การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน SF_6 และการวางแผนบำรุงรักษา GIS

THE STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SF_6 AND THE PREVENTIVE MAINTENANCE FOR GIS

โดย

นายก้องเกียรติ ยี่หวา

นายคฑาวุธ ตันเจริญ

นายชนกันต์ โฆษิตาภา

นายธเนศพล อภัยสุเทพพร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน SF_6 และการวางแผนบำรุงรักษา GIS
THE STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SF_6 AND THE PREVENTIVE MAINTENANCE FOR GIS

โดย

นายก้องเกียรติ ยี่หวา
นายคฑาวุธ ตันเจริญ
นายชนกันต์ โฆษิตาภา
นายธเนศพล อภัยสุเทพพร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SF_6 AND THE PREVENTIVE MAINTENANCE FOR GIS

KONGKIET YEEWA
KATAWUT TANCHAROEN
CHANAKUN KOSITAPA
THANATEPOL APHAISUTHEPPORN

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
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน SF_6 และการวางแผนบำรุงรักษา GIS

THE STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SF_6 AND THE PREVENTIVE MAINTENANCE FOR GIS

โดย

นายก้องเกียรติ ยี่หวา
นายคฑาวุธ ตันเจริญ
นายชนกันต์ โฆษิตาภา
นายธเนศพล อภัยสุเทพพร

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล
รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน SF_6 และการวางแผนบำรุงรักษา GIS

ผู้จัดทำ

1. นายก้องเกียรติ ยี่หวา
2. นายคฑาวุธ ตันเจริญ
3. นายชนกันต์ โฆษิตาภา
4. นายธเนศพล อภัยสุเทพพร

....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน SF_6 และการวางแผนบำรุงรักษา GIS

นายก้องเกียรติ	ยี่หว่า	56010053
นายคฑาวุธ	ตันเจริญ	56010114
นายชนกันต์	โฆษิตาภา	56010241
นายธเนศพล	อภัยสุเทพพร	56010582
รศ.ดร.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.นรเศรษฐ	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS) และสายส่งไฟฟ้าฉนวนก๊าซ (GIL) ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีสนามไฟฟ้า การเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซและหลักการซ่อมบำรุง GIS โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ (FEM) ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction พบว่าพฤติกรรมสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction มีค่าสูงอนันต์ที่จุดรอยต่ออิเล็กโตรดด้านแรงสูงและเข้าใกล้ศูนย์ที่จุดรอยต่ออิเล็กโตรดด้านกราวด์ หลังจากนั้นออกแบบชุดทดสอบในการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซโดยทำการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ก๊าซไนโตรเจนและอากาศ เมื่อกำหนดให้ความดันก๊าซมีค่า 0.5 – 2 บาร์และระยะแกปมีค่า 0.2 – 1 เซนติเมตร พบว่าที่ระยะแกปและความดันเดียวกัน ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์สามารถทนแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงที่สุด รองลงมาคือก๊าซไนโตรเจนและอากาศ โดยที่แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของฉนวนก๊าซขึ้นอยู่กับความดันของฉนวนก๊าซและระยะแกปของอิเล็กโตรด นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการซ่อมบำรุง GIS ระบบ 115 kV ที่โรงไฟฟ้า Glow จังหวัดระยอง ซึ่งเป็นการเรียนรู้ในการซ่อมบำรุง GIS ในภาคสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SF_6 AND THE PREVENTIVE MAINTENANCE FOR GIS

Mr.Kongkiet	Yeewa	56010053
Mr.Katawut	Tancharoen	56010114
Mr.Chanakun	Kositapa	56010241
Mr.Thanatepol	Aphaisuthepporn	56010582
Assoc.Prof.Dr.Siriwat	Potivejkul	Advisor
Assoc.Prof.Dr.techn.Norasage	Pattanadech	Advisor

year 2016

ABTRACT

This project is a study of the principles and theories related to the maintenance of gas-insulated substation (GIS) and gas-insulated transmission lines (GIL), which consists of an electric field theory, the breakdown of gas insulation and principle of maintenance GIS. Finite Element Method (FEM) is used to simulate the electric field at the Triple Junction found that the behavior of electric field at the Triple Junction is higher infinite at the junction of high voltage electrode and close to zero at the junction of ground electrode. Then designed the test cell to test the breakdown voltage of gas insulation by doing AC breakdown voltage withstand test of sulfur hexafluoride, nitrogen and air. When the gas pressure is 0.5 - 2 bar and the gap distance is 0.2 - 1 cm found that at the same pressure and gap distance, sulfur hexafluoride can withstand high voltage breakdown followed by nitrogen and air. The breakdown voltage of the gas insulation depends on the gas pressure and the gap distance of the electrodes. In addition, a study of the maintenance of the 115 kV GIS system at Glow power plant in Rayong, which learned about the maintenance of GIS in the field.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช และ รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือพร้อมแนะนำแนวทางการแก้ไขข้อบกพร่องในด้านต่าง ๆ ตั้งแต่การอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แนวทางการปฏิบัติงาน และคอยสอบถามความคืบหน้าและปัญหาต่างๆ โดยท่านคอยให้คำปรึกษา รวมถึงการลงมือปฏิบัติงานจริงด้วยตนเองในบางครั้งเพื่อช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น แนะนำบุคลากรที่มีความรู้เกี่ยวกับปริญญานิพนธ์ และตรวจสอบความถูกต้องของปริญญานิพนธ์ ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงและมีความสมบูรณ์ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ (FEM) เพื่อใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้า

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดหาก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ

ขอขอบคุณโรงไฟฟ้า Glow จังหวัดระยองที่ได้ให้โอกาสดูการซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ 115 kV คุณสุชาติ วิศวกรประจำสถานีไฟฟ้าย่อยของ Glow ที่ได้จัดหาที่พัก อำนวยความสะดวกและให้ความรู้เกี่ยวกับการซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซตลอดการศึกษาดูงาน 5 วัน และทีมงานซ่อมบำรุงจากบริษัท Alstom ที่ให้ข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับการซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Laboratory, HVL) สำหรับการช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ อาทิ สถานที่และอุปกรณ์การทดสอบ ทั้งนี้ขอขอบคุณรุ่นพี่ ป.เอก ป.โท ทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำจนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท Meidensha Corporation ที่ให้การสนับสนุน โดยการมอบทุนสำหรับวิจัยให้กับโครงงานปริญญานิพนธ์นี้ ที่ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นมา

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคณาจารย์ทุกท่านที่ถ่ายทอดวิชาความรู้เพื่อให้ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงสมาชิกท่านอื่น ๆ ในครอบครัว ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือทั้งในด้านกำลังใจและทุนทรัพย์ ให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดยอ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VIII
สารบัญตาราง	XIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน	3
1.5 แผนการดำเนินโครงงาน	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas Insulated Substation : GIS)	5
- ข้อดีของสถานีไฟฟ้าแบบ GIS	5
- ข้อเสียของสถานีไฟฟ้าแบบ GIS	5
2.2 อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ	5
2.2.1 ตัวถังโลหะ (Enclosure)	6
2.2.2 บัสบาร์ (Bus-Bar)	7
2.2.3 Insulation Spacer	7
2.2.4 อุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน (Pressure Relief Device)	8
2.2.5 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker)	9
2.2.6 ใบมีดตัดตอน (Disconnecting Switch)	10
2.2.7 ใบมีดกราวด์ (Ground Switch)	10
2.2.8 หม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformers)	11
2.2.9 หม้อแปลงวัดแรงดัน (Voltage Transformers)	12
2.2.10 External Connection	12
- SF_6/Air Bushing	12
- Cable Terminations	12
- Transformer Terminations	13
2.2.11 Lightning Arrester	13
2.2.12 Local Control Cubicle	13
2.2.13 Gas Systems	13
2.3 การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในระบบ GIS	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 วิธีการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนจากแสง (Light output)	15
2.3.2 วิธีการทางเคมีในการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน (Chemical By Product)	16
2.3.3 วิธีการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนจากเสียง (Acoustic Emission)	16
2.3.4 วิธีการวัดดิสชาร์จบางส่วนทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC60270 (ช่วงความถี่ระหว่าง 10 Hz ถึง 1 MHz)	17
2.3.5 วิธีการตรวจจับดิสชาร์จด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UHF	18
2.4 การเปรียบเทียบวิธีการตรวจวัดดิสชาร์จวิธีต่างๆ	19
2.5 คุณสมบัติทางเคมีของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)	20
2.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF_6	21
2.6 สนามไฟฟ้า	22
2.6.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	23
2.6.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	23
2.6.3 สนามไฟฟ้าในอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	26
2.7 พฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction	26
2.8 เบรกดาวน์ในก๊าซไฟฟ้าลบ (Breakdown in Electronegative Gas)	28
2.8.1 การเกิดไอออนลบ	28
2.8.2 สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนเป็นไอออนลบ	29
2.8.3 เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซไฟฟ้าลบ	30
2.9 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์ในก๊าซ SF_6	31
2.9.1 แรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	32
2.9.2 แรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของ SF_6	32
2.10 กลไกการสลายตัวของก๊าซ SF_6	35
2.11 ผลของผลิตภัณฑ์จากการสลาย SF_6	39
2.11.1 ความเป็นพิษ	39
2.11.2 ผลกระทบต่อ GIS	39
2.12 การกำจัดผลิตภัณฑ์จากการอาร์คของ SF_6	40
2.13 ความต้านทานพื้นผิวของเรซินที่เคลือบด้วยสารอินทรีย์ในก๊าซ SF_6	40
บทที่ 3 การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ	
3.1 การออกแบบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ (Test Cell)	46
3.1.1 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ	46
3.1.1.1 ออกแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม Solid Works	46
3.1.1.2 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมโซล	50
3.1.2 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศที่มีอนุภาค	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2.1 อนุภาคที่ใช้ในการทดสอบ	51
3.1.2.2 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ด้วยโปรแกรมคอมโซล	52
3.2 การเตรียมฉนวนก๊าซสำหรับการทดสอบ	53
3.2.1 ฉนวนก๊าซ 3 ชนิด	53
3.2.1.1 อากาศ	53
3.2.1.2 ก๊าซ N_2	53
3.2.1.3 ก๊าซ SF_6	53
3.2.2 ฉนวนก๊าซผสม	53
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ	54
3.3.1 วาริแอคสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า	54
3.3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ	54
3.3.3 ตัวต้านทานน้ำ	55
3.3.4 โวลเตจดิไวเดอร์	55
3.3.5 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ของฉนวนก๊าซ	56
3.3.6 มัลติมิเตอร์	56
3.4 ออกแบบไดอะแกรมการทดลองและวงจรการทดสอบ	57
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	
4.1 การจำลองสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction	58
4.2 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ	60
4.2.1 วงจรทดสอบ	60
4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ	60
4.2.3 ผลการทดสอบ	61
4.3 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสม	67
4.3.1 ผลการทดสอบ	67
4.4 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ เมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปน	70
4.4.1 ผลการทดสอบ	70
บทที่ 5 ศึกษาการซ่อมบำรุง GIS ระบบ 115 kV ที่โรงไฟฟ้า Glow	
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการซ่อมบำรุง	74
5.1.1 เครื่องทดสอบ motion และ timing	74
5.1.2 เครื่อง DILO	75
5.1.3 เครื่อง SF_6 - Q- Analyzer	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 รายละเอียดการทดสอบต่างๆ 77

5.2.1 Motion and Timing Test 77

- ขั้นตอนการทดสอบ Motion and Timing Test 78

5.2.2 Gas Quality Check 81

- Dew Point Temperature 81

- SF_6 Gas Percentage และ SF_6 Decomposition Product 81

- ขั้นตอนการทำ Gas Quality Check 82

5.2.3 Densimeter Test 83

- ขั้นตอนการทดสอบ Densimeter 83

5.2.4. การดูดเก็บก๊าซ SF_6 85

- ขั้นตอนการดูดเก็บก๊าซ SF_6 85

5.2.5. Overhaul Circuit Breaker 87

- ขั้นตอนการทำ Overhaul Circuit Breaker 87

5.2.6. การประกอบชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์กลับ Vacuum การเติมก๊าซ SF_6 101

- ขั้นตอนการประกอบชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์กลับ Vacuum การเติมก๊าซ SF_6 101

บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป 104

6.2 ข้อเสนอแนะ 105

เอกสารอ้างอิง 106

ภาคผนวก 107

ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการ 108

ภาคผนวก ข. การปฏิบัติงานPM 112

ภาคผนวก ค. การคำนวณก๊าซ SF_6 114

ประวัติผู้เขียน 115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวถังโลหะ	6
2.2 บัสบาร์	7
2.3 Insulation Spacer	7
2.4 ลักษณะอุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน	8
2.5 การระบายแรงดันเกินในระบบ GIS	8
2.6 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบแนวนอนใน GIS AREVA B65 115kV	9
2.7 ใบมีดตัดตอนใน GIS AREVA B65 115kV	10
2.8 ใบมีดกราวด์ใน GIS AREVA B65 115kV	11
2.9 หม้อแปลงกระแสในระบบ GIS AREVA B65 115kV	11
2.10 หม้อแปลงวัดแรงดันใน GIS AREVA B65 115kV	12
2.11 ภาพรวมของระบบ GIS แสดงเป็นภาพตัดขวาง	14
2.12 ภาพรวมของระบบ GIS แสดงเป็นไดอะแกรมตัดขวาง	15
2.13 เซ็นเซอร์เสียง (Acoustic Emission Sensor) และการติดตั้งเซ็นเซอร์กับหม้อแปลงไฟฟ้า	17
2.14 วงจรวัดการดิสชาร์จบางส่วน โดยอ้างอิงจาก IEC 60270	17
2.15 เซ็นเซอร์ตรวจจับคลื่นวิทยุ (UHF Sensor)	18
2.16 เปรียบเทียบเทคนิคการวัดดิสชาร์จบางส่วน	19
2.17 โครงสร้างของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)	20
2.18 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน	22
2.19 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า	24
2.20 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ	25
2.21 ไดอะแกรมแสดงลักษณะของจุด Triple Junction	27
2.22 สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันและ สัมประสิทธิ์เกาะตัวของอิเล็กตรอนของอากาศ และ SF_6 ตามลำดับ	31
2.23 ปริมาณของ SOF_4 ที่เกิดขึ้น ที่เวลามากกว่าหนึ่งชั่วโมงหลังจากการสปาร์ก กับพลังงานการดิสชาร์จรวม	38
2.24 แผนผังการเกิดผลิตภัณฑ์หลังจากการสปาร์ก	39
2.25 แผ่นอีพ็อกซีที่เต็มไปด้วยซิลิกาเปลือยหลังจากการวัดต้านทานพื้นผิวในก๊าซผสม SF_4/SF_6	41
2.26 ภาพตัดขวางของแผ่นอีพ็อกซี ซึ่งเกิดช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างอีพ็อกซี และฟิล์ม PTFE	41
2.27 ความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวของแผ่นอีพ็อกซีที่ถูกเคลือบในก๊าซผสม SF_4/SF_6	42
2.28 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ลดลงเทียบกับเวลาหลังจากการดับกระแสของ GCB	44
3.1 แบบจำลองที่บรรจุฉนวนก๊าซและใส่อิเล็กโตรดของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2, และอากาศ	46
3.2 ที่บรรจุฉนวนก๊าซและใส่อิเล็กโตรดของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2, และอากาศที่ได้ออกแบบสร้างจริง	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.3 แบบจำลองอิเล็กโตรดทรงกลมและระนาบของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2, และอากาศ 47
3.4 อิเล็กโตรดทรงกลมและระนาบของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2, และอากาศที่ออกแบบสร้างจริง 47
3.5 แบบจำลองแกนตัวนำสำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและทำการเชื่อมต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวด์ 48
3.6 แกนตัวนำสำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและทำการเชื่อมต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและ กราวนด์ ที่ออกแบบสร้างจริง 48
3.7 แบบจำลองชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศ 49
3.8 ชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศ ที่ออกแบบสร้างจริง 49
3.9 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ 50
3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดของชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ 51
3.11 อนุภาคประเภทตัวนำ ขนาด 0.5, 1.0, และ 1.5 cm ตามลำดับ 51
3.12 อนุภาคประเภทฉนวน ขนาด 0.5, 1.0, และ 1.5 cm ตามลำดับ 52
3.13 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศที่มีอนุภาคประเภทตัวนำ 52
3.14 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศที่มีอนุภาคประเภทฉนวน 53
3.15 ชนิดของฉนวนก๊าซสำหรับการทดสอบ 1.อากาศ 2.ก๊าซ N_2 3.ก๊าซ SF_6 53
3.16 วาริแอคสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า 54
3.17 หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 235/100 kV, 5 kVA 54
3.18 ตัวต้านทานน้ำ 55
3.19 โวลเตจดิไวเดอร์ พิกัด 100 kV 55
3.20 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ 56
3.21 มัลติมิเตอร์ FLUKE 56
3.22 ไดอะแกรมการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ 57
3.23 วงจรการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ 57
4.1 Insulation Spacer แบบปิด (Gas Tight Spacer) 58
4.2 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ triple junction 59
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและระยะแกป 59
4.4 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับความดันที่ระดับต่างๆ	62
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับความดันคูณกับระยะแกป	62
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซไนโตรเจนกับความดันที่ระดับต่างๆ	64
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซไนโตรเจนกับความดันคูณกับระยะแกป	64
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของ SF_6 กับความดันที่ระดับต่างๆ	66
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซ SF_6 กับความดันคูณกับระยะแกป	66
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซผสมในอัตราส่วน $SF_6 : N_2$ (80:20) กับระยะแกป	68
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซผสมในอัตราส่วน $SF_6 : N_2$ (60:40) กับระยะแกป	69
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทดสอบกับระยะแกปของก๊าซ SF_6, $SF_6 : N_2$ (80 : 20), $SF_6 : N_2$ (60 : 40) และ N_2 ที่ความดัน 1 bar	69
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับอนุภาคที่เจือปน	71
5.1 ชุดเครื่องทดสอบ motion และ timing	74
5.2 เครื่องทดสอบ motion และ timing	75
5.3 เครื่อง DILO ที่ใช้ในการเติม ดูดก๊าซและ vacuum	75
5.4 เครื่อง SF_6 – Q - Analyzer	76
5.5 One – line diagram หน้าตู้ Local control cubicle	76
5.6 One – line diagram ของ GIS ที่จัดวางแบบ double busbar	77
5.7 Supervisor ตรวจสอบสายวงจรเครื่องทดสอบที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์	78
5.8 Supervisor ทำการตั้งค่าเครื่องทดสอบ	79
5.9 ชุดคำสั่งที่ป้อนเข้าเครื่องทดสอบ	79
5.10 Supervisor ทำการทดสอบ motion และ timing	80
5.11 Supervisor ทำการจดบันทึกข้อมูลผลการทดสอบ	80
5.12 การต่อเครื่อง SF_6-Q-Analyzer เข้ากับ GIS	82
5.13 หน้าจอแสดงผลขณะทดสอบของเครื่อง SF_6-Q-Analyzer	83
5.14 เตรียมเครื่อง DILO เพื่อทำการ Drain Gas (ก)	84
5.14 เตรียมเครื่อง DILO เพื่อทำการ Drain Gas (ข)	84
5.15 ต่อเครื่อง DILO เข้ากับ GIS แต่ละคอมพาร์ทเมนต์แล้วทำการ Drain gas ออก	85
5.16 ช่างทำการเตรียมถังเปล่าเพื่อเก็บก๊าซ SF_6 (ก)	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.16 ช่างทำการเตรียมถังเปล่าเพื่อเก็บก๊าซ SF_6 (ข) 86
5.17 การต่อสายของเครื่อง DILO เข้ากับ GIS แต่ละคอมพาร์ทเมนต์ 87
5.18 ใช้เครื่อง DILO ดูดก๊าซออกจาก GIS 87
5.19 ทีมซ่อมบำรุงรักษาทำการถอดชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ก) 88
5.19 ทีมซ่อมบำรุงรักษาทำการถอดชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ข) 88
5.20 ทีมซ่อมบำรุงรักษาทำการเตรียมซ่อมบำรุงชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 89
5.21 ชุดอุปกรณ์และอะไหล่ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 89
5.22 ทีมซ่อมบำรุงวางแผนเตรียมเปลี่ยนอะไหล่ของชุดกลไกการทำงาน ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ก) 90
5.22 ทีมซ่อมบำรุงวางแผนเตรียมเปลี่ยนอะไหล่ของชุดกลไกการทำงาน ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ข) 90
5.23 Supervisor ทำการวางแผนเปลี่ยนอะไหล่ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 91
5.24 Supervisor ทำการเปลี่ยนอะไหล่ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 91
5.25 Supervisor ทำความสะอาดส่วน moving ของชุดกลไกการทำงาน ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ก) 92
5.25 Supervisor ทำความสะอาดส่วน moving ของชุดกลไกการทำงาน ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ข) 92
5.26 Supervisor ทำความสะอาดส่วน moving ของชุดกลไกการทำงาน ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ก) 93
5.26 Supervisor ทำความสะอาดส่วน moving ของชุดกลไกการทำงาน ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ข) 93
5.27 ทีมซ่อมบำรุงประกอบอุปกรณ์ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 94
5.28 ทีมซ่อมบำรุงประกอบอุปกรณ์ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 94
5.29 ทีมซ่อมทำการถอด Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 95
5.30 ทีมซ่อมทำการถอด Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ก) 95
5.30 ทีมซ่อมทำการถอด Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ข) 96
5.31 Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 96
5.32 ทีมซ่อมบำรุงทำความสะอาดคอมพาร์ทเมนต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 97
5.33 ทีมซ่อมบำรุงเตรียมทดสอบ Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 97
5.34 ทีมซ่อมบำรุงต่อวงจรทดสอบ Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ก) 98
5.34 ทีมซ่อมบำรุงต่อวงจรทดสอบ Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ข) 98
5.35 ทีมซ่อมบำรุงต่อวงจรทดสอบ Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 99
5.36 เครื่องจ่ายกระแสเพื่อทดสอบ Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 99
5.37 ทีมซ่อมบำรุงทำความสะอาด Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 100
5.38 ทีมซ่อมบำรุงทำความสะอาด Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 100
5.39 ทีมซ่อมบำรุงทำการเติมก๊าซ SF_6 ใส่ในแต่ละคอมพาร์ทเมนต์ของ GIS 101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.40 ทีมซ่อมบำรุงทำการทดสอบคุณภาพก๊าซ SF_6 หลังเติมก๊าซใส่ในแต่ละคอมพาร์ทเมนต์ของ GIS 102

5.41 ทีมซ่อมบำรุงทำการทดสอบคุณภาพก๊าซ SF_6 102

5.42 Supervisor ทำการทดสอบ motion และ timing หลังจากซ่อมบำรุงชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนดำเนินงาน 3

2.1 คุณสมบัติของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ 21

2.2 ค่า b = f (pr) 34

2.3 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่พบจากการสุ่มตัวอย่างก๊าซ SF_6 ที่พลังงานการดิสชาร์จรวม = 36kJ, ความดันของ SF_6 = 0.133 MPa, เวลาหลังจากดิสชาร์จ = 24 ชั่วโมง 36

2.4 แสดงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งกรัมของอลูมิเนียม และถ่านที่ความดันและอุณหภูมิปกติ 40

4.1 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซอากาศที่ความดันและระยะแกปต่างๆ 61

4.2 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซไนโตรเจนที่ความดันและระยะแกปต่างๆ 63

4.3 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ SF_6 ที่ความดันและระยะแกปต่างๆ 65

4.4 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสมในอัตราส่วน SF_6 : N_2 (80:20) ที่ความดันและระยะแกปต่างๆ 67

4.5 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสมอัตราส่วน SF_6 : N_2 (60:40) ที่ความดันและระยะแกปต่างๆ 68

4.6 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปน 70

5.1 การซ่อมบำรุง M4 ของ GIS 73

5.2 ค่าการวัดทางไฟฟ้า 78

5.3 ค่ามาตรฐาน SF_6 81

5.4 แสดงค่าที่ทาง Supervisor แนะนำ 82

5.5 มาตรฐานของ Contact Resistance 101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากประเทศไทยมีการพัฒนาขยายการลงทุน ทำให้มีผู้ใช้ไฟรายใหญ่เกิดขึ้นจำนวนมาก ทั้งในส่วนภาคธุรกิจอุตสาหกรรม ธุรกิจห้างสรรพสินค้า โรงแรม การคมนาคมขนส่ง และการศึกษา ทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น จึงต้องจัดหาแหล่งผลิตไฟฟ้าตลอดจนขยายระบบส่งเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานให้ถึงผู้ใช้ไฟ โดยมีปริมาณที่เพียงพอและมีคุณภาพตามมาตรฐานสากลแต่ปัญหาที่ประสบอยู่ประการหนึ่ง คือ การเพิ่ม หรือขยายสถานีไฟฟ้าแรงสูงในเขตตัวเมืองโดยเฉพาะอย่างยิ่งใน กทม. ที่ดินมีราคาสูง จึงได้พิจารณาการแก้ปัญหาโดยนำสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (Gas Insulated Substation : GIS) มาใช้ทั้งในด้านการขยายสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่มีอยู่ และในด้านการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแรงสูงแห่งใหม่สำหรับลูกค้ารายใหญ่ที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าปริมาณมากๆ และต้องการระบบที่มีความมั่นคง และมีคุณภาพ ต้องมีการปรับเปลี่ยนระบบการรับไฟฟ้า (Upgrade Voltage System) โดยแทนที่จะรับจากระบบจำหน่ายที่แรงดันระดับปานกลาง (Medium Voltage) เปลี่ยนมาเป็นการรับจากระบบแรงดันสูง (High Voltage System) โดยมีสถานีไฟฟ้าเป็นของตนเอง ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ผู้เกี่ยวข้องโดยเฉพาะบุคคลากรด้านการบำรุงรักษา จะต้องมีความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงของตน เพื่อความปลอดภัยต่อบุคคล และสามารถบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงให้มีความสมบูรณ์พร้อมใช้งานได้ตลอดเวลา

นับวัน GIS จะเข้ามามีบทบาทในระบบมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่นอกจากนี้ความต้องการของลูกค้าในด้านของความมั่นคงของระบบไฟฟ้ายังเป็นสิ่งเสริมการนำ GIS เข้ามาใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เนื่องจาก GIS จะช่วยขจัดปัญหาการขัดข้องของระบบอันเนื่องมาจากสัตว์ตลอดจนผลของมลภาวะจากธรรมชาติและโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงขึ้น อย่างไรก็ตาม GIS ไม่ใช่เรื่องที่ยุ่งยากซับซ้อน เพียงแต่ต้องพิจารณาทุกขั้นตอนเริ่มตั้งแต่การออกแบบทางวิศวกรรม การเลือกใช้อุปกรณ์ที่เป็นที่ยอมรับมีประวัติการใช้งานดีการควบคุมงานก่อสร้างให้เป็นไปตามหลักวิศวกรรมทุกขั้นตอน มีการทดสอบ และ การตรวจรับอย่างครบถ้วนตามมาตรฐานสากล รวมถึงการวางแผนงานบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม ถ้าทุกขั้นตอนที่กล่าวในข้างต้นดำเนินการโดยผู้ที่มีความรู้เชี่ยวชาญ สถานีไฟฟ้าแรงสูง และ GIS จะมีอายุการใช้งานได้มากกว่า 30 ปี

การศึกษาคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการเรียนรู้และทำความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานการเสียสภาพความเป็นฉนวนไฟฟ้าของฉนวนก๊าซ ฉนวนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ อากาศและก๊าซ SF_6 (Sulfur hexafluoride) อากาศนั้นถูกนำมาใช้เป็นฉนวนสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า(Transmission and Distribution Line) และสถานีไฟฟ้าย่อยภายนอกตัวอาคาร(Air Insulated Substation, AIS) อากาศมีข้อดีในแง่ ราคาถูก และมีความเป็นฉนวนที่ดีเมื่อแห้งและสะอาด แต่หากมีความชื้นหรือความสกปรกเกิดขึ้นมา ก็จะทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของอากาศลดลงอย่างมาก สำหรับ ก๊าซ SF_6 นั้น นิยมนำมาใช้สำหรับระบบ GIS และระบบ GIL (Gas Insulated Transmission Line) ระบบ GIS นั้นนิยมใช้อย่างมากในประเทศไทยเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยภายนอกตัวอาคารนั้นมีราคาแพงมากขึ้นมากปัจจุบันราคาค่าก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยนอกตัวอาคารต่อ 1 สถานีมีราคาประมาณ 200 ล้านบาท อย่างไรก็ตามเมื่อปี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.ศ.1995 จากผลการประชุมเกี่ยวกับสภาวะบรรยากาศและสภาพแวดล้อม ที่เกียวโต ประเทศญี่ปุ่น พบว่า ก๊าซ SF_6 เป็นต้นเหตุหนึ่งที่สำคัญมากๆ สำหรับ ก๊าซเรือนกระจกดังนั้นจึงมีข้อกำหนดให้ควบคุมการใช้ก๊าซ SF_6 ในระบบไฟฟ้าแรงสูง นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรจึงเริ่มต้นทำวิจัยเพื่อศึกษาหาฉนวนแก๊สชนิดใหม่ขึ้นมา เพื่อทดแทนก๊าซ SF_6 แต่ก็ยังไม่มีคำตอบที่น่าพึงพอใจ มีการนำเสนอให้ใช้ ก๊าซผสมระหว่าง ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซ SF_6 โดยที่คุณสมบัติการเป็นฉนวนจะลดลง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. ศึกษาทฤษฏีการเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 ในระบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
2. ทำการทดสอบคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ
3. ศึกษาหลักการและขั้นตอนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติของฉนวนแก๊ส SF_6 และปัจจัยต่างๆที่มีต่อการใช้งานฉนวนก๊าซ SF_6
2. ศึกษาส่วนประกอบและทำความเข้าใจการทำงานในระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS)
3. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าของชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซโดยการใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์
4. ทดสอบคุณสมบัติการเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ
5. ศึกษาการซ่อมบำรุง GIS ในภาคสนาม

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

1 .ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับฉนวนก๊าซ SF_6 และสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ

2. ศึกษาวิเคราะห์รูปแบบสนามไฟฟ้าชุดทดสอบการจำลองการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ SF_6
3. รวบรวมผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล
4. จัดเตรียมอุปกรณ์ และศึกษาเครื่องมือต่างๆ
5. ทดลองการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง
6. สรุปผลและวิเคราะห์งานวิจัยและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล และทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎี ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการใช้โปรแกรมจำลองสนามไฟฟ้าและการจัดสร้างชุดทดสอบ โดยมีระยะเวลาในการดำเนินงานตั้งแต่เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2559 ถึง เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560 โดยมีแผนการดำเนินโครงงานดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1 .ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	- - - / ───	- - - / ───	───							
2. ศึกษาวิเคราะห์รูปแบบสนามไฟฟ้าชุดทดสอบการจำลองการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ SF_6		- - - / ───	- - - / ───	- - - / ───	───					
3. รวบรวมผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล			- - - / ───	- - - / ───	- - - / ───	- - - / ───	───			
4. จัดเตรียมอุปกรณ์และศึกษาเครื่องมือต่างๆ						- - - / ───	- - - / ───	───		
5. ทดลองการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง						- - - / ───	- - - / ───	───		
6. สรุปผลและวิเคราะห์งานวิจัยและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์								- - - / ───	- - - / ───	- - - / ───

←- - -→ วางแผน ←───→ ปฏิบัติจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน

1. นำความรู้เกี่ยวกับการเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซในสภาวะต่างๆ มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงสูง

2. รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซและหลักการซ่อมบำรุงรักษา เพื่อนำมาเป็นองค์ความรู้ในการศึกษาการใช้ฉนวนก๊าซ SF_6 ในระบบไฟฟ้าแรงสูง

3. นำความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของฉนวนก๊าซ เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบและป้องกันปัญหาที่พบในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS)

4. ประยุกต์ทฤษฎีที่ศึกษาไปใช้ในการบำรุงรักษาระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเกี่ยวข้องกับทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ ส่วนประกอบที่สำคัญ หลักการทำงานและหน้าที่ในส่วนต่างๆที่ประกอบกันเป็นสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ รวมไปถึงคุณสมบัติของก๊าซ SF_6 ที่ใช้เป็นฉนวนหลักในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ

2.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas Insulated Substation : GIS) [1]

เป็นสถานีไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ต่างๆ ติดตั้งอยู่ภายในท่อโลหะ โดยการอัดก๊าซ SF_6 เพื่อเป็นก๊าซฉนวนไว้ภายใน จึงสามารถลดระยะปลอดภัยทางไฟฟ้าลงได้ ทำให้สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบ GIS มีขนาดเล็กลงมาก สามารถออกแบบให้ติดตั้งแบบกลางแจ้ง, ภายในอาคาร, ใต้พื้นดินหรือภายในอุโมงค์ก็ได้ โดยทั่วไปจะพิจารณาตามวัตถุประสงค์หลักของการติดตั้งใช้งาน เช่น ต้องการความเชื่อมั่นสูง, มีพื้นที่ว่างจำกัด, ไม่ต้องการมีภาระการบำรุงรักษามาก เป็นต้น ดังนั้นปัจจุบันจึงมีความนิยมติดตั้งสถานีไฟฟ้าแบบ GIS กันมากขึ้น

<u>ข้อดีของสถานีไฟฟ้าแบบ GIS</u>

- ใช้พื้นที่การก่อสร้างน้อยกว่า
- ติดตั้งได้รวดเร็วกว่า
- มีความปลอดภัยการใช้งานสูงกว่า
- ไม่มีผลกระทบจากมลภาวะภายนอก
- การบำรุงรักษาน้อยกว่า

<u>ข้อเสียของสถานีไฟฟ้าแบบ GIS</u>

- มีราคาอุปกรณ์แพงกว่ามาก
- การขยายหรือเพิ่มเติมต้องวางแผนล่วงหน้า และต้องใช้ผลิตภัณฑ์เดิม ซึ่งผู้ผลิตมักเสนอราคาสูงกว่าความเป็นจริง
- เมื่อมีความเสียหายระหว่างการใช้งาน เช่น หากเกิดฟอลท์ ภายในจะหาตำแหน่งฟอลท์ได้ยากกว่า และการซ่อมแซมมีความยุ่งยาก ทำให้เสียเวลาจ่ายไฟฟ้า (Outage Time) สูงกว่า
- หลังซ่อมหรือขยายเพิ่มเติม อาจต้องดับไฟฟ้าทั้งหมดเพื่อทดสอบฉนวนตัวกลาง (Dielectric)
- ใช้ปริมาณก๊าซ SF_6 ซึ่งมีราคาแพง และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

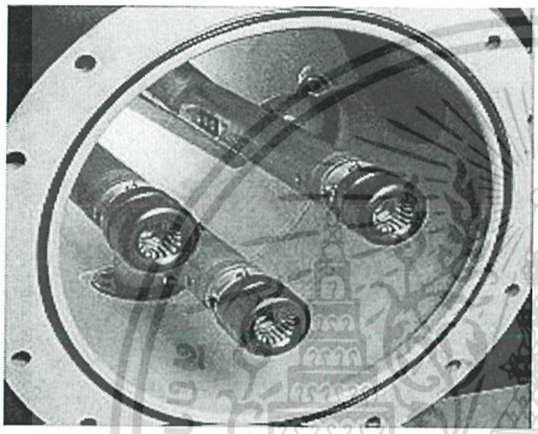
2.2 อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ [1]

ในแต่ละเบย์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งมีพิกัดการใช้งานเหมือนกับอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนอากาศทุกประการ เพียงแต่ออกแบบเป็นลักษณะโมดูล แต่ละโมดูลจะมีหน้าแปลน (Flange) เพื่อจะได้นำมาประกอบต่อกันได้ตามลักษณะการจัดบัสตามซิงเกิลไลน์ที่ต้องการ ส่วนต่างๆ ในแต่ละเบย์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซสามารถแยกได้ดังนี้

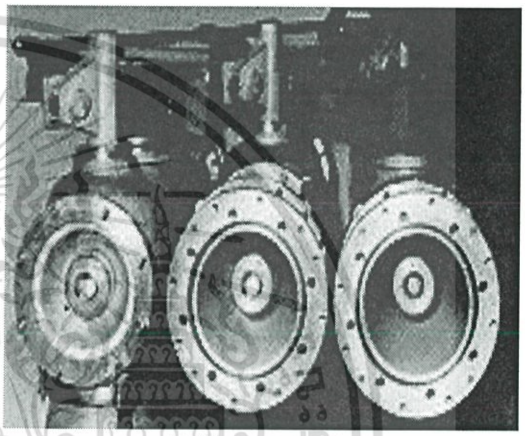
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ตัวถังโลหะ (Enclosure)

ทำจากอลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloy) หรือเหล็ก (Steel) ทำหน้าที่เป็นท่อหุ้มส่วนที่มีไฟ นอกจากนั้นยังเป็นทางผ่านของกระแสเหนี่ยวนำ (Induced Current) ซึ่งอาจสูงถึง 80-100% ของกระแสที่ไหลในบัสบาร์ ดังนั้นท่อโลหะทุกส่วนต้องต่อถึงกันทั้งหมดและต่อลงดิน ปัจจุบันมาตรฐานสากลได้มีข้อกำหนดให้อัตราการรั่วของก๊าซไม่ควรเกิน 0.5% ต่อปี ตัวถังโลหะของ GIS แบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบที่บรรจุบัสบาร์หรืออุปกรณ์ทั้ง 3 เฟส อยู่ภายในตัวถังเดียวกันเรียกว่า ตัวถังชนิด 3 เฟส (Three Phase Enclosure) ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ แต่ละท่อหรือตัวถังจะบรรจุอุปกรณ์เพียงเฟสเดียวเท่านั้นเรียกว่า ตัวถังชนิดเฟสเดียว (Single Phase Enclosure)



ก) ตัวถังแบบ 3 เฟส



ข) ตัวถังแบบเฟสเดียว

รูปที่ 2.1 ตัวถังโลหะ [1]

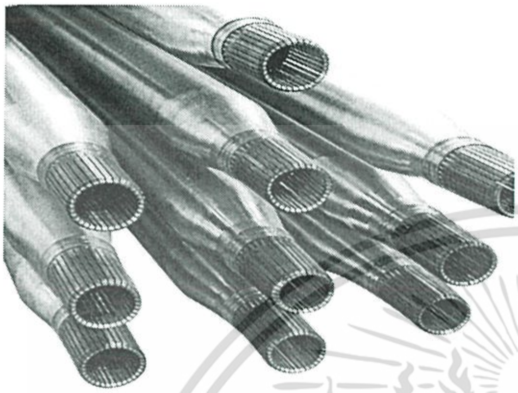
ข้อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างตัวถัง 1 เฟส และตัวถัง 3 เฟส สรุปได้ดังนี้

- GIS ที่ขนาดไม่เกิน 145kV ตัวถังแบบ 3 เฟส มีราคาถูกกว่าแบบ 1 เฟส
- ราคาการติดตั้งขึ้นอยู่กับการออกแบบของผู้ผลิตแต่ละยี่ห้อ ซึ่งโดยทั่วไปไม่แตกต่างกันมาก
- แบบ 3 เฟส มีขนาดเล็กกว่าจึงช่วยลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับที่ดินและอาคาร
- เมื่อเกิดฟอลท์แบบ 1 เฟสลงดิน (1 Line To Ground Fault) ตัวถังแบบ 3 เฟสจะทำให้ฟอลท์กลายเป็นแบบ 3 เฟส (Three Phase Fault) ซึ่งทำให้ระบบเสียเสถียรภาพมากกว่าและความเสียหายของอุปกรณ์ก็มีมากกว่า แต่เนื่องจากปริมาตรตัวถังใหญ่กว่าทำให้การระบายแรงดันทำงานยากกว่า (Pressure ไม่สูงเกิน)
- ถ้าต้องการให้เซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละขั้วทำงานได้อย่างอิสระ (Single-Pole Operated) การเลือกใช้ตัวถังแบบ 1 เฟส จะเหมาะสมกว่า
- ผู้ผลิตสามารถออกแบบชนิดผสมให้ได้เรียกว่า แบบไฮบริด คือ ตัวถังของบัสบาร์เป็นแบบ 3 เฟส ส่วนอุปกรณ์อื่นเป็นแบบ 1 เฟส

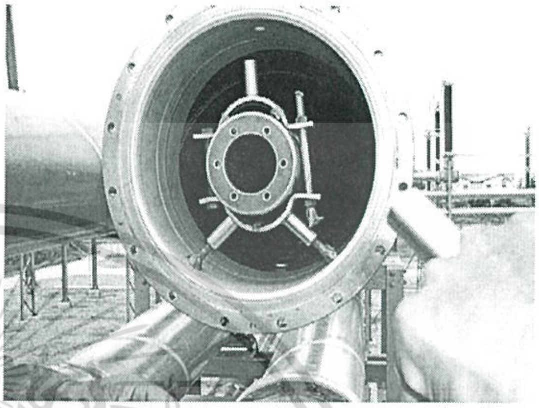
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 บัสบาร์ (Bus-Bar)

โดยทั่วไปทำจากอลูมิเนียม หรือทองแดง ออกแบบให้มีขนาดตามพิกัดกระแสต่อเนื่อง (Rated Continuous Current) ระยะความห่างของจุดจับยึด (Support) ขึ้นอยู่กับแรงกระทำทางกลขณะเกิดลัดวงจร ที่ปลายบัสบาร์ทั้ง 2 ข้าง จะเคลือบด้วยเงิน หรือโครเมี่ยม คอปเปอร์ การต่อกับอุปกรณ์มีทั้งแบบยึดกันด้วยสลักเกลียว (Bolt) และแบบเสียบ (Plug-In)



ก) บัสบาร์แบบเสียบ (Plug-In)

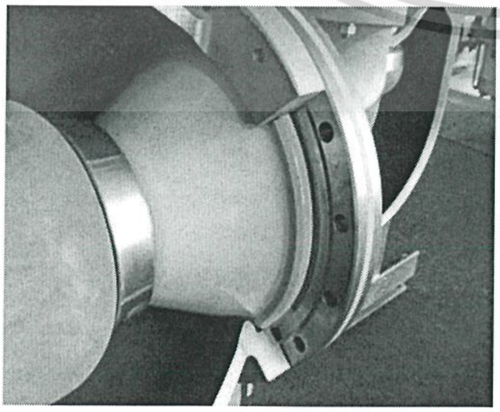


ข) บัสบาร์แบบยึดด้วยสลักเกลียว (Bolt)

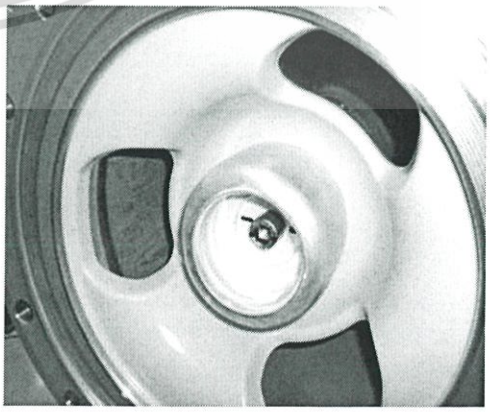
รูปที่ 2.2 บัสบาร์ [1]

2.2.3 Insulation Spacer

บางครั้งเรียกว่า Insulating Cone ทำจาก Epoxy Resin ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนสูง ปราศจากโพรงอากาศภายในเนื้อ มีความต้านทานต่อสารเคมีต่างๆ ทนความร้อนสูง ขึ้นรูปง่ายได้ตามความต้องการ ใช้สำหรับรองรับ บัสบาร์ หรืออุปกรณ์ต่างๆ ใน GIS เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์, ใบมีดตัดตอน เป็นต้น Insulation Spacer มีการออกแบบใช้งาน 2 ประเภทคือแบบปิด (Gas Tight Spacer) และแบบเปิด (Gas Pass Insulator) นอกจากจะใช้ Insulation Spacer แบบปิดรองรับตัวนำ (Conductor) แล้วยังทำหน้าที่แบ่งส่วน (Partition) ของก๊าซ คอมพาร์ทเมนต์เพื่อแยกเป็นส่วนๆ เวลาที่เกิดปัญหาไม่ให้กระทบกับส่วนอื่นๆ



ก) Insulation Spacer แบบปิด



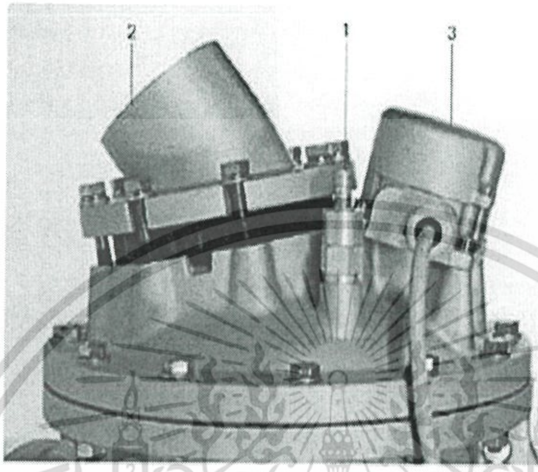
ข) Insulation Spacer แบบเปิด

รูปที่ 2.3 Insulation Spacer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

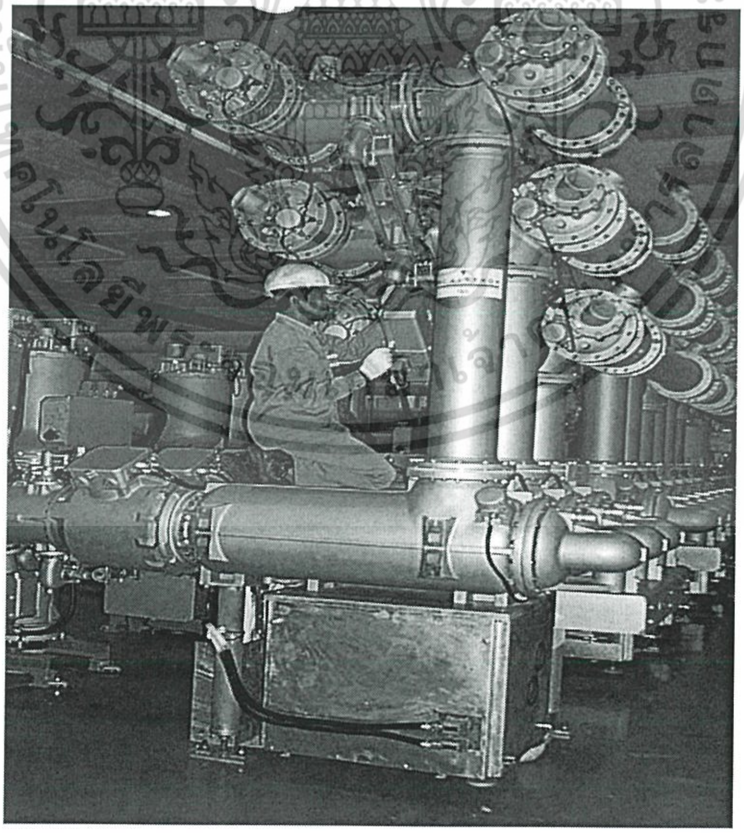
2.2.4 อุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน (Pressure Relief Device)

ทำหน้าที่ระบายแรงดันภายในไม่ให้สูงเกินค่าที่ตัวถังโลหะทนได้ กรณีระบบป้องกันตัดฟอลท์ทำงานช้ากว่าปกติ มักกำหนดให้ติดตั้งทุกคอมพาร์ทเมนต์ อุปกรณ์ระบายแรงดันเกินนี้เป็นแบบทำงานได้ครั้งเดียว ทำจากกราไฟท์ (Graphite) หรือโลหะ อุปกรณ์ระบายแรงดันจะต้องติดตั้งให้ขณะที่ทำงานจะระบายก๊าซออกไปในทิศทางที่เหมาะสม เพื่อป้องกันอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ในบริเวณนั้น



1. วาว์ลเติมก๊าซ
2. ชุดระบายแรงดันเกิน
3. สวิตช์ตรวจจับแรงดันก๊าซ

รูปที่ 2.4 ลักษณะอุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน [1]

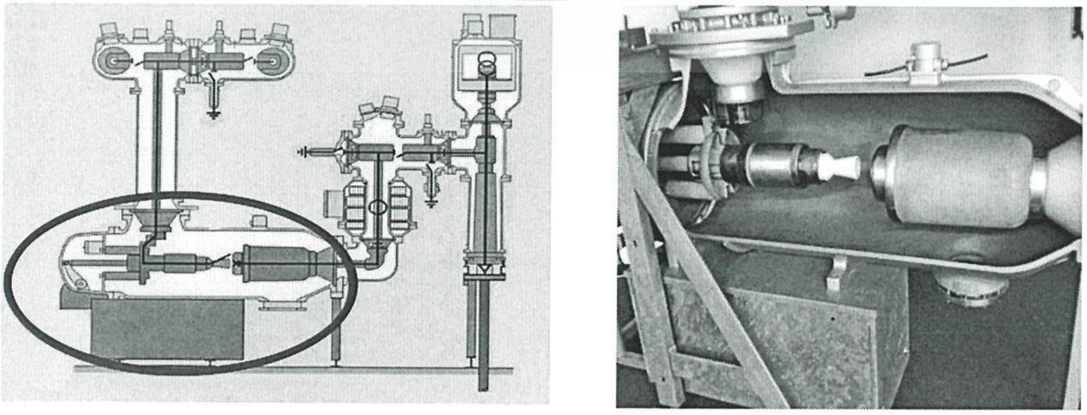


รูปที่ 2.5 การระบายแรงดันเกินในระบบ GIS [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker)

ออกแบบเป็นชนิดตัวถังไม่มีไฟ (Dead Tank) โดยใช้ก๊าซ SF_6 ทำหน้าที่เป็นทั้งฉนวนตัวกลางและตัวดับอาร์ค (Arc) โดยปกติแล้วคอมพาร์ทเมนต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จะใช้แรงดันก๊าซสูงกว่าในคอมพาร์ทเมนต์อื่นๆ อุปกรณ์เปิดปิดวงจรไฟฟ้ามีหลักการทำงานแบบบัฟเฟอร์ คือ ขณะ Moving Contact เคลื่อนที่ลง จะเป็นการใช้ลูกสูบอัดก๊าซในเวลาเดียวกันด้วย ถ้าพิกัดแรงดัน สูงกว่า 230 kV ภายในInterrupter จะต่อหน้าสัมผัสอนุกรมและมีการจัดลำดับคาปาซิเตอร์ ต่อขนานกับหน้าสัมผัสเพื่อให้แรงดันตกคร่อมแต่ละหน้าสัมผัสเท่ากันช่วงเวลาที่เซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังตัดกระแส ลักษณะการจัดวางเซอร์กิตเบรกเกอร์ มี 2 แบบ คือ การจัดวางในแนวตั้ง (Vertical) และวางในแนวนอน (Horizontal) ซึ่งมีข้อสังเกตคือ เซอร์กิตเบรกเกอร์วางในแนวนอนสามารถมั่นใจได้ว่า ฝุ่นผง ที่เกิดจากการอาร์คจะตกลงส่งพื้นด้านล่างซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดทางไฟฟ้า (Electrical Stress) ต่ำกว่า เมื่อพิจารณาลักษณะการจัดวางจะเห็นได้ว่า เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบแนวตั้งจะลดพื้นที่ในการติดตั้งได้มากกว่า แต่ระยะความสูงจะเพิ่มขึ้น เมื่อบำรุงรักษาจะต้องยก อุปกรณ์เปิดปิดวงจรไฟฟ้าขึ้นทั้งชุด ดังนั้นต้องออกแบบอาคารให้มีความสูงเผื่อไว้ด้วย การบำรุงรักษากรณีการจัดวางในแนวนอนต้องดึงหน้าสัมผัสทั้งชุดออกตามแนวนอนดังนั้นจะต้องเผื่อพื้นที่ด้านข้างในอาคารสำหรับการบำรุงรักษาเช่นกัน ในส่วนของชุดกลไกการทำงานมีทั้งแบบ สปริง, ลม (Pneumatic) และ ไฮดรอลิค ปัจจุบันกลไกการทำงานแบบลมไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากประกอบด้วยซีล (Seal) จำนวนมากและการเสื่อมสภาพมักขึ้นกับคุณภาพลม และความดันของลมที่ใช้ ทำให้วาระการบำรุงรักษาสั้น อีกทั้งต้องใช้เครื่องอัดอากาศชนิดพิเศษสำหรับอัดแรงดันให้สูงถึง 30 บาร์ ซึ่งมีราคาและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง ส่วนกลไกแบบสปริงแม้ว่าลักษณะการทำงานจะไม่สัมพันธ์กับเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบบัฟเฟอร์ แต่สามารถออกแบบระบบการเชื่อมต่อที่เหมาะสมได้ แต่ยังมีข้อจำกัดคือเมื่อต้องการใช้พลังงานสูงๆ จะเกิดความเค้นทางกล (Mechanical Stress) ของเนื้อสปริงสูง ซึ่งยังคงเป็นข้อจำกัดในการผลิตกลไกแบบนี้ ปัจจุบันจึงนิยมใช้กลไกแบบไฮดรอลิคมากกว่า เพราะมีขนาดเล็กใช้ซีลน้อยกว่าแบบลม และไม่มีผลกระทบจากคุณภาพอากาศ สามารถติดตั้งที่ใต้ตัวถังของเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละโพล และขับอุปกรณ์เปิดปิดวงจรไฟฟ้าได้โดยตรง โดยทั่วไปผู้ผลิตจะออกแบบให้ติดตั้ง Actuator แยกแต่ละโพล โดยผู้ใช้สามารถเลือกให้ทำงานแบบพร้อมกันสามโพล (Three Pole Operated) หรือทำงานแยกกันแต่ละโพล (Single Pole Operated) ได้ตามความต้องการโดยต่อสายควบคุมทางไฟฟ้าที่เตรียมไว้ให้

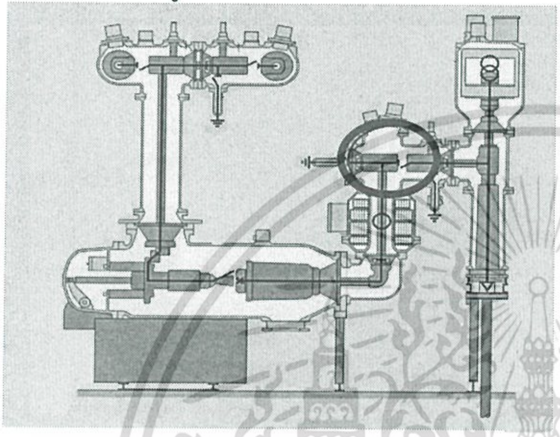


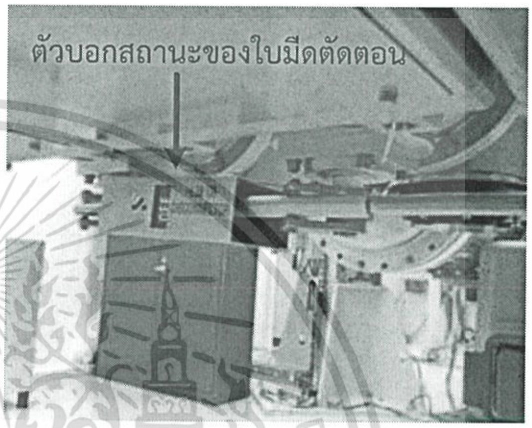
รูปที่ 2.6 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบแนวนอนใน GIS AREVA B65 115kV

เอกสารนี้เป็นเอกสาร [illegible] ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 ใบมีดตัดตอน (Disconnecting Switch)

ใช้สำหรับแยก เซอร์กิตเบรกเกอร์ บัสบาร์ หรือสายส่งออกจากระบบเพื่อการบำรุงรักษา ใบมีดตัดตอนจะเป็นชนิดที่ทำงานขณะไม่มีกระแสไฟ แต่ต้องสามารถตัดตอนกระแส การชาร์จประจุที่เกิดจากค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) ของบัสบาร์ และสายส่งได้ด้วยชุดกลไกของใบมีดมักเป็นแบบมอเตอร์ลักษณะของตัวถังสวิตซ์ใบมีดตัดตอน เป็นแบบโมดูลล่าคือมีรูปแบบโดยเฉพาะสามารถเลือกต่อเข้ากับอุปกรณ์อื่นๆได้หลายแบบตามความเหมาะสมกับตำแหน่งที่จะนำไปใช้งาน การเคลื่อนที่ของ Moving Contact จะเคลื่อนที่โดยการขับเคลื่อนของ มอเตอร์ผ่านทาง Driving Insulator ที่อยู่ภายในใบมีดตัดตอน



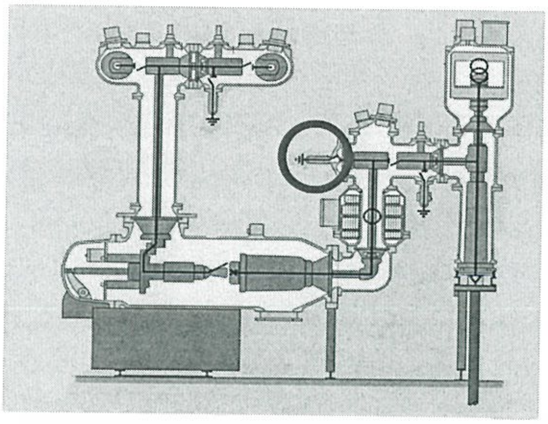


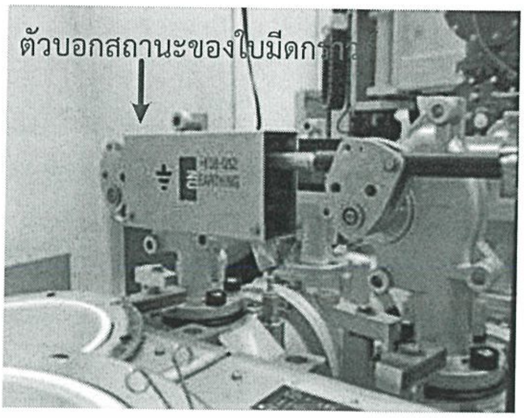
รูปที่ 2.7 ใบมีดตัดตอนใน GIS AREVA B65 115kV

2.2.7 ใบมีดกราวด์ (Ground Switch)

จุดประสงค์ของใบมีดกราวด์มีไว้ใช้สำหรับงานบำรุงรักษาเท่านั้น เพื่อลดประจุที่ค้างอยู่หรือแรงดันเหนี่ยวนำในจุดที่ทำงานให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน มักติดตั้งภายในโมดูลของใบมีดตัดตอน ใบมีดกราวด์ที่ใช้ใน GIS นั้นมี 2 แบบ คือ แบบธรรมดา และแบบความเร็วสูง (High Speed) ใบมีดกราวด์แบบธรรมดา จะติดตั้งไว้ภายในเบย์ส่วนแบบความเร็วสูงนั้น จะติดตั้งที่ปลายเบย์ด้านที่ออกไปยังสายส่ง และ ด้านติดกับบัสบาร์ เนื่องจากจุดดังกล่าวมักมีค่าคาปาซิแตนซ์สูงการทำงานของใบมีดกราวด์ความเร็วสูงนั้น เมื่อสั่งปิดสปริงจะถูกชาร์จ โดยที่ Moving Contact ยังไม่เคลื่อนที่จนกว่าสปริงถูกอัดเต็มที่แล้ว ส่วนการเปิดนั้น เปิดออกด้วยความเร็วปกติเหมือนใบมีดกราวด์แบบธรรมดา เมื่ออยู่ในตำแหน่งที่ปิดใบมีดกราวด์ ต้องสามารถทนกระแสลัดวงจรได้ นอกจากนั้นใบมีดกราวด์ยังสามารถใช้เป็นจุดทดสอบสำหรับการทดสอบต่างๆ ได้อีกด้วยเช่น Timing, Contact Resistance เป็นต้น ระหว่างตัวถังของ GIS และ ตัวถังของใบมีดกราวด์ จะใช้ฉนวนคั่นและใช้สายตัวนำต่อเชื่อมให้ระบบกราวด์ถึงกัน เมื่อต้องการทดสอบทำได้โดยการปลดสายตัวนำนี้ออก และปิดใบมีดกราวด์ ก็จะทำให้ตัวนำภายในเชื่อมต่อกับตัวถังของใบมีดกราวด์ทำให้สามารถป้อนแรงดัน หรือกระแสทดสอบเข้าไปที่ตัวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

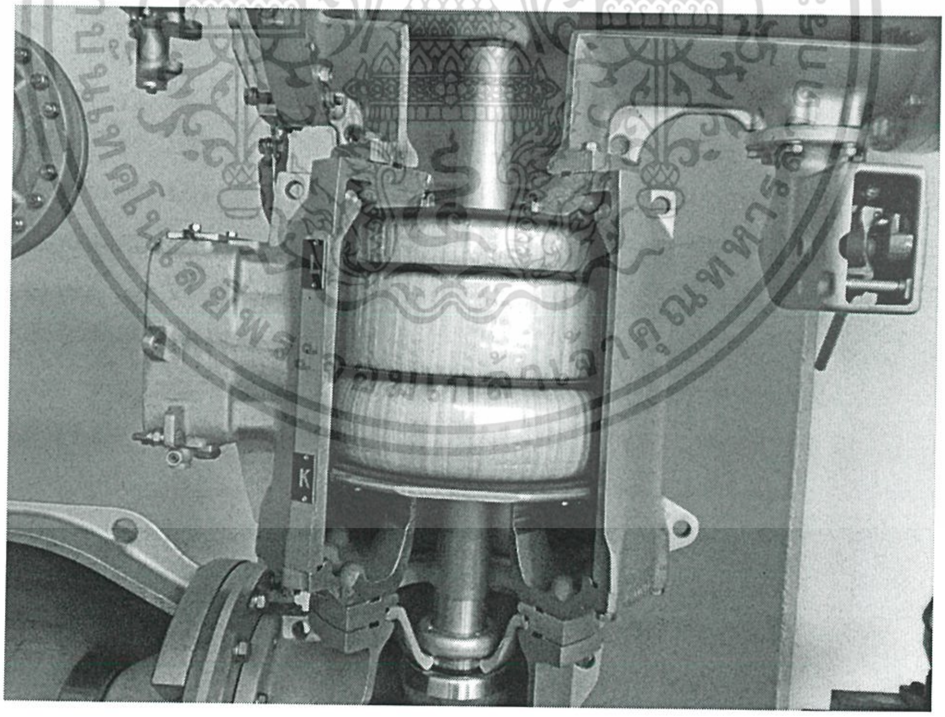




รูปที่ 2.8 ใบมีดกราวด์ใน GIS AREVA B65 115kV

2.2.8 หม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformers)

ทำหน้าที่แปลงระดับกระแสด้าน Primary ให้ต่ำลง เพื่อใช้สำหรับระบบป้องกัน และระบบการวัด (Metering) โดยทั่วไปจะสอดท่อตัวนำ ซึ่งถือว่าเป็นขดลวด Primary แบบ 1 รอบ ลอดผ่านแกนเหล็ก (Core) ของหม้อแปลงวัดกระแส ซึ่งเป็นชนิด Ring Type ตามปกติหม้อแปลงวัดกระแสแต่ละตัวจะมีแกนเหล็กหลายๆ ชุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ Primary Current, Accuracy Class และ Rated Burden ของแต่ละแกนเหล็ก



รูปที่ 2.9 หม้อแปลงกระแสในระบบ GIS AREVA B65 115kV

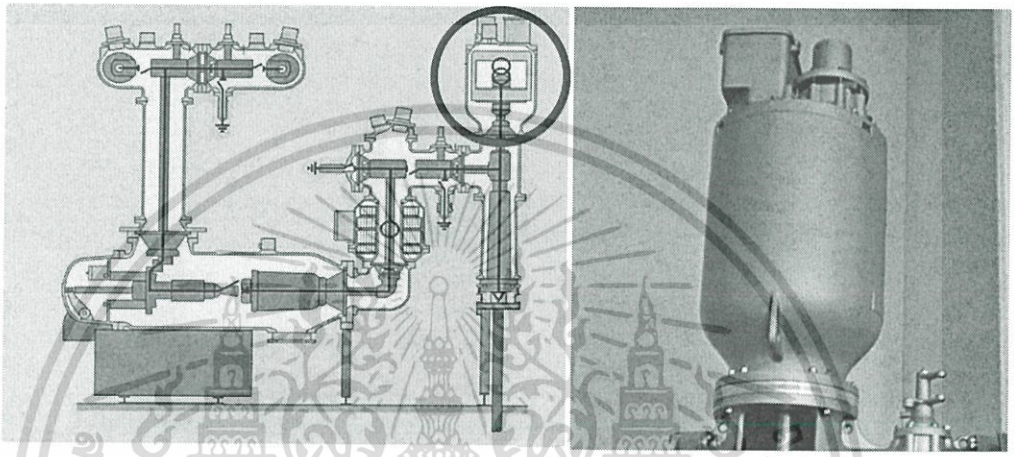
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.9 หม้อแปลงวัดแรงดัน (Voltage Transformers)

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- Capacitive Voltage Transformers (CVTs)
- Electromagnetic Transformers หรือ Potential Transformers (PTs)

การพิจารณาเลือกชนิดใด ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะที่ต้องการ ถ้าต้องการความแม่นยำสูงจะต้องเลือกแบบ PTs ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้มากกว่า ส่วน CVTs จะราคาถูกกว่า ภายในหม้อแปลงวัดแรงดันจะเติมด้วยแก๊ส SF_6 โดยมีระบบการตรวจวัด แยกออกจากคอมพาร์ทเมนต์อื่นๆ



รูปที่ 2.10 หม้อแปลงวัดแรงดันใน GIS AREVA B65 115kV

2.2.10 External Connection

GIS เป็นศูนย์กลางการสวิทซ์ชิ่งของระบบส่ง-จ่ายไฟฟ้า ซึ่งต้องมีการต่อ อุปกรณ์ภายนอกเข้ากับ GIS แต่ละเบย์เช่นหม้อแปลง (Transformers) ดังนั้นจะเห็นว่ามีการเปลี่ยนจากฉนวน (Insulation) แบบ SF_6 ที่ใช้ภายใน GIS เป็นฉนวน (Insulation) แบบอื่นขึ้นอยู่กับอุปกรณ์นั้นๆ อุปกรณ์ที่ใช้ต่อเข้า-ออกกับ GIS แบ่งเป็น 3 ชนิดคือ

- SF_6/Air Bushing

สำหรับเปลี่ยนจากฉนวน SF_6 ที่ใช้ภายใน GIS เป็นอากาศ ตัว Bushing ทำจากพอร์ซเลน ต่อกับ GIS โดยใช้โมดูลมีข้องอจัดได้ตามแนวที่ต้องการ ภายในบรรจุก๊าซ SF_6 เป็นฉนวน (Insulation) ส่วนภายนอกจะต้องมี Creepage Distance ตามระดับ Polution ที่ออกแบบให้ทนได้เช่นเดียวกับ AIS SF_6/Air Bushing เหมาะสมสำหรับใช้กับการต่อจาก GIS ออกไปยังหม้อแปลง (Transformer) ที่ใช้แบบ Bushing อยู่แล้ว

- Cable Terminations

เป็นการเปลี่ยนจากฉนวน SF_6 เป็นฉนวนที่ใช้กับสายเคเบิลเช่น XLPE, น้ำมันฉนวน ซึ่งมาตรฐานสากลได้มีข้อกำหนดลักษณะการต่อ Cable Terminator ระหว่างผู้ผลิต GIS และผู้ผลิตเคเบิลให้สามารถต่อเข้ากันได้ทุกยี่ห้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Transformer Terminations

เป็นการต่อจาก GIS เข้าหม้อแปลง หรือ Shunt Reactor ซึ่งใช้น้ำมันฉนวน มีลักษณะเป็นตัวถังโลหะของ GIS ครอบ Bushing ของหม้อแปลง โดยตัวถังโลหะนี้อัดด้วยก๊าซ SF_6 Bushing ที่ใช้แบบนี้จะออกแบบต่างจาก Bushing ของหม้อแปลงโดยทั่วไป

2.2.11 Lightning Arrester

เป็นชนิด Gapless Type โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide : ZnO) ที่ปลายของอุปกรณ์ (Element) จะต่อกับตัวนำ (Conductor) ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อกับจุดต่อลงดิน (Ground) ของระบบภายในสภาวะการทำงานปกติอุปกรณ์ (Element) จะเป็นรีซิสทีฟไม่มีกระแสไหลผ่าน เมื่อเกิดแรงดันเกินจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าหรือการสวิตซ์ซิ่งเกิดขึ้นบนตัวนำบัส (Bus Conductor) จะยอมให้กระแสไหลลงจุดต่อลงดิน เมื่อรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในพิกัดโดยทั่วไปผู้ใช้งานมักเลือกใช้กับดักฟ้าผ่าแบบธรรมดาติดตั้งไว้ภายนอกตัว GIS เนื่องจากมีราคาถูกกว่า แต่มีบางกรณีที่จำเป็นต้องใช้กับดักฟ้าผ่าแบบ GIS เท่านั้นเช่น สายส่งเป็นแบบใต้ดิน (Under Ground Cable) หรือกรณีต่อ GIS เข้ากับหม้อแปลงโดยตรงเป็นต้น

2.2.12 Local Control Cubicle

GIS แต่ละเบย์จะมีตู้ควบคุมเพื่อต่อสัญญาณไปยังอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ ใบมีดตัดตอน ใบมีดกราวด์ หม้อแปลงวัดกระแส หม้อแปลงวัดแรงดัน และสวิตซ์ตรวจจับแรงดันก๊าซ (Pressure Switches) การควบคุมจากตู้แบ่งออกเป็น 2 ระดับคือ

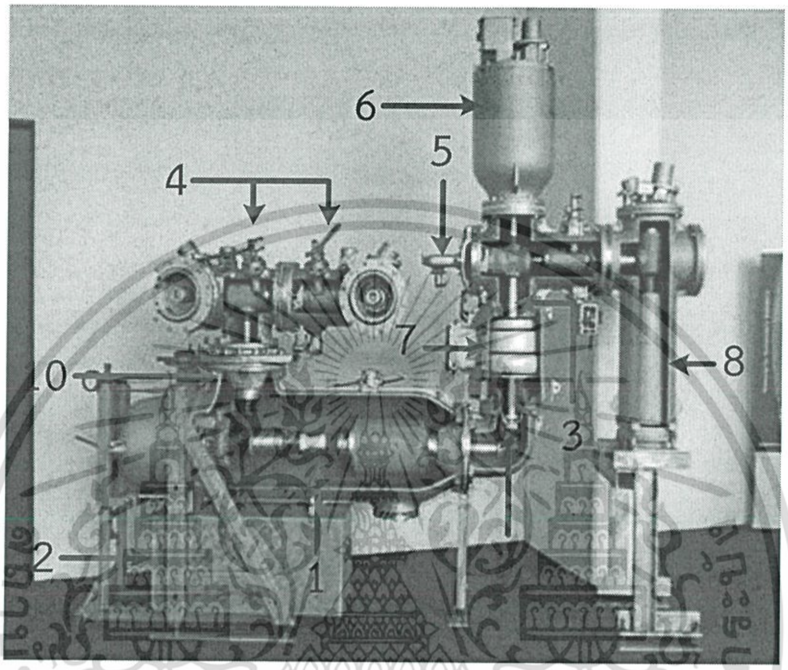
1. ใช้ควบคุมอุปกรณ์ภายในเบย์
   - สามารถควบคุมอุปกรณ์ทุกตัวได้ทางไฟฟ้า
   - มีซิงเกิลไลน์ ไดอะแกรม และไดอะแกรมจำลองสำหรับแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์
   - แสดงคอมพาร์ทเมนต์ที่เกิดเหตุการณ์ เช่น แรงดันก๊าซต่ำ
2. ใช้ต่อเชื่อมกับสัญญาณควบคุมภายนอกสามารถต่อร่วมกับอุปกรณ์ควบคุม เพื่อให้สามารถควบคุมจากห้องควบคุมศูนย์หรือ ศูนย์ควบคุมได้ นอกจากนั้นยังส่งข้อมูลขึ้นไปยังศูนย์ควบคุมได้อีกด้วย

2.2.13 Gas Systems

อุปกรณ์ทั้งหมดภายใน GIS จะอัดด้วยก๊าซ SF_6 แรงดันที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน และขนาด (Dimension) ของท่อโลหะ อุปกรณ์แต่ละชนิดเช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ ใบมีดตัดตอน หม้อแปลงวัดแรงดัน กับดักฟ้าผ่าหรืออุปกรณ์อื่นๆ จะแยกส่วนของก๊าซออกจากกันซึ่งเรียกแต่ละส่วนว่า (Gas Compartment) ทั้งนี้เพื่อป้องกันหากก๊าซรั่ว รวมถึงฝุ่นผงที่เกิดจากการอาร์คของเซอร์กิตเบรกเกอร์, ใบมีดตัดตอนหรือ เกิดอาร์คภายใน (Internal flashover) ฟุ้งกระจายไปยังบัสบาร์ และจุดต่อต่างๆ นอกจากนั้นยังลดผลกระทบต่อกันขณะทำการบำรุงรักษา โดยไม่จำเป็นต้องปล่อยก๊าซออกทั้งหมดเพียงแต่ปล่อยก๊าซในคอมพาร์ทเมนต์ที่ต้องบำรุงรักษาหรือคอมพาร์ทเมนต์ข้างเคียงออกเท่านั้น แต่ละการแยกส่วนของก๊าซจะมีอุปกรณ์ระบายแรงดัน เพื่อระบายแรงดันเกิน รวมทั้งเกจวัดแรงดันก๊าซ (Pressure Gauge) และ สวิตซ์ตรวจจับแรงดันก๊าซ เพื่อตรวจจับการรั่วของก๊าซ SF_6 ทุกคอมพาร์ทเมนต์ เมื่อพบแรงดันก๊าซต่ำจนถึงค่าที่ตั้งไว้จะเตือนและล็อคเอาท์ตามที่ตั้งไว้ โดยส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

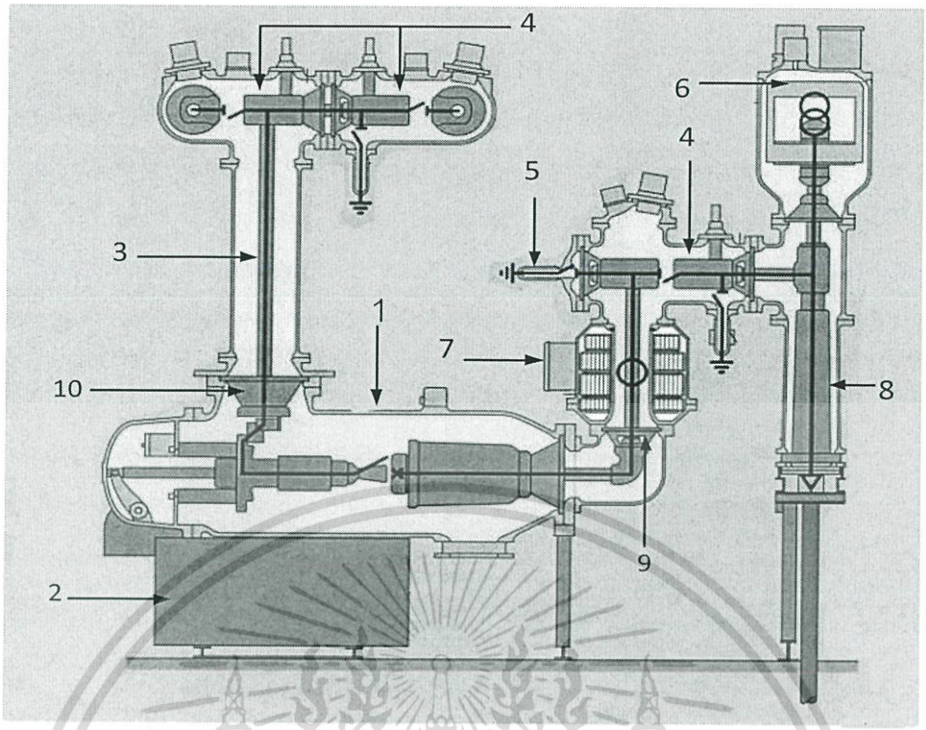
สัญญาณเตือนที่ตู้ควบคุม และส่งไปที่ศูนย์ควบคุมโดยทั่วไปความดันที่ใช้ใน GIS จะมี 2 ระดับคือ คอมพาร์ทเมนต์ทั่วไป เช่น ใบมีดตัดตอน บัสบาร์ หม้อแปลงวัดแรงดัน กับดักฟ้าผ่า จะใช้ความดันประมาณ 3-4 บาร์ ส่วนคอมพาร์ทเมนต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ มักจะมีความดันประมาณ 5-7 บาร์ จะเห็นว่าคอมพาร์ทเมนต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีความดันสูงกว่าคอมพาร์ทเมนต์อื่นๆ เพราะว่านอกจากจะใช้ก๊าซสำหรับเป็นฉนวนแล้วยังใช้สำหรับการดับอาร์คด้วย



รูปที่ 2.11 ภาพรวมของระบบ GIS แสดงเป็นภาพตัดขวาง

1. Circuit breaker, 2. Spring-operated mechanism, 3. Busbar, 4. Disconnector switch, 5. Earthing switch, 6. Voltage transformer, 7. Current transformer, 8. Cable termination, 9. Conical insulator, และ 10. Gas tight conical insulator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ภาพรวมของระบบ GIS แสดงเป็นไดอะแกรมตัดขวาง

1. Circuit breaker, 2. Spring-operated mechanism, 3. Busbar, 4. Disconnector switch, 5. Earthing switch, 6. Voltage transformer, 7. Current transformer, 8. Cable termination, 9. Conical insulator, และ 10. Gas tight conical insulator

2.3 การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในระบบ GIS [2]

ถึงแม้ว่าสถานีย่อยไฟฟ้าฉนวนก๊าซ (GIS) นั้นจะเป็นระบบที่มีความน่าเชื่อถือสูง เกิดข้อผิดพลาดในระบบได้ยากเนื่องจากก๊าซ SF_6 ที่ใช้เป็นฉนวนหลักในระบบมีความเป็นฉนวนสูง ยากต่อการเสียสภาพความเป็นฉนวน แต่ระบบ GIS บำรุงรักษายากและการเกิดดิสชาร์จบางส่วนซึ่งนำไปสู่การเสียสภาพถาวรของฉนวนก็สามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายที่จะตามมาในระบบรวมไปถึงการเตรียมการเพื่อทำการซ่อมบำรุงระบบ GIS ซึ่งวิธีการตรวจวัดดิสชาร์จนั้นมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีการมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันออกไป ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในระบบ GIS

2.3.1 วิธีการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนจากแสง (Light output) [3]

เป็นการตรวจวัดดิสชาร์จจากแสงที่เกิดขึ้นในระบบ GIS ซึ่งแสงที่เกิดขึ้นในระบบ GIS ส่วนมากจะเป็นแสงที่เกิดจากการสปาร์กในระบบ ซึ่งวิธีการ Light Output จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าหลอดแสงทวีคูณ (Photomultiplier tube :PM) ซึ่งวิธีตรวจจับแสงที่เกิดจากการดิสชาร์จนี้เหมาะกับการใช้ในการดูว่าระบบมีการเกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือไม่ เนื่องจากเป็นวิธีที่เร็วและง่าย แต่ไม่เหมาะกับการใช้ตรวจหาตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

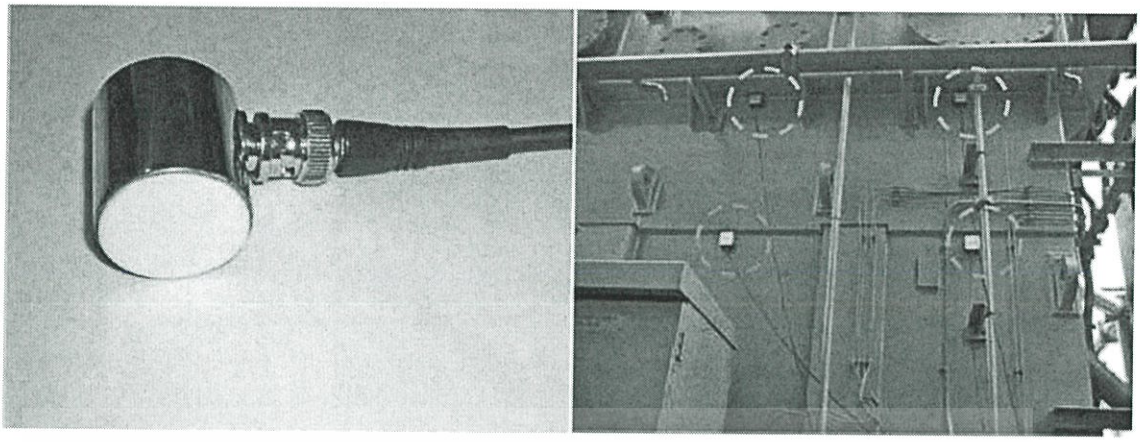
2.3.2 วิธีการทางเคมีในการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน (Chemical By Product) [3]

วิธีการนี้ใช้ตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบ GIS โดยใช้การวัดความเข้มข้นของสารเคมีที่เกิดจากการสลายตัวของก๊าซ SF_6 เมื่อเริ่มมีการเกิดดิสชาร์จนั้นก๊าซ SF_6 ที่เป็นฉนวนหลักในระบบจะเกิดการสลายตัวทางเคมี ซึ่งมีกระบวนการเป็นขั้นๆ ซึ่งแต่ละขั้นก็จะสลายตัวได้สารชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งวิธีการ Chemical By Product นั้นจะใช้อุปกรณ์วัดทางเคมีในการตรวจจับสารเคมีที่เกิดขึ้นมาในแต่ละขั้น ซึ่งสารเคมีจากการสลายตัวหลักของ SF_6 คือ Sulfur Tetrafluoride (SF_4) เป็นก๊าซที่ไวปฏิกิริยาสูง มันจะเกิดปฏิกิริยาต่อไป โดยปกติในระบบจะมีร่องรอยของไอน้ำในรูปแบบสารประกอบที่มีเสถียรภาพมากขึ้นคือ Thionyl fluoride (SOF_2) และ Sulphuryl Fluoride (SO_2F_2) สองก๊าซนี้เป็นก๊าซที่ถูกใช้ในการวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นและโดยการใช้ Gas Chromatograph และ Mass Spectrometer ซึ่งวิธีการ Chemical By Product นี้จะมีความแม่นยำในการหาตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากการวัดความเข้มข้นของสารเคมีที่กล่าวมาในข้างต้น บริเวณที่มีความเข้มข้นของสารเคมีเหล่านี้มาก บริเวณนั้นก็คือตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แต่วิธีการ Chemical By Product นั้นมีข้อเสียคือเป็นวิธีการที่ค่อนข้างช้าในการตรวจวัดเนื่องจากต้องใช้เวลาในการวินิจฉัยสารเคมีที่เกิดขึ้นในระบบ

2.3.3 วิธีการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนจากเสียง (Acoustic Emission) [2]

เป็นการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบ GIS โดยใช้การตรวจวัดเสียงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคอิสระที่เป็นผลจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เมื่ออนุภาคอิสระเหล่านี้อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่เกิดการเคลื่อนที่ซึ่งอาจจะเคลื่อนที่ชนกันระหว่างอนุภาคอิสระหรืออาจเคลื่อนที่กระทบกับผนังของตัวถัง ส่งผลให้เกิดคลื่นเสียงทางกลขึ้นมา หลักในการตรวจจับสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนด้วยเสียงนั้นจะอาศัยหลักการตรวจจับสัญญาณคลื่นความดันที่สร้างขึ้นโดยการดิสชาร์จแบบโคโรนาหรือแบบโพรงอากาศภายในเนื้อฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งจะอยู่ในช่วงความถี่ 100-300 kHz ถือว่าเป็นคลื่นเสียงความถี่สูงที่มนุษย์เราไม่สามารถได้ยิน โดยในการดิสชาร์จแต่ละครั้งจะเกิดการแตกตัวของอนุภาคซึ่งจะอยู่รอบๆ จุดที่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนและกระตุ้นให้สร้างคลื่นกลและแผ่กระจายออกมาผ่านฉนวนและสิ่งกีดขวางต่างๆ ภายในอุปกรณ์ ซึ่งความเร็วของคลื่นเสียงนั้นก็จะขึ้นอยู่กับตัวกลางที่เสียงนั้นผ่าน นอกจากนั้นเสียงยังมีคุณสมบัติสะท้อนและหักเห จึงทำให้การเดินทางของคลื่นเสียงนั้นถูกการดูดซับจากวัสดุที่คลื่นเสียงนั้นผ่าน ดังนั้นคลื่นของสัญญาณเสียงที่วัดได้อาจเกิดการลดทอนและผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ จึงทำให้การวัดการดิสชาร์จโดยการตรวจจับคลื่นเสียงนั้นอาจจะไม่สามารถหารูปแบบที่แท้จริงของการดิสชาร์จแบบออนไลน์ได้ อย่างไรก็ตามประเด็นหลักในการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์เสียงนั้นคือการหาตำแหน่งของการดิสชาร์จบางส่วนใน GIS โดยการใช้เซ็นเซอร์หลายตัวติดตั้งไว้บน GIS ที่ทำการวัดดังรูป ซึ่งเป็นวิธีการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับเซ็นเซอร์อื่นๆ นอกจากนี้การตรวจวัดโดยใช้เซ็นเซอร์เสียงนั้นจะมีสัญญาณรบกวนที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าไม่สามารถรบกวนคลื่นสัญญาณเสียงได้ ยิ่งไปกว่านั้นการใช้เซ็นเซอร์เสียงยังสามารถตรวจจับการสั่นที่ผิดปกติของ GIS ได้ซึ่งอาจเกิดจาก ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัดเกิดการหลุดหลวม หรืออาจเกิดจากสิ่งของแปลกปลอมตกอยู่ภายใน GIS ที่ทำการตรวจวัดอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

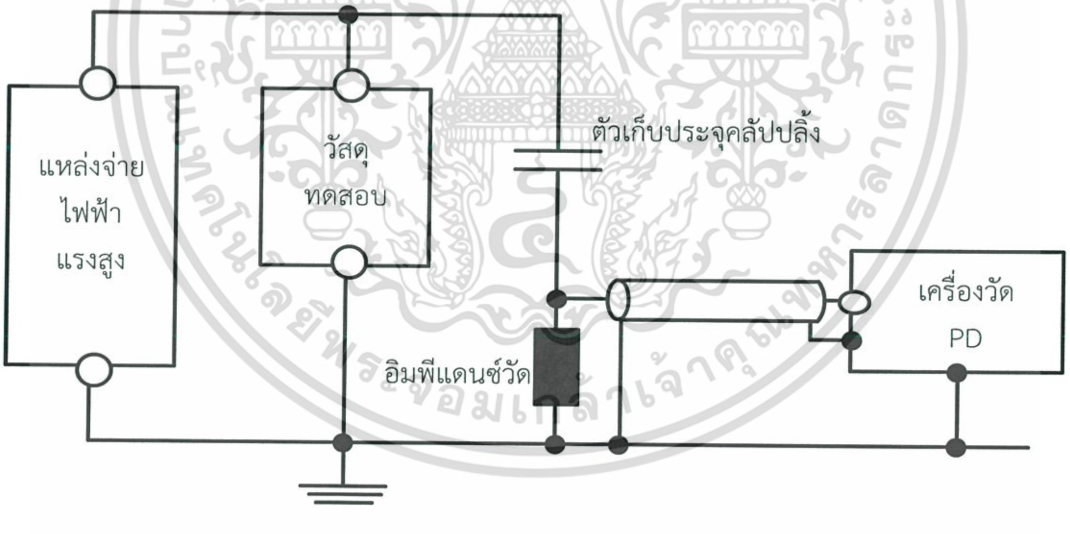


ก) ข)

รูปที่ 2.13 ก) เซ็นเซอร์เสียง (Acoustic Emission Sensor)
ข) การติดตั้งเซ็นเซอร์กับหม้อแปลงไฟฟ้า [2]

2.3.4 วิธีการวัดดิสชาร์จบางส่วนทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC60270 (ช่วงความถี่ระหว่าง 10 Hz ถึง 1 MHz) [4]

วิธีการวัดค่าประจุที่เกิดจากโคโรนาและการคล้ายประจุ โดยใช้ตัวเก็บประจุและความต้านทานซึ่งอาจอิงจากการวัดตามมาตรฐาน IEC 60270 วงจรวัดจะแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรวัดการดิสชาร์จบางส่วน โดยอ้างอิงจาก IEC 60270 [4]

วัตถุทดสอบในรูปแทนด้วยค่า C_t ในกรณีนี้เป็น GIS เมื่อเกิด PD จะก่อให้เกิดอิมพัลส์จำนวนมากออกมาซึ่งสามารถตรวจพบโดยตัวเก็บประจุเกี่ยวคล้อง C_K และการวัดความต้านทาน Z_m โดยกระแสที่ไหลผ่าน Z_m จะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ดิสชาร์จที่วัตถุทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสทั้งสองไม่สามารถระบุได้เนื่องจากการไม่ทราบค่าความจุที่ดิสชาร์จออกมา กระแสที่ใช้ในการตรวจจับดิสชาร์จผ่านตัว Z ที่ทราบค่าประจุที่เกิดขึ้น ขนาดของการวัดประจุที่เกิดนั้นจะขึ้นกับตำแหน่งรัศมีของการดิสชาร์จเพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาด วงจรการตรวจวัดควรจะมีการตัดความถี่ที่ต่ำ วิธีการนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ค่อยได้รับความนิยมในการทดสอบหน้างาน เนื่องจากมีผลของสัญญาณรบกวนจากภายนอกซึ่งอาจรบกวนการวัดได้

2.3.5 วิธีการตรวจจับดิสชาร์จด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า UHF [2]

สวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซ (Gas Insulated Switchgear) ถือว่าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นต้องทำการบำรุงรักษาบ่อยครั้ง เนื่องจากมีการใช้ก๊าซ SF_6 ซึ่งมีค่าความเป็นฉนวนสูงมากและบำรุงรักษาค่อนข้างยาก แต่ในความเป็นจริงแล้วก็ยังมีสวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซเกิดความเสียหายอยู่มากมาย โดยเฉพาะตำแหน่งของ T Position ของ Disconnecting Switch หรือ Cable Termination End ซึ่งเกิดจากการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนใน สวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซโดยในการเกิดการดิสชาร์จจะกระตุ้นทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงทำให้เกิดกระแสพัลส์ไหลเวียนอยู่ภายในรูปทรงกระบอกของสวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซซึ่งจากผลที่เกิดนี้จะนำไปสู่การเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์และทำให้เกิดความเสียหายของฉนวนภายใน สวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นการตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วนในสวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซด้วยวิธีการตรวจวัดในย่านความถี่สูงเป็นพิเศษ (Ultra High Frequency, UHF) เพราะกระแสพัลส์ซึ่งเกิดจากการดิสชาร์จมีความเร็วมากซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการเดินทางนั้นสั้นมาก (nS) จึงทำให้ความถี่ของกระแสพัลส์มีความถี่สูงถึงย่านกิ๊กกะเฮิร์ท (GHz) โดยเซ็นเซอร์ตรวจจับคลื่นวิทยุจะถูกออกแบบให้มีลักษณะคล้ายกับเสาอากาศซึ่งถูกพัฒนาให้สามารถตรวจจับคลื่นทรานเชียนท์ได้ (Transient Wave) โดยประสิทธิภาพ และความสามารถในการตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วนแบบคลื่นความถี่วิทยุนี้จะสูงกว่าเมื่อเทียบกับการวัดแบบดั้งเดิม (Conventional Method,IEC60270) โดยการติดเซ็นเซอร์ด้วยวิธีนี้จะติดตั้งกับฉนวนที่เป็นจุดต่อของสวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซดังรูป และจุดต่อนั้นต้องไม่เป็นเหล็กหรืออะลูมิเนียม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการฉนวนจะเป็นอีพ๊อกซี (Epoxy)

ก) ข)

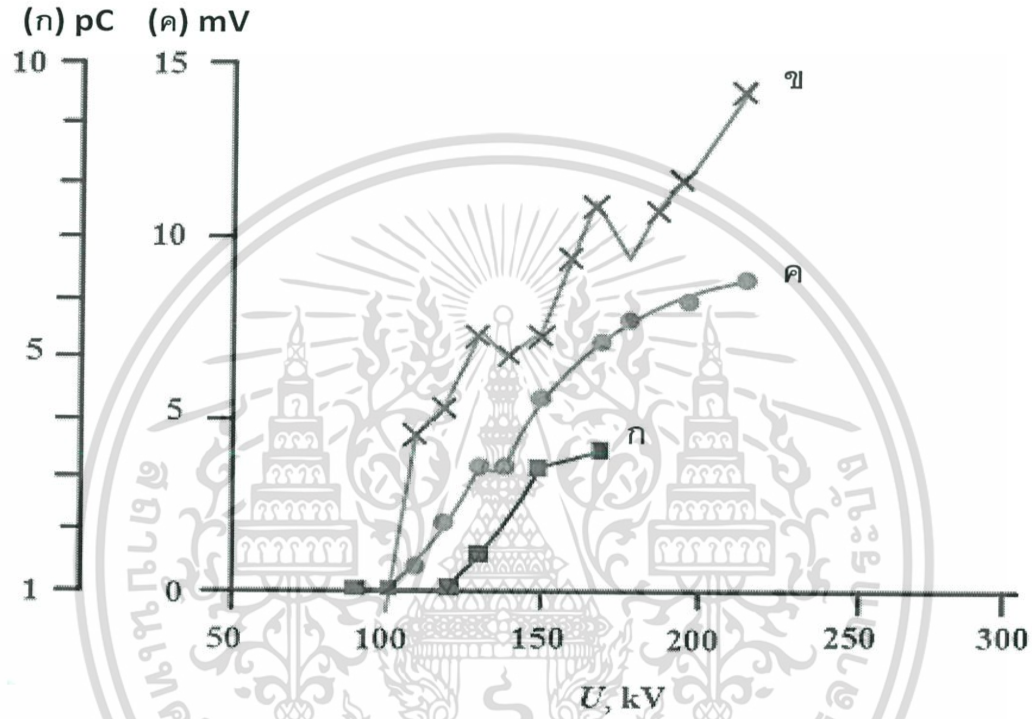
รูปที่ 2.15 ก) เซ็นเซอร์ตรวจจับคลื่นวิทยุ (UHF Sensor)
และ ข) และการติดตั้งเซ็นเซอร์ที่สวิตเกียร์แบบฉนวนก๊าซ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การเปรียบเทียบวิธีการตรวจวัดดิสชาร์จวิธีต่างๆ [3]

เป็นเรื่องยากที่จะเปรียบเทียบเทคนิคการวินิจฉัยที่แตกต่างกันจากผลที่ได้จากสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน ดังนั้น CIGRE Working group จึงทำการทดลองโดยการใช้ chamber ยาว 6 เมตรซึ่งเป็นส่วนตัดของระบบ GIS 420 kV เพื่อใช้ตรวจสอบข้อบกพร่องดังนี้

- อนุภาคโลหะอิสระ
- อนุภาคที่ติดอยู่กับพื้นผิวของสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบเทคนิคการวัดดิสชาร์จบางส่วน [3]

โดยชุดทดลองจะได้รับการป้อนแรงดันโดยหม้อแปลงทดสอบ Metal Clad 0-510 kV โดยที่จะทำการเพิ่มแรงดันอย่างช้าๆ จนเกิดการเบรกดาวน์ขึ้น โดยในระหว่างช่วงเวลานี้ เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวินิจฉัยใช้ดังต่อไปนี้

ก. วิธีการวัดดิสชาร์จบางส่วนทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC60270 และใช้เครื่องมือตรวจจับมาตรฐานที่ 1 MHz

ข. UHF โดยใช้ internal coupler ที่ความถี่สูงถึง 1,500 MHz

ค. Acoustic โดยใช้ external acoustic emission ที่ความถี่ 34 kHz

ง. Chemical โดยใช้ detector tube ซึ่งเทคนิคที่ทดสอบนี้ ไม่ตอบสนองต่อผลที่ได้จากการทดลองที่มีช่วงที่จำกัดนี้

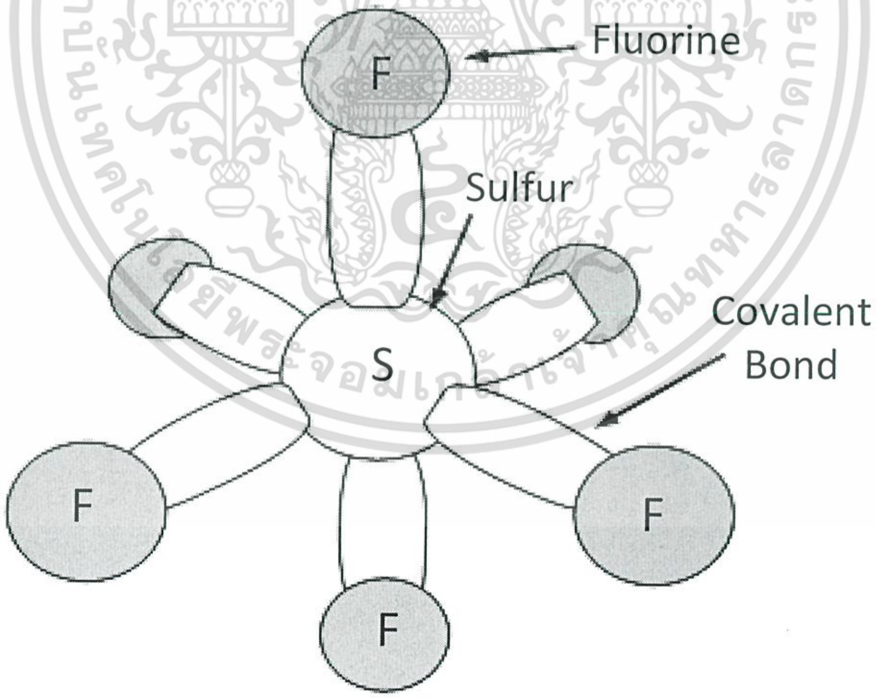
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งข้อมูลผลการทดสอบจากเทคนิคที่แตกต่างกันนี้ แสดงในรูปของอัตราส่วนของสัญญาณกับเสียงรบกวน ดังนั้นผลที่ได้มาจึงสามารถทำการเปรียบเทียบได้ โดยได้ข้อสรุปดังนี้

- Acoustic วิธีการวัดดิสชาร์จบางส่วนทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC60270 และ UHF ทั้งสามเทคนิคมีความไวต่อการตรวจจับที่ดี
- การวัดตรวจจับโดยการใช้เทคนิค acoustic ไม่มีการรบกวนต่อระบบและสามารถใช้ได้ในเกือบทุกระบบ GIS แต่สัญญาณที่ได้รับออกมาเพื่อทำการวินิจฉัยที่การถูกลดทอนค่อนข้างสูงจากสิ่งกีดขวางและผนังของ chamber
- วิธีการวัดดิสชาร์จบางส่วนทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC60270 ต้องการใช้ External coupling capacitor และไม่สามารถใช้งานได้ในขณะที่มีการใช้งาน GIS อยู่
- UHF เหมาะกับการเฝ้าตรวจจับ PD ในขณะมีการใช้งาน GIS

2.5 คุณสมบัติทางเคมีของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) [5]

โครงสร้างของซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ประกอบด้วยซัลเฟอร์หนึ่งอะตอมมีฟลูออรีนล้อมรอบอยู่หกอะตอม โดยค่าพลังงานของอะตอมซัลเฟอร์คือ $1S^2\ 2S^2\ 2P^6\ 3S^2\ 3P^4$ ส่วนค่าพลังงานของอะตอมฟลูออรีนคือ $1S^2\ 2S^2\ 2P^5$ แต่ละอะตอมซัลเฟอร์ในโมเลกุล SF_6 จะสร้างพันธะโคเวเลนต์กับหกอะตอมฟลูออรีน ทำให้มีพันธะโคเวเลนต์ทั้งหมด 6 พันธะ โครงสร้างโมเลกุลของก๊าซนี้แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดเรียงอิเล็กตรอนและโครงสร้างของก๊าซ SF_6 ทำให้มีเสถียรภาพมาก โครงสร้างของก๊าซนี้สามารถทนต่ออุณหภูมิโดยไม่เกิดการสลายตัวของก๊าซได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ไม่ไวไฟ ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และคลอไรด์ (Cl) อีกทั้งไม่ทำปฏิกิริยากับกรดด้วย ก๊าซ SF_6 เป็นหนึ่งในก๊าซที่หนักที่สุด ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 1 bar คือประมาณ 6.139 kg / m^3 สูงกว่าอากาศที่สภาวะเดียวกันประมาณ 5 เท่า น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซนี้ คือ 146.06 มีอุณหภูมิใช้งานจาก -25 ถึง +50 องศาเซลเซียส ความร้อนจำเพาะโดยปริมาตรของก๊าซนี้ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณของสสารในการจัดเก็บพลังงานภายในเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 3.7 เท่าของอากาศและนั่นคือเหตุผลที่ก๊าซนี้มีผลกระทบอย่างมากในเรื่องของการระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้า การนำความร้อนของก๊าซนี้ต่ำกว่าอากาศ แต่ยังคงเหมาะสำหรับการระบายความร้อนในเบรกเกอร์ ซึ่งเป็นเพราะในระหว่างการแยกออกจากกันของโมเลกุลซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ในขณะเกิดอาร์ค โมเลกุลนี้ได้ดูดซับความร้อนจำนวนมาก ซึ่งความร้อนนี้จะถูกปล่อยออกมาเมื่อโมเลกุลมีการเปลี่ยนรูป โดยกระบวนการนี้จะช่วยให้ก๊าซนี้ระบายความร้อนได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงถึงแม้ว่าการนำความร้อนของ SF_6 จะไม่สูงมาก

2.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF_6

ก๊าซ SF_6 เป็นก๊าซขั้วลบ ทำให้ดูดซับอิเล็กตรอนอิสระซึ่งเกิดเนื่องจากการอาร์ค การรวมกันของอิเล็กตรอนอิสระกับโมเลกุลจะได้ไอออนหนักและมีขนาดใหญ่ ทำให้มีการเคลื่อนไหวที่ต่ำมาก ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์จึงมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี ความเป็นฉนวนของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ประมาณ 2.5 เท่าของอากาศที่ความดัน 1 บาร์

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ [5]

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	$< 2 \times 10^{-7}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

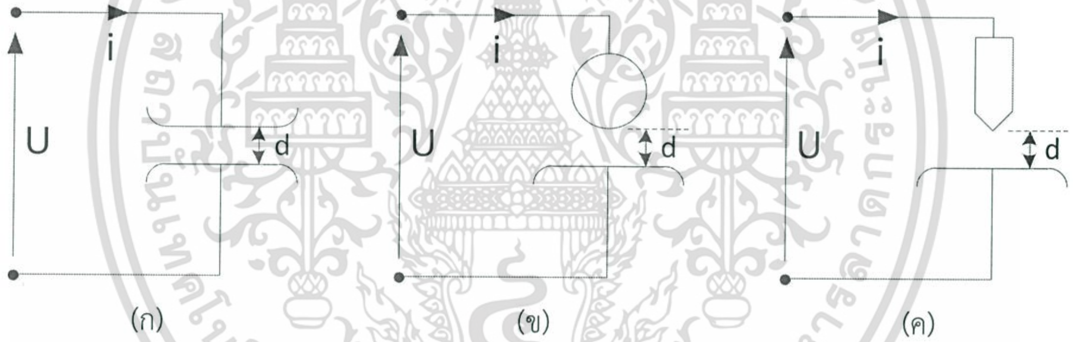
2.6 สนามไฟฟ้า [6]

ในการใช้งานอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้น จำเป็นจะต้องมีความเข้าใจในพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าเพื่อจะได้นำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงสูง สนามไฟฟ้าเกิดจากประจุไฟฟ้าซึ่งปริมาณวัดจากแรงที่เกิดขึ้นตากกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) เมื่อมีประจุ Q และ Q' อยู่ห่างกันระยะ r จะเกิดแรงกระทำต่อกันในทิศทางต่อเชื่อมโยงระหว่างสองประจุนั้น สมมติแรงที่เกิดจาก Q_1 ซึ่งมีตำแหน่งทางเวกเตอร์เทียบกับ Q' เป็น $\vec{r}$ แรงที่เกิดเป็นไปตามสมการ

$$F_{Q \to Q'} = \frac{Q' Q \vec{r}}{4\pi \varepsilon r^3} \tag{2.1}$$

เมื่อ $\vec{r}$ คือ เวกเตอร์ตำแหน่งสัมพันธ์ของประจุ Q' เทียบกับ Q ซึ่งมีเวกเตอร์หน่วย $\hat{r} = \vec{r} / r$

ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยชนิดไม่สม่ำเสมอแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง สนามไฟฟ้าจะเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโตรดดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน

ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)

ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field)

ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึงอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่วงระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{\max} = \frac{U}{d} \tag{2.2}$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด

$E_{\max}$ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

หมายความว่าเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดการเบรกดาวน์หรือสปาร์กทันที ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกดาวน์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่าย และวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเบรกดาวน์นั้นค่ากระแสนี้จะวัดไม่ได้ และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวน์นี้ก็คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า (dielectric strength) หรือความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของการฉนวน สามารถคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \tag{2.3}$$

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

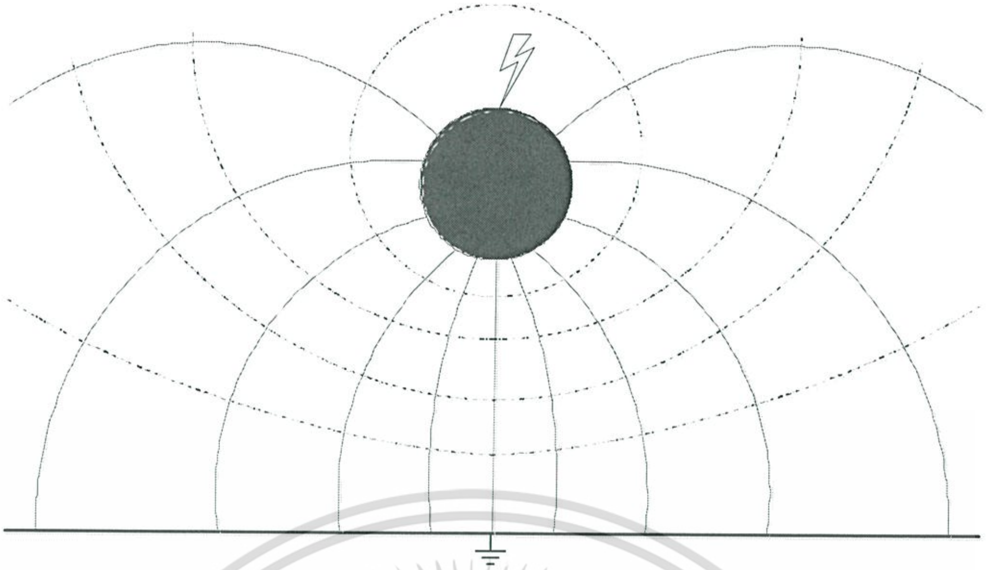
d คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ ซึ่งเรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

อย่างไรก็ตามค่า E_b นี้ ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ แม้แต่ความหนา หรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน มักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กตริกไว้ด้วยเสมอ

2.6.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอคือ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของเรขาคณิตของอิเล็กโตรด ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย เช่น อิเล็กโตรดในรูปที่ 2.18 (ข) ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าจะได้ดังรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า
———————— เส้นสนามไฟฟ้า
— — — — — — — เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

ในรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{\max}$ จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U_b}{d} \tag{2.4}$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{avg}}{E_{\max}} \qquad 0<\eta^* \le 1 \tag{2.5}$$

โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

อาจกล่าวได้ว่า η^* คือ ดรรชนีแสดงให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้น มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เอง จึงคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แบบ ข) ได้คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d \times \eta^*} \tag{2.6}$$

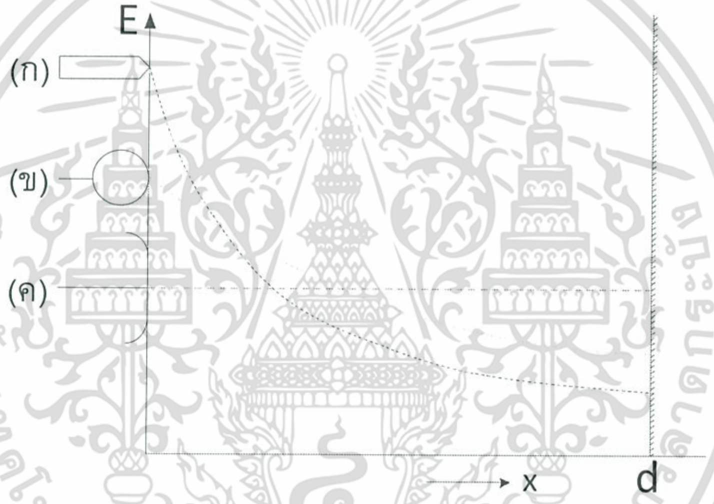
และค่าแรงดันเบรกดาวน์

$$U_b = E_b \times d \times \eta^* \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงว่า อิเล็กโตรดที่มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ก็จะลดลง สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา คือไม่มีดิสชาร์จนำหน้า (Predischarge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ ดังอิเล็กโตรดรูปที่ 2.18 (ข) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าความคงทน คือ $E_{\max} = E_b$

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non Uniform Field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่บริเวณใกล้กับผิวอิเล็กโตรด ที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังรูปที่ 2.18 (ค) เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังเส้นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบในรูปที่ 2.20 อิเล็กโตรดแบบ ค นี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าวิกฤตแล้วก็ตาม เบรกดาวน์จะยังไม่เกิดแต่จะเกิดโคโรนา [6]



รูปที่ 2.20 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ [6]

บริเวณที่ผิวอิเล็กโตรดเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ที่ห่างออกไปจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงและโคโรนาไม่เกิด ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge = PD) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง หรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด กระแสนี้จะขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์ เรียกว่ากระแสโคโรนา หรือกระแสพรีดิสชาร์จ ดังรูปที่ 2.20 (ค)

การเกิดโคโรนาจะทำให้สนามไฟฟ้าของเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (Space Charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะคำนวณจากสมการที่ (2.26) ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม สมการนี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าของเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d \times \eta^*} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่โคโรนาเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด

จากสมการใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรด (Free Of Space Charge) คือใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้า หรือแรงดันเริ่มต้น (Inception Voltage, Starting Voltage, Threshold Voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในแกป

2.6.3 สนามไฟฟ้าในอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

เนื่องจากในสถานีไฟฟ้าฉนวนย่อยในแต่ละเบย์ ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม อิเล็กโตรดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันและมีแกนร่วมกัน ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเป็นไปตามสมการ

$$E_{\max} = \frac{v}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \tag{2.9}$$

เมื่อ $E_{\max}$ คือค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm)

v คือแรงดันไฟฟ้า (kV)

r_1 คือรัศมีอิเล็กโตรดชั้นใน (cm)

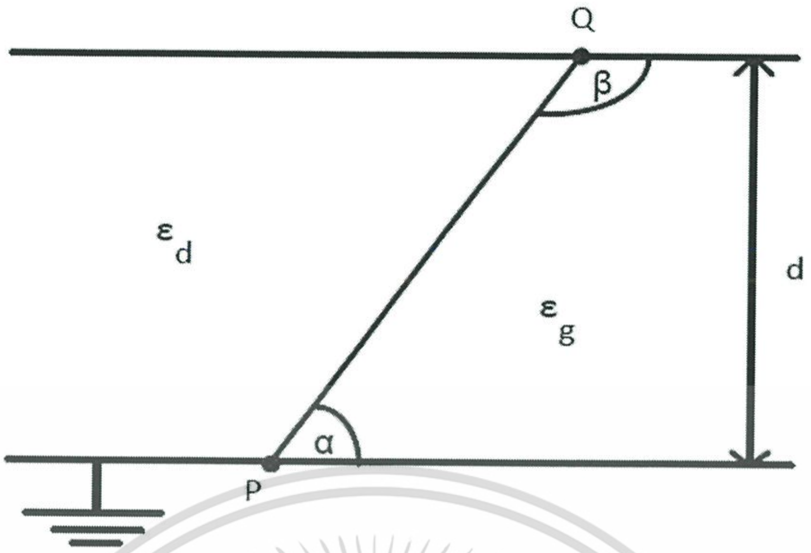
r_2 คือรัศมีอิเล็กโตรดชั้นนอก (cm)

การออกแบบให้ได้มิติที่พอเหมาะหมายถึงมิติที่เล็กที่สุด แต่สามารถทนแรงดันได้สูงสุด เมื่อกำหนดขนาดรัศมีนอก (r_2) จากนั้นพิจารณาต่อไปว่า ขนาดรัศมีใน (r_1) ควรเลือกขนาดเท่าใด โดยใช้หลักมิติที่เหมาะสม (แบบทรงกระบอกซ้อนแกน) เพื่อให้ได้ขนาดรัศมีใน (r_1) มีขนาดที่เล็กแต่สามารถทนแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงสุด

2.7 พฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction [7]

ในระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS) และระบบสายส่งไฟฟ้าฉนวนก๊าซ (GIL) นั้น นอกจากจะมีก๊าซ SF_6 เป็นฉนวนแล้ว ยังมีฉนวนแข็งที่ทำหน้าที่เป็นส่วนที่ยึดอุปกรณ์ไฟฟ้าให้อยู่กับที่และแบ่ง compartment แต่ละส่วน ซึ่งฉนวนแข็งที่ใช้ในระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS) และระบบสายส่งไฟฟ้าฉนวนก๊าซ (GIL) จะทำมาจาก Epoxy Resin ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.3 ทำให้ในระบบจะมีจุดต่อกันของตัวนำ ฉนวนแข็งและฉนวนก๊าซนั้นเรียกจุดนี้ว่า Triple Junction ซึ่งจุด Triple Junction นี้เป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูง ทำให้ฉนวนตรงจุดนี้เกิดความเสียหายได้ง่ายโดยเฉพาะฉนวนแข็งที่ทำหน้าที่รองรับอุปกรณ์ ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction จึงจำเป็นในการศึกษาการซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS) และระบบสายส่งไฟฟ้าฉนวนก๊าซ (GIL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 ไดอะแกรมแสดงลักษณะของจุด Triple Junction [7]

เมื่อ P คือ จุด Triple Junction ที่อิเล็กโตรดด้านแรงสูง
Q คือ จุด Triple Junction ที่อิเล็กโตรดด้านกราวด์
d คือ ระยะจากอิเล็กโตรดด้านแรงสูงถึงอิเล็กโตรดด้านกราวด์
ε_g คือ ค่า Permittivity ของฉนวนก๊าซ
ε_d คือ ค่า Permittivity ของฉนวนแข็ง
α คือ มุมที่ฉนวนแข็งทำกับอิเล็กโตรดฝั่งกราวด์
β คือ มุมที่ฉนวนแข็งทำกับอิเล็กโตรดฝั่งแรงสูง

จากการศึกษาพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction ของ Tadasu Takuma ได้อธิบายพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction ไว้ในหัวข้อ Embedding Effect (TAKAGI EFFECT) ซึ่งกล่าวว่าหน้าสัมผัสของฉนวนแข็งที่พบกับฉนวนก๊าซและตัวนำระนาบ ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ใกล้กับหน้าจุดสัมผัส P และ Q สามารถหาได้จาก

$$E = Kl^m \tag{2.10}$$

เมื่อ l คือ ระยะจากจุด P หรือ Q และค่า K คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับมุม α และอัตราส่วนของ ε_g กับ ε_d สำหรับ $\alpha < 90°$ ค่าเลขชี้กำลัง m จะขึ้นกับความสัมพันธ์ของค่า ε ดังนี้

m < 0 เมื่อ $\varepsilon_d > \varepsilon_g$

m > 0 เมื่อ $\varepsilon_d < \varepsilon_g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่า m เมื่อ $\alpha > 90^\circ$ ซึ่งเกิดขึ้นได้ที่จุด Q ดังรูปที่ 2.21

m < 0 เมื่อ $\varepsilon_d < \varepsilon_g$

m > 0 เมื่อ $\varepsilon_d > \varepsilon_g$

ค่าสนามไฟฟ้าเข้าใกล้จุด P จะมีค่าสูงมากเป็นอนันต์ เมื่อ $\varepsilon_d > \varepsilon_g$ และเป็นศูนย์เมื่อ $\varepsilon_d < \varepsilon_g$ อย่างไรก็ตามค่าพฤติกรรมที่ได้นี้เป็นผลคำนวณจากทฤษฎี และค่า m หาได้จาก

$$\tan(n\alpha) + \varepsilon_s \tan(n(\pi - \alpha)) = 0 \tag{2.11}$$

เมื่อ ε_s เป็นอัตราส่วนของ ε_d กับ ε_g ($\varepsilon_s = \varepsilon_d / \varepsilon_g$) และ n = (m+1) ค่า m มีความสัมพันธ์กับมุม α สำหรับ $2 \leq \varepsilon_s \leq 10$ สุดท้ายแล้วค่า m จะเพิ่มขึ้นตามค่า ε_s ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.3 เมื่อ ε_s เท่ากับ 10 ค่าสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นช้าๆเมื่อเข้าใกล้จุดหน้าสัมผัส

2.8 เบรกดาวน์ในก๊าซไฟฟ้าลบ (Breakdown in Electronegative Gas) [6]

ก๊าซไฟฟ้าลบ หมายถึง ก๊าซชนิดที่โมเลกุลมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนอิสระ และทำให้เป็นไอออนลบ ซึ่งก๊าซ SF_6 มีคุณสมบัติเป็นก๊าซไอออนลบ ดังนั้นจึงต้องทำความเข้าใจกระบวนการเบรกดาวน์ในก๊าซไอออนลบ

2.8.1 การเกิดไอออนลบ

ไอออไนเซชั่น เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลของก๊าซและเหลือเป็นไอออนบวก ในโอกาสเดียวกันไอออนลบอาจเกิดขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนไปเกาะบนโมเลกุล ทำให้กลายเป็นประจุที่มีมวลเพิ่มขึ้น มีค่าเท่าๆ กับไอออนบวกเป็นผลให้เคลื่อนที่ได้ช้า นั่นคือไอออนลบจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าน้อย โอกาสจะเกิดไอออไนเซชั่นจากการวิ่งชนของไอออนลบจึงมีน้อยจึงเท่ากับเป็นการหน่วงการเกิดไอออไนเซชั่นการหน่วงนี้จะมีผลอย่างยิ่งถ้าเกิดขึ้นบริเวณใกล้แคโทดเป็นผลให้อิเล็กตรอนที่เป็นตัวเริ่มต้นสร้างอะวาลานซ์จะลดลง ไอออนลบอาจเกิดขึ้นได้หลายกระบวนการดังต่อไปนี้ [5]

1) ไอออนลบเกิดขึ้นโดยอิเล็กตรอนไปเกาะบนอะตอม อนุภาคใหม่นี้จะอยู่ในสภาพดังกล่าวชั่วระยะเวลาหนึ่งได้ พลังงานของไอออนลบจะต้องมีค่าน้อยกว่าอนุภาคที่เป็นกลาง การเปลี่ยนสถานะภาพจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานถูกแบ่งออกไปจากอนุภาค ดังนั้นไอออนลบเสถียรมีพลังงานน้อยกว่าอนุภาคก่อนที่อิเล็กตรอนจะมาเกาะ พลังงานส่วนเกินจะถูกปล่อยออกมาเป็นควอนตัมในขณะที่อิเล็กตรอนไปเกาะอะตอม กลไกการก่อตัวของไอออนลบในลักษณะนี้เรียกว่า การเกาะของอิเล็กตรอนโดยการปล่อยรังสี และกระบวนการนี้กลับสภาพเดิมได้ นั่นคืออิเล็กตรอนที่เกาะอยู่จะหลุดออกมาได้ เมื่อได้รับพลังงานรังสี ซึ่งเรียกว่าการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยโฟตอน

2) การเกาะของอิเล็กตรอนบนอะตอมเป็นไอออนลบโดยกระบวนการแยก ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล พลังงานส่วนที่เกินนี้จะไม่ปล่อยออกไป แต่ทำให้เกิดแยกออกเป็น 2 อะตอม คือเป็นอนุภาคเป็นกลางหนึ่ง และอีกอะตอมหนึ่งเป็นไอออนลบ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นย้อนกลับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ไอออนลบอาจเกิดจากผลของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุล โดยที่โมเลกุลแยกออกเป็นอนุภาคบวกและอนุภาคลบ โดยไม่มีอิเล็กตรอนวิ่งไปเกาะบนอะตอม แบบนี้เรียกว่าแบบไอออนคู่

4) ไอออนลบอาจเกิดจากการที่อนุภาคหนักๆวิ่งชนกันเอง โดยไม่มีอิเล็กตรอนอิสระจะมีการถ่ายเทประจุเกิดขึ้น แยกออกเป็นไอออนคู่ คืออิเล็กตรอนที่เกาะอยู่จะหลุดออกจากไอออนลบได้ เมื่อได้รับควอนตัมเท่ากับ hv = W_a พลังงานเกาะตัวหรือทำให้อิเล็กตรอนที่เกาะออกมาได้ มีค่าอยู่ในย่านตั้งแต่ 0.75 eV ถึง 3.8 eV

2.8.2 สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนเป็นไอออนลบ

การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนอะตอมกลายเป็นไอออนลบมีผลอย่างมากต่อลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ อธิบายได้ด้วยสัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอน η ซึ่งนิยามเป็นความสัมพันธ์ของการลดจำนวนอิเล็กตรอน N_e เมื่อเทียบกับจำนวนอิเล็กตรอนต่อหน่วยระยะทางเคลื่อนที่ในปริมาตรของแก๊ส

ถ้ากระบวนการเพิ่มแบบ Exponential ของอิเล็กตรอนโดยการชนและอิเล็กตรอนลดลงเนื่องจากการเกาะตัวของอิเล็กตรอน จำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นจากการชนในระยะทาง dx เป็น

$$dN_i = N\alpha dx \tag{2.12}$$

ที่เวลาเดียวกันอิเล็กตรอนหายไปเนื่องจากการเกาะตัว

$$dN_a = -N\eta dx \tag{2.13}$$

เมื่อ x คือระยะทางจากคาโทด
ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนอิสระคงอยู่

$$dN = dN_i + dN_a = N(\alpha - \eta) \tag{2.14}$$

ถ้าอินทิเกรท x = 0 ถึง x ด้วยอิเล็กตรอนเริ่มต้น N_0 ที่คาโทดจะได้อิเล็กตรอนในแกปที่ระยะ x เป็น

$$N = N_0 e^{(\alpha-\eta)x} \tag{2.15}$$

และจะได้กระแสเป็น

$$I = I_0 \left[\frac{\alpha}{\alpha-\eta} \times e^{(\alpha-\eta)d} - \frac{\eta}{\alpha-\eta} \right] \tag{2.16}$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์ η จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชั่นในก๊าซลบ จะมีอิเล็กตรอนไปจับบนอะตอม ค่าสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชั่นยังผลจะเขียนได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta \tag{2.17}$$

เมื่อเขียนในรูปสมการทั่วไปจะได้

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = \frac{\alpha - \eta}{\alpha} \tag{2.18}$$

2.8.3 เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซไฟฟ้าลบ

ดังที่กล่าวแล้วว่าในก๊าซอาจเกิดไอออนลบขึ้นได้โดยอิเล็กตรอนที่แยกตัวเป็นอิสระจากโมเลกุลด้วยการไอออไนเซชั่น และมีพลังงานที่พอเหมาะไปเกาะติดอยู่กับโมเลกุลเป็นกลางของก๊าซกลายเป็นอนุภาคที่มีประจุลบในรูปแบบต่างๆ กัน ก๊าซที่มีคุณสมบัติที่โมเลกุลจับอิเล็กตรอนได้เรียกว่าก๊าซไฟฟ้าลบ (Electronegative gas)

จากคุณสมบัติของโมเลกุลของก๊าซประเภทนี้สามารถจับอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากไอออไนเซชั่นได้จึงเท่ากับเป็นการระงับการเกิดเบรกดาวน์ไม่ให้เกิดขึ้น หากจะทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ก็ต้องมีสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติเพื่อที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่เกาะอยู่นั้นให้หลุดออกมาสร้างอะวาลานช์ไปตามกระบวนการเกิดเบรกดาวน์ นั่นคือ ก๊าซไฟฟ้าลบจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซธรรมชาติที่โมเลกุลไม่สามารถจับอิเล็กตรอนได้ ในวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงจึงใช้คุณสมบัติของก๊าซไอออนลบนี้ไปใช้ประโยชน์ในการฉนวนอุปกรณ์และระบบต่างๆ ซึ่งในปัจจุบันก๊าซไฟฟ้าลบที่นิยมใช้ในอุปกรณ์และระบบไฟฟ้าแรงสูง คือ ก๊าซ SF_6 เพราะมีคุณสมบัติฉนวนที่ดี มีแรงดันเบรกดาวน์สูงและสามารถลดระยะปลอดภัยในระบบได้ ทำให้ประหยัดพื้นที่ใช้สอย

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซไฟฟ้าลบเป็นไปตามกลไกเบรกดาวน์ ดังนั้นจึงอาศัยทฤษฏีการเกิดเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์ในการอธิบายได้ อาจเขียนสมการของกระแสในแกปที่เกิดจากการไอออไนเซชั่นและเกิดอิเล็กตรอนเกาะโมเลกุลในเวลาเดียวกัน คือ

$$I = I_0 \frac{\frac{\alpha}{\alpha-\eta}\left[e^{(\alpha-\eta)d} - \frac{\eta}{\alpha-\eta}\right]}{I - \gamma\frac{\alpha}{\alpha-\eta}\left[e^{(\alpha-\eta)d} - 1\right]} \tag{2.19}$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชั่นที่หนึ่งของทาวน์เซนด์

γ คือ สัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโทดโดยการชนของไอออนบวก

η คือ สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนโมเลกุล

ค่าของ η/p จะอยู่ในฟังก์ชันของ E/p เช่นกัน เงื่อนไขการเกิดกระแสไหลประทังตัวอยู่ได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับกระแสอิ่มตัว I_0 เมื่อเทอมในส่วนของสมการ (2.20) เป็นศูนย์นั่นคือ

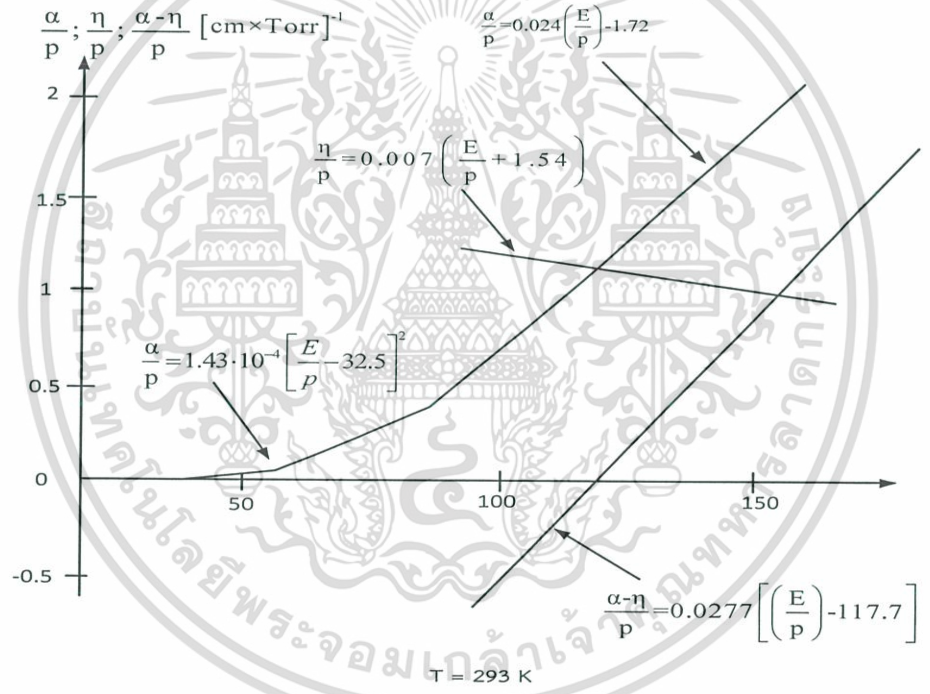
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma \frac{\alpha}{\alpha-\eta}\left[e^{(\alpha-\eta)d}-1\right] \quad (2.20)$$

การเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นได้เมื่อ $\alpha \geq \eta$ ในทำนองเดียวกัน การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซไฟฟ้าลบอาจอธิบายได้ด้วยทฤษฎีสตรีมเมอร์ได้เช่นกัน

2.9 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์ในก๊าซ SF_6 [6]

การคำนวณหาแรงดันเบรกดาวน์ใน SF_6 ทำเช่นเดียวกับอากาศ โดยมีเงื่อนไข $\int_0^{x_c}(\alpha-\eta)dx = k$ และค่า $(\alpha-\eta)/p = f(E/p)$ ที่วัดได้ หรือหาค่า E_b โดยตรง ค่าสัมประสิทธิ์ที่วัดได้ในรูป 2.22



รูปที่ 2.22 สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชั่นและสัมประสิทธิ์เกาะตัวของอิเล็กตรอนของอากาศ และ SF_6 ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.22 จะเขียนสมการได้ว่า

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = \frac{\alpha-\eta}{p} = C\left[\left(\frac{E}{p}\right)-\left(\frac{E}{p}\right)_c\right] \quad (2.21)$$

โดยที่ $C = 27$ kV^{-1} และ $\left(\frac{E}{p}\right)_c = 87.8$ kV/cm bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้น

$$\frac{\alpha-\eta}{p}=27\left[\left(\frac{E}{p}\right)-87.8\right] \quad (2.22)$$

แทนค่า $(\alpha-\eta)/p$ ลงในเงื่อนไขเบรกดาวน์สมการ จะได้

$$\int_0^{X_C}\frac{E(x)dx}{p}-\left(\frac{E}{p}\right)_c x_c=\frac{X}{pC} \quad (2.23)$$

2.9.1 แรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

จากสมการ $X_c = d$ และ E(x) คงตัวเมื่อ d คือระยะแกป หน่วย cm p คือ ความดันก๊าซ หน่วย bar

$$E_b=E_c=87.8 \text{ kV/cm bar} \quad (2.24)$$

$$\frac{E_b\cdot d}{p}-87.8d=\frac{K}{p27} \quad (2.25)$$

แต่ $E_b\cdot d=U_b$ ฉะนั้น $U_b=87.8pd+\frac{K}{27}$

โดยทั่วไปตามเงื่อนไขของทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Rather) ค่า k = 18 จะได้

$$U_b=87.8pd+0.67 \text{ kV} \quad (2.26)$$

2.9.2 แรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของ SF_6

ถ้าทราบค่า E_b และ η^* ของอิเล็กโตรดก็จะหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U_b=E_b\cdot d\cdot\eta^*$ ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างหาค่า U_i ของ SF_6 ในสนามไฟฟ้าอิเล็กโตรดทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม และทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

1) หาค่า U_i ของ SF_6 ในสนามไฟฟ้าแบบทรงกลมซ้อนศูนย์ร่วม

ให้ทรงกลมนอกมีรัศมี r_2 และทรงกลมในมีรัศมี r_1 ฉะนั้น ระยะแกปคือ $r_2 - r_1$ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมี r ($r_1 < r < r_2$) จุดที่อยู่ห่างจากผิวทรงกลมในเท่ากับ x จากสมการ คือ

$$E(r)=\frac{r_1r_2U}{r^2(r_2-r_1)} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $$E_m = E_{max} = \frac{r_2 U}{r_1(r_2 - r_1)} \tag{2.28}$$

$$E(x) = \frac{E_m}{\left(1+\frac{x}{r_1}\right)^2} \tag{2.29}$$

โดยที่ $x = r - r_1$ แทนค่า E(x) ใน ลงในสมการ จะได้ค่า x_c และสนามไฟฟ้าสูงสุดต่อความดันที่แรงดันเริ่มต้น คือ

$$x_c = r_1\left[\frac{E_i / p}{(E/p)_c} - 1\right] \tag{2.30}$$

และ $$\frac{E_i}{p} = \left(\frac{E_i}{p}\right)_C \left[1 + \frac{a}{\sqrt{p \cdot r_1}}\right]^2 \tag{2.31}$$

ฉะนั้นแรงดันเบรกดาวน์หรือแรงดันโคโรนาเริ่มต้น

$$U_i = \left(\frac{E}{p}\right)_C \left[1 + \frac{a}{\sqrt{p \cdot r_1}}\right]^2 p \cdot d \cdot \eta^* \tag{2.32}$$

เมื่อ $a = \sqrt{\frac{K}{C} \cdot \frac{1}{(E/P)_C}} = 0.0881(cmbar)^2$

d = ระยะแกป $(r_2 - r_1)$

2) หาค่า U_i ของ SF_6 ในสนามไฟฟ้าแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ให้ทรงกระบอกในและกระบอกนอกมีรัศมี r_1 และ r_2 ตามลำดับ สนามไฟฟ้าที่จุด x ห่างจากทรงกระบอกในหรือที่รัศมี r สมการและเขียนได้ว่า

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \tag{2.33}$$

และ $$E_m = E_m = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} = E_i \tag{2.34}$$

$$\therefore E(x) = \frac{E_m}{\left(1+\frac{x}{r}\right)} \tag{2.35}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทน E(x) ในสมการ จะได้ $$x_c = r_1\left[\frac{E_i / p}{(E/p)_C} - 1\right] \quad (2.36)$$

ความสัมพันธ์ของ E_i / p จะเป็น

$$\frac{E_i}{p}\left[1-\ln\frac{E_i/p}{(E/p)_C}\right]=\left(\frac{E}{p}\right)_C\left[1-\frac{K}{C}\cdot\frac{1}{(E/p)_C\,p\cdot r}\right] \quad (2.37)$$

ผลลัพธ์ของ E_i / p หาได้โดยการกระจายอนุกรมเทอมที่เป็นล็อก คือ

$$\frac{E_i}{p}=\left(\frac{E}{p}\right)_C\left[1+\frac{b}{\sqrt{p\cdot r}}\right] \quad (2.38)$$

ดังนั้นแรงดันเริ่มต้นจะเป็น $$U_i=\left(\frac{E}{p}\right)_C\cdot p\cdot d\cdot\eta^*\left[1+\frac{b}{\sqrt{p\cdot r}}\right]$$

เมื่อ $$\eta^* = \frac{r_1}{(r_2-r_1)}\ln(r_2-r_1)$$ (แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า)

$$b=\left[\frac{1-\dfrac{K}{C(E/p)_C\,p\cdot r}}{1-\ln\dfrac{E_i/p}{(E/p)_C}}-1\right]\cdot\sqrt{p\cdot r} \quad (2.39)$$

ค่า b จะขึ้นอยู่กับลักษณะอิเล็กโตรด และความดัน คือ $b = f(p\cdot r)$

ถ้าใช้ $(E_i/p)_c = 87.8\ \mathrm{kV/cm}$, $C = 27\ kV^{-1}$ และ $N_c = 10^8$ ค่า b จะได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่า b = f (pr) [6]

p.r (bar. cm)	b (bar.cm)$^{1/2}$
0.003	0.156
0.01	0.147
0.02	0.144
0.05	0.134
0.1	0.132
0.2	0.129
0.5	0.127
1.0	0.126
10.0	0.125
100	0.123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 กลไกการสลายตัวของก๊าซ SF_6 [8]

เนื่องจากมีการใช้ฉนวนก๊าซ SF_6 ที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีการศึกษากลไกการสลายตัวของก๊าซ SF_6 และผลกระทบจากผลิตภัณฑ์เหล่านั้นที่เพิ่มมากขึ้น การตรวจหาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายก๊าซ SF_6 ได้ถูกนำมาใช้มากขึ้นสำหรับการตรวจสอบสภาพฉนวนของ GIS สำหรับข้อดีเมื่อเทียบกับวิธีการตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิม เช่น ความสามารถในการป้องกันการรบกวนที่ดี วิธีการเทียบอย่างชัดเจน และอื่นๆ การเกิดโคโรนา, เบรกดาวน์ และอาร์คทางไฟฟ้าทำให้ก๊าซ SF_6 สลายตัวเกิดเป็นสารต่างๆ ขึ้นมาแล้วอาจไปทำปฏิกิริยากับอิเล็กโทรดหรือสิ่งเจือปนหรือฉนวนแข็งอื่น ๆ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ขึ้นมา ถึงแม้ว่าก๊าซ SF_6 จะเป็นก๊าซเฉื่อยและไม่มีพิษ แต่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นมีพิษและกัดกร่อน โดยสิ่งเจือปนทั่วไปคือ CF_4, N_2, O_2 และ H_2O ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการติดตั้ง ในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถหลีกเลี่ยงสิ่งเจือปนเหล่านี้ได้ ส่งผลต่อความปลอดภัยของบุคคลและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ สามกระบวนการพื้นฐานที่เป็นสาเหตุของการสลายตัวของก๊าซ SF_6 คือ ไฟฟ้า, ความร้อน และแสง กระบวนการทางไฟฟ้าและความร้อนสามารถเกิดในการดิสชาร์จ เช่น เบรกดาวน์ และการอาร์ค ในสภาวะปกตินั้นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนเซชันจะรวมตัวอย่างรวดเร็วกับ SF_6 เกิดเป็น SF_6 ไอออนลบ มีปฏิกิริยาดังนี้

$$SF_6 + e \longrightarrow (SF_6^-)^* \longrightarrow SF_6^- \longrightarrow SF_5^- + e$$

ในสนามไฟฟ้าพลังงานของอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนระหว่างสนามไฟฟ้าที่ใช้ (E) กับความหนาแน่นของโมเลกุล SF_6 (n) เมื่อพลังงานอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นทำให้ SF_5^- เพิ่มมากขึ้น นั่นคือ E/n จะสูงขึ้น การชนกันระหว่างไอออน SF_6^- กับ SF_6 เกิดเป็น SF_5^- อธิบายได้ดังนี้

$$SF_6^- + SF_6 \longrightarrow SF_5^- + F + SF_6$$

ที่ E/n สูงขึ้นทำให้ F^- เกิดขึ้น

$$SF_5^- + SF_6^- \longrightarrow F^- + SF_4 + SF_6$$

หรือ

$$SF_5^- + SF_6 \longrightarrow F^- + SF_5 + SF_5$$

สิ่งแรกที่ได้จากการสลายตัวของ SF_6 คือ SF_5^- และตามมาด้วย SF_5 และ F แม้ที่ E/n และอุณหภูมิต่ำ SF_6 อาจจะสลายตัวไปเป็น SF_5^- ซึ่งอาจจะเปลี่ยนไปเป็นชนิดอื่นๆ ได้ หากมีสิ่งเจือปนอยู่การที่มีออกซิเจนและไอน้ำเจือปนอยู่ด้วย จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นเกิดเป็นสารประกอบซัลเฟอร์ออกซีฟลูออไรด์ (SO_nF_n) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และสารประกอบโลหะฟลูออไรด์ ตัวอย่างปฏิกิริยาดังนี้

$$SF_5 + OH \longrightarrow SOF_4 + HF$$

$$SF_5 + O \longrightarrow SOF_4 + F$$

$$SF_4 + O \longrightarrow SOF_2 + 2F$$

$$SF_3 + O + OH \longrightarrow SO_2F_2 + HF$$

$$2SF_4 + O_2 \longrightarrow 2SOF_4$$

$$SF_4 + H_2O \longrightarrow SOF_2 + 2HF$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SOF_4 + H_2O \longrightarrow SO_2F_2 + HF$$
$$2SOF_2 + O_2 \longrightarrow 2SO_2F_2$$

การเกิดโคโรนา, เบรกดาวน์ และอาร์คทางไฟฟ้า ทำให้ก๊าซ SF_6 สลายตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เมื่อไปทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปน สารประกอบที่สามารถเกิดขึ้นได้คือ SF_4, SF_2, S_2F_{10}, SO_2, SOF_2, SOF_4, SO_2F_2, SOF_{10}, $S_2O_2F_{10}$, HF และ H_2S สารประกอบที่สร้างขึ้นรวมทั้งซัลเฟอร์ฟลูออไรด์ที่เป็นก๊าซและซัลเฟอร์ออกซีฟลูออไรด์กับฟลูออไรด์ที่เป็นโลหะเกิดขึ้นโดยการทำปฏิกิริยากับวัสดุของอิเล็กโทรดและฉนวน เมื่อเกิดโคโรนา SF_6 จะสลายตัวไปสู่ SF_4 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เสถียรมากแต่มีความเสถียรกว่าSF_5 กับอะตอมฟลูออรีนอิสระ ออกซิเจนและไอน้ำใน SF_6 ทำให้ SF_4 กลายเป็น SOF_4, SOF_2 และ SO_2F_2 โดยการเกิด SOF_4 และการเปลี่ยนไปเป็น SO_2F_2 นั้น เนื่องจากโคโรนาหรือการสปาร์กที่พลังงานต่ำ ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่พบจากการสุ่มตัวอย่างก๊าซ SF_6 แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่พบจากการสุ่มตัวอย่างก๊าซ SF_6 ที่พลังงานการดิสชาร์จรวม = 36kJ, ความดันของ SF_6 = 0.133 MPa, เวลาหลังจากดิสชาร์จ = 24 ชั่วโมง [8]

ผลิตภัณฑ์	ความเข้มข้น (ppm)	เปอร์เซ็นต์(%)เทียบกับSF_6*
SOF_2 (SF_4)	3870	1.1
SOF_4	720	0.22
SiF_4	78	0.03
SO_2F_2	140	0.015
SO_2	-	0.002
รวม	-	1.37

เมื่อวัสดุฉนวนเกิดการดิสชาร์จขึ้น ทำให้เกิดการรวมกันระหว่างคาร์บอนจากส่วนของอีพ็อกซีและ ออกซิเจนอิสระจากการดิสชาร์จ เกิดเป็น CO_2 ขึ้น ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของก๊าซที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ผลของการดิสชาร์จบางส่วนเป็นเวลายาวนานทำให้ฉนวนเสื่อมลงอย่างช้า ๆ ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดวาบไฟตามผิวผิวและการเบรกดาวน์ของฉนวนได้ สิ่งที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบการดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ฉนวนก๊าซ SF_6 ประกอบด้วยกระแสอิมพัลส์, UHF, เสียงและการสลายตัวของก๊าซ [9]

เมื่อเกิดสปาร์กขึ้น ก๊าซ SF_6 จะสลายตัวกลายไป SF_4 และฟลูออรีนอิสระ โดย SF_4 เป็นผลผลิตที่มีความเสถียร แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับไอน้ำที่ปนเปื้อนเข้าไปอย่างรวดเร็วเกิดเป็น SOF_2 (thionyl fluoride) และ HF เมื่อเวลามากขึ้นก็จะมีปริมาณที่มากขึ้น ปริมาณของ SOF_2 ที่เกิดขึ้นพบว่ามีความสัมพันธ์กับทั้งพลังงานสปาร์กรวมหรือความดันก๊าซ เมื่อพลังงานสปาร์กรวมปกติพบว่า SOF_2 เกิดขึ้นปริมาณสูงสุด ซึ่งมีกลไกการก่อตัวเป็นดังนี้

$$SF_6 \longrightarrow SF_4 + 2F$$
$$SF_4 + H_2O \longrightarrow SOF_2 + 2HF$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นพบว่า SOF_2 ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาข้างต้น สามารถมาทำปฏิกิริยากับไอน้ำ H_2O เกิดเป็น SO_2 (sulfur dioxide) และ HF ซึ่งมีกลไกการก่อตัวดังนี้

$$SOF_2 + H_2O \longrightarrow SO_2 + 2HF$$

หากภายในก๊าซ SF_6 มีการใช้ฉนวนที่เป็นอีพ็อกซี, แก้ว หรือฉนวนที่เป็นพอร์ซเลนร่วมด้วย ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะมีองค์ประกอบที่เป็น SiO_2 (silicon dioxide) สามารถทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสปาร์กของก๊าซ SF_6 ได้อีกเช่นกัน แล้วเกิดเป็น SiF_4 (silicon tetrafluoride) เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ถึงค่าสูงสุดที่เวลามากกว่า 100 ชั่วโมงหลังจากการสปาร์ก ค่าสูงสุดที่พบน้อยกว่า 10% ของปริมาณ SOF_2 มีความสัมพันธ์กับทั้งพลังงานและความดัน จากปฏิกิริยาสังเกตว่าสามารถเกิดไอน้ำขึ้นมาใหม่แล้วไปทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้ด้วยปฏิกิริยาที่เป็นไปได้คือ

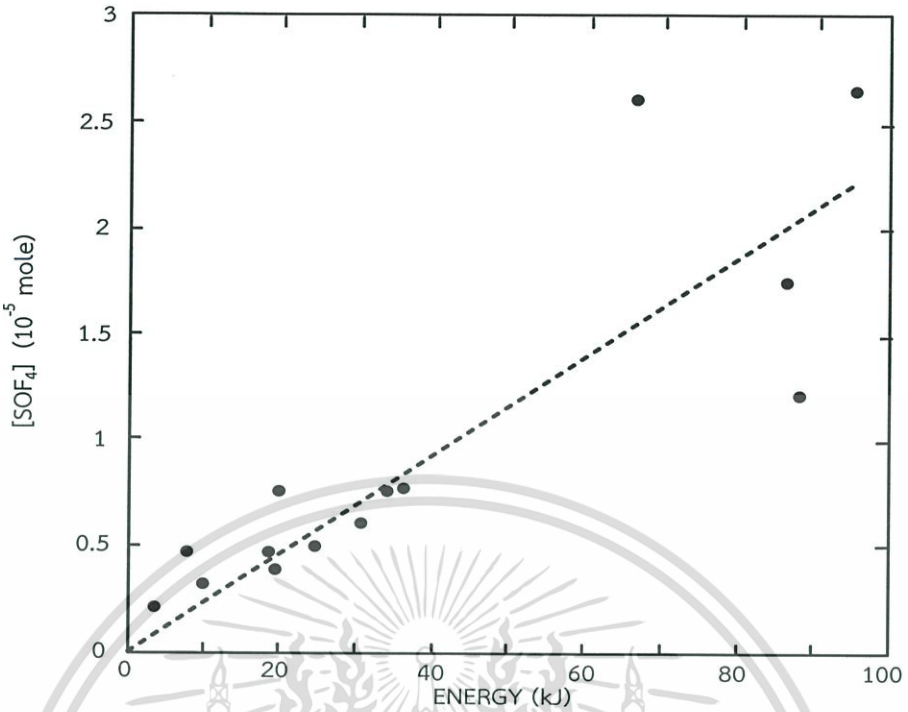
$$SF_4 + SiO_2 \longrightarrow SiF_4 + SO_2$$
$$2SOF_2 + SiO_2 \longrightarrow SiF_4 + 2SO_2$$
$$4HF + SiO_2 \longrightarrow SiF_4 + 2H_2O$$

ภายในส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะมีตัวนำ ตัวถัง และตัวดูดซับก๊าซสิ่งเจือปนต่าง ๆ ซึ่งทำจากอลูมิเนียม ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาขึ้นภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าของ GIS นั้นจะเกิดความร้อนส่วนเกินขึ้น อาจส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างอลูมิเนียมร้อนกับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวเกิดเป็นโลหะฟลูออไรด์ ซึ่งการก่อตัวที่เป็นไปได้คือ

$$6HF + Al_2O_3 \longrightarrow 2AlF_3 + 3H_2O$$
$$3SOF_2 + Al_2O_3 \longrightarrow 2AlF_3 + 3SO_2$$
$$3SF_4 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 4AlF_3 + 3SO_2$$

โดยทั่วไปนั้น SOF_4 พบเป็นอันดับสองในก๊าซ SF_6 ที่เกิดสปาร์ก เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วแล้วคงที่ภายในหนึ่งชั่วโมง สิ่งที่แตกต่างกับ SOF_2 คือไม่มีความสัมพันธ์กับความดัน แต่ยังสัมพันธ์กับพลังงานการดิสชาร์จรวม ดังแสดงในรูปที่ 2.23 เมื่อเกิด SOF_4 แล้วสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำได้เป็น SO_2F_2 และ 2HF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



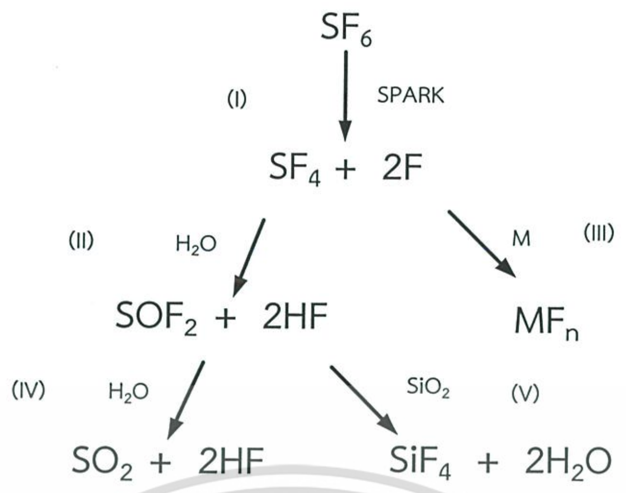
รูปที่ 2.23 ปริมาณของ SOF_4 ที่เกิดขึ้น ที่เวลามากกว่าหนึ่งชั่วโมงหลังจากการสปาร์ก กับพลังงานการดิสชาร์จรวม [8]

โดยปริมาณของ SO_2F_2 ที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นที่น้อยกว่า 2% ของความเข้มข้น SOF_2 โดยเพิ่มขึ้นตามเวลาจนถึงค่าคงที่หลังจากการดิสชาร์จประมาณ 20 ชั่วโมง ไม่ขึ้นอยู่กับความดันแต่มีความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นกับพลังงานดิสชาร์จรวม ส่วนปริมาณของ SO_2 มีความเข้มข้นเพียงประมาณ 0.5% ของความเข้มข้น SOF_2 เท่านั้น ไม่มีความสัมพันธ์กับทั้งพลังงานและความดัน ดังนั้นลำดับปริมาณของผลิตภัณฑ์เสถียรที่สำคัญจากการเกิดดิสชาร์จ (หลังจากเวลานานพอที่จะแปลง SF_4 ไปเป็น SOF_2) พบว่าเป็น

$$SOF_2 > SOF_4 > SiF_4 > SO_2F_2 > SO_2$$

โดยปริมาณ SOF_2 มีมากกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนทั้งหมด (มักจะ 90%) โดยผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเหล่านี้มีความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนของการสปาร์ก ปริมาณของ SOF_2, SiF_4 และ SO_2F_2 เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ตามเวลา ถึงค่าสูงสุดเป็นเวลาหลายชั่วโมงหลังจากการสปาร์ก ในขณะที่ปริมาณของ SOF_4 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เวลามากกว่าครึ่งชั่วโมง นอกจากนี้ ออกซิเจนยังอาจมีผลต่อกลไกการสร้าง SOF_4 และ SO_2F_2 แผนผังการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสปาร์กแสดงในรูปที่ 2.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แผนผังการเกิดผลิตภัณฑ์หลังจากการสปาร์ก [9]

2.11 ผลของผลิตภัณฑ์จากการสลาย SF_6 [10]

2.11.1 ความเป็นพิษ

ก๊าซ SF_6 บริสุทธิ์เป็นก๊าซที่ปลอดสารพิษ มีความเฉื่อย แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของ SF_6 มีความเป็นพิษเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ได้รับและมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการสปาร์กรวม SOF_2 มีผลกระทบกับปอดของสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสกับก๊าซนี้ โดยความเข้มข้นที่ทำให้หนูตายได้อยู่ที่ประมาณ 100 ppmv เป็นเวลา 60 นาที SF_4, SOF_4 และ HF พบว่ามีผลกระทบต่อปอดที่คล้ายกัน ในทางตรงกันข้าม SO_2F_2 พบว่าเป็นสารประกอบที่ทำให้เกิดการกระตุกได้ ความเข้มข้นที่ทำให้หนูตายอยู่ที่ประมาณ 2000 ppmv เป็นเวลา 60 นาที SO_2F_2 ไม่มีกลิ่น SO_2F_2 กับ SOF_4 มีความเป็นพิษเทียบเท่ากันและเป็นพิษมากกว่า SiF_4 ส่วน SOF_2 มีความเป็นพิษมากกว่า SO_2F_2 ส่วน SO_2 และ HF ก็มีความเป็นพิษเช่นกัน อะลูมิเนียมไตรฟลูออไรด์และคอปเปอร์ฟลูออไรด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เป็นของแข็ง มีความเป็นพิษมาจากก๊าซที่ดูดซับ

2.11.2 ผลกระทบต่อ GIS

การเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซและของแข็งจะลดความเป็นฉนวนของระบบลง หากปล่อยไว้เป็นเวลานานจะเกิดการการกัดกร่อนส่วนต่าง ๆ ของระบบ ส่งผลให้เกิดวาบไฟตามผิวบนพื้นผิวของฉนวน เป็นสาเหตุของความล้มเหลวใน GIS เนื่องจากฉนวนที่เป็นอีพ็อกซีมีการใช้อย่างกว้างขวางใน GIS สารที่มีซิลิกาในฉนวนอีพ็อกซีมีความเสี่ยงที่จะถูกผลกระทบโดยผลิตภัณฑ์จากการสลายตัว หลังจากที่วัสดุได้สัมผัสกับผลิตภัณฑ์จากการสลายตัว 6000 ppmv เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ส่งผลให้ความต้านทานพื้นผิวและความทนทานต่ออิมพัลส์ลดลงครึ่งหนึ่ง ชั้นผิวด้านบนของเรซิน 20 μm ถูกทำให้อิ่มตัวด้วย HF การดูดซับก๊าซ HF ในอีพ็อกซีเรซินทำให้ความต้านทานพื้นผิวเปลี่ยนและแรงดันที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวลดลง เรซินบางประเภทสามารถกลายเป็นตัวนำได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการก่อตัวของเกลือของเอมีน (amine salt) ที่สามารถแยกเป็นไอออนได้ ผงฟลูออไรด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการอาร์ค สามารถดูดซับปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซได้ เมื่อผลิตภัณฑ์ของแข็งที่อยู่ติดกับพื้นผิวฉนวนมีผลทำให้ความเป็นฉนวนลดลง ปัญหาที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ของแข็งจะมีความรุนแรงมากขึ้นเพราะพวกมันไม่สามารถกำจัดออกไปได้อย่างง่ายดาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การกำจัดผลิตภัณฑ์จากการอาร์คของ SF_6

เนื่องจากผลิตภัณฑ์ของ SF_6 มีการกัดกร่อนและอาจส่งผลต่อวัตถุอินทรีย์ในอุปกรณ์ฉนวนก๊าซ การสะสมในปริมาณที่มากเกินไปภายในส่วนประกอบจึงต้องมีการกำจัดออก วัสดุดูดซับได้ถูกวางไว้ภายในเพื่อกำจัดผลิตภัณฑ์ก๊าซและความชื้น วัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นตัวดูดซับคือ อลูมินา (alumina) และชาร์โคล (charcoal) ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งกรัมของอลูมินา (alumina) และชาร์โคล (charcoal) ที่ความดันและอุณหภูมิปกติ แสดงในตารางที่ 2.4

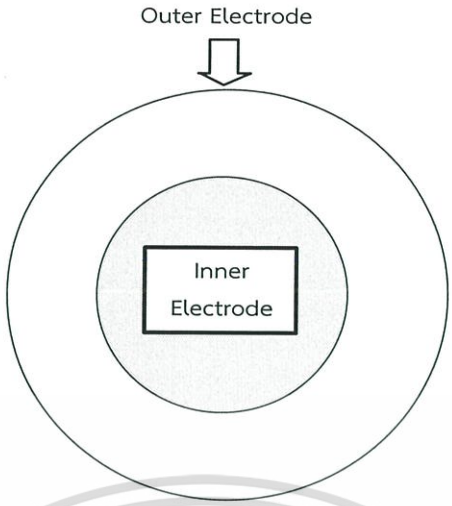
ตารางที่ 2.4 แสดงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งกรัมของอลูมิเนียม และถ่านที่ความดันและอุณหภูมิปกติ [10]

ผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับ	ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับต่ออลูมินา (alumina) หนึ่งกรัม (cm^3)	ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับต่อชาร์โคล (charcoal) หนึ่งกรัม (cm^3)
SOF_2	32	52
SO_2F_2	12	35
SF_4	35	48
SOF_4	20	40
SO_2	38	68

2.13 ความต้านทานพื้นผิวของเรซินที่เคลือบด้วยสารอินทรีย์ในก๊าซ SF_6 [11]

วัสดุฉนวนที่เป็นพอลิเมอร์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะมันสามารถปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ การประยุกต์ใช้วัสดุเหล่านี้ในอุปกรณ์ฉนวนก๊าซ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ฉนวนก๊าซ SF_6 (GCBs) และสวิตช์เกียร์ฉนวนก๊าซ SF_6 (GIS) เป็นที่รู้กันว่าการสลายตัวของก๊าซ SF_6 ส่งผลกระทบกับวัสดุโดยลดความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวของฉนวนและทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน และวาบไฟตามผิว ทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนนั้นเสื่อมลง การเลือกใช้วัสดุฟิลเลอร์ที่มีความทนต่อก๊าซ SF_6 ที่สลายตัวได้สูงเป็นหนึ่งในวิธีการแก้ปัญหา ฉนวนสามารถรักษาคุณสมบัติเดิมไว้ได้หากฟิล์มที่เคลือบช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากก๊าซ SF_6 ที่สลายตัว

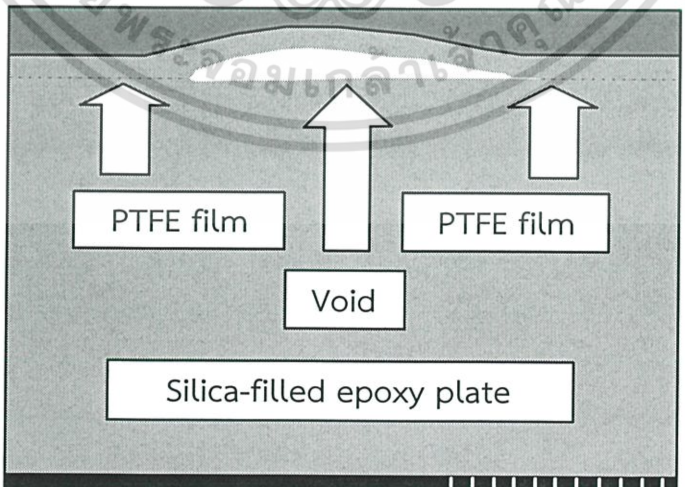
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แผ่นอีพ็อกซีที่เต็มไปด้วยซิลิกาเปลือยหลังจากการวัดต้านทานพื้นผิวในก๊าซผสม SF_4/SF_6

โดยรูปที่ 2.25 แสดงมุมมองภายนอกของแผ่นอีพ็อกซีที่เต็มไปด้วยซิลิกาเปลือย หลังจากการวัดต้านทานพื้นผิวในก๊าซผสม SF_4/SF_6 พบว่าความต้านทานมีค่าลดลงทำให้มีการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยส่วนสีขาวเป็นร่องรอยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารซิลิกาในก๊าซผสม SF_4/SF_6 ในขณะที่ส่วนสีเทาซึ่งถูกปกคลุมด้วยอิเล็กโตรดซึ่งยังคงพื้นผิวเดิม ฟิล์ม PTFE มีความทนต่อก๊าซ SF_6 ที่สลายตัวได้สูง แผ่นอีพ็อกซีที่เคลือบด้วย PTFE มีความหนาของฟิล์มประมาณ 30 μm ถูกนำไปใส่ในก๊าซผสม SF_4/SF_6 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง รูปที่ 2.26 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นอีพ็อกซี มีช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างอีพ็อกซีและฟิล์ม PTFE ช่องว่างนี้ถูกสร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้

$$SF_4 + H_2O \longrightarrow SOF_2 + 2HF$$
$$SiO_2 + 4HF \longrightarrow SiF_4 + 2H_2O$$

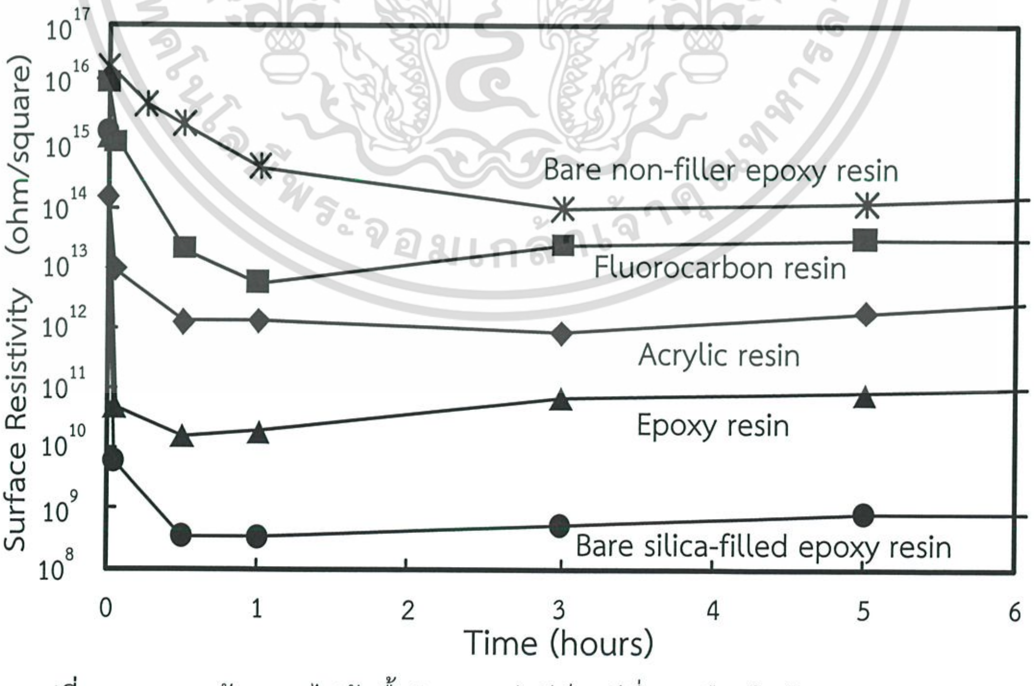


รูปที่ 2.26 ภาพตัดขวางของแผ่นอีพ็อกซี ซึ่งเกิดช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างอีพ็อกซีและฟิล์ม PTFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย SiF_4 ถูกสร้างขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารซิลิกากับก๊าซ HF ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยการสลายตัวของก๊าซ SF_4 ในขณะที่ความดันไอสูง SiF_4 จะระเหย ฟิล์ม PTFE นั้นป้องกันการแพร่กระจายของ SiF_4 และป้องกันก๊าซ SiF_4 ไม่ให้สร้างอยู่ในขอบเขตระหว่างแผ่นอีพ็อกซีกับฟิล์ม PTFE ปรากฏการณ์นี้ก็ขึ้นอยู่กับการแพร่กระจายของ HF ในฟิล์ม PTFE ที่เร็วกว่าการแพร่กระจายของ SiF_4 เป็นเพราะขนาดของโมเลกุล SiF_4 มีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของ HF แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเคลือบที่หนานั้นสามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ HF ลงในฟิล์มเคลือบได้เพื่อรักษาคุณสมบัติเดิมของฉนวนไว้ แต่ในทางปฏิบัติทำได้ยาก จึงหาวัสดุเคลือบอื่น ๆ เช่น อีพ็อกซี, อะคริลิก และเรซินฟลูออโรคาร์บอน อีพ็อกซีได้รับการใช้กันอย่างแพร่หลาย เป็นวัสดุฉนวนในอุปกรณ์ฉนวนก๊าซและความทนสูงต่อก๊าซ SF_6 ที่สลายตัว วัสดุเหล่านี้ถูกนำมาเคลือบบนแผ่นอีพ็อกซีที่เต็มไปด้วยซิลิกาและวัดความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวเหล่านี้ เพื่อให้ได้ฟิล์มเคลือบที่หนาได้ทำการเคลือบหลายครั้งและได้ความหนาของฟิล์มมากกว่า 100 μm แผ่นอีพ็อกซีที่ถูกเคลือบเหล่านี้ถูกใส่ในส่วนผสมของก๊าซ SF_4/SF_6 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและสังเกตภาพตัดขวางของมัน พบว่าไม่มีช่องว่างที่รอยต่อระหว่างแผ่นอีพ็อกซีและฟิล์มเคลือบ

โดยรูปที่ 2.27 แสดงให้เห็นถึงความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวของแผ่นอีพ็อกซีที่ถูกเคลือบในก๊าซผสม SF_4/SF_6 กลุ่มตัวอย่างทั้งหมดมีความต้านทานเริ่มแรกมากกว่า 10^{16} โอห์ม / พื้นที่ ทันทีหลังจากการที่อยู่ในก๊าซผสม SF_4/SF_6 ความต้านทานของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดลดลงอย่างกะทันหันภายในหนึ่งชั่วโมง ยกเว้นแผ่นอีพ็อกซีแบบไม่มีฟิลเลอร์ (non-filler) ความต้านทานคงที่หลังจากหนึ่งชั่วโมงและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นหลังจากนั้น การเปลี่ยนแปลงความต้านทานนี้สะท้อนให้เห็นถึงการสลายตัวของก๊าซ SF_4 ถูกทำให้หยุด เพราะการสูญเสียความชื้นในก๊าซผสม SF_4/SF_6 จะเห็นว่าความต้านทานพื้นผิวของตัวอย่างที่ถูกเคลือบทั้งหมดสูงกว่าของแผ่นอีพ็อกซีที่เต็มไปด้วยซิลิกาเปลือย



รูปที่ 2.27 ความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวของแผ่นอีพ็อกซีที่ถูกเคลือบในก๊าซผสม SF_4/SF_6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

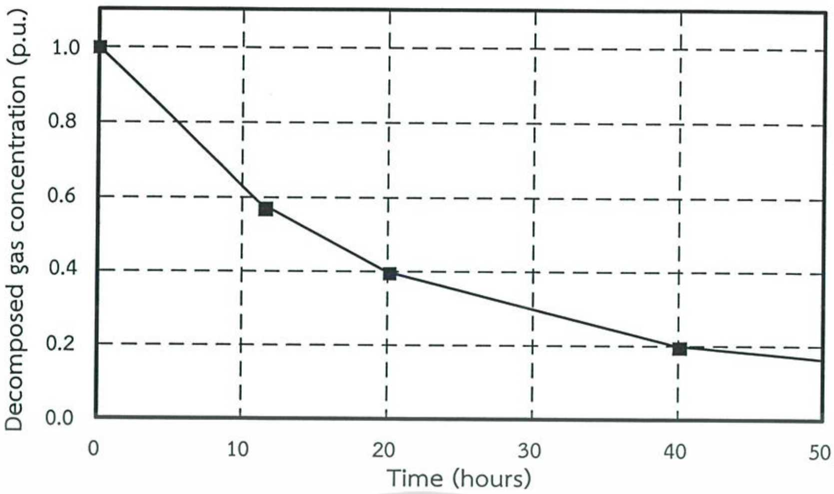
ต้านทานต่ำสุดของแผ่นเคลือบอีพ็อกซีน้อยกว่า 10^{11} โอห์ม / พื้นที่ ในทางตรงกันข้ามความต้านทานของแผ่นอีพ็อกซีเปลือยที่ไม่มีฟิลเลอร์มีเสถียรภาพมากและความต้านทานต่ำสุดมากกว่า 10^{14} โอห์ม /พื้นที่ ปรากฏการณ์นี้สะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของอีพ็อกซีที่ใช้สำหรับเคลือบผิวและการทำเป็นแผ่น อีพ็อกซีที่ใช้สำหรับการหล่อไม่สามารถใช้ได้สำหรับการเคลือบผิวเนื่องจากการที่มีความหนืดสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแบบสเปรย์ ดังนั้นอีพ็อกซีที่มีความหนืดต่ำถูกใช้สำหรับเคลือบ นอกจากนี้จำนวนของตัวทำละลายอินทรีย์ถูกใส่เพิ่มเพื่อลดความหนืด ชี้ให้เห็นว่าปฏิกิริยาทางเคมีบางชนิดสร้างผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวที่นำไฟฟ้าสูงขึ้นบนพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบอีพ็อกซีดังนั้นอีพ็อกซีที่ใช้การเคลือบแบบสเปรย์ไม่สามารถใช้ได้เพราะมันจะเสื่อมลงก๊าซผสม SF_4/SF_6

แผ่นเคลือบอะคริลิกแสดงให้เห็นลักษณะที่มีเสถียรภาพมากกว่าแผ่นเคลือบอีพ็อกซี ความต้านทานต่ำสุดน้อยกว่า 10^{12} โอห์ม / พื้นที่ ซึ่งสูงกว่าของแผ่นเคลือบอีพ็อกซี เรซินฟลูออโรคาร์บอนแสดงให้เห็นลักษณะที่มั่นคงที่สุดในตัวอย่างที่เคลือบทั้งหมด โดยมีความต้านทานต่ำสุดมากกว่า 10^{12} โอห์ม / พื้นที่

อิทธิพลของความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวนั้นเกี่ยวเนื่องกับคุณสมบัติการวาบไฟตามผิว แสดงให้เห็นว่าการลดลงของความต้านทานพื้นผิวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากสนามความจุ (capacitive) ไปเป็นสนามความต้านทาน (resistive) ที่มีการเปลี่ยนแปลงการกระจายสนามไฟฟ้า แสดงให้เห็นโดยการคำนวณสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดใกล้กับ 10^{10} โอห์ม / พื้นที่ ภายใต้รูปแบบของคลื่นกระแสสลับ นอกจากนั้นแรงดันวาบไฟตามผิวลดลงในขณะที่ความต้านทานพื้นผิวลดลงในช่วงที่มากกว่า 10^{10} โอห์ม / พื้นที่ ดังนั้นฟิล์มเคลือบที่มีความต้านทานพื้นผิวสูงมีความเหมาะสม ทำให้เรซินฟลูออโรคาร์บอนมีความเหมาะสมที่สุด

ตัวดูดซับมักจะติดตั้งในอุปกรณ์ฉนวนก๊าซในทางปฏิบัติ ผลของการดูดซับจะเกี่ยวข้องในการประเมินฟิล์มเคลือบ พบว่าไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุเคลือบผิว ถ้าความเข้มข้นของก๊าซ SF_6 ที่สลายตัวในอุปกรณ์ลดลงอย่างรวดเร็วมากเมื่อเทียบกับการลดลงของความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิว รูปที่ 2.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซ SF_6 ที่สลายตัวในการทำงานของ GCB ก๊าซได้ถูกสุ่มตัวอย่างจากก๊าซที่เหมาะสมของอุปกรณ์ การวิเคราะห์ก๊าซด้วยโครมาโทกราฟิกถูกนำมาใช้เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซ SF_6 ที่สลายตัว ความเข้มข้นนี้มีการลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปหลังจากการดับกระแสมีค่าคงที่เวลาประมาณ 30 ชั่วโมง ซึ่งช้ามากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานพื้นผิวที่เกิดขึ้นน้อยกว่าหนึ่งชั่วโมง เนื่องจากการดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีในระยะยาว แต่มีประสิทธิภาพต่ำในระยะสั้น ทำให้การเคลือบที่มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญที่จะป้องกันผลกระทบจากก๊าซ SF_6 ที่สลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ลดลงเทียบกับเวลาหลังจากการดับกระแสของ GCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ

ในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ ก๊าซ SF_6 เป็นก๊าซที่ใช้ในการฉนวน เนื่องจากสามารถทนแรงดันเบรกดาวน์ได้มากกว่าอากาศที่ความดันเท่ากัน และมีคุณสมบัติในการดับอาร์คได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ซึ่งสนามไฟฟ้ามีลักษณะไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ดังนั้นในการซ่อมบำรุงและดูแลรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติของก๊าซ SF_6 ซึ่งเป็นฉนวนหลัก จึงได้มีการออกแบบการทดลอบเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6 เพื่อนำมาเทียบกับก๊าซ N_2 และอากาศ ภายในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยซึ่งในการทดลองนี้ประกอบด้วย

1. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศ ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
2. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ N_2 ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
3. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ SF_6 ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
4. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซผสม SF_6/N_2 ในอัตราส่วน 80/20 และ 60/40 ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
5. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศที่มีอนุภาคประเภทตัวนำและฉนวน ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

ก่อนที่จะทำการทดลอบ จะต้องทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบ (Test Cell) เพื่อนำมาใช้ทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ SF_6, N_2, Air, ก๊าซผสม SF_6/N_2 และ อากาศเมื่อมีอนุภาค โดยการใช้โปรแกรม Solid Works ในการ จำลองรูปแบบ 3 มิติขึ้นมา เพื่อนำไปประกอบสร้างชุดทดสอบจริง เพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติของฉนวนก๊าซภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ (Test Cell)

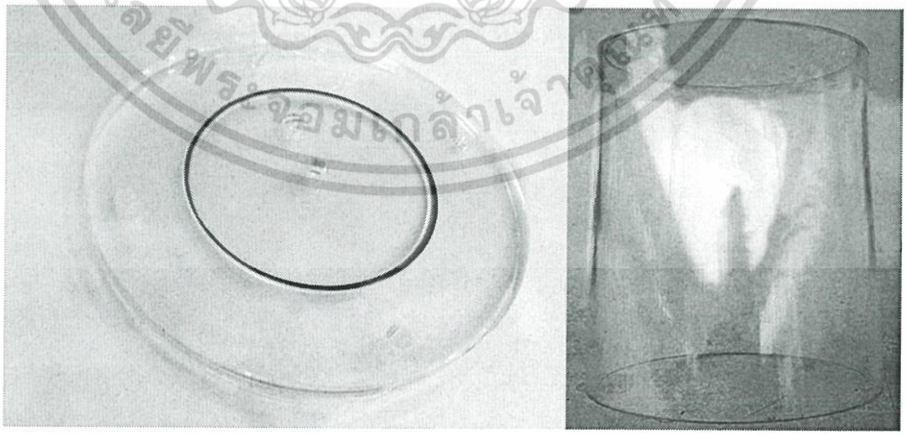
3.1.1 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ

1. ออกแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม Solid Works

-ที่บรรจุฉนวนก๊าซและอิเล็กโตรด

ทำจากวัสดุอะคริลิกใส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 15 cm หนา 5 mm สูง 25 cm ด้านบนและล่างของกระบอกประกอบกับแผ่นอะคริลิกวงกลม เจาะรูสำหรับยึดโครงสร้างของชุดทดสอบและยึดกับแกนตัวนำที่ไว้สำหรับใส่อิเล็กโตรด และทำร่องสำหรับใส่ยางกันซึมในส่วนของรอยต่อ

รูปที่ 3.1 แบบจำลองที่บรรจุฉนวนก๊าซและใส่อิเล็กโตรดของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2, และอากาศ

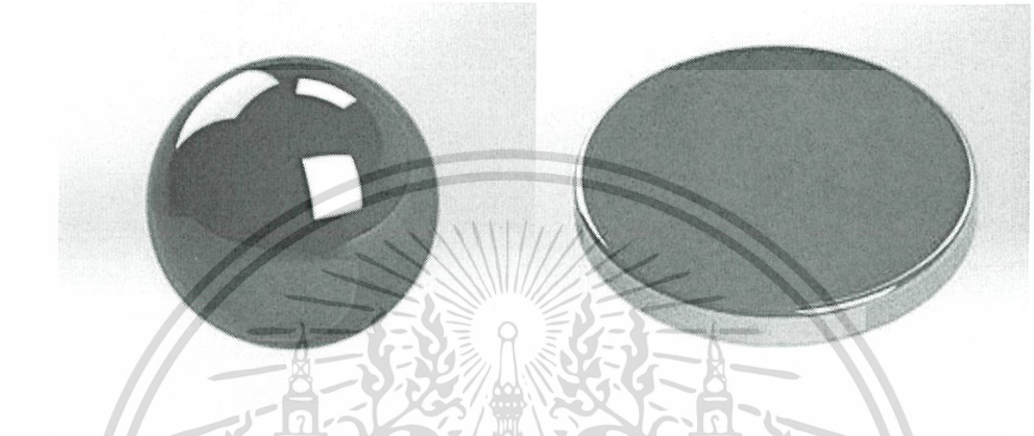


รูปที่ 3.2 ที่บรรจุฉนวนก๊าซและใส่อิเล็กโตรดของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2, และอากาศที่ได้ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-อิเล็กโตรด

หัวอิเล็กโตรดที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60243-1 [12] โดยอิเล็กโตรดทรงกลมทำมาจากวัสดุทองแดง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm และอิเล็กโตรดระนาบทำจากสแตนเลส โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm และมีความหนา 1 cm



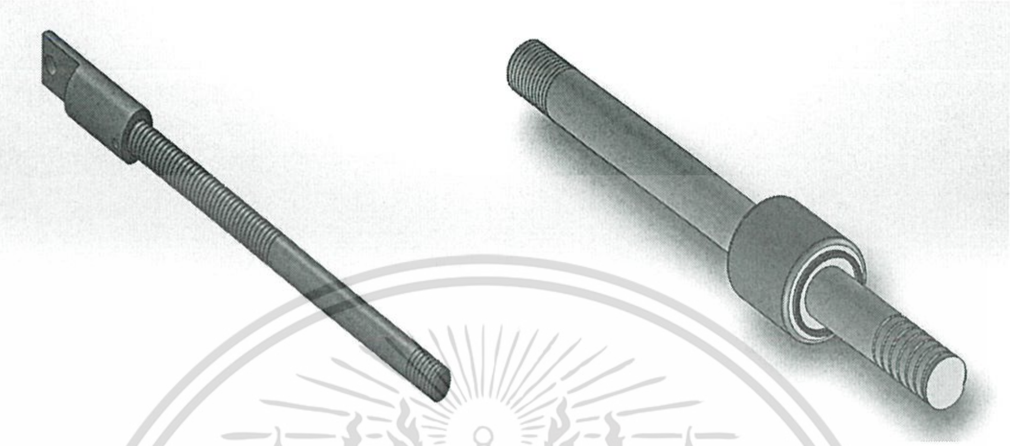
รูปที่ 3.3 แบบจำลองอิเล็กโตรดทรงกลมและระนาบของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2, และอากาศ

รูปที่ 3.4 อิเล็กโตรดทรงกลมและระนาบของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2, และอากาศที่ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แกนตัวนำ

ทำจากทองแดงและสแตนเลสเป็นก้านยาว สำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและทำการเชื่อมต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวนด์



รูปที่ 3.5 แบบจำลองแกนตัวนำสำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและทำการเชื่อมต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวด์

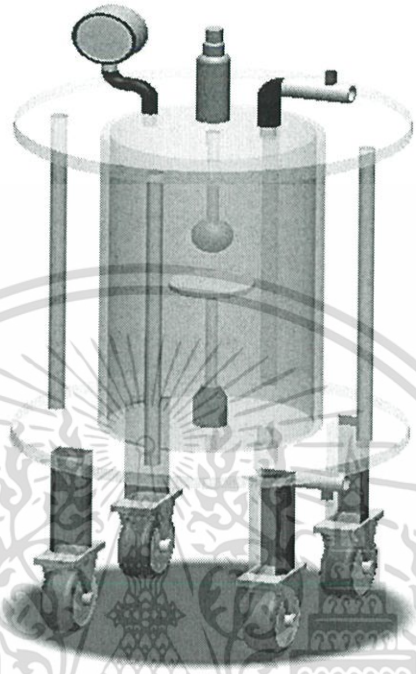
รูปที่ 3.6 แกนตัวนำสำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและทำการเชื่อมต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวด์ ที่ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

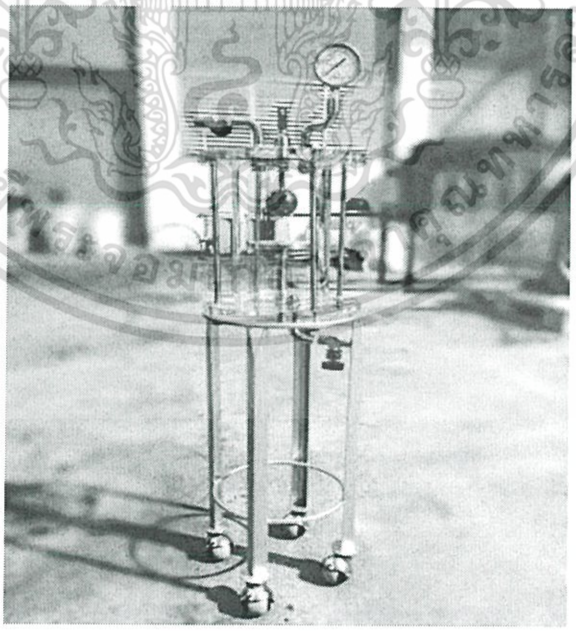
- มาตรวัดความดัน

ใช้ในการวัดความดันของก๊าซที่อยู่ภายในชุดทดสอบ

- ชุดทดสอบ



รูปที่ 3.7 แบบจำลองชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศ

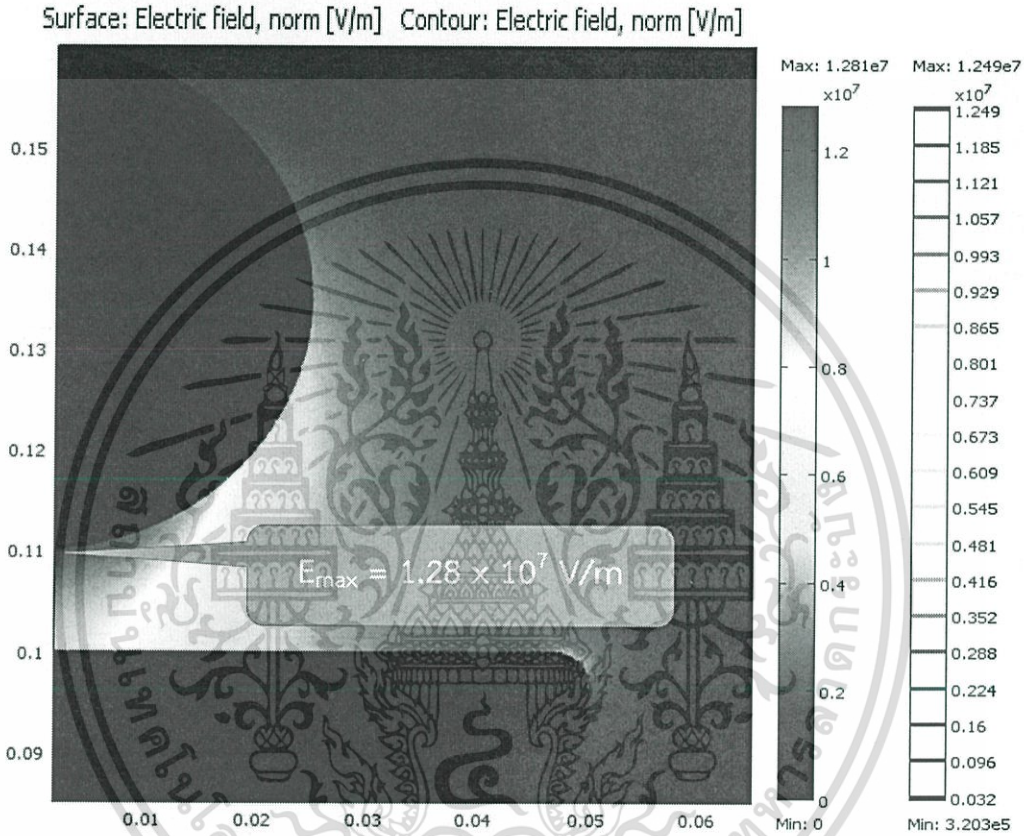


รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศ ที่ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมโซล

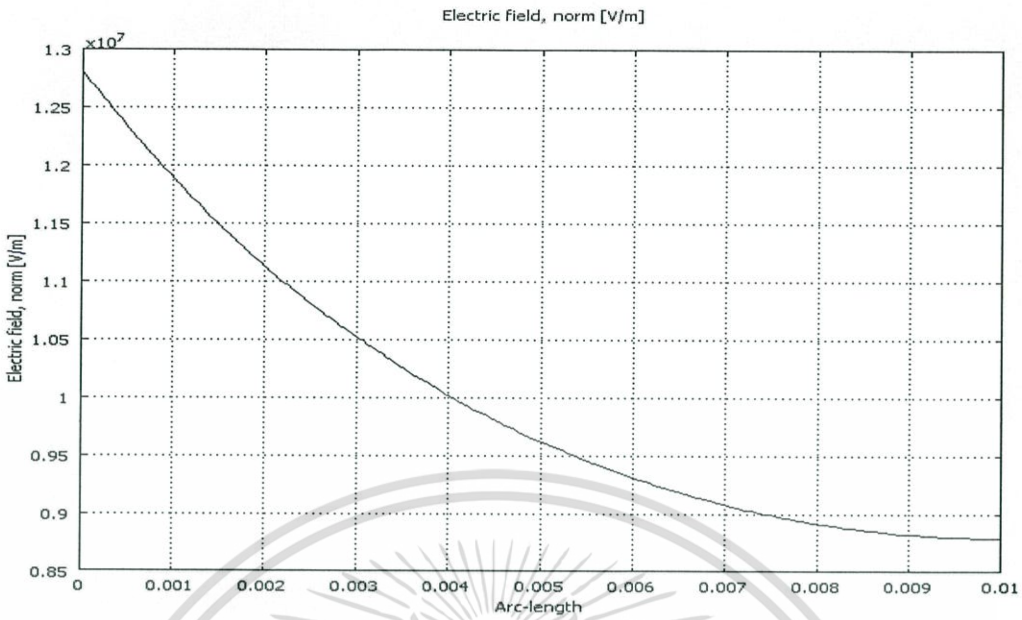
ในการจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้านี้ ได้ทำการป้อนแรงดันขนาด 100 kV ไปที่อิเล็กโตรดทรงกลม และต่อกราวด์ทางด้านอิเล็กโตรดระนาบ ภายในฉนวนก๊าซที่ความดัน 1 bar ระยะแกป 1 cm พบว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่เกิดขึ้นทางด้านอิเล็กโตรดทรงกลมมีค่าเท่ากับ 1.28×10^7 V/m โดยแบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.9 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ

ฉนวนก๊าซที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ อากาศ N_2 และ SF_6 ซึ่งสามารถใช้กับผลการจำลองนี้ได้เนื่องจากฉนวนก๊าซทั้ง 3 ชนิดมีค่า permittivity เป็น 1 เหมือนกัน โดยที่ความดัน 1 bar อากาศ N_2 และ SF_6 สามารถทนความเข้มสนามไฟฟ้าได้ 30, 31 และ 89 kV/cm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



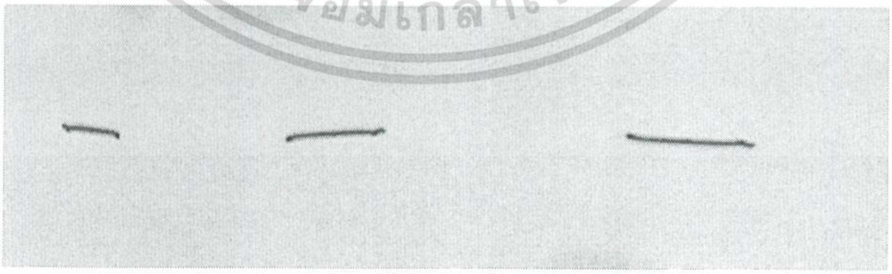
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดของชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ

3.1.2 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศที่มีอนุภาค

1. อนุภาคที่ใช้ในการทดสอบ

- อนุภาคประเภทตัวนำ

ใช้ลวดเย็บกระดาษเบอร์ 10-1M ที่มีความยาวต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ 0.5, 1.0, และ 1.5 cm จำนวนอย่างละ 1 อัน วางอยู่บนอิเล็กโตรดระนาบฝั่งกราวด์

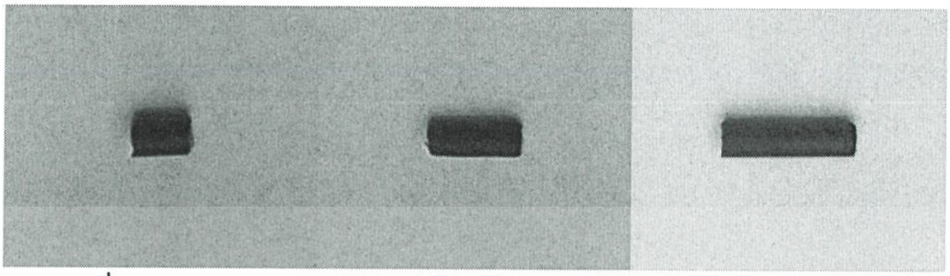


รูปที่ 3.11 อนุภาคประเภทตัวนำ **ขนาด** 0.5, 1.0, และ 1.5 cm **ตามลำดับ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อนุภาคประเภทฉนวน

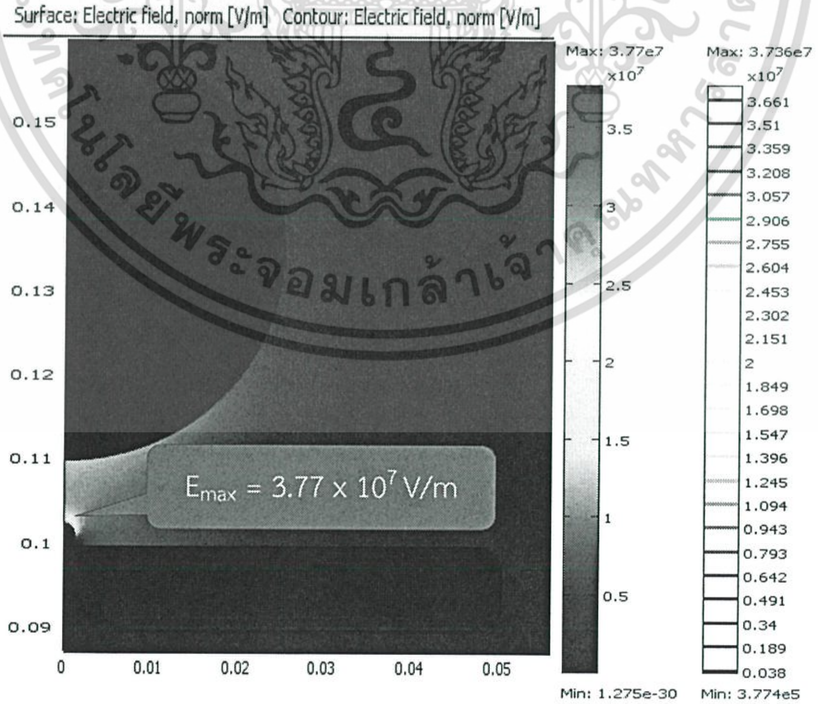
ใช้เป็นฉนวนของสายไฟขนาด 1.5 sq.mm ที่มีความยาวต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ 0.5, 1.0, และ 1.5 cm จำนวนอย่างละ 1 อัน วางอยู่บนอิเล็กโตรดระนาบฝั่งกราวด์



รูปที่ 3.12 อนุภาคประเภทฉนวน **ขนาด** 0.5, 1.0, และ 1.5 cm **ตามลำดับ**

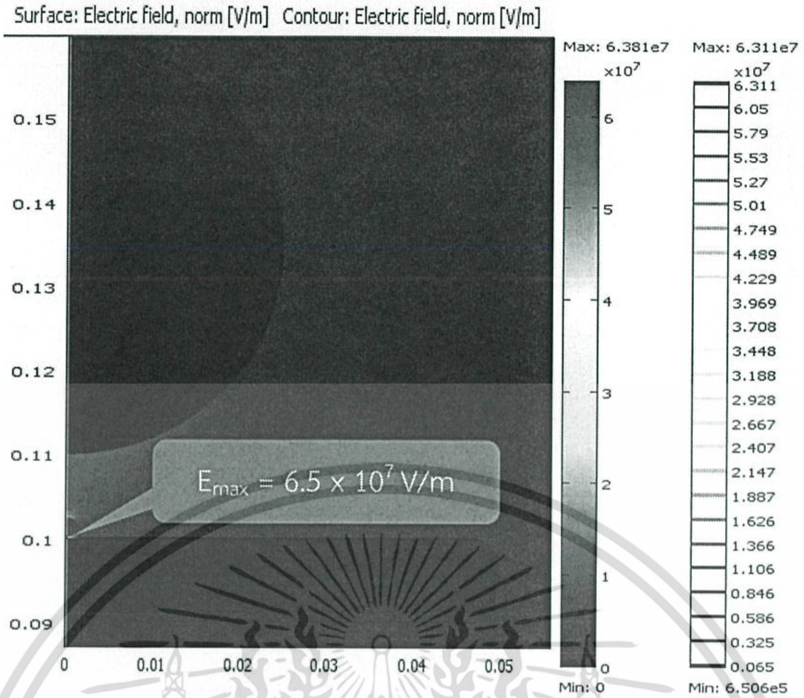
2. การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมโซล

ในการจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของอากาศที่มีอนุภาค ได้ทำการป้อนแรงดันขนาด 100 kV ไปที่อิเล็กโตรดทรงกลม และต่อกราวด์ทางด้านอิเล็กโตรดระนาบ โดยที่อิเล็กโตรดฝั่งกราวด์มีอนุภาควางอยู่ ภายในฉนวนก๊าซที่ความดัน 1 bar ระยะแกป 1 cm โดยแบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของอากาศที่มีอนุภาคประเภทตัวนำและฉนวน แสดงดังรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศที่มีอนุภาคประเภทตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศที่มีอนุภาคประเภทฉนวน

3.2 การเตรียมฉนวนก๊าซสำหรับการทดสอบ

3.2.1 ฉนวนก๊าซ 3 ชนิด

1. อากาศ : อุณหภูมิ 30°C, ความดัน 762 mmHg, ความชื้นสัมพัทธ์ 74%
2. ก๊าซ N_2 : ความบริสุทธิ์ 99.5%, ความดันบรรจุ 2000 psig ที่ 27 ± 2°C
3. ก๊าซ SF_6 : ความบริสุทธิ์ 99.99%

3.2.2 ฉนวนก๊าซผสม

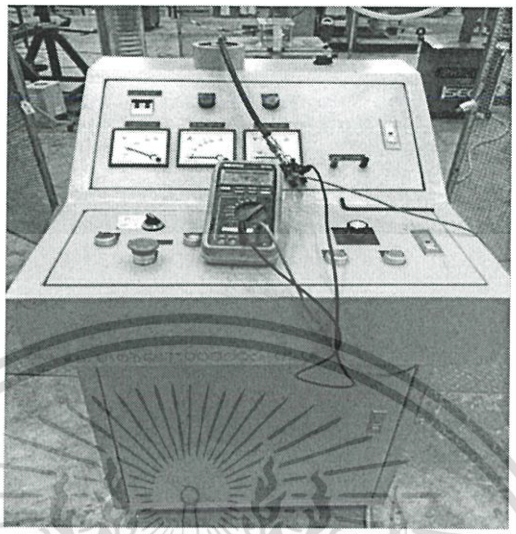
ทำการผสมก๊าซ SF_6 กับ N_2 ในอัตราส่วน 80% กับ 20% และ 60% กับ 40% เข้าไปในชุดทดสอบ

รูปที่ 3.15 ชนิดของฉนวนก๊าซสำหรับการทดสอบ
1.อากาศ 2.ก๊าซ N_2 3.ก๊าซ SF_6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

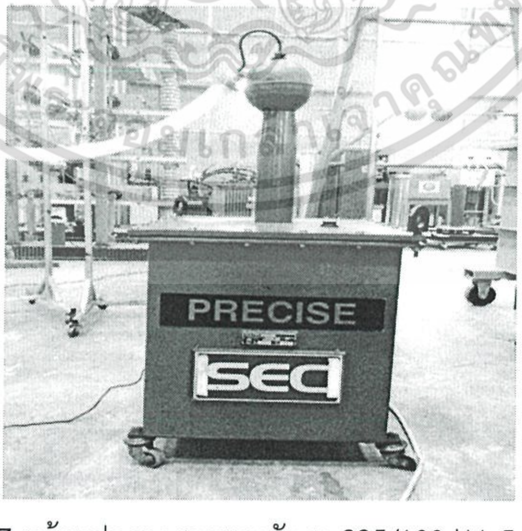
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ

1. วาริแอคสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.16 วาริแอคสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า

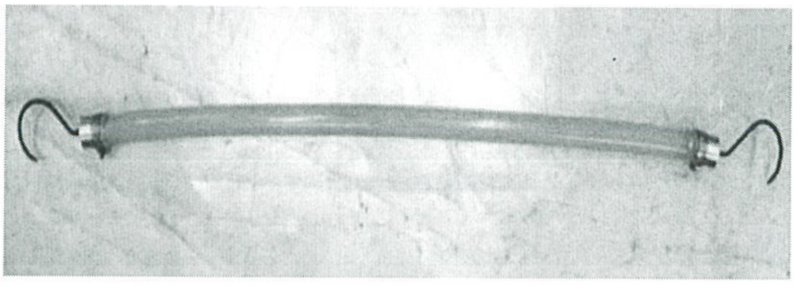
2. เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ พิกัด 100 kV 50 mA
- Rated Power 5 kVA
- Input Voltage Max. 300 V 50 Hz
- Output Voltage 100 kV 1 P
- Output current 50 mA
- Frequency 50 Hz



รูปที่ 3.17 หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 235/100 kV, 5 kVA

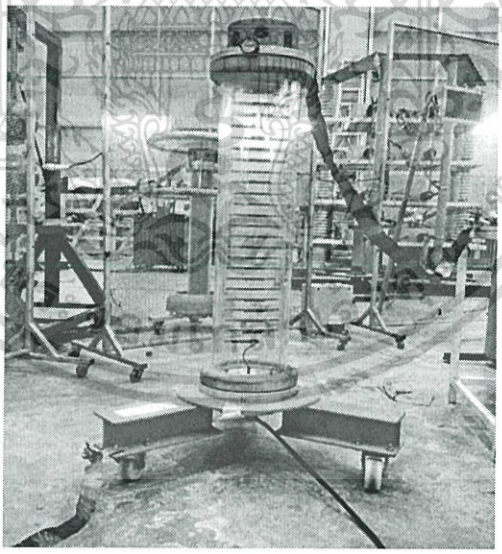
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตัวต้านทานน้ำ



รูปที่ 3.18 ตัวต้านทานน้ำ

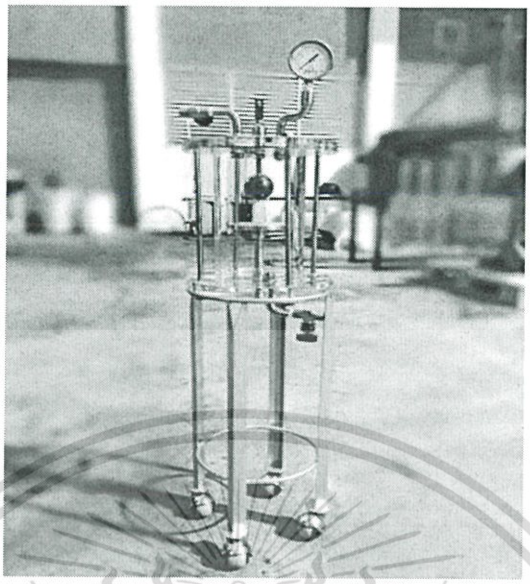
4. โวลเตจดิไวเดอร์ พิกัด 100kV บรรจุแก๊ส SF6
- Rated Voltage A.C./D.C./Impulse 100kV.
- Rated Ratio A.C. 980:1/D.C. 985:1/Impulse 993:1
- Rated Capacitance (High) 110 pF
- Rated Capacitance (Low) 110 nF
- Rated Resistance (High) 250 MΩ
- Rated Resistance (Low) 250 Ω
- Frequency 50 Hz



รูปที่ 3.19 โวลเตจดิไวเดอร์ พิกัด 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ



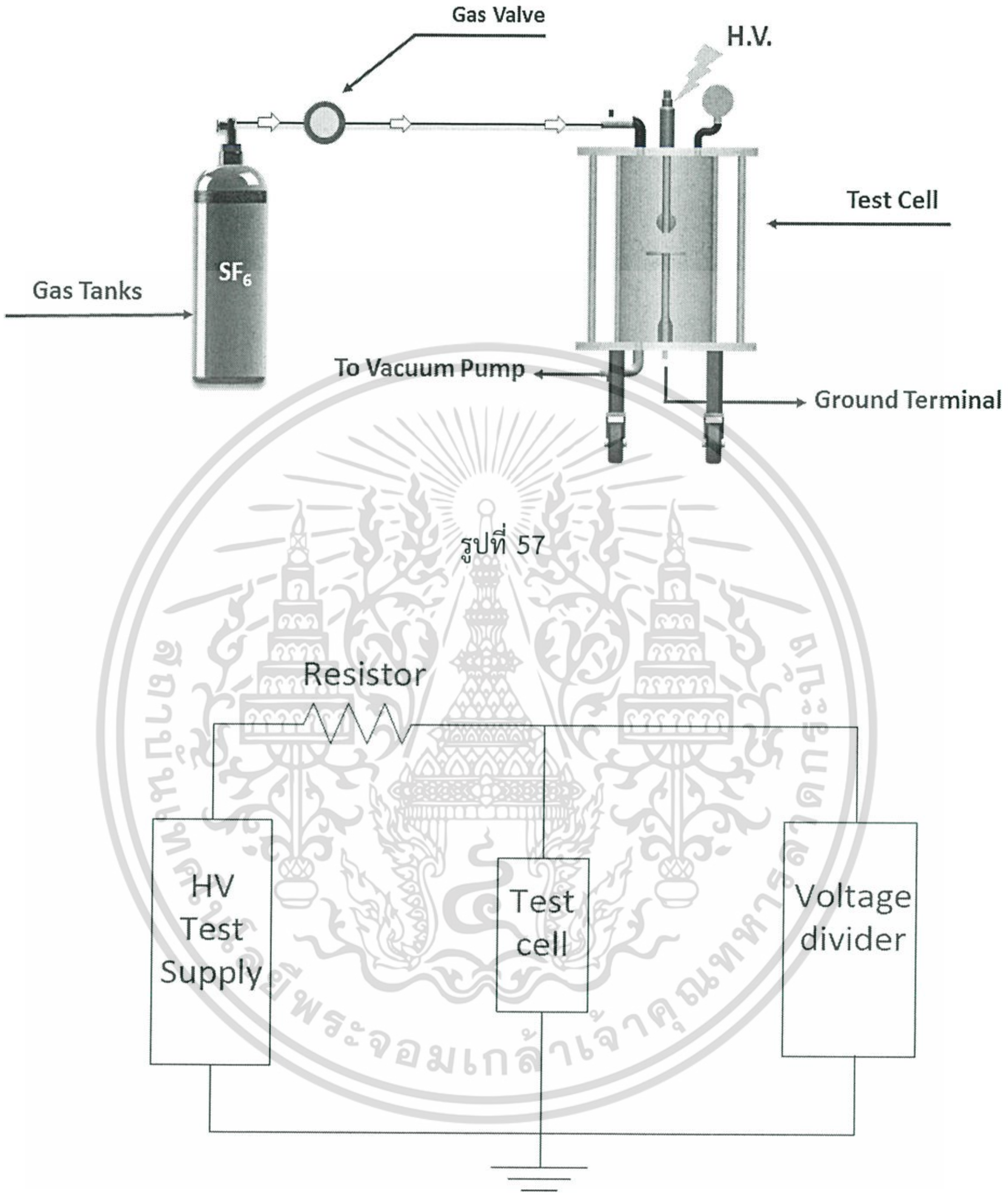
รูปที่ 3.20 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ

6. มัลติมิเตอร์

รูปที่ 3.21 มัลติมิเตอร์ FLUKE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ออกแบบไดอะแกรมการทดลองและวงจรการทดสอบ



รูปที่ 3.23 วงจรการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ของฉนวนก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

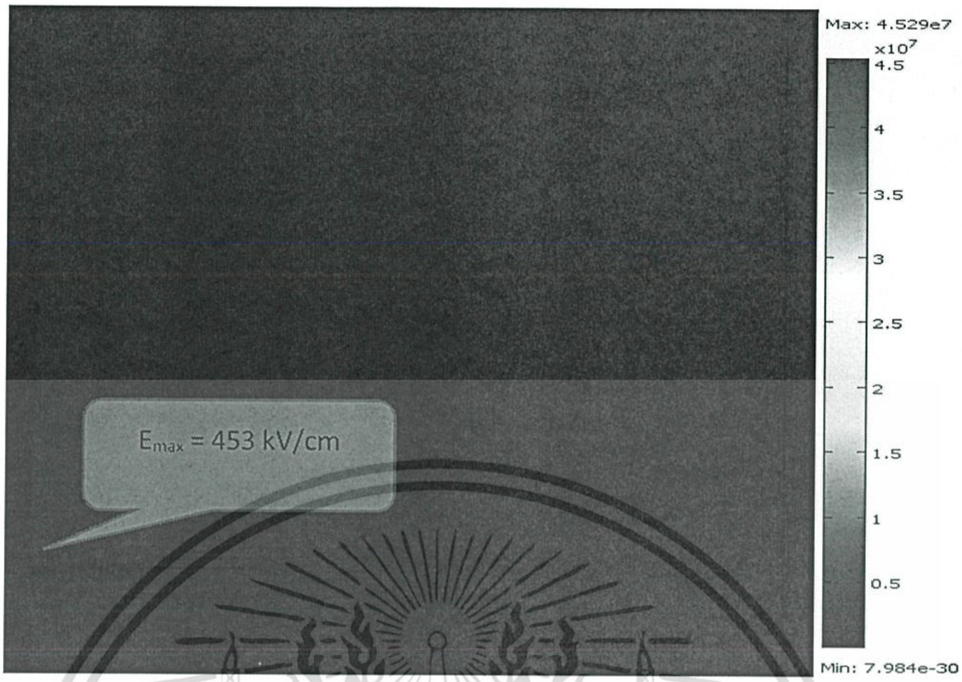
บทที่ 4
การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การจำลองสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction

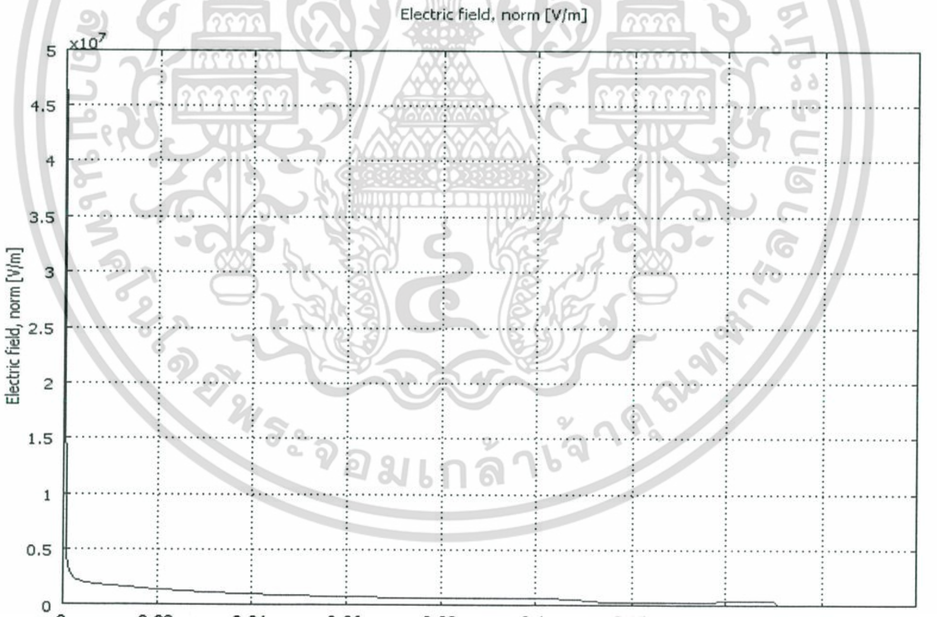
จากการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS) พบว่าใน GIS นั้นนอกจากจะมีก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์เป็นฉนวนแล้ว ยังมีฉนวนแข็งที่ทำมาจากอีพ็อกซีเรซินเป็นฉนวนและส่วนรองรับอุปกรณ์ภายใน GIS อีกด้วย ซึ่งทำให้เกิดจุดรอยต่อของฉนวนก๊าซ ฉนวนแข็งและตัวนำไฟฟ้าเรียกจุดรอยต่อนี้ว่าจุด Triple Junction ซึ่งเป็นจุดที่พบปัญหาและเกิดความเสียหายบ่อย ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction จึงมีความสำคัญในการซ่อมบำรุงรักษา GIS โดยใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ (FEM) ในการจำลองสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction โดยจำลอง Insulation Spacer แบบปิด (Gas Tight Spacer) ซึ่งใช้ในการแยกก๊าซแต่ละคอมพาร์ทเมนต์ใน GIS อยู่ในตัวถังของ GIS ป้อนแรงดันเข้าบัสบาร์ 100 kV กำหนดตัวถังเป็นอิเล็กโตรดด้านกราวด์ กำหนดให้ค่า Relative permittivity (ε_r) ของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์มีค่าเท่ากับ 1 และค่า ε_r ของ Gas Tight Spacer เป็น 3.9 เนื่องจาก Gas Tight Spacer ทำมาจากอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งมีค่า ε_r อยู่ระหว่าง 3.2-3.9[6]

รูปที่ 4.1 Insulation Spacer แบบปิด (Gas Tight Spacer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าสูงสุดที่จุด Triple Junction



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและระยะแกป

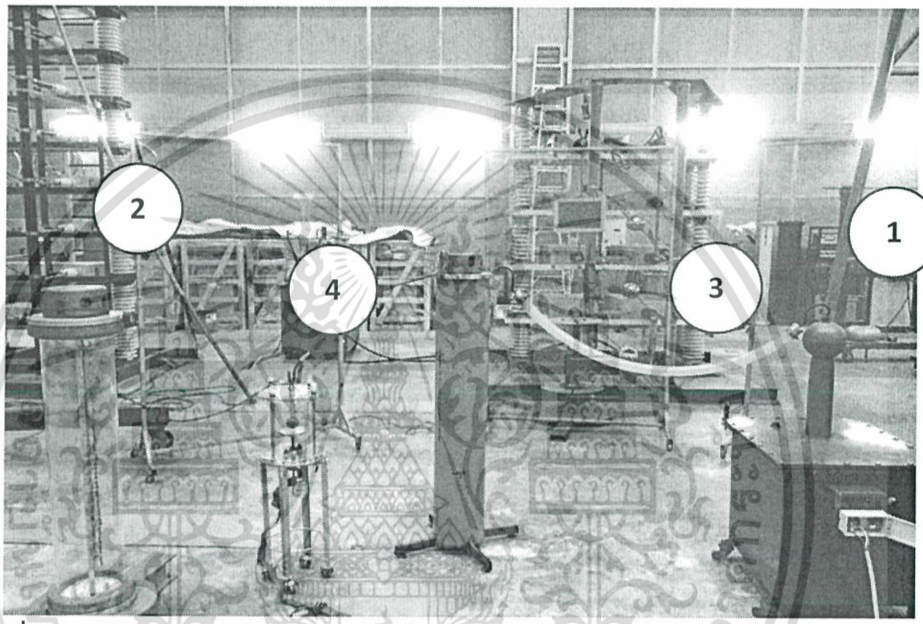
พบว่ามีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงอนันต์ที่จุดรอยต่ออิเล็กโตรดด้านแรงสูงและเข้าใกล้ศูนย์ที่จุดรอยต่ออิเล็กโตรดด้านกราวด์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ

เนื่องจาก GIS ใช้ก๊าซ SF_6 เป็นฉนวนดังนั้นความเข้าใจในทฤษฎีเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซมีความสำคัญในการใช้ซ่อมบำรุง GIS จึงได้ออกแบบชุดทดสอบเพื่อทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยซึ่งจะทดสอบฉนวนก๊าซ 3 ชนิด ได้แก่ อากาศ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)

4.2.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.4 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ
1.หม้อแปลงทดสอบ 2.โวลเตจดิไวเดอร์ 3.ตัวต้านทานน้ำ 4.ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันของฉนวนก๊าซ

4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.4
2. นำก๊าซใส่ลงไปในชุดทดสอบจากนั้น อัดฉนวนก๊าซลงในชุดทดสอบโดยให้ฉนวนก๊าซอยู่ในระดับความดันที่ต้องการทดสอบ
3. ตรวจสอบฉนวนก๊าซที่ถูกอัดลงในชุดทดสอบว่ามีการรั่วซึมอยู่หรือไม่โดยใช้น้ำสบู่ป้ายไปตามข้อต่อ ถ้ามีการรั่วให้ขันน็อตแน่นขึ้น จนกว่าฟองสบู่ที่มีจะหายไปจนหมด
4. จดบันทึกค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ
5. ทำการป้อนแรงดันโดยให้อัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ 2 kV/s จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ฉนวนก๊าซ
6. บันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดแรงดัน
7. เมื่อฉนวนก๊าซที่ใช้ทดสอบเกิดการเบรกดาวน์ จากนั้นตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ระยะเวลา 2 นาที
8. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5-7 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะทดสอบครบจำนวน 6 ครั้ง

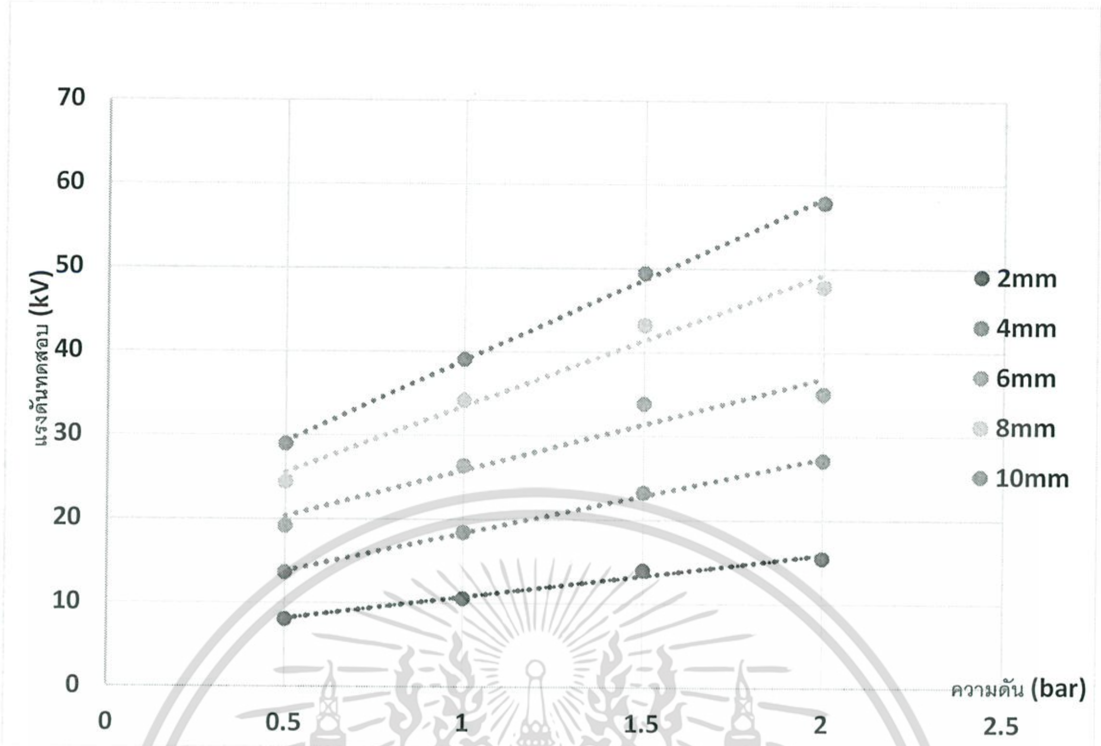
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการทดสอบ

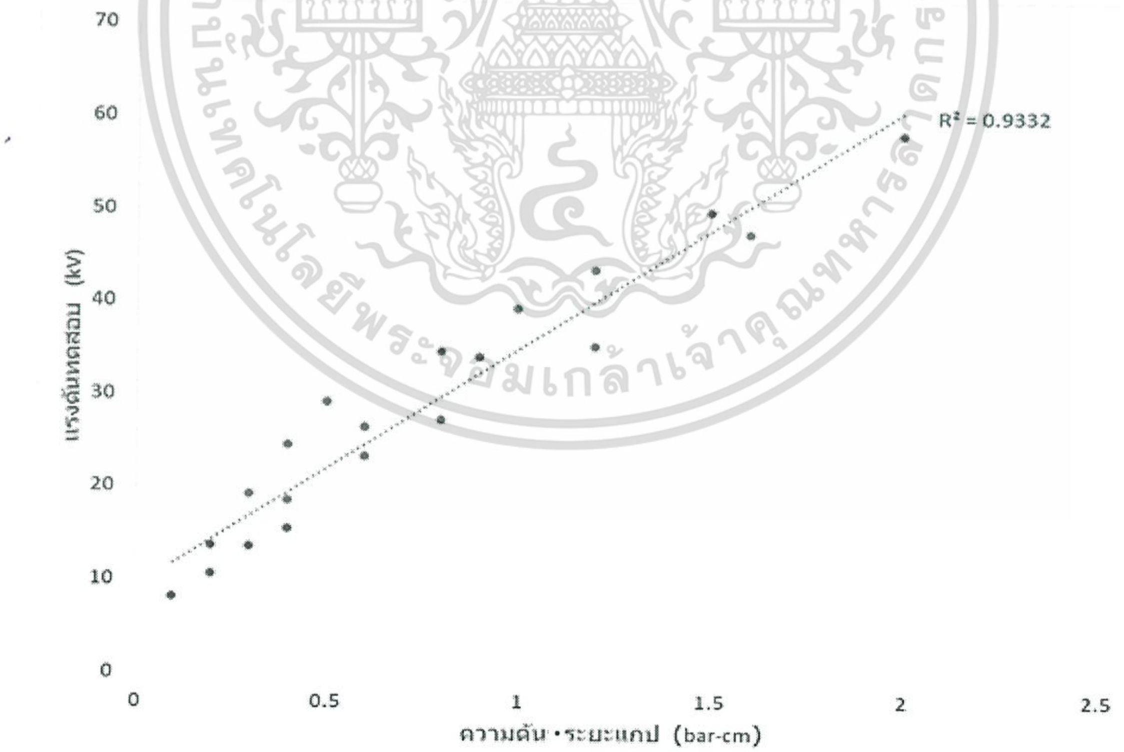
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซอากาศที่ความดันและระยะแกปต่างๆ

ระยะแกป (mm)	ความดัน (bar)	ค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ (kV)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ค่าเฉลี่ย
2	0.5	7.89	8.81	7.85	7.89	7.75	8.02	8.04
	1	11.74	10.35	10.23	10.41	10.15	10.28	10.53
	1.5	13.72	14.07	13.53	14.28	14.17	14.04	13.49
	2	16.73	14.97	14.91	15.16	15.12	15.76	15.44
4	0.5	13.48	13.81	13.35	13.53	13.78	13.74	13.62
	1	18.28	18.71	18.11	18.38	18.48	18.62	18.43
	1.5	23.41	23.08	23.16	23.35	23.22	23.18	23.23
	2	27.17	26.58	26.89	27.53	27.14	27.22	27.09
6	0.5	18.83	19.23	19.12	19.46	19.18	19.18	19.17
	1	26.43	26.16	26.35	25.56	26.28	26.35	26.36
	1.5	34.81	33.87	33.41	33.45	33.87	33.65	33.84
	2	33.84	35.13	35.23	35.17	36.26	34.62	35.04
8	0.5	24.68	24.25	24.33	24.54	24.53	24.51	24.47
	1	33.65	33.78	33.94	34.54	34.61	34.83	34.43
	1.5	42.71	43.41	43.45	43.51	43.47	42.74	43.22
	2	45.37	48.62	46.74	48.63	48.62	48.82	47.08
10	0.5	28.48	28.78	28.93	39.02	39.35	29.38	28.99
	1	39.68	38.82	39.24	39.16	38.95	38.65	39.08
	1.5	49.34	49.45	49.49	49.57	49.59	49.04	49.41
	2	58.62	58.43	58.55	58.37	54.07	59.07	57.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับความดันที่ระดับต่างๆ



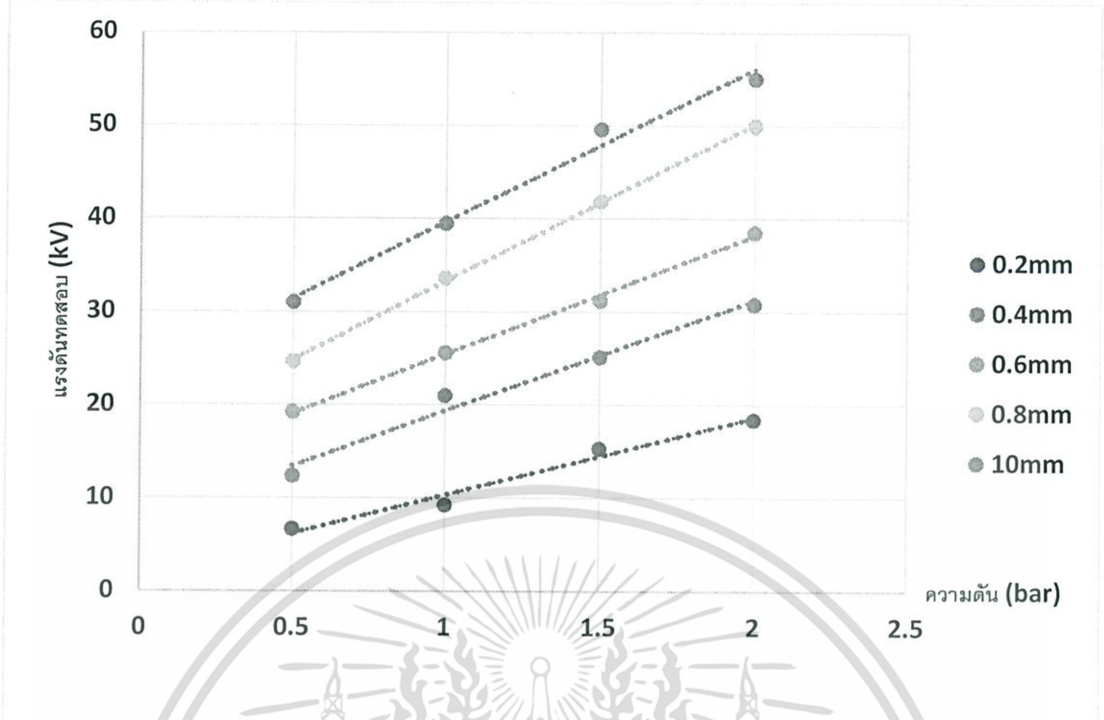
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับความดันคูณกับระยะแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

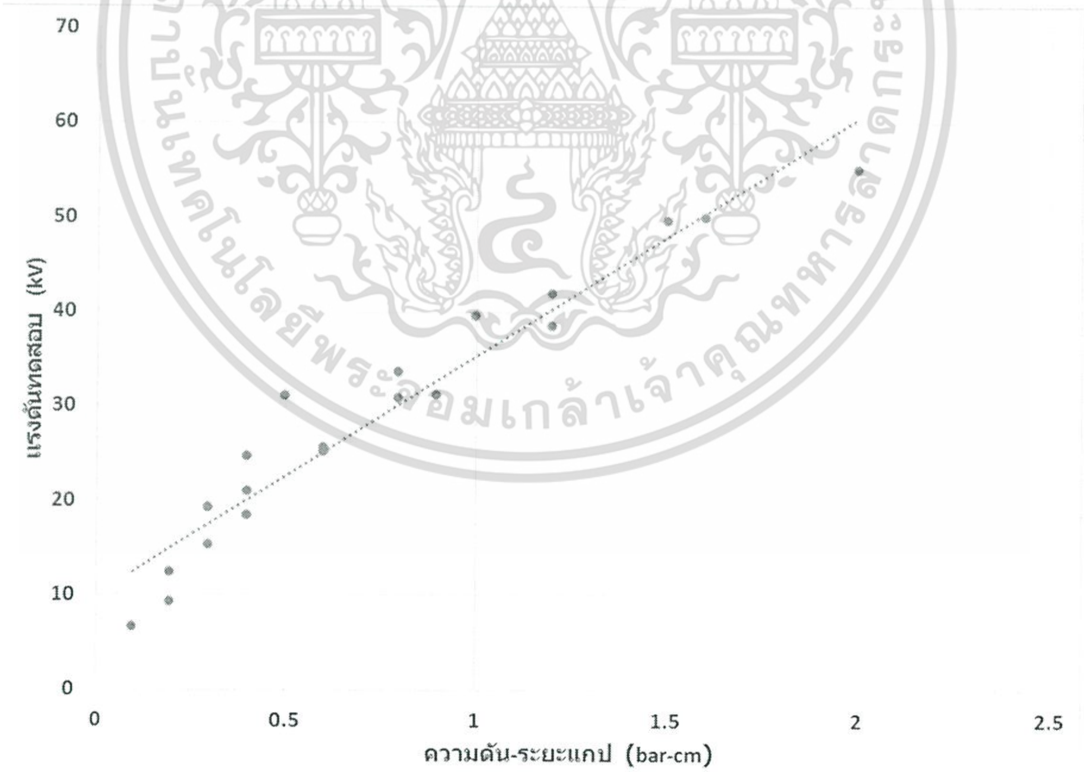
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซไนโตรเจนที่ความดันและระยะแกปต่างๆ

ระยะแกป (mm)	ความดัน (bar)	ค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ (kV)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ค่าเฉลี่ย
2	0.5	6.27	6.35	6.96	6.83	6.56	6.37	6.56
	1	9.25	9.37	9.16	9.11	9.2	9.31	9.23
	1.5	15.11	15.35	14.96	15.41	15.35	15.67	15.31
	2	18.01	18.66	17.78	18.47	18.25	19.17	18.39
4	0.5	12.84	12.24	12.06	12.17	12.45	12.55	12.39
	1	21.06	20.84	21.02	21.11	20.86	21.04	20.99
	1.5	25.62	25.37	25.33	24.47	24.62	25.22	25.11
	2	18.01	18.66	17.78	18.47	18.25	19.17	18.39
6	0.5	19.24	19.29	19.03	19.32	19.21	19.17	19.21
	1	25.45	25.49	25.91	25.3	25.66	25.49	25.55
	1.5	31.12	31.49	31.28	30.76	31.07	31.24	31.16
	2	38.87	38.02	37.92	38.69	38.75	38.72	38.5
8	0.5	24.83	24.72	24.58	24.69	24.34	24.59	24.63
	1	33.75	33.54	33.45	33.47	33.81	33.32	33.56
	1.5	42.1	41.9	41.7	41.5	42.1	41.7	41.83
	2	50.4	48.5	50.3	50.2	49.7	50.7	49.97
10	0.5	31.16	30.74	31.13	30.77	30.86	31.25	30.99
	1	39.31	39.56	39.27	39.17	40.07	39.44	39.47
	1.5	49.6	49.3	49.5	49.2	50.1	49.8	49.58
	2	53.9	56.8	56.7	51.4	54.9	56.3	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซไนโตรเจนกับความดันที่ระดับต่างๆ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซไนโตรเจนกับความดันคูณกับระยะแกป

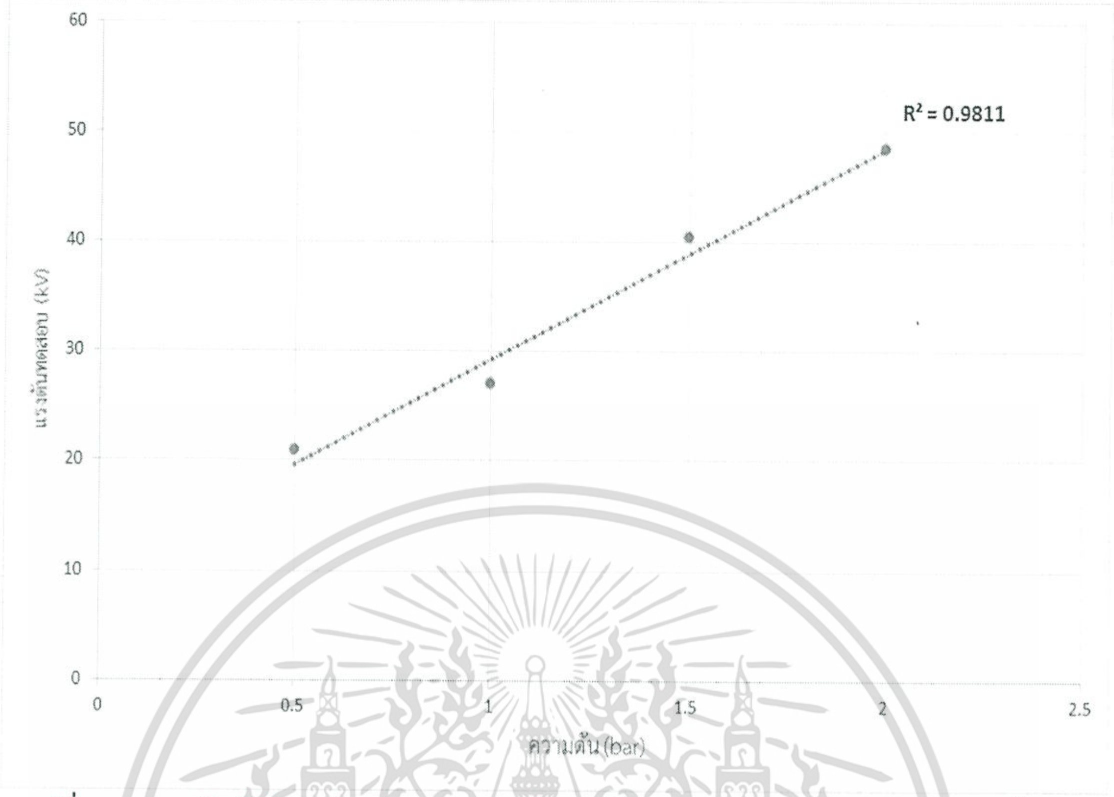
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ SF_6 ที่ความดันและระยะแกปต่างๆ

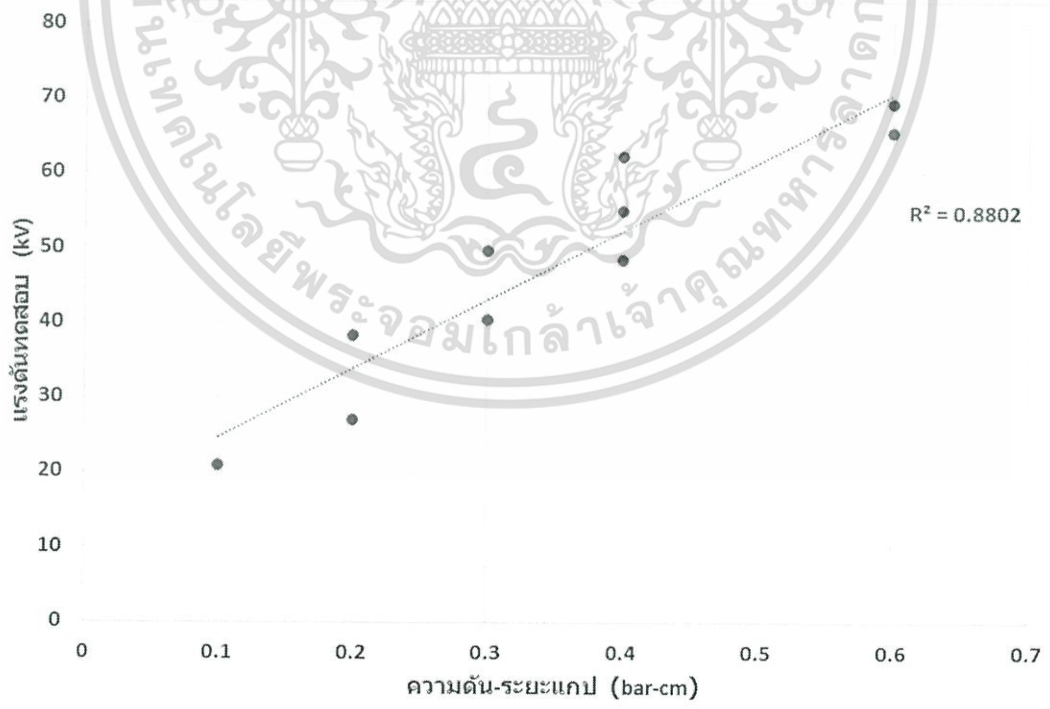
ระยะแกป (mm)	ความดัน (bar)	ค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ (kV)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ค่าเฉลีย
2	0.5	20.82	20.73	20.54	21.12	20.83	20.85	20.82
	1	26.72	26.74	27.16	26.54	26.83	27.57	26.93
	1.5	40.5	40.2	39.8	41.1	40.7	39.6	40.32
	2	50.3	47.8	47.5	48.6	48.4	47.9	48.42
4	0.5	38.61	38.42	37.93	37.87	38.27	38.16	38.23
	1	55.9	54.4	55.6	53.8	54.2	55.3	54.87
	1.5	67.6	63.2	65.9	66.4	65.1	64.8	65.5
	2	>75						
6	0.5	50.6	49.9	49.5	48.5	49.3	50.1	49.65
	1	69.8	69.5	69.7	69.3	68.5	69.6	69.4
	1.5	> 75						
	2							
8	0.5	63.2	61.2	61.7	62.5	61.2	63.5	62.22
	1	> 75						
	1.5							
	2							
10	0.5	>75						
	1							
	1.5							
	2							

*หมายเหตุ เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบมีขนาดพิกัด 100 kV แต่หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงเก่า ดังนั้นเพื่อรักษาการทำงานของหม้อแปลงทดสอบจึงป้อนแรงดันสูงสุดที่ 75เปอร์เซ็นต์ของพิกัดหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของ SF_6 กับความดันที่ระดับต่างๆ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซ SF_6 กับความดันคูณกับระยะแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสม

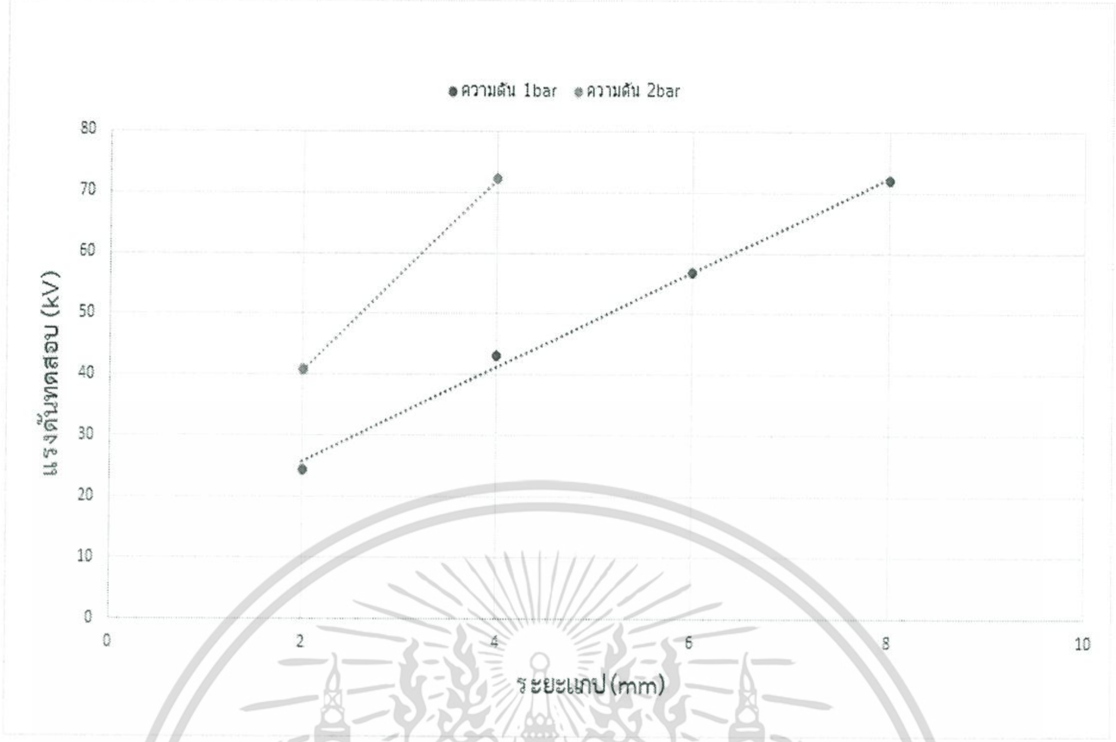
การใช้ก๊าซ SF_6 เป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการรั่วไหลของก๊าซหรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวเมื่อเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 จึงมีการวิจัยเพื่อลดการใช้ก๊าซ SF_6 โดยการนำไปผสมกับฉนวนก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซ N_2 เป็นต้น ดังนั้นจึงทำการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสมในอัตราส่วนต่างๆ

4.3.1 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสมในอัตราส่วน SF_6 : N_2 (80:20) ที่ความดันและระยะแกปต่างๆ

ระยะแกป (mm)	ความดัน (bar)	ค่าความตงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ (kV)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ค่าเฉลี่ย
2	1	24.48	24.29	25.05	23.74	24.56	25.02	24.52
	2	39.17	41.18	40.56	40.17	41.98	42.07	40.86
4	1	44.17	42.92	42.48	43.01	42.54	44.03	43.19
	2	72.3	71.94	72.8	71.04	72.4	72.6	72.18
6	1	56.27	56.73	57.89	56.51	57.02	56.31	56.78
8	1	71.3	72.1	71	72.56	72.45	71.48	71.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

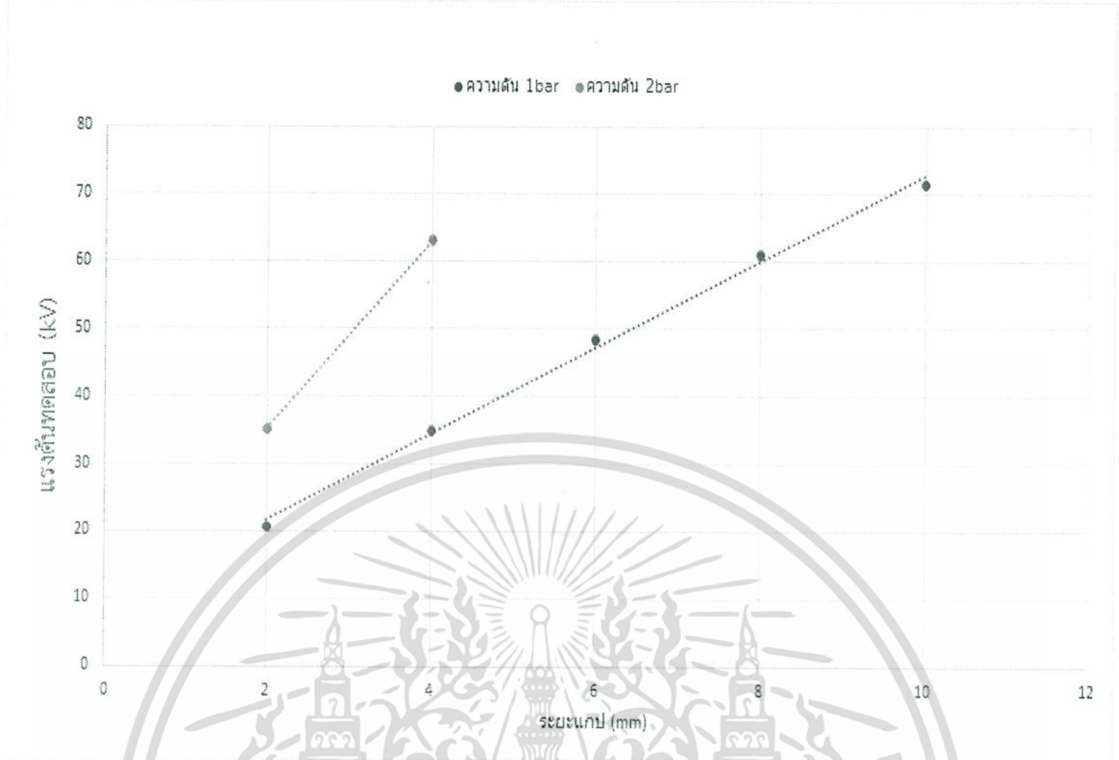


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซผสมในอัตราส่วน SF_6 : N_2 (80:20) กับระยะแกป

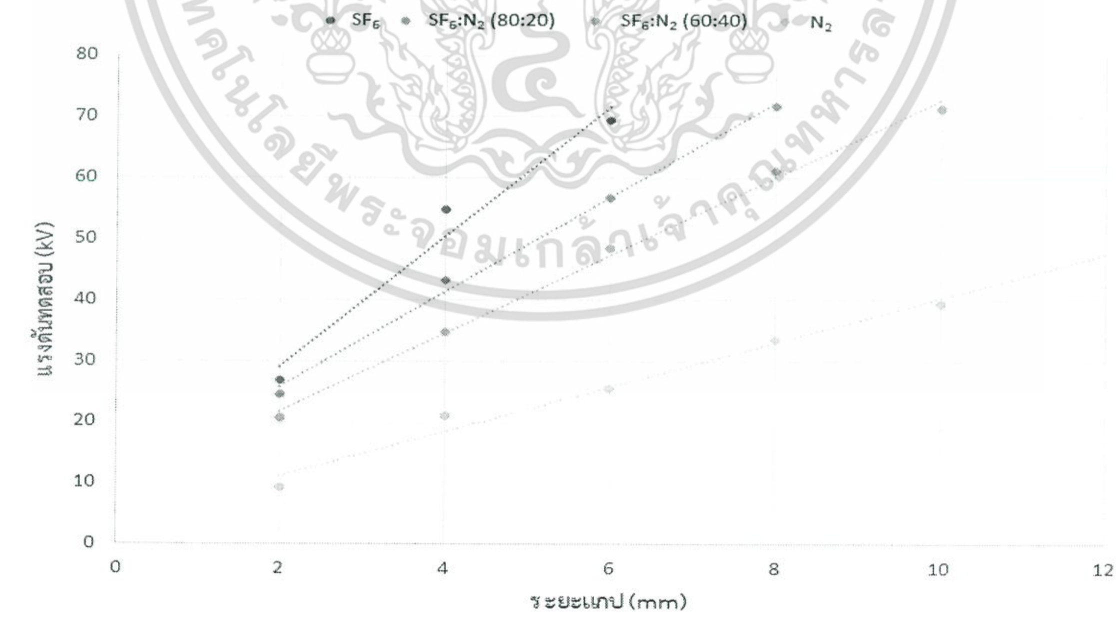
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสมอัตราส่วน SF_6 : N_2 (60:40) ที่ความดันและระยะแกปต่างๆ

ระยะแกป (mm)	ความดัน (bar)	ค่าความตงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ (kV)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ค่าเฉลี่ย
2	1	20.18	20.52	20.8	20.73	20.69	20.71	20.605
	2	33.71	36.67	37.06	36.86	33.06	33.76	35.19
4	1	35.86	34.61	31.87	36.54	34.23	35.81	34.82
	2	63.76	62.94	62.04	63.48	62.31	63.84	63.06
6	1	48.17	48.93	48.74	49.05	47.67	48.2	48.46
8	1	61.73	60.58	60.75	61.24	61.24	61.18	61.12
10	1	71.43	72.1	70.69	70.31	72.52	71.69	71.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซผสมในอัตราส่วน SF_6 : N_2 (60:40) กับระยะแกป



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทดสอบกับระยะแกปของก๊าซ SF_6, SF_6 : N_2 (80 : 20), SF_6 : N_2 (60 : 40) และ N_2 ที่ความดัน 1 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปน

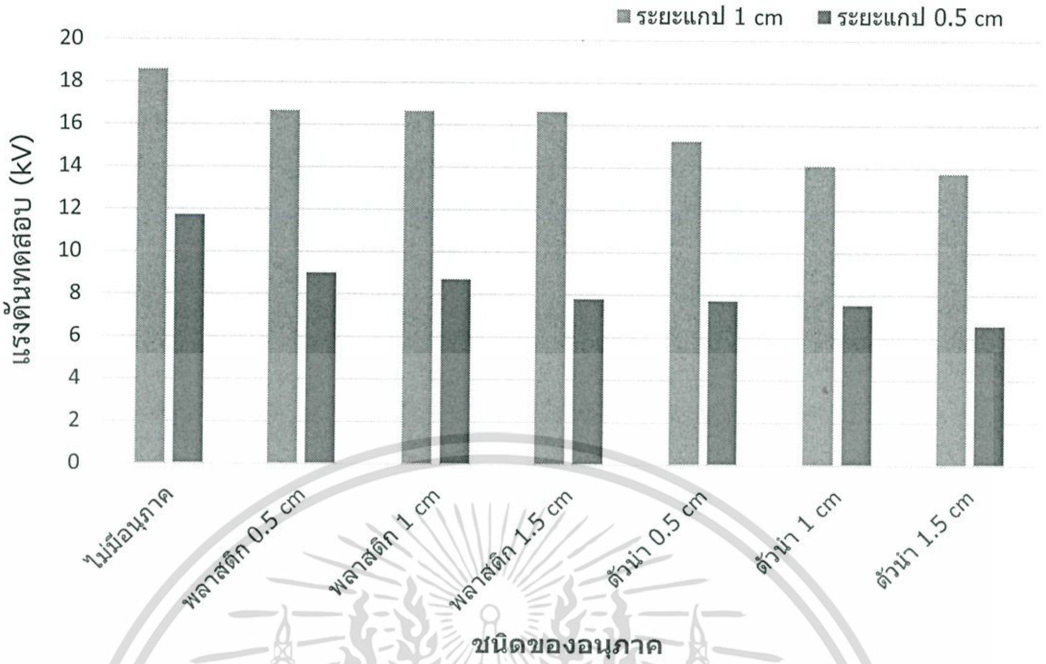
การใช้ฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอาจมีการเจือปนของอนุภาคซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผลิตของตัวฉนวนหรือตัวอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นการศึกษาการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปนจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ โดยใช้อนุภาคโลหะและอนุภาคพลาสติกขนาดต่างๆ เข้าไปเจือปนกับอากาศ เพื่อศึกษาว่าอนุภาคชนิดต่างๆและขนาดต่างๆ จะส่งผลต่อคุณสมบัติของฉนวนก๊าซอย่างไร

4.4.1 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปน

ชนิดของอนุภาค	ระยะแกป (mm)	ค่าความตงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ (kV)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ค่าเฉลี่ย
ไม่มีอนุภาค	5	11.83	11.51	11.67	12.12	11.82	11.42	11.73
	10	18.41	18.62	18.71	18.21	18.95	18.67	18.59
พลาสติก (0.5 cm)	5	8.93	9.34	8.81	8.95	9.22	8.79	9.01
	10	16.61	17.23	15.83	16.17	16.91	17.12	16.65
พลาสติก (1 cm)	5	10.07	7.85	8.21	9.63	8.74	7.81	8.72
	10	16.52	16.48	16.92	16.41	17.23	16.25	16.64
พลาสติก (1.5 cm)	5	7.65	7.87	8.21	8.11	7.67	7.34	7.81
	10	16.72	16.13	16.45	17.12	16.34	16.93	16.62
ตัวนำ (0.5 cm)	5	7.65	8.31	8.31	7.93	7.09	7.16	7.74
	10	14.31	15.07	15.71	15.71	14.37	16.3	15.25
ตัวนำ (1 cm)	5	7.32	7.41	7.53	7.91	7.38	7.83	7.56
	10	14.12	13.71	13.5	13.81	14.52	14.89	14.09
ตัวนำ (1.5 cm)	5	6.18	6.35	7.23	6.72	6.13	6.83	6.57
	10	13.51	14.32	13.84	13.21	14.17	13.43	13.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับอนุภาคที่เจือปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซชนิดต่างๆ ในสนามไฟฟ้าไม่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. จากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศ ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่า อากาศที่ความดัน 2 bar และระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 1 cm มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 57.85 kV และอากาศที่ความดัน 0.5 bar และระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 0.2 cm มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ 8.04 kV

2. จากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ N_2 ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่า ก๊าซ N_2 ที่ความดัน 2 bar และระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 1 cm มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 55.00 kV และ ก๊าซ N_2 ที่ความดัน 0.5 bar และระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 0.2 cm มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ 6.56 kV

3. จากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่า ด้วยขีดจำกัดของอุปกรณ์หม้อแปลงที่ใช้ในการขึ้นแรงดัน ทำให้สามารถทดสอบได้สูงสุดที่ความดัน 1 bar และระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 0.6 cm มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 69.40 kV

4. จากการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสม พบว่าก๊าซผสม SF_6:N_2 ที่อัตราส่วน 80:20 มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับมากกว่าก๊าซผสม SF_6:N_2 ที่อัตราส่วน 60:40 ที่ความดัน และระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน

5. จากการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปน พบว่าอากาศที่มีอนุภาคโลหะเข้าไปเจือปนจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศน้อยกว่าอากาศที่มีอนุภาคพลาสติกเข้าไปเจือปน ที่ความดัน ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดและขนาดของอนุภาคที่เจือปนเท่ากัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ศึกษาการซ่อมบำรุง GIS ระบบ 115 kV ที่โรงไฟฟ้า Glow

เนื่องด้วย GIS ของ AREVA ที่ทางโรงไฟฟ้า GLOW ใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นทางบริษัทผู้ผลิตได้แนะนำให้มีการซ่อมบำรุงในโปรแกรม M4 maintenance ซึ่งจะทำการซ่อมบำรุงโดยทีมงานของ supervisor จากบริษัท ALSTOM ซึ่งจะดำเนินงานในทุก 15 ปีตามคู่มือของ GIS โดยในการซ่อมบำรุงในครั้งนี้จะเป็นการทดสอบคุณภาพก๊าซ SF_6 ที่ใช้เป็นฉนวน Pressure Alarm และตรวจสอบการทำงานของระบบที่มีการ moving ต่างๆ ได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ Disconnector Switch และ Earthing Switch ซึ่งพวกเราได้มีโอกาสไปศึกษาการซ่อมบำรุง GIS ใน 1 เบย์เป็นเวลา 4 วัน ทำให้มีความเข้าใจกระบวนการหน้างานในการซ่อมบำรุง

ตารางที่ 5.1 การซ่อมบำรุง M4 ของ GIS

วันที่	รายการการซ่อมบำรุง
15 ธันวาคม 2559	- การทดสอบ motion และ timing ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ผ่านเมนคอนแทค เพื่อทำการบันทึกค่าก่อนทำการซ่อมบำรุง - ทำการตรวจเช็คการทำงานของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ก่อนทำการซ่อมบำรุง - ทำการตรวจเช็คคุณภาพของก๊าซ SF_6 แต่ละคอมพาร์ทเมนต์ ทุกเฟส โดยทำการวัดความบริสุทธิ์ ปริมาณ SO_2 ความดันของก๊าซ และค่าdew point - ทำการรื้อถอดชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อเตรียมที่จะทำการซ่อมบำรุงในวันต่อไป
16 ธันวาคม 2559	- ทดสอบความหนาแน่นของก๊าซ SF_6 ซึ่งทำการทดสอบการทำงานของ Alarm ในทุกคอมพาร์ทเมนต์ โดยทำการดูดและเติมก๊าซ และวัดความดันของก๊าซเมื่อ Alarm ของ Stage1 และ Stage2 ทำงาน - ถอดชิ้นส่วนของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ออกมาทำความสะอาด และทำการเรียงส่วนต่างๆ ไว้เพื่อรอทำต่อในวันต่อไป - ทำการดูดก๊าซ SF_6 ของคอมพาร์ทเมนต์ G1 และ G9 ออกให้เหลือที่ 0.5 บาร์ ส่วนของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นทำการดูดก๊าซออกมาให้หมด โดยเก็บก๊าซไว้ในถังก๊าซ - เตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือเพื่อใช้ในการซ่อมบำรุงตัว Interrupter ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในวันต่อไป
17 ธันวาคม 2559	- ถอดตัว Interrupter ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ออกมาทีละเฟส เพื่อทำความสะอาดและทำการเปลี่ยนอุปกรณ์บางอัน และทำการวัดค่า Contact Resistance ของ Moving Contact แล้วทำความสะอาดอีกครั้ง จากนั้นทำการประกอบกลับที่เดิม

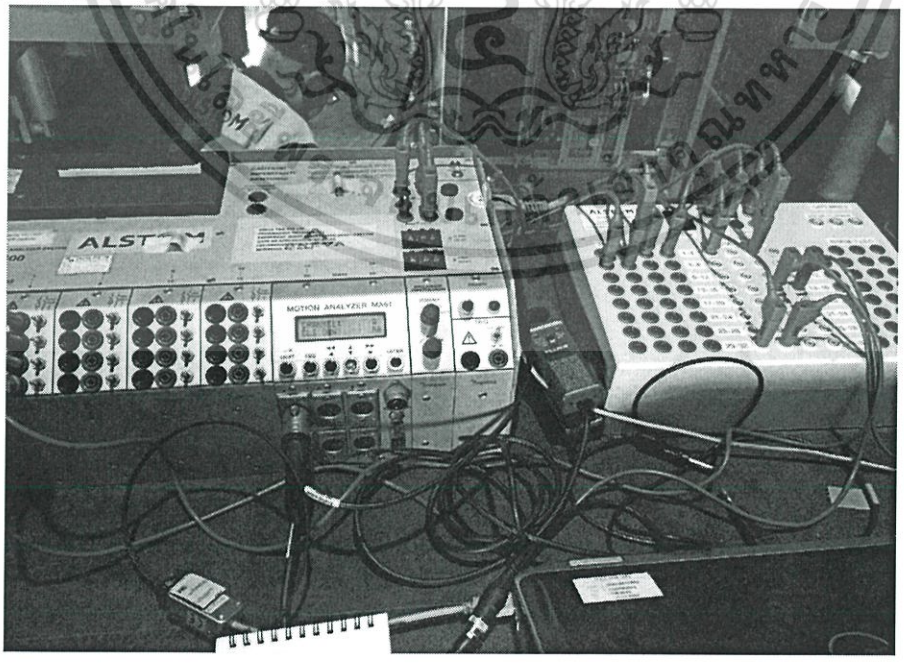
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	- ทำการเปลี่ยนส่วนต่างๆ ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ใส่น้ำมันหล่อลื่น ตรวจเช็คการทำงานของเคาเตอร์ และทำการประกอบส่วนต่างๆ เข้าเหมือนเดิม - ทำการ Vacuum ในส่วนคอมพาร์ทเมนต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทิ้งไว้ทั้งคืน เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง
18 ธันวาคม 2559	- ทำการเติมก๊าซ SF_6 กลับเข้าไปในทุกคอมพาร์ทเมนต์ของ GIS ในระดับความดันใช้งานปกติ - ทำการตรวจเช็คคุณภาพของก๊าซ SF_6 แต่ละคอมพาร์ทเมนต์ทุกเฟส โดยทำการวัดความบริสุทธิ์ ปริมาณ SO_2 ความดันของก๊าซ และค่าdew point ภายหลังการเติม - ตรวจสอบการทำงานของ DS, ES ทั้งแบบ Manual และ Electrical ทำการจับเวลาการเปิด, ปิดสวิตซ์ และตรวจเช็คการทำงานของสัญญาณไฟ Alarm ต่างๆ - ประกอบชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์กลับที่ตัว GIS - ทำการทดสอบ Motion และ Timing หลังจากการซ่อมบำรุง ว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้หรือไม่

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการซ่อมบำรุง

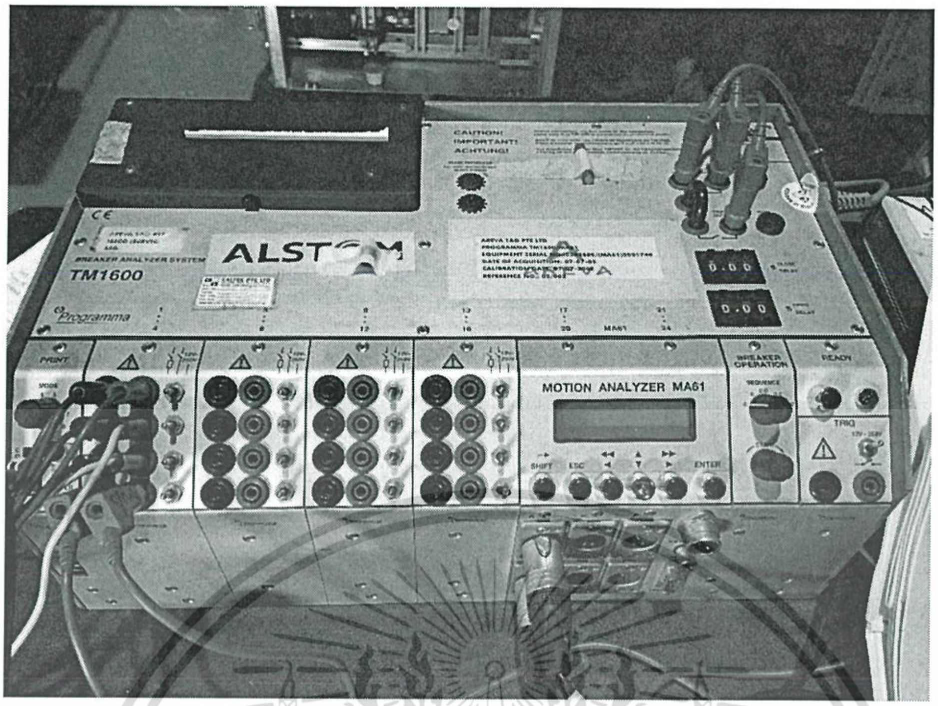
1. เครื่องทดสอบ motion และ timing

ใช้ต่อแทนสาย control ของตู้ Local Control Cubicle เพื่อทำการป้อนสัญญาณสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการเปิดและปิดวงจร



รูป 5.1 ชุดเครื่องทดสอบ motion และ timing

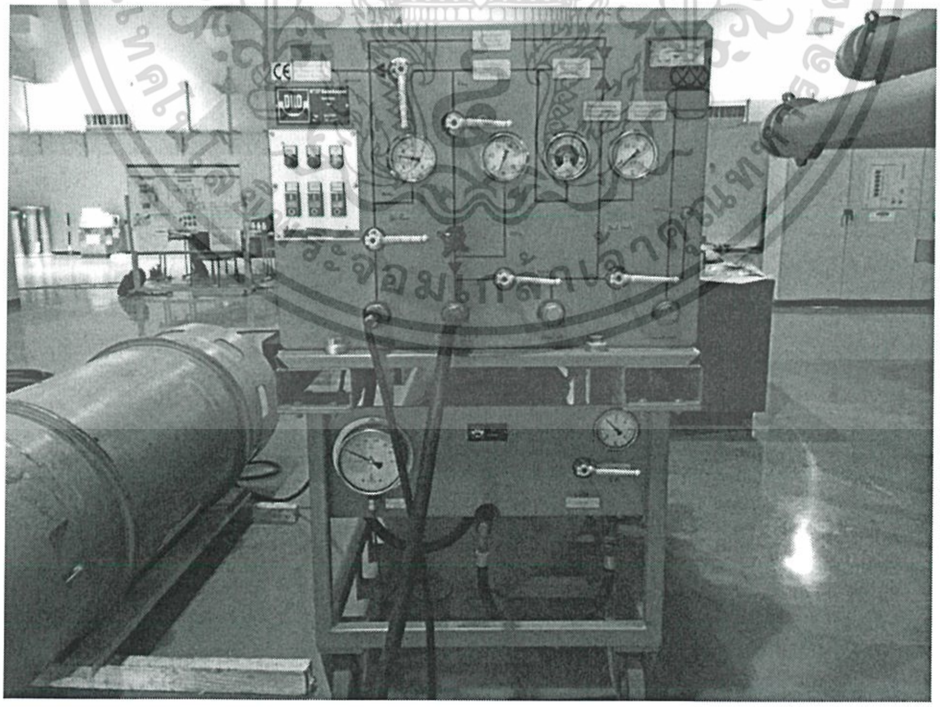
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.2 เครื่องทดสอบ motion และ timing

2. เครื่อง DILO

- ใช้ในการเก็บดูดก๊าซไปไว้ในถัง เติมก๊าซเข้าไปในคอมพาร์ทเมนต์ของ GIS และสามารถ Vacuum ได้อีกด้วย

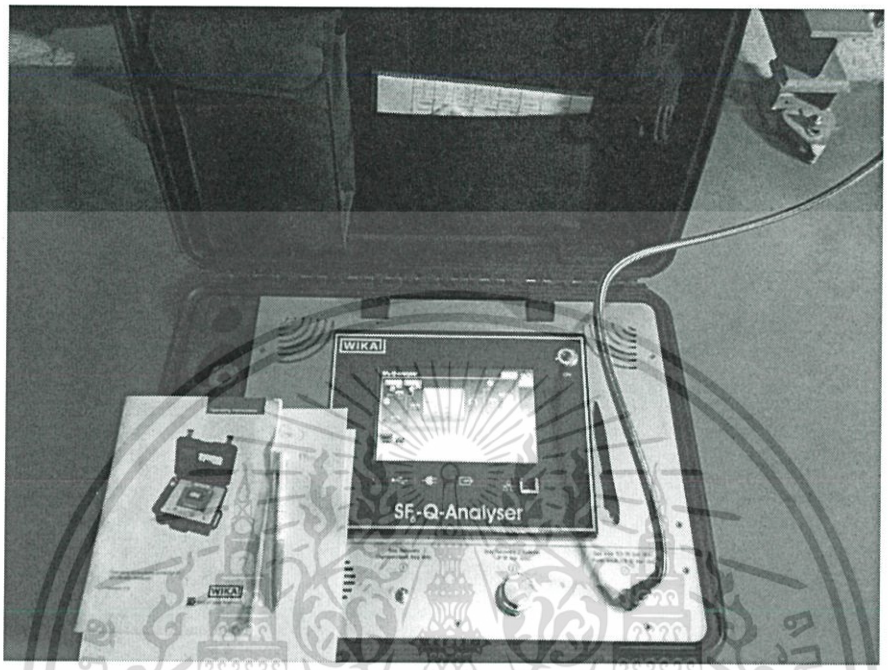


รูป 5.3 เครื่อง DILO ที่ใช้ในการเติม ดูดก๊าซและ vacuum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

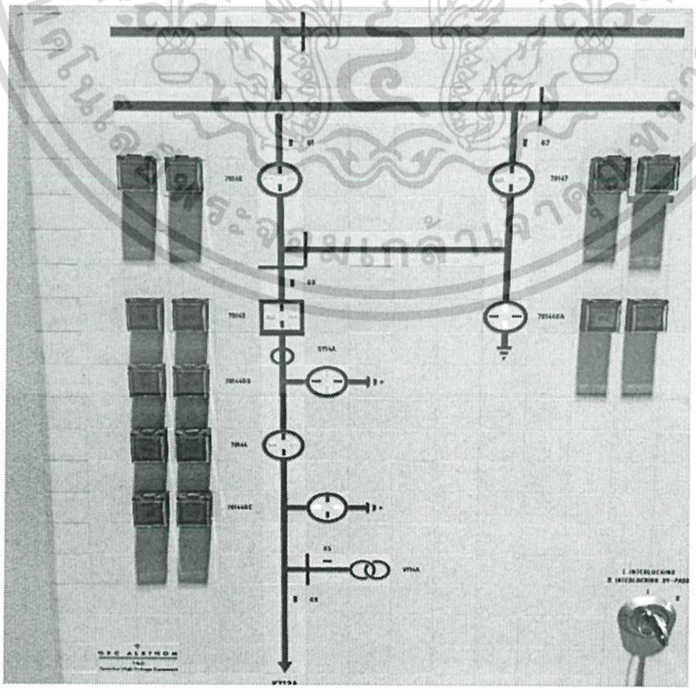
3. เครื่อง SF_6 - Q- Analyzer

- ใช้วิเคราะห์คุณภาพของก๊าซ SF_6 ว่ามีความบริสุทธิ์กี่เปอร์เซ็นต์ มีค่าความชื้นในก๊าซมากน้อยแค่ไหน และวัดค่า Dew point



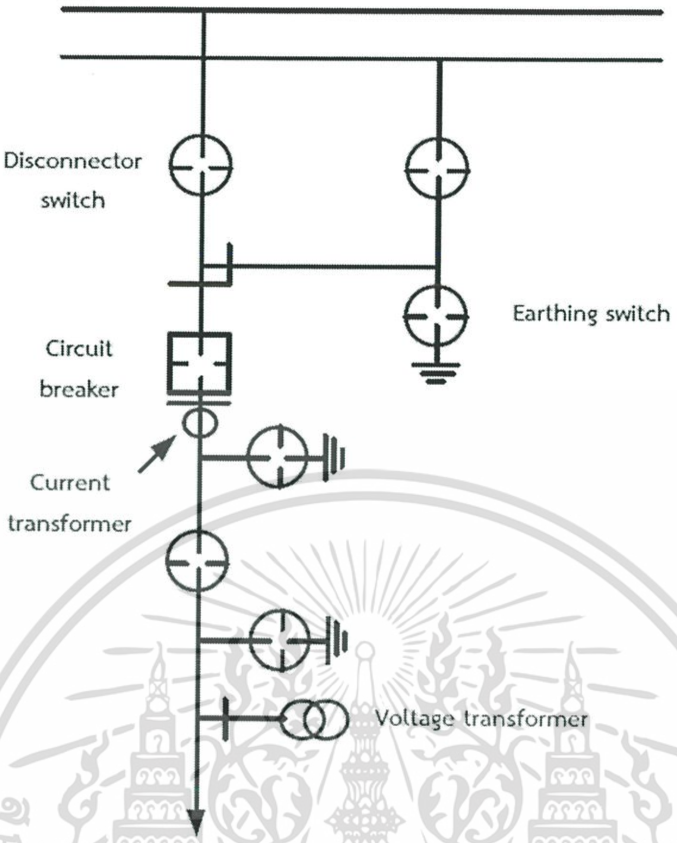
รูป 5.4 เครื่อง SF_6 – Q - Analyzer

One – line diagram ของ GIS 1 เบย์



รูป 5.5 One – line diagram หน้าตู้ Local control cubicle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.6 One – line diagram ของ GIS ที่จัดวางแบบ double busbar

โดย G1,G2 คือ คอมพาร์ทเมนต์ ของ Disconnector Switch

G0 คือ คอมพาร์ทเมนต์ ของ เซอร์กิตเบรกเกอร์

G5 คือ คอมพาร์ทเมนต์ ของ Voltage Transformer

G9 คือ คอมพาร์ทเมนต์ ของ Disconnector Switch, Earthing Switch และ Current Transformer

5.2 รายละเอียดการทดสอบต่างๆ

5.2.1. Motion and Timing Test

- Motion Test เป็นการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของ Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในช่วงขณะ Close และ Open
- Timing Test เป็นการทดสอบระยะเวลาการ Close และ Open ของเซอร์กิตเบรกเกอร์โดยที่ Closing Time เป็นระยะเวลาที่ Closing Circuit ถูก Energize จนกระทั่ง Moving Contact สัมผัสกับ Fixed Contact ส่วน Interrupting Time เป็นระยะเวลาที่ Opening Circuit ถูก Energize จนกระทั่ง Moving Contact แยกออกจาก Fixed Contact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

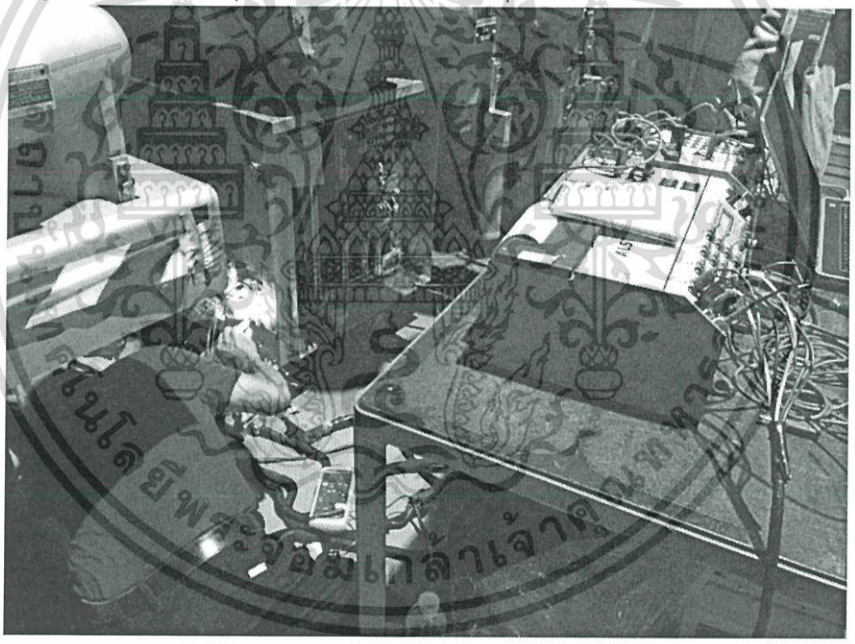
ตาราง 5.2 ค่าการวัดทางไฟฟ้า

	ค่าที่ไม่ควรเกิน
Closing Time	140 ms
Opening Time	30 ms

ค่า Timing ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้ยึดถือตาม Instruction ของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นๆ ตาม IEC 62271-100(2001) ระบุว่า Maximum Difference ภายใน Pole เดียวกันมีค่า 2.5 ms

ขั้นตอนการทดสอบ Motion and Timing Test

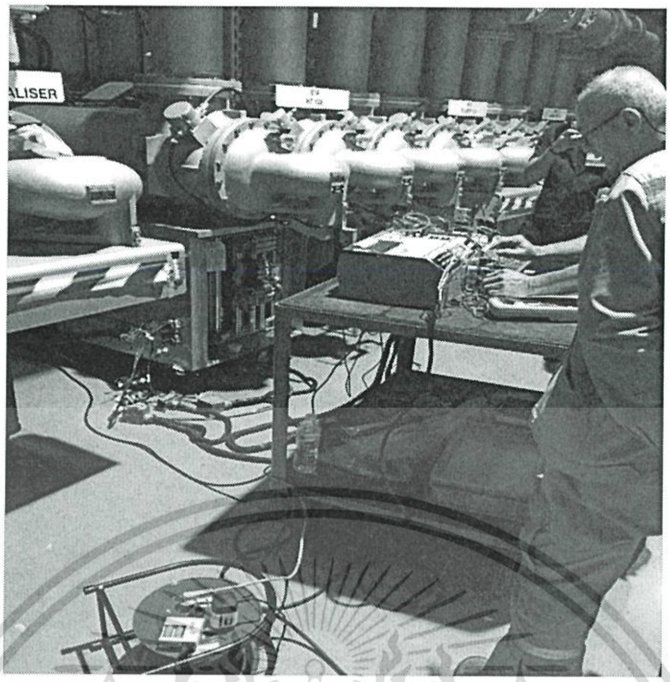
1. ต่อวงจรของชุดทดสอบเข้ากับจุดต่อสาย control ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์



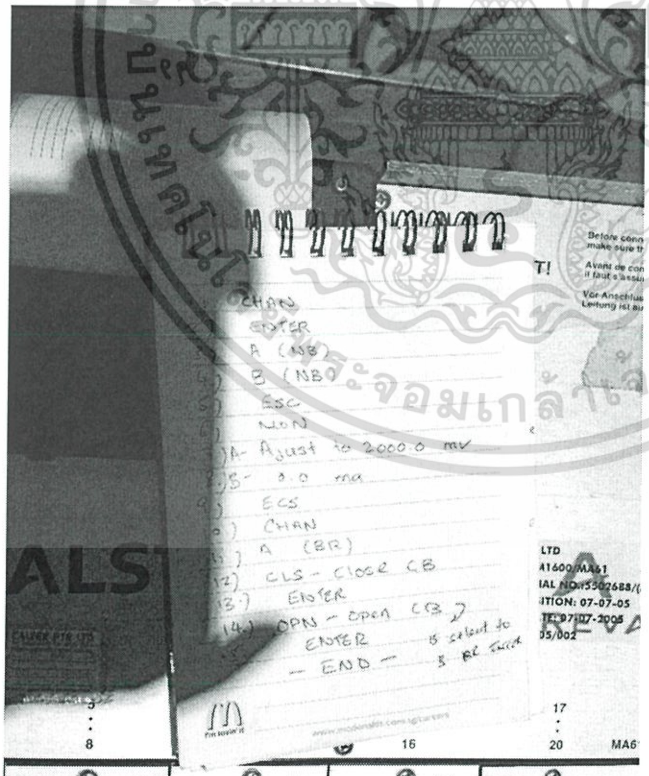
รูป 5.7 Supervisor ตรวจสอบสายวงจรเครื่องทดสอบที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์

2. ป้อนคำสั่งกับชุดทดสอบ ตรงนี้เป็นเทคนิคคำสั่งทางบริษัท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.8 Supervisor ทำการตั้งค่าเครื่องทดสอบ



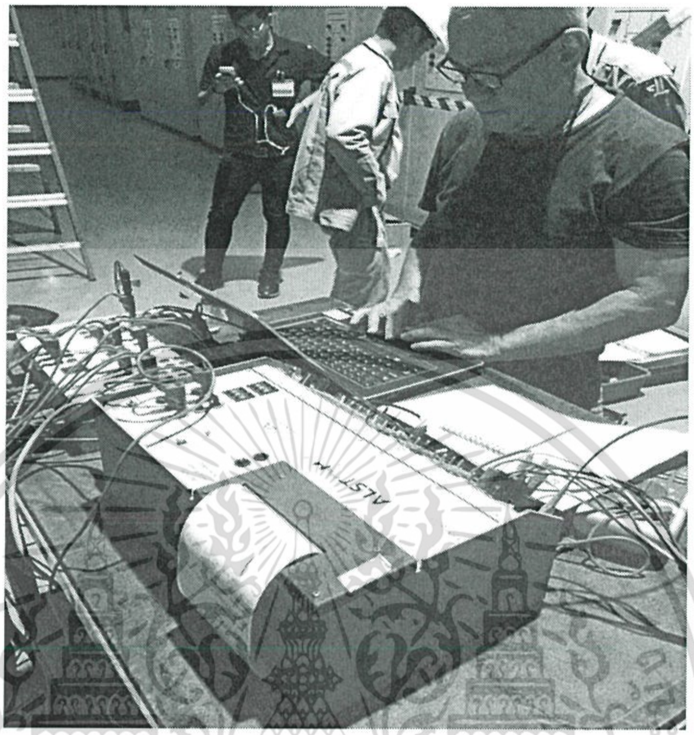
1. CHAN
2. ENTER
3. A (NB)
4. B (NB)
5. ESC
6. NON
7. A – Ajust to 2000.0 mV
8. B- 0.0 ma
9. ESC
10. CHAN
11. A (BR)
12. CLS-close CB
13. ENTER
14. OPN-open CB
15. ENTER

-END-

รูป 5.9 ชุดคำสั่งที่ป้อนเข้าเครื่องทดสอบ

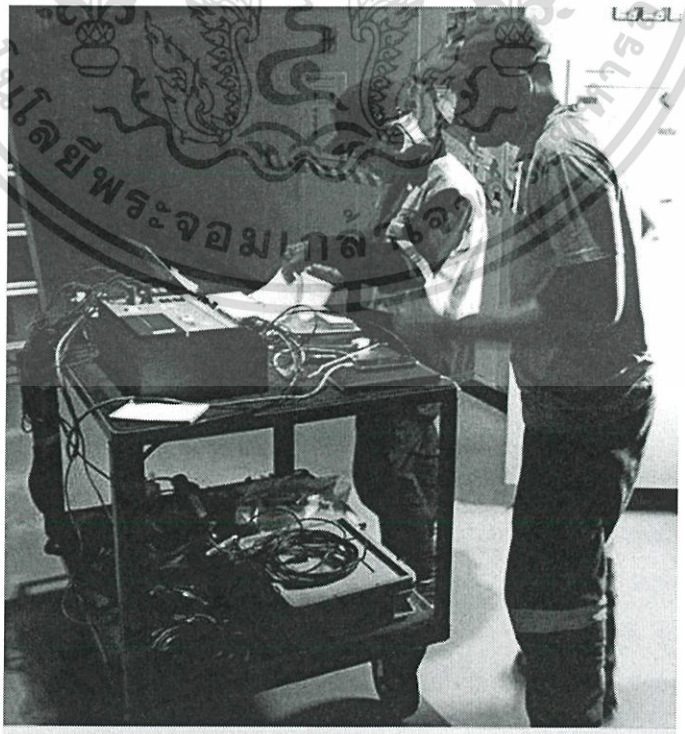
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากนั้นทำการสั่งให้ชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการ open circuit และ close circuit



รูป 5.10 Supervisor ทำการทดสอบ motion และ timing

4. บันทึกค่าและทำการทดลองซ้ำอีก 1 รอบ



รูป 5.11 Supervisor ทำการจดบันทึกข้อมูลผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ … ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2. Gas Quality Check

การตรวจสอบคุณภาพของก๊าซ SF_6 เป็นการตรวจสอบดูความบริสุทธิ์และปริมาณสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่อยู่ภายในก๊าซ ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะมาลดความเป็นฉนวนลง ส่งผลให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและเบรกดาวน์ตามมาได้ ซึ่งประกอบด้วย

Dew Point Temperature

เป็นการตรวจสอบอุณหภูมิ ซึ่งบ่งบอกว่าเมื่อก๊าซที่มีความชื้น (moisture) ถูกทำให้เย็นลงในขณะที่ปริมาตร (Volume) ยังคงที่อยู่ การลดอุณหภูมิเมื่อลดถึงจุด ๆ หนึ่งจะทำให้ไอน้ำเกิดการอิ่มตัวและกลั่นตัว (Condensate) เป็นหยดน้ำมีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ค่า Dew point ขึ้นอยู่กับ water content และ pressure โดยต้องทดสอบทุกคอมพาร์ทเมนต์ เนื่องจากถ้าก๊าซ SF_6 มีความชื้นปะปนอยู่เกินมาตรฐานที่กำหนดจะทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของก๊าซ SF_6 เสื่อมลง อีกทั้งเวลาเกิดฟอลต์หรือแฟลชที่ทำให้เกิดการ Decomposition ของก๊าซ SF_6 ความชื้นที่ปะปนอยู่ในก๊าซ SF_6 จะทำปฏิกิริยากับ SF_4 และ SOF_4 ที่เป็นก๊าซที่จากการ Decomposition ของก๊าซ SF_6 ก่อให้เกิดกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ดังสมการ

$$SF_4 + H_2O \longrightarrow SOF_2 + 2HF$$
$$SOF_4 + H_2O \longrightarrow SO_2F_2 + HF$$

ซึ่ง HF มีคุณสมบัติเป็นกรดซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะของ GIS เช่นตัวถังและบัสบาร์ทำให้เกิดความเสียหายของอุปกรณ์ทำให้อุปกรณ์มีอายุการใช้งานสั้นลง

ตารางที่ 5.3 ค่ามาตรฐาน SF_6

Contaminant	IEC 60376 (New SF_6)	IEC 60480 (Reclaimed SF_6 for reuse)	IEC 60694 (SF_6 in equipment)
Moisture	15 ppmw	▪ 750 ppmv for p≤ 200 kPa or Dew point < -23°C for test at atmospheric pressure ▪ 200 ppmw for p≤ 850 kpa or Dew point < -36°C for test at atmospheric pressure ▪ Or Dew point < -15°C at filling pressure	▪ 2000 ppmv for p≤ 200 kpa ▪ 460 ppmw for p≤ 850 kpa ▪ Or Dew point < -5°C
Non-reactive gases	Air ≤ 0.05% CF_4, C_2F_6 ≤ 0.05%	3 % vol total	
Reactive gases	1 ppmw total	50 ppmv total or 12 ppmv SO_2+SOF_2	

SF_6 Gas Percentage และ SF_6 Decomposition Product

เป็นการตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ และสิ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพความเป็นฉนวนของ gas SF_6 นอกจากความชื้นยังมีสารอื่น ๆ ที่อาจจะเกิดจากการ Decompose เมื่อเกิดการ Arc เช่น O_2, N_2, CF_4, S_2F_{10}, SO_2, H_2O, HF เป็นต้น

- ตาม IEC 60480 กำหนด SF_6 percentage ใช้งานต้องไม่ต่ำกว่า 97%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

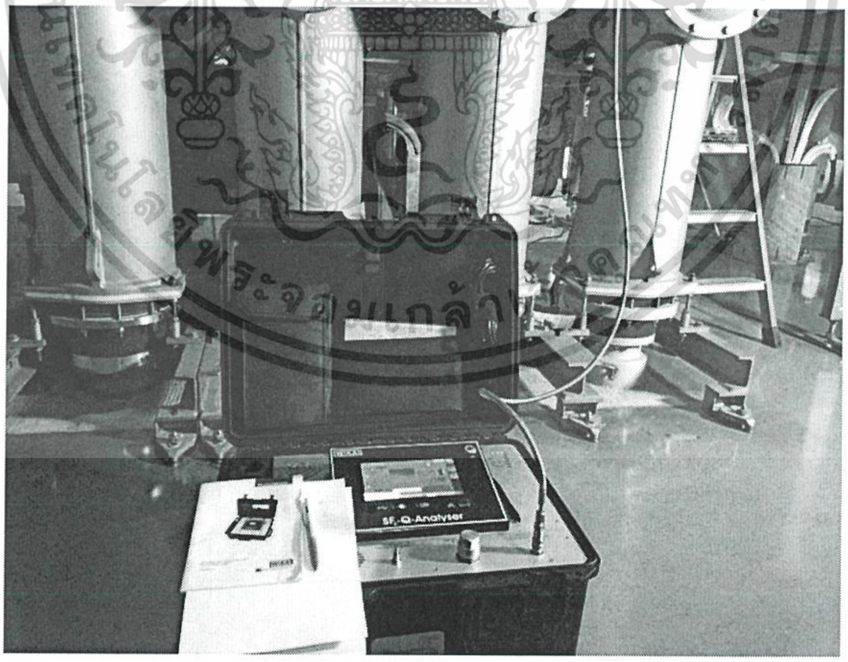
- ตามมาตรฐาน IEC 62271-303 กำหนด $SO_2 \le 12$ ppmv และ HF ≤ 12 ppmv

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าที่ทาง Supervisor แนะนำ

	Degree Purity SF6 (PPMg)	Degree Purity SF6 (PPMv)
O_2N_2	500	61.73
CF_4	500	61.73
S_2F_{10}	0.02	0.0025
SO_2	1	0.1234
H_20	1.5	0.185
HF	1	0.1234

ขั้นตอนการทำ Gas Quality Check

1. ต่อเครื่อง SF_6-Q-Analyzer เข้ากับวาล์วก๊าซของคอมพาร์ทเมนต์ ที่ต้องการทำการวิเคราะห์คุณภาพของก๊าซ SF_6



รูป 5.12 การต่อเครื่อง SF_6-Q-Analyzer เข้ากับ GIS

2. เริ่มทำการวิเคราะห์คุณภาพของก๊าซ SF_6 โดยเครื่องจะใช้เวลาในการวิเคราะห์ 7 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.13 หน้าจอแสดงผลขณะทดสอบของเครื่อง SF_6-Q-Analyzer

3. ทำการจดบันทึกค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งประกอบไปด้วยเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ ค่า Dew Point และค่า SO_2
4. ต่อสายเข้ากับคอมพาร์ทเมนต์อื่นที่จะวิเคราะห์ต่อไป

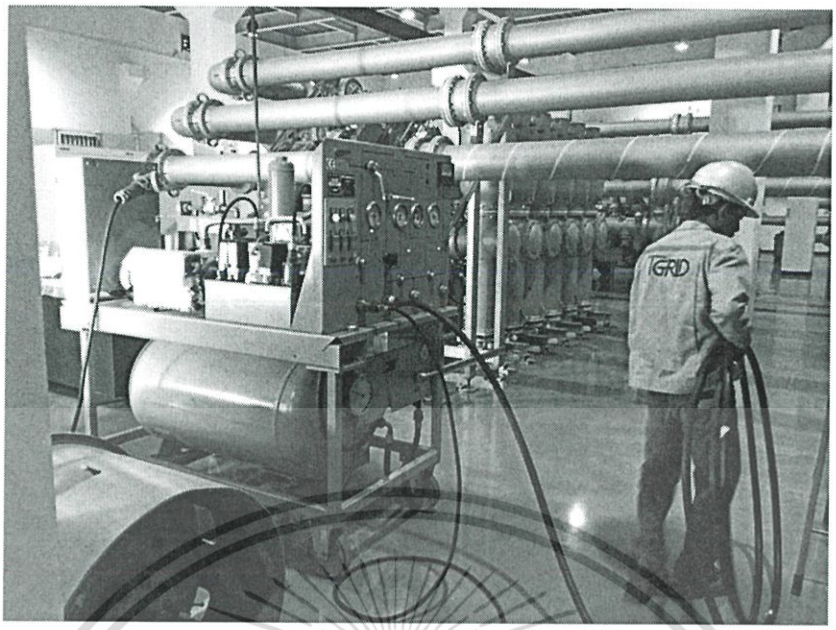
5.2.3. Densimeter Test

เป็นการทดสอบการทำงานของ Alarm ว่าในกรณีที่ก๊าซ SF_6 เกิดรั่วแล้วทำให้ความดันลดลงมาถึง Stage 1 ความดันก๊าซ SF_6 3.2 บาร์ และ Stage 2 ความดันก๊าซ SF_6 3.0 บาร์จะมีสัญญาณ Alarm เตือนหรือไม่ และความดันที่มีสัญญาณ Alarm เตือนนั้น มีค่าเท่าไร แล้วถ้ามีการเติมก๊าซแล้วความดันเพิ่มขึ้นสัญญาณ Alarm จะหายไปหรือไม่ และเกิดขึ้นที่ความดันเท่าไร โดยที่ความเป็นฉนวนของ SF_6 ขึ้นกับความหนาแน่น (Density) ของ gas การทำงานของ Densimeter จะตรวจสอบทั้ง Pressure และ Temperature ของ SF_6

ขั้นตอนการทดสอบ Densimeter

1. เราจะ Drain Gas ออกไปเรื่อยๆ จนมีสัญญาณ Alarm และ Lock Out ที่ตู้ LCC ตามลำดับและบันทึกค่าความดันนั้น

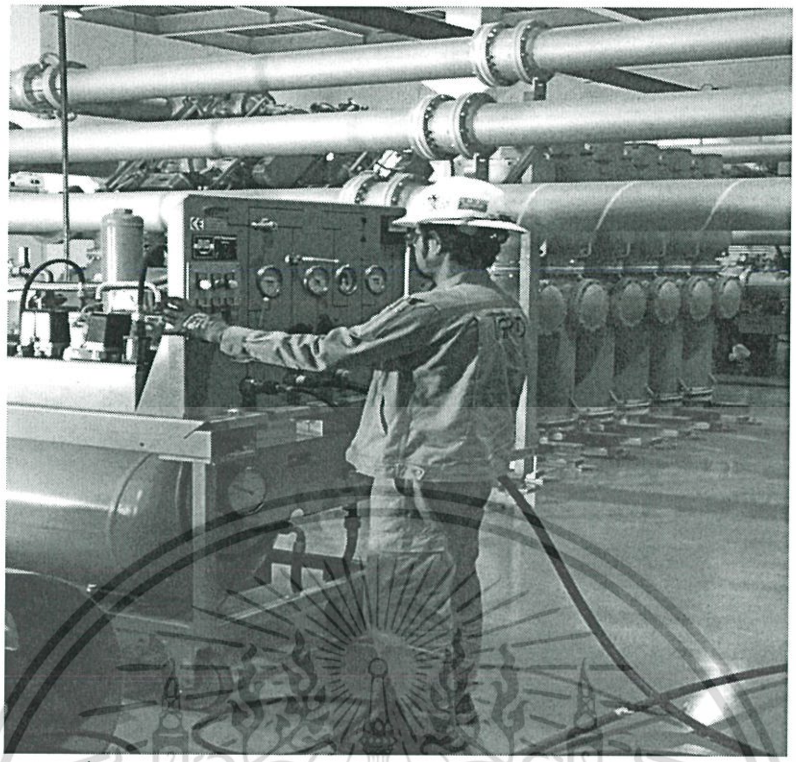
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.14 เตรียมเครื่อง DILO เพื่อทำการ Drain Gas (ก)

รูป 5.14 เตรียมเครื่อง DILO เพื่อทำการ Drain Gas (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.15 ต่อเครื่อง DILO เข้ากับ GIS แต่ละคอมพาร์ทเมนต์แล้วทำการ Drain gas ออก

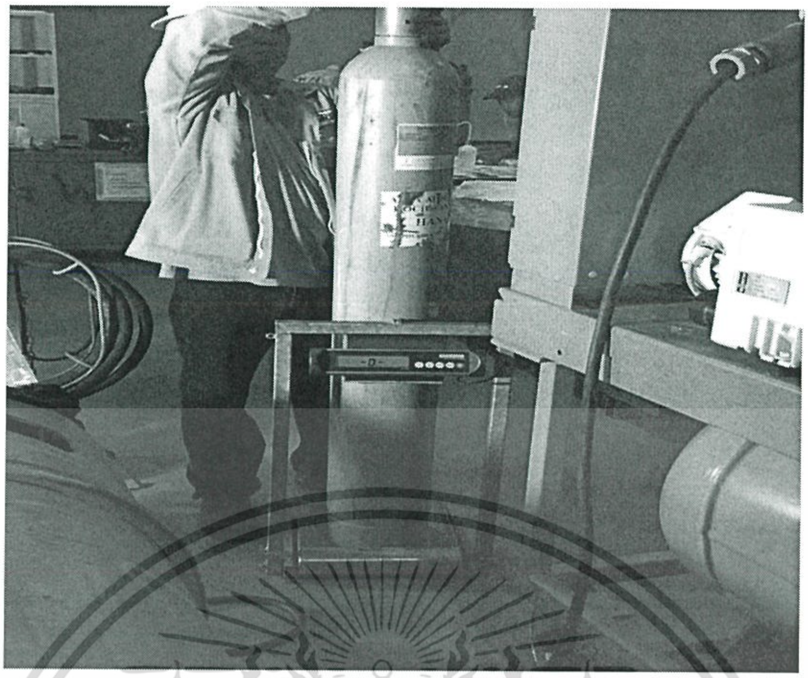
2. จากนั้นเราจะเติม Gas เข้ามาจนกระทั่งถึงค่า Lock Out และจดบันทึกความดันนั้น
3. เติม Gas ต่อไปอีกจนค่าความดันสูงขึ้นจนสัญญาณ Alarm หายไป และจดบันทึกความดันนั้น
4. ทดสอบให้ครบทุกเฟส และทุกคอมพาร์ทเมนต์

5.2.4. การดูดเก็บก๊าซ SF_6

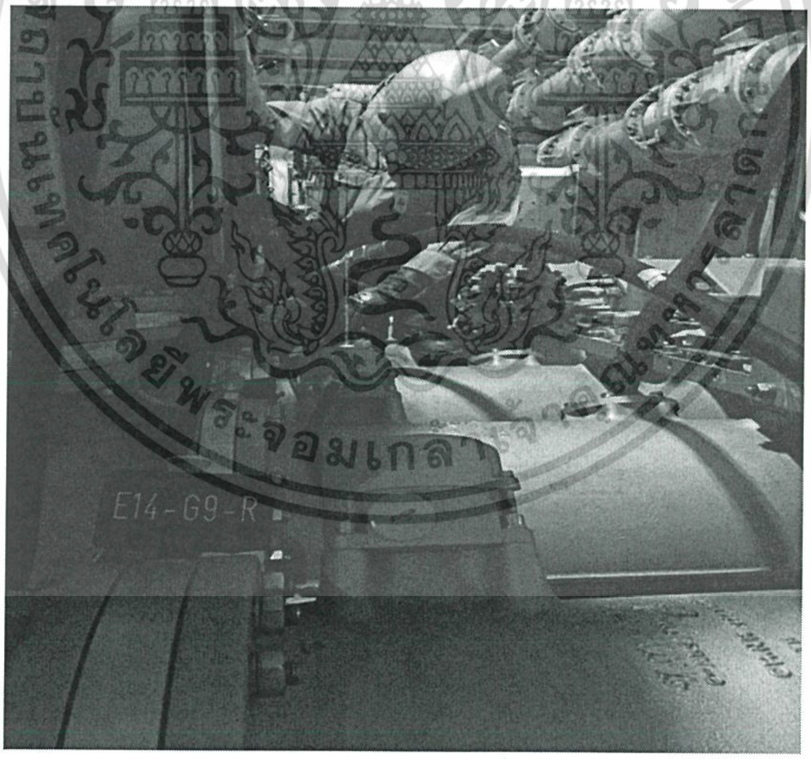
ขั้นตอนการดูดเก็บก๊าซ SF_6

1. ทำการลดความดันของ G1 ให้เหลือไม่เกิน Half Pressure (เช่นจากประมาณ 3 bar เป็นไม่เกิน 1.5 bar)
2. จากนั้นลดความดันของ G9 ให้เหลือไม่เกิน Half Pressure (เช่นจากประมาณ 3 bar เป็นไม่เกิน 1.5 bar)
3. จากนั้นทำการลดความดันของ G0 ซึ่งก็คือคอมพาร์ทเมนต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้เหลือ 0 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

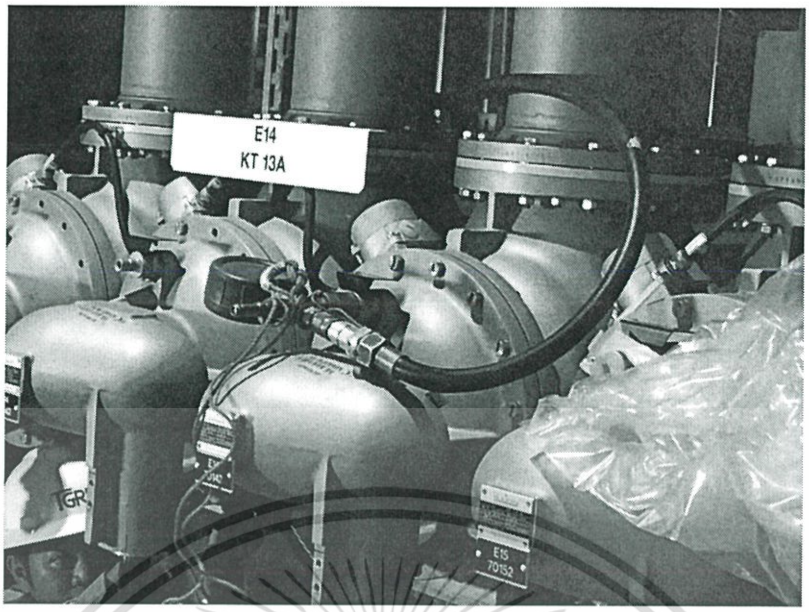


รูป 5.16 ช่างทำการเตรียมถังเปล่าเพื่อเก็บก๊าซ SF_6 (ก)

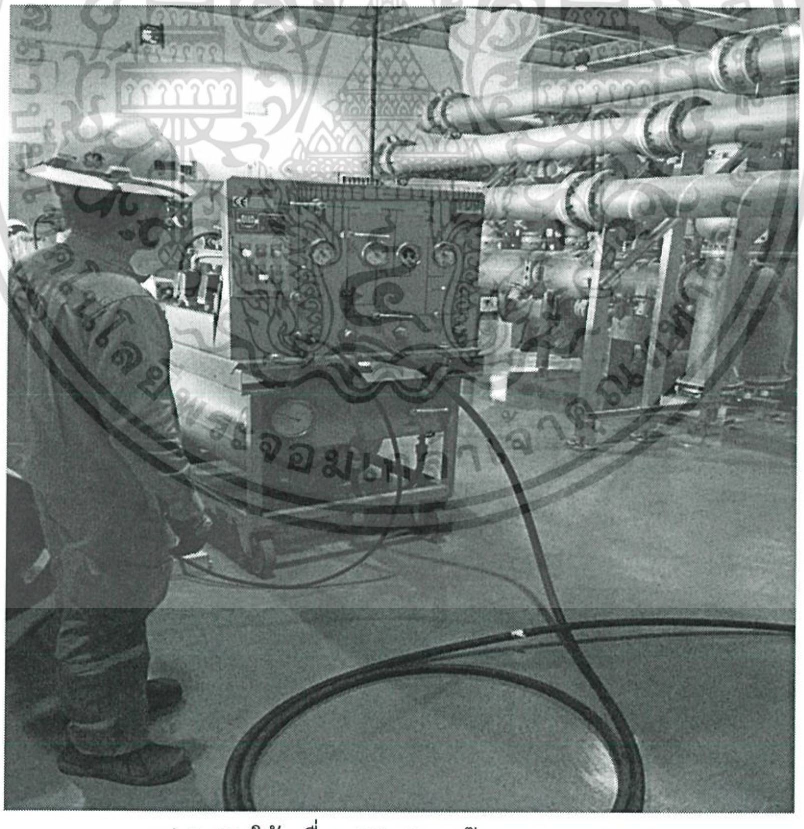


รูป 5.16 ช่างทำการเตรียมถังเปล่าเพื่อเก็บก๊าซ SF_6 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.17 การต่อสายของเครื่อง DILO เข้ากับ GIS แต่ละคอมพาร์ทเมนต์



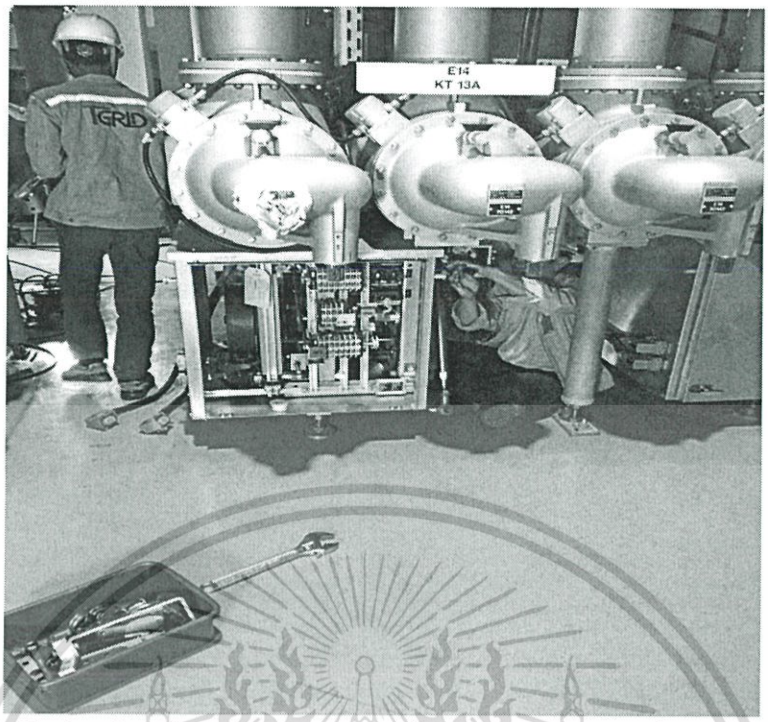
รูป 5.18 ใช้เครื่อง DILO ดูดก๊าซออกจาก GIS

5.2.5. Overhaul Circuit Breaker

ขั้นตอนการทำ Overhaul Circuit Breaker

1. ถอดชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ออกไปทำความสะอาดและเปลี่ยน Spare Part ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

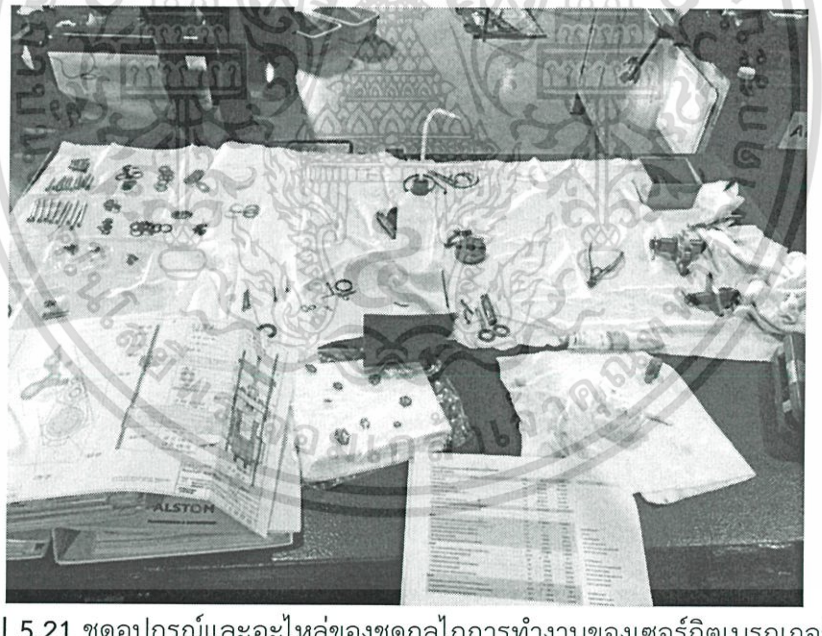


รูป 5.19 ทีมซ่อมบำรุงรักษาทำการถอดชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ก)

รูป 5.19 ทีมซ่อมบำรุงรักษาทำการถอดชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ข)

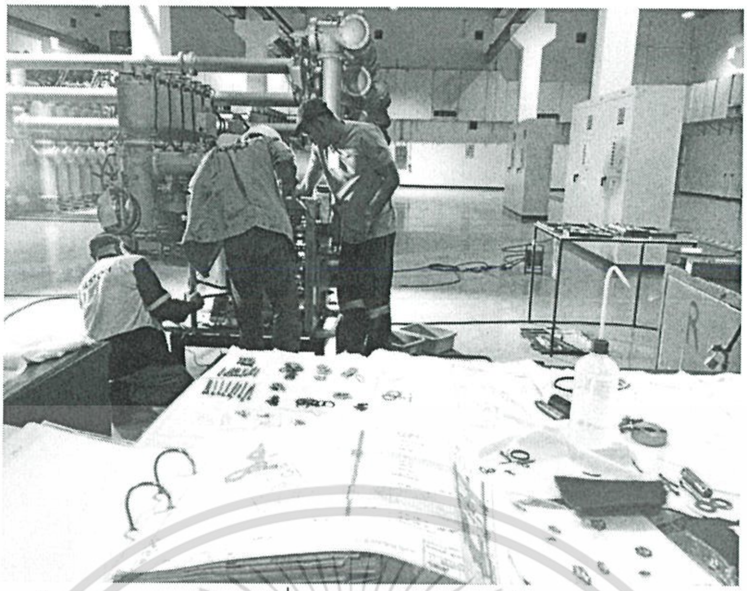
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.20 ทีมซ่อมบำรุงรักษาทำการเตรียมซ่อมบำรุงชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูป 5.21 ชุดอุปกรณ์และอะไหล่ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.22 ทีมซ่อมบำรุงวางแผนเตรียมเปลี่ยนอะไหล่ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

(ก)

รูป 5.22 ทีมซ่อมบำรุงวางแผนเตรียมเปลี่ยนอะไหล่ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

(ข)

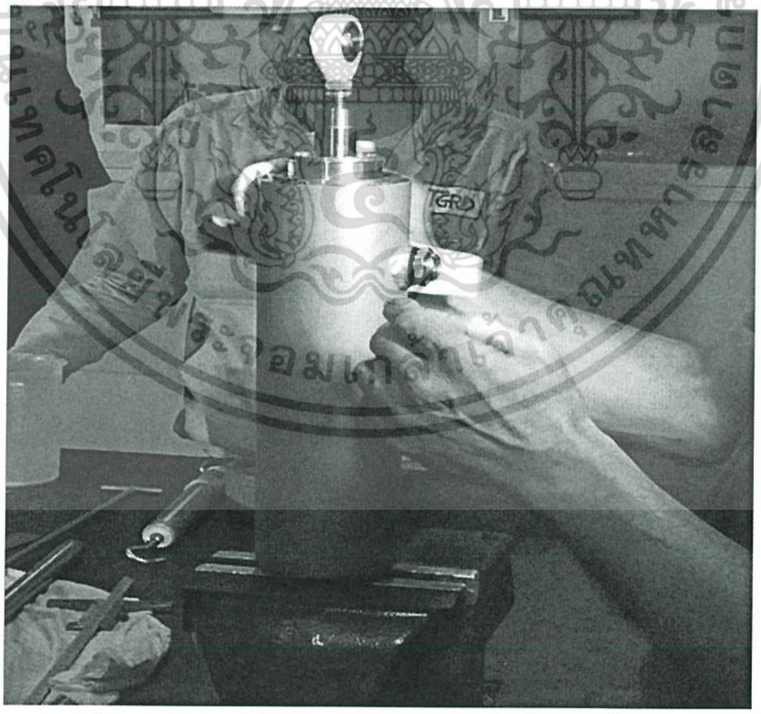
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.23 Supervisor ทำการวางแผนเปลี่ยนอะไหล่ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

รูป 5.24 Supervisor ทำการเปลี่ยนอะไหล่ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

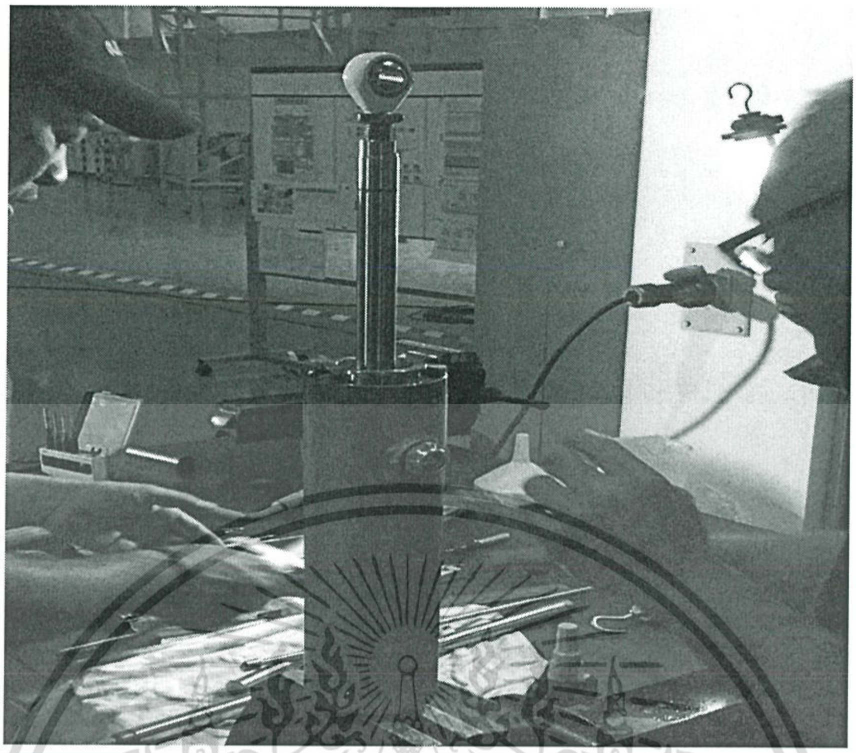
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.25 Supervisor ทำความสะอาดส่วน moving ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ก)

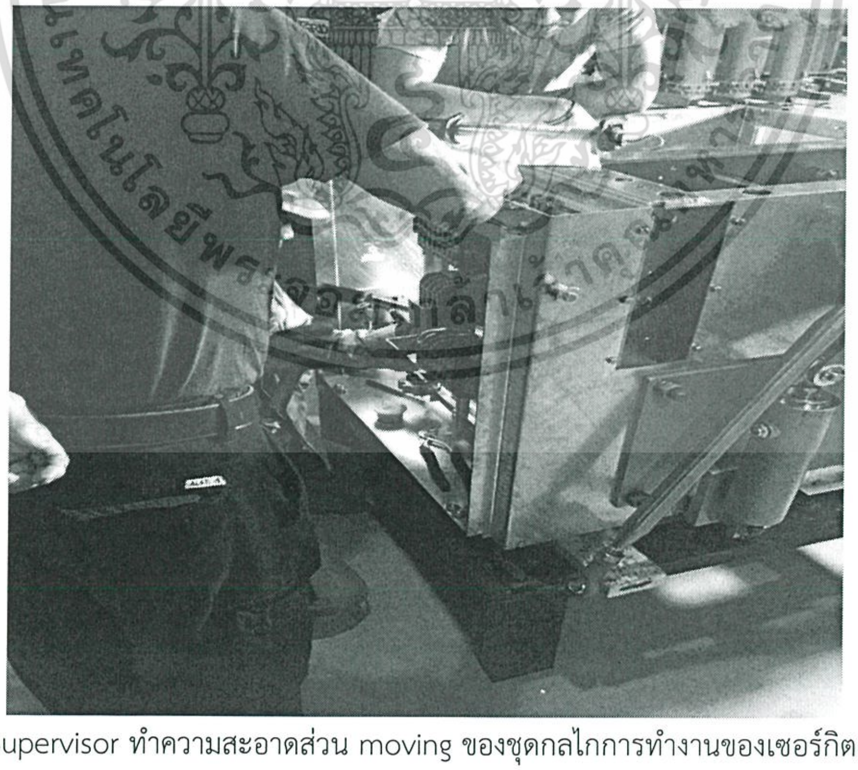


รูป 5.25 Supervisor ทำความสะอาดส่วน moving ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.26 Supervisor ทำความสะอาดส่วน moving ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ก)



รูป 5.26 Supervisor ทำความสะอาดส่วน moving ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ข)

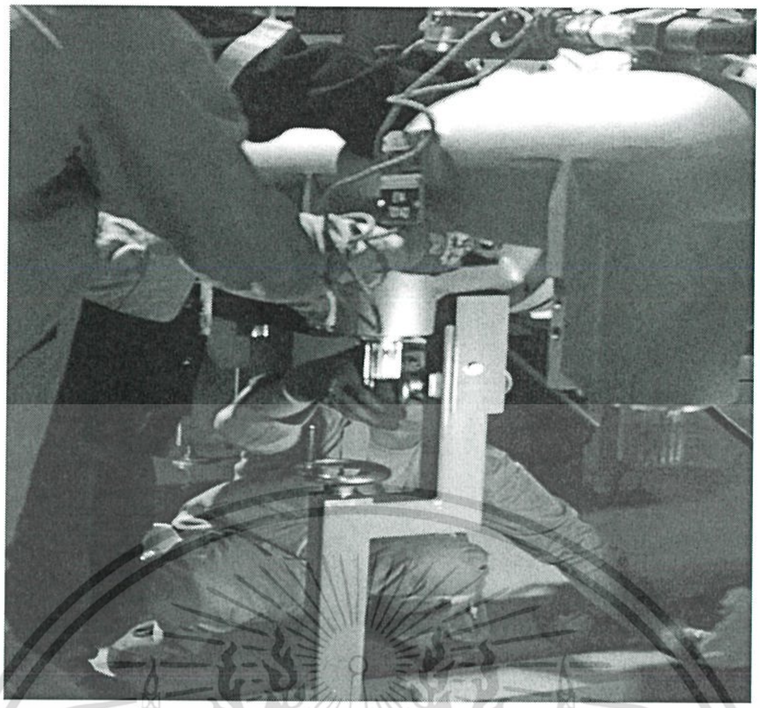
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.27 ทีมซ่อมบำรุงประกอบอุปกรณ์ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

รูป 5.28 ทีมซ่อมบำรุงประกอบอุปกรณ์ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

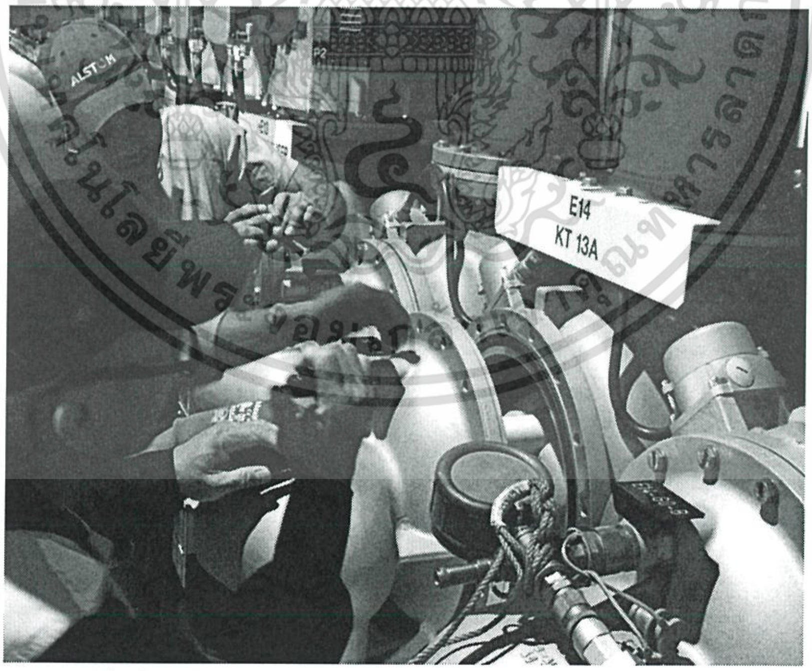
2. หลังจากที่ Test Alarm Lock Out และดูดเก็บก๊าซ SF_6 เป็นที่เรียบร้อยแล้วจากนั้นจะทำการขัน Bolt ออกโดยเหลือ Bolt ด้านบนไว้ก่อนเพื่อนำ **(Special Tools)** เข้ามารองรับเพื่อเข็นส่วนของ Moving Contact ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



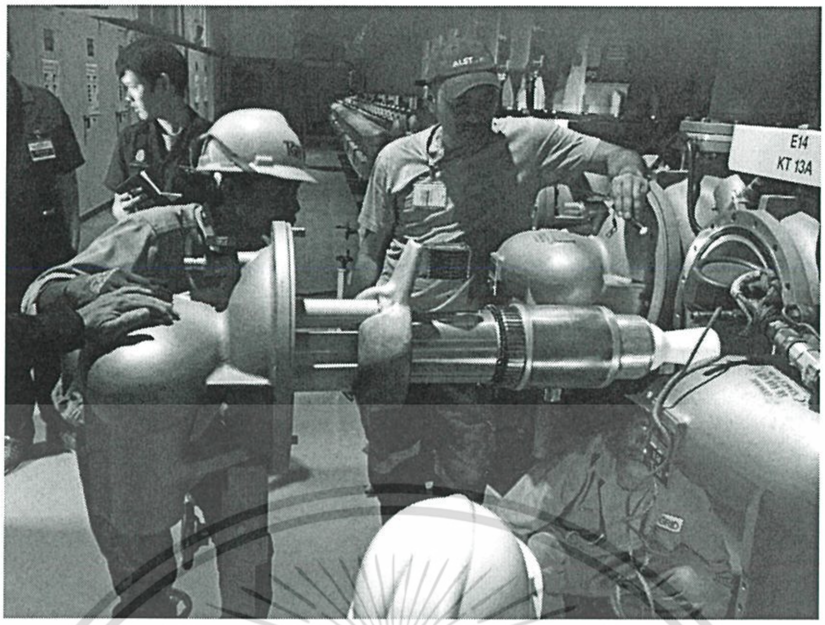
รูป 5.29 ทีมซ่อมทำการถอด Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

3. ทำการปรับให้ความดันภายในกับภายนอกเท่ากัน แล้วเข็นส่วนของ Moving Contact ออกมา แล้วทำการ Visual Inspection และ Cleaning ทั้งในส่วนของ Moving Contact และ Fixed Contact ทีละเฟส

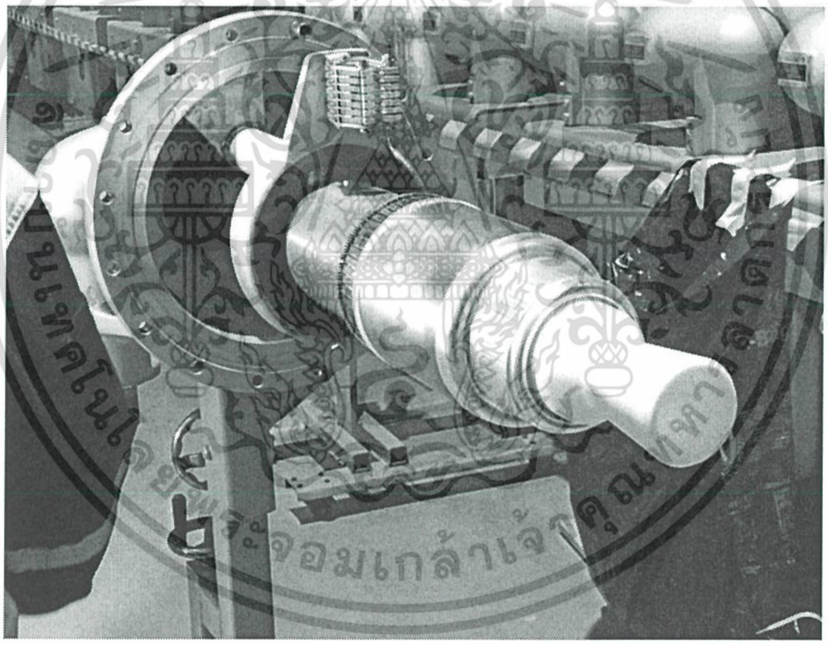


รูป 5.30 ทีมซ่อมทำการถอด Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.30 ทีมซ่อมทำการถอด Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ข)



รูป 5.31 Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

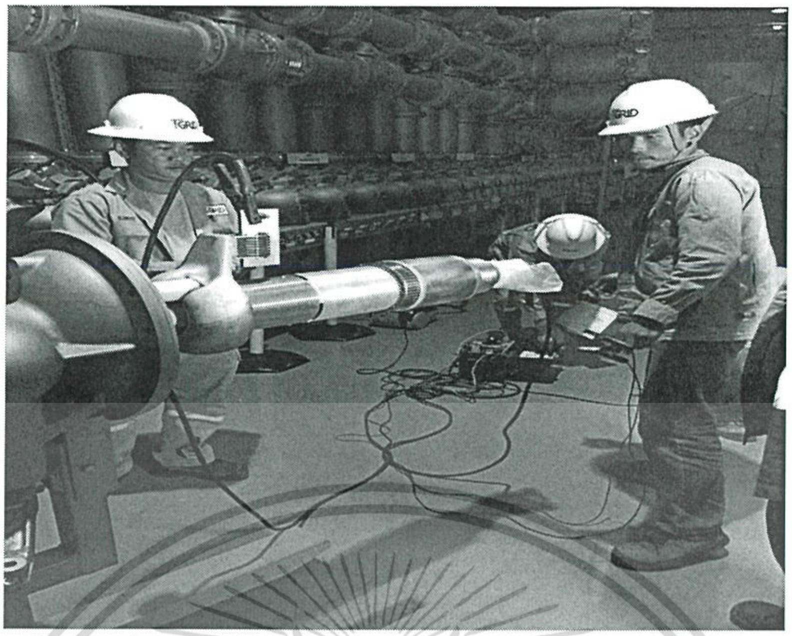
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.32 ทีมซ่อมบำรุงทำความสะอาดคอมพาร์ทเมนต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

รูป 5.33 ทีมซ่อมบำรุงเตรียมทดสอบ Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

4. วัดค่า Contact Resistance ของ Moving Contact โดยจ่ายกระแสไฟฟ้า 100A และวัดค่าความต้านทาน โดยจะทำการวัดทั้งหมด 4 จุด ได้แก่ ระหว่างซี่ของ Finger, ระหว่างจุดต่อกันของ Piston, ระหว่าง Contact Crown กับ Blast Cylinder และวัดความต้านทานรวมจาก Finger ถึง Blast Cylinder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

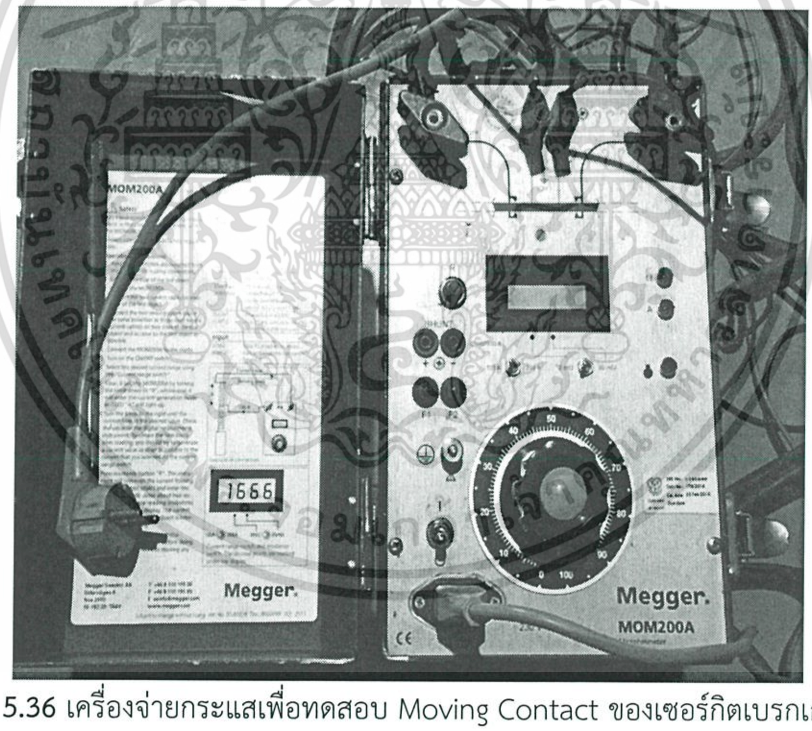


รูป 5.34 ทีมซ่อมบำรุงต่อวงจรทดสอบ Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ก)

รูป 5.34 ทีมซ่อมบำรุงต่อวงจรทดสอบ Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.35 ทีมซ่อมบำรุงต่อวงจรทดสอบ Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

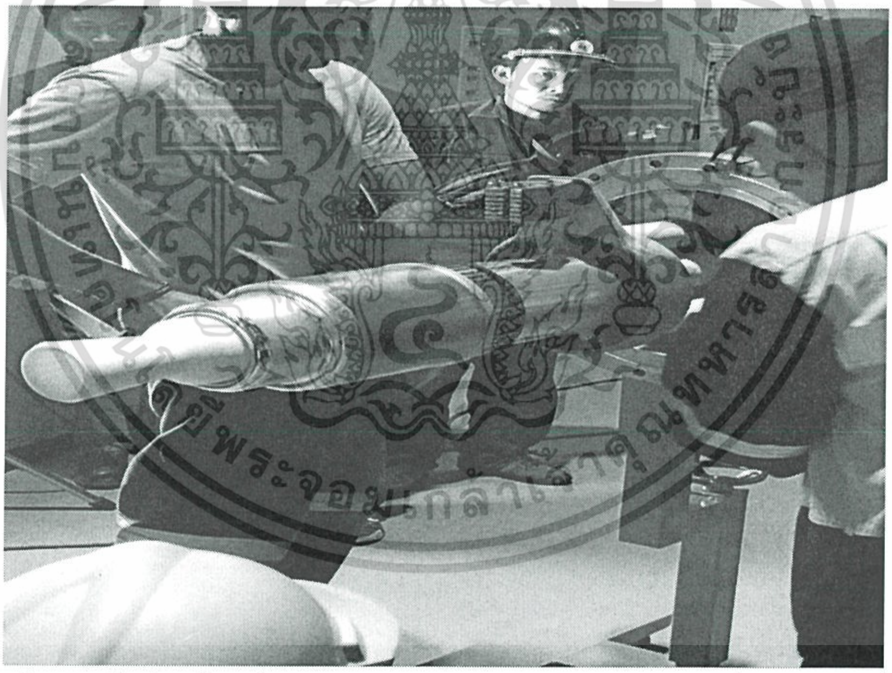


รูป 5.36 เครื่องจ่ายกระแสเพื่อทดสอบ Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

5. ทำการ Clean ซ้ำอีกครั้ง และ ทาสาร Grease สำหรับอุณหภูมิสูง (เนื่องจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องรับ Arc ซึ่งมีอุณหภูมิ)
6. ส่วนของ Fixed Contact เราทำการ Clean และเปลี่ยนซีลใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.37 ทีมซ่อมบำรุงทำความสะอาด Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูป 5.38 ทีมซ่อมบำรุงทำความสะอาด Moving Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

7. ทำการประกอบส่วนของ Moving Contact กลับเข้าที่เดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

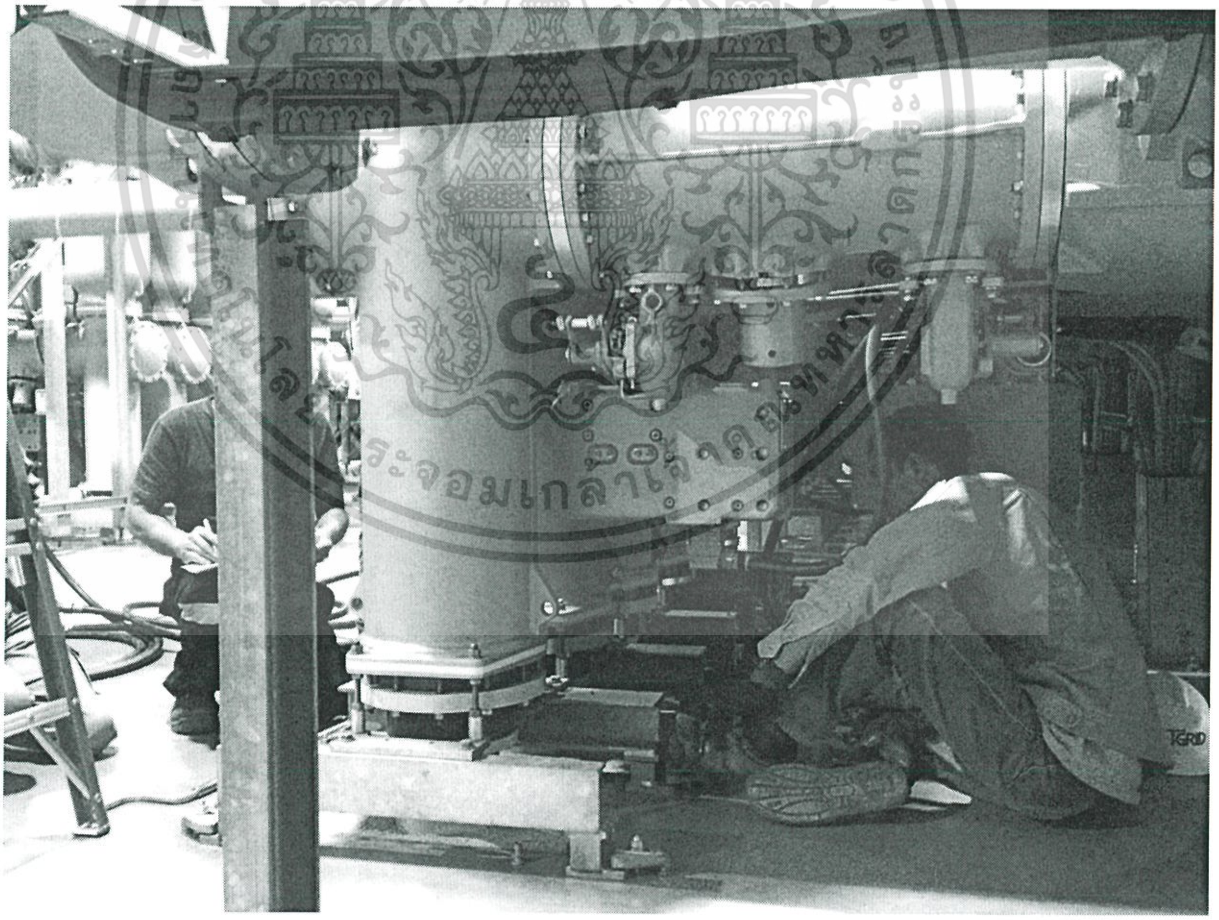
ตารางที่ 5.5 มาตรฐานของ Contact Resistance

	ระหว่างซี่ของ Finger	ระหว่างจุดต่อกันของ Piston	ระหว่าง Contact Crown กับ Blast Cylinder	วัดความต้านทานรวมจาก
มาตรฐานความต้านทาน	12 ไมโครโอห์ม	1 ไมโครโอห์ม	6 ไมโครโอห์ม	17 ไมโครโอห์ม

5.2.6. การประกอบชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์กลับ Vacuum การเติมก๊าซ SF_6

ขั้นตอนการประกอบชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์กลับ Vacuum การเติมก๊าซ SF_6

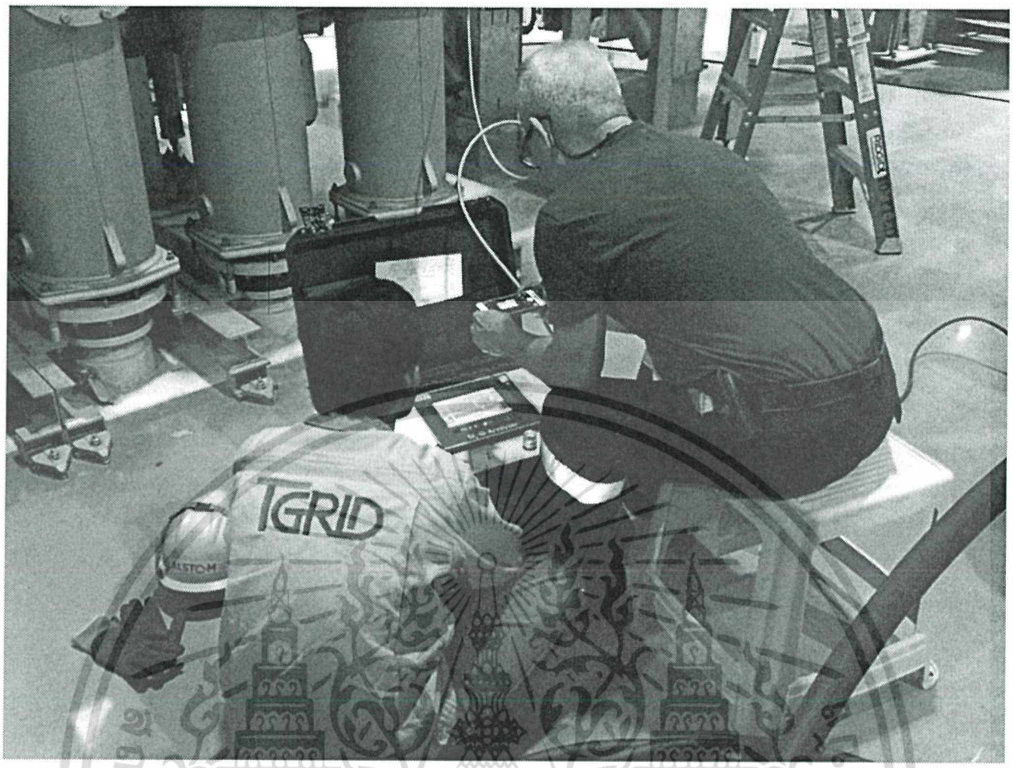
1. หลังจากเปลี่ยนส่วนต่างๆ ของชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์และประกอบส่วนต่างๆ เข้าเหมือนเดิมแล้วจากนั้นทำการ Vacuum ในส่วนคอมพาร์ทเมนต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทิ้งไว้เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง
2. จากนั้นเติมก๊าซ SF_6 เข้าในคอมพาร์ทเมนต์ G0 ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ และ G1 กับ G9 ไปที่ความดันใช้งานปกติ



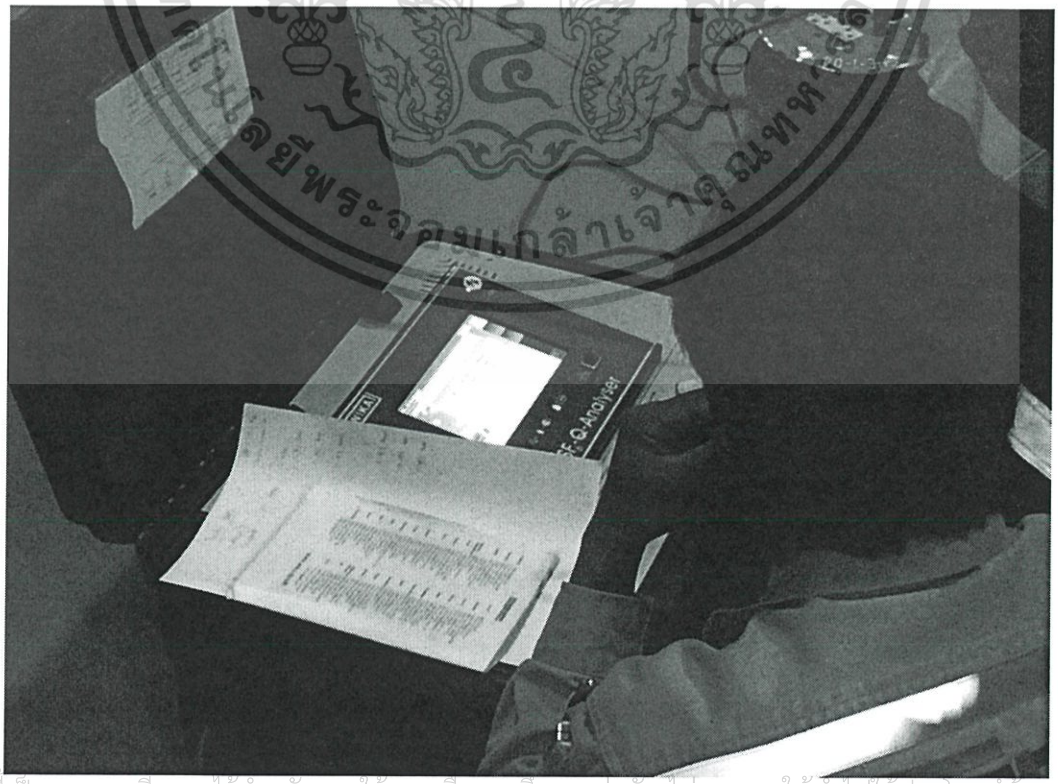
รูป 5.39 ทีมซ่อมบำรุงทำการเติมก๊าซ SF_6 ใส่ในแต่ละคอมพาร์ทเมนต์ของ GIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากนั้นวิเคราะห์คุณภาพของก๊าซ SF_6 ตามขั้นตอนการทำ Gas Quality Check เพื่อดูว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้หรือไม่



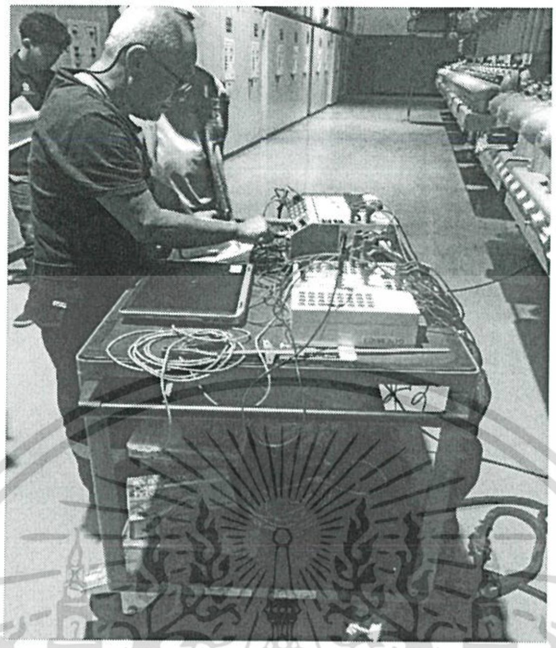
รูป 5.40 ทีมซ่อมบำรุงทำการทดสอบคุณภาพก๊าซ SF_6 หลังเติมก๊าซใส่ในแต่ละคอมพาร์ทเมนต์ของ GIS



รูป 5.41 ทีมซ่อมบำรุงทำการทดสอบคุณภาพก๊าซ SF_6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ประกอบชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์กลับที่ตัว GIS แล้วทำการ motion และ timimg test หลังเปลี่ยนชิ้นส่วนอีกครั้ง



รูป 5.42 Supervisor ทำการทดสอบ motion และ timing หลังจากซ่อมบำรุงชุดกลไกการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

1. จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ (FEM) เพื่อศึกษาลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ Triple Junction เป็นจุดที่พบปัญหามากในทางปฏิบัติ พบว่ามีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงอนันต์ที่จุดรอยต่ออิเล็กโตรดด้านแรงสูงและเข้าใกล้ศูนย์ที่จุดรอยต่ออิเล็กโตรดด้านกราวด์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.7 และจากการจำลองสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบระหว่างอิเล็กโตรดทรงกลมและระนาบ พบว่ามีลักษณะของสนามไฟฟ้าคล้ายกับสนามไฟฟ้าของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมซึ่งเป็นรูปทรงที่ใช้ใน GIS และ GIL

2. จากการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ ซึ่งได้แก่ อากาศ N_2 และ SF_6 ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่าก๊าซ SF_6 สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้สูงสุดรองลงมาคือ N_2 และอากาศที่ความดันและระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน และแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซทั้งสามชนิดมีค่าขึ้นอยู่กับความดันของฉนวนก๊าซและระยะแกปของอิเล็กโตรด

3. จากการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซผสม พบว่าก๊าซ SF_6 ผสม N_2 ในอัตราส่วน 80:20 สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้มากกว่าก๊าซ SF_6 ผสม N_2 ในอัตราส่วน 60:40 ที่ความดันและระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน และก๊าซ SF_6 ผสม N_2 มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับน้อยกว่าก๊าซ SF_6 แต่มากกว่าก๊าซ N_2

4. จากการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปน พบว่าเมื่อฉนวนก๊าซมีอนุภาคเข้าไปเจือปน ฉนวนก๊าซจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับน้อยลง และเมื่อฉนวนก๊าซมีอนุภาคที่เป็นโลหะเจือปนจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับน้อยกว่าฉนวนก๊าซมีอนุภาคที่เป็นพลาสติกเจือปน และถ้าอนุภาคที่เจือปนมีขนาดใหญ่จะทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซลดลงมากกว่าอนุภาคที่เจือปนที่มีขนาดเล็ก

5. จากการศึกษาดูงานการซ่อมบำรุง GIS ระบบ 115 kV ที่โรงไฟฟ้า Glow จังหวัดระยอง เพื่อวางแผนในการซ่อมบำรุง GIS และ GIL ทำให้ได้เห็นอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ ที่หน้างานจริง และทำให้เข้าใจในขั้นตอนการซ่อมบำรุง ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบคุณภาพของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ การทดสอบการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ชุดควบคุมการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ใบมีดตัดตอน และใบมีดกราวด์ รวมทั้งเข้าใจขั้นตอนการเช็คสถานการณ์รั่วซึมของก๊าซ SF_6 เพื่อตรวจสอบว่ามีการทำงานตามปกติหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการควบคุมอัตราการขึ้นแรงดันให้คงที่และเหมือนกันตลอดการทดสอบ เพราะถ้าอัตราการขึ้นแรงดันในการทดสอบแต่ละครั้งที่ไม่เท่ากัน ก็จะทำให้ผลการทดสอบมีความผิดเพี้ยนไป

2. ควรมีการออกแบบชุดทดสอบที่ไม่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้นที่จุดอื่นของชุดทดสอบ เนื่องจากจะทำให้ให้ผลการทดสอบมีความผิดเพี้ยนไป

3. ในการทดสอบฉนวนก๊าซแต่ละชนิดควรมีการควบคุมระดับความดัน และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดให้เหมือนกัน เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนก๊าซแต่ละชนิดได้

4. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซนั้น ต้องอาศัยการสังเกตและความว่องไวในการตัดวงจรทันที เมื่อเกิดการเบรกดาวน์ หากมีการตัดวงจรช้า จะทำให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิวของอิเล็กโทรด ทำให้ผลการทดสอบมีความผิดเพี้ยนไปมากขึ้น

5. ในการทดสอบแต่ละครั้งนั้น หลังจากเกิดเบรกดาวน์แล้วควรปล่อยให้ฉนวนก๊าซที่ดีมาแทนที่ฉนวนก๊าซที่เสียสภาพไปประมาณ 2 นาที เพื่อให้ผลการทดสอบมีความถูกต้องมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] AIDA ENGINEERING CO., LTD, 2547, "gas insulated substation", ปรับปรุงครั้งที่1, 27 มกราคม 2547, บทที่4, หน้า 1-19

[2] รฐนนท์ ศรีเผือก, ศุภกิตติ์ โชติโก, กิตติมศักดิ์ ติกะโกศล, 2559, "การประยุกต์ใช้การตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วนแบบออนไลน์สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทย", วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่39, ฉบับที่1, มกราคม – มีนาคม 2559, หน้า 105-122

[3] A. Haddad, D. Warne, 2007, "Advances in High Voltage Engineering", Institution of Engineering and Technology, London, United kingdom.

[4] IEC Std. 60270: High Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements, 2000.

[5] http://www.electrical4u.com/sulfur-hexafluoride-sf6-gas-properties/

[6] สำรวย สังข์สะอาด, 2549, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์.

[7] T. Takuma, "Field behavior at a triple junction in composite dielectric arrangements", IEEE Trans. Electr.Insul., vol. 26, no. 3, pp. 500-509, June 1991.

[8] R. Arora and W. Mosch, "High Voltage and Electrical Insulation Engineering"

[9] I. Sauers, H. W. Ellis and L. G. Christophorou, "NEUTRAL DECOMPOSITION PRODUCTS IN SPARK BREAKDOWN OF SF6" , IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No.2, April 1986, pp.113-119.

[10] F. Y. Chu, "SF6 DECOMPOSITION IN GAS-INSULATED EQUIPMENT" , IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-2l, No.5, October 1986, pp.711-715.

[11] T. Minagwa, H. Kohyama, Y. Yoshitomo, M. Miyashita and E. Nagao: "Electrical surface resistivity of organic coating resin in arc-decomposed SF6 gas" , IEEE, 2006, pp. 696-699.

[12] IEC60243-1, Edition3.0–2013, Electric strength of insulating materials–Test methods– Part 1: Tests at power frequencies.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

บทความวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน SF_6 และการวางแผนบำรุงรักษา GIS

THE STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SF_6 AND THE PREVENTIVE MAINTENANCE FOR GIS

ก้องเกียรติ ยี่หวา, คฑาวุธ ตันเจริญ, ชนกันต์ โฆษิตาภา, ธเนศพล อภัยสุเทพพร
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: chanakun_new@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ซึ่งเป็นฉนวนก๊าซที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS) และสายส่งไฟฟ้าฉนวนก๊าซ (GIL) เปรียบเทียบกับฉนวนก๊าซชนิดอื่นได้แก่ อากาศและก๊าซไนโตรเจน (N_2) โดยทำการออกแบบชุดทดสอบในการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซโดยทำการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ก๊าซไนโตรเจนและอากาศ เมื่อกำหนดให้ความดันก๊าซมีค่า 0.5 – 2 บาร์และระยะแกปมีค่า 0.2 – 1 เซนติเมตร พบว่าที่ระยะแกปและความดันเดียวกัน ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์สามารถทนแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงที่สุด รองลงมาคือก๊าซไนโตรเจนและอากาศ โดยที่แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของฉนวนก๊าซขึ้นอยู่กับความดันของฉนวนก๊าซและระยะแกปของอิเล็กโตรด

คำสำคัญ: ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์, ฉนวนก๊าซ

Abstract

This paper is a study the breakdown voltage of Sulfur Hexafluoride (SF_6) which is gas insulation used in gas-insulated substation (GIS) and gas-insulated transmission line (GIL) compared with other gas insulation including air and nitrogen (N_2). The test cell was designed and constructed for the breakdown voltage of gas insulation testing the gases for the experiment were sulfur hexafluoride, nitrogen and air. It was found that from AC breakdown voltage withstand test of sulfur hexafluoride, nitrogen and air, at the same pressure and gap distance, sulfur hexafluoride can withstand high voltage breakdown followed by nitrogen and air. The breakdown voltage of the gas insulation depended on the gas pressure and the gap distance of the electrodes.

Keyword: Sulfur Hexafluoride, Gas insulation

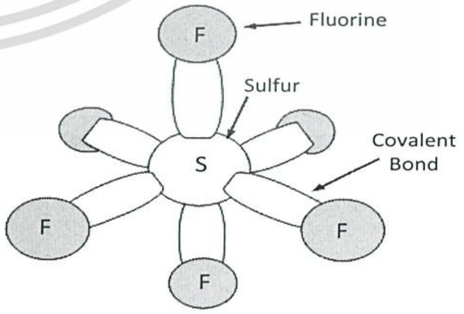
1. บทนำ

การศึกษาทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการเรียนรู้และทำความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานการเสียสภาพความเป็นฉนวนไฟฟ้าของฉนวนก๊าซ ฉนวนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ อากาศและก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ซึ่งก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์เป็นฉนวนก๊าซที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS) และสายส่งไฟฟ้าฉนวนก๊าซ (GIL) ดังนั้นการบำรุงรักษา GIS และ GIL จึงจำเป็นต้องเข้าใจทฤษฎีการเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานบำรุงรักษา GIS และ GIL

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติทางเคมีของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) [1]

โครงสร้างของซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ประกอบด้วยซัลเฟอร์หนึ่งอะตอมมีฟลูออรีนล้อมรอบอยู่หกอะตอม โดยค่าพลังงานของอะตอมซัลเฟอร์คือ $1S^2\ 2S^2\ 2P^6\ 3S^2\ 3P^4$ ส่วนค่าพลังงานของอะตอมฟลูออรีนคือ $1S^2\ 2S^2\ 2P^5$ แต่ละอะตอมซัลเฟอร์ในโมเลกุล SF_6 จะสร้างพันธะโคเวเลนต์กับหกอะตอมฟลูออรีน ทำให้มีพันธะโคเวเลนต์ทั้งหมด 6 พันธะ โครงสร้างโมเลกุลของก๊าซนี้แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF_6

ก๊าซ SF_6 เป็นก๊าซขั้วลบ ทำให้ดูดซับอิเล็กตรอนอิสระซึ่งเกิดเนื่องจากการอาร์ค การรวมกันของอิเล็กตรอนอิสระกับโมเลกุลจะได้ไอออนหนักและมีขนาดใหญ่ ทำให้มีการเคลื่อนไหวที่ต่ำมาก ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์จึงมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี ความเป็นฉนวนของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ประมาณ 2.5 เท่าของอากาศที่ความดัน 1 บาร์

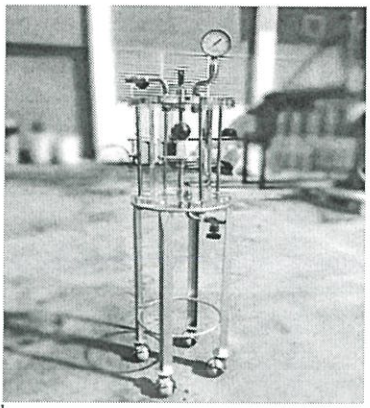
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ [1]

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	$< 2 \times 10^{-7}$

3. การออกแบบชุดทดสอบและฉนวนก๊าซที่ใช้ในการทดสอบ

3.1 ชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ฉนวนก๊าซ

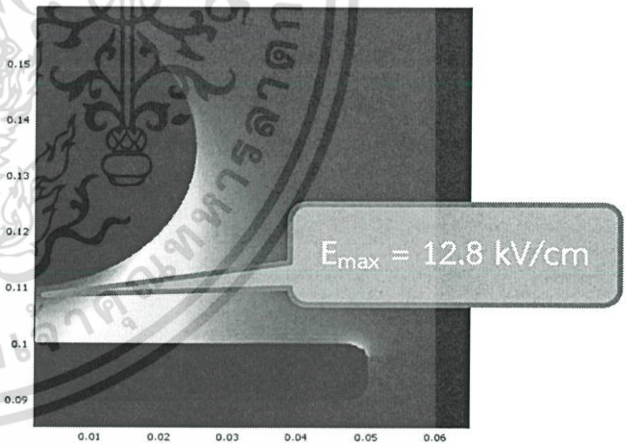
ชุดทดสอบประกอบไปด้วยบรรจุฉนวนก๊าซและอิเล็กโตรดทำจากวัสดุอะคริลิกใส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 15 cm หนา 5 mm สูง 25 cm ด้านบนและล่างของกระบอกประกอบกับแผ่นอะคริลิกวงกลม เจาะรูสำหรับยึดโครงสร้างของชุดทดสอบและยึดกับแกนตัวนำที่ไว้สำหรับใส่อิเล็กโตรด และทำร่องสำหรับใส่ยางกันซึมในส่วนของรอยต่อ ส่วนอิเล็กโตรดที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60243-1[2] โดยอิเล็กโตรดทรงกลมทำมาจากวัสดุทองแดง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm และอิเล็กโตรดระนาบทำจากสแตนเลส โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm และมีความหนา 1 cm และมาตรวัดความดันใช้ในการวัดความดันของก๊าซที่อยู่ภายในชุดทดสอบ



รูปที่ 2 ชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ

3.2 การจำลองวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์

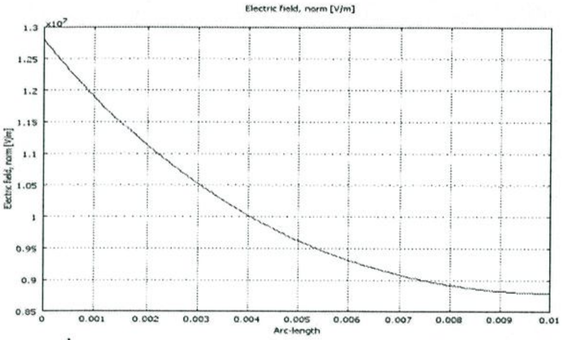
ในการจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้านี้ ได้ทำการป้อนแรงดันขนาด 100 kV ไปที่อิเล็กโตรดทรงกลม และต่อกราวด์ทางด้านอิเล็กโตรดระนาบ ภายในฉนวนก๊าซที่ความดัน 1 bar ระยะแกป 1 cm พบว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่เกิดขึ้นทางด้านอิเล็กโตรดทรงกลม มีค่าเท่ากับ 12.8 kV/cm โดยแบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ

ฉนวนก๊าซที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ อากาศ N_2 และ SF_6 ซึ่งสามารถใช้กับผลการจำลองนี้ได้ เนื่องจากฉนวนก๊าซทั้ง 3 ชนิดมีค่า permittivity เป็น 1 เหมือนกัน โดยที่ความดัน 1 bar อากาศ N_2 และ SF_6 สามารถทนความเข้มสนามไฟฟ้าได้ 30, 31 และ 89 kV/cm ตามลำดับ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดของชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ

3.2 การเตรียมฉนวนก๊าซสำหรับการทดสอบ

3.2.1 ฉนวนก๊าซ

ฉนวนก๊าซที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ชนิดได้แก่

1. อากาศ: อุณหภูมิ 30ºC, ความดัน 762 mmHg, ความชื้นสัมพัทธ์ 74%

2. ก๊าซ N_2: ความบริสุทธิ์ 99.5%, ความดันบรรจุ 2000 psig ที่ 27 ± 2ºC

3. ก๊าซ SF_6: ความบริสุทธิ์ 99.99%

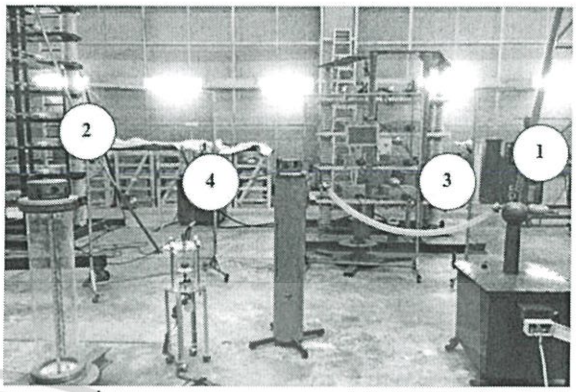
รูปที่ 5 ชนิดของฉนวนก๊าซสำหรับการทดสอบ
1.อากาศ 2.ก๊าซ N_2 3.ก๊าซ SF_6

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 วงจรทดสอบ

การทดสอบนั้นประกอบไปด้วย

1. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศ ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
2. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ N_2 ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
3. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ SF_6 ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย



รูปที่ 6 วงจรทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ
1.หม้อแปลงทดสอบ 2.โวลเตจดิไวเดอร์ 3.ตัวต้านทานน้ำ 4.ชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ

4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 6

2. นำก๊าซใส่ลงไปในชุดทดสอบจากนั้น อัดฉนวนก๊าซ ลงในชุดทดสอบ โดยให้ฉนวนก๊าซอยู่ในระดับความดันที่ต้องการทดสอบ

3. ตรวจสอบฉนวนก๊าซที่ถูกอัดลงในชุดทดสอบว่ามีการรั่วซึมอยู่หรือไม่โดยใช้น้ำสบู่ป้ายไปตามข้อต่อ ถ้ามีการรั่วให้ขันน็อตแน่นขึ้น จนกว่าฟองสบู่ที่มีจะหายไปจนหมด

4. จดบันทึกค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ

5. ทำการป้อนแรงดันโดยให้อัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ 4 kV/s ขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ผ่านฉนวนก๊าซ

6. บันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดแรงดัน

7. เมื่อฉนวนก๊าซที่ใช้ทดสอบเกิดการเบรกดาวน์ จากนั้นตั้งพักชุดทดสอบ ทิ้งไว้ระยะเวลา 2 นาที

8. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5-7 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะทดสอบครบจำนวน 6 ครั้ง

4.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซชนิดต่าง ๆ ในสนามไฟฟ้าไม่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย สามารถสรุปออกมาได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

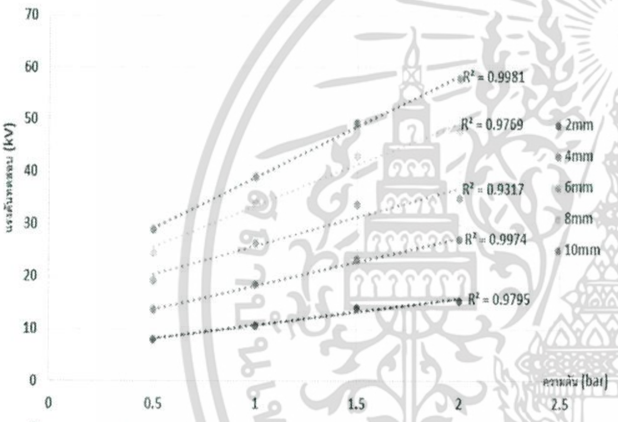
1. จากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศ ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่า อากาศที่ความดัน 2 bar และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 cm มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 57.85 kV และอากาศที่ความดัน 0.5 bar และระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

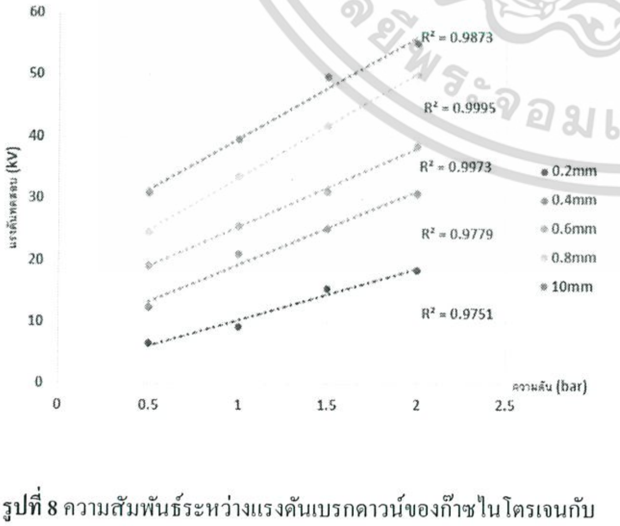
ระหว่างอิเล็กโทรด 0.2 cm มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ 8.04 kV

2. จากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ N_2 ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่า ก๊าซ N_2 ที่ความดัน 2 bar และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 cm มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 55.00 kV และ ก๊าซ N_2 ที่ความดัน 0.5 bar และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0.2 cm มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ 6.56 kV

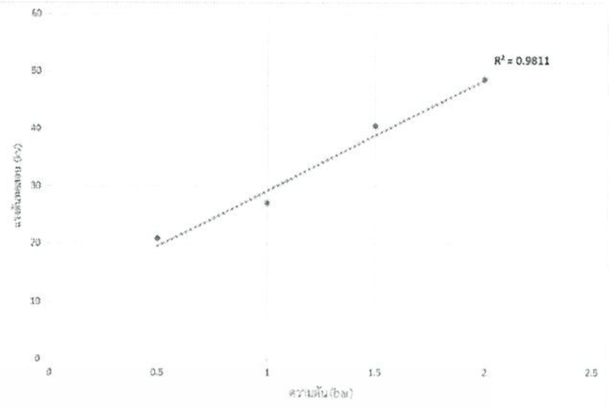
3. จากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่า ด้วยขีดจำกัดของอุปกรณ์หม้อแปลงที่ใช้ในการขึ้นแรงดัน ทำให้สามารถทดสอบได้สูงสุดที่ความดัน 1 bar และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0.6 cm มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 69.40 kV



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศกับความดันที่ระดับต่างๆ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซไนโตรเจนกับความดันที่ระดับต่างๆ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์ของ SF_6 กับความดันที่ระดับต่างๆ

5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลทดสอบวัดค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซชนิดต่างๆ ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย สามารถสรุปได้ว่า จากการทดสอบพบว่าก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์มีแรงดันเบรกดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยสูงกว่าอากาศและก๊าซไนโตรเจนที่ความดันและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากัน 2.63 และ 2.72 เท่าตามลำดับ และแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซทั้งสามชนิดมีค่าขึ้นอยู่กับความดันของฉนวนก๊าซและระยะแกปของอิเล็กโตรด

6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงาน และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ให้ความเอาใจใส่ และช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์จัดหาก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบ บริษัท MEIDENSHA CORPORATION ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย และโรงไฟฟ้า Glow จังหวัดระยองที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับ GIS และโอกาสในการดูงานซ่อมบำรุง GIS ในภาคสนาม

7. เอกสารอ้างอิง

[1] **http://www.electrical4u.com/sulfur-hexafluoride-sf6-gas-properties/.**

[2] IEC 60243-1, Edition 3.0 – 2013, Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies.

[3] **http://chemistry.mdma.ch/hiveboard/rhodium/pdf/chemical-data/diel_strength.pdf.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การวางแผนในการซ่อมบำรุง GIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวางแผนในการซ่อมบำรุง GIS

ระบบ GIS นั้นสามารถใช้งานได้นานโดยไม่ต้องมีการซ่อมบำรุง แต่ในทางปฏิบัติมีการซ่อมบำรุงในส่วนของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ใบมีดตัดตอน ใบมีดกราวด์ และคุณภาพของฉนวนก๊าซในทุก 10-15 ปี ซึ่งมีแผนในการซ่อมบำรุงดังตารางต่อไปนี้

การปฏิบัติงาน CB	phase	R		Y		B	
		1		2		3	
1. CB timing test ก่อนซ่อมบำรุง -ปิด (เทียบกับมาตรฐานโรงงาน) -เปิด	Δt_{max} = ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
	Δt_{max} = ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
2. Contact Resistance ที่กระแส 100A ก่อนซ่อมบำรุง - ระหว่างซี่ของ Finger - ระหว่างจุดต่อกันของ Piston - ระหว่าง Contact Crown กับ Blast Cylinder - วัดความต้านทานรวมจาก Finger ถึง Blast Cylinder							

การปฏิบัติงาน CB	phase	R		Y		B	
		1		2		3	
3. CB timing test หลังซ่อมบำรุง -ปิด (เทียบกับมาตรฐานโรงงาน) -เปิด	Δt_{max} = ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
	Δt_{max} = ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
4. Contact Resistance ที่กระแส 100A หลังซ่อมบำรุง - ระหว่างซี่ของ Finger - ระหว่างจุดต่อกันของ Piston - ระหว่าง Contact Crown กับ Blast Cylinder - วัดความต้านทานรวมจาก Finger ถึง Blast Cylinder							

การปฏิบัติงาน DS/ES	phase	R	Y	B
		1	2	3
5. เช็คเวลาทำงานของ DS/ES -ปิด ก่อนซ่อมบำรุง -เปิด ที่ Supply Voltage 133.8 VDC	สูงสุด = 6.5ms	ms	ms	ms
	สูงสุด = 6.5ms	ms	ms	ms
6. เช็คเวลาทำงานของ DS/ES -ปิด ก่อนซ่อมบำรุง -เปิด ที่ Supply Voltage 133.8 VDC	สูงสุด = 6.5ms	ms	ms	ms

เอกสารนี้เป็น ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปฏิบัติงาน Gas	G0			G1			G2			G5			G9		
	R	Y	B	R	Y	B	R	Y	B	R	Y	B	R	Y	B
7. ความดัน (bar)															
8. การรั่วไหลของก๊าซ (รั่ว/ไม่รั่ว)															
9. ความบริสุทธิ์ของSF_6 (%)															
10. Dew Point (3/- °C)															
11. ส่วนประกอบของน้ำ (ppmv)															
12. ปริมาณ SO_2 (PPM)															

* ทำการซ่อมบำรุงที่เฟส R, Y, B

โดยที่ CB คือ Circuit Breaker

DS คือ Disconnector Switch

ES คือ Earthing Switch

G1, G2 คือ คอมพาร์ทเมนต์ ของ Disconnector Switch

G0 คือ คอมพาร์ทเมนต์ ของ เซอร์กิตเบรกเกอร์

G5 คือ คอมพาร์ทเมนต์ ของ Voltage Transformer

G9 คือ คอมพาร์ทเมนต์ ของ Disconnector Switch, Earthing Switch และ Current Transformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

การคำนวณก๊าซ SF_6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณปริมาตรของก๊าซ SF_6 ที่ใช้ในการทดสอบ

จากสมการ

$$V = \pi r^2 h$$

$$V = \frac{\pi \times (15)^2 \times 25}{4}$$

$$V = 4.4179 \times 10^3 \ cm^3$$

ความหนาแน่นของก๊าซ SF_6 = 6.146×10^{-3} g/cm^3
คำนวณหามวลของก๊าซ SF_6 ที่ใช้ในการทดสอบ

จากสมการ

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = 6.146 \times 10^{-3} \times 4.4179 \times 10^3$$

$$m = 27.1524 \ g$$

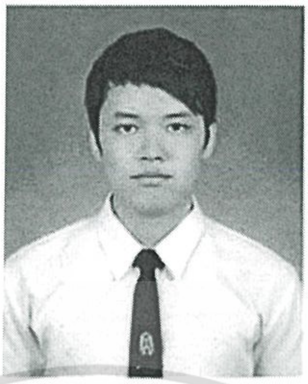
ในการทดสอบนั้นได้ทำการทดสอบที่ความดันสูงสุด 2 bar ดังนั้นน้ำหนักของก๊าซ SF_6 ที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้งจะใช้สูงสุดที่

$$m = 2 \times 27.1524$$

$$m = 54.3048 \ g$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

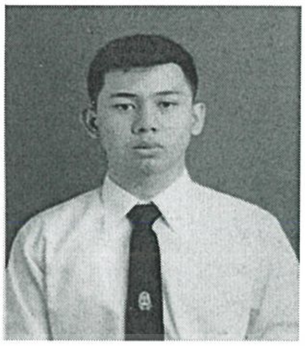
ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล นายก้องเกียรติ ยี่หวา
วัน เดือน ปีเกิด 14 กันยายน พ.ศ. 2537
ที่อยู่ 126 หมู่ 14 ต.ตากออก อ.บ้านตาก จ.ตาก 63120
ประวัติการศึกษา ระดับชั้นประถมศึกษา โรงเรียนเซนต์ฟรังซีสเซเวียร์มัธโนทัย
ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเซนต์ฟรังซีสเซเวียร์มัธโนทัย
ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนตากพิทยาคม
ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail kongkiat_yee@hotmail.com

ชื่อ-สกุล นายคฑาวุธ ตันเจริญ
วัน เดือน ปีเกิด 19 พฤศจิกายน พ.ศ. 2537
ที่อยู่ 22 หมู่14 ต.เฝ้าไร่ อ.เฝ้าไร่ จ.หนองคาย 43120
ประวัติการศึกษา ระดับชั้นประถมศึกษา โรงเรียนบ้านโพธิ์งาม
ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเสลภูมิพิทยาคม
ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนชุมพลโพนพิสัย
E-mail ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Katawutmos19@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-สกุล นายขนกันต์ โฆษิตาภา
วัน เดือน ปีเกิด 25 ธันวาคม พ.ศ. 2537
ที่อยู่ 225 ม.3 ต.น้ำซึม อ.เมืองอุทัยธานี จ.อุทัยธานี 61000
ประวัติการศึกษา ระดับชั้นประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลเมืองอุทัยธานี จ.อุทัยธานี
ระดับชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนนครสวรรค์ จ.นครสวรรค์
ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail chanakun_new@hotmail.com

ชื่อ-สกุล นายธเนศพล อภัยสุเทพพร
วัน เดือน ปีเกิด 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2538
ที่อยู่ 33/38 แยก2-5 ซอยนวมินทร์85 ถนนนวมินทร์ แขวงนวมินทร์ เขตบึงกุ่ม กทม 10240
ประวัติการศึกษา ระดับชั้นประถมศึกษา โรงเรียนนราธิปพิทยา กรุงเทพมหานคร
ระดับชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนพระมารดานิจจานุเคราะห์ กรุงเทพมหานคร
ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail thanatepon.apai@outlook.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้