พฤติกรรมการเบรกดาวน์ของอากาศ, ก๊าซ และก๊าซผสมระหว่าง N_2 และ SF_6 ในระบบปิด

BREAKDOWN VOLTAGE OF AIR, N_2, SF_6 AND MIXED GAS IN CLOSED SYSTEM

จาตุรนต์ สินธุคุณากร
JATURON SINTUKUNAKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-020-080

พฤติกรรมการเบรกดาวน์ของอากาศ, ก๊าซ และก๊าซผสมระหว่าง N_2 และ SF_6 ในระบบปิด

BREAKDOWN VOLTAGE OF AIR, N_2, SF_6 AND MIXED GAS IN CLOSED SYSTEM

จาตุรนต์ สินธุคุณากร

JATURON SINTUKUNAKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-020-80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BREAKDOWN VOLTAGE OF AIR, N_2, SF_6 AND MIXED GAS IN CLOSED SYSTEM

JATURON SINTUKUNAKORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

KMITL-2018-EN-M-020-80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2018
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ พฤติกรรมการเบรกดาวน์ของอากาศ, ก๊าซ และก๊าซผสมระหว่าง N_2 และ SF_6 ในระบบปิด
Thesis Title Breakdown Voltage of Air, N_2 SF_6 and Mixed Gas in Closed System
นักศึกษา นายจาตุรนต์ สินธุคุณากร
รหัสประจำตัว 58601156
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-020-80

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ศุภกิตต์	โชติโก	
ผศ.ดร.เชาว์	ชมภูอินไหว	
รศ.ดร.อานันทวัฒน์	คุณากร	
ผศ.ดร.พีรวุฒิ	ยุทธโกวิท	
รศ.ดร.นรเศรษฐ	พัฒนเดช	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-304 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการเบรกดาวน์ของอากาศ, ก๊าซ และก๊าซผสมระหว่าง N_2 และ SF_6 ในระบบปิด
นักศึกษา	นายจาตุรนต์ สินธุคุณากร
รหัสประจำตัว	58601156
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบความคงทนแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซได้แก่ อากาศ การผสมก๊าซระหว่างก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์(SF_6) และ ก๊าซไนโตรเจน(N_2) และก๊าซผสมระหว่าง SF_6 กับ N_2 โดยทำการควบคุม ความดันก๊าซ และระยะช่องว่างอิเล็กโตรดทรงกลม และระนาบ ในช่วงระยะระหว่าง 2 – 10 มิลลิเมตร และมีความดันของก๊าซ 0.5 – 2 บาร์ ในระบบปิด โดยได้ออกแบบอุปกรณ์และห้องทดสอบระบบปิด(Test Cell) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซเดี่ยวขึ้นอยู่กับ ความดันของก๊าซ และระยะช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด ในกรณีของก๊าซผสมอัตราส่วนของก๊าซผสมเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ เมื่อมีการผสมก๊าซ SF_6 และ ก๊าซ N_2 ในอัตราส่วน 80:20 ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซผสมจะมีค่า 82% ของก๊าซ SF_6 นอกจากนี้แล้วผลของอนุภาคเจือปนในก๊าซ ทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซลดลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากการศึกษาความคงทนต่อการเบรกดาวน์ของเปรียบเทียบของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ได้กล่าวเรียนข้างต้นแล้ว งานวิจัยฉบับนี้ยังได้ศึกษาต่อเนื่องถึงผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศเมื่อมีสิ่งเจือปนชนิดฉนวนและโลหะเข้ามาในระบบไฟฟ้าแบบปิด ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ของชิ้นส่วนสถานีไฟฟ้าชนิดฉนวนก๊าซ(Gas Insulated Substation : GIS) รวมถึงการวัดค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน(Partial Discharge : PD) เมื่อมีสิ่งเจือปนเข้าไปอยู่ใน Test Cell ที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน X พบว่าสามารถตรวจวัดค่า PD ได้ ทุกตำแหน่งในแนวแกน x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Breakdown Voltage of Air, N_2, SF_6 and Mixed Gas in Closed System
Student	Mr.Jaturon Sintukunakorn
Student ID.	58601156
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech

ABSTRACT

This thesis proposes the breakdown voltage characteristic of gas insulation i.e., dry air, Sulfur Hexafluoride (SF_6) and Nitrogen (N_2) including the mixture gas of SF_6 and N_2. In the experiment, gas pressure of 0.5 -2 bar and the gap distance between the spherical- plane electrodes in the range of 2 - 10 mm gas were controlled in closed system. The test result showed that the breakdown voltage of the gas dielectric depended on the gas pressure and the gap distance between the electrodes. In the case of mixture gases, the ratio of gas volume was one of important factors influenced on the breakdown voltage characteristic. From the experiments, SF_6 and N_2 mixed with the ratio of 80:20 provided the breakdown strength 82% of the pure SF_6. Moreover, particles in the experimented gases reduced significantly the breakdown voltage strength. In addition, the study of the durability of the comparison of various gas types. This research also investigated the effects of air insulation breakdown voltage when have the particle into the Test cell. This may be a simulation of the part of Gas Insulated Substation(GIS), as well as Partial Discharge (PD) measurements when contaminants enter the Test cell every position in X-Axis. The PD can be measured at every position refer this tested.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือพร้อมแนะนำแนวทางการแก้ไขข้อบกพร่องในด้านต่าง ๆ ตั้งแต่การอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แนวทางการปฏิบัติงาน และคอยสอบถามความคืบหน้าและปัญหาต่างๆ โดยท่านคอยให้คำปรึกษารวมถึงการลงมือปฏิบัติงานจริงด้วยตนเองในบางครั้งเพื่อช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น แนะนำบุคลากรที่มีความรู้เกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงและมีความสมบูรณ์ ซึ่งข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ คุณสุริยะ มงคลสาธิตพงศ์ บริษัท พีดี โซลูชั่นส์ จำกัด ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวัดการดิสชาร์จบางส่วน(Partial Discharge :PD) และให้คำแนะนำในการวัดการเกิด PD รวมถึงสนับสนุนเจ้าหน้าที่ของบริษัทฯ ในการอำนวยความสะดวกในการทดสอบ

ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดหาก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ

ขอขอบพระคุณคุณวุฒิชัย ชนปิยางกูร ผู้จัดการใหญ่ บริษัท ไออาร์พีซี คลีน พาวเวอร์ จำกัด ที่สนับสนุนการศึกษาของพนักงาน และให้โอกาสดำเนินโครงการสถานีไฟฟ้าแรงสูงฉนวนก๊าซระดับแรงดัน 115 kV และ 230 kV

ขอขอบพระคุณคุณประสาน กังวลงาน ผู้จัดการแผนกบำรุงรักษาไฟฟ้าโรงไฟฟ้า บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด(มหาชน) ที่ให้คำแนะนำ และสนับสนุนข้อมูลด้านต่างๆ และแนะนำผู้ทำ Test Cell

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Laboratory, HVL) สำหรับการช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ อาทิ สถานที่และอุปกรณ์การทดสอบ ทั้งนี้ขอขอบคุณนักศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และ ปริญญาเอก ทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคณาจารย์ทุกท่านที่ถ่ายทอดวิชาความรู้เพื่อให้ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงสมาชิกท่านอื่น ๆ ในครอบครัว ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือทั้งในด้านกำลังใจและทุนทรัพย์ ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

จาตุรนต์ สินธุคุณากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas Insulated Substation: GIS)	4
2.2 อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ	5
2.2.1 ตัวถังโลหะ (Enclosure)	5
2.2.2 บัสบาร์ (Bus-Bar)	6
2.2.3 Insulation Spacer	6
2.2.4 อุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน (Pressure Relief Device)	7
2.2.5 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker)	8
2.2.6 ใบมีดตัดตอน (Disconnecting Switch)	9
2.2.7 ใบมีดกราวด์ (Ground Switch)	10
2.2.8 หม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformers)	11
2.2.9 หม้อแปลงวัดแรงดัน (Voltage Transformers)	11
2.2.10 External Connection	12
2.2.11 Lightning Arrester	12
2.2.12 Local Control Cubicle	13
2.2.13 Gas Systems	13
2.3 การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในระบบ GIS	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.. 24
2.6.3 สนามไฟฟ้าในอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.................................... 27
2.7 พฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction... 27
2.8 เบรกดาวน์ในก๊าซไฟฟ้าลบ (Breakdown in Electronegative Gas)........................ 29
2.8.1 การเกิดไอออนลบ.. 29
2.8.2 สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนเป็นไอออนลบ.. 30
2.8.2 เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซไฟฟ้าลบ.. 31
2.9 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์ในก๊าซ SF_6.. 32
2.9.1 แรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.. 34
2.9.2 แรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของ SF_6..................................... 34
2.10 กลไกการสลายตัวของก๊าซ SF_6.. 36
2.11 ผลของผลิตภัณฑ์จากการสลาย SF_6.. 41
2.11.1 ความเป็นพิษ... 41
2.11.2 ผลกระทบต่อ GIS.. 41
2.12 การกำจัดผลิตภัณฑ์จากการอาร์คของ SF_6... 42
2.13 ความต้านทานพื้นผิวของเรซินที่เคลือบด้วยสารอินทรีย์ในก๊าซ SF_6...................... 42
2.14 การผสมก๊าซเบื้องต้น และสมการของแมกซ์เวล การ์เน็ต(Maxwell Garnett)........ 46
2.14.1 พื้นฐานการผสมก๊าซ และสมการของแมกซ์เวล การ์เน็ต(Maxwell Garnett).. 46
2.14.2 โพลาไลซ์อะบิลิตี้(Polarizability) ของไดอิเล็กทริกซ์ทรงกลม....................... 47
2.14.3 สมการของ Clausius-Mossotti... 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.4 กฎการผสมแมกซ์เวล การ์เน็ต(Maxwell Garnett Mixing Rule)............... 48

บทที่ 3 การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ... 50
3.1 การออกแบบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ(Test Cell).................................... 51
3.1.1 ออกแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม Solid Works 51
3.1.2 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมโซล............... 55
3.1.3 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศที่มีอนุภาค......... 56
3.1.4 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมโซล............... 57
3.2 การเตรียมฉนวนก๊าซสำหรับการทดสอบ.. 58
3.2.1 ฉนวนก๊าซ 3 ชนิด.. 58
3.2.2 ฉนวนก๊าซผสม.. 58
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ.. 59
3.3.1 วาริแอคสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า... 59
3.3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ พิกัด 100 kV 50 mA............................. 59
3.3.3 ตัวต้านทานน้ำ ค่าความต้านทาน 500 กิโลโอห์ม... 60
3.3.4 โวลเตจดิไวเดอร์ พิกัด 100kV บรรจุแก๊ส SF_6... 60
3.3.5 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ............. 61
3.3.6 มัลติมิเตอร์... 62
3.3.7 เครื่องมือวัด Partial Discharge(PD)... 62
3.4 การออกแบบไดอะแกรมการทดลองและวงจรการทดสอบ.. 63
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ... 64
4.1 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ........................... 64
4.1.1 วงจรทดสอบ.. 64
4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ.. 64
4.1.3 ผลการทดสอบ.. 65
4.2 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสม.................... 71
4.2.1 ผลการทดสอบ.. 71
4.3 การเปรียบเทียบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ.............................. 73
4.4 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปน.. 74
4.4.1 ผลการทดสอบ.. 74
4.5 การทดสอบลักษณะการเกิดการ Partial Discharge(PD) เมื่อมีสิ่งเจือปน ใน Test Cell.. 79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 การทดสอบการเกิด PD ขณะที่ยังไม่ได้ใส่สิ่งเจือปน.. 79
4.5.2 การทดสอบการเกิด PD ใส่สิ่งเจือปนชนิดโลหะที่ตำแหน่งที่ 1........................ 80
4.5.3 การทดสอบการเกิด PD ใส่สิ่งเจือปนชนิดโลหะที่ตำแหน่งที่ 2........................ 81
4.5.4 การทดสอบการเกิด PD ใส่สิ่งเจือปนชนิดโลหะที่ตำแหน่งที่ 3........................ 81
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.. 83
5.1 สรุป.. 83
5.2 ข้อเสนอแนะ.. 84
เอกสารอ้างอิง.. 85
ภาคผนวก.. 86
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.. 87
ภาคผนวก ข ตัวอย่างตารางแสดงค่า permittivity... 94
ประวัติผู้เขียน.. 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 คุณสมบัติของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์.. 22

2.2 ค่า b = f (pr).. 36

2.3 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่พบจากการสุ่มตัวอย่างก๊าซ SF_6 ที่พลังงานการดิสชาร์จรวม = 36kJ, ความดันของ SF_6 = 0.133 MPa, เวลาหลังจากดิสชาร์จ = 24 ชั่วโมง................. 38

2.4 แสดงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งกรัมของอลูมิเนียม และถ่านที่ความดันและอุณหภูมิปกติ.. 42

4.1 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซอากาศที่ความดันและระยะแกปต่างๆ.. 66

4.2 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซไนโตรเจนที่ความดันและระยะแกปต่างๆ... 68

4.3 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ SF_6 ที่ความดันและระยะแกปต่างๆ.. 70

4.4 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสมในอัตราส่วน $SF_6 : N_2$ (80:20) ที่ความดันและระยะแกปต่างๆ.. 72

4.5 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสมอัตราส่วน $SF_6 : N_2$ (60:40) ที่ความดันและระยะแกปต่างๆ... 73

4.6 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคโลหะและฉนวนที่ขนาดต่างกัน และปริมาณต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 5 มิลลิเมตร.. 75

4.7 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคโลหะและฉนวนที่ขนาดต่างกัน และปริมาณต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 10 มิลลิเมตร.. 76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวถังโลหะ	5
2.2 บัสบาร์	6
2.3 Insulation Spacer	7
2.4 ลักษณะอุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน	7
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	10
2.9 หม้อแปลงกระแสในระบบ GIS AREVA B65 115kV	11
2.10 หม้อแปลงวัดแรงดันใน GIS	12
2.11 ภาพรวมของระบบ GIS แสดงเป็นภาพตัดขวาง	14
2.12 ภาพรวมของระบบ GIS แสดงเป็นไดอะแกรมตัดขวาง	15
2.13 ก)เซ็นเซอร์เสียง (Acoustic Emission Sensor) ข)การติดตั้งเซ็นเซอร์กับหม้อแปลงไฟฟ้า	17
2.14 วงจรวัดการดิสชาร์จบางส่วน โดยอ้างอิงจาก IEC 60270	17
2.15 ก) เซ็นเซอร์ตรวจจับคลื่นวิทยุ (UHF Sensor) และ ข) และการติดตั้งเซ็นเซอร์ที่สวิตเกียร์ แบบฉนวนก๊าซ	19
2.16 เปรียบเทียบเทคนิคการวัดดิสชาร์จบางส่วน	19
2.17 โครงสร้างของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)	21
2.18 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field) ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field) ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)	23
2.19 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า	24
2.20 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ	26
2.21 ไดอะแกรมแสดงลักษณะของจุด Triple Junction	28
2.22 สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันและ สัมประสิทธิ์เกาะตัวของอิเล็กตรอนของอากาศ และ SF_6 ตามลำดับ	33
2.23 ปริมาณของ SOF_4 ที่เกิดขึ้น ที่เวลามากกว่าหนึ่งชั่วโมงหลังจากการสปาร์ก กับพลังงานการดิสชาร์จรวม	40
2.24 แผนผังการเกิดผลิตภัณฑ์หลังจากการสปาร์ก	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.25 แผ่นอีพ็อกซีที่เต็มไปด้วยซิลิกาเปลือยหลังจากการวัดต้านทานพื้นผิวในก๊าซผสม SF_4/SF_6 43
2.26 ภาพตัดขวางของแผ่นอีพ็อกซี ซึ่งเกิดช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างอีพ็อกซี และฟิล์ม PTFE.......... 44
2.27 ความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวของแผ่นอีพ็อกซีที่ถูกเคลือบในก๊าซผสม SF_4/SF_6.......... 45
2.28 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ลดลงเทียบกับเวลาหลังจากการดับกระแสของ GCB.......... 46
2.29 พื้นฐานการผสมก๊าซ โดยทรงกลมคือก๊าซผสม โดยค่า E_i คือค่าของก๊าซผสม และ E_e เป็นค่าของสิ่งแวดล้อม.......... 47
2.30 อัตราส่วน $\frac{\varepsilon_{eff}-\varepsilon_e}{\varepsilon_i-\varepsilon_e}$ สำหรับการพยากรณ์ค่า Effective permittivity ของก๊าซผสม โดยค่า permittivity ของก๊าซที่นำมาผสมคือ ε_i และค่า permittivity ของก๊าซฐาน หรือก๊าซปริมาณมากคือ ε_e.......... 49
3.1 แบบจำลองที่บรรจุฉนวนก๊าซและใส่อิเล็กโตรดของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศ.......... 51
3.2 ที่บรรจุฉนวนก๊าซและใส่อิเล็กโตรดของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศที่ได้ออกแบบสร้างจริง.......... 51
3.3 แบบจำลองอิเล็กโตรดทรงกลมและระนาบของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศ.......... 52
3.4 อิเล็กโตรดทรงกลมและระนาบของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศที่ออกแบบสร้างจริง.......... 52
3.5 แบบจำลองแกนตัวนำสำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและทำการเชื่อมต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวด์.......... 53
3.6 แกนตัวนำสำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและทำการเชื่อมต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวด์ที่ออกแบบสร้างจริง.......... 53
3.7 แบบจำลองชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศ.......... 54
3.8 ชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศ ที่ออกแบบสร้างจริง.......... 54
3.9 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ.......... 55
3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดของชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ.......... 56
3.11 อนุภาคประเภทตัวนำ ขนาด 0.5, 1.0, และ 1.5 cm ตามลำดับ.......... 56
3.12 อนุภาคประเภทฉนวน ขนาด 0.5, 1.0, และ 1.5 cm ตามลำดับ.......... 57
3.13 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศที่มีอนุภาคประเภทตัวนำ.......... 57
3.14 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศที่มีอนุภาคประเภทฉนวน........ 58
3.15 ชนิดของฉนวนก๊าซสำหรับการทดสอบ และถังบรรจุก๊าซทิ้งหลังทดสอบ 1.ก๊าซ SF_6 2.ถังบรรจุก๊าซทิ้ง 3.ก๊าซ N_2........ 59
3.16 วาริแอคสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า........ 59
3.17 หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 235/100 kV, 5 kVA........ 60
3.18 ตัวต้านทานน้ำ........ 60
3.19 โวลเตจดิไวเดอร์ พิกัด 100 kV........ 61
3.20 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ........ 61
3.21 มัลติมิเตอร์........ 62
3.22 เครื่องมือวัด Partial Discharge(PD Analyzer)........ 62
3.23 ไดอะแกรมการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ........ 63
3.24 วงจรการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ........ 63
4.1 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ 1.หม้อแปลงทดสอบ 2.โวลเตจดิไวเดอร์ 3.ตัวต้านทานน้ำ 4.ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันของฉนวนก๊าซ (Test Cell)........ 64
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับความดันที่ระดับต่างๆ........ 67
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซไนโตรเจนกับความดันที่ระดับต่างๆ........ 69
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของ SF_6 กับความดันที่ระดับต่างๆ........ 71
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซผสมในอัตราส่วน SF_6 : N_2 (80:20) กับระยะแกป........ 72
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซผสมในอัตราส่วน SF_6 : N_2 (60:40) กับระยะแกป........ 73
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซ N_2, SF_6 ก๊าซผสมในอัตาราส่วน SF_6 : N_2 (80:20) และ SF_6 : N_2 (60:40)........ 74
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับอนุภาคที่โลหะและฉนวนที่ขนาดต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 5 มิลลิเมตร........ 75
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับอนุภาคที่โลหะที่มีปริมาณปริมาณต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 5 มิลลิเมตร........ 76
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับอนุภาคที่โลหะและฉนวนที่ขนาดต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 10 มิลลิเมตร... 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับอนุภาคที่โลหะที่
มีปริมาณปริมาณต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 10 มิลลิเมตร... 77
4.12 การติดตั้งอุปกรณ์วัด PD เพื่อดูลักษณะการเกิด PD เมื่อมีสิ่งเจือปนใน Test Cell โดยที่
1. UHF เซนเซอร์ 2.ชุดทดสอบ PD Analyzer HF/UHF ของ DIMRUS........................... 79
4.13 รูปคลื่นการวัด PD ของ Test Cell ที่ไม่ได้ใส่สิ่งเจือปน.. 79
4.14 ลักษณะการใส่สิ่งเจือปนใน Test Cell
(1). ตำแหน่งการวางสิ่งเจือปนของข้อ 4.6.2
(2). ตำแหน่งการวางสิ่งเจือปนของข้อ 4.6.3
(3). ตำแหน่งการวางสิ่งเจือปนของข้อ 4.6.4.. 80
4.15 รูปคลื่นการวัด PD ของ Test Cell เมื่อใส่สิ่งเจือปน ดังรูป 4.19(1).................................. 80
4.16 รูปคลื่นการวัด PD ของ Test Cell เมื่อใส่สิ่งเจือปน ดังรูป 4.19(2).................................... 81
4.17 รูปคลื่นการวัด PD ของ Test Cell เมื่อใส่สิ่งเจือปน ดังรูป 4.19(3).................................... 82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา และสำคัญของปัญหา

ในโลกยุคปัจจุบันมีการพัฒนาทางเศรษฐกิจ และเทคโนโลยีส์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าถือเป็นสาธารณูปโภคที่ทำสำคัญในการใช้ขับเคลื่อนเศรษฐกิจและการพัฒนาต่างๆ ทำให้ปริมาณการใช้ไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้นในทุกภาคส่วน ทั้งในส่วนภาคอุตสาหกรรม ห้างสรรพสินค้า โรงแรม การคมนาคมขนส่ง และการศึกษา ทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้ามีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องจัดหาแหล่งผลิตไฟฟ้าตลอดจนขยายเขตระบบส่งไฟฟ้าและระบบจำหน่ายเพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ถึงผู้ใช้ไฟ ตามความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า แต่การขยายเขตของระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าในปัจจุบันโดยเฉพาะในประเทศไทย ได้ประสบปัญหาหลักจากการเพิ่มหรือขยายสถานีไฟฟ้าแรงสูงในเขตตัวเมือง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรุงเทพมหานครฯ(กทม.) ที่ราคาที่ดินมีมูลค่าสูงและการขอเวนคืนที่ดินเป็นสิ่งที่ยากลำบาก ทำให้มีการพิจารณาการแก้ปัญหาโดยนำสถานีไฟฟ้าชนิดฉนวนก๊าซ(Gas Insulated Substation : GIS) มาใช้ทดแทนสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนอากาศ(Air Insulated Substation: AIS) ในการขยายสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่มีอยู่เดิม และการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแรงสูงแห่งใหม่ เพราะสามารถลดขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า อีกทั้งยังลดความเสี่ยงจากการเกิดไฟฟ้าดับที่มีสาเหตุจากสัตว์ และสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย ทำให้ความมั่นคงของระบบไฟฟ้า และคุณภาพไฟฟ้าดีขึ้น ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ผู้เกี่ยวข้องโดยเฉพาะบุคคลากรด้านการบำรุงรักษาจะต้องมีความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงชนิด GIS ที่ได้นำมาใช้ทดแทนสถานีไฟฟ้าแบบ AIS เพื่อความปลอดภัยต่อบุคคล และสามารถบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงให้มีความสมบูรณ์พร้อมใช้งานให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ในปัจจุบัน GIS มีแนวโน้มเข้ามามีบทบาทในระบบไฟฟ้ามากขึ้น เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ที่ใช้ในการขยายเขตระบบไฟฟ้า นอกจากความต้องการใช้ไฟฟ้าแล้ว ผู้ใช้ไฟฟ้ายังต้องการเสถียรภาพและความมั่นคงของระบบไฟฟ้ายังเป็นสิ่งเสริมการนำ GIS เข้ามาใช้งานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหากพิจารณาการใช้งาน GIS จะเห็นได้ว่าไม่ใช่เทคโนโลยีส์ที่มีความยุ่งยากหรือซับซ้อน เพียงแต่ต้องพิจารณาทุกขั้นตอนเริ่มตั้งแต่การออกแบบทางวิศวกรรม รูปแบบการติดตั้ง การเลือกใช้อุปกรณ์ที่เป็นที่ยอมรับการควบคุมงานก่อสร้าง การทดสอบให้เป็นไปตามหลักวิศวกรรมทุกขั้นตอน รวมถึงการวางแผนงานบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม ถ้าทุกขั้นตอนที่กล่าวในข้างต้นดำเนินการหรือได้รับคำปรึกษาโดยผู้ที่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญ สถานีไฟฟ้าแรงสูง และ GIS ก็จะทำให้ GIS มีอายุการใช้งานที่ยาวนานเลยทีเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการเรียนรู้และทำความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานการเสียสภาพความเป็นฉนวนไฟฟ้าของฉนวนก๊าซ โดยฉนวนก๊าซที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อป้องกันระบบไฟฟ้าในปัจจุบันได้แก่ อากาศและก๊าซ SF_6 (Sulfur hexafluoride) โดยอากาศถูกนำมาใช้เป็นฉนวนสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า(Transmission and Distribution Line) และสถานีไฟฟ้าย่อยภายนอกตัวอาคาร(Air Insulated Substation, AIS) ข้อดีของฉนวนอากาศคือ มีราคาถูก และมีความเป็นฉนวนที่ดีเมื่อแห้งและสะอาด แต่ถ้าอากาศมีความชื้นหรือเกิดการเจือปนของฝุ่นละอองต่างๆ จะทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของอากาศลดลงอย่างมาก สำหรับก๊าซ SF_6 นั้น นิยมนำมาใช้สำหรับระบบ GIS และระบบ GIL (Gas Insulated Transmission Line) โดย GIS เริ่มมีความนิยมใช้ในประเทศไทย เนื่องจากความยากลำบากในการหาพื้นที่ก่อสร้าง AIS อีกทั้งหากประเมินค่าใช้จ่ายเพื่อจัดหาที่ดินที่มีขนาดเพิ่มขึ้นในการสร้าง AIS จะเห็นได้ว่า GIS การเป็นทางเลือกที่ดีในการเลือกใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปี ค.ศ.1995 การประชุมเกี่ยวกับสภาวะบรรยากาศและสภาพแวดล้อม ที่เกียวโต ประเทศญี่ปุ่นพบว่า ก๊าซ SF_6 ส่งผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อนมีค่า Global Warming Potential(GWP) เท่ากับ 23,900 เลยทีเดียว ดังนั้นจึงมีข้อกำหนดให้ควบคุมการใช้ก๊าซ SF_6 ในระบบไฟฟ้าแรงสูง นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรจึงเริ่มต้นทำวิจัยเพื่อศึกษาหาฉนวนแก๊สชนิดใหม่ขึ้นมา เพื่อทดแทนก๊าซ SF_6 โดยมีการนำเสนอให้ใช้ ก๊าซผสมระหว่าง ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซ SF_6 โดยที่คุณสมบัติการเป็นฉนวนจะลดลง แต่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีการเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซในระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

2. ทำการทดสอบคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศ ก๊าซ N_2 ก๊าซ SF_6 และก๊าซผสมระหว่าง SF_6 และ N_2 ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเล็กน้อย

3. ศึกษาผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศในกรณีที่มีสิ่งเจือปนที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำ และฉนวน

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา วิเคราะห์ และทดสอบ การเบรกดาวน์ของอากาศ ก๊าซ N_2 ก๊าซ SF_6 และก๊าซผสมระหว่าง N_2 และ SF_6 เพื่อทดสอบความสามารถคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนทั้ง 3 ชนิด ในระบบปิด โดยจะดำเนินการทดสอบในชุดอุปกรณ์ทดสอบ(Test Cell) และวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้ก๊าซผสม เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูงทดแทนการใช้ก๊าซ SF_6 ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมค่อนข้างสูง โดยงานวิจัยในส่วนของก๊าซผสม จะทำศึกษาเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซผสม SF_6/N_2 ในอัตราส่วน 80/20 และ 60/40 ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ที่ความดันอากาศ 1 บาร์ เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซ N_2 และก๊าซ SF_6 เพียงอย่างเดียว อีกทั้งยังมีการศึกษาความคงทนของฉนวนอากาศ เมื่อมีสิ่งเจือปน(particle) เข้ามาในระบบปิด ซึ่งเป็นการจำลองเมื่อใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GIS ที่มีการใช้งานระบบตัดต่อวงจรไฟฟ้า อาจจะมีการอาร์ค(Arc) ทางไฟฟ้าของโลหะที่เป็นสวิตช์ (Switch) ทำให้มีสิ่งเจือปนชนิดโลหะ อยู่ใน GIS แล้วจะส่งผลต่อการคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนอากาศ อย่างไร รวมถึงศึกษาผลของการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน(Partial Discharge : PD) ของสิ่งเจือปนในตำแหน่งต่างๆ ว่าเมื่อตรวจวัดค่า PD จะมีความแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร โดยมีรายละเอียดของขอบเขตในการศึกษาวิจัยโดยสังเขปดังนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติของก๊าซ SF_6 และปัจจัยต่างๆที่มีต่อการใช้งานฉนวนก๊าซ SF_6
2. ศึกษาส่วนประกอบและทำความเข้าใจการทำงานในระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS)
3. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าของชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซโดยการใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์
4. ทดสอบคุณสมบัติการเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ
5. ศึกษาคุณสมบัติของฉนวนก๊าซผสม
6. ศึกษาผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน์ เมื่อมีสิ่งเจือปนในห้องทดลองแบบปิด

1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

1 .ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับฉนวนก๊าซ SF_6 และสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ
2. ศึกษาวิเคราะห์รูปแบบสนามไฟฟ้าชุดทดสอบการจำลองการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ SF_6
3. รวบรวมผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล
4. จัดเตรียมอุปกรณ์ และศึกษาเครื่องมือต่างๆ
5. ทดลองการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง
6. สรุปผลและวิเคราะห์งานวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจและนำความรู้เกี่ยวกับการเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซในสภาวะต่างๆ มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงสูง
2. สามารถรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซและหลักการซ่อมบำรุงรักษา เพื่อนำมาเป็นองค์ความรู้ในการศึกษาการใช้ฉนวนก๊าซ SF_6 ในระบบไฟฟ้าแรงสูง
3. นำความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของฉนวนก๊าซ เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบและป้องกันปัญหาที่พบในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS)
4. ประยุกต์ทฤษฎีที่ศึกษาไปใช้ในการบำรุงรักษาระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซ (GIS)
5. สามารถนำข้อมูลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซผสม มาเป็นข้อเสนอในการประยุกต์ใช้ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการนำฉนวนก๊าซ SF_6 (Sulfur hexafluoride) มาใช้งานในสถานีไฟฟ้าชนิดฉนวนก๊าซ(Gas Insulated Substation : GIS) และบรรยายถึงส่วนประกอบที่สำคัญ หลักการทำงานและหน้าที่ในส่วนต่างๆ ของ GIS รวมไปถึงทฤษฎีการเบรกดาวน์ของก๊าซ และคุณสมบัติของก๊าซ SF_6 ที่ใช้เป็นฉนวนหลักของ GIS

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

สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ(GIS) เป็นสถานีไฟฟ้าที่นำอุปกรณ์ต่างๆ ติดตั้งอยู่ภายในท่อโลหะ และทำการอัดก๊าซ SF_6 เพื่อเป็นก๊าซฉนวนภายใน ทำให้สามารถลดระยะปลอดภัยทางไฟฟ้าลงได้ สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบ GIS จึงมีขนาดเล็กลงมาก สามารถออกแบบให้ติดตั้งได้หลายแบบ ทั้งกลางแจ้ง, ภายในอาคาร, ใต้พื้นดินหรือภายในอุโมงค์ก็สามารถติดตั้งใช้งานได้ โดยทั่วไปจะพิจารณาตามวัตถุประสงค์หลักของการติดตั้งใช้งาน เช่น ต้องการความเชื่อมั่นสูง(Reliability), มีพื้นที่จำกัด, ไม่ต้องการมีภาระการบำรุงรักษามาก เป็นต้น ดังนั้นปัจจุบันจึงมีความนิยมติดตั้งสถานีไฟฟ้าแบบ GIS กันมากขึ้น

<u>ข้อดีของสถานีไฟฟ้าแบบ GIS</u>

- ประหยัดพื้นที่การก่อสร้างมากกว่าสถานีไฟฟ้าชนิด Air Insulated Substation
- การดำเนินการติดตั้ง และประกอบอุปกรณ์ได้รวดเร็ว
- มีความปลอดภัยการใช้งานค่อนข้างสูง
- ลดผลกระทบจากมลภาวะภายนอก
- ภาระในการบำรุงรักษาน้อย

<u>ข้อเสียของสถานีไฟฟ้าแบบ GIS</u>

- ราคาอุปกรณ์ รวมการออกแบบและติดตั้งค่อนข้างสูง
- การขยายหรือเพิ่มเติมต้องวางแผนล่วงหน้า และมีแนวโน้มต้องใช้ผลิตภัณฑ์เดิมเพราะข้อมูลทางด้านเทคนิค และความรับผิดชอบหลังการติดตั้ง ทำให้ผู้ผลิตเสนอราคาค่อนข้างสูง
- เมื่อมีผิดปกติระหว่างการใช้งาน เช่น หากเกิดฟอลท์(fault) ภายในจะหาตำแหน่งฟอลท์ได้ยากกว่า และการซ่อมบำรุงมีความยุ่งยาก ทำให้อาจจะใช้เวลาในการดับไฟฟ้า (Outage Time) ค่อนข้างนาน
- ภายหลังจากการบำรุงรักษาหรือต่อขยาย ควรดับไฟฟ้าเพื่อทดสอบฉนวนตัวกลาง (Dielectric)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

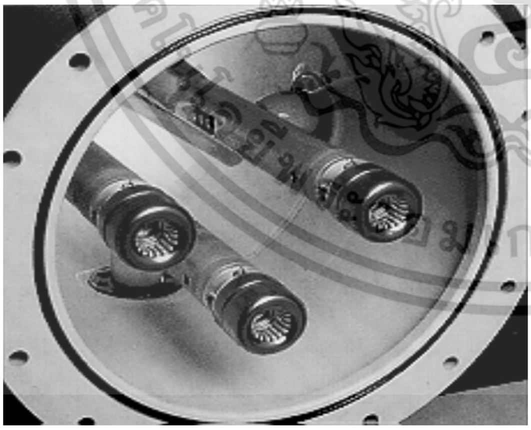
- ใช้ก๊าซ SF_6 ปริมาณมาก ซึ่งก๊าซ SF_6 มีราคาแพง และยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

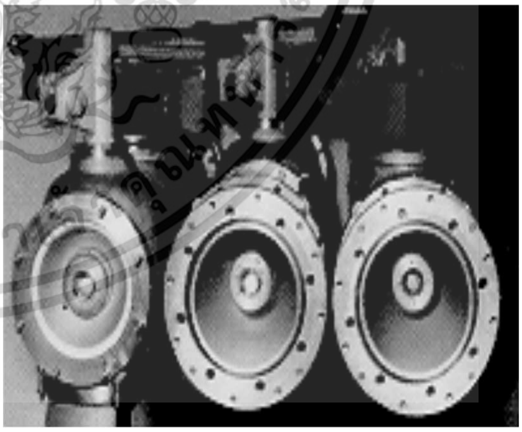
2.2 อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ [1]

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบ 3 เฟส มีขนาดเล็กกว่าจึงช่วยลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับที่ดินและอาคาร

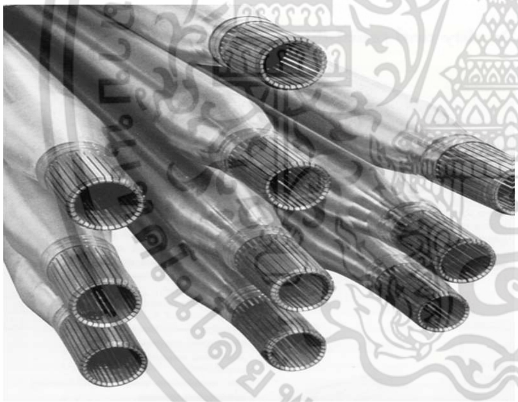
- เมื่อเกิดฟอลท์แบบ 1 เฟสลงดิน (1 Line To Ground Fault) ตัวถังแบบ 3 เฟสจะทำให้ฟอลท์กลายเป็นแบบ 3 เฟส (Three Phase Fault) ซึ่งทำให้ระบบเสียเสถียรภาพมากกว่าและความเสียหายของอุปกรณ์ก็มีมากกว่า แต่เนื่องจากปริมาตรตัวถังใหญ่กว่าทำให้การระบายแรงดันทำงานยากกว่า (Pressure ไม่สูงเกิน)

- ถ้าต้องการให้เซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละขั้วทำงานได้อย่างอิสระ (Single-Pole Operated) การเลือกใช้ตัวถังแบบ 1 เฟส จะเหมาะสมกว่า

- ผู้ผลิตสามารถออกแบบชนิดผสมให้ได้เรียกว่า แบบไฮบริด คือ ตัวถังของบัสบาร์เป็นแบบ 3 เฟส ส่วนอุปกรณ์อื่นเป็นแบบ 1 เฟส

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)

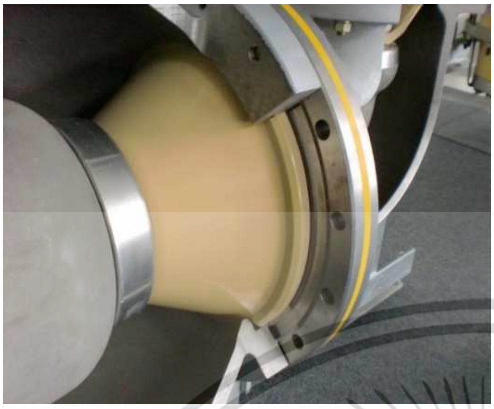
รูปที่ 2.2 บัสบาร์ [1]

2.2.3 Insulation Spacer

บางครั้งเรียกว่า Insulating Cone ทำจาก Epoxy Resin ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนสูงปราศจากโพรงอากาศภายในเนื้อ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Conductor) แล้วยังทำหน้าที่แบ่งส่วน (Partition) ของก๊าซ คอมพาร์ทเมนต์เพื่อแยกเป็นส่วนๆ เวลาที่เกิดปัญหาไม่ให้กระทบกับส่วนอื่นๆ

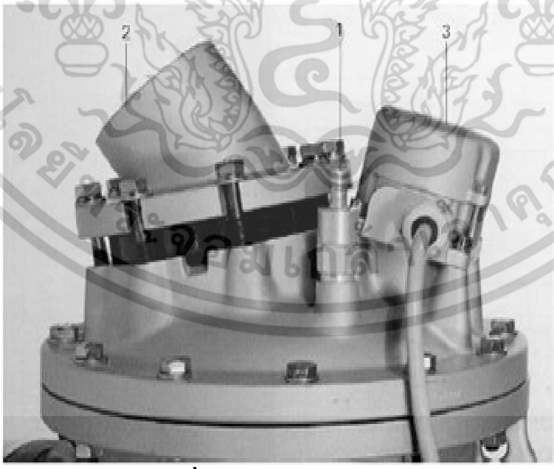

ก) Insulation Spacer แบบปิด

ข) Insulation Spacer แบบเปิด

รูปที่ 2.3 Insulation Spacer

2.2.4 อุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน (Pressure Relief Device)

ทำหน้าที่ระบายแรงดันภายในไม่ให้สูงเกินค่าที่ตัวถังโลหะทนได้ กรณีระบบป้องกันตัดฟอลท์ทำงานช้ากว่าปกติ มักกำหนดให้ติดตั้งทุกคอมพาร์ทเมนต์ อุปกรณ์ระบายแรงดันเกินนี้เป็นแบบทำงานได้ครั้งเดียว ทำจากกราไฟท์ (Graphite) หรือโลหะ อุปกรณ์ระบายแรงดันจะต้องติดตั้งให้ขณะที่ทำงานจะระบายก๊าซออกไปในทิศทางที่เหมาะสม เพื่อป้องกันอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ในบริเวณนั้น



รูปที่ 2.4 ลักษณะอุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

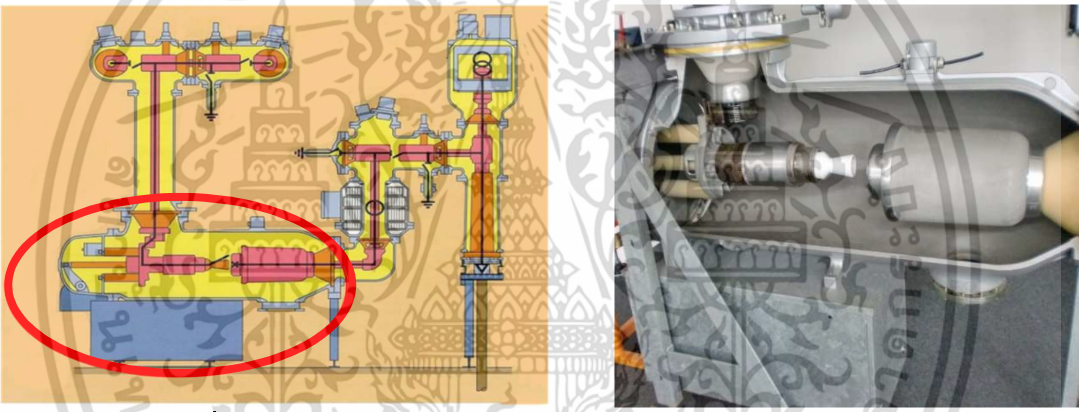
รูปที่ 2.5 การระบายแรงดันเกินในระบบ GIS [1]

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) จำนวนมากและการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสื่อมสภาพมักขึ้นกับคุณภาพลม 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

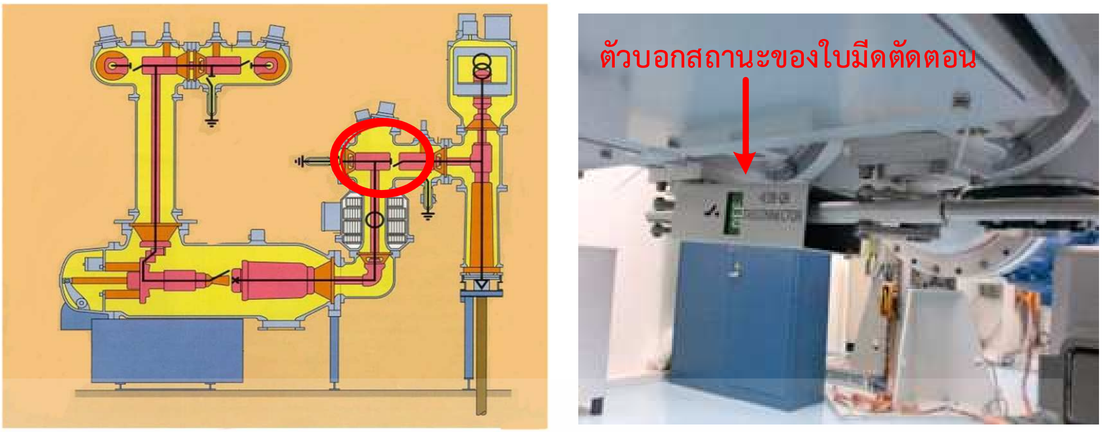


รูปที่ 2.6 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบแนวนอนใน GIS AREVA B65 115kV

2.2.6 ใบมีดตัดตอน (Disconnecting Switch)

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

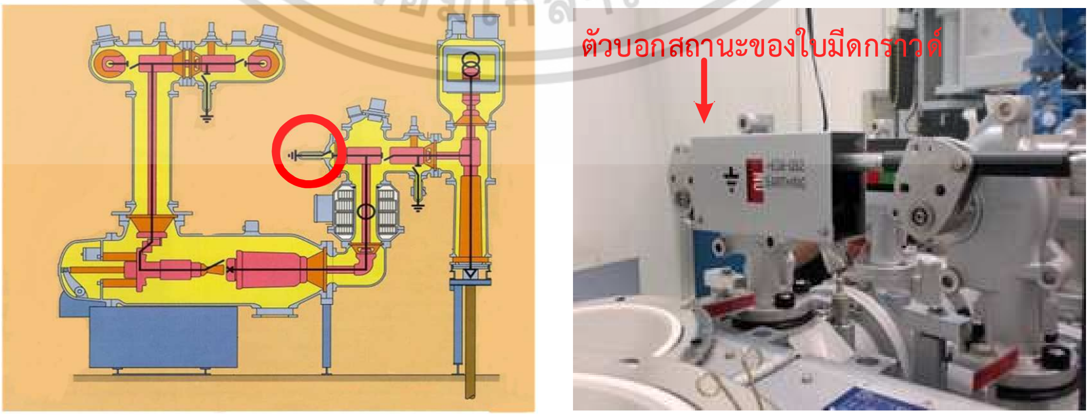
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

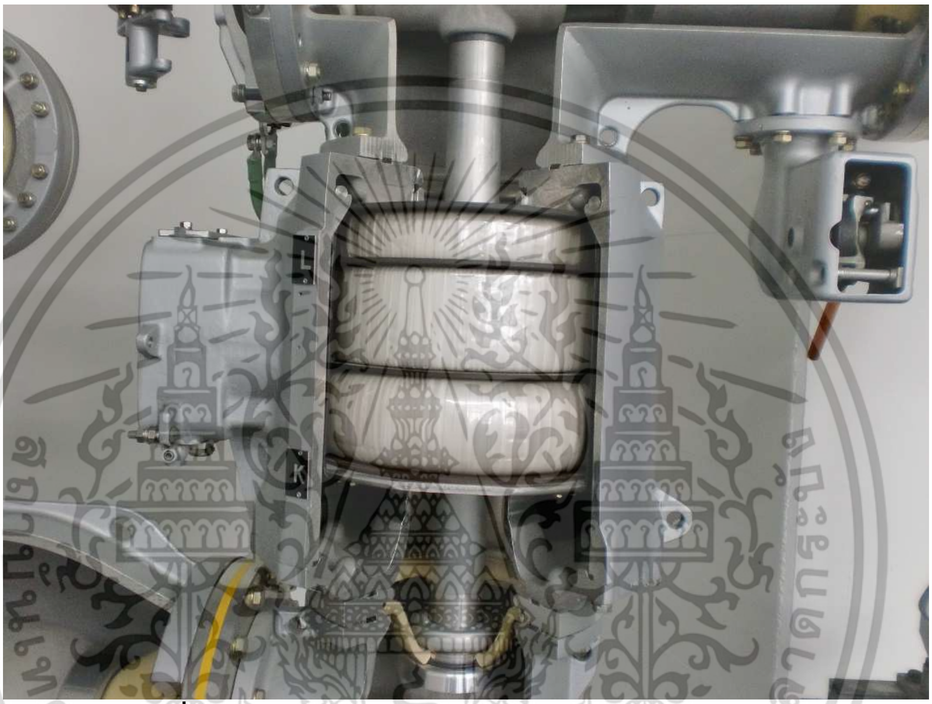


รูปที่ 2.8 ใบมีดกราวด์ใน GIS AREVA B65 115kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

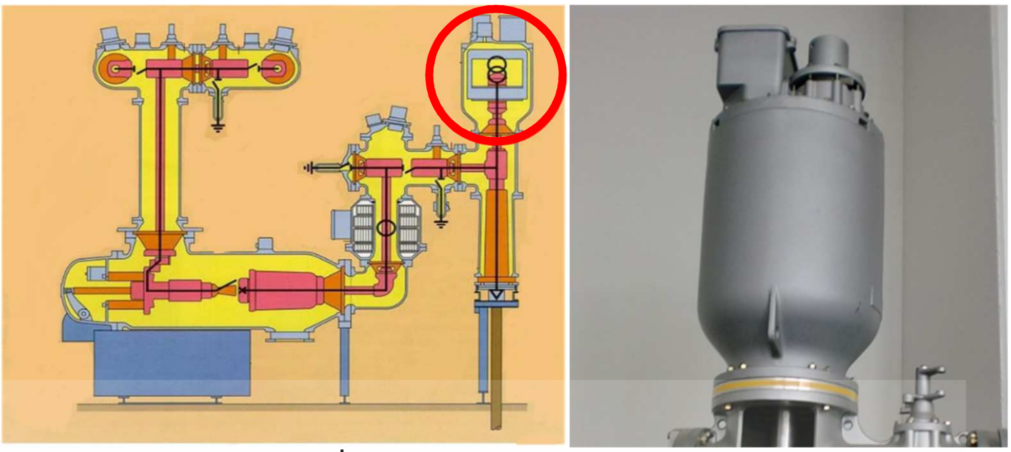
2.2.9 หม้อแปลงวัดแรงดัน (Voltage Transformers)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 หม้อแปลงวัดแรงดันใน GIS

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

- 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) ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบภายในสภาวะการทำงานปกติอุปกรณ์ (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

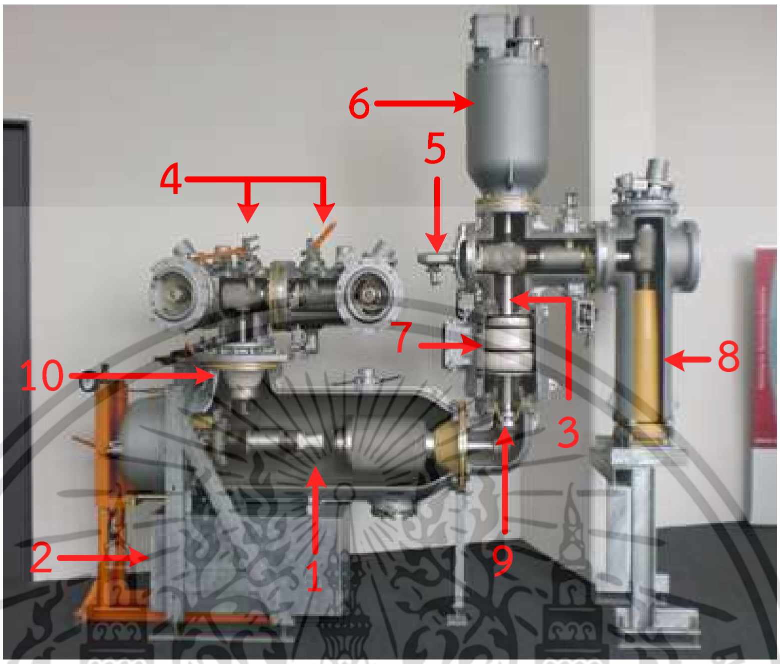
1. ใช้ควบคุมอุปกรณ์ภายในเบย์
   - สามารถควบคุมอุปกรณ์ทุกตัวได้ทางไฟฟ้า
   - มีซิงเกิลไลน์ ไดอะแกรม และไดอะแกรมจำลองสำหรับแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์
   - แสดงคอมพาร์ทเมนต์ที่เกิดเหตุการณ์ เช่น แรงดันก๊าซต่ำ
2. ใช้ต่อเชื่อมกับสัญญาณควบคุมภายนอกสามารถต่อร่วมกับอุปกรณ์ควบคุม เพื่อให้สามารถควบคุมจากห้องควบคุมศูนย์หรือ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

2.2.13 Gas Systems

อุปกรณ์ทั้งหมดภายใน GIS จะอัดด้วยก๊าซ SF_6 แรงดันที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานและขนาด (Dimension) ของท่อโลหะ อุปกรณ์แต่ละชนิดเช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ ใบมีดตัดตอน หม้อแปลงวัดแรงดัน กับดักฟ้าผ่าหรืออุปกรณ์อื่นๆ จะแยกส่วนของก๊าซออกจากกันซึ่งเรียกแต่ละส่วนว่า (Gas Compartment) ทั้งนี้เพื่อป้องกันหากก๊าซรั่ว รวมถึงฝุ่นผงที่เกิดจากการอาร์คของเซอร์กิตเบรกเกอร์, ใบมีดตัดตอนหรือ เกิดอาร์คภายใน (Internal flashover) ฟุ้งกระจายไปยังบัสบาร์ และ จุดต่อต่างๆ นอกจากนั้นยังลดผลกระทบต่อกันขณะทำการบำรุงรักษา โดยไม่จำเป็นต้องปล่อยก๊าซออกทั้งหมดเพียงแต่ปล่อยก๊าซในคอมพาร์ทเมนต์ที่ต้องบำรุงรักษาหรือคอมพาร์ทเมนต์ข้างเคียงออกเท่านั้น แต่ละการแยกส่วนของก๊าซจะมีอุปกรณ์ระบายแรงดัน เพื่อระบายแรงดันเกิน รวมทั้งเกจวัดแรงดันก๊าซ (Pressure Gauge) และ สวิตซ์ตรวจจับแรงดันก๊าซ เพื่อตรวจจับการรั่วของก๊าซ SF_6 ทุกคอมพาร์ทเมนต์ เมื่อพบแรงดันก๊าซต่ำจนถึงค่าที่ตั้งไว้จะเตือนและล็อคเอาท์ตามที่ตั้งไว้ โดยส่งสัญญาณเตือนที่ตู้ควบคุม และส่งไปที่ศูนย์ควบคุมโดยทั่วไปความดันที่ใช้ใน GIS จะมี 2 ระดับคือ คอมพาร์ทเมนต์ทั่วไป เช่น ใบมีดตัดตอน บัสบาร์ หม้อแปลงวัดแรงดัน กับดักฟ้าผ่า จะใช้ความดันประมาณ 3-4 บาร์ ส่วนคอมพาร์ทเมนต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ มักจะมีความดันประมาณ 5-7 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

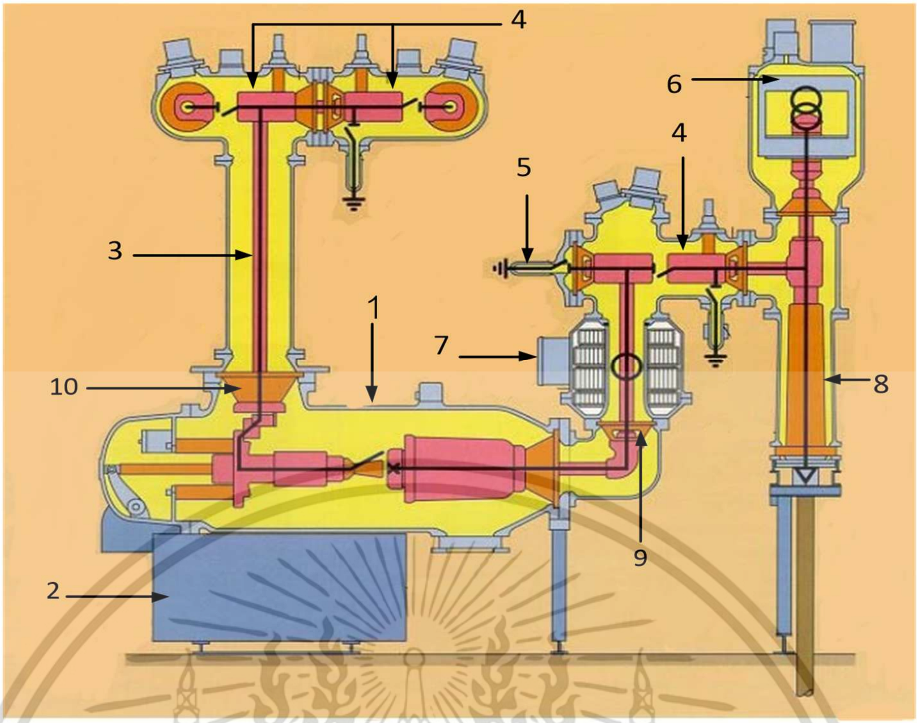
จะเห็นว่าคอมพาร์ทเมนต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีความดันสูงกว่าคอมพาร์ทเมนต์อื่นๆ เพราะว่านอกจากจะใช้ก๊าซสำหรับเป็นฉนวนแล้วยังใช้สำหรับการดับอาร์คด้วย



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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 วิธีการทางเคมีในการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน (Chemical By Product) [3]

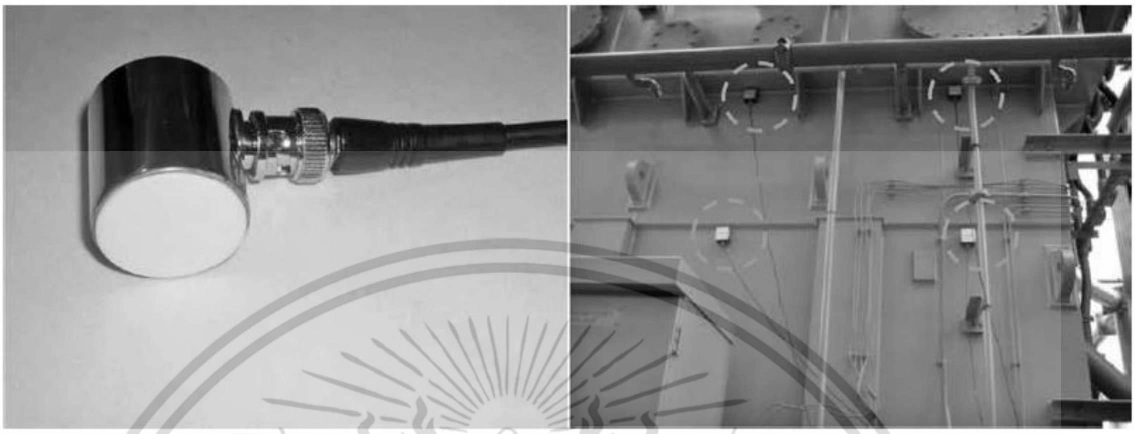
วิธีการนี้ใช้ตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบ GIS โดยใช้การวัดความเข้มข้นของสารเคมีที่เกิดจากการสลายตัวของก๊าซ SF_6 เมื่อเริ่มมีการเกิดดิสชาร์จนั้นก๊าซ SF_6 ที่เป็นฉนวนหลักในระบบจะเกิดการสลายตัวทางเคมี ซึ่งมีกระบวนการเป็นขั้นๆ ซึ่งแต่ละขั้นก็จะสลายตัวได้สารชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งวิธีการ Chemical 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 ยิ่งไปกว่านั้นการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซ็นเซอร์เสียงยังสามารถตรวจจับการสั่นที่ผิดปกติของ GIS ได้ซึ่งอาจเกิดจาก ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัดเกิดการหลุดหลวม หรืออาจเกิดจากสิ่งของแปลกปลอมตกอยู่ภายใน GIS ที่ทำการตรวจวัดอีกด้วย

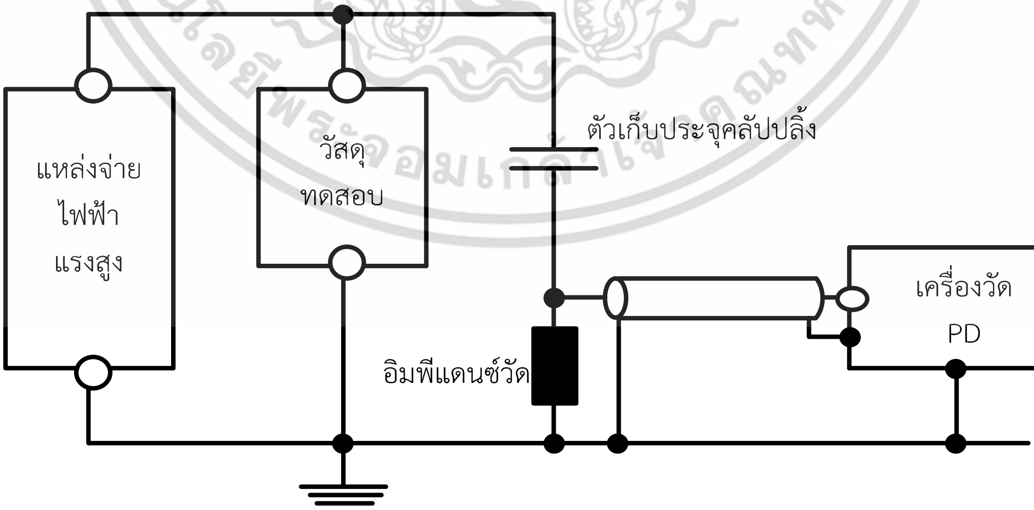


ก) ข)

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]

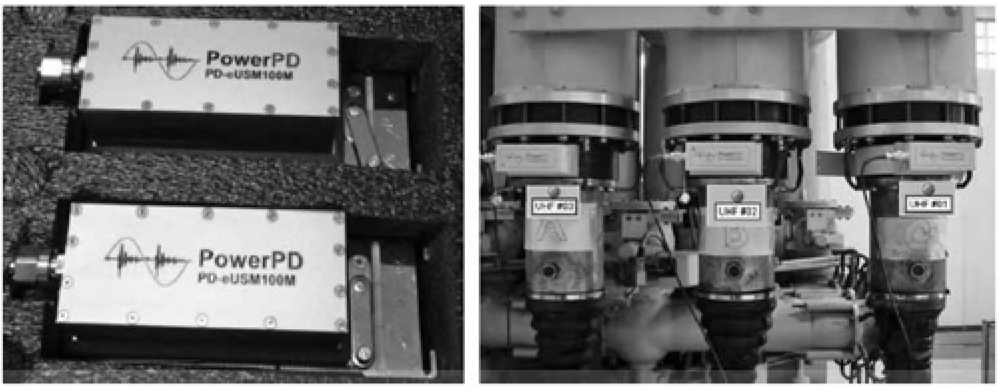
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



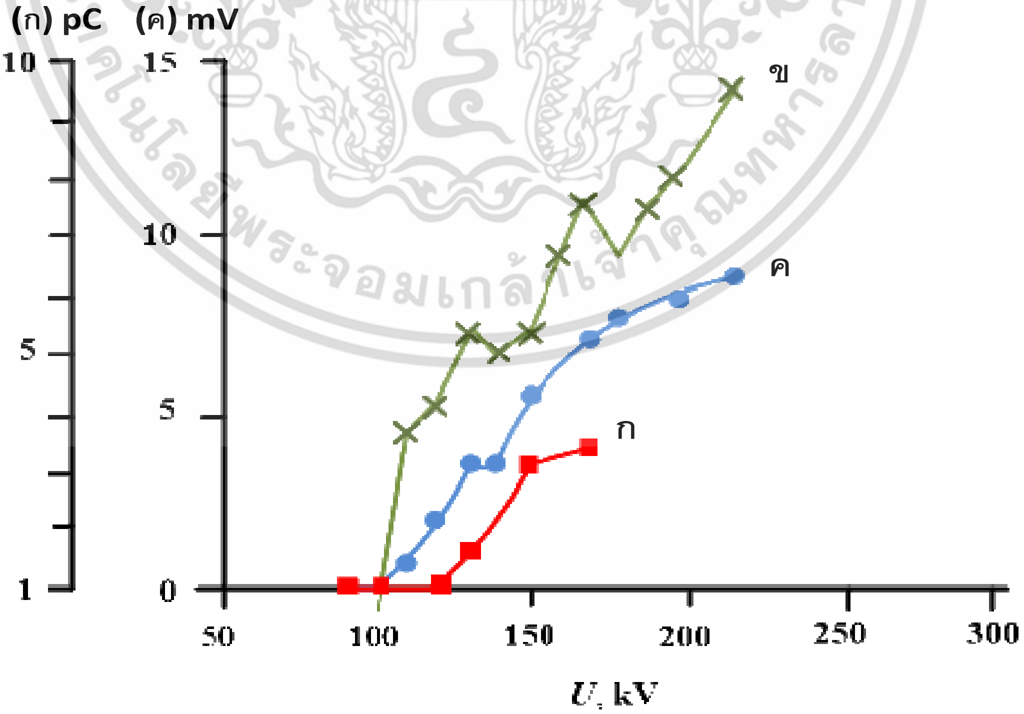
ก) ข)

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

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]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

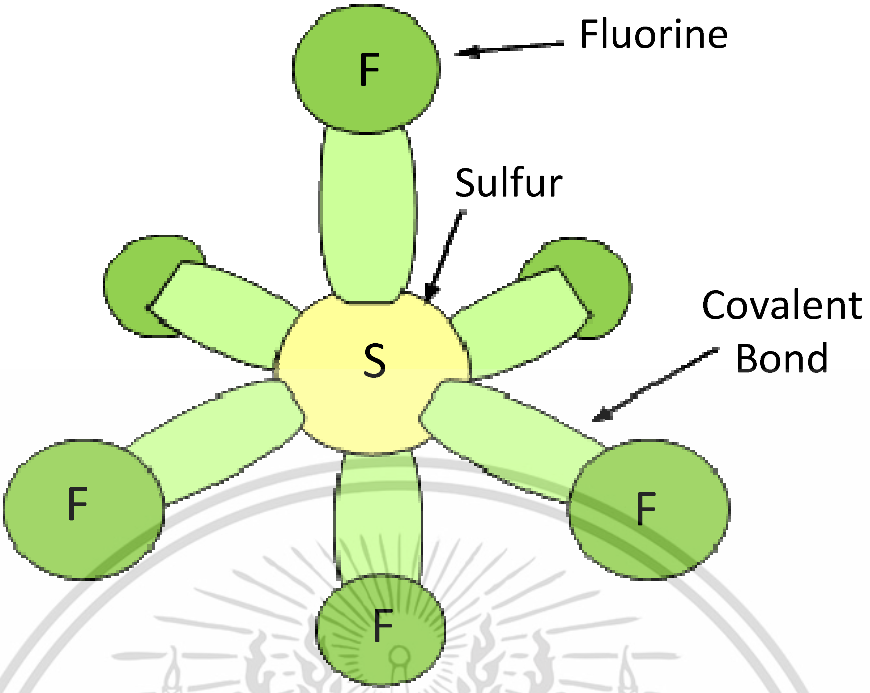
ซึ่งข้อมูลผลการทดสอบจากเทคนิคที่แตกต่างกันนี้ แสดงในรูปของอัตราส่วนของสัญญาณกับเสียงรบกวน ดังนั้นผลที่ได้มาจึงสามารถทำการเปรียบเทียบได้ โดยได้ข้อสรุปดังนี้

- 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 $1S^2\ 2S^2\ 2P^5$ โดยอะตอมซัลเฟอร์ในโมเลกุล SF_6 จะสร้างพันธะโคเวเลนต์กับหกอะตอมฟลูออรีน ทำให้มีพันธะโคเวเลนต์ทั้งหมด 6 พันธะ โครงสร้างโมเลกุลของก๊าซนี้แสดงดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) [5]

การจัดเรียงอิเล็กตรอนและโครงสร้างของก๊าซ SF_6 ทำให้มีเสถียรภาพมาก โครงสร้างของก๊าซนี้สามารถทนต่ออุณหภูมิโดยไม่เกิดการสลายตัวของก๊าซได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ไม่ไวไฟ ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และคลอไรด์ (Cl) อีกทั้งไม่ทำปฏิกิริยากับกรดด้วย ก๊าซ SF_6 เป็นหนึ่งในก๊าซที่หนักที่สุด ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 1 bar คือประมาณ 6.139 kg / m^3 มากกว่าอากาศที่สภาวะเดียวกันประมาณ 5 เท่า น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซนี้ คือ 146.06 มีอุณหภูมิใช้งานในช่วงระหว่าง -25 ถึง +50 องศาเซลเซียส ความร้อนจำเพาะโดยปริมาตรของก๊าซนี้ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณของสสารในการจัดเก็บพลังงานภายในเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 3.7 เท่าของอากาศและนั่นคือเหตุผลที่ก๊าซนี้มีผลกระทบอย่างมากในเรื่องของการระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้า การนำความร้อนของก๊าซนี้ต่ำกว่าอากาศ แต่ยังคงเหมาะสำหรับการระบายความร้อนใน เบรกเกอร์ ซึ่งเป็นเพราะในระหว่างการแยกออกจากกันของโมเลกุลซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ในขณะเกิดอาร์ค โมเลกุลนี้ได้ดูดซับความร้อนจำนวนมาก ซึ่งความร้อนนี้จะถูกปล่อยออกมาเมื่อโมเลกุลมีการเปลี่ยนรูป โดยกระบวนการนี้จะช่วยให้ก๊าซนี้ระบายความร้อนได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง ถึงแม้ว่าการนำความร้อนของ SF_6 จะไม่สูงมาก

2.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF_6

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 tanδ at 25°C and 1 bar absolute	< 2 × 10^{-7}

2.6 สนามไฟฟ้า [6]

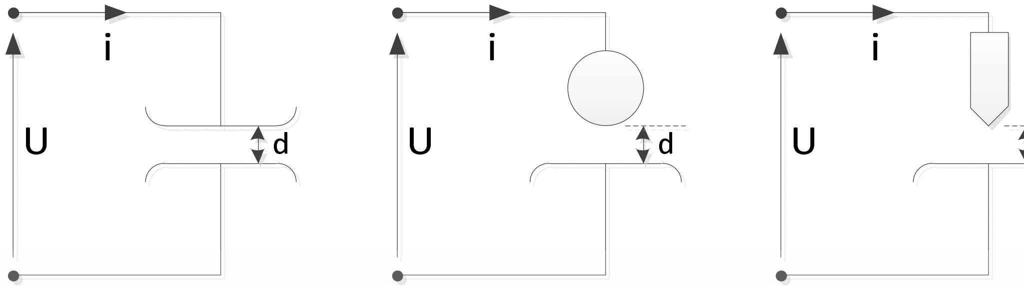
ในการใช้งานอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้น จำเป็นจะต้องมีความเข้าใจในพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าเพื่อจะได้นำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงสูง สนามไฟฟ้าเกิดจากประจุไฟฟ้าซึ่งปริมาณวัดจากแรงที่เกิดขึ้นตากกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) เมื่อมีประจุ Q และ Q' อยู่ห่างกันระยะ r จะเกิดแรงกระทำต่อกันในทิศทางต่อเชื่อมโยงระหว่างสองประจุนั้น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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน[6]
ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field)
ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

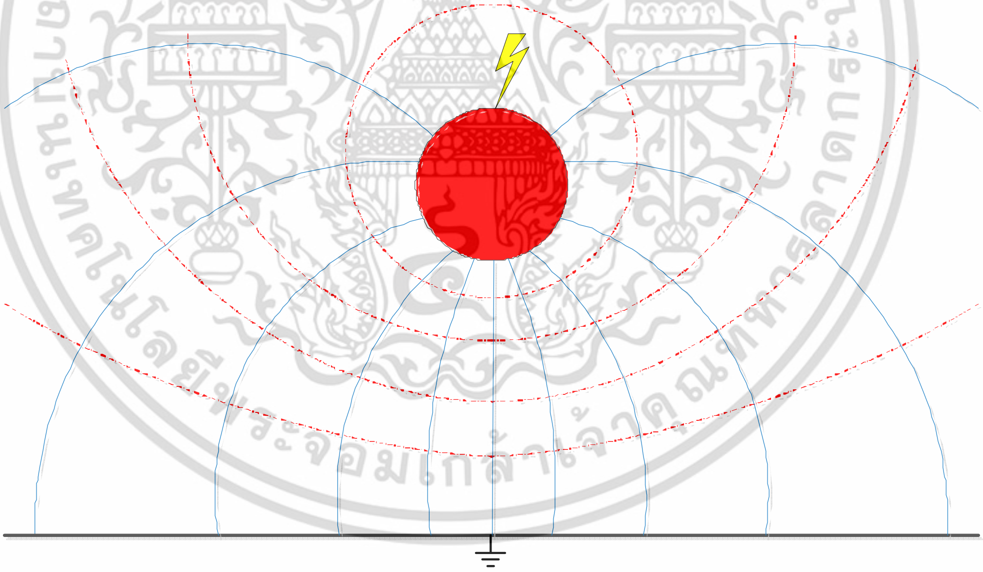
เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

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



รูปที่ 2.19 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

——— เส้นสนามไฟฟ้า

— - — - — เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

ในรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

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

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

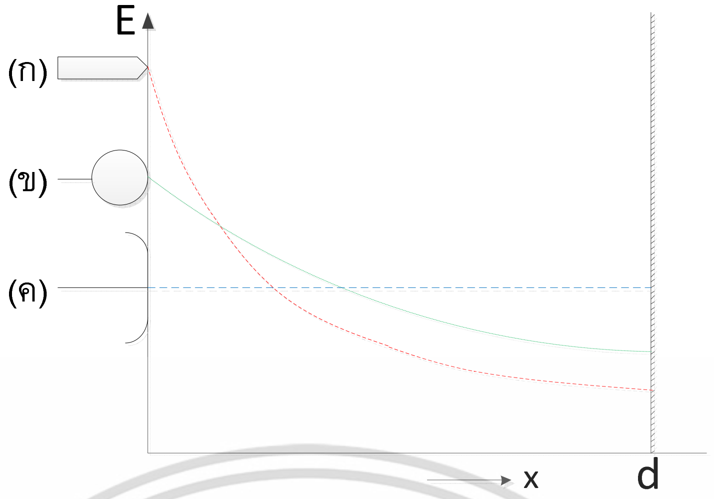
และค่าแรงดันเบรกดาวน์

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

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]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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 อย่างไรก็ตามสมการนี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าของเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

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

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่โคโรนาเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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)

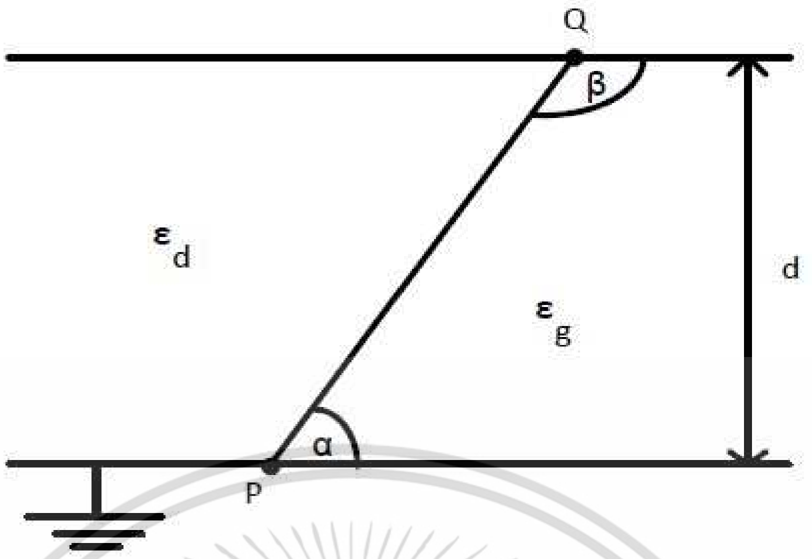
r_2 คือรัศมีอิเล็กโตรดชั้นนอก (cm)

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) นั้นนอกจากจะมีก๊าซ 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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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 $\alpha < 90^\circ$ ค่าเลขชี้กำลัง m จะขึ้นกับความสัมพันธ์ของค่า ε ดังนี้

m < 0 เมื่อ $\varepsilon_d > \varepsilon_g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m > 0 \text{ เมื่อ } \varepsilon_d < \varepsilon_g$$

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

$$m < 0 \text{ เมื่อ } \varepsilon_d < \varepsilon_g$$

$$m > 0 \text{ เมื่อ } \varepsilon_d > \varepsilon_g$$

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

$$\tan(n\alpha) + \varepsilon_s \tan(n(\pi - \alpha)) = 0 \qquad (2.11)$$

เมื่อ ε_s เป็นอัตราส่วนของ ε_d กับ ε_g ($\varepsilon_s = \varepsilon_d / \varepsilon_g$) และ n = (m+1) ค่า m มีความสัมพันธ์กับมุม α สำหรับ $2 \le \varepsilon_s \le 10$ 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 นั้นคือไอออนลบจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าน้อย โอกาสจะเกิดไอออไนเซชั่นจากการวิ่งชนของไอออนลบจึงมีน้อยจึงเท่ากับเป็นการหน่วงการเกิดไอออไนเซชั่นการหน่วงนี้จะมีผลอย่างยิ่งถ้าเกิดขึ้นบริเวณใกล้แคโทดเป็นผลให้อิเล็กตรอนที่เป็นตัวเริ่มต้นสร้างอะวาลานซ์จะลดลง ไอออนลบอาจเกิดขึ้นได้หลายกระบวนการดังต่อไปนี้ [5]

1) ไอออนลบเกิดขึ้นโดยอิเล็กตรอนไปเกาะบนอะตอม อนุภาคใหม่นี้จะอยู่ในสภาพดังกล่าวชั่วระยะเวลาหนึ่งได้ พลังงานของไอออนลบจะต้องมีค่าน้อยกว่าอนุภาคที่เป็นกลาง การเปลี่ยนสถานะภาพจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานถูกแบ่งออกไปจากอนุภาค ดังนั้นไอออนลบเสถียรมีพลังงานน้อยกว่าอนุภาคก่อนที่อิเล็กตรอนจะมาเกาะ พลังงานส่วนเกินจะถูกปล่อยออกมาเป็นควอนตัมในขณะที่อิเล็กตรอนไปเกาะอะตอม กลไกการก่อตัวของไอออนลบในลักษณะนี้เรียกว่า การเกาะของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนโดยการปล่อยรังสี และกระบวนการนี้กลับสภาพเดิมได้ นั่นคืออิเล็กตรอนที่เกาะอยู่จะหลุดออกมาได้ เมื่อได้รับพลังงานรังสี ซึ่งเรียกว่าการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยโฟตอน

2) การเกาะของอิเล็กตรอนบนอะตอมเป็นไอออนลบโดยกระบวนการแยก ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล พลังงานส่วนที่เกินนี้จะไม่ปล่อยออกไป แต่ทำให้เกิดแยกออกเป็น 2 อะตอม คือเป็นอนุภาคเป็นกลางหนึ่ง และอีกอะตอมหนึ่งเป็นไอออนลบ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นย้อนกลับได้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชั่นในก๊าซลบจะมีอิเล็กตรอนไปจับบนอะตอม ค่าสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชั่นยังผลจะเขียนได้ว่า

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

เมื่อเขียนในรูปสมการทั่วไปจะได้

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

2.8.3 เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซไฟฟ้าลบ

ดังที่กล่าวแล้วว่าในก๊าซอาจเกิดไอออนลบขึ้นได้โดยอิเล็กตรอนที่แยกตัวเป็นอิสระจากโมเลกุลด้วยการไอออไนเซชั่น และมีพลังงานที่พอเหมาะไปเกาะติดอยู่กับโมเลกุลเป็นกลางของก๊าซกลายเป็นอนุภาคที่มีประจุลบในรูปแบบต่างๆ กัน ก๊าซที่มีคุณสมบัติที่โมเลกุลจับอิเล็กตรอนได้เรียกว่า ก๊าซไฟฟ้าลบ (Electronegative gas)

จากคุณสมบัติของโมเลกุลของก๊าซประเภทนี้สามารถจับอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจาก ไอออไนเซชั่นได้จึงเท่ากับเป็นการระงับการเกิดเบรกดาวน์ไม่ให้เกิดขึ้น หากจะทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ก็ต้องมีสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติเพื่อที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่เกาะอยู่นั้นให้หลุดออกมาสร้าง อะวาลานซ์ไปตามกระบวนการเกิดเบรกดาวน์ นั่นคือ ก๊าซไฟฟ้าลบจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซธรรมชาติที่โมเลกุลไม่สามารถจับอิเล็กตรอนได้ ในวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงจึงใช้คุณสมบัติของก๊าซไอออนลบนี้ไปใช้ประโยชน์ในการฉนวนอุปกรณ์และระบบต่างๆ ซึ่งในปัจจุบันก๊าซไฟฟ้าลบที่นิยมใช้ในอุปกรณ์และระบบไฟฟ้าแรงสูง คือ ก๊าซ SF_6 เพราะมีคุณสมบัติฉนวนที่ดี มีแรงดันเบรกดาวน์สูงและสามารถลดระยะปลอดภัยในระบบได้ ทำให้ประหยัดพื้นที่ใช้สอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซไฟฟ้าลบเป็นไปตามกลไกเบรกดาวน์ ดังนั้นจึงอาศัยทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์ในการอธิบายได้ อาจเขียนสมการของกระแสในแกปที่เกิดจากการไอออไนเซชั่นและเกิดอิเล็กตรอนเกาะโมเลกุลในเวลาเดียวกัน คือ

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

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชั่นที่หนึ่งของทาวน์เซนด์

γ คือ สัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโทดโดยการชนของไอออนบวก

η คือ สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนโมเลกุล

ค่าของ η/p จะอยู่ในฟังก์ชันของ $\mathrm{E/p}$ เช่นกัน เงื่อนไขการเกิดกระแสไหลประทังตัวอยู่ได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับกระแสอิ่มตัว I_0 เมื่อเทอมในส่วนของสมการ (2.20) เป็นศูนย์นั่นคือ

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

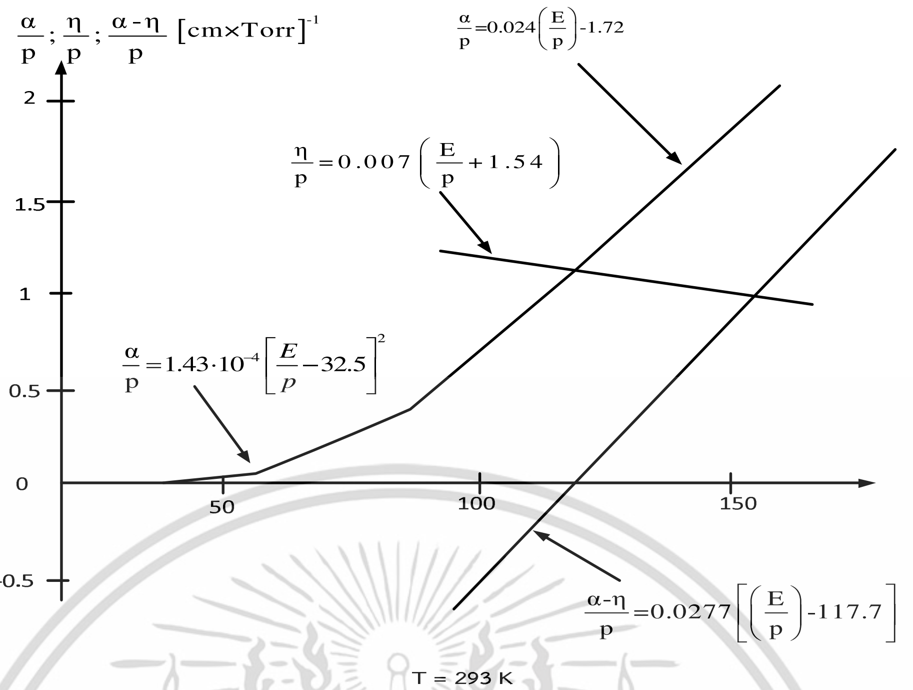
การเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นได้เมื่อ $\alpha \geq \eta$ ในทำนองเดียวกัน การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซไฟฟ้าลบอาจอธิบายได้ด้วยทฤษฎีสตรีมเมอร์ได้เช่นกัน

2.9 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์ในก๊าซ SF_6 [6]

การคำนวณหาแรงดันเบรกดาวน์ใน SF_6 ทำเช่นเดียวกับอากาศ โดยมีเงื่อนไข

$\int_0^{x_c}(\propto -\eta)\,dx = k$ และค่า $(\propto -\eta)/p = f(E/p)$ ที่วัดได้ หรือหาค่า E_b โดยตรง ค่าสัมประสิทธิ์ที่วัดได้ในรูป 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชั่นและสัมประสิทธิ์เกาะตัวของอิเล็กตรอนของอากาศ และ SF_6 ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.22 จะเขียนสมการได้ว่า

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

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

ฉะนั้น

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 แรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

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

$$E_b = E_c = 87.8 \text{ kV/cm bar} \tag{2.24}$$

$$\frac{E_b \cdot d}{p} - 87.8d = \frac{K}{p27} \tag{2.25}$$

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

โดยทั่วไปตามเงื่อนไขของทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Rather) ค่า k = 18 จะได้

$$U_b = 87.8pd + 0.67 \text{ kV} \tag{2.26}$$

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

d = ระยะแกป $\left(r_2 - r_1\right)$

2) หาค่า U_i ของ SF_6 ในสนามไฟฟ้าแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ให้ทรงกระบอกในและกระบอกนอกมีรัศมี r_1 และ r_2 ตามลำดับ สนามไฟฟ้าที่จุด x ห่างจากทรงกระบอกในหรือที่รัศมี r สมการและเขียนได้ว่า

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

และ

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

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

แทน E(x) ในสมการ จะได้

$$x_c = r_1\left[\frac{E_i / p}{\left(E / p\right)_C} - 1\right] \tag{2.36}$$

ความสัมพันธ์ของ E_i / p จะเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ของ E_i / p หาได้โดยการกระจายอนุกรมเทอมที่เป็นล็อก คือ

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

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

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

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

2.10 กลไกการสลายตัวของก๊าซ SF_6 [8]

เนื่องจากการใช้ฉนวนก๊าซ SF_6 ที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีการศึกษากลไกการสลายตัวของก๊าซ SF_6 และผลกระทบจากผลิตภัณฑ์เหล่านั้นที่เพิ่มมากขึ้น การตรวจหาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายก๊าซ SF_6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$SF_6 + e \rightarrow (SF_6^-)^* \rightarrow SF_6^- \rightarrow SF_5^- + F$$

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

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

ที่ E/n สูงขึ้นทำให้ F^- เกิดขึ้น

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

หรือ

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

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

$$SF_5 + OH \rightarrow SOF_4 + HF$$

$$SF_5 + O \rightarrow SOF_4 + F$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$2SF_4 + O_2 \rightarrow 2SOF_4$$

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

$$SOF_4 + H_2O \rightarrow SO_2F_2 + HF$$

$$2SOF_2 + O_2 \rightarrow 2SO_2F_2$$

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]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

ภายในส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะมีตัวนำ ตัวถัง และตัวดูดซับก๊าซสิ่งเจือปนต่าง ๆ ซึ่งทำจากอลูมิเนียม ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาขึ้นภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าของ GIS นั้นจะเกิดความร้อนส่วนเกินขึ้น อาจส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างอลูมิเนียมร้อนกับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวเกิดเป็นโลหะฟลูออไรด์ ซึ่งการก่อตัวที่เป็นไปได้คือ

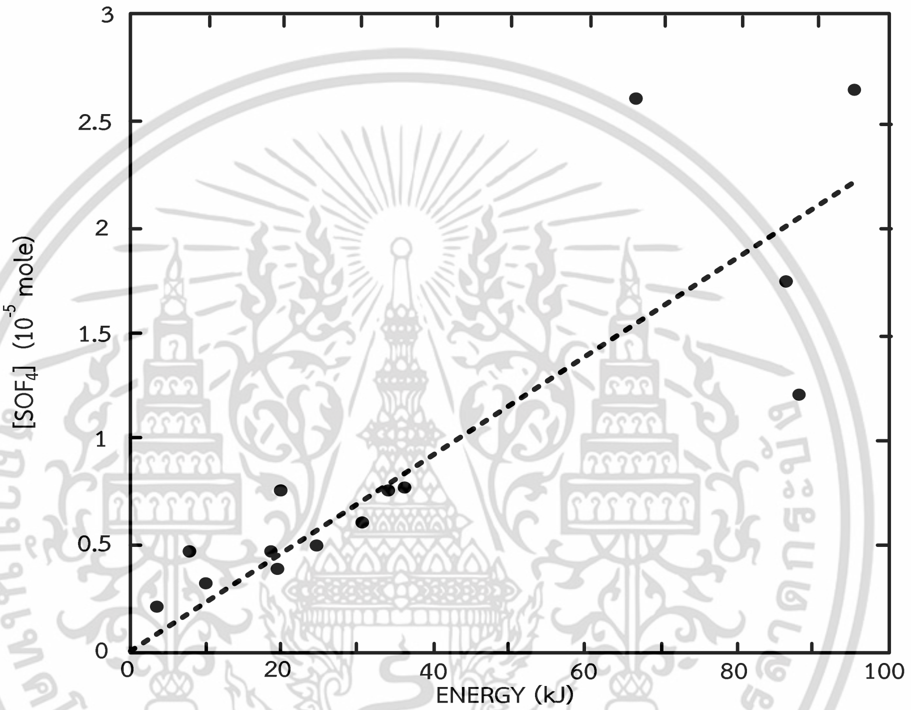
$$6HF + Al_2O_3 \rightarrow 2AlF_3 + 3H_2O$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$3SOF_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2AlF_3 + 3SO_2$$

$$3SF_4 + 2Al_2O_3 \rightarrow 4AlF_3 + 3SO_2$$

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



รูปที่ 2.23 ปริมาณของ SOF_4 ที่เกิดขึ้น ที่เวลามากกว่าหนึ่งชั่วโมงหลังจากการสปาร์กกับพลังงานการดิสชาร์จรวม [8]

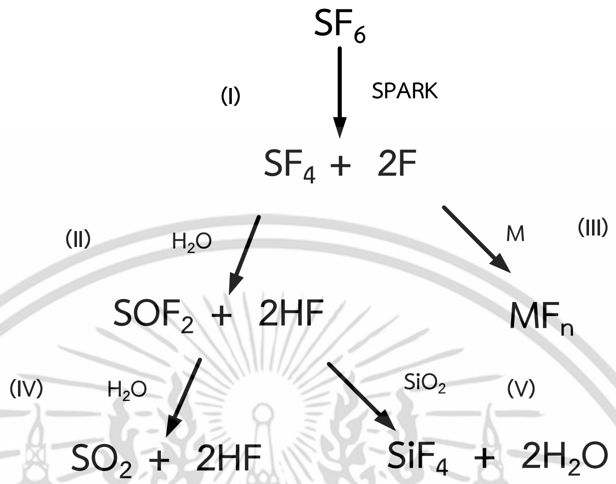
โดยปริมาณของ SO_2F_2 ที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นที่น้อยกว่า 2% ของความเข้มข้น SOF_2 โดยเพิ่มขึ้นตามเวลาจนถึงค่าคงที่หลังจากการดิสชาร์จประมาณ 20 ชั่วโมง ไม่ขึ้นอยู่กับความดันแต่มีความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นกับพลังงานดิสชาร์จรวม ส่วนปริมาณของ SO_2 มีความเข้มข้นเพียงประมาณ 0.5% ของความเข้มข้น SOF_2 เท่านั้น 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 ในขณะที่ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ SOF_4 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เวลามากกว่าครึ่งชั่วโมง นอกจากนี้ ออกซิเจนยังอาจมีผลต่อกลไกการสร้าง SOF_4 และ SO_2F_2 แผนผังการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสปาร์กแสดงในรูปที่ 2.24



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 เนื่องจากฉนวนที่เป็นอีพ็อกซีมีการใช้อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างขวางใน 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

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]

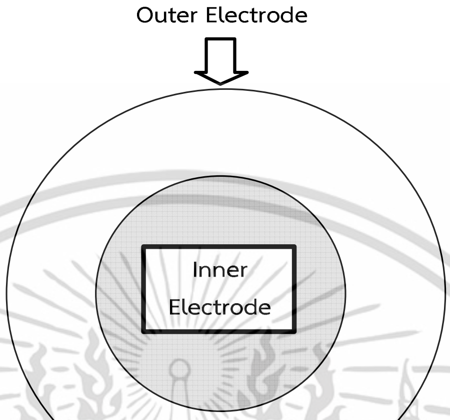
ผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับ	ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับต่ออลูมินา (alumina) หนึ่งกรัม (cm^3)	ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับต่อชาร์โคล (charcoal) หนึ่งกรัม (cm^3)
SOF_2	32	52
SO_2F_2	12	35
SF_4	35	48
SOF_4	20	40
SO_2	38	68

2.13 ความต้านทานพื้นผิวของเรซินที่เคลือบด้วยสารอินทรีย์ในก๊าซ SF_6 [11]

วัสดุฉนวนที่เป็นพอลิเมอร์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะมันสามารถปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ การประยุกต์ใช้วัสดุเหล่านี้ในอุปกรณ์ฉนวนก๊าซ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ฉนวนก๊าซ SF_6 (GCBs) และสวิตช์เกียร์ฉนวนก๊าซ SF_6 (GIS) เป็นที่รู้กันว่าการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลายตัวของก๊าซ SF_6 ส่งผลกระทบกับวัสดุโดยลดความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวของฉนวนและทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน และวาบไฟตามผิว ทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนนั้นเสื่อมลง การเลือกใช้วัสดุฟิลเลอร์ที่มีความทนต่อก๊าซ SF_6 ที่สลายตัวได้สูงเป็นหนึ่งในวิธีการแก้ปัญหา ฉนวนสามารถรักษาคุณสมบัติเดิมไว้ได้หากฟิล์มที่เคลือบช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากก๊าซ SF_6 ที่สลายตัว



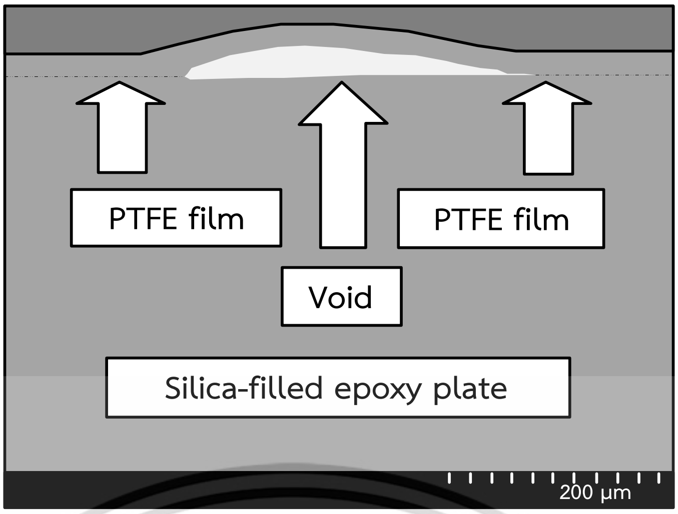
รูปที่ 2.25 แผ่นอีพ็อกซีที่เต็มไปด้วยซิลิกาเปลือยหลังจากการวัดต้านทานพื้นผิวในก๊าซผสม SF_4/SF_6

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

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

$$SiO_2 + 4HF \rightarrow SiF_4 + 2H_2O$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

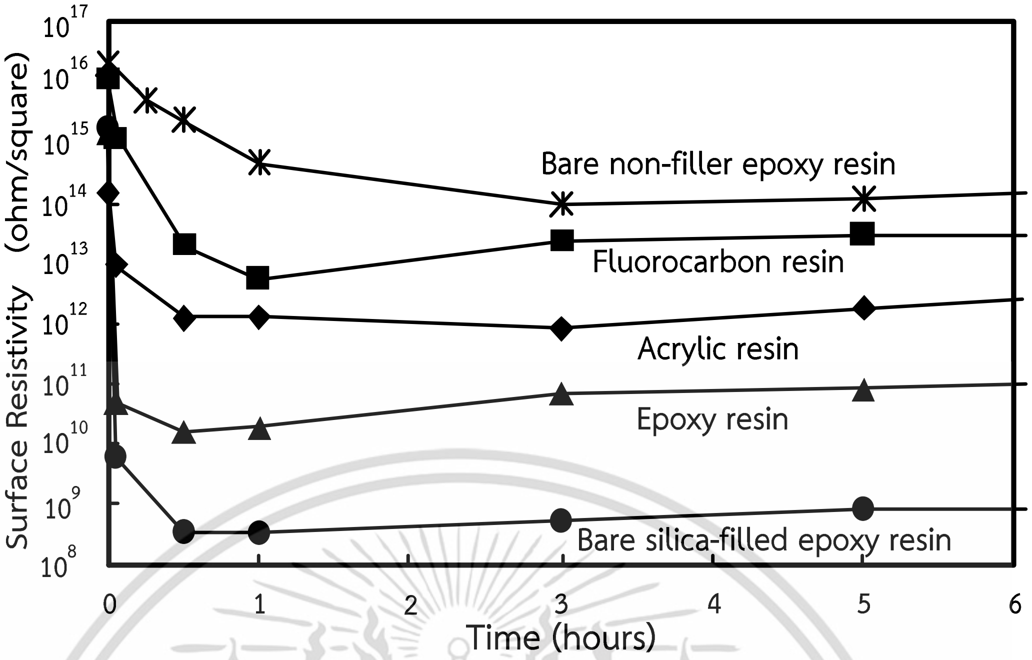


รูปที่ 2.26 ภาพตัดขวางของแผ่นอีพ็อกซี ซึ่งเกิดช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างอีพ็อกซีและฟิล์ม PTFE

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 ความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวของแผ่นอีพ็อกซีที่ถูกเคลือบในก๊าซผสม SF_4/SF_6[11]

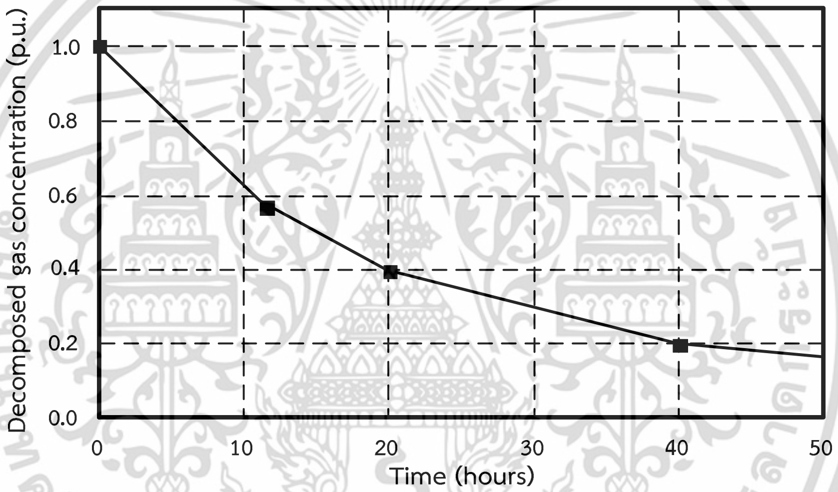
ต้านทานต่ำสุดของแผ่นเคลือบอีพ็อกซีน้อยกว่า 10^{11} โอห์ม / พื้นที่ ในทางตรงกันข้ามความต้านทานของแผ่นอีพ็อกซีเปลือยที่ไม่มีฟิลเลอร์มีเสถียรภาพมากและความต้านทานต่ำสุดมากกว่า 10^{14} โอห์ม /พื้นที่ ปรากฏการณ์นี้สะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของอีพ็อกซีที่ใช้สำหรับเคลือบผิวและการทำเป็นแผ่น อีพ็อกซีที่ใช้สำหรับการหล่อไม่สามารถใช้ได้สำหรับการเคลือบผิวเนื่องจากการที่มีความหนืดสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแบบสเปรย์ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



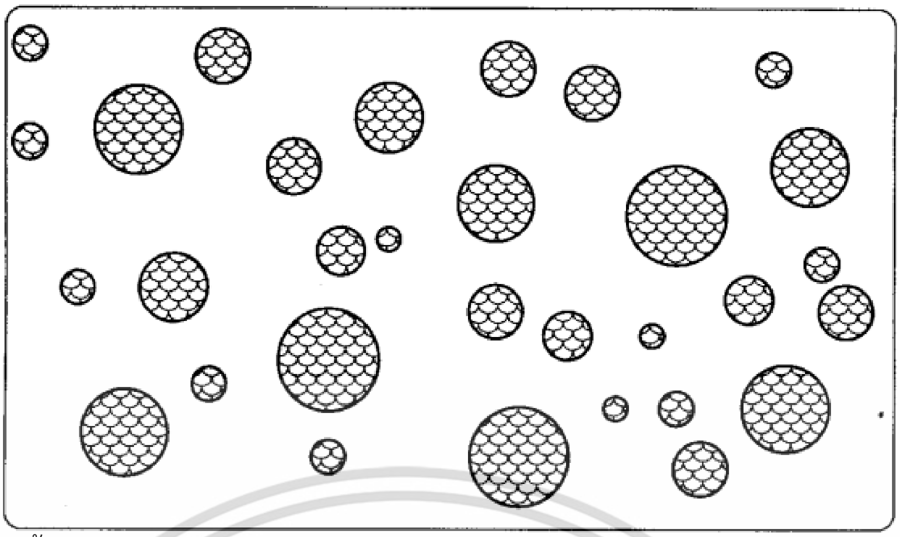
รูปที่ 2.28 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ลดลงเทียบกับเวลาหลังจากการดับกระแสขอGCB[11]

2.14 การผสมก๊าซเบื้องต้น และสมการของแมกซ์เวล การ์เน็ต(Maxwell Garnett)[13]

2.14.1 พื้นฐานการผสมก๊าซ และสมการของแมกซ์เวล การ์เน็ต(Maxwell Garnett)

กฎของแมกซ์เวล การ์เน็ต(Maxwell Garnett) เป็นสมการพื้นที่ ที่สามารถคำนวนการผสมของก๊าซ โดยการผสมก๊าซจะมองลักษณะก๊าซที่ผสมกันเป็นทรงกลมดังรูปที่ 2.29 โดยก๊าซที่ผสมกันสองส่วนจะเรียกว่า เฟส(phases) เฟสของสิ่งแวดล้อมหรือก๊าซปริมาณมากจะถูกเรียกว่า เมทริกซ์(Matrix) หรือ โฮสต์(host) ส่วนที่จะมาผสมจะเรียกว่า เกสต์(guest)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 พื้นฐานการผสมก๊าซ โดยทรงกลมคือก๊าซผสม โดยค่า E_i คือค่าของก๊าซผสม และ E_e เป็นค่าของสิ่งแวดล้อม[13]

2.14.2 โพลาไลซ์อะบิลิตี้(Polarizability) ของไดอิเล็กทริกซ์ทรงกลม

โพลาไลซ์อะบิลิตี้ของการรวมเป็นมาตรการสำหรับการการวัดการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า โดยโพลาไลซ์อะบิลิตี้ของอนุภาค $\propto$ คือความสัมพันธ์ของไดโพลโมเมนต์ p ซึ่งเกิดจากการรวมโพลาไรเซชันและสนามไฟฟ้าภายนอก E_e :

$$p = \propto E_e \tag{2.40}$$

สำหรับโพลาไลซ์อะบิลิตี้ของทรงกลมสามารถคำนวนจากสัดส่วนภายในสนาม ประกอบด้วยการรวมปริมาตรและความแตกต่างของอิเล็กทริกระหว่างการรวมกันและสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่สนามไฟฟ้า E_i เหนี่ยวนำทรงกลมลักษณะสม่ำเสมอ และไฟฟ้าสถติย์จากภายนอก E_e ยังคงสม่ำเสมอและขนานกับสนามไฟฟ้าภายนอก

$$E_i = \frac{3\varepsilon_e}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_e} E_e \tag{2.41}$$

สามารถเขียนสมการโพลาไลซ์อะบิลิตี้ได้ดังนี้

$$\propto = V(\varepsilon_i - \varepsilon_e)\frac{3\varepsilon_e}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_e} \tag{2.42}$$

ค่า permittivities ของก๊าซที่นำมาผสม และสภาพแวดล้อมหรือก๊าซที่มีปริมาณมากจะแสดงด้วย ε_i และ ε_e ตามลำดับ โดย V คือปริมาตรของก๊าซ โดยจะมองเป็นลักษณะทรงกลม ซึ่งโพลาไลซ์อะบิลิตี้จะเป็นปริมาณ สเกลาร์

2.14.3 สมการของ Clausius-Mossotti

การหา permittivity สามารถคำนวนได้จากความหนาแน่นของทรงกลมที่อยู่ภายใต้ permittivity ของสภาพแวดล้อม ε_eโดย ค่า Effective permittivity จะมีความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอก และค่าเฉลี่ยความน่าแน่นของฟลักซ์<D> ดังนี้

$$< D > = \varepsilon_{eff} E_e = \varepsilon_e E_e + < \mathbf{P} > \tag{2.43}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย <P> คือค่าเฉลี่ยโพลาไลซ์เซชั่นจะเชื่อมต่อกับความหนาแน่นของไดโพลโมเมนต์(P) ของการผสม

$$< \mathbf{P} >= n\mathbf{p} \tag{2.44}$$

โดย n คือความหนาแน่นของไดโพลโมเมนต์ของการผสม

ในส่วนผสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีความหนาแน่นมากเราไม่สามารถคาดเดาได้ว่าสนามไฟฟ้ากระตุ้นการผสมมาจากภายใน หรือสนามไฟฟ้าภายนอก E_e ซึ่งโพลาไลซ์เซชั่นที่เพิ่มขึ้นจากสภาพแวดล้อมเป็นปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย โดยสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นการรวมกันตัว E_L จะถูกเรียกว่า Local field หรือ สนามลอเลนท์เซียน(Lorentzian field) ขึ้นอยู่กับรูปทรงของการรวมตัวและสำหรับทรงกลมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{E}_L = \mathbf{E}_e + \frac{1}{3\varepsilon_e}\mathbf{P} \tag{2.45}$$

ที่ 1 ส่วน 3 ของดีโพลาไลซ์เซชั่น แฟคเตอร์ ของทรมกลม โดยรวมสมการนี้ กับสมการ $\mathbf{p} = \propto \mathbf{E}_L$ ทำให้เรามีโพลาไรเซชันโดยเฉลี่ยแล้วสามารถเขียนสมการ Effective (จากสมการที่ 2.43) ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_e + \frac{n\alpha}{1-n\alpha/(3\varepsilon_e)} \tag{2.46}$$

โดยมากจะเขียนสมการในรูปแบบอัตราส่วนดังนี้

$$\frac{\varepsilon_{eff}-\varepsilon_e}{\varepsilon_{eff}+2\varepsilon_e} = \frac{n\alpha}{3\varepsilon_e} \tag{2.47}$$

ความสัมพันธ์นี้ถูกเรียกว่าสมการของ Clausius-Mossotti บางครั้งอาจเรียกว่าสมการของ Lorenz-Lorentz การประมาณส่วนผสมเจือจางจะถูกทำให้ผลน้องลงโดยการใส่ค่าลิมิตของ n ทำให้ได้สมการ

$$\varepsilon_{eff} \approx \varepsilon_e + n\alpha \tag{2.48}$$

2.14.4 กฎการผสมแมกซ์เวล การ์เน็ต(Maxwell Garnett Mixing Rule)

ในปริมาณการใช้งานจริงเช่น โพลาไลซ์อะบิลิตี้ และ Scatterer densities ค่อนข้างมีความซับซ้อนในการใช้งาน จึงนิยมใช้ส่วนประกอบการผสมของค่า permittivity ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของการรวมสมการ Clausius-Mossotti ด้วย สามารถเขียนสมการโพลาไลซ์อะบิลิตี้ จากสมการที่(2.42) ได้ดังนี้

$$\frac{\varepsilon_{eff}-\varepsilon_e}{\varepsilon_{eff}+2\varepsilon_e} = f\,\frac{\varepsilon_i-\varepsilon_e}{\varepsilon_i+2\varepsilon_e} \tag{2.49}$$

เมื่อ $f = nV$ คือมิติด้านปริมาณ ของส่วนผสมที่ใช้ผสม สมการนี้ถูกเรียกว่าสมการการผสมของเรย์ลี่(Rayleigh maxing formula) เนื่องจากมีเพียงเศษเสี้ยวของปริมาณและ permittivity ที่ปรากฏในกฎการผสมเท่านั้น ทรงกลมไม่จำเป็นต้องมีขนาดเท่ากันถ้าทั้งหมดมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น

บางกรณีกฎของการผสมที่นิยมที่สุดสมการของ Maxwell Garnett ซึ่งเป็นกฎ Rayleigh (2.49) สามารถเขียนสมการ Effective permittivity ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_e + 3f\varepsilon_e\,\frac{\varepsilon_i-\varepsilon_e}{\varepsilon_i+2\varepsilon_e-f(\varepsilon_i-\varepsilon_e)} \tag{2.50}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้มีการใช้อย่างแพร่หลายในหลากหลายสาขาวิชา ความพิเศษของสมการของ Maxwell Garnett คืออยู่ในรูปแบบที่เรียบง่าย และสามารถใช้ได้ในวงกว้าง โดยมีขอบเขตจำกัดในการรวมกันกรณีการหายไปของการรวมตัวของเฟสดังนี้

$$f \rightarrow 0 \approx \varepsilon_{eff} \rightarrow \varepsilon_e \quad (2.51)$$

กรณีที่ก๊าซปริมาณมากเดิมเจือจางจนหายไป

$$f \rightarrow 1 \approx \varepsilon_{eff} \rightarrow \varepsilon_i \quad (2.52)$$

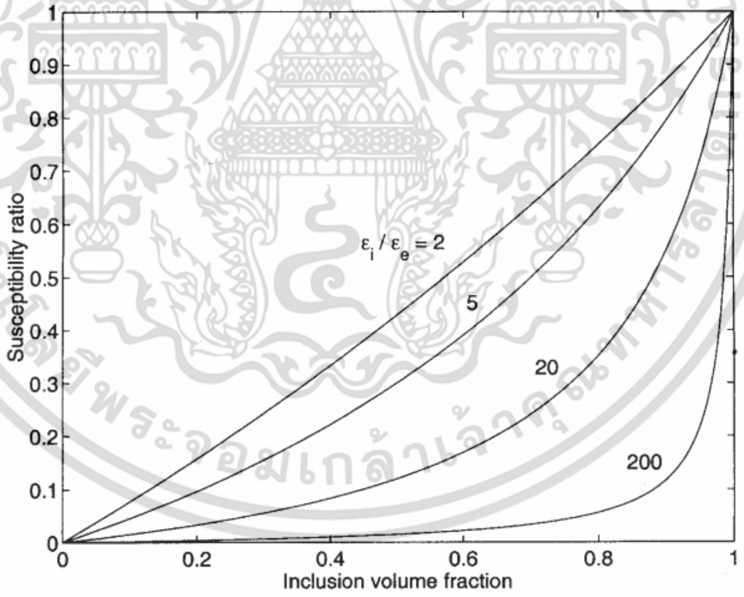
การรบกวนส่วนขยายของกฎของ Maxwell Garnett ในสมการการผสมสำหรับการเจือจางของการผสม $(f \ll 1)$ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_e + 3f\varepsilon_e \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_e}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_e} \quad (2.53)$$

โดยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการผสมระหว่างก๊าซ SF_6 ที่มีค่า permittivity เท่ากับ 1.00204 และ ก๊าซ N_2 ที่ค่า permittivity เท่ากับ 1.00058 ซึ่งทำให้ค่า permittivity ของก๊าซผสมระหว่าง SF_6 :N_2 ที่อัตราส่วน 80:20 และ 60:40 เท่ากับ 1.001675 และ 1.001066 ตามลำดับ

รูปที่ 2.30 จะแสดงการพยากรณ์จากสมการของ Maxwell Garnett สำหรับสัดส่วนที่แตกต่างกันของไดอิเล็คทริกซ์ $\varepsilon_i/\varepsilon_e$ โดยจะแสดงในอัตราส่วนดังนี้

$$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_e}{\varepsilon_i - \varepsilon_e}$$



รูปที่ 2.30 อัตราส่วน $\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_e}{\varepsilon_i - \varepsilon_e}$ สำหรับการพยากรณ์ค่า Effective permittivity ของก๊าซผสม โดยค่า permittivity ของก๊าซที่นำมาผสมคือ ε_i และค่า permittivity ของก๊าซฐาน หรือก๊าซปริมาณมากคือ ε_e[13]

ซึ่งการเจือจางของก๊าซผสมจนเหลือเฉพาะก๊าซฐาน f=0 และกรณีเต็มไปด้วยก๊าซผสม f=1 จะเป็นอิสระต่อกันอย่างชัดเจน โดยรูปที่ 2.30 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าไปด้วย permittivity จะไม่เป็นเชิงเส้นถ้าจำนวนปริมาตรของก๊าซผสมมีจำนวนมากกว่าก๊าซฐานหลายเท่าตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ

ในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในสถานีไฟฟ้าชนิดฉนวนก๊าซ ซึ่งใช้ก๊าซ SF_6 เป็นฉนวน เนื่องจาก SF_6 เป็นก๊าซที่สามารถทนแรงดันเบรกดาวน์ได้มากกว่าอากาศที่ความดันเท่ากัน และมีคุณสมบัติในการดับอาร์คได้อย่างรวดเร็ว โดยสถานีไฟฟ้าชนิดฉนวนก๊าซมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ซึ่งสนามไฟฟ้ามีลักษณะไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ดังนั้นในการซ่อมบำรุงและดูแลรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนก๊าซจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติของก๊าซ SF_6 ซึ่งเป็นฉนวนหลัก จึงได้มีการออกแบบการทดลอบเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6 เพื่อนำมาเทียบกับก๊าซ N_2 และอากาศ ภายในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยซึ่งในการทดลองนี้ประกอบด้วย

1. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศ(Air) ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ที่ความดันอากาศ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 บาร์
2. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซไนโตรเจน(N_2) ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ที่ความดันอากาศ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 บาร์
3. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ SF_6 ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ที่ความดันอากาศ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 บาร์
4. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซผสม SF_6/N_2 ในอัตราส่วน 80/20 และ 60/40 ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ที่ความดันอากาศ 1 บาร์
5. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศที่มีอนุภาคประเภทตัวนำและฉนวนเจือปนขนาด 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร จำนวน 1, 5 และ 10 ชิ้น ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

และการทดสอบการเกิด Partial Discharge(PD) เมื่อมีสิ่งเจือปนเข้าไปในสนามไฟฟ้าระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ โดยพิจารณาการวางตำแหน่งของสิ่งเจือปนที่ระยะจุดศูนย์กลางแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 ระยะดังนี้

1. ตำแหน่งสิ่งเจือปนอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของแหล่งจ่ายไฟฟ้า
2. ตำแหน่งสิ่งเจือปนอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลาง 3 เซนติเมตร
3. ตำแหน่งสิ่งเจือปนอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลาง 5 เซนติเมตร(ระยะเดียวกับอิเล็กโตรดระนาบทำจากสแตนเลส)

ก่อนที่จะทำการทดลอบ จะต้องทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบ (Test Cell) เพื่อนำมาใช้ทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ SF_6, N_2, Air, ก๊าซผสม SF_6/N_2 และ อากาศเมื่อมีอนุภาค โดยการใช้โปรแกรม Solid Works ในการ จำลองรูปแบบ 3 มิติ ขึ้นมา เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปประกอบสร้างชุดทดสอบจริง เพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติของฉนวนก๊าซภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยต่อไป

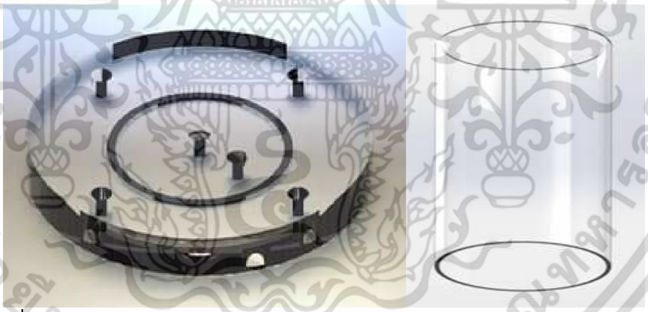
3.1 การออกแบบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ(Test Cell)

งานวิจัยนี้ต้องการทดสอบเปรียบเทียบความสามารถทดต่อแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ Air, N_2, SF_6 และก๊าซผสม SF_6/N_2 ซึ่งอุปกรณ์ทดสอบต้องมีความสามารถรับแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงทดสอบ เพื่อทำการทดสอบโดยการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าต้องมีความสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย เพื่อให้ใกล้เคียงกับการนำก๊าซฉนวนไปใช้งานจริง โดยมีรายละเอียดในการออกแบบ และสร้างชุดทดสอบ(Test Cell) ดังนี้

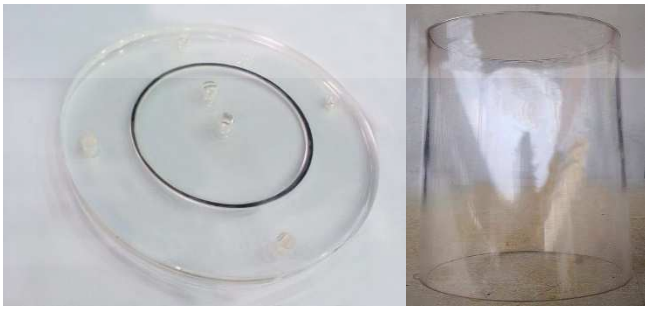
3.1.1. ออกแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม Solid Works

- 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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อิเล็กโตรด

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

รูปที่ 3.3 แบบจำลองอิเล็กโตรดทรงกลมและระนาบของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2, และอากาศ

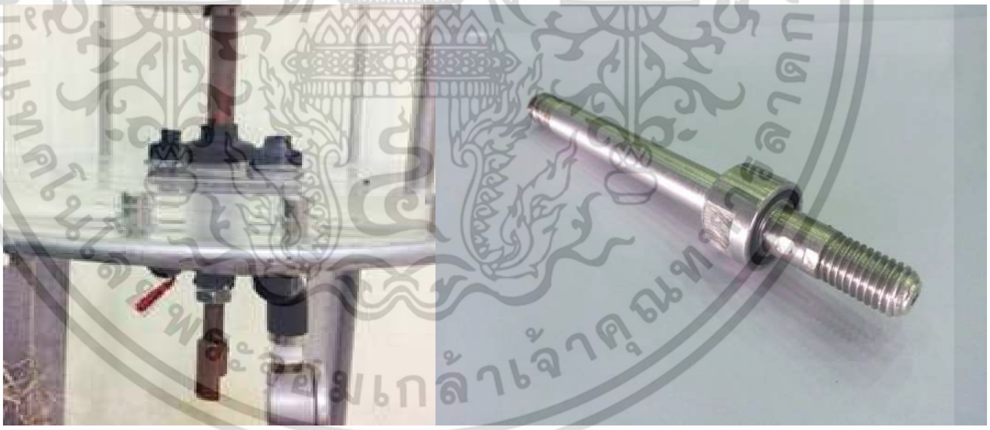
รูปที่ 3.4 อิเล็กโตรดทรงกลมและระนาบของชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2, และอากาศที่ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แกนตัวนำ

ทำจากทองแดงและสแตนเลสเป็นก้านยาว สำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและทำการเชื่อมต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวนด์

รูปที่ 3.5 แบบจำลองแกนตัวนำสำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและทำการเชื่อมต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวด์

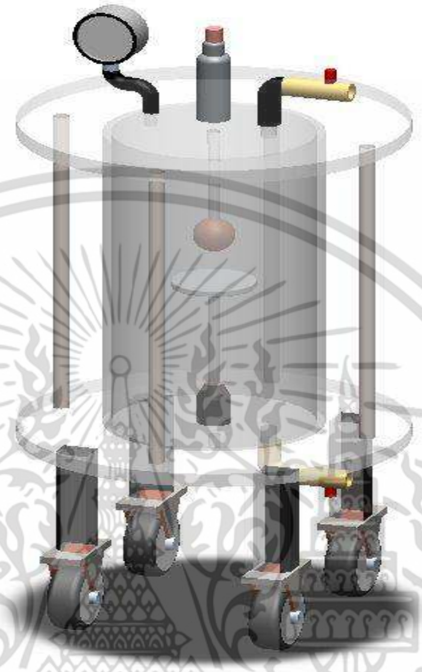


รูปที่ 3.6 แกนตัวนำสำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและทำการเชื่อมต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวด์ที่ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มาตรวัดความดัน
ใช้ในการวัดความดันของก๊าซที่อยู่ภายในชุดทดสอบ

- ชุดทดสอบชุดสมบูรณ์



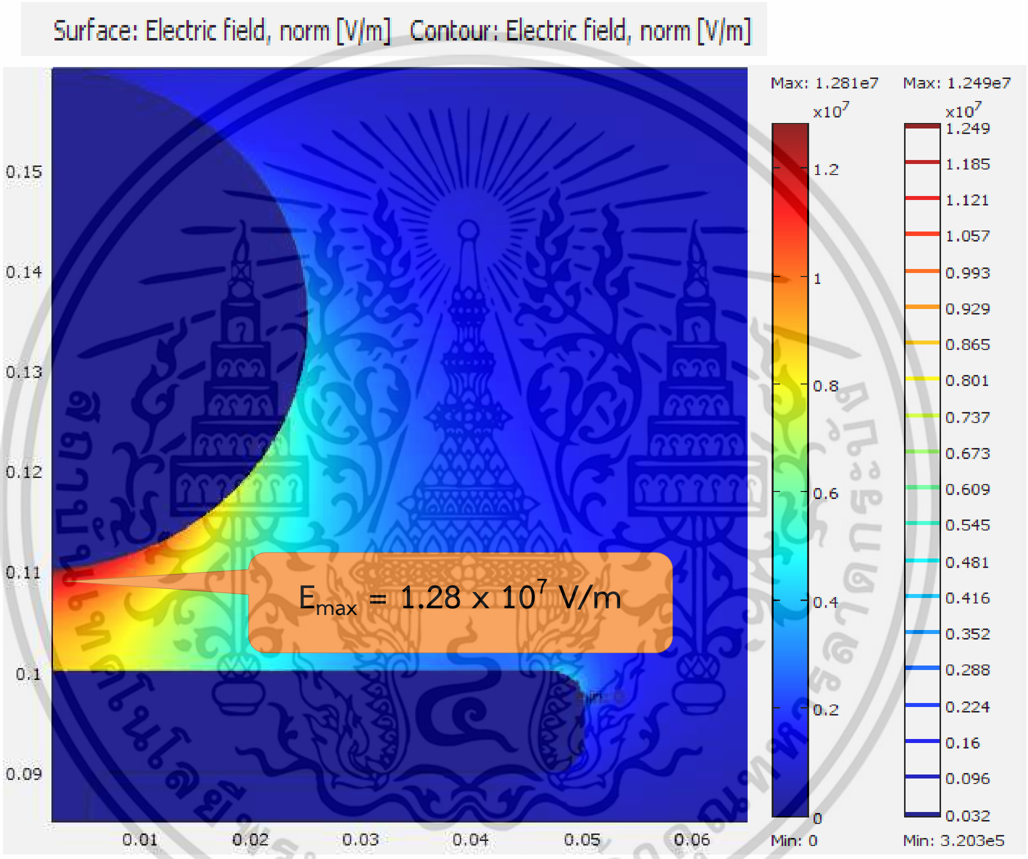
รูปที่ 3.7 แบบจำลองชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศ

รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศ ที่ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมโซล

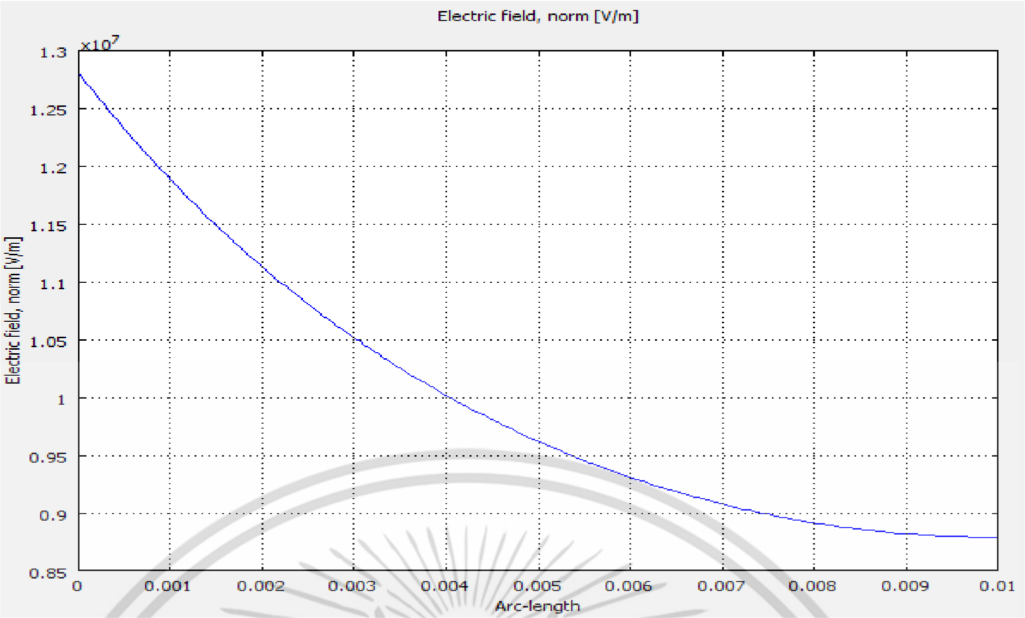
ในการจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้านี้ ได้ทำการป้อนแรงดันขนาด 100 kV ไปที่อิเล็กโตรดทรงกลม และต่อกราวด์ทางด้านอิเล็กโตรดระนาบ ภายในฉนวนก๊าซที่ความดัน 1 bar ระยะแกป 1 cm พบว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่เกิดขึ้นทางด้านอิเล็กโตรดทรงกลมมีค่าเท่ากับ 1.28×10^7 V/m โดยแบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่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



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดของชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ

3.1.3 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศที่มีอนุภาค

งานวิจัยนี้ใช้อนุภาคในการทดสอบ 2 ประเภท ได้แก่ประเภทตัวนำ และประเภทฉนวน เพื่อให้มีความสอดคล้องกับอนุภาคที่อาจจะเกิดขึ้นภายหลังจากการใช้งานของ GIS โดยมีรายละเอียดดังนี้

- อนุภาคประเภทตัวนำ

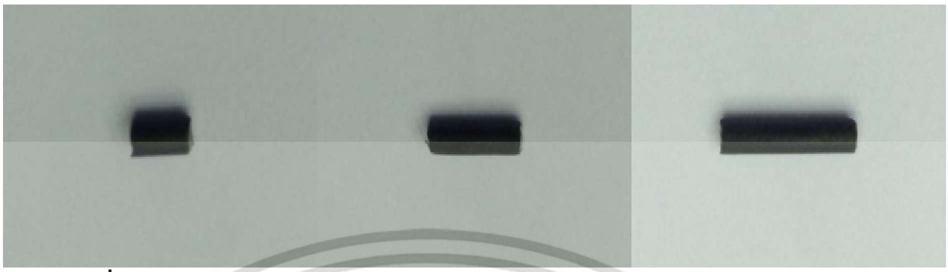
ใช้ลวดเย็บกระดาษเบอร์ 10-1M ที่มีความยาวต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ 0.5, 1.0, และ 1.5 cm จำนวนอย่างละ 1 อัน วางอยู่บนอิเล็กโตรดระนาบฝั่งกราวด์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อนุภาคประเภทฉนวน

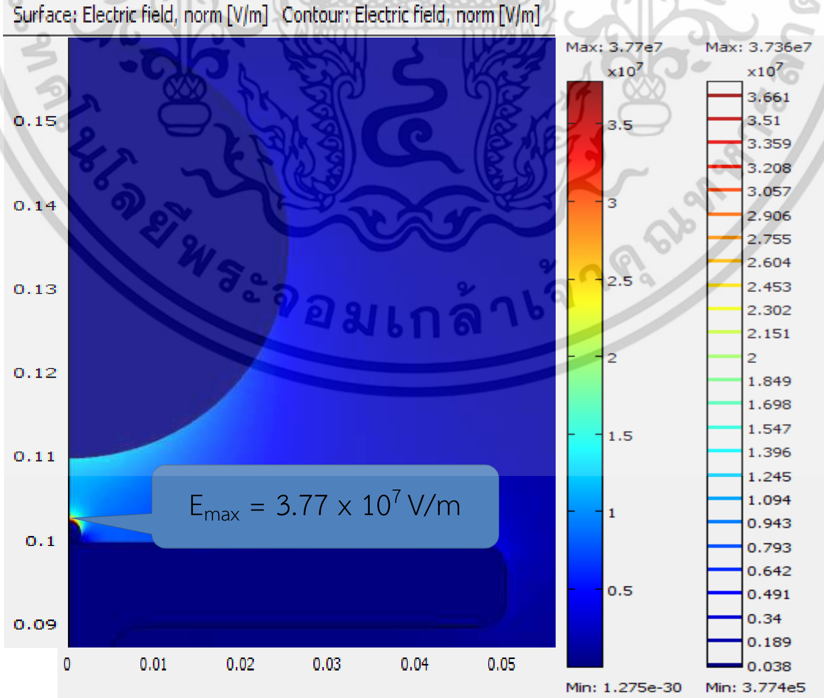
ใช้เป็นฉนวนของสายไฟขนาด 1.5 sq.mm ที่มีความยาวต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ 0.5, 1.0, และ 1.5 cm จำนวนอย่างละ 1 อัน วางอยู่บนอิเล็กโตรดระนาบฝั่งกราวด์



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

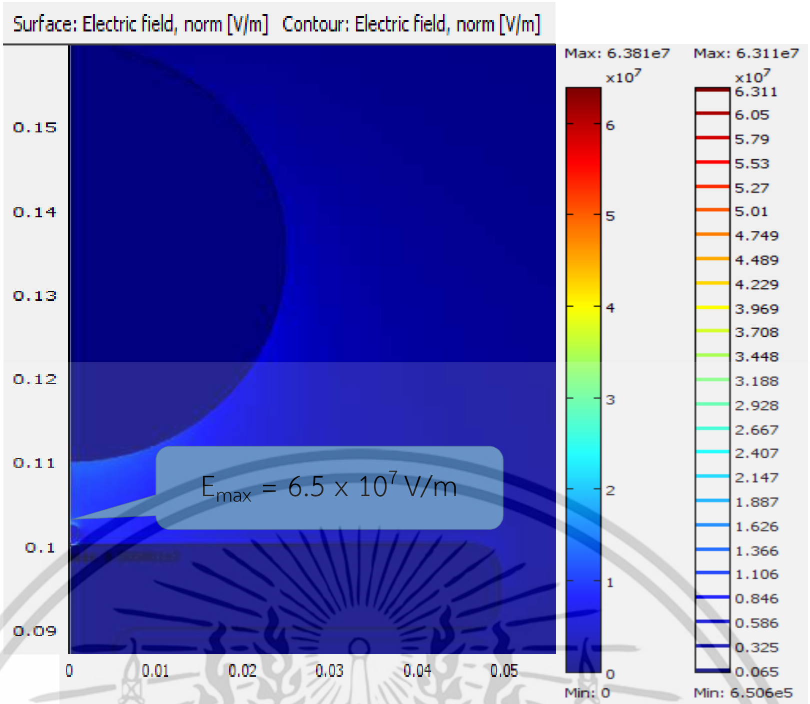
3.1.4 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมโซล

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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.14 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ ของอากาศที่มีอนุภาคประเภทฉนวน

3.2 การเตรียมฉนวนก๊าซสำหรับการทดสอบ

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาความคงทนของแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซชนิดต่างๆ เพื่อหาความเป็นไปในการหาก๊าซฉนวนทดแทนก๊าซ SF_6 หรือลดปริมาณการใช้ก๊าซ SF_6 ลง แต่ยังคงความสามารถเป็นฉนวนได้ตามการใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

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

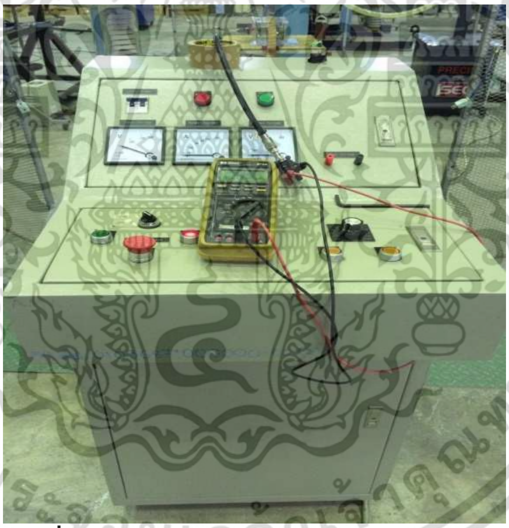
ทำการผสมก๊าซ SF_6 กับ N_2 ในอัตราส่วน 80% กับ 20% และ 60% กับ 40**%** เข้าไปในชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.15 ชนิดของฉนวนก๊าซสำหรับการทดสอบ และถังบรรจุก๊าซทิ้งหลังทดสอบ 1.ก๊าซ SF_6 2.ถังบรรจุก๊าซทิ้ง 3.ก๊าซ N_2

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ

3.3.1 วาริแอคสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.16 วาริแอคสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า

3.3.2 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.17 หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 235/100 kV, 5 kVA

3.3.3 ตัวต้านทานน้ำ ค่าความต้านทาน 500 กิโลโอห์ม

รูปที่ 3.18 ตัวต้านทานน้ำ

3.3.4 โวลเตจดิไวเดอร์ พิกัด 100kV บรรจุแก๊ส SF_6

- 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.19 โวลเตจดิไวเดอร์ พิกัด 100 kV

3.3.5 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ

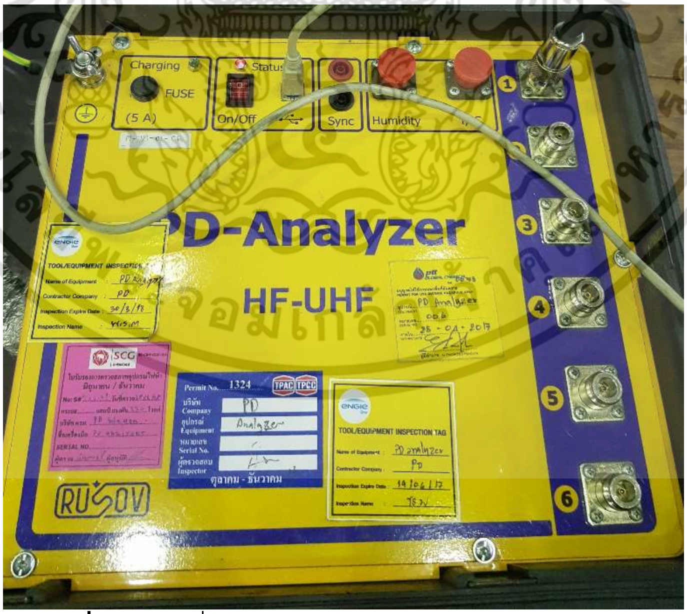
รูปที่ 3.20 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 มัลติมิเตอร์

รูปที่ 3.21 มัลติมิเตอร์

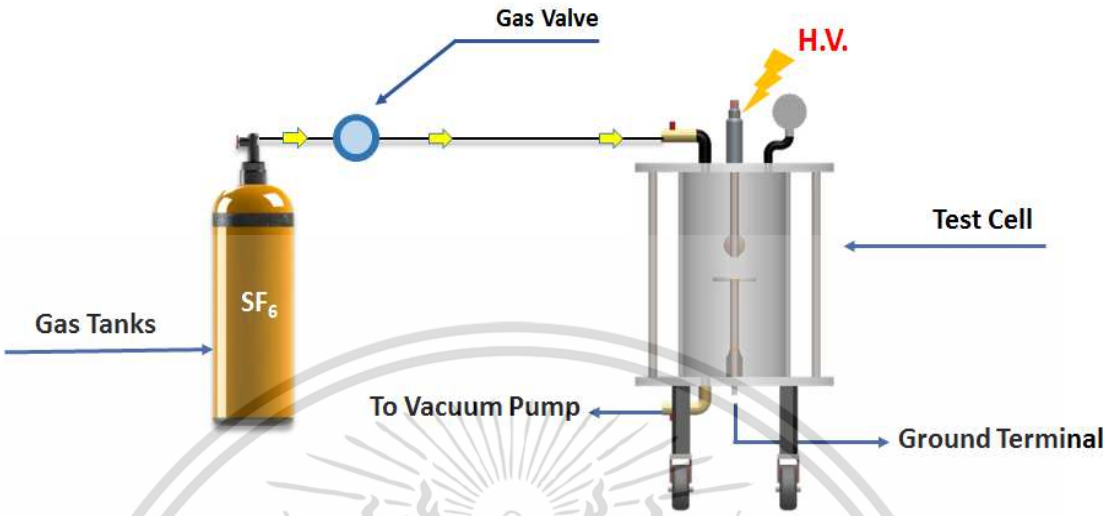
3.3.7 เครื่องมือวัด Partial Discharge(PD)



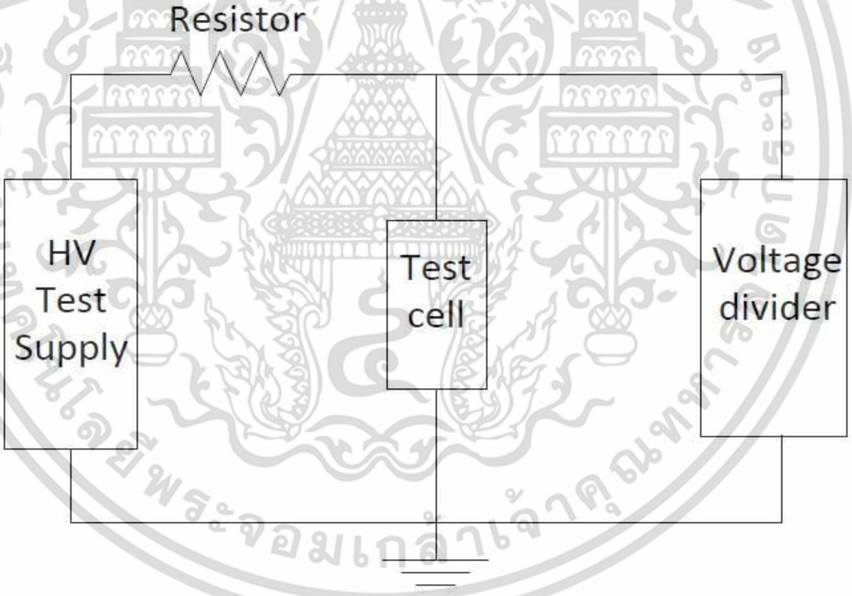
รูปที่ 3.22 เครื่องมือวัด Partial Discharge(PD Analyzer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบไดอะแกรมการทดลองและวงจรการทดสอบ



รูปที่ 3.23 ไดอะแกรมการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ



รูปที่ 3.24 วงจรการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

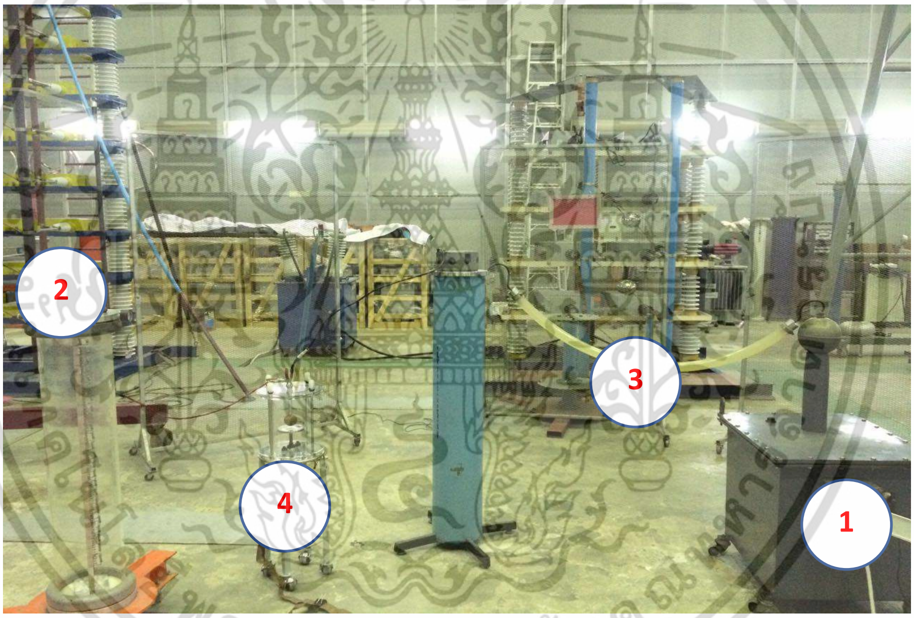
บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ

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

4.1.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ1.หม้อแปลงทดสอบ 2.โวลเตจดิไวเดอร์ 3.ตัวต้านทานน้ำ 4.ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันของฉนวนก๊าซ(Test Cell)

4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

4.1.2.1 ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.1

4.1.2.2 นำชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันของฉนวนก๊าซ (Test Cell) อัดฉนวนก๊าซลงในชุดทดสอบโดยให้ฉนวนก๊าซอยู่ในระดับความดันที่ต้องการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 ตรวจสอบฉนวนก๊าซที่ถูกอัดลงในชุดทดสอบว่ามีการรั่วซึมอยู่หรือไม่โดยใช้น้ำสบู่ป้ายไปตามข้อต่อ ถ้ามีการรั่วให้ขันน็อตแน่นขึ้น จนกว่าฟองสบู่ที่มีจะหายไปจนหมด

4.1.2.4 จดบันทึกค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ

4.1.2.5 ทำการป้อนแรงดันโดยให้อัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ 2 kV/s จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ฉนวนก๊าซ

4.1.2.6 บันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดแรงดัน

4.1.2.7 เมื่อฉนวนก๊าซที่ใช้ทดสอบเกิดการเบรกดาวน์ จากนั้นตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ระยะเวลา 2 นาที

4.1.2.8. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5-7 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะทดสอบครบจำนวน 6 ครั้ง

4.1.3 ผลการทดสอบ

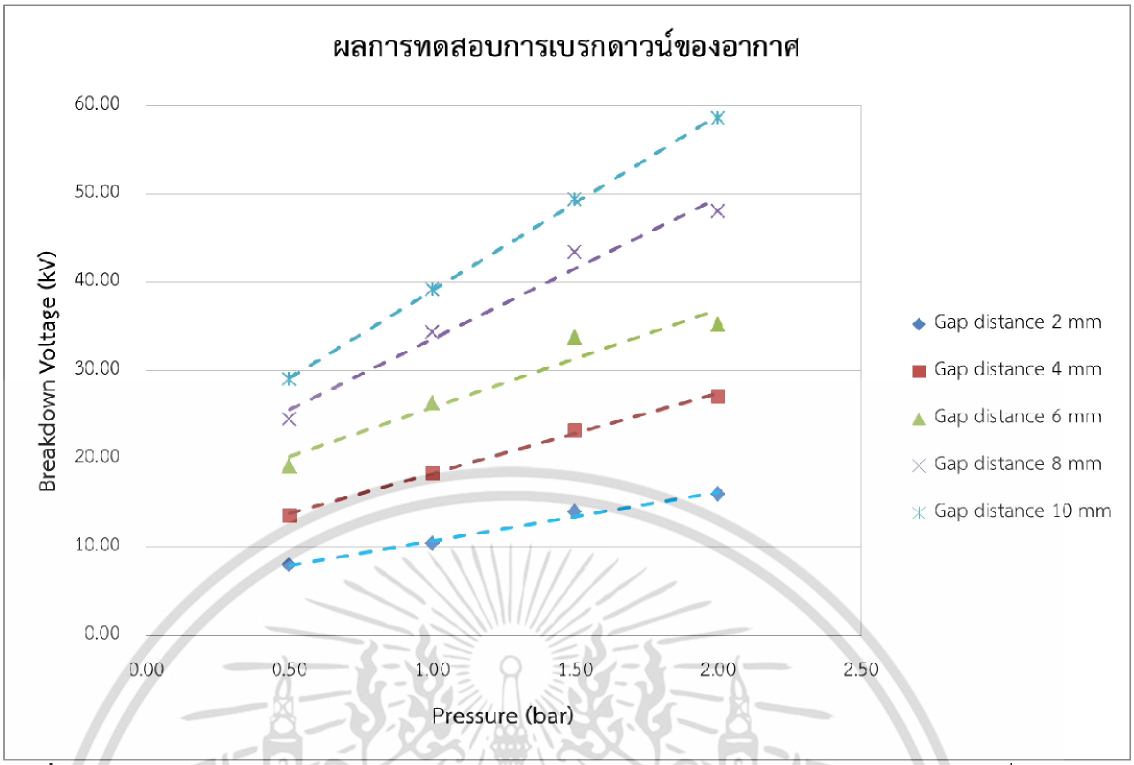
จากการทดสอบผลการเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ 3 ชนิดได้แก่ อากาศ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) พบว่าได้ผลการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซอากาศที่ความดันและระยะแกปต่างๆ

Gap distance	Pressure (Bar)	Breakdown Voltage(kV)						
		1	2	3	4	5	6	Average
2	0.50	7.85	8.12	7.89	7.96	8.02	7.98	7.97
	1.00	11.12	10.30	10.23	10.41	10.15	10.28	10.42
	1.50	13.73	13.92	13.95	13.26	14.03	14.70	13.93
	2.00	15.72	16.07	15.83	16.28	16.17	15.88	15.99
4	0.50	13.48	13.80	13.35	13.53	13.78	13.74	13.61
	1.00	18.20	18.70	18.10	18.35	18.52	18.60	18.41
	1.50	23.39	23.08	23.15	23.35	23.22	23.28	23.25
	2.00	27.15	26.98	26.89	27.14	27.19	27.31	27.11
6	0.50	18.89	19.16	19.19	19.35	19.22	19.28	19.18
	1.00	26.52	26.11	26.39	26.50	26.22	26.32	26.34
	1.50	33.92	33.68	33.74	33.42	33.88	33.54	33.70
	2.00	35.02	35.28	35.36	35.12	35.24	34.98	35.17
8	0.50	24.62	24.28	24.43	24.56	24.39	24.49	24.46
	1.00	33.92	33.72	33.88	34.68	34.64	34.86	34.28
	1.50	43.24	43.38	43.48	43.54	43.32	43.14	43.35
	2.00	47.84	47.94	48.25	48.42	47.82	47.92	48.03
10	0.50	28.62	28.76	28.88	29.32	28.96	29.24	28.96
	1.00	39.60	38.90	39.28	39.12	38.98	38.72	39.10
	1.50	49.30	49.48	49.42	49.62	49.56	49.12	49.42
	2.00	58.68	58.38	58.52	58.42	58.12	58.98	58.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



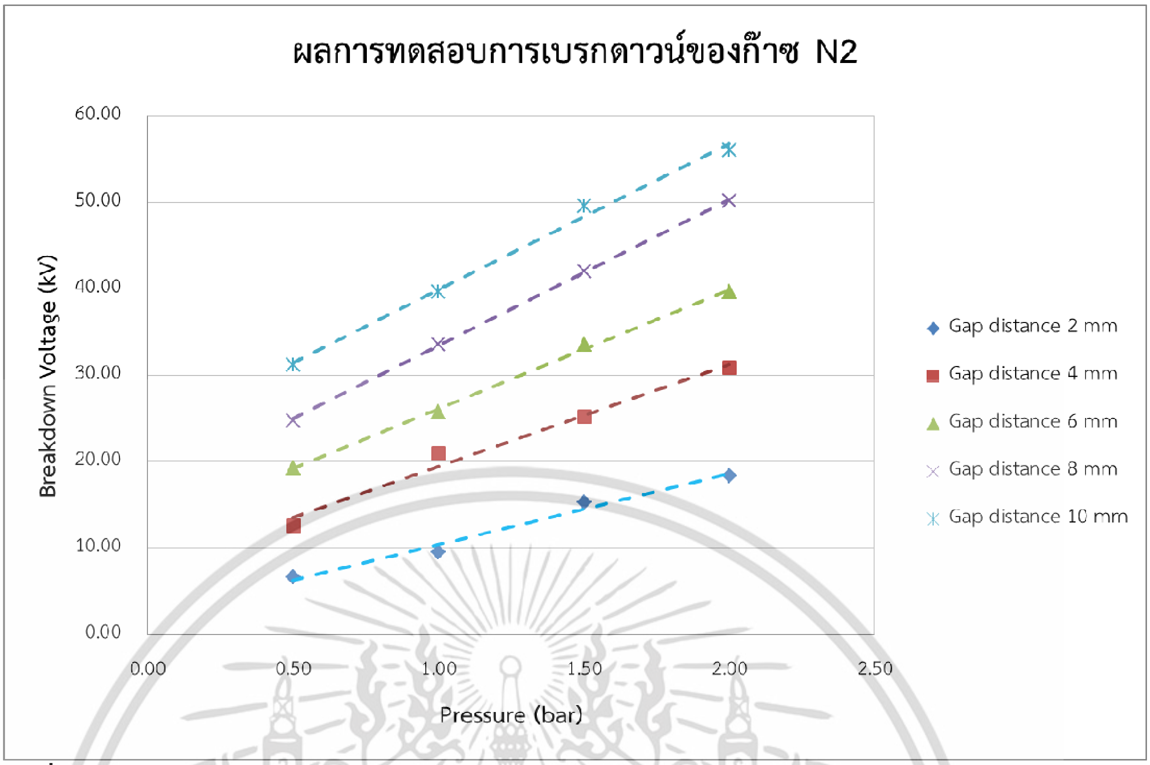
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับความดันที่ระดับต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซไนโตรเจนที่ความดันและระยะแกปต่างๆ

Gap distance (mm)	Pressure (Bar)	Breakdown Voltage(kV)						
		1	2	3	4	5	6	Average
2	0.50	6.48	6.36	6.96	6.80	6.56	6.64	6.63
	1.00	9.36	9.38	9.48	9.54	9.66	9.50	9.49
	1.50	15.18	15.24	14.98	15.36	15.30	15.58	15.27
	2.00	18.05	18.60	17.88	18.42	18.32	18.92	18.37
4	0.50	12.52	12.64	12.86	12.72	12.44	12.56	12.62
	1.00	20.84	20.96	21.18	21.24	20.72	20.92	20.98
	1.50	25.32	25.58	25.33	24.98	24.72	25.12	25.18
	2.00	30.54	30.84	30.98	31.08	31.12	30.72	30.88
6	0.50	19.12	19.28	19.32	19.36	19.18	19.12	19.23
	1.00	25.42	25.56	25.88	25.96	25.76	25.62	25.70
	1.50	33.75	33.54	33.45	33.47	33.81	33.32	33.56
	2.00	39.36	39.48	39.56	39.72	39.90	39.66	39.61
8	0.50	24.72	24.86	24.92	24.68	24.74	24.56	24.75
	1.00	33.45	33.64	33.72	33.84	33.58	33.36	33.60
	1.50	42.40	41.80	41.70	41.82	42.60	41.56	41.98
	2.00	50.62	48.90	50.40	50.36	50.10	50.50	50.15
10	0.50	31.06	30.98	31.24	31.18	31.08	31.28	31.14
	1.00	39.42	39.36	39.58	39.72	40.10	39.62	39.63
	1.50	49.28	49.40	49.50	49.74	49.90	49.70	49.59
	2.00	55.88	56.70	56.82	54.90	55.60	56.15	56.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซไนโตรเจนกับความดันที่ระดับต่างๆ

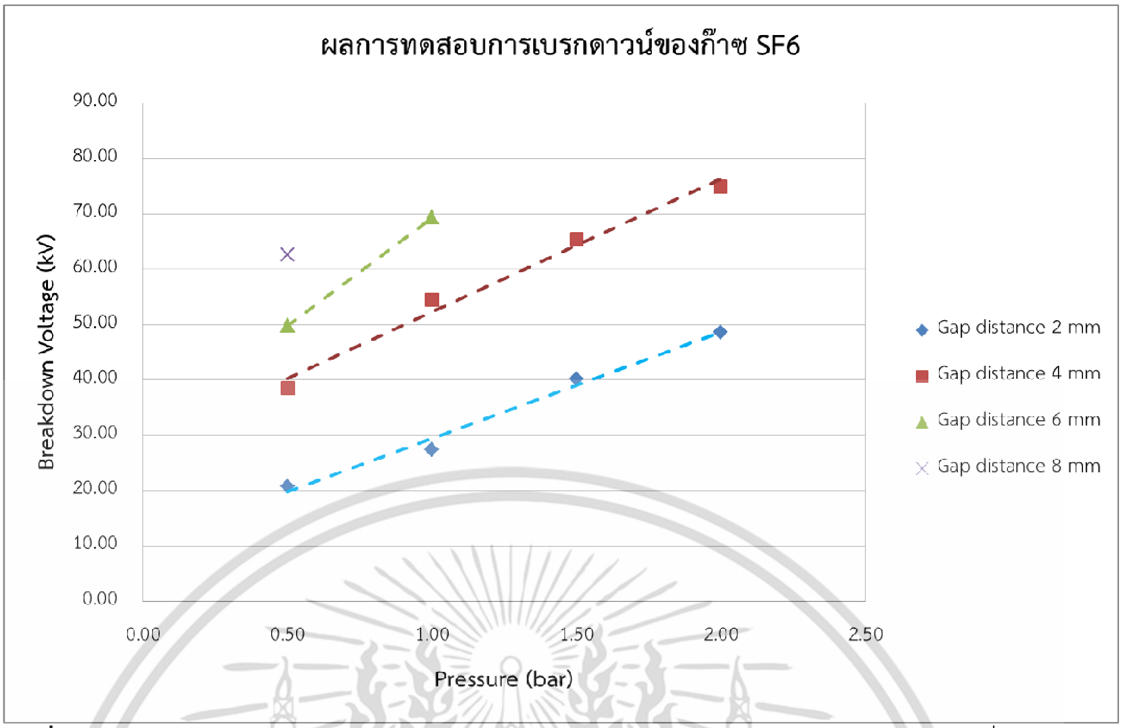
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ SF_6 ที่ความดันและระยะแกปต่างๆ

Gap distance (mm)	Pressure (Bar)	Breakdown Voltage(kV)						
		1	2	3	4	5	6	Average
2	0.50	20.74	20.86	20.65	21.02	20.88	20.74	20.82
	1.00	26.68	26.72	27.84	27.98	27.46	27.48	27.36
	1.50	40.10	40.20	39.90	40.90	40.80	39.56	40.24
	2.00	50.10	47.90	48.50	48.70	48.40	47.90	48.58
4	0.50	38.54	38.48	38.96	38.58	38.36	38.24	38.53
	1.00	54.40	53.90	55.20	54.76	54.30	54.50	54.51
	1.50	65.40	64.80	65.80	66.20	65.50	64.90	65.43
	2.00	>75	>75	>75	>75	>75	>75	75.00
6	0.50	50.20	49.80	50.00	48.90	49.50	50.40	49.80
	1.00	69.40	69.50	69.30	69.90	68.60	69.20	69.32
	1.50	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75
	2.00	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75
8	0.50	63.40	62.50	61.80	62.90	61.40	63.20	62.53
	1.00	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75
	1.50	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75
	2.00	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75
10	0.50	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75
	1.00	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75
	1.50	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75
	2.00	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75

*หมายเหตุ เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบมีขนาดพิกัด 100 kV แต่หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงเก่า ดังนั้นเพื่อรักษาการทำงานของหม้อแปลงทดสอบจึงป้อนแรงดันสูงสุดที่ 75เปอร์เซ็นต์ของพิกัดหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของ SF_6 กับความดันที่ระดับต่างๆ

4.2 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสม

การใช้ก๊าซ SF_6 เป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการรั่วไหลของก๊าซหรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวเมื่อเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 จึงมีการวิจัยเพื่อลดการใช้ก๊าซ SF_6 โดยการนำไปผสมกับฉนวนก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซ N_2 เป็นต้น ในการนี้งานวิจัยนี้ จึงทำการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซผสมในอัตราส่วน $SF_6 : N_2$ (80:20) และ $SF_6 : N_2$ (60:40) เพื่อทดสอบดูความเป็นได้ในลดการใช้ก๊าซ SF_6 โดยก๊าซ N_2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

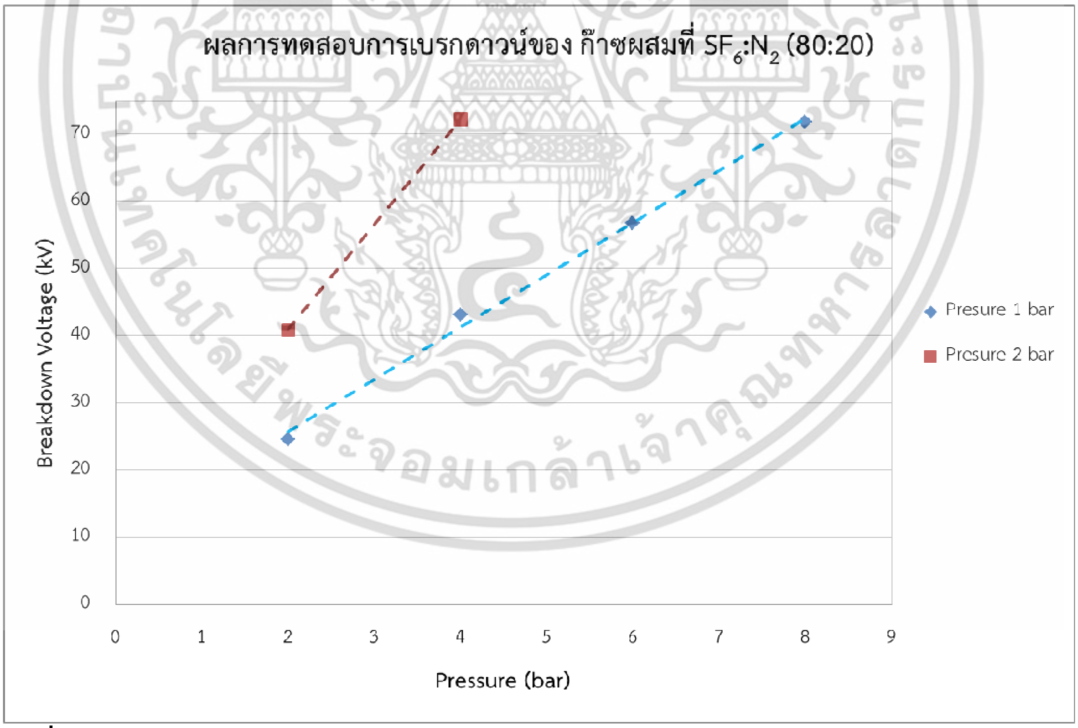
4.2.1 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบผลการเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซผสมในอัตราส่วน $SF_6 : N_2$ (80:20) และ $SF_6 : N_2$ (60:40) พบว่าได้ผลการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	24.36	24.24	24.98	23.94	24.66	25.04	24.52
	2	40.06	41.12	40.54	40.67	41.08	41.24	40.86
4	1	43.72	43.86	42.98	43.56	42.74	44.06	43.19
	2	71.5	71.9	72.5	71.72	72.64	72.7	72.18
6	1	56.42	56.8	57.42	56.82	57.05	56.76	56.78
	2	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75
8	1	71.4	72.3	71.5	72.42	72.5	71.88	71.82
	2	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75

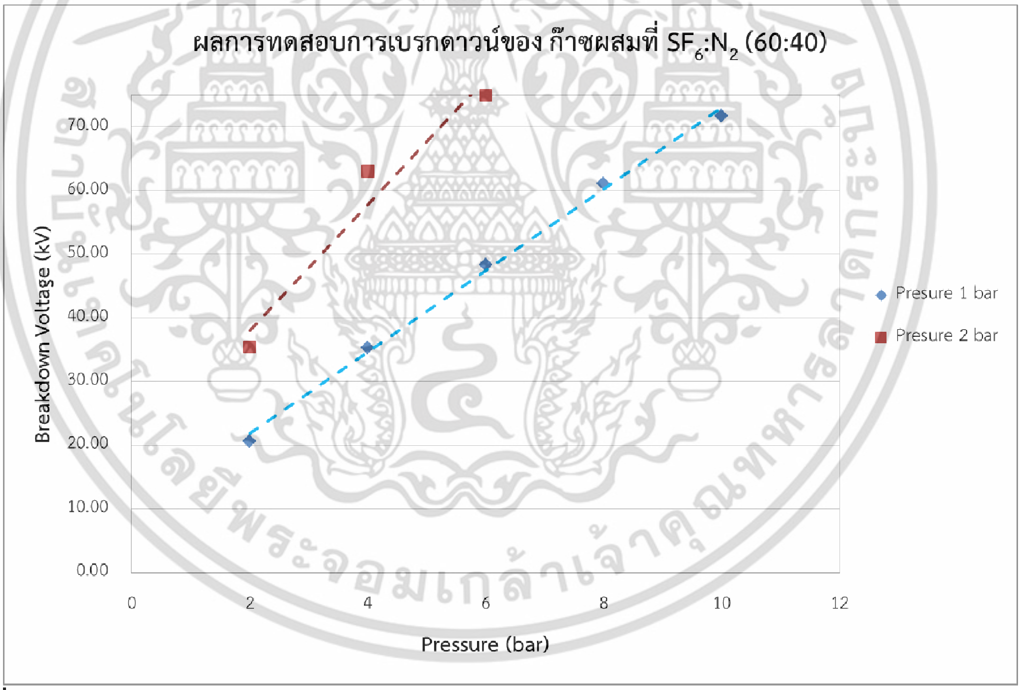


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซผสมในอัตราส่วน SF_6:N_2 (80:20) กับระยะแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	20.24	20.48	20.64	20.78	20.58	20.82	20.59
	2	34.25	35.98	37.02	36.74	34.56	33.96	35.42
4	1	34.86	35.64	33.87	36.24	35.48	35.96	35.34
	2	62.86	63.02	62.94	63.36	62.78	63.54	63.08
6	1	47.74	48.54	48.76	49.08	47.87	48.24	48.37
	2	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75
8	1	61.64	60.92	60.76	61.12	61.28	61.04	61.13
	2	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75
10	1	72.45	72.18	70.78	70.84	72.16	71.72	71.69
	2	>75	>75	>75	>75	>75	>75	>75



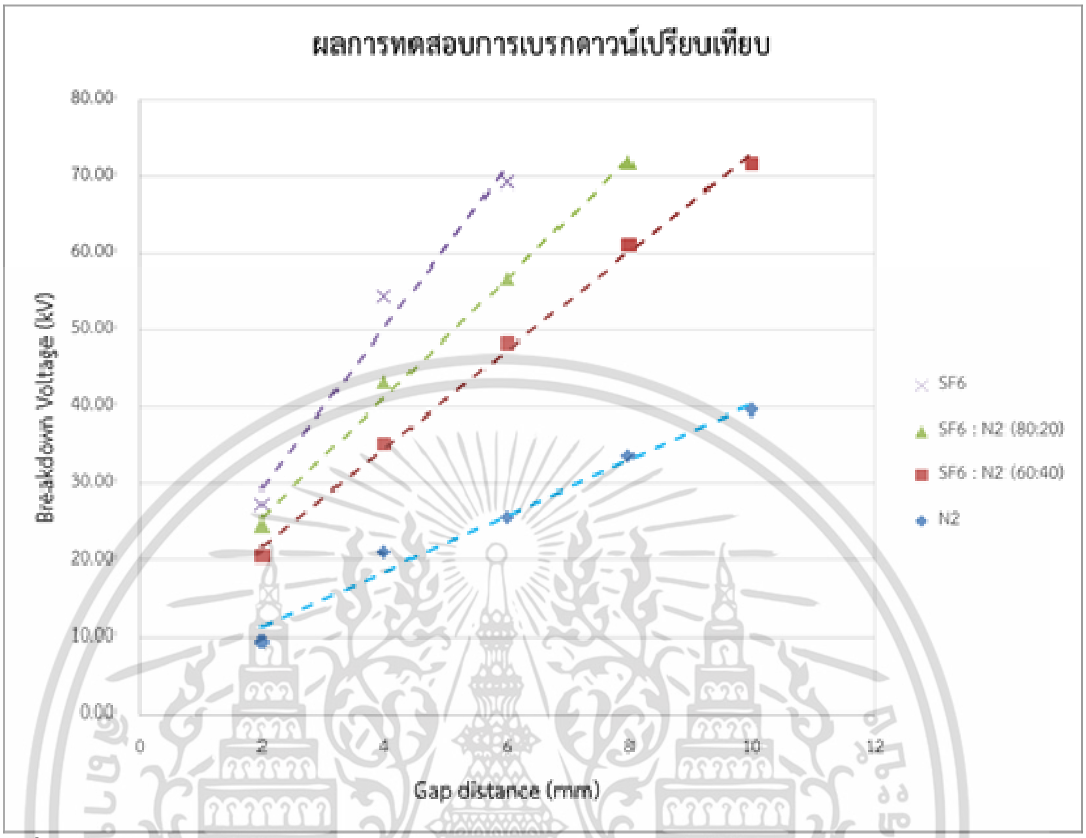
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซผสมในอัตราส่วน SF_6:N_2 (60:40) กับระยะแกป

4.3 การเปรียบเทียบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ

จากการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ เมื่อนำผลการทดสอบการคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของ N_2, SF_6 ก๊าซผสมในอัตาราส่วน SF_6 : N_2 (80:20) และ SF_6 : N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(60:40) มาทำการเปรียบเทียบที่ความดันก๊าซ 1 บาร์ โดยมีการปรับระยะแก็ป ระหว่าง 2 มิลลิเมตร ถึง 10 มิลลิเมตร ได้ผลการทดสอบเปรียบเทียบดังนี้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของก๊าซ N2, SF6 ก๊าซผสม ในอัตราส่วน SF6 : N2 (80:20) และ SF6 : N2 (60:40)

4.4 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปน

การใช้ฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอาจมีการเจือปนของอนุภาคซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผลิต หรือการใช้งานของการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นการศึกษาการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปนจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ โดยใช้อนุภาคโลหะและอนุภาคฉนวนขนาดต่างๆ เข้าไปเจือปนกับอากาศ เพื่อศึกษาว่าชนิดของอนุภาค ขนาดของอนุภาค และจำนวนของอนุภาค จะส่งผลต่อคุณสมบัติของฉนวนก๊าซอย่างไร

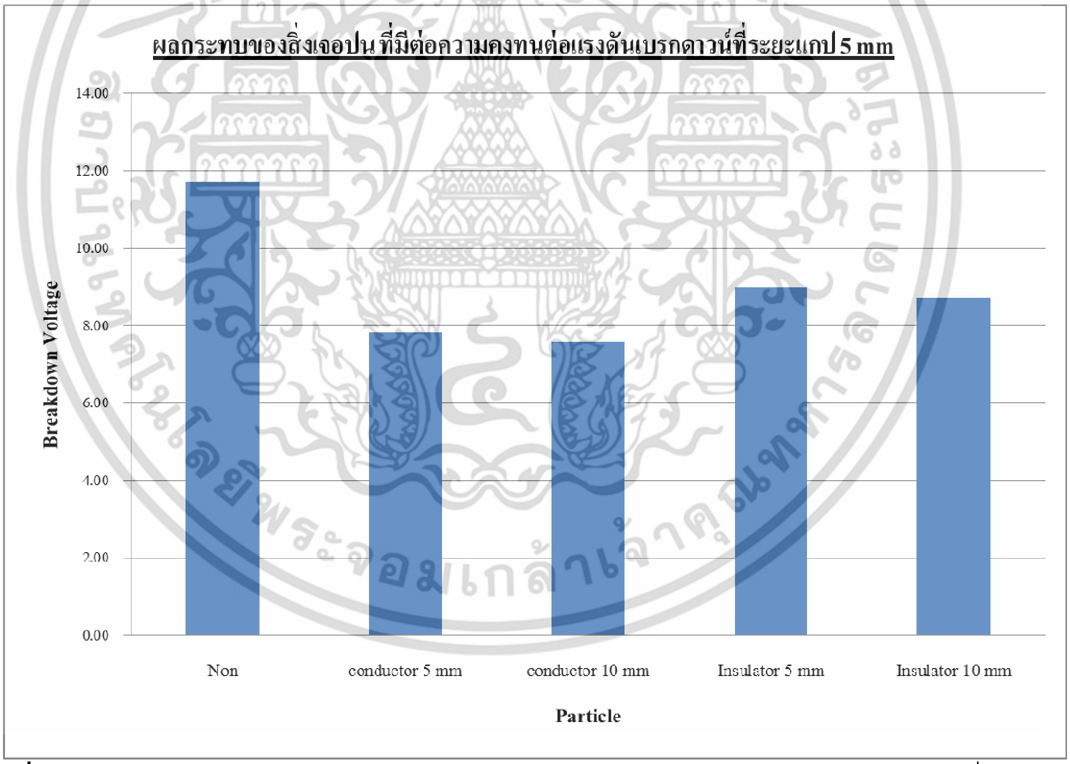
4.4.1 ผลการทดสอบ

จากการศึกษาในกรณีที่มีการเจือปนของอนุภาคชนิดโลหะและฉนวนที่ขนาดต่างกัน และปริมาณต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 5 และ 10 มิลลิเมตรพบว่ามีผลการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

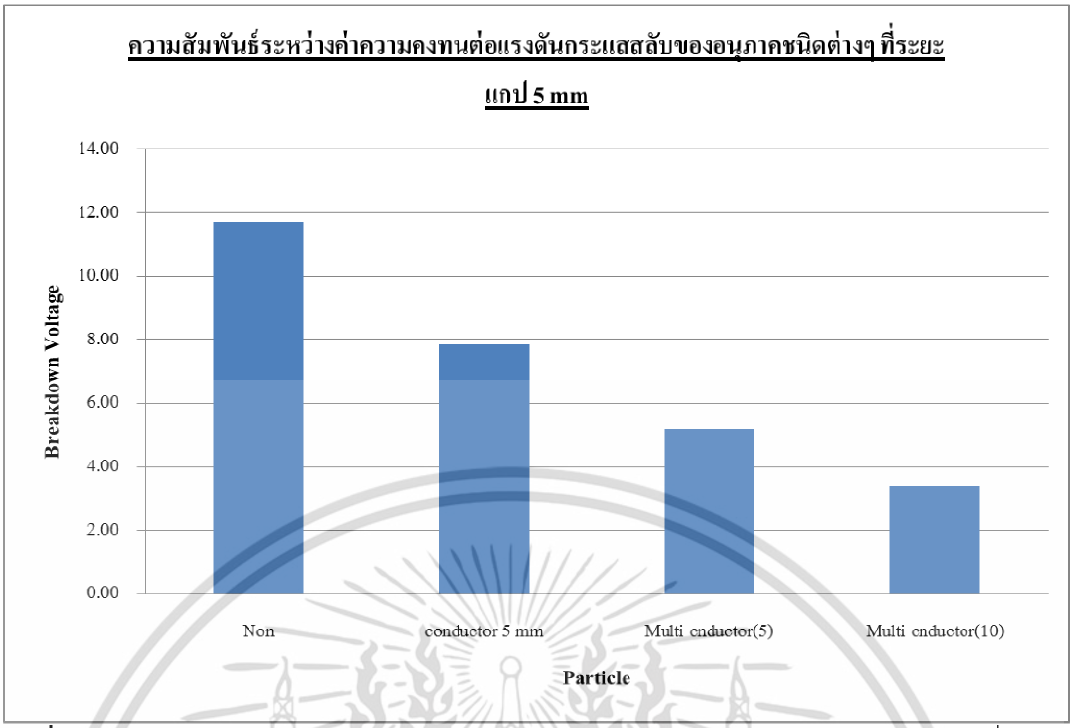
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคโลหะและฉนวนที่ขนาดต่างกัน และปริมาณต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 5 มิลลิเมตร

Gap distance (mm)	Particle	Breakdown Voltage(kV)						
		1	2	3	4	5	6	Averager
5	Non	11.85	11.61	11.48	11.42	12.07	11.76	11.70
	conductor 5 mm	7.68	8.28	8.31	7.96	7.52	7.24	7.83
	conductor 10 mm	7.28	7.45	7.56	7.86	7.36	7.85	7.56
	Insulator 5 mm	8.95	9.36	8.76	8.84	9.12	8.88	8.99
	Insulator 10 mm	9.87	8.85	8.24	8.73	8.86	7.76	8.72
	Multi cnductor(5)	5.24	5.18	5.16	5.08	5.12	5.28	5.18
	Multi cnductor(10)	3.54	3.74	3.28	3.45	3.12	3.36	3.42



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับอนุภาคที่โลหะและฉนวนที่ขนาดต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

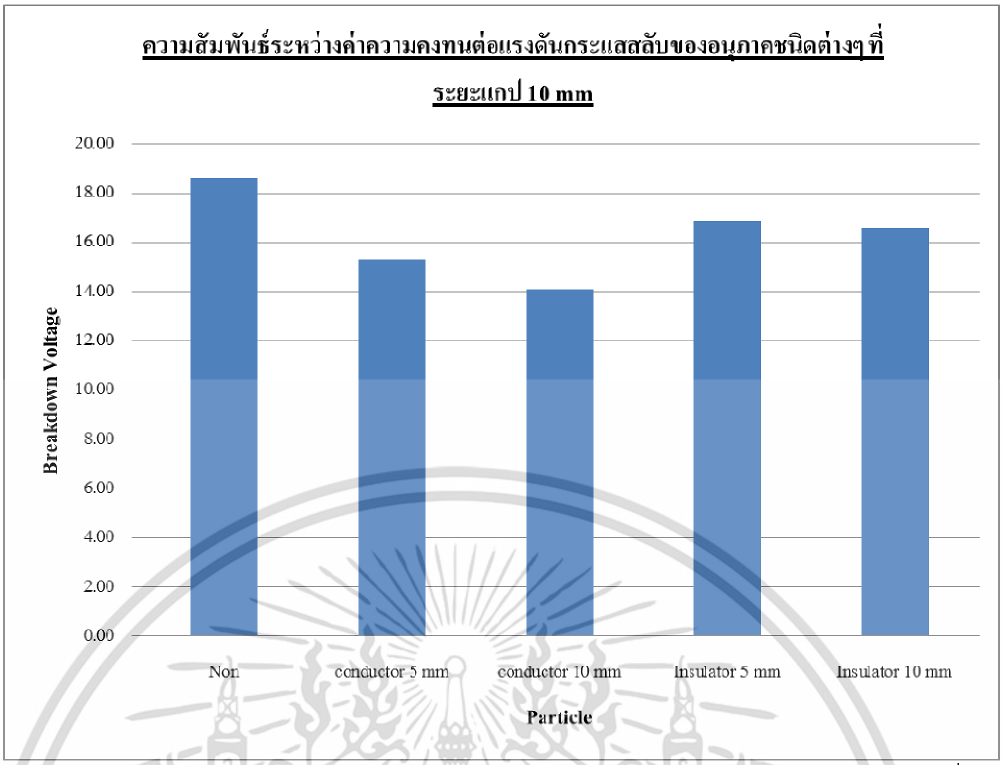


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับอนุภาคที่โลหะที่มีปริมาณปริมาณต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 5 มิลลิเมตร

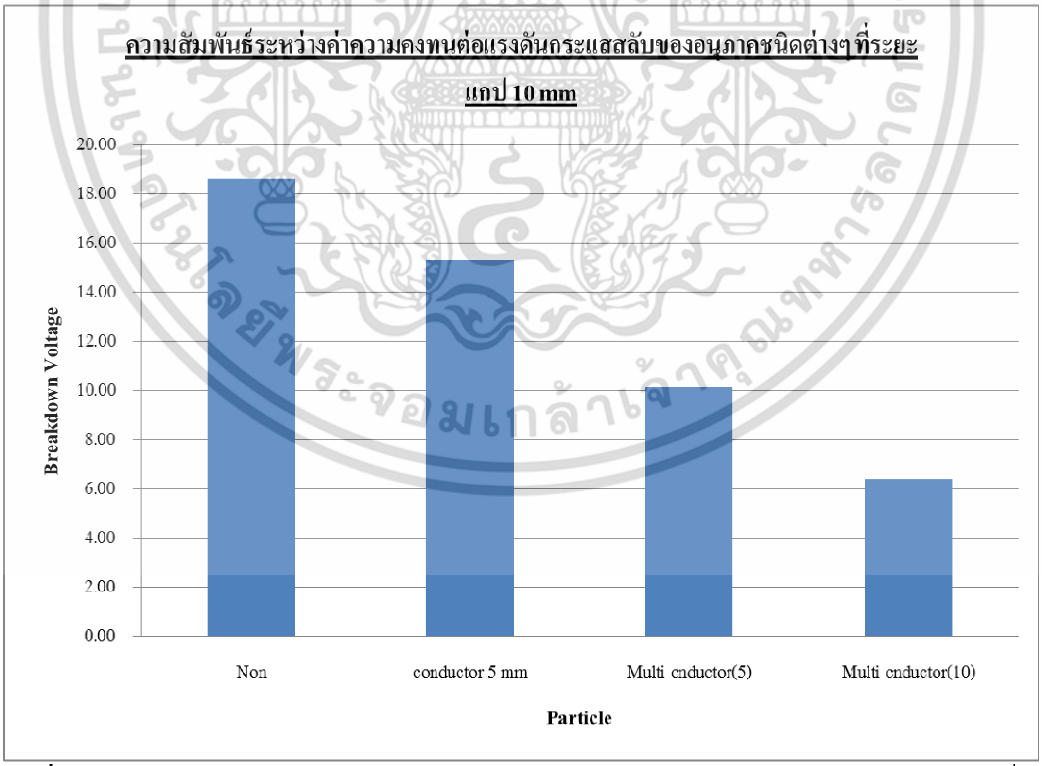
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคโลหะและฉนวนที่ขนาดต่างกัน และปริมาณต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้าและกราวด์ 10 มิลลิเมตร

Gap distance (mm)	Particle	Breakdown Voltage(kV)						
		1	2	3	4	5	6	Averager
10	Non	18.45	18.72	18.65	18.78	18.30	18.85	18.63
	conductor 5 mm	15.56	14.98	15.62	15.74	14.67	15.35	15.32
	conductor 10 mm	14.05	13.96	13.55	13.84	14.32	14.78	14.08
	Insulator 5 mm	16.74	17.24	16.54	16.67	16.94	17.05	16.86
	Insulator 10 mm	16.32	16.48	16.84	16.65	17.04	16.28	16.60
	Multi cnductor(5)	10.18	10.05	10.21	10.28	10.02	10.12	10.14
	Multi cnductor(10)	7.05	6.81	5.76	6.82	5.87	6.05	6.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับอนุภาคที่โลหะและฉนวนที่ขนาดต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศกับอนุภาคที่โลหะที่มีปริมาณปริมาณต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชุดจ่ายไฟฟ้า และกราวด์ 10 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซชนิดต่างๆ ในสนามไฟฟ้าไม่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. จากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศ ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่าอากาศที่ความดันมากขึ้นทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สูงขึ้น เช่น ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 10 มิลลิเมตร ความดันอากาศ 0.5 bar มีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับเฉลี่ยที่ 28.96 kV และอากาศที่ความดัน 1.0 bar มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ 58.52 kV

2. จากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ N_2 ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่าอากาศที่ความดันมากขึ้นทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สูงขึ้น เช่น ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 10 มิลลิเมตร ความดันอากาศ 0.5 bar มีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับเฉลี่ยที่ 31.14 kV และอากาศที่ความดัน 1.0 bar มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ 56.01 kV

3. จากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่าอากาศที่ความดันมากขึ้นทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สูงขึ้น เช่น ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 2 มิลลิเมตร ความดันอากาศ 0.5 bar มีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับเฉลี่ยที่ 20.82 kV และอากาศที่ความดัน 1.0 bar มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ 48.58 kV

4. จากการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ N_2, SF_6 และก๊าซผสม ระหว่าง SF_6:N_2 ที่อัตราส่วน 80:20 และอัตราส่วน 60:40 พบว่าสามารถเรียงลำดับความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ ได้ดังนี้ SF_6> SF_6:N_2(80:20) > SF_6:N_2(60:40)> N_2 โดยที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 6 มิลลิเมตร ความดันอากาศ 1 bar พบว่าค่าคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยของ SF_6, SF_6:N_2(80:20), SF_6:N_2(60:40) และ N_2 มีค่าดังนี้ 69.32 kV, 56.78 kV, 48.37 kV และ25.70 kV ตามลำดับ ซึ่งหากคิดเป็นอัตราส่วน โดยให้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยของ SF_6 มีค่าเท่ากับ 1 จะประมาณการความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ในหน่วยจำนวนเท่าของ SF_6 คือ 1, 0.82, 0.70 และ0.37 ตามลำดับ

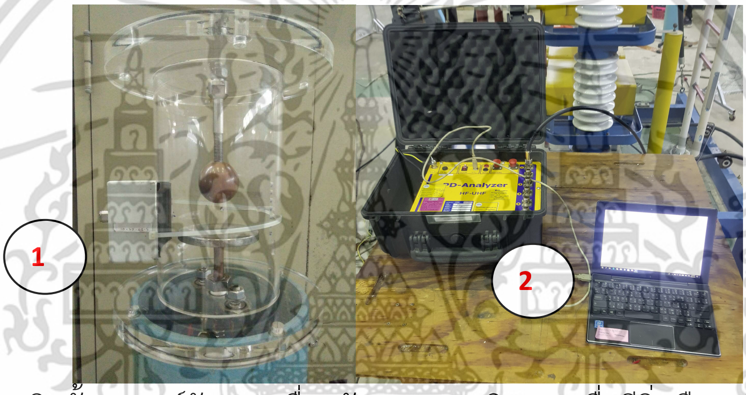
5. จากการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปน พบว่าอากาศที่มีการเจือปนของอนุภาคโลหะจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของอากาศน้อยกว่าอากาศที่มีอนุภาคฉนวน ที่ความดัน ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดและขนาดของอนุภาคที่เจือปนเท่ากัน

6. จากการทดสอบวัดวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซเมื่อมีการเจือปนของอนุภาคโลหะ ในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่า หากมีการเจือปนของอนุภาคโลหะที่มากขึ้นจะทำให้ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ลดลง ความดัน ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดและขนาดของอนุภาคที่เจือปนเท่ากัน โดยงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจกับผลของแรงดันเบรกดาวน์ เนื่องจากปริมาณของอนุภาคโลหะ เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้จริงกรณีที่มีการใช้งานอุปกรณ์ตัดต่อวงจรของ GIS ซึ่งอาจจะมีการหลอมหรือหลุดของอนุภาคโลหะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบลักษณะการเกิดการ Partial Discharge(PD) เมื่อมีสิ่งเจือปน ใน Test Cell

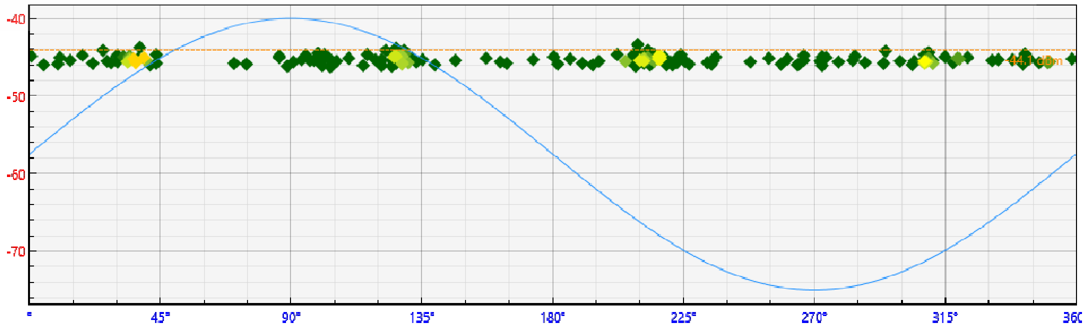
เนื่องจากการใช้งาน GIS ในการใช้งานต้องมีการสับเข้า และปลดออกในส่วนของอุปกรณ์เบรกเกอร์ หรืออุปกรณ์ตัดต่อภายใน GIS ทำให้อาจจะมีการเกิดคราบเขม่า หรือสิ่งเจือปนจากการดับอาร์ก (Arc) ทางไฟฟ้า จึงจำลองการทดสอบเมื่อมีสิ่งเจือปนชนิดตัวนำเข้าไปอยู่ใน Test Cell ที่ตำแหน่งต่างๆ และทดสอบดูลักษณะการเกิด Partial Discharge โดยใช้เครื่องมือวัด Partial Discharge ของ PD Analyzer HF/UHF ของ DIMRUS ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท พีดี โซลูชั่นส์ จำกัด โดยลักษณะข้อมูลที่วัดจะเป็นหน่วย เดซิเบล(dB) ซึ่งจากให้ข้อมูลขอรูปแบบการเกิด PD และความรุนแรงในการเกิด โดยลักษณะการต่อวงจรทดสอบจะต่อเหมือนรูปที่ 4.4 แต่มีการติดตั้งอุปกรณ์เซอร์ UHF เพื่อจับสัญญาณการเกิด PD ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การติดตั้งอุปกรณ์วัด PD เพื่อดูลักษณะการเกิด PD เมื่อมีสิ่งเจือปนใน Test Cell โดยที่ 1. UHF เซนเซอร์ 2.ชุดทดสอบ PD Analyzer HF/UHF ของ DIMRUS

4.5.1 การทดสอบการเกิด PD ขณะที่ยังไม่ได้ใส่สิ่งเจือปน

เพื่อตรวจสอบสมมุติฐานในการทดสอบ และทราบถึงค่าเริ่มต้นของอุปกรณ์ก่อนมีสิ่งเจือปนใน Test Cell โดยกำหนดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทรงกลมที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า และแผ่นอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมที่ต่อกับกราวนด์ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ขึ้นแรงดันไฟฟ้าจนถึงค่าประมาณ 15 kV ได้ผลจากการตรวจวัด PD ดังนี้



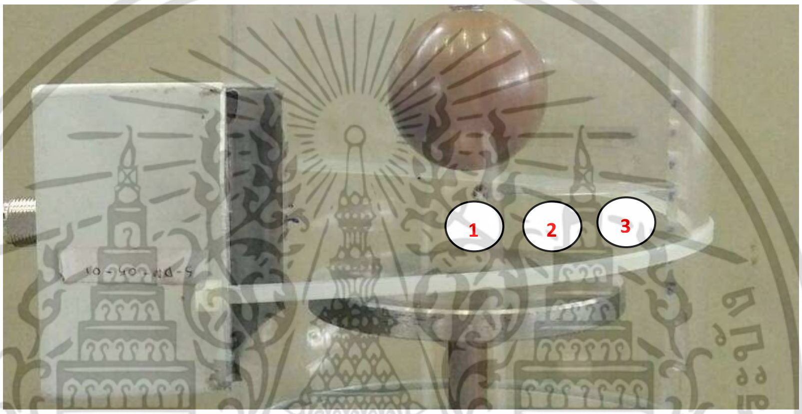
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นการวัด PD ของ Test Cell ที่ไม่ได้ใส่สิ่งเจือปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบการวัด PD ของ Test Cell ที่ไม่ได้ใส่สิ่งเจอปนที่แรงดัน 15 kV ไม่พบรูปแบบการเกิด PD พบพียง Background Noise อยู่ที่ระดับ -44 dBm เท่านั้น

4.5.2 การทดสอบการเกิด PD ใส่สิ่งเจือปนชนิดโลหะ ที่ตำแหน่งที่ 1

การทดสอบการเกิด PD ใส่สิ่งเจือปนชนิดโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของอิเลกโทรดทรงกลม และแผ่นอิเลกโทรดอะลูมิเนียม ที่ระยะห่าง 2 เซนติเมตร จากแผ่นอะลูมิเนียมที่ต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 4.14(1) ซึ่งจะทดสอบโดยจากจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยขึ้นแรงดันไฟฟ้าที่ประมาณ 15 kV เหมือนข้อ 4.6.1 โดยได้ผลจากการตรวจวัดค่า PD ดังนี้

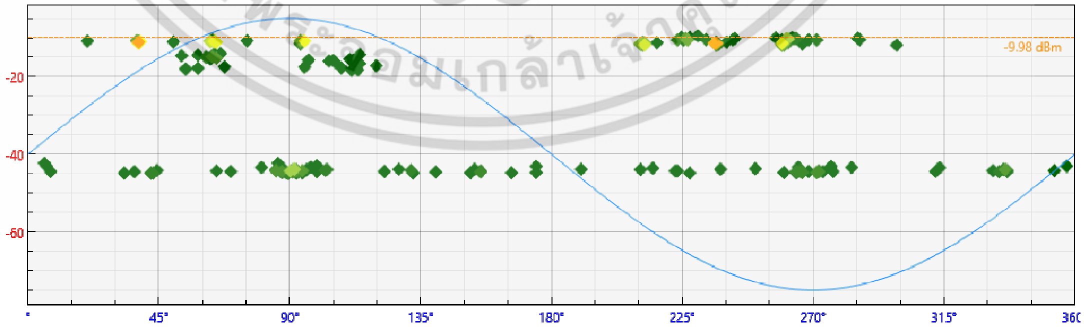


รูปที่ 4.14 ลักษณะการใส่สิ่งเจือปนใน Test Cell

(1). ตำแหน่งการวางสิ่งเจือปนของข้อ 4.6.2

(2). ตำแหน่งการวางสิ่งเจือปนของข้อ 4.6.3

(3). ตำแหน่งการวางสิ่งเจือปนของข้อ 4.6.4



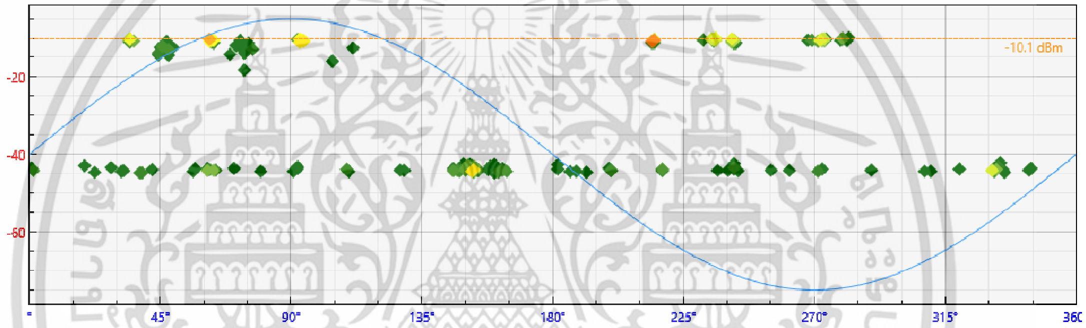
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นการวัด PD ของ Test Cell เมื่อใส่สิ่งเจือปน ดังรูป 4.19(1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบการวัด PD ของ Test Cell ที่ใส่สิ่งเจอปน โดยทำการทดสอบการขึ้นแรงดันไฟฟ้าจนถึงประมาณ 15 kV พบรูปแบบการเกิด PD เป็นชนิด Floating Pattern ที่ระดับ -9.98 dBm และพบ Background Noise ลักษณะเดียวกันกับขณะไม่ได้มีการใส่สิ่งเจือปน

4.5.3 การทดสอบการเกิด PD ใส่สิ่งเจือปนชนิดโลหะที่ตำแหน่งที่ 2

การทดสอบการเกิด PD ใส่สิ่งเจือปนชนิดโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งห่างจากจุดระหว่างกึ่งกลางของอิเลกโทรดทรงกลม และแผ่นอิเลกโทรดอะลูมิเนียม 2 เซนติเมตร(ในแนวแกน X) และแผ่นอิเลกโทรดอะลูมะเนียม ที่ระยะห่าง 2 เซนติเมตร จากแผ่นอะลูมิเนียมที่ต่อลงกราวด์(ในแนวแกน Y) ดังรูป 4.14(2) ซึ่งจะทดสอบโดยจากจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยขึ้นแรงดันไฟฟ้าที่ประมาณ 15 kV เหมือนข้อ 4.6.1 และ 4.6.2 โดยได้ผลจากการตรวจวัดค่า PD ดังนี้



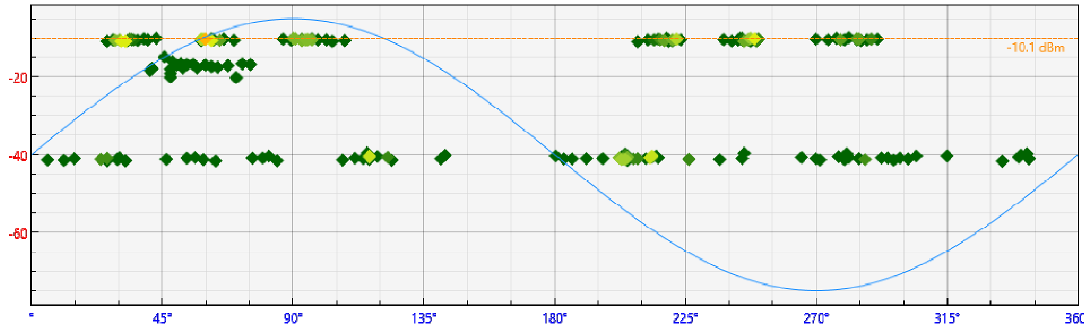
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นการวัด PD ของ Test Cell เมื่อใส่สิ่งเจือปน ดังรูป 4.19(2)

จากการทดสอบการวัด PD ของ Test Cell ที่ใส่สิ่งเจอปน โดยทำการทดสอบการขึ้นแรงดันไฟฟ้าจนถึงประมาณ 15 kV พบรูปแบบการเกิด PD เป็นชนิด Floating Pattern ที่ระดับ -10.1 dBm และพบ Background Noise ลักษณะเดียวกันกับขณะไม่ได้มีการใส่สิ่งเจือปน

4.5.4 การทดสอบการเกิด PD ใส่สิ่งเจือปนชนิดโลหะที่ตำแหน่งที่ 3

การทดสอบการเกิด PD ใส่สิ่งเจือปนชนิดโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งห่างจากจุดระหว่างกึ่งกลางของอิเลกโทรดทรงกลม และแผ่นอิเลกโทรดอะลูมิเนียม 5 เซนติเมตร(ในแนวแกน X) และแผ่นอิเลกโทรดอะลูมะเนียม ที่ระยะห่าง 2 เซนติเมตร จากแผ่นอะลูมิเนียมที่ต่อลงกราวด์(ในแนวแกน Y) ดังรูป 4.14(3) ซึ่งจะทดสอบโดยจากจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยขึ้นแรงดันไฟฟ้าที่ประมาณ 15 kV เหมือนข้อ 4.6.1, 4.6.2 และ 4.6.3 โดยได้ผลจากการตรวจวัดค่า PD ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 รูปคลื่นการวัด PD ของ Test Cell เมื่อใส่สิ่งเจือปน ดังรูป 4.19(3)

จากการทดสอบการวัด PD ของ Test Cell ที่ใส่สิ่งเจอปน โดยทำการทดสอบการขึ้นแรงดันไฟฟ้าจนถึงประมาณ 15 kV พบรูปแบบการเกิด PD เป็นชนิด Floating Pattern ที่ระดับ -10.1 dBm และพบ Background Noise ลักษณะเดียวกันกับขณะไม่ได้มีการใส่สิ่งเจือปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 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 สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้สูงสุด ส่วนความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของ N_2 และอากาศ มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ที่ความดันและระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากันอาจจะเพราะในอากาศมี N_2 เป็นส่วนประกอบประมาณ 78% นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความดันของฉนวนก๊าซและระยะแกปของอิเล็กโตรด ยังเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

3. จากการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนก๊าซ N_2, SF_6 และก๊าซผสมระหว่าง SF_6:N_2 ที่อัตราส่วน 80:20 และอัตราส่วน 60:40 พบว่า จะเห็นได้ว่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของก๊าซก๊าซผสม ระหว่าง SF_6:N_2 ที่อัตราส่วน 80:20 ที่ความดันอากาศ 1 บาร์และระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 6 มิลลิเมตร มีค่าประมาณ 0.82 เท่าของก๊าซ SF_6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า สามรถนำก๊าซ N_2 มาผสมกับ SF_6 อาจจะทำให้ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนลดลงไปบ้างนั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ถ้าหากสามารถขยายขนาดพื้นที่ในการสร้างสถานีไฟฟ้าลักษณะ GIS เพิ่มขึ้น หรือตัว GIS สามารถทนแรงดันก๊าซได้สูงขึ้น ซึ่งจะมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

4. จากการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนอากาศเมื่อมีอนุภาคเข้าไปเจือปน พบว่าเมื่อฉนวนอากศมีอนุภาคเข้าไปเจือปน ฉนวนอากาศจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะลดลง และถ้าฉนวนอากาศมีอนุภาคที่เป็นโลหะเจือปนจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์น้อยกว่าฉนวนก๊าซมีอนุภาคที่เป็นฉนวนเจือปน และกรณีที่อนุภาคที่เจือปนมีขนาดใหญ่จะทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซลดลงมากกว่าอนุภาคที่เจือปนที่มีขนาดเล็ก อีกทั้งเมื่อจำนวนสิ่งเจือปนโลหะมีจำนวนเพิ่มขึ้น ยิ่งทำให้ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศต่ำลดลง

5. จากการทดสอบการตรวจจับ Partial Discharge(PD) ของสิ่งเจือปนชนิดโลหะ โดยใช้ Ultra High Frequency(UHF) Sensor ที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน X พบว่าทุกตำแหน่งในการวางสิ่งเจือปนส่งผลต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD ที่ใกล้เคียงกัน สามารถสรุปได้ว่า กรณีที่เกิดการ Arc หรือมีสิ่งเจือปนใน GIS สามารถตรวจสอบการเกิด PD ได้ โดยใช้ UHF Sensor ทุกตำแหน่งในแนวแกน X หรือแนวระนาบเดียวกันกับ UHF Sensor

5.2 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

6. ในการทดสอบวัด PD ใน GIS จริง การติดตั้งตำแหน่ง UHF Sensor น่าจะเป็นสิ่งสำคัญ เพราะในกรณีที่อุปกรณ์ที่ต้องการตรวจวัดใหญ่ขึ้น การติดตั้ง UHF Sensor ในการตรวจจับสิ่งเจือปนให้ครอบคลุม ถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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.

[13] Ari Sihvola: “Mixing Rules with Complex Dielectric Coefficients”. Subsurface Sensing Technology and Applications Vol.1, No.4, 2000

[14] https://www.engineeringtoolbox.com/relative-permittivity-d_1660.html

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาตุรนต์ สินธุคุณากร และนรเศรษฐ พัฒนเดช, "ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซผสมระหว่างก๊าซ SF_6 และก๊าซ N_2" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐, วันที่ ๑๕-๑๗ พฤศจิกายน ๒๕๖๐, โรงแรมเดอะเดอะซายน์, จังหวัดชลบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMUTNB

EECON XL

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐

The 40th Electrical Engineering Conference (EECON - 40)

Featuring

SSCS IEEE SOLID-STATE CIRCUITS SOCIETY
Where ICs are in IEEE

IEEE
KMUTNB Student Branch

with Special Thanks to

SIEMENS
Ingenuity for life

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY

Volume I

PW, GN, PE

วันที่ ๑๕ - ๑๗ พฤศจิกายน พ.ศ.๒๕๖๐

สถานที่ โรงแรมเดอะซายน์ (The Zign Hotel) อ.บางละมุง จ.ชลบุรี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐ (EECON-40)
วันที่ ๑๕ - ๑๗ พฤศจิกายน ๒๕๖๐

ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซผสมระหว่างก๊าซ SF_6 และก๊าซ N_2

Breakdown Voltage of SF_6 Mixed with N_2

จาตุรนต์ สินธุคุณากร[1] และ นรเศรษฐ พัฒนเดช[1]

[1]ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Jaturon.s@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบความคงทนแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซได้แก่ อากาศ การผสมก๊าซระหว่างก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์(SF_6) และ ก๊าซไนโตรเจน(N_2) และก๊าซผสมระหว่าง SF_6 กับ N_2 โดยทำการควบคุม ความดันก๊าซ และระยะช่องว่างอิเล็กโตรดทรงกลม และระนาบ ในช่วงระยะ 2 – 10 มิลลิเมตร ความดันของก๊าซ 0.5 – 2 บาร์ จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซเดี่ยวขึ้นอยู่กับ **ความดันของก๊าซ** และระยะช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด ในกรณีของก๊าซผสมอัตราส่วนของก๊าซผสมเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ เมื่อมีการผสมก๊าซ SF_6 และ ก๊าซ N_2 ในอัตราส่วน 80:20 ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซผสมจะมีค่า 82% ของก๊าซ SF_6 นอกจากนี้แล้ว ผลของอนุภาคเจือปนในก๊าซ ทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซลดลงอย่างเห็นได้ชัด

คำสำคัญ: เบรกดาวน์ ฉนวนก๊าซ ก๊าซผสม

Abstract

This article presents the breakdown voltage characteristic of gas insulation i.e., dry air, Sulfur Hexafluoride (SF_6) and Nitrogen (N_2) including the mixture gas of SF_6 and N_2. In the experiment, gas pressure of 0.5 -2 bar and the gap distance between the spherical- plane electrodes in the range of 2 - 10 mm gas were controlled. The test result showed that the breakdown voltage of the gas dielectric depended on the gas pressure and the gap distance between the electrodes. In the case of mixture gases, the ratio of gas volume was one of important factors influenced on the breakdown voltage characteristic. From the experiments, SF_6 and N_2 mixed with the ratio of 80:20 provided the breakdown strength 82% of the pure SF6. Moreover, particles in the experimented gases reduced significantly the breakdown voltage strength.

Keywords: Breakdown, Gas insulator, Gas mix

1. บทนำ

การฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นเรื่องที่สำคัญมาก เพราะหากการฉนวนไม่ดีจะทำให้การส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงมีประสิทธิภาพลดลง เป็นที่ทราบกันดีว่าฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังมี 3 ประเภทหลักด้วยกัน ได้แก่ฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว และก๊าซ ซึ่งมีข้อดี-ข้อเสียแตกต่างกันไป งานวิจัยชิ้นนี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวน์ภายใต้แรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซชนิดต่างๆ ได้แก่ อากาศ ก๊าซไนโตรเจน(N_2) ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์(SF_6) และก๊าซผสม ระหว่าง SF_6 และ N_2 ทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบ โดยมีวัตถุประสงค์เบื้องต้นเพื่อหาฉนวนก๊าซที่จะสามารถทดแทนก๊าซ SF_6 ได้ในอนาคต เนื่องจากปัญหาการปลดปล่อย SF_6 เข้าสู่บรรยากาศ ซึ่งจะเป็นก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญกับสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน[1,2]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เบรกดาวน์ในก๊าซ SF_6

ก๊าซ SF_6 มีคุณสมบัติเป็นก๊าซไฟฟ้าลบ ซึ่งหมายถึง ก๊าซชนิดที่โมเลกุลมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนอิสระ และทำให้กลายเป็นไอออนลบ ซึ่งมีคุณสมบัติมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง[3]

2.2 เงื่อนการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซไฟฟ้าลบ[3,4]

ก๊าซอาจเกิดไอออนลบขึ้นได้โดยอิเล็กตรอนที่แยกตัวเป็นอิสระจากโมเลกุลด้วยการไอออไนเซชัน และมีพลังงานที่พอเหมาะไปเกาะติดอยู่กับโมเลกุลเป็นกลางของก๊าซจะทำให้โมเลกุลดังกล่าว กลายเป็นอนุภาคที่มีประจุลบในรูปแบบต่างกัน ก๊าซที่มีคุณสมบัติที่โมเลกุลจับอิเล็กตรอนได้เรียกว่า ก๊าซไฟฟ้าลบ(Electronegative gas)

จากคุณสมบัติของโมเลกุลของก๊าซประเภทนี้สามารถจับอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากไอออไนเซชันได้ จึงเท่ากับเป็นการระงับการเกิดเบรกดาวน์ไม่ให้เกิดขึ้น หากจะทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ก็ต้องมีสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติเพื่อที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่เกาะอยู่นั้นให้หลุดออกมาสร้างอะวาลานช์ไปตามกระบวนการเกิดเบรกดาวน์ นั่นคือ ก๊าซไฟฟ้าลบจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซธรรมชาติที่โมเลกุลไม่สามารถจับอิเล็กตรอนได้ ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงจึงนำคุณสมบัติของก๊าซไอออนลบนี้ไปใช้ประโยชน์ในการฉนวนอุปกรณ์และระบบต่างๆ ซึ่งในปัจจุบันก๊าซไฟฟ้าลบที่นิยมใช้ในอุปกรณ์และระบบไฟฟ้าแรงสูง คือ ก๊าซ SF_6 เพราะมีคุณสมบัติฉนวนที่ดี มีแรงดันเบรกดาวน์สูง และสามารถลดระยะปลอดภัยในระบบการฉนวนได้ ทำให้ประหยัดพื้นที่ใช้สอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซไฟฟ้าลบ อาศัยทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์ในการอธิบายได้ จากสมการของกระแสในแก็ปที่เกิดจากการไอออไนเซชันคือ

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

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาวน์เซนด์

γ คือ สัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโทดโดยการชนของไอออนบวก

I_0 คือกระแสไฟฟ้าที่ออกจากขั้วลบของ Electrode บางทีเราก็เรียกว่าเป็นกระแส Photo electric

η คือ สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนโมเลกุล

ค่าของ η / P จะอยู่ในฟังก์ชันของ E/P เช่นกัน เมื่อ P คือความดันก๊าซ เงื่อนไขการเกิดกระแสไหลประทังตัวอยู่ได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับกระแส I_0 เมื่อเทอมในส่วนของสมการ $dN_i = N\alpha dx$ เป็นศูนย์นั่นคือ

$$\gamma\frac{\alpha}{\alpha-\eta}\left[e^{(\alpha-\eta)d}-1\right]=1 \qquad (2)$$

โดยที่การเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นได้เมื่อ $\alpha \geq \eta$

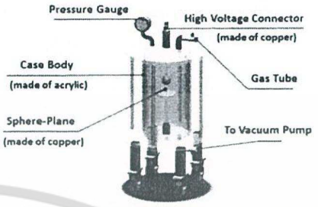
3. การออกแบบการทดลอง

3.1 การออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบ (Testing Chamber)

การออกแบบสร้างชุดทดสอบ เพื่อนำมาใช้ทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของ อากาศ, ก๊าซ SF_6, ก๊าซ N_2, ก๊าซผสมระหว่าง SF_6: N_2 โดยการใช้โปรแกรม Solid Works ในการ จำลองรูปแบบ 3 มิติ ขึ้นมา เพื่อนำไปประกอบสร้างชุดทดสอบจริง เพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติของฉนวนก๊าซภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย เพื่อให้ใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าภายในอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas Insulated Substation : GIS)

โดยรายละเอียดของชุดทดสอบ มีรายการดังนี้

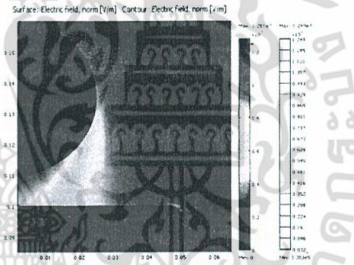
- **ที่บรรจุฉนวนก๊าซและอิเล็กโตรด** ทำจากวัสดุอะคริลิกใส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 15 ซม. หนา 5 มม. สูง 25 ซม. ด้านบนและล่างของกระบอกประกอบกับแผ่นอะคริลิกวงกลม เจาะรูสำหรับยึดโครงสร้างของชุดทดสอบและยึดกับแกนตัวนำที่ไว้สำหรับใส่อิเล็กโตรด และทำร่องสำหรับใส่ยางกันซึมในส่วนของรอยต่อ
- **อิเล็กโตรด** หัวอิเล็กโตรดใช้อิเล็กโตรดทรงกลมทำมาจากวัสดุทองแดง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm และอิเล็กโตรดระนาบทำจากสแตนเลส โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm และมีความหนา 1 cm
- **แกนตัวนำ** ทำจากทองแดงและสแตนเลสเป็นก้านยาว สำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและทำการเชื่อมต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวนด์
- **มาตรวัดความดัน** ใช้ในการวัดความดันของก๊าซที่อยู่ภายในชุดทดสอบ



รูปที่ 1 แบบจำลองชุดทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ SF_6, N_2 และอากาศ

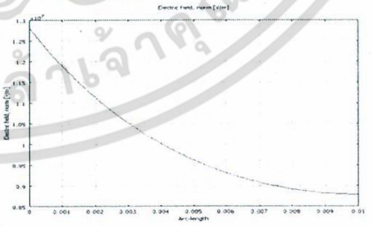
3.2 การวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้า

ในการจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics ซึ่งลองทำการป้อนแรงดันขนาด 100 V ไปที่อิเล็กโตรดทรงกลม และต่อกราวด์ทางด้านอิเล็กโตรดระนาบ ภายในฉนวนอากาศที่ความดัน 1 บาร์ ระยะแก็ป 1 ซม. พบว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด (Emax) ที่เกิดขึ้นทางด้านอิเล็กโตรดทรงกลม มีค่าเท่ากับ 1.28×10^7 V/m โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ

ฉนวนก๊าซที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ อากาศ, N_2 และ SF_6 ซึ่งสามารถใช้กับผลการจำลองนี้ได้ เนื่องจากฉนวนก๊าซทั้ง 3 ชนิดมีค่า permittivity เป็น 1 เหมือนกัน โดยที่ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอความดัน 1 บาร์ อากาศ, N_2 และ SF_6 สามารถทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ 30, 31 และ 89 kV/cm ตามลำดับ



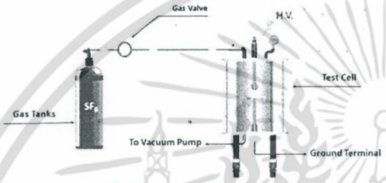
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดของชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ

3.3 การเตรียมฉนวนก๊าซสำหรับการทดสอบ

- อากาศ : อุณหภูมิ 30°C, ความดัน 762 mmHg, ความชื้นสัมพัทธ์ 74%
- ก๊าซ N_2 : ความบริสุทธิ์ 99.5%, ความดันบรรจุ 2000 psig ที่ 27 ± 2°C
- ก๊าซ SF_6 : ความบริสุทธิ์ 99.99%
- ในกรณีของก๊าซผสมจะทำการผสมก๊าซ SF_6 กับ N_2 ในอัตราส่วน 80% กับ 20% และ 60% กับ 40% เข้าไปในชุดทดสอบ

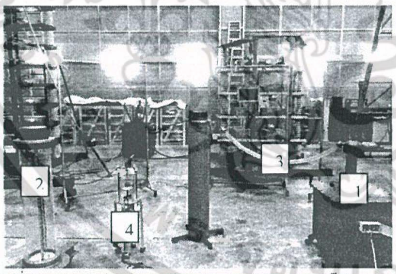
ตัวอย่างการเตรียมก๊าซ เพื่อใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ไดอะแกรมการสำหรับก๊าซทดสอบ

4. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ

เนื่องจาก GIS ใช้ก๊าซ SF_6 เป็นฉนวนดังนั้นความเข้าใจในทฤษฎีเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซมีความสำคัญในการใช้ซ่อมบำรุง GIS จึงได้ออกแบบชุดทดสอบเพื่อทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับในการทดสอบจะทำให้ศึกษาคุณสมบัติของฉนวนก๊าซภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยซึ่งจะทดสอบฉนวนก๊าซ 3 ชนิดได้แก่ อากาศ ก๊าซ N_2, SF_6 และก๊าซผสมระหว่าง ก๊าซ SF_6 กับ N_2 ในอัตราส่วน 80% กับ 20% และ 60% กับ 40% เข้าไปในชุดทดสอบ โดยต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซ
1.หม้อแปลงทดสอบ 2.โวลเตจดิไวเดอร์ 3.ตัวต้านทานน้ำ 4.ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันของฉนวนก๊าซ

5. ผลการทดสอบ

จากการทดสอบการเบรกดาวน์ของอากาศ, N_2 และ SF_6 ในชุดทดสอบ เมื่อมีการปรับความดันก๊าซ และระยะแก็ป มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ดังรูปที่ 6, 7 และ 8 ตามลำดับ

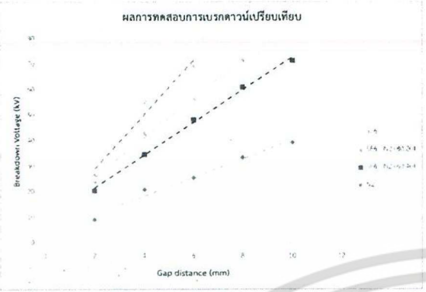
รูปที่ 6 แรงดันเบรกดาวน์ของอากาศเมื่อมีการปรับความดันก๊าซ และระยะแก็ป

รูปที่ 7 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ N_2 เมื่อมีการปรับความดันก๊าซ และระยะแก็ป

รูปที่ 8 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 เมื่อมีการปรับความดันก๊าซ และระยะแก็ป

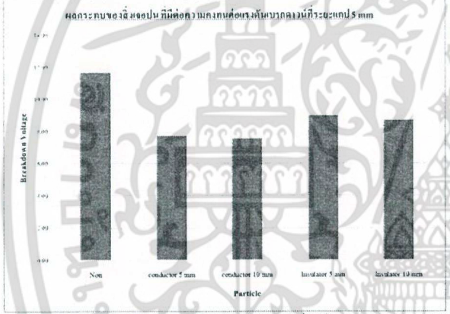
เมื่อลองทำการทดสอบเปรียบเทียบการเกิดเบรกดาวน์ระหว่างก๊าซ N_2, SF_6 และก๊าซผสมระหว่าง SF_6 และ N_2 ในอัตราส่วน 80:20 และ 60:40 พบว่าผลของแรงดันเบรกดาวน์เป็นดังรูปที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 ผลของการเกิดแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ N_2, SF_6 และก๊าซผสมระหว่าง SF_6 และ N_2 ในอัตราส่วน 80:20 และ 60:40

เมื่อทำการทดลองใส่สิ่งเจือปน ที่เป็นโลหะ และฉนวน ลงไปในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดทรงกลม และระนาบ ที่ระยะ 5 มม. แล้วทำการทดสอบการเบรกดาวน์ของอากาศ พบว่าสิ่งเจอปนที่เป็นโลหะ ส่งเป็นกระทบต่อค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์มากกว่าฉนนวน และสิ่งเจือปนที่ขนาดใหญ่กว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์มากกว่า อย่างเห็นได้ชัดเจนดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลกระทบต่อความคงทนของแรงดันเกบรกดาวน์ เมื่อมีสิ่งเจือปนชนิดโลหะและฉนวนขนาด 5 และ 10 มม

6. สรุป

จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ ระยะแก็ป และอัตราส่วนผสมของก๊าซ นอกจากนี้พบว่าขนาดของอนุภาคเจือปนมีอิทธิพลต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซเป็นอย่างมาก จะเห็นได้ว่า SF_6 จะมีค่าความเป็นฉนวนดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ N_2 และอากาศ แต่หากลองพิจารณาด้านราคา และการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว การใช้ก๊าซ N_2 มาผสม เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้ก๊าซ SF_6 นั้นเป็นทางเลือกที่ดีเลยทีเดียว เพราะก๊าซผสมสามารถทนแรงดันเบรกดาวน์ได้ค่อนข้างสูง

โดยที่ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซผสมระหว่าง SF_6 และ N_2 ที่อัตราส่วน 80:20 และ 60:40 จะมีค่าเป็น 0.82 และ 0.70 เท่า(อ้างอิงที่ระยะแก็ป 6 มม.)ของ SF_6 อย่างเดียว ซึ่งการทดลองก๊าซผสมระหว่าง SF_6 และ N_2 ในอัตราส่วน 80:20 ก็เป็นทางเลือกที่ดีอีกทางหนึ่ง โดยอาจจะมีการเพิ่มระยะปลอดภัยภายในตัวอุปกรณ์ให้มากขึ้น แต่การเลือกใช้ก๊าซผสมจะทำให้สามารถลดปริมาณการใช้ SF_6 ได้พอสมควรเลยทีเดียว

เมื่อทดลองใส่สิ่งเจือปนที่เป็นโลหะ และฉนวน พบว่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด หากลองเปรียบเทียบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศขณะไม่มีสิ่งเจือปนจะมีค่าประมาณ 11.68 kV เมื่อมีอนุภาคโลหะขนาดประมาณ 1 ซม จะทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ลดลงเหลือประมาณ 7.56 kV ซึ่งเป็นค่อนข้างมากเลยทีเดียว

เอกสารอ้างอิง

[1] I. Sauers, H. W. Ellis and L. G. Christophorou, "NEUTRAL DECOMPOSITION PRODUCTS IN SPARK BREAKDOWN OF SF_6" , IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No.2, April 1986, pp.113-119.

[2] F. Y. Chu, "SF_6 DECOMPOSITION IN GAS-INSULATED EQUIPMENT" , IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No.5, October 1986, pp.711-715.

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

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

แสกนรูปถ่าย
ขนาด
2 cm x 2 cm

จาตุรนต์ สินธุคุณากร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

แสกนรูปถ่าย
ขนาด
2 cm x 2 cm

นรเศรษฐ พัฒนเดช ดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ เป็นอาจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตารางแสดงค่า permittivity

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างตารางแสดงค่า Permittivity[14]

Material	Relative Permittivity - εr -	Material	Relative Permittivity - εr -	Material	Relative Permittivity - εr -
Acetaldehyde (41° F)	21.8	Ammonia (-30° F)	22	Formamide (20°C)	84
Acetic Acid (68° F)	6.2	Ammonia (40° F)	18.9	Furfural	42
Acetic Acid (36° F)	4.1	Ammonia (69° F)	16.5	Glycerin, Liquid	47-68
Acetone (77° F)	20.7	Aniline (32° F)	7.8	Glycerol (77° F)	42.5
Acetone (127° F)	17.7	Aniline (68° F)	7.3	Hydrofluoric acid (0°C)	83.6
Acetone (32° F)	1.0159	Aniline (212° F)	5.5	Hydrogen peroxide (25°C)	60
Acetyl Acetone (68° F)	23.1	Argon (68° F)	1.000513	Isoprene (77° F)	2.1
Acetyl Bromide (68° F)	16.5	Carbon dioxide (68° F)	1.000921	Insulation of high voltage cables	4.2
Acetyl Chloride (68° F)	15.8	Carbon disulfide	2.6	Marble	8
Acetyle Acetone (68° F)	25	Casting compound	2.5	Methanol (20°C))	33.6
Acetylene (32° F)	1.0217	Caster oil	4.7	Mineral Oil (80° F)	2.1
Air (Dry) (68° F)	1.000536	Chlorine (32° F)	2	Neoprene	6.7
Air, Liquid (-191°C)	1.4	Chloroform (68° F)	4.8	Nitrogen (68° F)	1.00058
Alcohol, Industrial	16-31	Ebonite	2.5 - 2.9	Nylon	4.0 - 5.0
Alumina	9.3-11.5	Ethanol (25°C, 77° F)	24.3	Oil paper	4
Aluminum Bromide (212° F)	3.4	Ethyl Acetate (77° F)	6	Olive oil	3
Aluminum Fluoride	2.2	Ethyl Alcohol (77° F)	24.3	Paraffin oil	2.2
Ammonia (-74° F)	25	Ethylene glycol	37	Petroleum	2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายจาตุรนต์ สินธุคุณากร
วัน เดือน ปีเกิด	12 กรกฎาคม 2529 ที่นครสวรรค์
ที่อยู่	25/5 ถนนตีคลี ตำบลตาคลี อำเภอตาคลี จังหวัดนครสวรรค์ 60140
ประวัติการศึกษา	2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ.2552-2555	ตำแหน่งผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายปฏิบัติการระบบส่งจำหน่าย บริษัท เนชันแนลเพาเวอร์ซัพพลาย จำกัด(มหาชน) - งานขยายเขตไฟฟ้าระบบส่งและจำหน่าย 22 kV และเชื่อมต่อไฟฟ้าระบบ 22 kV ไปยังโรงงานของลูกค้าภายในนิคมอุตสาหกรรม 304 - คณะทำงานออกแบบ และก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแรงสูง 115/22 kV
พ.ศ.2555-2557	ตำแหน่งวิศวกรส่วนพัฒนาธุรกิจไฟฟ้า บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด(มหาชน) - คณะทำงานออกแบบ และควบคุมงานก่อสร้างโรงไฟฟ้า SPP-Cogeneration - บริหารสัญญาก่อสร้าง และบริหารสัญญาทางธุรกิจอื่นๆ
พ.ศ.2557-ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกรส่วนบริหารพาณิชยกิจ และพัฒนาธุรกิจ บริษัท ไออาร์พีซี คลีน พาวเวอร์ จำกัด - คณะทำงานออกแบบ ควบคุมงานก่อสร้าง และทดสอบระบบของโรงไฟฟ้า SPP-Cogeneration จนสามารถเริ่มต้นซื้อขายเชิงพาณิชย์กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ.) - คณะทำงานออกแบบ ควบคุมงานก่อสร้าง และทดสอบระบบของสถานีไฟฟ้าชนิด Gas Insulated Substation(GIS) ที่พิกัดแรงดัน 115 kV และ 230 kV - วิศวกรโครงการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าชนิด Air Insulated Substation(AIS) ที่พิกัดแรงดัน 230 kV(สถานีไฟฟ้าแรงสูงเชิงเนิน) จนแล้วเสร็จ และทำการโอนสิทธิให้กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้