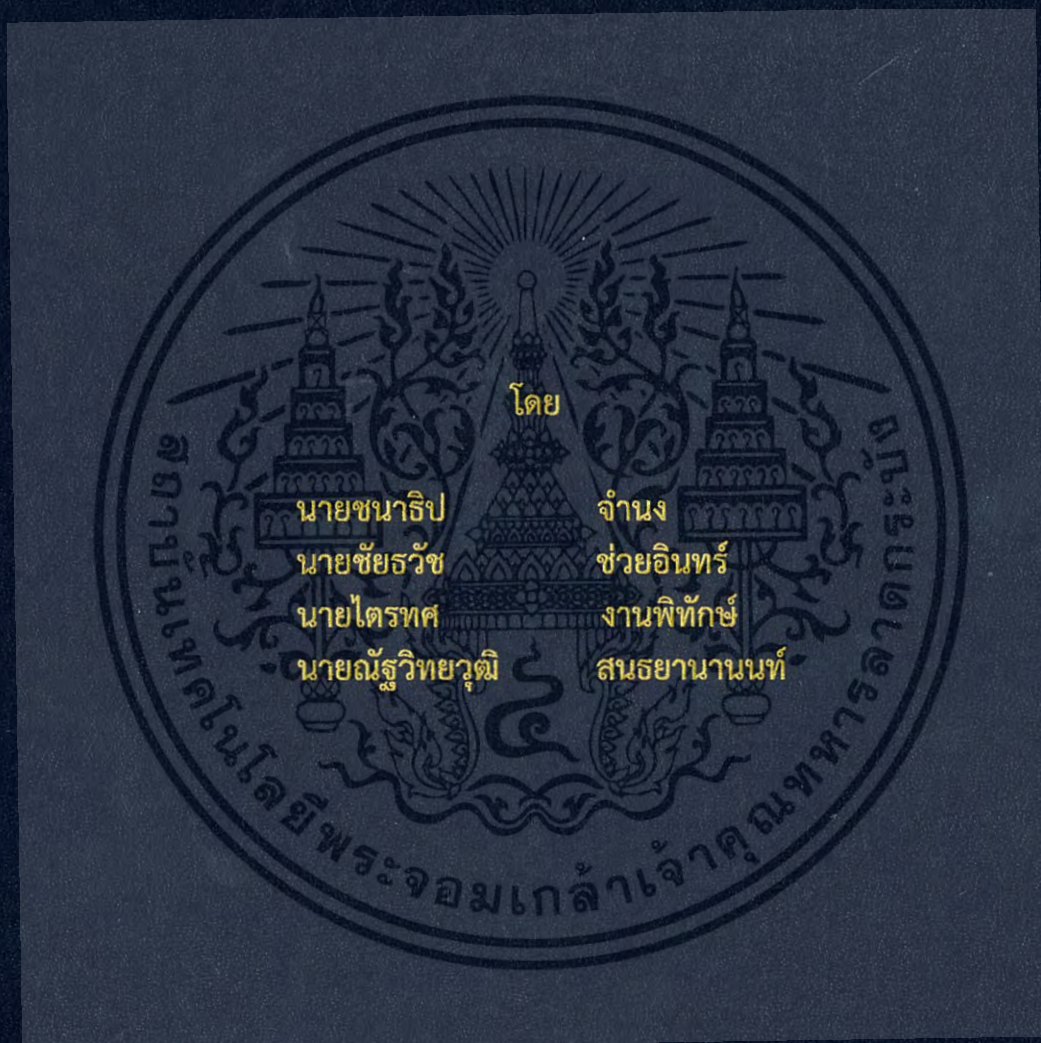


ผลของวัตถุลอยต่อความคงทนแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ
ของฉนวนก๊าซภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
THE EFFECT OF FLOATING OBJECT ON AC BREAKDOWN VOLTAGE
OF GAS INSULATION SYSTEM UNDER SLIGHTLY NONUNIFORM FIELD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

ผลของวัตถุลอยต่อความคงทนแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ

ของฉนวนก๊าซภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

THE EFFECT OF FLOATING OBJECT ON AC BREAKDOWN VOLTAGE
OF GAS INSULATION SYSTEM UNDER SLIGHTLY NONUNIFORM FIELD



โดย

นายชนาธิป

นายชัยรัช

นายไตรทศ

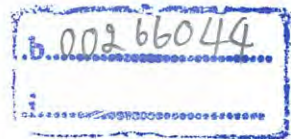
นายณัฐวิทย์วุฒิ

จำนง

ช่วยอินทร์

งานพิทักษ์

สนรยานานนท์



๓๖๐๐๒๓๖

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE EFFECT OF FLOATING OBJECT ON AC BREAKDOWN VOLTAGE
OF GAS INSULATION SYSTEM UNDER SLIGHTLY NONUNIFORM FIELD



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

ผลของวัตถุลอยต่อความคงทนแรงดันเบรกดาวน์กระแสลับ

ของฉนวนก๊าซภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

THE EFFECT OF FLOATING OBJECT ON AC BREAKDOWN VOLTAGE
OF GAS INSULATION SYSTEM UNDER SLIGHTLY NONUNIFORM FIELD



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของวัตถุลอยต่อความคงทนแรงดันเบรกดาวนักระแสสลับ
ของฉนวนกัซภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สมำเสมอเล็กน้อย

นายชนาธิป	จำนง	
นายชัยธวัช	ช่วยอินทร์	
นายไตรทศ	งานพิทักษ์	
นายณัฐวิทย์วุฒิ	สนธยานานนท์	
รศ.ดร. นรเศรษฐ	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาผลของวัตถุลอยต่อความคงทนแรงดันเบรกดาวนักระแสสลับของฉนวนกัซภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สมำเสมอเล็กน้อย เพื่อจำลองปัญหาของการใช้งานระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยฉนวนกัซ (Gas Insulated Transmission Line) โดยออกแบบสร้างอิเล็กโตรดทดสอบทรงกลม-ระนาบขึ้นมา ใช้โปรแกรมไฟไนท์อิเลิเมนต์ (FEM) จำลองสนามไฟฟ้าและใช้อัลกอริทึมคำนวณแรงดันเบรกดาวนักระแสสลับสนามไฟฟ้าไม่สมำเสมอเล็กน้อย ทดสอบความคงทนแรงดันเบรกดาวนักระแสสลับโดยใช้อากาศภายใต้ความดันบรรยากาศแล้วทำการจำลองวัตถุลอยอะลูมิเนียมทรงกลมและพลาสติกทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.11 เซนติเมตรติดตั้งที่แนวศูนย์กลางชุดทดสอบและที่ระยะ 2 – 4 เซนติเมตรจากแนวศูนย์กลางชุดทดสอบ ที่ความสูงจากอิเล็กโตรดแบบระนาบ 1 – 3 เซนติเมตร พบว่าแรงดันเบรกดาวนักระแสสลับมีแนวโน้มลดลงตามการลดลงของระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดทรงกลมกับวัตถุลอยอะลูมิเนียม ในกรณีวัตถุลอยแบบพลาสติก พบว่าแรงดันเบรกดาวนักระแสสลับมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากยกเว้นกรณีที่วัตถุลอยพลาสติกตั้งอยู่ในแนวเส้นตรงระหว่างอิเล็กโตรดพอดีจะพบว่าแรงดันเบรกดาวนักระแสสลับมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับกรณีของวัตถุลอยอะลูมิเนียมจึงสรุปได้ว่าวัตถุลอยมีผลต่อการดิสชาร์จโดยวัสดุที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้าจะมีผลมากกว่าวัสดุที่เป็นฉนวน ความคงทนแรงดันเบรกดาวนักระแสสลับที่ลดลงจะนำไปสู่ปัญหาการดิสชาร์จขึ้นในที่สุด

THE EFFECT OF FLOATING OBJECT ON AC BREAKDOWN VOLTAGE OF GAS INSULATION SYSTEM UNDER SLIGHTLY NONUNIFORM FIELD

Chaitawat	Chuayin
Chanathip	Chamnong
Nuttawittayawut	Sontayananon
Tritod	Nganpitak
Assoc.Prof.Dr. techn.	Norasage Pattanadech Advisor

Abstract

This project studies the effects of floating objects on AC breakdown voltage of gas insulation system under slightly nonuniform field to simulate the problem generally occurs in a gas insulated transmission line (GIL) system. The sphere-plane electrodes were designed and constructed. Finite Element Method (FEM) was used to simulate the electric field and the algorithm to compute the breakdown voltage of slightly nonuniform electric field was developed. Then the AC breakdown voltage of the designed electrode system was investigated. Moreover, spherical aluminum and plastic particles with the diameter of 0.11 centimeters were used in the experiment. The investigated particle was inserted between or near the sphere-plane electrodes. The particle was aligned at the test electrodes' symmetrical axis, and at the range of 2 – 4 centimeters from the axis. The height of the particle was set at 1 – 3 centimeters above the plane electrode. The AC breakdown voltages of the tested electrode system decreased with the reduction of the distance between the sphere electrode and the investigated particle. After that, the same procedure was used to study the effects of plastic particle, which resulted in insignificant changes in AC breakdown voltages in all cases, except for the cases those the plastic floating object was on the interelectrode line. Consequently, for dielectric gas under an electric field that resembles that of GIL's, floating object cause highly nonuniform electric field, with higher effects in conductive floating. Because of this, the AC breakdown strength decreased and turned into a cause of discharge problems in GIL.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้คำปรึกษา แนวทางปฏิบัติงานในระหว่าง การดำเนินไปของขั้นตอนกระบวนการต่าง ๆ ของปริญญาานิพนธ์นี้ ตลอดจนข้อแนะนำอื่น ๆ ที่เห็นว่าจะเป็นประโยชน์ต่อคณะผู้จัดทำ เช่น การจัดทำและส่งบทความทางวิชาการในงานประชุมวิชาการต่าง ๆ รวมถึงคอยตรวจสอบความถูกต้องของปริญญาานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้โดยสมบูรณ์ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณบริษัท Meidensha Corporation ที่ให้การสนับสนุน มอบทุนสำหรับวิจัยให้กับโครงการปริญญาานิพนธ์นี้ ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณ ฝ่ายก่อสร้างระบบส่ง และฝ่ายบำรุงรักษาระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ฝ่ายวิศวกรรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และบริษัท โกลว์ พลังงาน จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้โอกาสคณะผู้จัดทำ ได้เข้าไปศึกษาสถานที่ตลอดจนให้ความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบ Gas-Insulated Substation ทำให้อ่านสามารถนำมาศึกษาต่อยอดและประยุกต์ใช้งานภายในปริญญาานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำหรับความช่วยเหลือและอนุเคราะห์ ทั้งในส่วนของสถานที่และอุปกรณ์ทดสอบ ตลอดจนบุคลากรทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำจนปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคณาจารย์ทุกท่านที่คอยถ่ายทอดวิชาความรู้จนปรากฏออกมาเป็นปริญญาานิพนธ์นี้ ตลอดจนองค์ความรู้อื่น ๆ ที่สามารถนำไปใช้ในการประกอบอาชีพต่อไป

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงสมาชิกท่านอื่น ๆ ในครอบครัว ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือทั้งในด้านกำลังใจและทุนทรัพย์ ให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้จากโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สถานีไฟฟ้าย่อย	5
2.1.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนอากาศ (Air Insulated Substation: AIS)	5
2.1.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas Insulated Substation: GIS)	6
2.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ	7
2.2.1 ตัวถัง (Enclosure)	8
2.2.2 โคน (Insulating Cone)	8
2.2.3 ตัวนำ (Conductor)	9
2.2.4 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker)	9
2.2.5 ไบมีดกราวด์ (Ground Switch)	10
2.2.6 ไบมีดตัดต่อ (Disconnecting Switch)	10
2.2.7 หม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer)	11
2.2.8 หม้อแปลงวัดแรงดัน (Voltage Transformer)	11
2.2.9 อุปกรณ์ขยาย (Expansion Bellows)	12
2.2.10 อุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน (Pressure Relief)	12
2.2.11 External Connection	13
2.3 Gas-Insulated Transmission Line (GIL)	14
2.3.1 ส่วนประกอบของ GIL	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.3.2 ข้อมูลพื้นฐานของ GIL เมื่อเปรียบเทียบกับระบบส่งจ่าย OHL กับ XLPE	15
2.3.3 GIL กับปัญหาเกี่ยวกับการปล่อยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	16
2.3.4 กระแสเหนี่ยวนำทิศทางตรงข้ามที่ตัวถัง GIL	18
2.4 ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF ₆)	19
2.4.1 คุณสมบัติทางเคมี	19
2.4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า	19
2.4.3 กลไกการสลายตัวของ SF ₆	20
2.4.4 การกำจัดผลิตภัณฑ์จากการอาร์คของ SF ₆	20
2.5 สนามไฟฟ้าและการทำนายปรากฏการณ์ดิสชาร์จ	21
2.6 การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน	26
2.6.1 การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)	26
2.6.2 วิธีการตรวจวัดสัญญาณดิสชาร์จที่นิยมใช้ในระบบ GIS, GIL	27
2.6.3 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการวัดดิสชาร์จแบบต่าง ๆ	28
2.7 Ultra-High Frequency (UHF)	29
2.8 พฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction	33
บทที่ 3 การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ	35
3.1 การพิสูจน์และปรับแก้โปรแกรมคำนวณแรงดันเบรกดาวน	36
3.1.1 หลักการทำงานโปรแกรมการคำนวณเบรกดาวน	36
3.1.2 กระบวนการตรวจสอบความถูกต้อง	38
3.1.3 กระบวนการปรับแก้โปรแกรม	40
3.2 การออกแบบชุดทดสอบ	45
3.2.1 ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการประกอบสร้างชุดทดสอบ	45
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	49
4.1 ชุดทดสอบที่ติดตั้ง Floating Object	49
4.2 วงจรการทดสอบ	50
4.3 ขั้นตอนการทดสอบ	51
4.4 ผลการทดสอบ	52
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุป	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	54

สารบัญรูปรภาพ

รูปที่ 2.1	สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนอากาศ (AIS)	5
รูปที่ 2.2	สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (GIS)	6
รูปที่ 2.3	เปรียบเทียบขนาดระหว่าง AIS กับ GIS	6
รูปที่ 2.4	ส่วนประกอบภายในของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (GIS)	8
รูปที่ 2.5	INSULATING CONE	8
รูปที่ 2.6	ตัวนำ ALUMINUM มีการเคลือบปลายด้วย SILVER	9
รูปที่ 2.7	ส่วนประกอบภายใน CIRCUIT BREAKER	9
รูปที่ 2.8	ส่วนประกอบของใบมีดกราวด์	10
รูปที่ 2.9	ส่วนประกอบของใบมีดตัดตอน	10
รูปที่ 2.10	ส่วนประกอบของหม้อแปลงวัดกระแส	11
รูปที่ 2.11	ส่วนประกอบของหม้อแปลงวัดแรงดัน	11
รูปที่ 2.12	ส่วนประกอบของอุปกรณ์ขยาย	12
รูปที่ 2.13	ส่วนประกอบของอุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน	12
รูปที่ 2.14	ตัวอย่างของ EXTERNAL CONNECTION	13
รูปที่ 2.15	ดีไซน์ทั่วไปของ GIL	15
รูปที่ 2.16	การเปรียบเทียบความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในระบบ OHL CABLE และ GIL	17
รูปที่ 2.17	ระบบการต่อสะพานกราวด์ของระบบ GIL 3 เฟส	18
รูปที่ 2.18	กระบวนการสลายตัวของก๊าซ SF ₆	20
รูปที่ 2.19	วงจรสมมูลการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	26
รูปที่ 2.20	วงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วน ตาม IEC 60270	27
รูปที่ 2.21	กราฟการเปรียบเทียบการวัดดิสชาร์จบางส่วน	28
รูปที่ 2.22	ตัวอย่างการเกิด PD ตามจุดต่าง ๆ	29
รูปที่ 2.23	FREE CONDUCTIVE PARTICLE SIGNAL	30
รูปที่ 2.24	HV PROTRUSION SIGNAL	30
รูปที่ 2.25	LV PROTRUSION SIGNAL	31
รูปที่ 2.26	FLOATING POTENTIAL PARTICLE SIGNAL	31
รูปที่ 2.27	PARTICLES ON INSULATOR SURFACE SIGNAL	32
รูปที่ 2.28	VOID SIGNAL	32
รูปที่ 2.29	ลักษณะของจุด TRIPLE JUNCTION	33

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่ 3.1	FLOWCHART แสดงการหาค่า T ของโปรแกรมการคำนวณเบรกดาวน	37
รูปที่ 3.2	ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะแกป 2 ซม. แรงดัน 59 KV	38
รูปที่ 3.3	ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะแกป 4 ซม. แรงดัน 112 KV	38
รูปที่ 3.4	ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะแกป 8 ซม. แรงดัน 214 KV	39
รูปที่ 3.5	ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะแกป 2 ซม. แรงดัน 59 KV (โดยมีการตั้งค่า $K_{ST}=9.955$)	42
รูปที่ 3.6	ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะแกป 4 ซม. แรงดัน 112 KV (โดยมีการตั้งค่า $K_{ST}=9.955$)	42
รูปที่ 3.7	ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะแกป 2 ซม. แรงดัน 59 KV (โดยมีการตั้งค่า $K_{ST}=9.955$)	43
รูปที่ 3.8	ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะแกป 4 ซม. แรงดัน 110 KV (โดยมีการตั้งค่า $K_{ST}=9.955$)	43
รูปที่ 3.9	ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะแกป 8 ซม. แรงดัน 185 KV* (โดยมีการตั้งค่า $K_{ST}=9.955$)	43
รูปที่ 3.10	อีเล็กโตรดและแกนตัวนำที่ถูกจำลองโดยโปรแกรม SOLIDWORKS	45
รูปที่ 3.11	วัสดุบรรจุก๊าซที่ถูกจำลองโดยโปรแกรม SOLIDWORKS	45
รูปที่ 3.12	ชุดทดสอบที่ประกอบสมบูรณ์	46
รูปที่ 3.13	วาริแอกสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า	46
รูปที่ 3.14	หม้อแปลงทดสอบ 235/100 KV, 5 KVA	47
รูปที่ 3.15	ตัวต้านทานน้ำ	47
รูปที่ 3.16	VOLTAGE DIVIDER	48
รูปที่ 3.17	มัลติมิเตอร์ FLUKE	48
รูปที่ 4.1	ภาพตัดขวางของชุดทดสอบ	49
รูปที่ 4.2	วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ 1	50
รูปที่ 4.3	วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ 2	50
รูปที่ 4.4	ตำแหน่งของ FLOATING OBJECT	51

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	แผนการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 2.1	ตารางเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของสถานีไฟฟ้า AIS กับ GIS	7
ตารางที่ 2.2	ตารางเปรียบเทียบ GIL OHL และ XLPE CABLE	16
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์	19
ตารางที่ 2.4	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับระหว่าง ALUMINA และ CHARCOAL	20
ตารางที่ 3.1	การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอเล็กโตรด ทรงกลม-ทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 CM ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม และจากมาตรฐาน IEC 60052)	39
ตารางที่ 3.2	การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอเล็กโตรด ทรงกลม-ทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 CM ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม และจากมาตรฐาน IEC 60052)	39
ตารางที่ 3.3	ผลการจำลองการหาค่า K_{ST} ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอเล็กโตรดทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 CM ระยะแก๊ป 8 CM) โดยการปรับค่า K_{ST} ในช่วง 0 – 20 ทีละ 5	40
ตารางที่ 3.4	แสดงความคลาดเคลื่อนจากการปรับค่า K_{ST} สำหรับอเล็กโตรดทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 CM ระยะแก๊ป 8 CM)	41
ตารางที่ 3.5	ผลการจำลองการหาค่า K_{ST} ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอเล็กโตรดทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 CM ระยะแก๊ป 8 CM) โดยการปรับค่า K_{ST} ในช่วง 5 – 10 ทีละ 1	41
ตารางที่ 3.6	การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอเล็กโตรด ทรงกลม-ทรงกลม ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม (โดยตั้งค่า $K_{ST}=9.955$ และจากมาตรฐาน IEC 60052)	44
ตารางที่ 4.1	พิกัดของ FLOATING OBJECT ที่ต้องการทดสอบ	51
ตารางที่ 4.2	ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซอากาศ (มี FLOATING OBJECT เป็นอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.11 CM ระยะแก๊ป 3 CM)	52
ตารางที่ 4.3	ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซอากาศ (มี FLOATING OBJECT เป็นพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.11 CM ระยะแก๊ป 3 CM)	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีพัฒนาก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว สำหรับประเทศไทยนั้นก็เกิดผู้ใช้ไฟรายใหญ่เพิ่มขึ้นจำนวนมากทั้งในส่วนของภาครัฐและเอกชน แน่แน่นอนว่าการที่มีผู้ใช้ไฟจำนวนมากขึ้น ปริมาณการใช้งานไฟฟ้ามีมากขึ้น การเพิ่มจำนวนของ แหล่งผลิตไฟฟ้า สายส่ง รวมถึง สถานีส่งจ่ายกำลัง จึงเป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

ในอดีตการเพิ่ม-การขยาย สถานีไฟฟ้าแรงสูงในเขตตัวเมืองนั้น มักประสบปัญหาในเรื่องของราคาที่ดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กทม. ที่ราคาที่ดินนั้นสูงมาก แต่ในปัจจุบันปัญหานี้ได้รับการแก้ไขให้ทุเลาลง โดยการเปลี่ยนจากการสร้างสถานีไฟฟ้าฉนวนอากาศ (Air Insulated Substation : AIS) ไปสร้างสถานีไฟฟ้าฉนวนแก๊ส (Gas Insulated Substation : GIS) แทน

สถานีไฟฟ้าฉนวนแก๊ส (GIS) นั้นได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาเรื่องข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ในเขตตัวเมือง ข้อดีของสถานีไฟฟ้าชนิดนี้ คือ ทำให้ขนาดของสถานีไฟฟ้าลดลงจากแบบเดิมถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ลดปัญหาจากสัตว์ รวมถึงลดปัญหาจากสิ่งแวดล้อม เช่น มลภาวะจากภายนอกที่ทวีความรุนแรงขึ้นทุกวัน

อย่างไรก็ตามสถานีไฟฟ้าฉนวนแก๊สยังถือเป็นความรู้ที่ค่อนข้างใหม่ในประเทศไทย หลาย ๆ อย่างยังติดขัดมีปัญหายูบ้าง แม้ในการสร้างสถานีไฟฟ้าฉนวนแก๊สจะไม่ใช่ว่าเรื่องที่ยุ่งยากซับซ้อน แต่ก็เป็นเรื่องที่ต้องพิจารณาอย่างละเอียดรอบคอบในทุกขั้นตอนตั้งแต่เริ่มออกแบบทางวิศวกรรม เพราะสถานีไฟฟ้านั้นต้องมีการทดสอบและตรวจรับให้เป็นไปตามหลักมาตรฐานสากล รวมถึง ต้องมีการวางแผนงานบำรุงรักษาให้เป็นอย่างดีเหมาะสม โดยหากทุกขั้นตอนที่กล่าวมานั้น ดำเนินการโดยผู้เชี่ยวชาญ สถานีไฟฟ้าชนิดนี้จะมีอายุการใช้งานได้มากกว่า 30 ปี และนอกจากการเปลี่ยนชนิดสถานีไฟฟ้าแล้วอีกหนึ่งสิ่งที่สำคัญคือการเปลี่ยนชนิดของสายส่งจำหน่ายระบบไฟฟ้าแรงสูงจากสายส่งเหนือหัว (Overhead Line : OHL) มาเป็นวิธีส่งจ่ายผ่านระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (Gas Insulated Line : GIL)

ระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (GIL) นั้นหากมองในฐานะของผู้ลดปัญหาการสูญเสียพลังงานในสายส่งแล้วนั้น ถือว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสาย XLPE แต่หากพิจารณาลงลึกไปในมุมของการปล่อยสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว ตัวของ GIL นั้นสามารถแก้ปัญหาการปล่อยสนามแม่เหล็กของ OHL ได้ดีกว่า XLPE มาก ปัจจุบันประเทศไทยจึงเริ่มเปลี่ยนการส่งจำหน่ายมาเป็น GIL มากขึ้น ซึ่งแน่นอนว่าสิ่งใหม่ ๆ ในยุคแรกเริ่มย่อมมีปัญหายูบ้าง การศึกษาปัญหาใน GIL ไม่ว่าจะเป็นเรื่อง Triple junction หรือ การเกิด Partial discharge รวมถึงวิธีการบำรุงรักษาจึงเป็นอีกหนึ่งปัญหาที่ท้าทายของคณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาหลักการและขั้นตอนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส (GIS)
2. ศึกษาหลักการและขั้นตอนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ภายในของระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (GIL)
3. ศึกษาทฤษฎีการเบรกดาวน์ของแก๊ส SF₆ และอากาศ ในระบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
4. ศึกษาและทดสอบคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวน์ของแก๊ส SF₆ และอากาศภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาคุณสมบัติของฉนวนแก๊ส SF₆ และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อการใช้งานฉนวนแก๊ส SF₆
2. ศึกษาส่วนประกอบและทำความเข้าใจการทำงานในระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส (GIS) และระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (GIL)
3. วิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้า ค่าคงทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ รวมถึงศึกษาการเกิดดิสชาร์จบางส่วน จากชุดทดสอบ 2 ชุด ที่ถูกดัดแปลงขึ้นเพื่อวิเคราะห์ปัญหาของ GIL
4. ศึกษาปัญหาเกี่ยวกับ Floating object ที่เป็นตัวนำไฟฟ้า และฉนวนทางไฟฟ้า ในชุดทดสอบ GIL จำลอง โดยควบคุม Floating object ไว้ที่จำนวน 1 ลูกต่อหนึ่งกรณีชุดทดสอบ
5. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าของชุดทดสอบ GIL จำลอง โดยการใช้โปรแกรม MATLAB

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาข้อมูล งานวิจัย ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ และระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (GIS)
2. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดในชุดทดสอบ ออกแบบแนวทางการปรับปรุงชุดทดสอบ
3. จัดเตรียมปรับปรุงชุดทดลองให้เหมาะสม รวมถึงศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือต่าง
4. ทดลองการเกิดเบรกดาวน์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง
5. สรุปผลและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ทางผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล จากทฤษฎี และงานวิจัยต่าง ๆ ทั้งภายในประเทศ และต่างประเทศ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการใช้โปรแกรมจำลองสนามไฟฟ้าและการจัดสร้างปรับปรุงแก้ไขชุดทดสอบ โดยระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานนั้น ครอบคลุมตั้งแต่ เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2560 ถึง เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2561 โดยมีแผนการดำเนินงานดังตารางที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2560									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูล งานวิจัย ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง กับ สถานีไฟฟ้าย่อยฉนวน แก๊ส และระบบส่งจ่าย ฉนวนแก๊ส										
2. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ เกิดในชุดทดสอบ ออกแบบ แนวทางการปรับปรุงชุด ทดสอบ										
3. จัดเตรียมปรับปรุงชุด ทดลองให้เหมาะสมรวมถึง ศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือ ต่าง ๆ										
4. ทดลองการเกิดเบรก ดาวนในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง										
5. สรุปผลและจัดทำรูปเล่ม ปริญญานิพนธ์										
	←-----> วางแผน					←-----> ปฏิบัติจริง				

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. นำความรู้เกี่ยวกับการเบรกดาวนของฉนวนแก๊สในสภาวะต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงสูง
2. รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊สและหลักการซ่อมบำรุงรักษา เพื่อนำมาเป็นองค์ความรู้ในการศึกษาการใช้ฉนวนแก๊ส SF₆ ในระบบไฟฟ้าแรงสูง
3. นำความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของฉนวนแก๊ส เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบและป้องกันปัญหาที่พบในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส (GIS) และระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (GIL)
4. ประยุกต์ทฤษฎีที่ศึกษาไปใช้ในการบำรุงรักษาระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส (GIS) และระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (GIL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

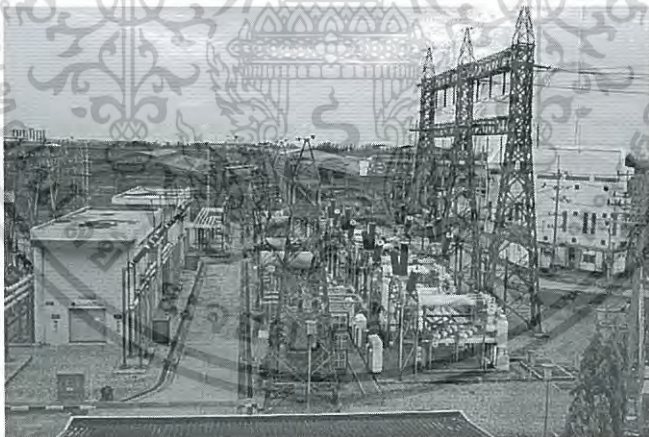
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบสถานีไฟฟ้าฉนวนแก๊ส ทั้งข้อดี-ข้อเสีย หลักการทำงาน ส่วนประกอบ หน้าที่ จวบจนปัญหาที่พบไม่ว่าจะเรื่องการเบรกตัวนำหรือการดิสชาร์จบางส่วน

2.1 สถานีไฟฟ้าย่อย

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

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

เป็นสถานีชนิดที่นิยมใช้กันตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีราคาค่าก่อสร้างที่ถูก โดยอุปกรณ์หลัก ๆ ในสถานีไฟฟ้านั้นจะติดตั้งอยู่บนพลาเพื่อให้อาคารสถานีแบบนี้ถูกจึงเป็นการที่ต้องใช้พื้นที่กว้างใหญ่ในการสร้าง



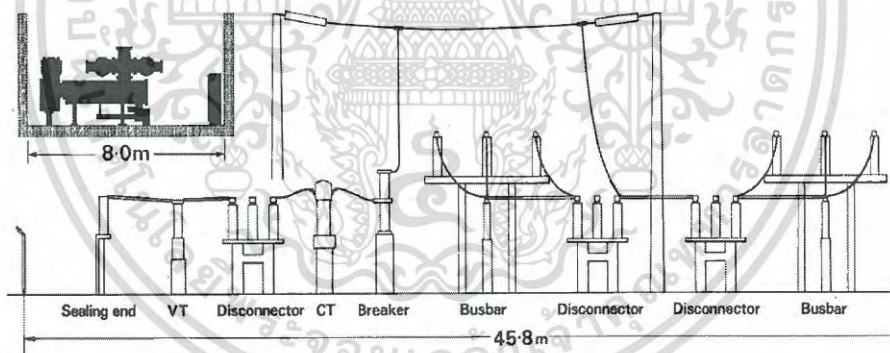
รูปที่ 2.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนอากาศ (AIS) [1]

2.1.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนแก๊ส (Gas Insulated Substation : GIS) [1]

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



รูปที่ 2.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนแก๊ส (GIS) [1]



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบขนาดระหว่าง AIS กับ GIS [1]

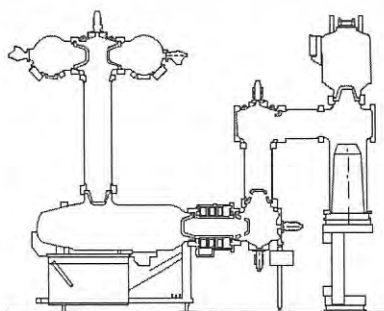
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของสถานีไฟฟ้า AIS กับ GIS [1]

สถานีไฟฟ้า AIS	สถานีไฟฟ้า GIS
ข้อดี	ข้อเสีย
อุปกรณ์ราคาถูก เวลาเกิดการเสียหายสามารถหาซื้อมาทดแทนได้ง่าย	อุปกรณ์ราคาแพง ใช้อุปกรณ์เฉพาะทางจำนวนมาก ลำบากในการหาทดแทน
ขยายระบบได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องปิดระบบทั้งหมดเวลาต้องการติดตั้งส่วนขยายเพิ่มเติม	การขยายระบบยาก หลังขยายอาจต้องมีการดับไฟเพื่อตรวจสอบ Dielectric
เวลามีปัญหาจะหาตำแหน่งที่มีปัญหาได้ง่าย	เนื่องจากอยู่ในท่อ เวลามีสัญญาณจะหาตำแหน่งได้ยาก
เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะไม่ค่อยใช้ SF ₆	ใช้ SF ₆ มาก จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
ข้อเสีย	ข้อดี
ใช้พื้นที่มาก ไม่เหมาะแก่การติดตั้งในตัวเมืองหรือสถานที่ที่ดินราคาแพง	ใช้พื้นที่น้อย ติดตั้งที่ไหนก็ได้ ใต้ดินก็ได้ บนรถบรรทุกก็ได้
มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมเยอะ ทั้งจากสภาพอากาศและปัญหาจากสัตว์	มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมน้อย เพราะอยู่ในท่อ
ใช้เวลาในการติดตั้งนาน เพราะต้องประกอบส่วนต่าง ๆ หน่วยงาน	ใช้เวลาติดตั้งน้อย ติดตั้งสะดวกรวดเร็ว ชิ้นส่วนประกอบมาจากโรงงาน

2.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนแก๊ส [1]

ความกระตือรือร้น, การติดตั้งได้สะดวกรวดเร็วในทุกสภาพแวดล้อม, ใช้พื้นที่น้อย, เชื่อถือได้สูง คือข้อดีของสถานีไฟฟ้าชนิดนี้ หากเปรียบเทียบกับชนิดอากาศจะพบว่า อุปกรณ์ส่วนใหญ่เหมือนกัน เพียงแต่ในชนิดอากาศอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้นจะเชื่อมต่อกันผ่านโครงเหล็ก แต่ในชนิดแก๊สนี้ อุปกรณ์ต่าง ๆ จะถูกบรรจุในตัวถัง (Enclosure) แล้วจึงนำมาเชื่อมต่อกันผ่านท่อ



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบภายในของสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนแก๊ส (GIS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

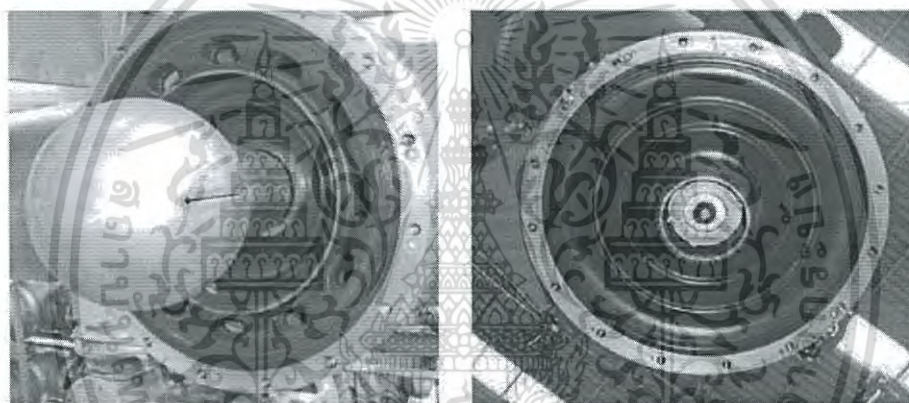
2.2.1 ตัวถัง (Enclosure)

ทำจาก Aluminum alloy หรือ Steel ทำหน้าที่ห่อหุ้มอุปกรณ์ บริเวณว่างภายในนั้นบรรจุแก๊ส SF₆ ไว้ เวลาใช้งานจะมีกระแสเหนี่ยวนำไหลผ่านประมาณ 80-100 % ของกระแสที่ไหลในตัวถัง ดังนั้นตัวถังทั้งหมดจึงต้องต่อลงดิน

2.2.2 โคน (Insulating cone)

ทำจาก Epoxy resin วัสดุที่มีความเป็นฉนวนสูง ทนทานต่ออากาศ ความร้อน และปราศจากโพรงอากาศภายใน โดยโคนนั้นแบ่งออกตามหน้าที่การใช้งานได้เป็น 2 ชนิดคือ

- แบบเปิด (Open cone) ทำหน้าที่ใช้รองรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ใน GIS เช่น ตัวนำ
- แบบปิด (Close cone) ที่นอกจากจะทำหน้าที่รองรับอุปกรณ์แล้วยังทำหน้าที่แบ่งส่วนแก๊สภายใน GIS ด้วย



ก)

ข)

รูปที่ 2.5 Insulating cone [1]

เมื่อ ก) เป็นชนิด Open cone ข) เป็นชนิด Close cone

2.2.3 ตัวนำ (Conductor)

มีหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าภายใน GIS ทั่วไปมักทำมาจาก Aluminum ออกแบบให้มีพิกัดตาม “พิกัดกระแสต่อเนื่อง” โดยตัวนำนั้นที่ปลายมักเคลือบด้วย Silver เพื่อเพิ่มความนำไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ



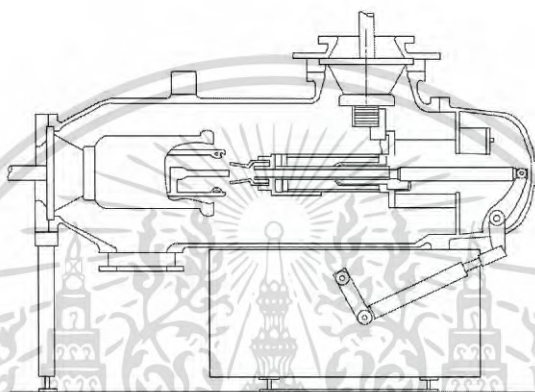
รูปที่ 2.6 ตัวนำ Aluminum มีการเคลือบปลายด้วย Silver [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker)

ออกแบบเป็นชนิดตัวถังไม่มีไฟ (Dead Tank) โดยทั่วไปจะใช้ SF₆ เป็นทั้งฉนวน และตัวดับอาร์ค เนื่องจากต้องใช้ SF₆ ในการดับอาร์คด้วย ดังนั้นในส่วนนี้จึงมีค่าความดันของ SF₆ มากกว่าส่วนอื่น เซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ Moving contact และ Fixed contact

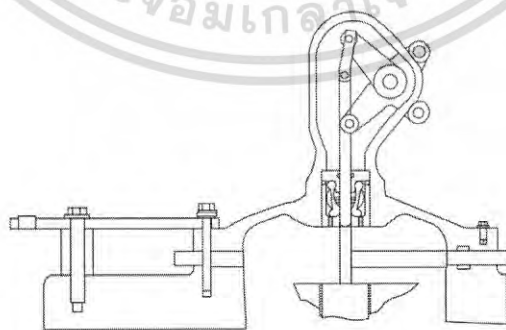
หลักการทำงาน คือ ช่วงปกติ Moving contact จะติดกับ Fixed contact แต่เมื่อต้องการตัดกระแส จะใช้ชุดกลไกดึง Moving contact ออกมา เพื่อยืดลัมอาร์คออก จากนั้น SF₆ จะทำหน้าที่ดับลัมอาร์คเพื่อตัดกระแส



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบภายใน Circuit breaker

2.2.5 ไบมีดกราวด์ (Ground switch)

ใช้สำหรับงานบำรุงรักษา เมื่อสั่งใช้งาน ไบมีดจะลดประจุที่ตกค้างอยู่ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยไบมีดกราวด์นั้นมี 2 ชนิดคือ แบบธรรมดา และแบบความเร็วสูง โดยทั้ง 2 แบบจะเปิดออกด้วยความเร็วเท่ากัน แต่แบบความเร็วสูงจะมีกลไกชาร์จ ทำให้ปิดได้รวดเร็วกว่า โดยทั่วไปนั้นจะติดตั้งแบบความเร็วสูงเฉพาะส่วนปลายเบย์ที่ต่อออกไปยังสายส่งเท่านั้น

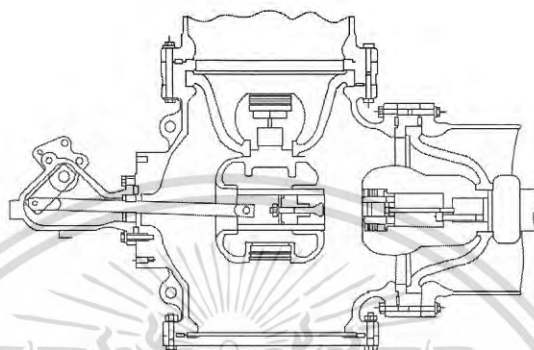


รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของไบมีดกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 ไบมีดตัดต่อ (Disconnect switch)

ใช้สำหรับงานบำรุงรักษา โดยเมื่อใช้งานจะทำการแยก เซอร์กิตเบรกเกอร์ ตัวนำ หรือสายส่ง ออกจากระบบ แม้ไบมีดตัดตอนจะถูกใช้งานในขณะที่ไม่มีกระแสไหลอยู่ แต่ตัวไบมีดตัดตอนนั้นตัด ตอนกระแสที่เกิดจากการชาร์จประจุที่เกิดจากค่าคาปาซิแตนซ์ได้ด้วย



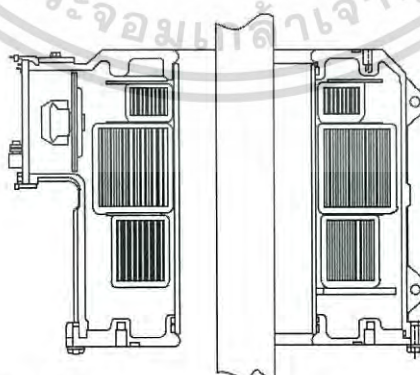
รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของไบมีดตัดตอน

2.2.7 หม้อแปลงวัดกระแส (Current transformer)

โดยทั่วไปสอดท่อตัวนำ ซึ่งถือเป็นขดลวดปฐมภูมิ 1 รอบ ลอดผ่านแกนเหล็กแกนเหล็กของ หม้อแปลงวัดกระแสชนิด Ring type โดยหม้อแปลงวัดกระแสนี้ทำหน้าที่ลดระดับกระแสฝั่งปฐมภูมิ ให้น้อยลงเพื่อใช้กับเครื่องมือวัด และใช้กับระบบป้องกัน

หากแบ่งประเภทโดยใช้รูปแบบเป็นแกนจะแบ่งได้ 2 ชนิด

- ติดตั้งภายในตัวถัง ชนิดนี้สามารถใช้ได้กับท่อทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส
- ติดตั้งภายนอกตัวถัง ชนิดนี้ใช้ได้เฉพาะกับท่อ 1 เฟส

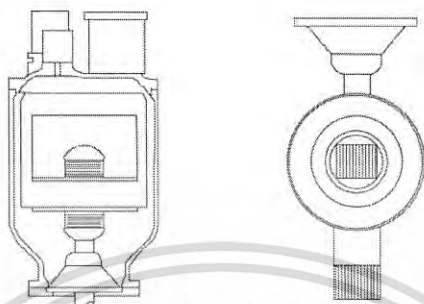


รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของหม้อแปลงวัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.8 หม้อแปลงวัดแรงดัน (Voltage transformer)

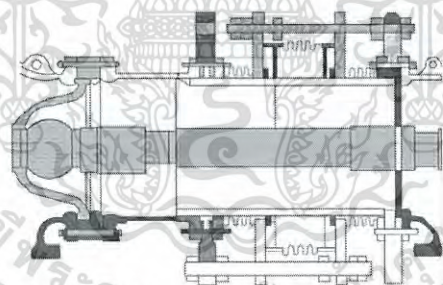
หม้อแปลงวัดแรงดันนั้นมีความคล้ายคลึงกับโวลต์เทจตีไวเตอร์ในสถานีแบบ AIS โดยตัวหม้อแปลงวัดแรงดันนั้นต่างจากหม้อแปลงวัดกระแส คือมีเฉพาะชนิดบรรจุในตัวถัง



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของหม้อแปลงวัดแรงดัน

2.2.9 อุปกรณ์ขยาย (Expansion bellows)

เป็นอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ทำจาก Stainless ทำงานเมื่อได้รับความร้อน อุปกรณ์ขยายจะขยายตัวเพื่อลดแรงที่กระทำต่อส่วนอื่น ๆ ทำให้ท่อส่วนอื่นไม่ขยายตัวจนปริออกเมื่อได้รับความร้อน

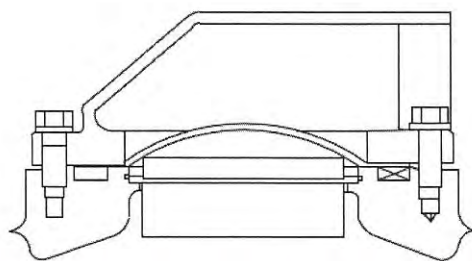


รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ขยาย

2.2.10 อุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน (Pressure relief)

มี 2 ส่วนคือ ส่วนควบคุมทิศทาง กับ Rupture disc ที่ทำจากกราไฟท์ หลักการทำงานคือ เมื่อมีแก๊สมีแรงดันสูงขึ้น ก่อนที่ตัวถังจะระเบิด Rupture disc จะพังก่อน เพื่อระบายแรงดันออกไปตามส่วนควบคุมทิศทาง โดยทั่วไปนั้น อุปกรณ์ระบายแรงดันเกินจะติดตั้งในทุก compartment

ข้อควรระวังในการติดตั้งคือ ควรติดตั้งให้เวลาทำงาน ระบายแก๊สหนีไปในทิศทางที่เหมาะสม ไม่ให้เกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานอยู่บริเวณนั้น

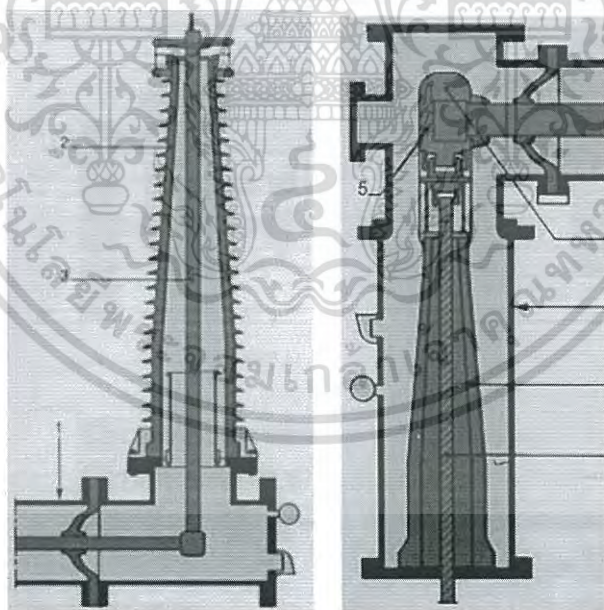


รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน

2.2.11 External connection

เนื่องจากตัว GIS นั้นเป็นศูนย์กลางของการสวิชชิงต่าง ๆ ดังนั้นจึงต้องมีหัวต่อเพื่อรองรับการใช้งาน SF_6 ไปใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้วย เช่น

- SF_6 /Air Bushing เป็นช่วงเปลี่ยนผ่านระหว่างฉนวน SF_6 กับฉนวนอากาศ มีไว้สำหรับการต่อ busbar ต่าง ๆ
- Cable terminator เป็นช่วงเปลี่ยนผ่านระหว่างฉนวน SF_6 กับฉนวน XLPE หรือฉนวนน้ำมันเพื่อใช้กับการต่อสายเคเบิลต่าง ๆ



ก)

ข)

รูปที่ 2.14 ตัวอย่างของ External connection [1]

เมื่อ ก) SF_6 /Air Bushing ข) Cable terminator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Gas-insulated Transmission Line (GIL)

ปัจจุบันระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงนั้น สามารถส่งถ่ายพลังงานได้เป็น 3 รูปแบบหลัก ๆ คือ

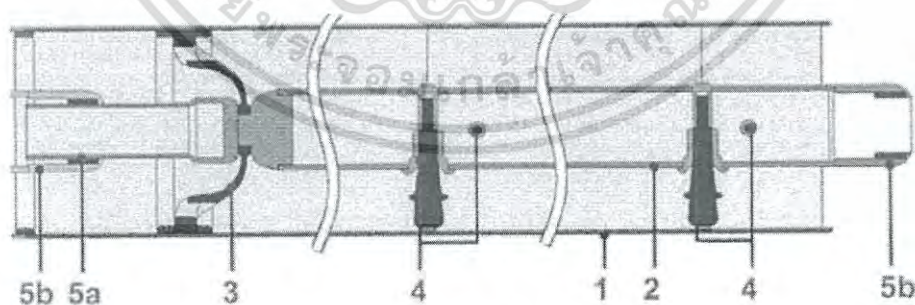
- Overhead Line (OHL)
- Cable
- Gas-Insulated Transmission Line (GIL)

โดยส่วนมากระบบส่งจ่ายที่มีระยะทางไกล ๆ จะใช้ OHL ส่งจ่าย เนื่องด้วยเหตุผลทางด้านต้นทุนในการก่อสร้างที่ต่ำที่สุด แต่ก็จะมีข้อเสียในเรื่องของความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความน่าเชื่อถือต่ำที่สุด ส่วน Cable ส่วนใหญ่จะใช้กับระบบส่งจ่ายในเมือง แต่ปัจจุบัน GIL เริ่มเข้ามา มีบทบาทและถูกนำมาเอามาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังมากขึ้น

2.3.1 ส่วนประกอบของ GIL [2]

ส่วนประกอบของ GIL นั้นมีความคล้ายคลึงกับ GIS อย่างมากแต่หากเปรียบเทียบกันแล้ว นับว่า GIL มีความซับซ้อนน้อยกว่า โดย GIL นั้นจะมีรูปทรงคล้าย ๆ กับส่วนบัสบาร์ของ GIS คือ มีตัวนำแรงดันสูง มีฉนวนโคน มี Enclosure ที่ต่อลงดิน มีส่วน Sliding contact และที่สำคัญพื้นที่ภายในที่เคลือบอยู่นั้นก็ถูกเติมเต็มด้วย SF₆ ที่ใช้เป็นฉนวนเหมือน GIS

- Insulator ใน GIL นั้นมี 2 ชนิด คือ Conical insulator กับ Support insulator โดยทั้ง 2 ทำหน้าที่เหมือน Close cone กับ Open cone ใน GIS ตามลำดับ
- Enclosure ทำจาก Aluminum alloy หรือ Steel ทำหน้าที่ห่อหุ้มอุปกรณ์ มีปัญหาจากกระแสเหนี่ยวนำ จึงต้องต่อลงดิน เหมือน GIS
- Sliding contact ทำหน้าที่เหมือนส่วน Expansion bellows ใน GIS คือทำหน้าที่ลดความเสียหายจากการขยายตัวของท่อเนื่องจากความร้อน (ติดในทุก ๆ ช่วง 100 เมตร)



- | | |
|----|------------------------|
| 1 | Enclosure |
| 2 | Inner conductor |
| 3 | Conical insulator |
| 4 | Support insulator |
| 5a | Male sliding contact |
| 5b | Female sliding contact |

รูปที่ 2.15 ดีไซน์ทั่วไปของ GIL [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ข้อมูลพื้นฐานของ GIL เมื่อเปรียบเทียบกับระบบส่งจ่าย OHL กับ XLPE [3]

- ค่าสูญเสียทางไฟฟ้าโดยรวมนั้น ต่ำกว่า OHL
- GIL นั้นไม่มีนัยสำคัญของการสูญเสียไดอิเล็กทริก
- GIL สามารถใช้งานโดยการฝังลงดินโดยตรง ปราศจากการใช้ cooling ได้ถึงพิกัด 2000 MVA หรือมากกว่า ที่ 550kV
- แม้ GIL จะมีค่าคาปาซิแตนซ์มากกว่า OHL หลายเท่า แต่ก็ยังคงน้อยกว่า XLPE
- ส่วนประกอบภายในของ GIL นั้นไม่มีปัญหาจากปัจจัยสภาพแวดล้อม เช่น หิมะ ลม หรือ มลภาวะในอากาศ
- GIL มีนั้นเกือบไม่มีปัญหาจากปรากฏการณ์ aging
- GIL นั้นมีความยืดหยุ่นสูงมาก สามารถต่อได้ในทุกมุมทุกองศา
- GIL ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเรื่องการบดบังทัศนียภาพ
- GIL มีการปล่อยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าน้อย
- GIL มีความเสี่ยงไฟไหม้ต่ำ เพราะส่วนประกอบต่าง ๆ ใน GIL นั้นไม่ติดไฟ
- เมื่อเทียบกับ OHL และ XLPE GIL นั้นมีความน่าเชื่อถือสูงกว่า

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

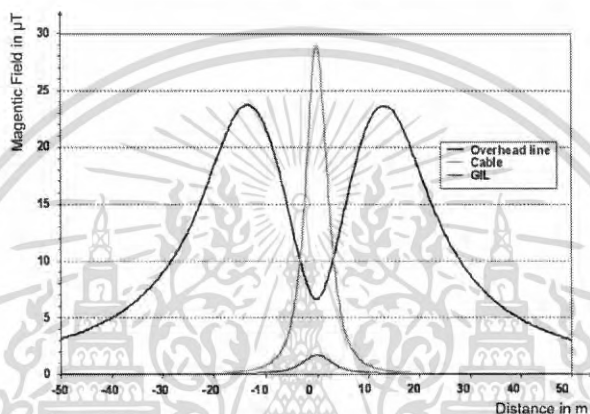
ข้อมูลต่าง ๆ	GIL	OHL	XLPE cable (2/phase)
พิกัดกระแส	3000	3000	3000
การสูญเสียในสายส่ง (W/m) ที่ 3000 A	180	540	166
การสูญเสียไดอิเล็กทริก (W/m)	-	2.4	15
การสูญเสียทั้งหมด (W/m)	180	542.4	181
ความต้านทาน AC ($\mu\Omega/m$)	6.7	20	6.0
ความเหนี่ยวนำ (nH/m)	162	892	189
ความจุไฟฟ้า (pF/m)	68.6	13	426
กัปดาห์เสิร์จ (Ω)	48.6	263	21

2.3.3 GIL กับการปัญหาเกี่ยวกับการปล่อยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งพื้นฐานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงและมีความจำเป็นที่ต้องมีการจัดการให้ผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง มีความน่าเชื่อถือตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น ๆ ผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลกระทบบนอุปกรณ์ จะใช้ EMC (Electromagnetic Compatibility) บอกความสามารถของอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้โดยที่ไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และในขณะเดียวกันต้องสามารถทนต่อการถูกรบกวนจากปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก
- ผลกระทบต่อมนุษย์ โดยทั่วไปสนามแม่เหล็กของโลกที่มีอยู่ในธรรมชาติเป็นค่าคงที่ที่เกิดจากผลของขั้วเหนือและขั้วใต้ของโลก มีค่าอยู่ที่ 40 μT ส่วนค่าสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศโดยมีค่าเท่า 20 kV/cm ในวันที่อากาศมีดีคริม และจะมีค่า 0.5 kV/cm ในวันที่อากาศปลอดโปร่ง



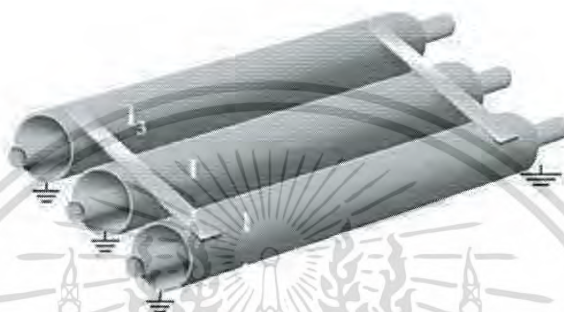
รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในระบบ OHL Cable และ GIL[2]

ภาพที่ 2.16 เป็นระบบการส่งจ่าย 400 kV 1000 MVA มีกระแสไหลผ่าน 1450 A จะเห็นได้ว่า Overhead line (OHL) จะให้ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงเป็นระยะที่กว้าง ที่ระยะ 50 เมตรจะเห็นว่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่มีค่าเท่ากับ 3 μT ซึ่งถือเป็นปริมาณที่มากโดยปกติแล้วการกำหนดค่ามาตรฐานความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมีกำหนดในประเทศแถบยุโรปบางประเทศ เช่นของประเทศสวีเดนตามมาตรฐานได้กำหนดสำหรับความถี่กระแสสลับ 50Hz ห้ามเกิน 100 μT และแนะนำสำหรับพื้นที่ที่มีคนอยู่ประจำหรือที่ที่เป็นแหล่งสาธารณะเข้าถึงได้ง่าย ค่าที่กำหนดเพื่อป้องกันไว้ก่อนที่ 1 μT ส่วนในอิตาลีกำหนดสำหรับความถี่กระแสสลับ 50Hz ห้ามเกิน 100 μT เช่นกัน ส่วนที่ค่าแนะนำสำหรับพื้นที่สาธารณะเข้าถึงได้ง่าย จะให้ไว้ที่ 0.5 μT และสูงสุดที่ 2 μT ติดต่อกันเป็นเวลานาน 0.1 วินาที แต่ในระบบเคเบิลค่าของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงที่สุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณรอบ ๆ สายเคเบิลมีค่าเท่ากับ 28 μT และมีค่าอยู่ในระยะไม่เกิน 20 เมตร ส่วนในระบบ GIL จากรูปจะเห็นได้ว่ามีค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กต่ำที่สุดเนื่องด้วยโครงสร้างที่ตัวถังมีกระแสไหลในทิศที่ตรงข้ามกับกระแสในตัวนำ โดยกระแสนี้เกิดจากการเหนี่ยวนำตามกฎของฟาราเดย์ () ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสุทธิสามารถหาได้จาก ทฤษฎีการทับซ้อน(Superposition Theorem) ของกระแสในตัวนำและในตัวถังที่เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเกิดกระแสในทิศทางตรงข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 กระแสเหนี่ยวนำทิศทางตรงข้ามที่ตัวถัง GIL [2]

ด้วยเทคโนโลยีที่มีความก้าวหน้าและคำนึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นจึงมีการออกแบบให้ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด การออกแบบให้มีการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ตัวถังของ GIL เพื่อสร้างกระแสเหนี่ยวนำในทิศทางตรงข้ามกับกระแสในตัวนำภายในท่อ GIL จะช่วยลดความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่จะออกไปภายนอกของตัวถัง GIL ได้นั่นเอง



รูปที่ 2.17 ระบบการต่อสะพานกราวด์ของระบบ GIL 3 เฟส [2]

นอกจากนี้เนื่องจากมีกระแสเหนี่ยวนำที่มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสภายในตัวนำเกิดขึ้นที่ตัวถัง จึงมีการต่อสะพานกราวด์ทั้ง 3 เฟสทั้งหัวและท้าย 2 ด้าน เพื่อให้กระแสรวมสุทธิที่ตัวถังเป็นศูนย์จากการรวมกันทางเวกเตอร์ของกระแสทั้ง 3 เฟส ที่มีความต่างเฟสห่างกันเฟสละ 120° ระยะเวลาต่อระบบกราวด์หัวท้ายจะเป็นระยะที่เหมาะสมและมีเป็นระบบต่อลงดินโดยตรงเพื่อให้สนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปกระแสเหนี่ยวนำที่ตัวถังที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 80-85 เปอร์เซ็นต์ของกระแสในตัวนำ

2.4 แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)

2.4.1 คุณสมบัติทางเคมี [4]

โครงสร้างของ SF_6 ประกอบด้วย S 1 อะตอม F 6 อะตอมการจัดเรียงอิเล็กตรอนและโครงสร้างของ SF_6 นั้นถือว่ามีเสถียรมาก โครงสร้างทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะเกิดการสลายตัว ไนโวไฟ ไม่เกิดปฏิกิริยากับทั้ง น้ำ กรด และคลอไรด์ ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสความดัน 1 bar มีค่าประมาณ 6.139 kg/m^3 ซึ่งสูงกว่าอากาศในสถานะเดียวกันถึง 5 เท่า แต่การจัดเก็บพลังงานภายในเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินั้นมากกว่าอากาศถึง 3.7 เท่าส่งผลให้แก๊สนี้ ไม่ค่อยเหมาะในการใช้ระบายความร้อนแต่ยังพอใช้ได้ในเบรกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า [4]

SF₆ เป็นแก๊สขั้วลบ ส่งผลให้เมื่อมีการอาร์คเกิดขึ้นแก๊สนี้จะดูดซับอิเล็กตรอนอิสระเข้ามา ส่งผลให้อิออนหนักและใหญ่ขึ้น คุณสมบัติในการเป็นฉนวนถือว่ายอดเยี่ยม ดีกว่าอากาศถึง 2.5 เท่าที่ความดัน 1 บาร์

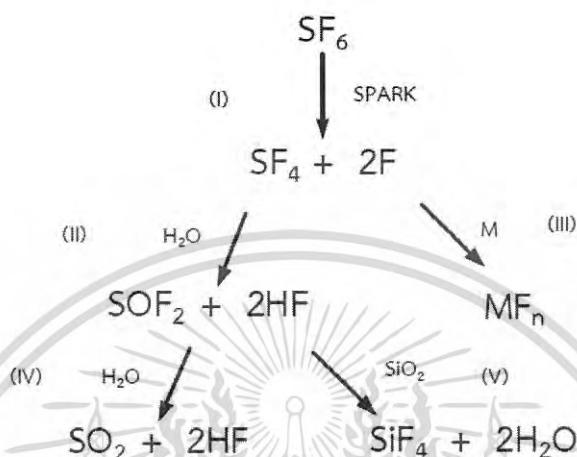
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ [4]

Density at 20 °C	6.14 k/m ³
Color of Gas	Colorless
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.lt is 3 times less than that in air
Refractive Index	1.000783
Formation Heat	-1.2221.66 Kf/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 at 25 °C and 1 bar absolute	< 2 × 10 ⁻⁷

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 กลไกการสลายตัวของ SF₆ [5]

แม้ SF₆ จะเป็นแก๊สเฉื่อยและไม่มีพิษ แต่เมื่อ SF₆ เกิดการสลายตัวขึ้น ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนั้นมีพิษและมีฤทธิ์กัดกร่อนส่งผลกระทบต่อทั้งระบบ GIS และ GIL



รูปที่ 2.18 กระบวนการสลายตัวของแก๊ส SF₆ [6]

2.4.4 การกำจัดผลิตภัณฑ์จากการอาร์คของ SF₆ [7]

ผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของ SF₆ นั้นมีพิษทั้งกับมนุษย์และระบบฉนวน ดังนั้นเพื่อลดปริมาณผลิตภัณฑ์เหล่านั้นจึงเติมตัวดูดซับเช่น Alumina และ Charcoal

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับระหว่าง Alumina และ Charcoal [7]

ผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับ	ปริมาณที่ถูกดูดซับ ต่อ Alumina 1 g (cm ³)	ปริมาณที่ถูกดูดซับ ต่อ Charcoal 1 g (cm ³)
SOF ₂	32	52
SO ₂ F ₂	12	35
SF ₄	35	48
SOF ₄	20	40
SO ₂	38	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สนามไฟฟ้าและการทำนายปรากฏการณ์ดิสชาร์จ [8]

สนามไฟฟ้า อาจกล่าวได้ว่าเป็นภาระทางไฟฟ้าที่ตัวกลางใด ๆ ภายใต้แรงดันไฟฟ้าจะต้องแบกรับ ในแง่เดียวกับความเค้นแรงกด ซึ่งเป็นภาระทางกลที่ตัวกลางใด ๆ ภายใต้แรงกดต้องแบกรับ และเมื่อสนามไฟฟ้าหรือความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าที่ตัวกลางจะแบกรับได้ จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการดิสชาร์จ และอาจมีชื่อเรียกของระดับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทนได้ตามประเภทการดิสชาร์จ

การดิสชาร์จอาจแบ่งออกได้เป็น การดิสชาร์จแบบสมบูรณ และโคโรนาดิสชาร์จ การดิสชาร์จแบบสมบูรณเกิดขึ้นเมื่อมีแนวเส้นใด ๆ ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าที่ตัวกลางจะแบกรับได้ลากตัดผ่านทั้งตัวกลางนั้น เราเรียกระดับแรงดันที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การดิสชาร์จแบบสมบูรณว่าแรงดันเบรกดาวน U_b ส่วนโคโรนาดิสชาร์จเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าที่ตัวกลางจะแบกรับได้เฉพาะบางส่วนของตัวกลางนั้น เราเรียกระดับแรงดันที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จว่า แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด U_i

แรงดันเบรกดาวนและแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด แม้จะมีความหมายในทางกายภาพแตกต่างกันดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งสำหรับกรณีที่เกิดโคโรนาดิสชาร์จขึ้นแล้ว พบว่าจะไม่สามารถทำนายพฤติกรรมการเบรกดาวนสมบูรณต่อจากนั้นได้อย่างถูกต้องเลย เพราะปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จเป็นเหตุให้เกิดผลของประจุค้าง อย่างไรก็ตาม จากองค์ความรู้ทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง พบว่าในการคำนวณแรงดันเบรกดาวนและแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดในแก๊สใช้สมการความสัมพันธ์เดียวกัน

ดังนั้น หากมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องของสนามไฟฟ้า สามารถคำนวณสนามไฟฟ้าภายในตัวกลางต่าง ๆ ด้วยหลักทางคณิตศาสตร์, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข หรือจำลองผลสนามไฟฟ้าด้วยซอฟต์แวร์จำลองผลต่าง ๆ แล้ว และทราบความสัมพันธ์ที่สำคัญในการคำนวณแรงดันเบรกดาวนหรือแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ก็ย่อมที่จะสามารถคำนวณหาแรงดันเบรกดาวนหรือแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดตลอดจนวิเคราะห์ปรากฏการณ์ดิสชาร์จสมบูรณและปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จที่เกิดขึ้นได้

ทั้งนี้ ความสัมพันธ์และศาสตร์ที่สำคัญในการคำนวณแรงดันเบรกดาวนหรือแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ผู้ศึกษาจะต้องมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องของสัมประสิทธิ์การไอออไนเซชัน และกลไกการเกิดเบรกดาวน โดยเฉพาะในส่วนของกลไกการเกิดเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานในการคำนวณหาแรงดันที่ก่อให้เกิดสถานะสนามไฟฟ้าวิกฤต อันเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการดิสชาร์จแบบสมบูรณหรือปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จดังกล่าวต่อไป

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สนามไฟฟ้าในบริเวณหนึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้คณิตศาสตร์ในเรื่องของสมการเชิงอนุพันธ์หลายตัวแปร ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข หรืออาจจำลองผลด้วยซอฟต์แวร์ที่สามารถคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ซับซ้อนได้ ณ ที่นี้จะกล่าวถึงการหาสนามไฟฟ้าแบบละเลยผลของช่วง Transient และผลของเวกเตอร์โพลาริซชันทางไฟฟ้า ซึ่งมีหลักการดังต่อไปนี้ ความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า จะขึ้นกับสนามไฟฟ้าและเวกเตอร์การโพลาริซชันทางไฟฟ้า

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.1)$$

โดยสำหรับอัตราเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ c_0 , ความซึมซาบทางแม่เหล็กในสุญญากาศ μ_0

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c_0^2 \mu_0} = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

ซึ่งสำหรับวัสดุที่มีสมบัติเป็นเชิงเส้นและมีสภาพยอมทางไฟฟ้า χ_e จะมีเวกเตอร์โพลาริซชันทางไฟฟ้า

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \quad (2.2)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการ (2.1) และ (2.2)

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \mathbf{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.3)$$

เรากล่าวว่า ϵ_0 เป็นค่าความยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของตัวกลาง

พิจารณากฎของเกาส์จากสมการของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (2.4)$$

เมื่อพิจารณาที่รอยต่อระหว่างสองผิวตัวกลาง โดย ρ_s เป็นความหนาแน่นประจุค้ำเชิงผิว

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \rho_s \quad (2.5)$$

พิจารณาสถาปัตยกรรมไฟฟ้า \mathbf{E} ในบริเวณที่มีความต่างศักย์ V และเวกเตอร์ศักย์แม่เหล็ก \mathbf{A}

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{d\mathbf{A}}{dt}$$

เมื่อละเลยผลจากการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ศักย์แม่เหล็ก \mathbf{A} จะได้ว่า

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2.6)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.3) และ (2.5)

$$\mathbf{n} \cdot [(\epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E})_1 - (\epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E})_2] = \rho_s \quad (2.7)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.6) และ (2.7)

$$-\mathbf{n} \cdot [(\epsilon_r \epsilon_0 \nabla V)_1 - (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla V)_2] = \rho_s \quad (2.8)$$

พิจารณาค่าความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.5) เมื่อความหนาแน่นประจุค้ำเชิงผิว ρ_s เป็นศูนย์

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.9)$$

พิจารณาค่าความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.8) เมื่อความหนาแน่นประจุค้ำเชิงผิว ρ_s เป็นศูนย์

$$\mathbf{n} \cdot [(\epsilon_r \epsilon_0 \nabla V)_1 - (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla V)_2] = 0 \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.8) ตัวแปรที่มีผลต่อการคำนวณได้แก่ ค่าความยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ ϵ_r , ศักย์ไฟฟ้า V , และความหนาแน่นประจุเชิงผิว ρ_s ดังนั้น ซอฟต์แวร์จำลองผลสนามไฟฟ้าโดยทั่วไป จึงให้กำหนดเงื่อนไขควบคุมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรเหล่านี้ เช่น สมบัติของวัสดุ (โดยสนใจค่าความยอมทางไฟฟ้า), ศักย์ไฟฟ้าบนผิวตัวกลาง, ศักย์ไฟฟ้าจากผลของประจุค้าง, หรือความหนาแน่นของประจุค้างเชิงผิว ซึ่งล้วนก็สรุปรวมได้เป็นตัวแปรที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นทั้งสิ้น ในขณะที่ผิวบนสุดของแบบจำลองจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขในสมการที่ (2.9) เพื่อเตรียมคำนวณตามสมการที่ (2.10)

เมื่อกำหนดเงื่อนไขควบคุมให้กับแบบจำลองเสร็จแล้ว จะต้องทำ Mesh Generation คือ กำหนดความละเอียดในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของซอฟต์แวร์นั้น ๆ เช่นซอฟต์แวร์ที่คำนวณด้วยระเบียบวิธี Finite Element Method (FEM) ก็จะทำให้การสร้าง Mesh สำหรับคำนวณแบบ FEM เป็นต้น โดยสำหรับการจำลองสนามไฟฟ้า บริเวณที่ควรกำหนดให้มีความละเอียดสูงคือ บริเวณที่มีบริเวณปลายแหลมหรือขอบคม หรือบริเวณที่ต้องการศึกษาสนามไฟฟ้าเป็นพิเศษ และระยะเวลาในการคำนวณจะเพิ่มมากขึ้นตามความละเอียดในการคำนวณที่เพิ่มขึ้น

สุดท้าย การส่งคำนวณจะทำให้ซอฟต์แวร์จำลองผลทำการคำนวณหาปริมาณทางฟิสิกส์ที่ต้องการด้วยสมการและเงื่อนไขควบคุมทั้งหมดที่ได้กำหนดไว้ เช่น ซอฟต์แวร์อาจคำนวณหาศักย์หรือสนามไฟฟ้า ณ จุดต่าง ๆ ได้จากสมการที่ (2.8) แล้วทำการแปลงผลเป็นอีกปริมาณหนึ่งได้ด้วยความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.6) เป็นต้น จึงได้ผลจากการจำลองเป็นสนามไฟฟ้า ณ จุดต่าง ๆ ออกมา

ข้อมูลสนามไฟฟ้า ณ จุดต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณหรือการจำลองผล ถือเป็นข้อมูลที่สำคัญในการทำนายปรากฏการณ์ดิสชาร์จ เนื่องจากสามารถบอกได้ทั้งความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ตลอดจนการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายใต้ระดับแรงดันที่กำหนด ในเงื่อนไขควบคุม ดังนั้น เมื่อได้ผลการคำนวณหรือผลการจำลองสนามไฟฟ้าแล้ว หากมีความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมสนามไฟฟ้าเนื่องจากแรงดัน และกลไกการเกิดเบรกดาวน์ของแก๊ส ผู้ศึกษาย่อมสามารถทำนายปรากฏการณ์ดิสชาร์จได้

กลไกการเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์ของ Meek และ Loeb และเงื่อนไขสตรีมเมอร์ของ Rather เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha}(x) dx = K_{st} \quad (2.11)$$

เมื่อ x_c คือ ระยะอะวาลานซ์วิกฤต

$\bar{\alpha}(x)$ คือ สัมประสิทธิ์การไอออไนซ์แบบ Effective

K_{st} คือ ค่าคงที่สตรีมเมอร์

ซึ่งฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การไอออไนซ์แบบ Effective จะเป็นคุณลักษณะของแก๊สแต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง และผ่านการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ออกมาเป็นสมการรูปแบบต่าง ๆ เช่น สำหรับแก๊ส SF₆ ที่ระดับ E/P ในช่วง 60 – 120 kV/cm·bar

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} = C \left[\frac{E}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_0 \right] \quad (2.12)$$

โดยที่ $C = 28 \text{ kV}^{-1}$ และ $\left(\frac{E}{P} \right)_0 = 87.7 \text{ kV/cm} \cdot \text{bar}$

สำหรับอากาศจากการนำเสนอของ Schumann ที่ระดับ E/P ในช่วง 21.4 – 60 kV/cm·bar

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} = C \left[\frac{E}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_0 \right]^2 \quad (2.13)$$

โดยที่ $C = 0.22 \text{ kV}^{-1}$ และ $\left(\frac{E}{P} \right)_0 = 24.4 \text{ kV/cm} \cdot \text{bar}$

ข้อมูลสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดจะถูกนำไปแทนในสมการที่ (2.12) สำหรับแก๊ส SF₆, (2.13) สำหรับอากาศ, หรือสมการอื่น ๆ ที่เหมาะสม เมื่อผลของปริพันธ์จำกัดเขตตามสมการที่ (2.11) เป็นจริง นั่นคือข้อมูลสนามไฟฟ้านั้น ๆ เป็นข้อมูลสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จขึ้น

ข้อมูลสนามไฟฟ้า 1 ชุด จะได้จากการคำนวณหรือจำลองผลด้วยเงื่อนไขควบคุมแรงดัน 1 ค่า ซึ่งผลการคำนวณปริพันธ์จำกัดเขตเปรียบเทียบกับค่าคงที่สตรีมเมอร์ดังสมการที่ (2.11) อาจได้ค่าของปริพันธ์จำกัดเขตสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าคงที่สตรีมเมอร์ ถ้าหากค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าคงที่สตรีมเมอร์ แสดงว่าแรงดันในเงื่อนไขควบคุมมีค่าสูงเกิน แต่ถ้าค่าที่ได้ต่ำกว่าค่าคงที่สตรีมเมอร์ แสดงว่าแรงดันในเงื่อนไขควบคุมมีค่าต่ำเกิน และถ้าหากค่าที่ได้มีค่าเท่ากับค่าคงที่สตรีมเมอร์พอดี แสดงว่าระดับแรงดันดังกล่าวเป็นแรงดันเบรกดาวน (ดิสชาร์จแบบสมบรูณ์) หรือแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด (โคโรนาดิสชาร์จ)

เนื่องจากการจะจำลองผลแล้วปรับแรงดันในเงื่อนไขควบคุมทุก ๆ ครั้งที่คำนวณได้ค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าคงที่สตรีมเมอร์ ย่อมเป็นการเสียเวลามาก เราจึงสามารถใช้ประโยชน์จากความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ U และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{\max} ได้ คือ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.14)$$

ซึ่งสำหรับระยะห่าง d และค่า η^* ที่คงที่เนื่องจากรูปทรงเรขาคณิตในการจำลองที่คงที่ การปรับเปลี่ยนเฉพาะแรงดันในเงื่อนไขควบคุมย่อมทำให้ชุดข้อมูลสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโดยแปรผันตรงตามแรงดันที่เปลี่ยนไปเสมอ ดังนั้น เราจึงสามารถใช้ความรู้ในเรื่องระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ทำการเขียนโปรแกรมให้ปรับเปลี่ยนแรงดันไปตามเงื่อนไขจากผลการคำนวณในสมการที่ (2.11) และแปรผันชุดข้อมูลสนามไฟฟ้าทั้งหมดด้วยสัดส่วนเดียวกัน คำนวณจนกว่าจะได้ชุดข้อมูลสนามไฟฟ้าที่มีปริพันธ์จำกัดเขตตามสมการที่ (2.11) เท่ากับค่าคงที่สตรีมเมอร์ K_{st} พอดี ก็จะสามารถหาแรงดันเบรกดาวนหรือแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด และทำนายปรากฏการณ์ดิสชาร์จได้

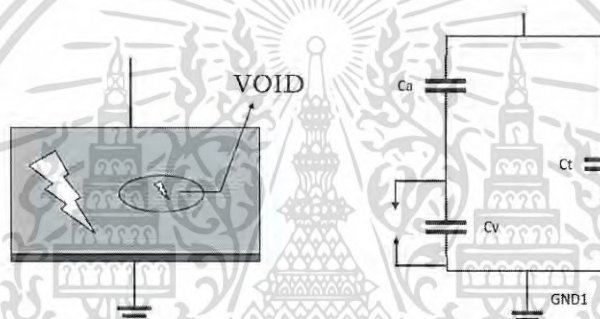
สุดท้าย เมื่อได้ระดับแรงดันวิกฤตดังกล่าวแล้ว เราจำแนกว่าเป็นปรากฏการณ์ดิสชาร์จแบบสมบรูณ์หรือไม่โดยการพิจารณาสนามไฟฟ้าที่ระดับแรงดันวิกฤตนั้น หากสนามไฟฟ้าตลอดแนวมีค่าสูงกว่าค่าวิกฤต $(E/P)_0$ เรากล่าวว่าเป็นปรากฏการณ์ดิสชาร์จแบบสมบรูณ์ และเรียกแรงดันที่คำนวณได้ว่าแรงดันเบรกดาวน U_b แต่ถ้าสนามไฟฟ้าบางส่วนมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต $(E/P)_0$ เรากล่าวว่าเป็นปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จ และเรียกแรงดันที่คำนวณได้ว่าแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด U_i

2.6 การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

การตรวจสอบและวินิจฉัยฉนวนไฟฟ้า เป็นสิ่งสำคัญในการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าแรงสูง การที่เรามีการตรวจสอบฉนวนไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ จะทำให้เราพบกับปัญหาข้อบกพร่องก่อนที่อุปกรณ์จะเกิดความเสียหายขึ้น โดยในปัจจุบันวิธีที่ได้รับความนิยมและมีศักยภาพสูงสุดในการตรวจสอบฉนวน คือ การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน [9]

2.6.1 การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) [9]

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD) คือ การเกิดการเสียหายฉนวนเพียงบางส่วนของระบบการฉนวน โดยการเกิด PD นั้นจะเกิดในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอหรือฉนวนที่ในเนื้อมีส่วนเจือปนส่งผลให้สนามไฟฟ้าบางส่วนมีค่าสูงเกินกว่าค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ การเกิด PD นั้นมีลักษณะเหมือนการเกิดตัวเก็บประจุแฝงขึ้นตามรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ประเภทของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ คือ 1) โครน่า ดิสชาร์จ 2) ดิสชาร์จตามผิว 3) ดิสชาร์จภายใน [9]

ในแต่ละครั้งที่เกิดการดิสชาร์จจะเกิดพลังงานถ่ายเทให้แก่ฉนวน ส่งผลให้ความร้อนเพิ่มขึ้นในบางจุด ความร้อนจะก่อให้เกิดความเสียหาย โดยความเสียหายนั้นจะเริ่มจากจุดเล็ก ๆ ก่อนที่จะค่อยขยายตัวขึ้น จนนำไปสู่การเบรกดาวนในที่สุด ซึ่งในแต่ละครั้งที่เกิดการถ่ายเทพลังงาน จะเกิดสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ เช่น แสง รังสี เสียง คลื่นความถี่ เป็นต้น โดยการตรวจวัดวัดสัญญาณดิสชาร์จนั้นเราจะวัดจากสัญญาณเหล่านี้ [9]

2.6.2 วิธีการตรวจวัดวัตต์สัญญาณดิสชาร์จที่นิยมใช้ในระบบ GIS, GIL [9]

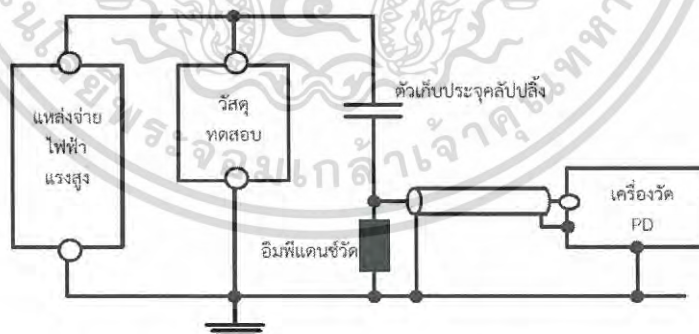
- การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนจากแสง (Light Output) ในการเกิดดิสชาร์จแต่ละครั้งจะเกิดแสงจากการสปาร์คขึ้น โดยเราจะใช้หลอดแสงฟลูออเรสเซนต์เพื่อตรวจสอบว่ามีการเกิดดิสชาร์จขึ้นหรือไม่ ข้อดีคือง่ายและรวดเร็ว ข้อเสียคือเราไม่สามารถบอกตำแหน่งที่เกิดได้

- การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนจากเสียง (Acoustic Emission) เมื่อเกิดการดิสชาร์จขึ้นอนุภาคที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะเกิดการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ทั้งชนกันเองและกระทบผนัง ซึ่งการกระทำเหล่านั้นจะเกิดเสียงทางกล เราจะใช้เซนเซอร์ตรวจวัดเสียงทางกลเหล่านั้นจากหลายทิศทางเพื่อคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น

- การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (UHF) ในระบบสวิตช์เกียร์แบบฉนวนแก๊สขึ้น บางส่วนยังมีการเกิดดิสชาร์จเกิดขึ้น ก่อให้เกิดกระแสพัลส์ไหลเวียนภายในทรงกระบอก ซึ่งก่อให้เกิดการเบรกดาวนได้ โดยกระแสพัลส์พวกนี้เคลื่อนที่เร็วมาก ดังนั้นความถี่จึงสูงมากเช่นกัน เราจึงต้องใช้เซนเซอร์ตรวจจับวิญญูที่พัฒนาให้ตรวจจับ Transient wave ได้

- วิธีการทางเคมีในการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน (Chemical By Product) เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น SF_6 จะสลายตัวบางส่วน โดยวิธีนี้เราจะตรวจสอบสารที่เกิดจากการสลายตัวของ SF_6 วิธีการนี้แม่นยำพอสมควรในการหาตำแหน่ง แต่มีข้อเสียคือค่อนข้างช้า

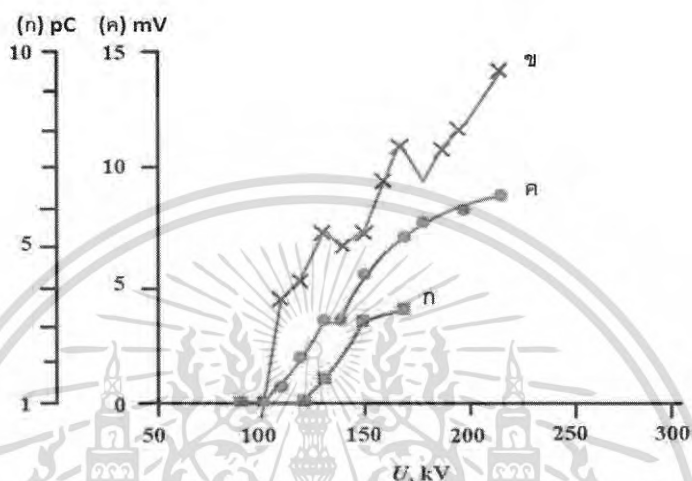
- การวัดดิสชาร์จบางส่วนทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC60270 (ช่วงความถี่ 10 Hz – 1 MHz) เป็นวิธีดั้งเดิมคือวัดประจุที่เกิดจากการดิสชาร์จ โดยการต่อวงจรดังรูป ไม่ค่อยนิยมใน onsite test เพราะวิธีนี้โดนสัญญาณภายนอกรบกวนได้ง่าย



รูปที่ 2.20 วงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วน ตาม IEC 60270 [9]

2.6.3 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการวัดดิสชาร์จแบบต่าง ๆ [10]

เป็นการยากที่จะเปรียบเทียบเทคนิคที่แตกต่างกันในสภาพการทดลองที่ต่างกัน ดังนั้น CIGRE Working Group จึงทดลองโดยใช้ห้อง Chamber ยาว 6 เมตรซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบ GIS 420 kV ตรวจสอบข้อบกพร่องจาก อนุภาคโลหะอิสระ และ อนุภาคที่ติดอยู่กับพื้นผิวของสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 2.21 กราฟการเปรียบเทียบการวัดดิสชาร์จบางส่วน [10]

ชุดทดลองข้างต้นได้รับการขึ้นแรงดันอย่างช้า ๆ จนเกิดการเบรกดาวน จากหม้อแปลงทดสอบ Metal Clad 0-510 kV โดยระหว่างขึ้นแรงดันนั้นใช้เครื่องมือวินิจฉัยตามนี้

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

- Acoustic, การวัด PD ตาม IEC60270 และ UHF ทั้ง 3 มีความไวต่อการตรวจจับที่ดี
- Acoustic ไม่ก่อความรบกวนต่อระบบ สามารถใช้ได้เกือบทุกระบบ GIS แต่สัญญาณที่ได้นั้นถูกลดทอนลงจากสิ่งกีดขวางและผนัง Chamber
- การวัด PD ตาม IEC60270 ต้องใช้ External coupling capacitor และไม่สามารถวัดได้ตอน GIS ทำงานอยู่
- UHF เหมาะสมที่สุดในการเฝ้าตรวจจับ PD ขณะ GIS ทำงาน

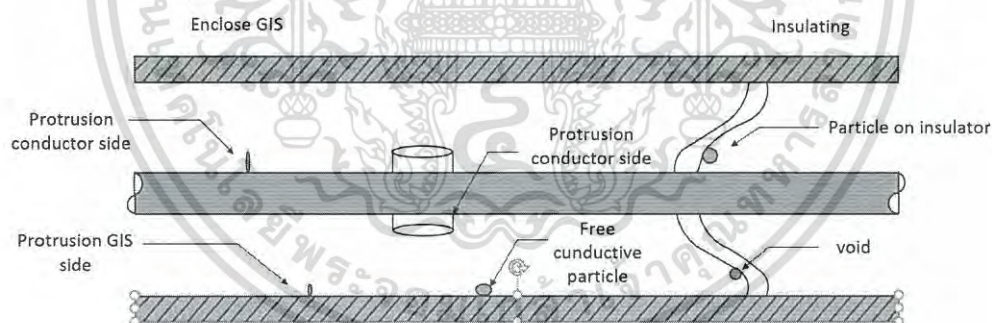
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 Ultra-high frequency (UHF)

UHF นั้นเป็นหนึ่งในวิธีหนึ่งที่ใช้วัด PD ผลลัพธ์ของการตรวจวัดด้วย UHF นั้นสามารถแสดงผ่านออสซิลโลสโคปแบบรังสีแคโทดได้ ซึ่งหมายความว่าสัญญาณที่เราวัดนั้นสามารถ นำออกมาพิจารณาในเทอมของเฟสของความต่างศักย์ โดยทั่วไป การดิสชาร์จนั้นแบ่งออกเป็น 3 ประเภทซึ่งเมื่อแสดงผลออกมา จะมีรูปแบบกราฟที่ต่างกันดังนี้ [11]

- ดิสชาร์จแบบโคโรน่า : เมื่อแสดงในรูปแบบกราฟในระบบฐานเวลาแล้ว ที่แรงดันเริ่มเกิดจะเกิดที่มุมเฟส 270 องศา ก่อน จากนั้นหากปรับแรงดันให้เพิ่มขึ้นไปก็จะเกินที่ 90 องศาด้วย
- ดิสชาร์จตามผิว : เมื่อแสดงในรูปแบบกราฟในระบบฐานเวลาแล้วจะเริ่มเกิดที่ระหว่างมุมเฟส 0-90 และ 180-270 องศา
- ดิสชาร์จภายใน : เมื่อแสดงในรูปแบบกราฟในระบบฐานเวลาแล้วจะเริ่มเกิดที่มุมเฟส 0-90 และ 180-270 องศา

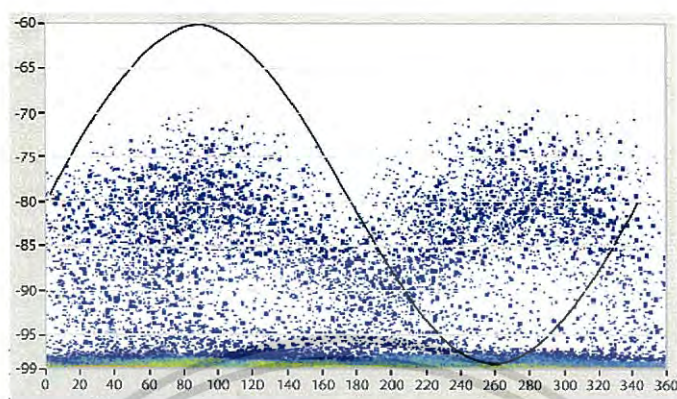
เนื่องจากการวัดสัญญาณเฉพาะภายในอย่างเดียวนั้นเป็นไปได้ยาก โดยทั่วไปมักมีสัญญาณภายนอกปะปนรบกวนมาด้วยเสมอ การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วย UHF จึงจำเป็นต้องใช้เซนเซอร์ 2 ตัวในการวัด โดยตัวแรกนั้นวัดสัญญาณทั้งหมด ทั้งสัญญาณรบกวนและสัญญาณ PD อีกตัวหนึ่งวัดเฉพาะสัญญาณรบกวน แล้วจึงนำมาสัญญาณทั้ง 2 มาเปรียบเทียบกับกันเพื่อให้ได้มาซึ่งสัญญาณเดี่ยว (Isolated Signal)



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการเกิด PD ตามจุดต่าง ๆ

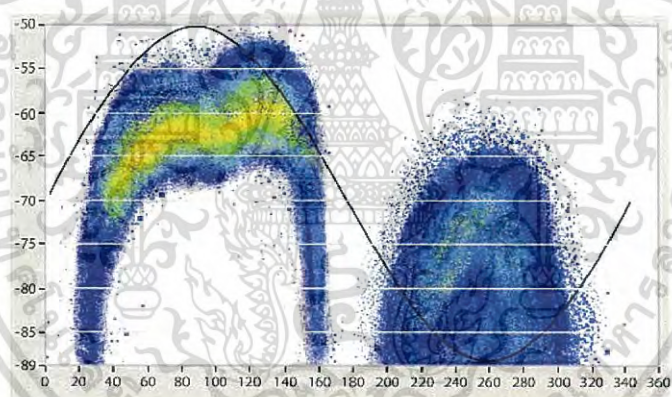
ตัวอย่างรูปจำลองสัญญาณที่ได้จากการวัด GIS GIL จากบริษัทแห่งหนึ่ง

- สัญญาณการเกิด PD จากอนุภาคตัวนำอิสระ (Free conductive particle)



รูปที่ 2.23 Free conductive particle signal

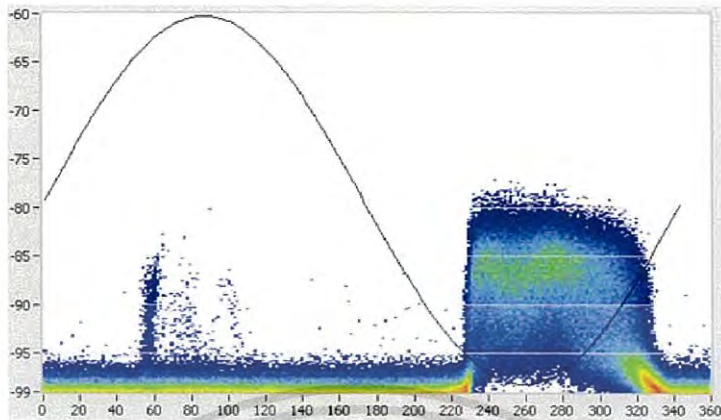
- สัญญาณการเกิด PD จากการมีบางส่วนยื่นออกมาจากฝั่ง HV (HV Protrusion)



รูปที่ 2.24 HV protrusion signal

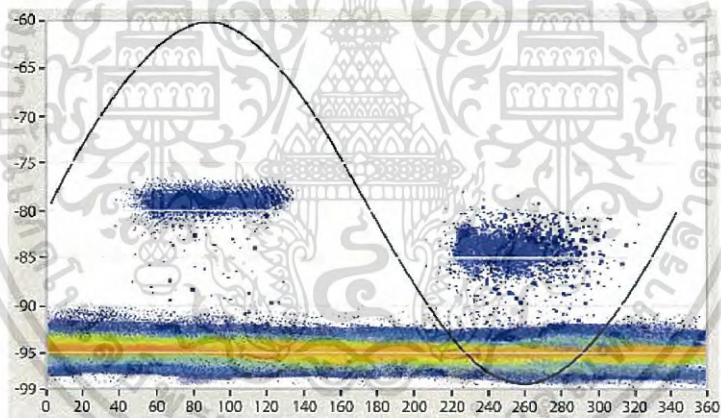
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณการเกิด PD จากการมีบางส่วนยื่นออกมาจากฝั่ง LV (LV Protrusion)



รูปที่ 2.25 LV protrusion signal

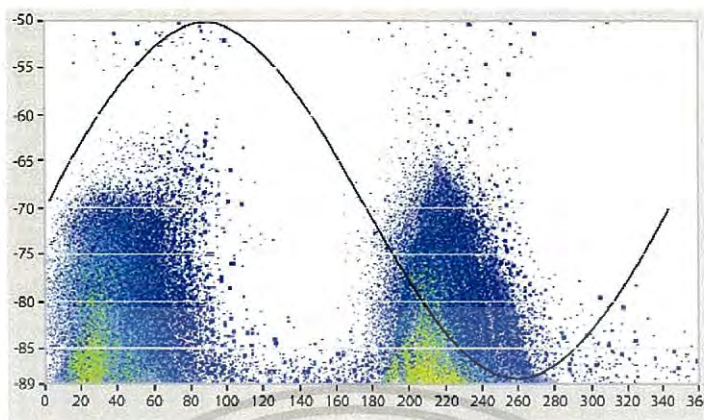
- สัญญาณการเกิด PD จากการศักย์ไฟฟ้าของประจุค้าง (Floating potential)



รูปที่ 2.26 Floating potential partial signal

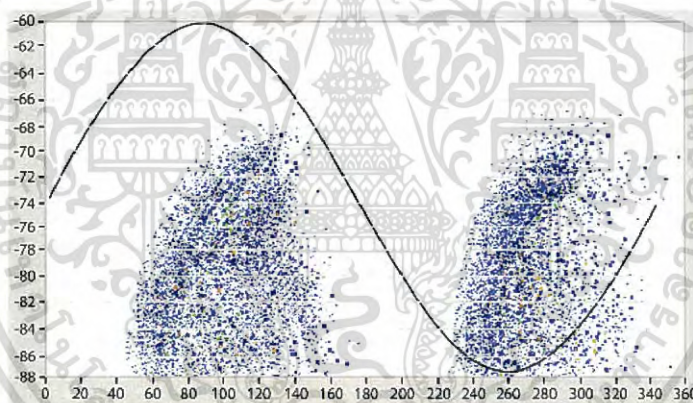
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณการเกิด PD จากอนุภาคบนผิวฉนวน (Particles on insulator surface)



รูปที่ 2.27 Particles on insulator surface signal

- สัญญาณการเกิด PD จากการมีโพรงอากาศ (Void)



รูปที่ 2.28 Void signal

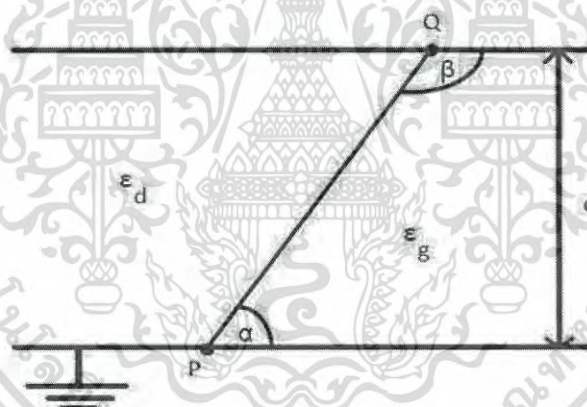
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 พฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction [12]

ระบบแก๊สภายในสถานีไฟฟ้า GIS และในระบบส่ง GIL จะไม่ได้เชื่อมต่อถึงกันทั้งหมด แต่จะถูกกันออกจากกันเป็นช่วง ๆ ด้วยฉนวนแข็งที่ทำขึ้นจาก Epoxy Resin ที่มีสมบัติความคงทนต่อแรงทางกลสูงและต้านทานกระบวนการ Tracking โดยฉนวนแข็งดังกล่าวนี้นอกจากจะใช้ในการแบ่งระบบแก๊สออกจากกันแล้ว ยังทำหน้าที่ซีฟพอร์ตแรงทางกลอีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามรูปทรงของฉนวน คือฉนวนแบบ Post-Type และฉนวนแบบ Conical

ฉนวนแบบ Post-Type มีลักษณะเป็นแท่งยึดระหว่างผิวด้านในของ Enclosure กับตัวนำ อาจมี 1 – 3 แท่งต่อหนึ่งจุด ขึ้นกับลักษณะการใช้งาน, กลไกการเคลื่อนไหวในบริเวณ, และแนวทอ ส่วนฉนวนแบบ Conical มีลักษณะเป็นโคนมีช่องตรงกลางให้ตัวนำผ่าน ส่วนตัวโคนอาจเป็นแบบมีรู เพื่อให้ระบบแก๊สเชื่อมถึงกันหรือเป็นแบบปิดทึบเพื่อแบ่งระบบแก๊สออกจากกันดังที่กล่าวมา

จุดเชื่อมระหว่างฉนวนแข็ง, แก๊ส SF_6 และตัวนำ เรียกว่าจุด Triple Junction ซึ่งจะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง อันนำไปสู่ปรากฏการณ์ดิสชาร์จ และถ้าหากมีความรุนแรงก็อาจเป็นเหตุให้เกิดกระบวนการ Tracking ที่ฉนวนแข็ง สร้างความเสียหายขึ้นในที่สุดได้



รูปที่ 2.29 ลักษณะของจุด Triple Junction

เมื่อ	P	คือ จุด Triple Junction ที่อเล็กโทรดฝั่งกราวนด์
	Q	คือ จุด Triple Junction ที่อเล็กโทรดฝั่งแรงสูง
	d	คือ ระยะจากอเล็กโทรดฝั่งแรงสูงถึงอเล็กโทรดฝั่งกราวนด์
	ϵ_g	คือ ค่าความยอมทางไฟฟ้าของฉนวนแก๊ส
	ϵ_d	คือ ค่าความยอมทางไฟฟ้าของฉนวนแข็ง
	α	คือ มุมที่ฉนวนแข็งทำกับอเล็กโทรดฝั่งกราวนด์
	β	คือ มุมที่ฉนวนแข็งทำกับอเล็กโทรดฝั่งแรงสูง

จากการศึกษาพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่จุด Triple Junction ของ Tadasu Takuma ในหัวข้อ Embedding Effect (TAKAGI EFFECT) ได้มีการอธิบายพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่จุดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าว ว่าผิวดวงระหว่างตัวกลางคือฉนวนแข็ง, ฉนวนแก๊ส และตัวนำ จะสามารถคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้า E ในบริเวณจุด P และ Q จากความสัมพันธ์

$$E = Kl^m \quad (2.15)$$

เมื่อ l คือระยะที่วัดออกมาจากจุด P หรือ Q และค่า K คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับมุม α และอัตราส่วนของ ϵ_g กับ ϵ_d

ค่า m หาได้จากความสัมพันธ์

$$\tan(n\alpha) + \epsilon_s \tan(n(\pi - \alpha)) = 0 \quad (2.16)$$

เมื่อ $\epsilon_s = \epsilon_g / \epsilon_d$ และ $n = m + 1$ โดยค่า m มีความสัมพันธ์กับมุม α สำหรับ $2 \leq \epsilon_s \leq 10$ สุดท้าย ค่า m จะเพิ่มขึ้นตามค่า ϵ_s ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.3 เมื่อ ϵ_s มีค่าเป็น 10 ส่วนค่าสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อเข้าใกล้ผิวดวงระหว่างตัวกลาง

สำหรับ $\alpha < 90^\circ$ ค่า m จะเป็นไปตามเงื่อนไข

$$m < 0 \text{ เมื่อ } \epsilon_d > \epsilon_g$$

$$m > 0 \text{ เมื่อ } \epsilon_d < \epsilon_g$$

และเมื่อ $\alpha > 90^\circ$ ซึ่งเกิดขึ้นได้ที่จุด Q ค่า m จะเป็นไปตามเงื่อนไข

$$m < 0 \text{ เมื่อ } \epsilon_d < \epsilon_g$$

$$m > 0 \text{ เมื่อ } \epsilon_d > \epsilon_g$$

ค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีนี้จะเข้าใกล้จุด P จะมีค่าสูงมากเป็นอนันต์ เมื่อ $\epsilon_d > \epsilon_g$ และเป็นศูนย์เมื่อ $\epsilon_d < \epsilon_g$

บทที่ 3

การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ

แม้ว่าเทคโนโลยี สถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส และ สายส่งฉนวนแก๊สนั้น จะพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วจนปัญหาที่เกี่ยวข้องกับระบบเหล่านี้มีจำนวนลดน้อยลง แต่แม้ว่าปัญหาจะเหลือเพียงเล็กน้อย แต่ปัญหายังคงมีอยู่ และเมื่อปัญหาต่าง ๆ นั้นเกิดขึ้น แม้จะเริ่มจากเพียงเล็กน้อย แต่หากไม่สามารถแก้ไขได้อย่างทันที่ ปัญหาเหล่านั้นก็จะก่อให้เกิดการสูญเสียมหาศาลต่อตัวระบบ จึงเป็นหน้าที่ของวิศวกรที่ต้องคอยดูแลรักษาจวบจนวินิจฉัยปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของระบบฉนวนแก๊ส โดยวิธีการที่มีประสิทธิภาพ และได้รับการยอมรับที่วิศวกรใช้ในการดูแลรักษาระบบนั้นคือ วิธีการตรวจวินิจฉัยฉนวน ซึ่งวิธีนี้จะคอยช่วยเตือนวิศวกรให้ทราบถึงปัญหา ในขณะที่ปัญหานั้นยังเพิ่งเริ่มเกิด ส่งผลให้วิศวกรสามารถแก้ไขปัญหานั้นได้อย่างทันที่ โดยในปริญญาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบปัญหาที่เกิดจากพฤติกรรมความเครียดสนามไฟฟ้าอันเป็นผลมาจากวัตถุลอย (Floating object)

โดยก่อนที่จะทำการวัดผลและทดสอบนั้นก็ต้องการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบ ซึ่งในการออกแบบชุดทดสอบให้ได้มาตรฐาน กล่าวคือมีความถูกต้องตามหลักวิศวกรรม นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการจำลองระบบต่าง ๆ ผ่านทางคอมพิวเตอร์ก่อน ซึ่งโปรแกรมที่ใช้จำลองสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ เราต้องมั่นใจว่าโปรแกรมเหล่านั้นมีความน่าเชื่อถือ การทำงานเป็นไปตามมาตรฐานต่างๆจริง ดังนั้นในบทนี้จึงจะเริ่มกล่าวตั้งแต่การพิสูจน์ความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ จวบจนการประกอบสร้างชุดทดสอบ

3.1 การพิสูจน์และปรับแก้โปรแกรมคำนวณแรงดันเบรกดาวน

ในการคำนวณออกแบบสร้างชุดทดสอบนั้น เราจำเป็นอย่างยี่งที่จะต้องใช้โปรแกรม MATLAB แปรผลค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นแรงดันเบรกดาวนต่าง ๆ ซึ่งโค้ดที่ใช้ใน MATLAB นั้น เป็นโค้ดที่ถูกเขียนขึ้นมาโดยไม่มีมาตรฐานใด ๆ รับรอง จึงมีความจำเป็นอย่างยี่งที่ต้องตรวจเช็คเสียก่อนว่าโค้ดที่ใช้งานนั้นมีความถูกต้องตามมาตรฐานหรือไม่อย่างไร และหากมีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น เราสามารถยอมรับค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนนั้นได้หรือไม่

3.1.1 หลักการทำงานโปรแกรมการคำนวณเบรกดาวน

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha}(x) dx = K_{st}$$

จากสมการที่ (2.11) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การไอออไนซ์แบบ Effective α มีค่าแปรผันตาม ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า E และความดันไฟฟ้า P และกำหนดให้ความสัมพันธ์ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของแก๊สที่ทำให้ $\alpha = 0$ คือ $(E/P)_{cr}$ โดยเมื่อเราทำการวัดข้อมูลสำหรับอากาศสังเคราะห์จะได้ $f[E/P]$ ดังสมการที่ (3.1) โดยที่ $(E/P)_{cr} = 2.588 \text{ kV/mm} \cdot \text{bar}$

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} = C \left[\frac{E}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_0 \right]^2 \quad (3.1)$$

โดยที่ $C = 1.6053 \text{ mm} \cdot \text{bar} / \text{KV}^2$

$$(E/P)_0 = 2.588 \text{ kV/mm} \cdot \text{bar}$$

$$A = 0.2873$$

$$P = 1.013 \text{ bar (ความดันที่มาตรฐานที่ใช้ในตารางที่ 1 ของ IEC 60052)}$$

แทนค่า α ที่ได้จากสมการที่ (3.1) ลงในสมการ (2.11) โดยเปลี่ยนช่วงอินทิเกรตจาก 0 ถึง x_c เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0 ถึง s และเปลี่ยนฟังก์ชัน $E(x)$ เป็น $T \cdot E(x)$

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} \int_0^s \left[PC \left[\frac{T \cdot E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_0 \right]^2 - PA \right] dx = K_{st} \quad (3.2)$$

โดยที่ T คือ ค่าคงที่ที่ทำให้สมการทั้ง 2 ข้างนั้นมีค่าเท่ากัน

$E(x)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด

เปลี่ยนการอินทิเกรตเป็นการรวมพื้นที่ย่อย ๆ แทน โดยการเปลี่ยนฟังก์ชัน $E(x)$ เป็น E_n ซึ่งค่า E_n เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดตามจำนวนข้อมูล โดย E_n มีค่าขึ้นกับแรงดันที่ป้อนใน COMSOL จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นสมการที่ (3.3)

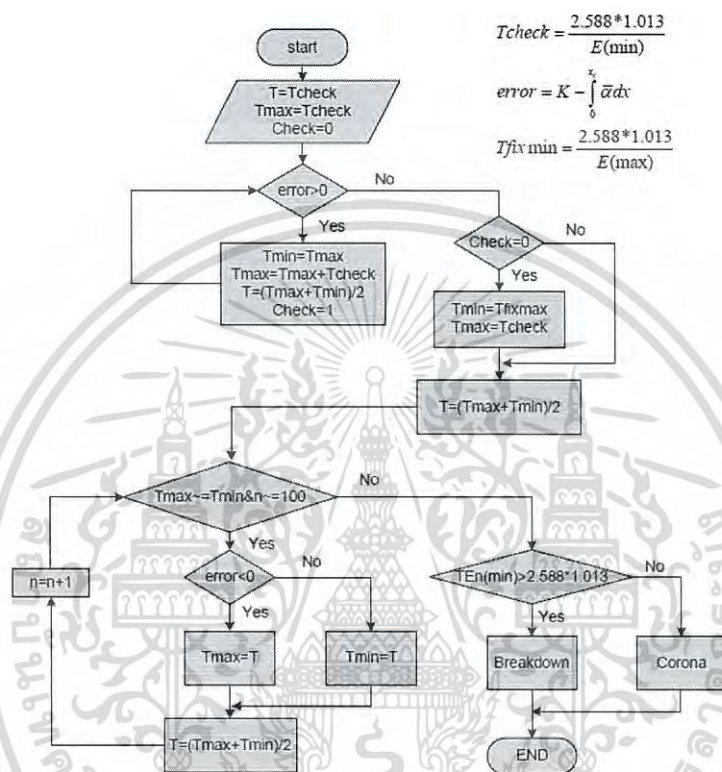
$$PC \sum_{n=1}^M B_n \left[\frac{T \cdot E_n}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_0 \right]^2 - PA \sum_{n=1}^M B_n = K_{st} \quad (3.3)$$

โดยที่ M คือ จำนวนข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.3) เมื่อเราหาค่า T ที่ทำให้สมการทั้ง 2 ข้างเท่ากันโดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยมีเงื่อนไขของ E_n และ B_n คือ

เมื่อได้ค่า T นำค่า T ที่ได้ไปคูณเข้ากับค่าแรงดันที่ป้อน จะได้มาซึ่งค่าแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด หรือ แรงดันเบรกดาวน์ โดยกระบวนการหาค่า T นั้นจะเป็นไปตาม Flow chart ในรูปที่ (3.1)

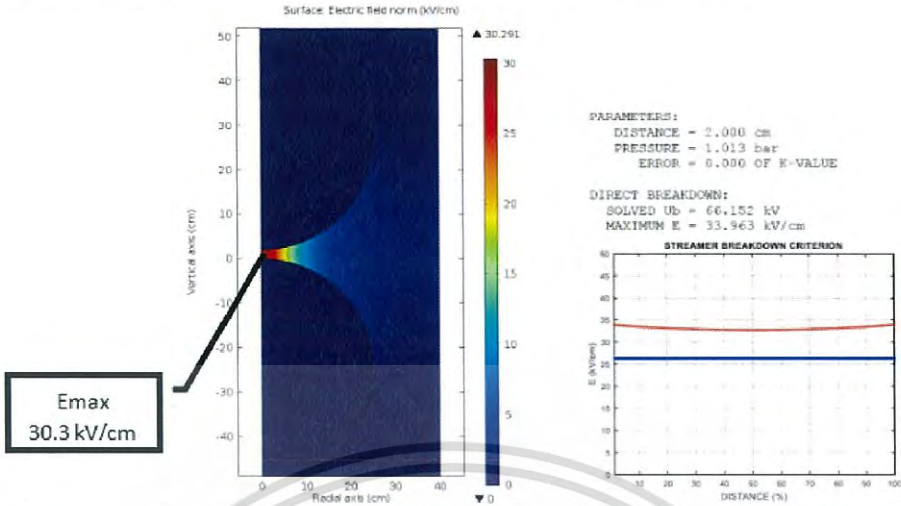


รูปที่ 3.1 Flowchart แสดงการหาค่า T ของโปรแกรมการคำนวณเบรกดาวน์

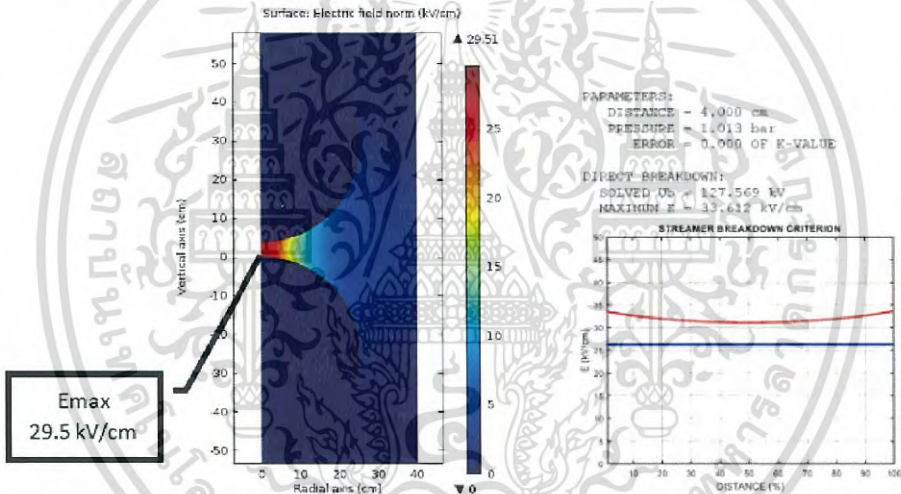
3.1.2 กระบวนการตรวจสอบความถูกต้อง

เราจะทำการทดสอบโปรแกรมคำนวณแรงดันเบรกดาวน์ โดยใช้ AutoCAD วาดอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม-ทรงกลม รัศมีและเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ จึงนำมาจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า (โดยตั้งค่าต่าง ๆ ในสภาวะมาตรฐาน) แล้วผลลัพธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาแรงดันเบรกดาวน์ด้วยโปรแกรมดังกล่าว จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตารางในมาตรฐาน IEC 60052

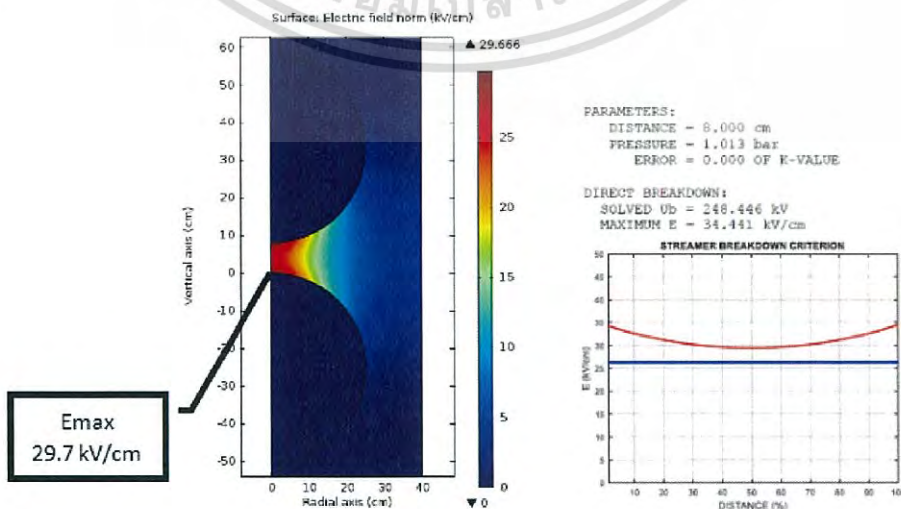
ผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าระหว่างแก๊สอิเล็กโตรดของ ทรงกลม-ทรงกลม



รูปที่ 3.2 ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ซม. ระยะแก๊ป 2 ซม. แรงดัน 59kV



รูปที่ 3.3 ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ซม. ระยะแก๊ป 4 ซม. แรงดัน 112kV



รูปที่ 3.4 ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ซม. ระยะแก๊ป 8 ซม. แรงดัน 214kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น มิใช่ผู้จัดทำเห็นใจข้อระเบียบขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรด ทรงกลม-ทรงกลม

(เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 cm ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม และจากมาตรฐาน IEC 60052)

ระยะแกป (ซม.)	แรงดันเบรกดาวน์ (U_b) / โคโรนาเริ่มเกิด (U_c)		ประเภทการเบรกดาวน์	ความเครียด สนามไฟฟ้าสูงสุด
	โปรแกรมคำนวณ (kV)	IEC 60052 (kV)		
2	66.152	59	Direct Breakdown	33.963 kV/cm
4	127.569	112	Direct Breakdown	33.612 kV/cm
8	248.446	214	Direct Breakdown	34.441 kV/cm

ในทำนองเดียวกันเราได้ทำการทดสอบระยะแกป 2 ซม. 4 ซม. และ 8 ซม. ของอิเล็กโทรด ทรงกลมรัศมี 15 cm อีกด้วย โดยมีผลการทดลองตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรด ทรงกลม-ทรงกลม

(เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม และจากมาตรฐาน IEC 60052)

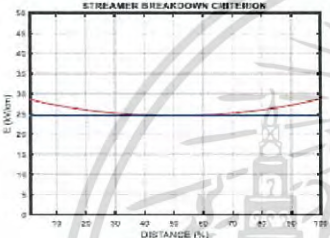
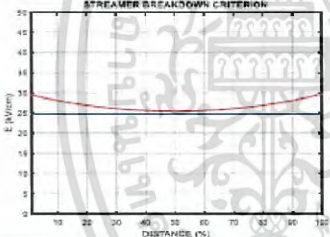

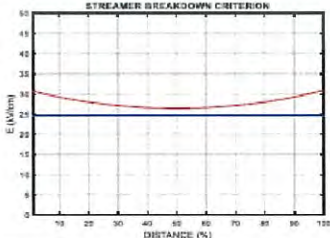
ระยะแกป (ซม.)	แรงดันเบรกดาวน์ (U_b) / โคโรนาเริ่มเกิด (U_c)		ประเภทการเบรกดาวน์	ความเครียด สนามไฟฟ้าสูงสุด
	โปรแกรมคำนวณ (kV)	IEC 60052 (kV)		
2	65.927	59	Direct Breakdown	35.947 kV/cm
4	125.495	110	Direct Breakdown	37.164 kV/cm
8	218.555	(185)	Corona Breakdown	37.783 kV/cm

จากการทดลองทั้ง 2 เส้นผ่านศูนย์กลางพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม และจากมาตรฐาน IEC 60052 มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 15 % ซึ่งไม่สามารถยอมรับได้ (เกินกว่า 3 % ที่มาตรฐานกำหนดไว้) จึงนำไปสู่กระบวนการปรับแก้โปรแกรม

3.1.3 กระบวนการปรับแก้โปรแกรม

ความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมที่ถูกทดสอบในหัวข้อที่ 3.1.2 นั้นมีค่ามากเกินไปกว่าจะยอมรับได้ จึงตั้งสมมติฐานเพิ่มเติมว่าโปรแกรมอาจเกิดความผิดพลาดจากความคลาดเคลื่อนของค่าคงที่สตรีมเมอร์ K_{st} โดยเริ่มแรกเพื่อให้ผลการคำนวณเป็นไปตามผลการนำเสนอของ Schumann เราจึงทำการปรับแก้ค่า $(E/P)_0$ เป็น 24.4 kV/cm·bar และปรับค่า C เป็น 0.22 cm·bar/kV² จากนั้นจึงทำการจำกัดขอบเขตการศึกษา แล้วทดลองปรับหาค่า K_{st} ที่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ผลการจำลองหาค่าคงที่สตรีมเมอร์ที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 3.3 ผลการจำลองหาค่า K_{st} ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอิเล็กโทรดทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ระยะแก๊ป 8 cm) โดยการปรับค่า K_{st} ในช่วง 0-20 ทีละ 5

	<p>PARAMETERS: DISTANCE = 8.000 cm PRESSURE = 1.013 bar K-VALUE = 5.000 ERROR = 0.000 OF K-VALUE</p> <p>CORONA BREAKDOWN: SOLVED U_i = 207.157 kv MAXIMUM E = 28.718 kV/cm</p>
	<p>PARAMETERS: DISTANCE = 8.000 cm PRESSURE = 1.013 bar K-VALUE = 10.000 ERROR = 0.000 OF K-VALUE</p> <p>DIRECT BREAKDOWN: SOLVED U_b = 214.050 kv MAXIMUM E = 29.673 kV/cm</p>
	<p>PARAMETERS: DISTANCE = 8.000 cm PRESSURE = 1.013 bar K-VALUE = 15.000 ERROR = 0.000 OF K-VALUE</p> <p>DIRECT BREAKDOWN: SOLVED U_b = 218.844 kv MAXIMUM E = 30.338 kV/cm</p>
	<p>PARAMETERS: DISTANCE = 8.000 cm PRESSURE = 1.013 bar K-VALUE = 20.000 ERROR = 0.000 OF K-VALUE</p> <p>DIRECT BREAKDOWN: SOLVED U_b = 222.752 kv MAXIMUM E = 30.880 kV/cm</p>

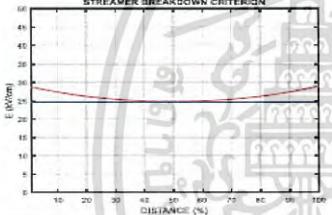
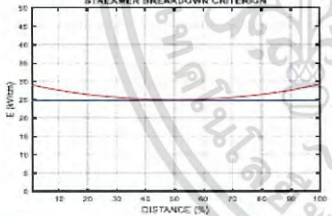
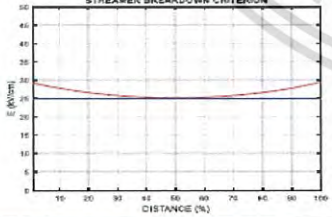
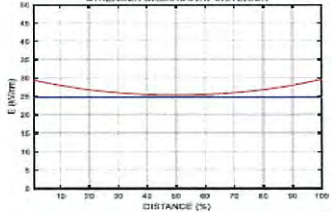
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 แสดงความคลาดเคลื่อนจากการปรับค่า K_{st} สำหรับอิเล็กโทรดทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ระยะแกป 8 cm)

K_{st}	แรงดันเบรกดาวน, แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด กรณีอิเล็กโทรดทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ซม. ระยะแกป 8 ซม.		
	แรงดันที่คำนวณ	แรงดันมาตรฐาน IEC	ความคลาดเคลื่อน
5.00	207.157 kV	214 kV	-3.20%
10.00	214.050 kV	214 kV	0.02%
15.00	218.844 kV	214 kV	2.26%
20.00	222.752 kV	214 kV	4.09%

จาก พบว่าค่า K_{st} ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงที่ 5 ถึง 10 จึงทำการตรวจสอบในช่วง 5 ถึง 10 อีกครั้งเพื่อความแม่นยำ โดยค่อย ๆ ปรับค่า K_{st} ทีละ 1

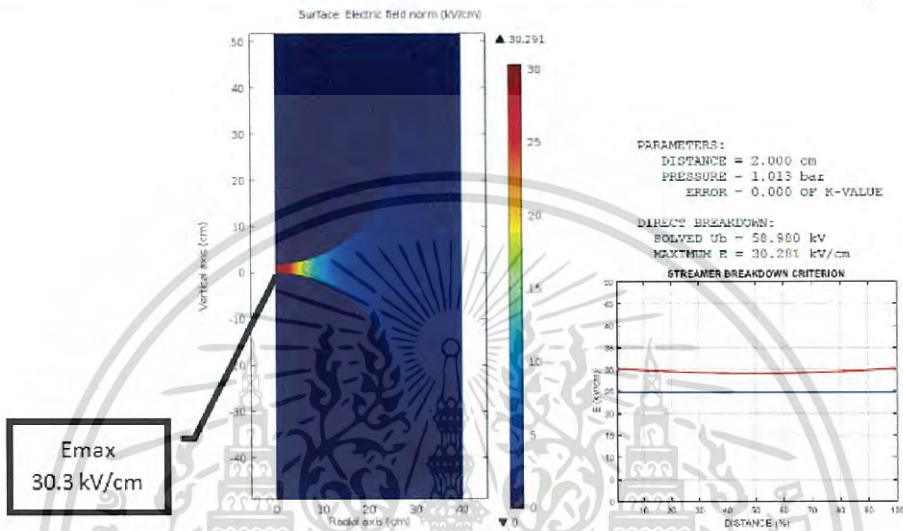
ตารางที่ 3.5 ผลการจำลองการหาค่า K_{st} ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอิเล็กโทรดทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ระยะแกป 8 cm) โดยการปรับค่า K_{st} ในช่วง 5-10 ทีละ 1

พฤติกรรมของสนามไฟฟ้า	พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ	ความคลาดเคลื่อน
	PARAMETERS : DISTANCE = 8.000 cm PRESSURE = 1.013 bar K-VALUE = 6.000 ERROR = 0.000 OF K-VALUE DIRECT BREAKDOWN: SOLVED U_b = 208.863 kV MAXIMUM E = 28.954 kV/cm	-2.40%
	PARAMETERS : DISTANCE = 8.000 cm PRESSURE = 1.013 bar K-VALUE = 7.000 ERROR = 0.000 OF K-VALUE DIRECT BREAKDOWN: SOLVED U_b = 210.354 kV MAXIMUM E = 29.161 kV/cm	-1.70%
	PARAMETERS : DISTANCE = 8.000 cm PRESSURE = 1.013 bar K-VALUE = 8.000 ERROR = 0.000 OF K-VALUE DIRECT BREAKDOWN: SOLVED U_b = 211.692 kV MAXIMUM E = 29.346 kV/cm	-1.08%
	PARAMETERS : DISTANCE = 8.000 cm PRESSURE = 1.013 bar K-VALUE = 9.000 ERROR = 0.000 OF K-VALUE DIRECT BREAKDOWN: SOLVED U_b = 212.915 kV MAXIMUM E = 29.516 kV/cm	-0.51%

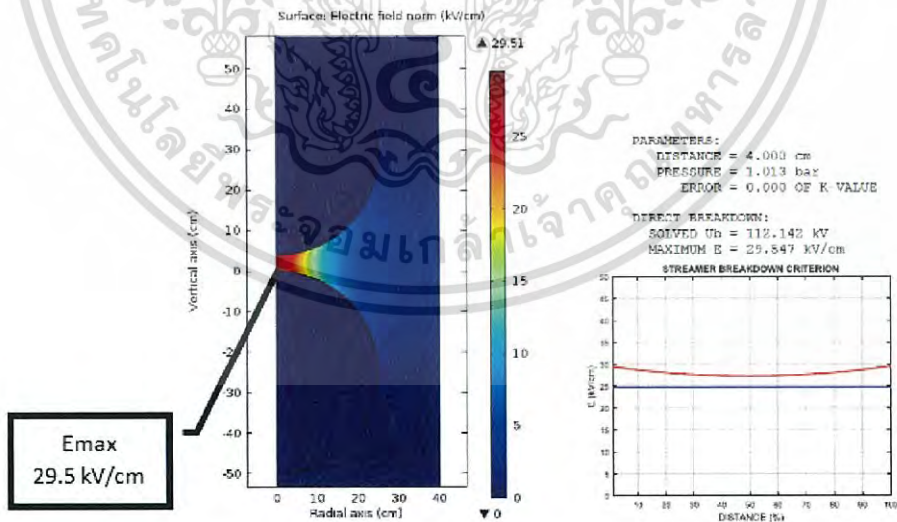
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทำการจำลองซ้ำไปเรื่อย ๆ โดยค่อย ๆ ขยับช่วงให้แคบลง เพื่อหาค่า K_{st} ที่เหมาะสม ที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อน 0.000% พบว่า สุตท้ายสำหรับอิลีกโทรดทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ระยะแกป 8 cm) ค่า K_{st} ที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ที่ 9.955 โดยเมื่อเรานำค่า K_{st} ที่ได้มานี้ไปพิจารณาในกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะแกปอื่น

ผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าระหว่างแกปอิลีกโทรดของ ทรงกลม-ทรงกลม โดยให้ค่า $K_{st} = 9.955$

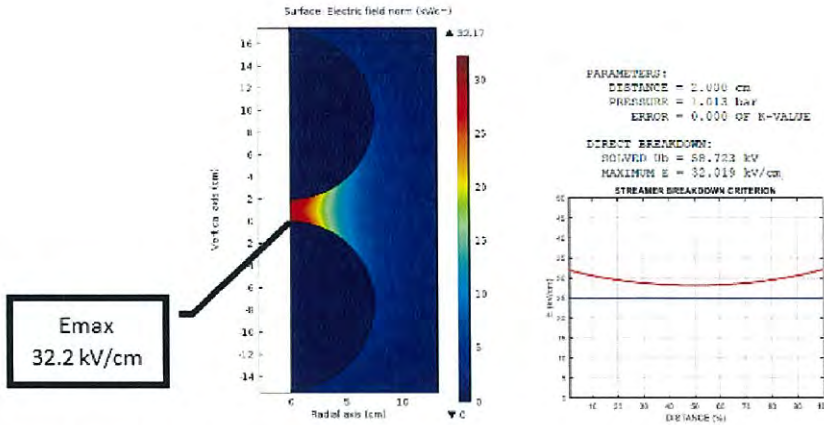


รูปที่ 3.5 ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ซม. ระยะแกป 2 ซม. แรงดัน 59kV (โดยมีการตั้งค่า $K_{st} = 9.955$)

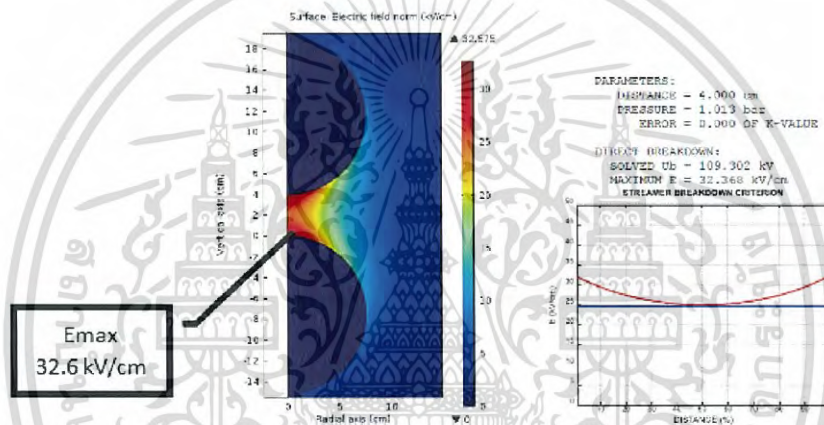


รูปที่ 3.6 ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ซม. ระยะแกป 4 ซม. แรงดัน 112kV (โดยมีการตั้งค่า $K_{st} = 9.955$)

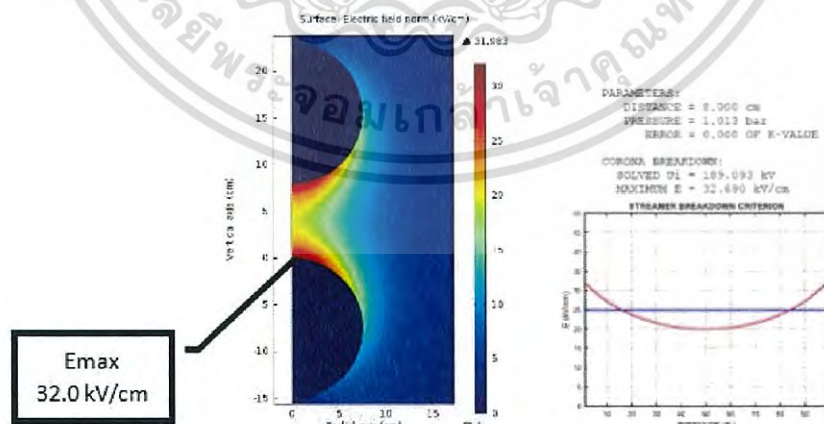
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ระยะแกป 2 ซม. แรงดัน 59kV (โดยมีการตั้ง
ค่า $K_{st} = 9.955$)



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ระยะแกป 4 ซม. แรงดัน 110kV (โดยมีการ
ตั้งค่า $K_{st} = 9.955$)



รูปที่ 3.9 ผลการจำลองเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ระยะแกป 8 ซม. แรงดัน 185kV* (โดยมีการ
ตั้งค่า $K_{st} = 9.955$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการจำลองเมื่อทำการปรับแก้ค่า K_{st} เป็น 9.955

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม-ทรงกลม ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม (โดยตั้งค่า $K_{st} = 9.955$ และจากมาตรฐาน IEC 60052)

เส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม	ระยะแกป	แรงดันเบรกดาวน, โครโน่าเริ่มเกิด		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
		มาตรฐาน IEC 60052	จากการคำนวณโดยมีการตั้งค่า $K_{st} = 9.955$	
50 cm	2 cm	59 kV	58.980 kV	0.034%
50 cm	4 cm	112 kV	112.142 kV	0.127%
50 cm	8 cm	214 kV	214.000 kV	0.000%
15 cm	2 cm	59 kV	58.730 kV	0.458%
15 cm	4 cm	110 kV	109.302 kV	0.634%
15 cm	8 cm	185 kV*	189.093 kV	2.212%

จากการปรับแก้ค่าคงที่สตรีมเมอร์ K_{st} และการตั้งค่าให้คำนวณที่สภาวะอากาศจากการนำเสนอของ Schumann ค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าตามมาตรฐาน IEC60052 (มีค่าคลาดเคลื่อนจากมาตรฐานไม่เกิน 3%) ส่งผลให้โปรแกรมการคำนวณแรงดันที่ปรับแก้แล้วมีความน่าเชื่อถือ

ระดับเบรกดาวนมาตรฐาน IEC 60052 ที่เส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม 15 cm และระยะแกป 8 cm มีเครื่องหมาย * เนื่องจากเป็นแรงดันทดสอบที่ทางมาตรฐานไม่ได้รับรองโดยสมบูรณ์ เพียงแต่ถือว่าใช้ได้ถ้าหากผู้ทดสอบเห็นว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

3.2 การออกแบบชุดทดสอบ

3.2.1 ชั้นส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการประกอบสร้างชุดทดสอบ

(1.) แกนตัวนำและอิเล็กโทรด

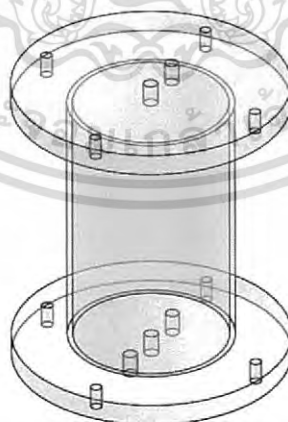
- แกนตัวนำ ทำจาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 mm
- อิเล็กโทรดทรงกลม ทำจากทองแดง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22.5 mm
- อิเล็กโทรดทรงระนาบ ทำจาก อะลูมิเนียม
มีความหนา 9 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm



รูปที่ 3.10 อิเล็กโทรดและแกนตัวนำที่ถูกจำลองโดยโปรแกรม SolidWorks

(2.) วัสดุบรรจุแก๊ส

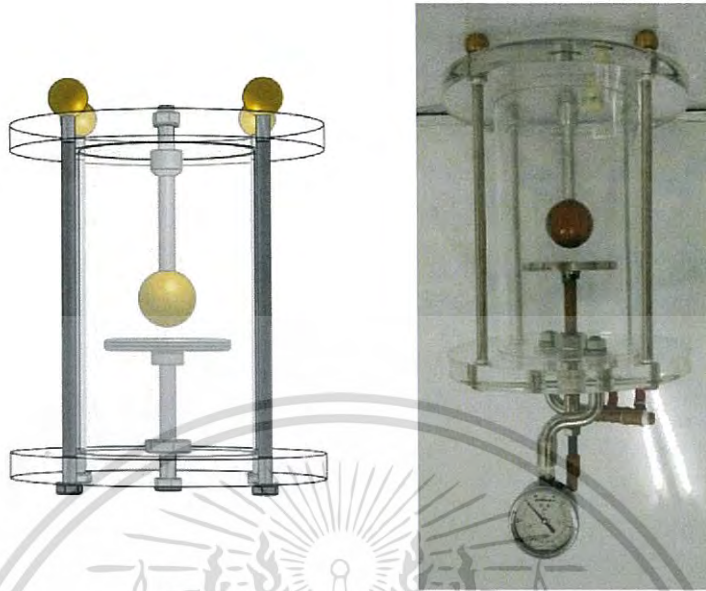
- ทำจากวัสดุอะคริลิกใส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกึ่งวงกลมขนาดใหญ่
- มีเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 15 cm ความหนา 5 mm ความสูง 25 cm



รูปที่ 3.11 วัสดุบรรจุแก๊สที่ถูกจำลองโดยโปรแกรม SolidWorks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดสอบหลังจากประกอบส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.12 ชุดทดสอบที่ประกอบสมบูรณ์

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

(1.) วาริแอกสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.13 วาริแอกสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.) เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV 50 mA

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



รูปที่ 3.14 หม้อแปลงทดสอบ 235/100 kV, 5 kVA

(3.) ตัวต้านทานน้ำ

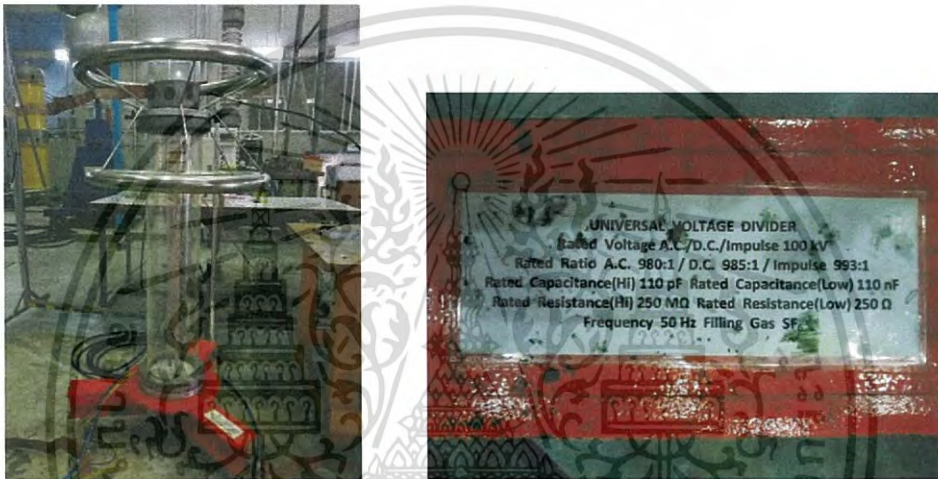


รูปที่ 3.15 ตัวต้านทานน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4.) โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100 kV บรรจุแก๊ส SF₆

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



รูปที่ 3.16 Voltage divider

(5.) มัลติมิเตอร์



รูปที่ 3.17 มัลติมิเตอร์ FLUKE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

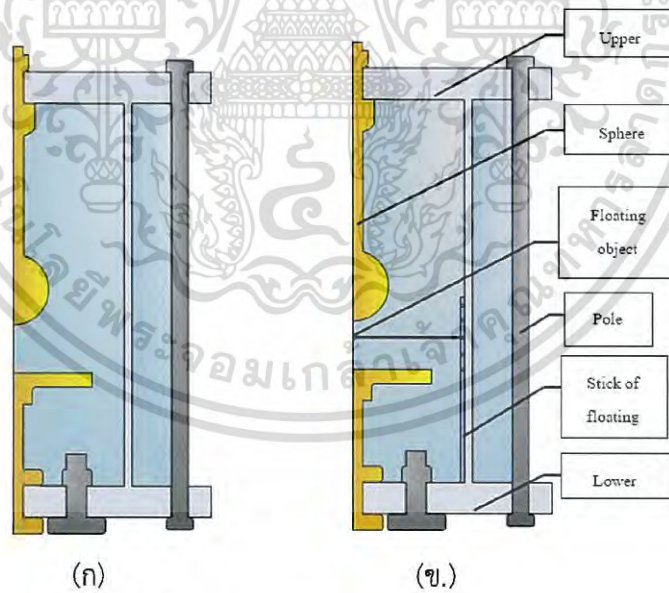
บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

จากการศึกษาโครงสร้างและระบบการทำงานส่วนต่างๆของระบบสถานีไฟฟ้าออยฉนวนแก๊ส (Gas Insulated Station: GIS) และระบบสายส่งฉนวนแก๊ส (Gas Insulated Line: GIL) พบว่า ปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในระบบนั้น เกิดจากการที่มีวัตถุเจือปนหลุดรอดเข้าไปในระบบ โดยวัตถุเหล่านั้นจะก่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูง ส่งผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดต่ำลง จนนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วน และเกิดเบรคดาวนทางไฟฟ้าตามลำดับ ดังนั้นในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การทดลองเพื่อวัดค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่แปรเปลี่ยนไปเมื่อมีวัตถุเจือปนในระบบ

4.1 ชุดทดสอบที่ติดตั้ง Floating Object

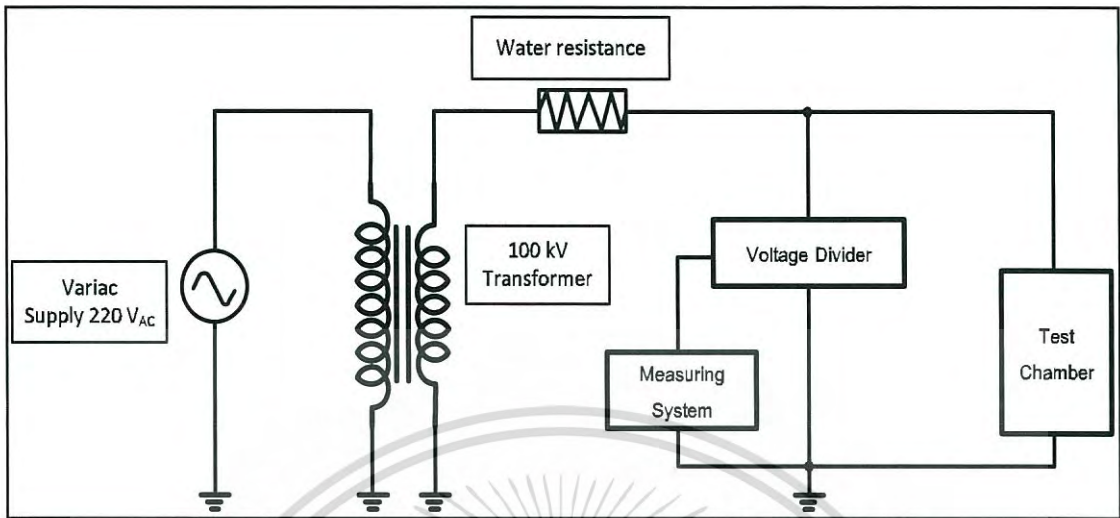
เพื่อวัดค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่แปรเปลี่ยนไปเมื่อมีวัตถุเจือปนในระบบ จึงทำการติดตั้ง Floating Object เข้าไปในชุดทดสอบ โดยวัสดุที่ใช้ทำ Floating Object ในการทดลองนั้นมี 2 ชนิดคือ วัสดุพลาสติก และ วัสดุอลูมิเนียม ซึ่งเป็นตัวแทนสำหรับเศษวัสดุที่อาจหลุดลอกออกมาจากเนื้อฉนวนโคน (Insulation cone) และตัวนำ (Conductor) ตามลำดับ



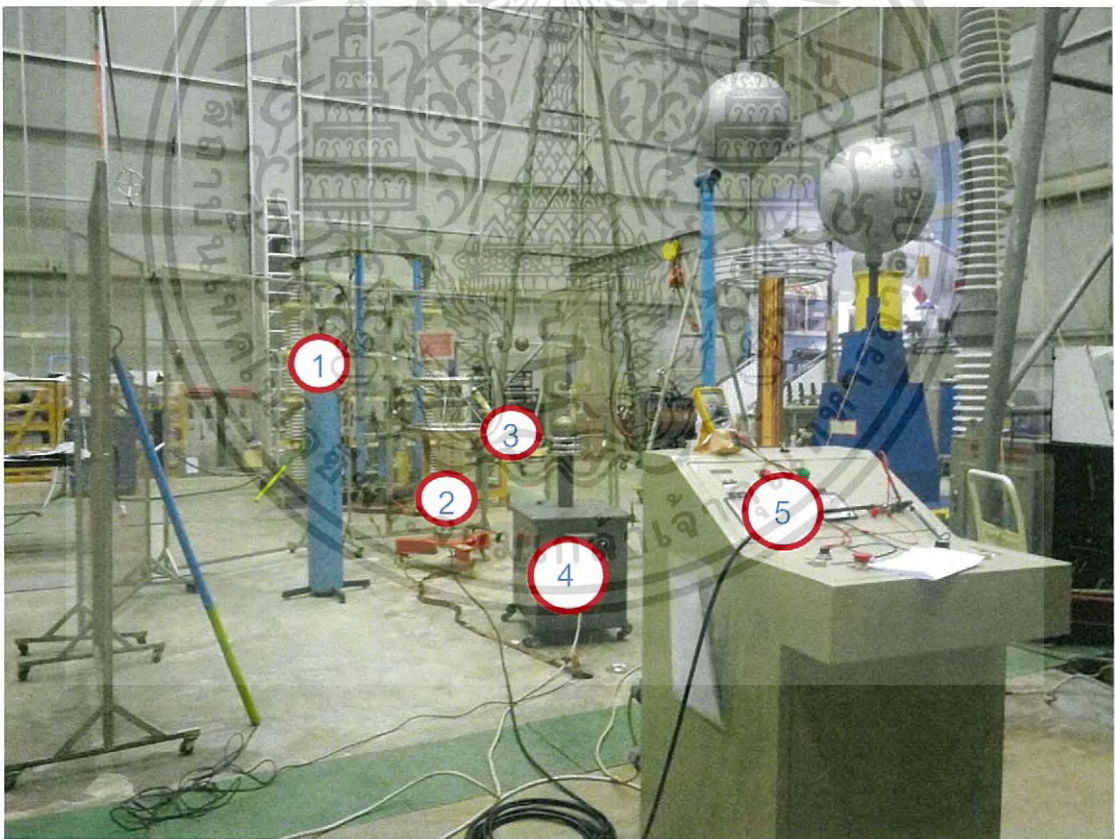
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของชุดทดสอบ

เมื่อ (ก) ก่อนติดตั้ง Floating Object (ข) หลังติดตั้ง Floating Object

4.2 วงจรการทดสอบ



รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 4.3 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ 2

(1.ชุดทดสอบ 2.โวลต์จติไวเตอร์ 3.ตัวต้านทานน้ำ 4.หม้อแปลงทดสอบ 5.วาริแอด)

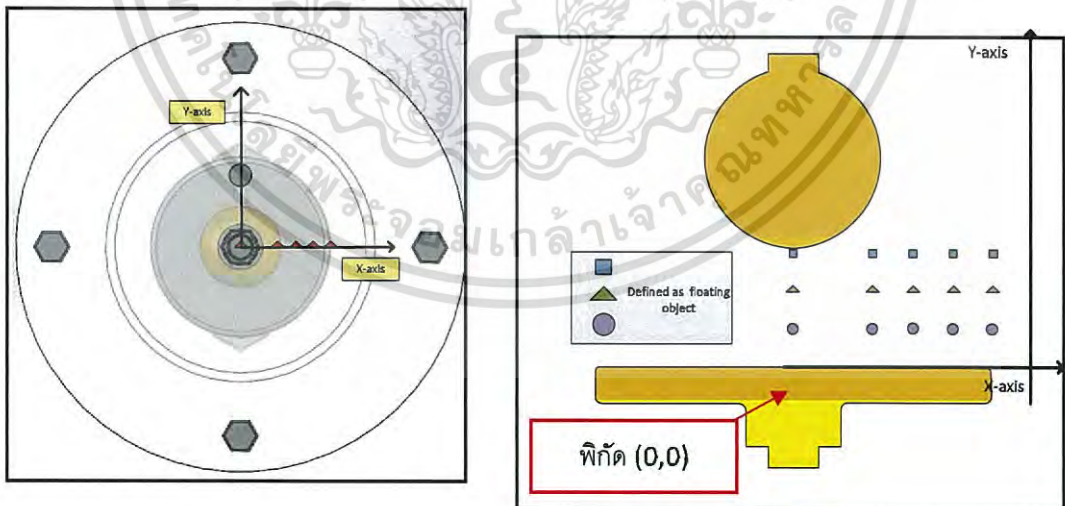
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.2 โดยปรับระยะระหว่าง Sphere-Plate ไว้ที่ 3 cm
- 2) ทดลองโดยปราศจาก Floating Object จากนั้นติดตั้ง Floating Object โดยใช้ชนิดและพิกัด (X, Y) ตามตารางที่ 4.1 โดยจุดศูนย์กลาง (0, 0) อยู่ที่ศูนย์กลางของเพลทระนาบตามรูปที่ 4.4 ทั้งนี้ให้วัดและจดค่าตำแหน่งจริง Floating Object โดยคลาดเคลื่อนจากตารางที่ 4.1 ได้เล็กน้อย
- 3) ทำการป้อนแรงดันกระแสสลับโดยให้อัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ที่ 2 kV/s
- 4) ป้อนแรงดันจนอากาศภายในชุดทดสอบเกิดการเบรกดาวนทางไฟฟ้าจึงยุติแล้วบันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ ที่อ่านได้จากมิเตอร์ลงในตารางที่ 4.2 หรือ 4.3
- 5) พักชุดทดสอบทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 2 นาที
- 6) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3-5 จนได้ผลการทดลอง 5 ครั้ง

ตารางที่ 4.1 พิกัดของ Floating Object ที่ต้องการทดสอบ

พิกัด(X, Y) Floating Object ชนิดอลูมิเนียม			พิกัด(X, Y) Floating Object ชนิดพลาสติก		
(0, 0.9)	(0, 1.9)	(0, 2.9)	(0, 0.9)	(0, 1.9)	(0, 2.9)
(2, 0.9)	(2, 1.9)	(2, 2.9)	(2, 0.9)	(2, 1.9)	(2, 2.9)
(3, 0.9)	(3, 1.9)	(3, 2.9)	(3, 0.9)	(3, 1.9)	(3, 2.9)
(4, 0.9)	(4, 1.9)	(4, 2.9)	(4, 0.9)	(4, 1.9)	(4, 2.9)



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งของ Floating Object

4.4 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก้ำอากาศ

(มี Floating Object เป็นอนุภาคน้ำผ่านศูนย์กลาง 0.11 cm ระยะแก๊ป 3 cm)

พิกัดของโพลต์ตั้ง		แรงดันเบรกดาวนักระแสสลับที่ทดสอบได้					ค่าเฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์
แนวนอน	แนวตั้ง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	แรงดันเบรกดาวนั	ความผิดเพี้ยน
กรณีไม่มีโพลต์ตั้ง		46	45	47	47	46	46.2	-
0.00	0.85	45	45	45	45	45	45.0	-2.60%
	1.95	43	44	44	45	45	44.2	-4.33%
	2.80	21	21	21	21	21	21.0	-54.55%
1.96	0.85	45	46	46	46	46	45.8	-0.87%
	1.90	45	45	45	45	45	45.0	-2.60%
	2.90	34	40	39	40	41	38.8	-16.02%
2.95	0.90	43	46	46	46	47	45.6	-1.30%
	1.95	45	45	46	46	45	45.4	-1.73%
	2.85	46	44	45	45	45	45.0	-2.60%
4.10	0.85	47	46	46	46	46	46.2	0.00%
	1.95	35	37	37	38	38	37.0	-19.91%
	2.85	45	46	45	45	44	45.0	-2.60%

จากตารางพบว่า ที่ระยะ Floating Object ตามแนวรัศมีเท่ากัน แรงดันเบรกดาวนัมีการลดลงมากขึ้นตามระยะที่เข้าใกล้บริเวณอิเล็กโทรดทรงกลมซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าด้านเพลท ทั้งกรณีระยะแนวนอนเป็นศูนย์คืออยู่ในแนวเส้นตรงระหว่างอิเล็กโทรดพอดี และกรณีระยะแนวนอนไม่เป็นศูนย์คืออยู่นอกแนวเส้นตรงดังกล่าว ยกเว้นกรณีระยะแนวนอนเท่ากับ 4.10 ซม. ซึ่งอยู่ใกล้แนวขอบเพลทระนาบที่มีขอบคมและความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จึงอาจเป็นผลให้แนวโน้มของแรงดันเบรกดาวนัเปลี่ยนไป

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก๊าซอากาศ
(มี Floating Object เป็นพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.11 cm ระยะแกบ 3 cm)

พิกัดของโพลต์ตั้ง		แรงดันเบรกดาวนักระแสสลับที่ทดสอบได้					ค่าเฉลี่ย แรงดันเบรก ดาวนั	การลดลง ของแรงดัน เบรกดาวนั
แนวนอน	แนวตั้ง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
กรณีไม่มีโพลต์ตั้ง		48	48	48	48	48	48.0	-
0.00	0.95	48	48	48	48	48	48.0	0.00%
	2.00	43	44	43	46	44	44.0	-8.33%
	2.90	21	20	23	23	27	22.8	-52.5%
1.96	0.95	46	49	50	49	50	48.8	1.67%
	1.95	48	48	48	48	48	48.0	0.00%
	2.90	44	46	46	47	47	46.0	-4.17%
2.95	0.90	48	48	48	47	48	47.8	-0.42%
	2.00	48	45	48	48	49	47.6	-0.83%
	2.90	48	48	48	48	48	48.0	0.00%
4.10	1.00	48	49	48	49	49	48.6	1.25%
	2.00	49	49	49	49	49	49.0	2.08%
	2.95	48	48	48	48	48	48.0	0.00%

จากตารางพบว่า กรณีที่ Floating Object อยู่ในแนวเส้นตรงระหว่างอิเล็กโทรด แรงดันเบรกดาวนัมีการลดลงมากขึ้นตามระยะที่เข้าไปใกล้บริเวณอิเล็กโทรดทรงกลมซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าด้านเพลท ส่วนกรณีที่ Floating Object อยู่นอกแนวเส้นตรงดังกล่าว พบว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเบรกดาวนัมีน้อยลงและมีแนวโน้มไม่แน่นอน จึงอาจไม่มีนัยสำคัญต่อการทดลอง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

1. จากบทที่ 4 ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 พบว่า Floating Object ที่ทำจากอะลูมิเนียม มีผลต่อระดับแรงดันเบรกดาวน้มากกว่า Floating Object ที่ทำจากพลาสติก เนื่องจาก Floating Object อะลูมิเนียม การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเบรกดาวน้มีนัยสำคัญทุกกรณี ส่วน Floating Object พลาสติก การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเบรกดาวน้มีนัยสำคัญเฉพาะกรณีที่ Floating Object อยู่ในแนวเส้นตรงระหว่างอิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น

2. จากบทที่ 4 ตารางที่ 4.2 ในแต่ละกรณีที่มีพิกัดของ Floating Object ตามแนวรัศมีเท่า ๆ กัน พบว่าระยะห่างจาก Floating Object กับบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้ามีผลต่อระดับแรงดันเบรกดาวน้มียกเว้นทิศทาง

3. จากบทที่ 4 ตารางที่ 4.3 ในกรณีที่ Floating Object ตั้งอยู่ในแนวเส้นตรงระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสอง พบว่าระยะห่างจาก Floating Object กับบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้ามีผลต่อระดับแรงดันเบรกดาวน้มียกเว้นทิศทาง

4. พบว่าในทุกกรณีที่ Floating Object มีผลต่อระดับแรงดันเบรกดาวน้มียกเว้นทิศทางนั้น แรงดันเบรกดาวน้มี่แนวโน้มที่จะลดลงตามผลของโพลต์ดิ่งที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ Floating Object ส่งผลเสียต่อความคงทนแรงดันเบรกดาวน้ม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการควบคุมอัตราการขึ้นแรงดันให้คงที่และเหมือนกันตลอดการทดสอบ เพราะถ้าอัตราการขึ้นแรงดันในการทดสอบแต่ละครั้งที่ไม่เท่ากัน ผลการทดสอบที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อน

2. ควรมีการออกแบบชุดทดสอบที่ไม่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้นที่จุดอื่นของชุดทดสอบ เนื่องจากการดิสชาร์จที่จุดอื่นจะทำให้ผลการทดสอบมีความผิดพลาด

3. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนก้านนั้น ต้องอาศัยการสังเกตและความระมัดระวังในการตัดวงจรทันที เมื่อเกิดการเบรกดาวน้ม หากมีการตัดวงจรช้า จะทำให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิวของอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ผลการทดสอบมีความผิดพลาดมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Breakdown Voltage Estimating Program

C. Chamnong, C. Chuay-in, T. Nganpitak, N. Sontayananon, N. Pattanadech

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalongkung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
E-mail : schnatipp.user@gmail.com

Abstract

This paper introduces a program with the ability to estimate the breakdown voltage of an insulation system with uniform or slightly non-uniform electric field distribution. The program uses bisection method to numerically compute the required electric field that satisfies streamer breakdown criterion. The equation that represents the air effective primary ionization coefficient is referred from Schumann's modeling with the streamer constant (K_{st}) of 14. The developed program is verified by comparing the calculated breakdown voltages with the breakdown voltages from IEC-60052, which has less than 3% error.

Keywords: bisection method, breakdown voltage, IEC-60052, ionization coefficient, streamer breakdown

1. Introduction

A flow of electric charges from an electrode with high potential to the lower voltage electrode is called 'discharge' and can be categorized into two types; complete discharge and partial discharge. For dielectric gases, complete discharge occurs when the electric field stress across the electrodes is higher than the electric field strength of the gas. Such discharge links both electrodes through the gas and reduces the voltage between electrodes to practically zero. Partial discharge in dielectric gases, on the other hand, is called corona discharge and occurs only at some region which is not completely through the insulation system. If a breakdown occurs without corona, the phenomenon is called 'complete breakdown' and the voltage causing complete discharge is called 'breakdown voltage, U_b '. If a breakdown occurs after corona takes place, the phenomenon is called 'corona breakdown' and the voltage causing the initialization of corona discharge is called 'corona inception voltage, U_i '.

For uniform and slightly non-uniform electric field distribution, the breakdown voltage, U_b , can be estimated in the case of complete discharge phenomenon. In the case of corona discharge phenomenon, a complete breakdown may occur after the initialization of corona. In this case, the breakdown voltage, U_b , can no longer be estimated because of space charge effect, so only the corona inception voltage, U_i , can be estimated. The capability of estimating breakdown voltage and corona inception voltage is highly desirable because of its application on diagnosing some high-voltage problems, or even on designing test cells and dimension determination.

2. Theoretical Background

2.1 Effective primary ionization coefficient

For the movement of a free electron along a gaseous volume with the distance of one centimeter; Townsend's first ionization coefficient, α , is the number of mean free path electrons produced. The attachment coefficient, η , is the number of missing mean free path electrons. The effective primary ionization coefficient, $\bar{\alpha}$, is the effective number of mean free path electrons left. Thus, $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$.

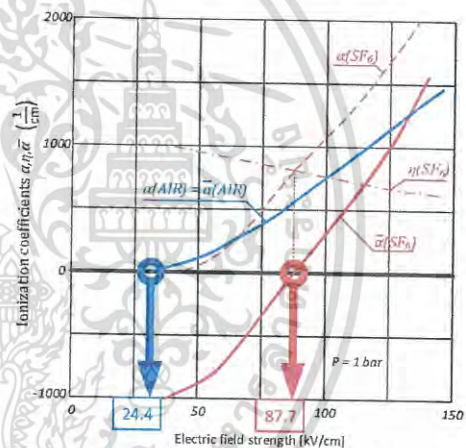


Fig.1 The α , η , and $\bar{\alpha}$ coefficient of air and SF₆ at 1-bar pressure [1]

The coefficient $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$ of the air and SF₆ is greater than 0 when $(E/P)_0$ is greater than 24.4 kV/cm·bar and 87.7 kV/cm·bar respectively. This means that before the occurrence of electron avalanche, several electrons are captured by atoms and positive ions. Thus, electron avalanche can occur only after E/P is greater than $(E/P)_0$.

Breakdown phenomena can happen once the electron avalanche occurs. So, breakdown or corona inception voltage can be estimated if the effective primary ionization coefficient, $\bar{\alpha}$, as a function of the electric field, E , is known because it can be used to determine the avalanche. The function can be formed by mathematical modeling.

For SF₆ with E/P of 60~120 kV/cm·bar,

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} = C \left(\frac{E}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_0 \right) \quad (1)$$

For air with E/P of 21.4~60 kV/cm·bar,

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} = C \left(\frac{E}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_0 \right)^2 \quad (2)$$

2.2 Electron avalanche

When a molecule is hit by an electron with sufficient kinetic energy, the molecule loses its own electron and turns into a positive ion. The new electron from the molecule, influenced by the electric field, moves toward the anode. At the same time, the electron that hit the molecule continues moving and hitting other molecules. Thus, the number of electrons increases, and an avalanche of electrons is formed. It is called 'electron avalanche'.

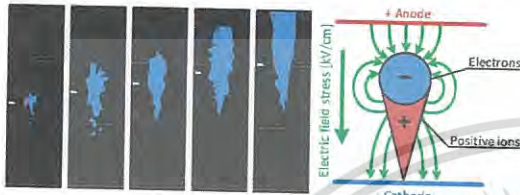


Fig.2 Electron avalanche [4]

The increase rate of the electrons is a function of the effective primary ionization coefficient, $\bar{\alpha}$. Thus, the increase rate of the electrons due to the collision (dN_c) in a small gap (dx) from the distance of x to $x+dx$ in the opposite direction of the electric field can be written as

$$dN = N \cdot \bar{\alpha} \cdot dx$$

$$\int_{N_0}^N \frac{1}{N} \cdot dN = \int_0^x \bar{\alpha} \cdot dx$$

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = \int_0^x \bar{\alpha} \cdot dx$$

$$N = N_0 e^{\int_0^x \bar{\alpha} \cdot dx} \tag{3}$$

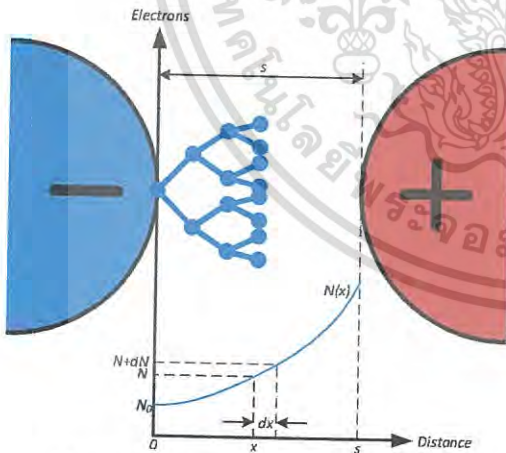


Fig.3 Electrons increase rate under electric field [4]

2.3 Streamer breakdown mechanism

Failure in dielectric gas under uniform electric field with moderate pressure can be explained with Townsend's breakdown process. Nevertheless, with the product $P \cdot s$ of pressure, P , and gap spacing, s , of 300 cm·kPa or more, Townsend's breakdown process is no longer valid.

Generally, streamer theory is used to explain the breakdown process in such cases. Positive streamer theory is presented by Meek and Loeb in 1940, while negative streamer theory is presented by Rather. According to the theory, the electron avalanche, acting as space charge, alters the electric field in some point especially on the tip of the avalanche. Photon energy, produced at the points more easily, can travel with higher speed than the electron avalanche. With the influence of photon energy, new electron avalanches can be formed at somewhere far from the point. Since the charge density of the original electron avalanche is much higher, the latter is drawn toward the original one, causing the discharge phenomenon to be much faster since the original avalanche does not need to completely link between both electrodes anymore.

Streamer breakdown criterion, at which a single electron avalanche turns into several avalanches, was described by some scientists in different ways as the following:

- Meek and Loeb: Streamer happens when the electric field, E_r , caused by the space charge of electron avalanche, is equal to the geometrical electric field, E .
- Rather: Streamer happens when the number of electrons or positive ions in the electron avalanche is 10^8 approximately.

Since the electron distribution at the tip of the avalanche is spherical with the radius of r , the electric field of an avalanche with the length of x is

$$E_r = \frac{N_x \cdot e}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} = \frac{e \cdot e^{\bar{\alpha}x}}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \tag{4}$$

which can be concluded that the electric field at the tip of the avalanche, E_r , is a function of the number of electrons, N_x , in the avalanche. And the number of electrons, N_x , is a function of the length, x , of the avalanche.

If the critical length satisfying Meek and Loeb's condition is x_c , and the critical number of electrons in the avalanche satisfying Rather's condition is N_c . From the knowledge on electron avalanche (3),

$$N_c = e^{\int_0^{x_c} \bar{\alpha} \cdot dx}$$

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha} \cdot dx = \ln(N_c) = k_{st} \tag{5}$$

The constant k_{st} , that satisfies the streamer breakdown criterion is called 'streamer constant'.

2.4 Electric field and electric potential relation

As the shape of electrodes has high influence on the electric field distribution, the degree of uniformity, η^* , is thus defined to imply the distribution of the electric field.

$$\eta^* = \frac{E_{avg}}{E_{max}} \tag{6}$$

For gap spacing, s , the relation between the maximum electric field, E_{max} , and the electric potential, U , is

$$E_{max} = \frac{U}{s \cdot \eta^*} \tag{7}$$

With unvarying electrode shape, gap spacing, and grounding system, the parameter η^* and s is constant. Consequently, the relation becomes linear,

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{U_2}{U_1} = T \tag{8}$$

2.5 Breakdown voltage estimating program

By substituting the effective primary ionization coefficient function of the air, (2), into streamer breakdown criterion, (5),

$$\int_0^{x_c} C \cdot P \cdot \left(\frac{E}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_0 \right)^2 dx = k_{st}$$

For a different value of electric field E that is linearly proportional to the electric field E' due to the constant gap spacing and electrode shape (8),

$$E = TE'$$

the following expression is obtained,

$$\int_0^{x_c} C \cdot P \cdot \left(\frac{TE'}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_0 \right)^2 dx = k_{st} \quad (9)$$

To calculate numerically, the integral is needed to be replaced with a summation form. The infinitesimal dx is replaced by B_n , the division of gap spacing by the number of data.

$$CP \sum_{n=1}^{x_c} B_n \left(\frac{TE'}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_0 \right)^2 = k_{st} \quad (10)$$

If the electric field E is the data exported from an electric field simulation, with constant x_c , $(E/P)_0$, B_n , P , and k_{st} , the value of T satisfying the equation (10) can be determined using numerical methods in [2] such as bisection method in [3].

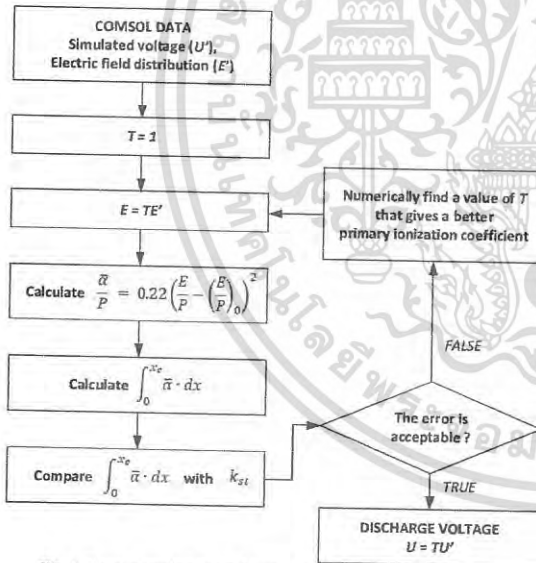


Fig.4 Chart showing breakdown voltage estimating algorithm

This algorithm can be modified with other gases, such as modifying to SF₆ by changing from equation (2) to (1). The program may be made using calculation tools that can create automated script. In this case, the program is written on MATLAB m-file script.

3. Program verification

The program is needed to be proven for capability. The method is by calculating the breakdown voltage of a system consisting of a pair of electrodes with the dimension that is consistent with IEC-60052 standard.

3.1 Test object

The test objects are sphere-to-sphere electrodes with the diameter of D and the gap spacing of s as in TABLE I.

TABLE I
DIMENSION OF SPHERE-TO-SPHERE ELECTRODES

Case	Sphere diameter, D (cm)	Gap spacing, s (cm)
1	15	2
2	15	4
3	50	4
4	50	8

Each test object model is drawn as 2D axisymmetric dxf-format model by using AutoCAD LT.

3.2 Test settings

To estimate breakdown voltage of air-insulated system, Equation (10) is used with $C = 0.22$ cm-bar/kV², $P = 1.013$ bar, $(E/P)_0 = 24.4$ kV/cm-bar according to Schumann's modeling in [1]. The streamer constant, K_{st} , is set to 14 which is within the range of Schumann's modeling as well.

3.3 Test procedure

Test objects are imported to COMSOL Multiphysics. For each simulation, the module is chosen as Electrostatics and the study is chosen as Stationary. The lower electrode is set as ground while a voltage of 100 kV is applied on the upper electrode.

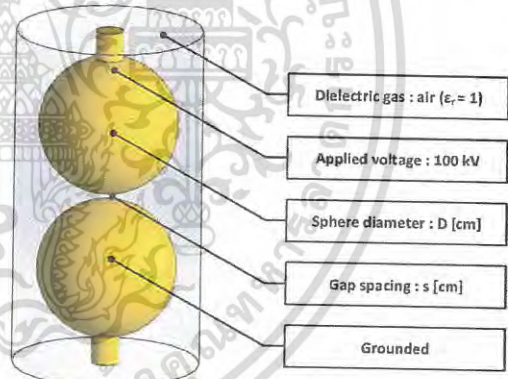


Fig.5 Diagram showing simulation settings

The simulated electric field data are exported from COMSOL Multiphysics, and then imported to the breakdown voltage estimating program.

4. Results

The results from the program are shown both numerically and graphically. The numerical results are compared with the data from IEC-60052 and the error is calculated as shown in TABLE II.

TABLE II
COMPARISON BETWEEN BREAKDOWN VOLTAGE FROM IEC-60052 AND THE BREAKDOWN VOLTAGE ESTIMATING PROGRAM

Dimension (cm)	IEC-60052	Estimated Voltage	Error
D = 15, s = 2	59 kV	60.598 kV	2.71%
D = 15, s = 4	110 kV	112.536 kV	2.31%
D = 50, s = 4	112 kV	114.772 kV	2.48%
D = 50, s = 8	214 kV	218.231 kV	1.98%

Graphical results are shown from Fig.6 to Fig.9. Each graphical result consists of the electric field strength of the dielectric (the blue line) and the electric field stress (the red curve) satisfying streamer breakdown criterion.

The red curve lying above the blue line indicates that the discharge is a complete discharge. Thus, the estimated voltage is the breakdown voltage. If the red curve intersected the blue line, however, the discharge would be a corona discharge. In that case, the estimated voltage would be the corona inception voltage.

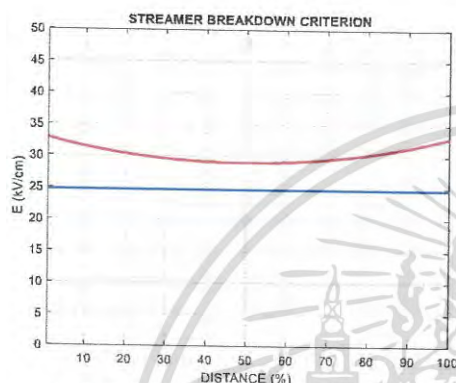


Fig.6 Graphical result with $D = 15$ cm and $s = 2$ cm

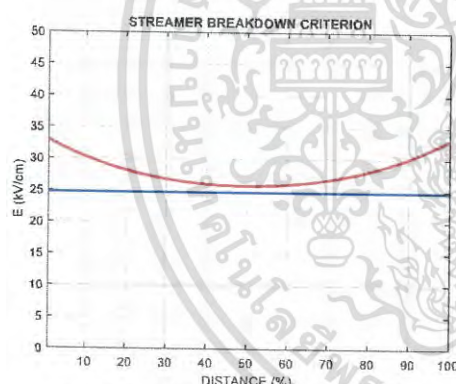


Fig.7 Graphical result with $D = 15$ cm and $s = 4$ cm

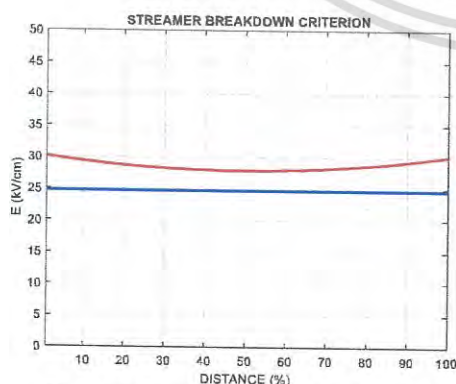


Fig.8 Graphical result with $D = 50$ cm and $s = 4$ cm

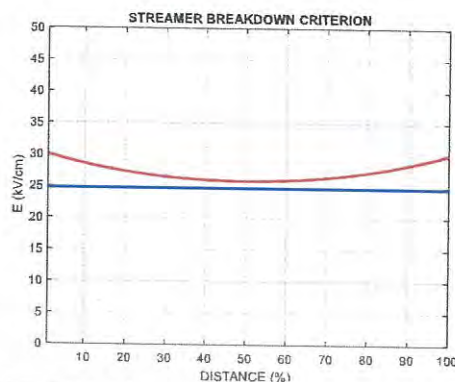


Fig.9 Graphical result with $D = 50$ cm and $s = 8$ cm

5. Conclusion

The AC breakdown voltages of the sphere-sphere electrodes obtained from the developed program are relatively the same as the breakdown voltages from IEC-60052 which has less than 3% error. This program should be useful for gas discharge calculation application for high voltage field

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge Mr. P. Nimsanong for his help, his effort on building up the fundamental program along with its instruction manual. Besides, the authors would like to express their thanks for project financial support from Meidensha Corporation.

References

- [1] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, "Electrical breakdown in gases," in *High Voltage Engineering Fundamentals*, 2nd ed., Oxford, England: Newnes, 2000, ch. 5, sec. 5.2, pp. 294–314.
- [2] J. Douglas Faires, Richard L. Burden, "Solutions of Equations of One Variable," in *Numerical Methods*, Boston: PWS, 1993, ch. 2, pp. 25–49.
- [3] James F. Epperson, "Root finding," in *An introduction to numerical methods and analysis*, New York: Wiley, 2001, ch. 3, sec. 3.1, pp. 81–86.
- [4] S. Sangsa-ard, "Gas breakdown," in *High-Voltage Engineering*, Bangkok, Thailand: 2547, ch. 5, pp. 7–17.

Breakdown Voltage Characteristics of Slightly Non-uniform Field with floating object

C. Chuay-in, C. Chamnong, N. Sontayananon, T. Nganpitak and N. Pattanadech

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalangkung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
Email: chaitwat09@gmail.com

Abstract

In this paper, the breakdown characteristics of slightly non-uniform field with floating object. The floating object was divided into 2 types i.e., Aluminum material and Plastic material. The floating object was installed at various position between the electrodes in the test cell. This experiment, AC voltage was applied to sphere-plane electrode forming to be non-uniform field as the electric field in Gas Insulated Line. It was found that the floating object has clearly negative effect on the breakdown voltage of the tested electrode system. Besides, the breakdown directions between electrodes before and after inserting the floating object was observed and compared.

Keywords: floating object, GIL, breakdown

1. Introduction

Gas Insulated line (GIL) has been introduced to be used in a specific area in which environment problems such as strong wind, extremely contaminant or confined areas may great affect the conventional transmission line.

Since GILs are new technology, some problems may be found in installation process which needs to perform complex welding of each pipe of GIL together in longitudinal direction. So the bad installation, if exists, will cause a consequent problem for example the any particle may drop into the GIL construction. Moreover the ageing of insulation in the GIL maybe happened from mechanical stress repeatedly. The purpose of this research is to investigate the breakdown characteristics of slightly non-uniform field with floating object to simulate such problems which may exist in the real GIL system. Two types of floating objects from aluminum representing the metal particle and plastic represent the insulation particle were used in the experiment. The breakdown voltage of the slightly non-uniform field with and without floating object was comparatively investigated

2. Experiment setup and methods

2.1 Experiment setup

The test chamber comprised of the sphere-plane electrodes was designed and constructed on the basic of GIL field distribution. The 3D schematic diagram of test

chamber is shown in Fig. 1. It consisted of sphere electrode, plane electrode, upper cover, lower cover and poles respectively.

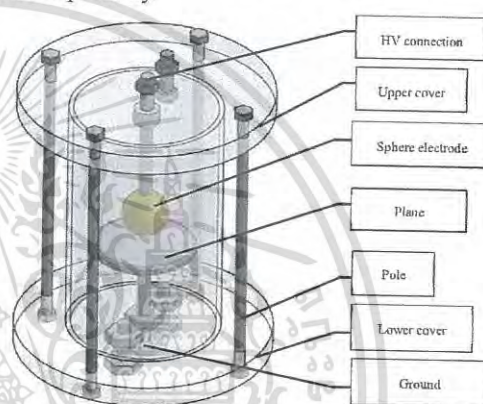


Fig.1 Three dimension of schematic diagram test chamber

The spherical floating objects used in the experiment were divided into 2 types i.e., Aluminum and Plastic floating object with 1.1 mm diameter. The floating object has a hole with a diameter of 0.35 mm by which the a plastic stick can insert inside the hole. The plastic stick can move therefore the position of the floating object can be adjusted. Fig.2 below represents the test chamber with and without the floating objects. The gap spacing between electrodes was fixed at 3 cm.

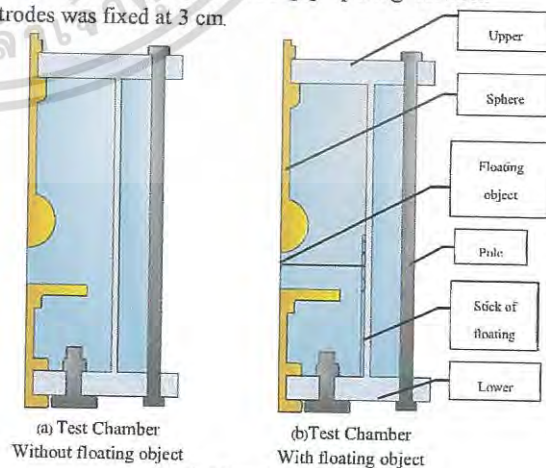


Fig.2 Test chamber

2.2 Study Methods

The objective of this research work to study the effect of the floating object on the slightly non-uniform field aiming to apply for GIL problem. Therefore, the electric field distribution in the test cell and in the GIL system needs to understand. Fig.3 illustrates the electric field of the test cell compared with that of the GIL.

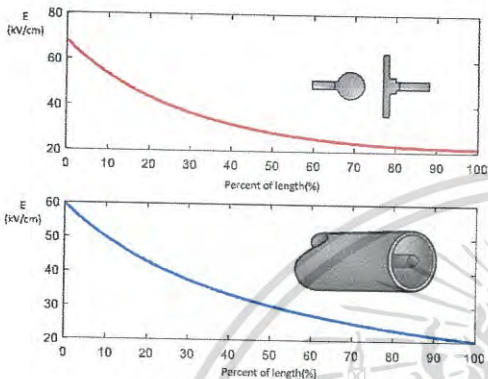


Fig.3 Electric field distribution of the test chamber and the GIL (measured from HV to ground)

The position of floating object was adjusted into 9 cases as shown you in Fig. 4 - Fig.5 respectively. Fig.4 shows X-Y coordinate in the top view and Fig.5 shows floating object position in the side view.

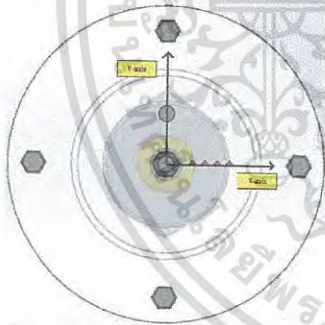


Fig.4 position of floating object in top view

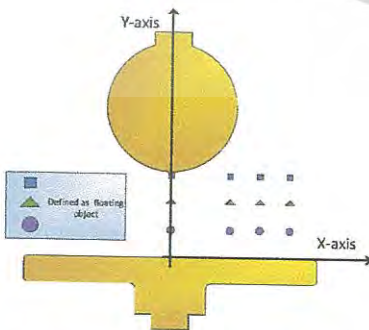


Fig.5 position of floating object in front view

The test circuit was set up as demonstrated in Fig.6, which consisted of 220/400 variac, 100 kV, 5 kVA transformers, 980:1 universal voltage divider, water resistance and Fluke multimeter. To perform the experiment AC voltage was applied to the electrode with a rate of 1 kV/s until breakdown occurs. The experiment was done for five breakdown events of each case. Then, the mean value of breakdown voltage was calculated.

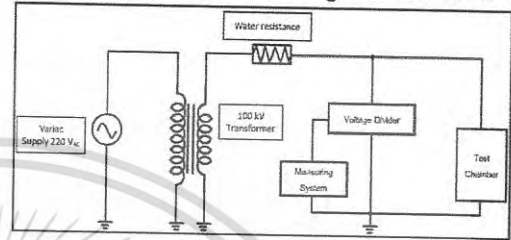


Fig.6 test circuit

3. Test result and analysis

3.1 Test result

The breakdown voltages obtained from the experiment was illustrated in Table I and Table II respectively.

TABLE I
Breakdown voltages of Aluminum floating object

(bar)	Breakdown voltage(kV)					Mean
	1	2	3	4	5	
No floating	46	45	47	47	46	46.2
(6.60,2.80)	21	21	21	21	21	21
(4.64,2.90)	34	40	39	40	41	38.8
(3.65,2.85)	46	44	45	45	45	45
(2.50,2.85)	45	46	45	45	44	45
(6.60,1.95)	43	44	44	45	45	44.2
(4.64,1.90)	45	45	45	45	45	45
(3.65,1.95)	45	45	46	46	45	45.4
(2.50,1.95)	35	37	37	38	38	37
(6.60,0.85)	45	45	45	45	45	45
(4.64,0.85)	45	46	46	46	46	45.8
(3.65,0.90)	43	46	46	46	47	45.6
(2.50,0.85)	47	46	46	46	46	46.2

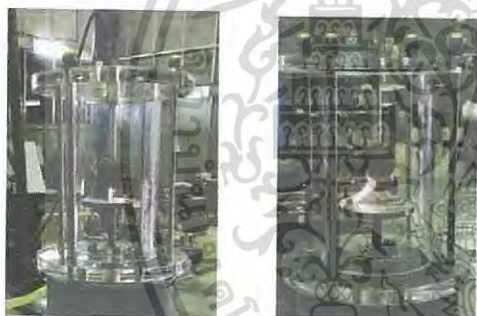
TABLE II
Breakdown voltages of Plastic floating object

Pressure (bar)	Breakdown voltage(kV)					Mean
	1	2	3	4	5	
No floating	48	48	48	48	48	48
(6.60,2.9)	21	20	23	23	27	22.8
(4.64,2.9)	44	46	46	47	47	46
(3.65,2.9)	48	48	48	48	48	48
(2.50,2.95)	48	48	48	48	48	48
(6.60,2.00)	43	44	43	46	44	44
(4.64,1.95)	48	48	48	48	48	48
(3.65,2.00)	48	45	48	48	49	47.6
(2.50,2.00)	49	49				49
(6.60,0.95)	48	48	48	48	48	48
(4.64,0.95)	46	49	50	49	50	48.8
(3.65,0.90)	48	48	48	47	48	47.8
(2.50,1.00)	48	49				48.5

note: the breakdown experiment was not performed with the floating object position of (2.50,2.00) and (2.50,1.00). Because at these positions the floating objects did not interfere the electric field of the sphere-plane electrode.

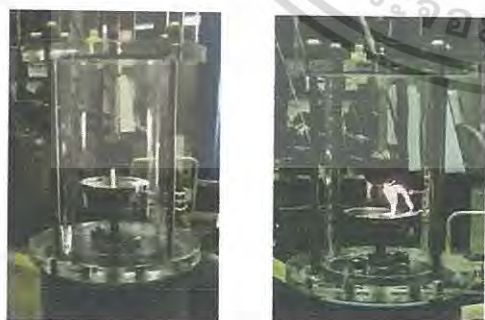
It was found that the floating object caused the reduction of the breakdown voltages of the slightly non-uniform field especially when the floating object was fixed at the 1st position, the breakdown voltage was reduced by half. The test results also reveal that the aluminum object had more effect on the reduction of the breakdown voltage compared to plastic object. Besides, corona phenomena were detected when conducting the experiment with the aluminum floating object.

In the experiment the breakdown channels of the electrode systems were recorded. Fig.7 shows the effect of the aluminum floating object at the position of (3.65,2.85) on the breakdown channel compared to the breakdown channel of the electrodes without floating object. The recorded data illustrates that the streamer attempted to get close the floating object. Hence it was verified that floating object had a significant effect on breakdown phenomena.



(a) break down channel of the air gap without floating object (b) breakdown channel of the air gap with aluminum floating object

Fig.7. Breakdown channels observed from the experiment with aluminum floating object



(a) break down channel of the air gap without floating object (b) breakdown channel of the air gap with plastic floating object

Fig.8 Breakdown channels observed from the experiment with plastic floating object

As described above, the breakdown channels of the electrode system without the floating object compared to the breakdown channel of the electrodes with plastic floating object fixed at the position of (6.60,2.9) is demonstrated in Fig 8. It is noticed that the breakdown voltage of the electrode system with the floating object at the position of (2.50,2.95) is the same as the breakdown voltage of the electrode system without the floating object. However, the discharge channel also attempted to get close the plastic floating object.

4. Conclusion

From the experiment, it was clearly that

- 1) The floating object had a negative effect on the breakdown strength of the tested electrode system.
- 2) Aluminum material had more effect on the reduction of the breakdown voltage than plastic material.
- 3) The position of the floating object under the electrode system had an effect on the reduction of the breakdown strength of the tested electrode system.

5. Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge Mr. P. Nimsanong and Mr. K. Jariyanurat for their advice and many helps in the experiment. Besides, the authors would like to express their thanks for project financial support from Meidensha Corporation.

6. References

- [1] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, "Polarity effect - influence of space charge," in *High Voltage Engineering Fundamentals*, 2nd ed., Oxford, England: Butterworth-Heinemann, 2000, pp.354-359.
- [2] Y. Negara, "Corona Discharge Mechanism and Breakdown Voltage Characteristics from Metallic Floating Particle in SF₆ Gas under dc Voltage," in *IEEE, Bali, Indonesia*, 2006, pp.1-4.
- [3] A. L. WARD, "Calculations of Breakdown in Air between Spherical Electrodes," in *IEEE, Berkeley, USA*, 1966, pp.30-33.
- [4] Y. Negara, "DC Corona Discharge from Floating Particle in Low Pressure SF₆," *IEEE Journals & Magazines*, vol. 13, no. 6, pp.1208-1216, 2006.
- [5] S. Choi, "The Space Charge Effect on the Corona Discharge of SF₆ Gas," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 2, pp. 1289 - 1292, Mar. 2002.

Induce Current Problems of Gas Insulated Line

N. Sontayananon, C. Chamnong, C. Chuay-in, T. Nganpitak and N. Pattanadech

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
1 SoiChalongkung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
E-mail: nath.sontayananon@gmail.com

Abstract

This paper presents induced current a problem occurred in a gas-insulated transmission line (GIL) and its solution. In a commissioning test, ground wires at a compensator unit module were burned because they carried over current due to sheath current induced from the current flowing in conductors.

The induced current is measured and a way to estimate the current is derived based on electromagnetic theory. The estimated results are compared with the measured results. Finally, a solution is achieved by using ground bars as electrical bridges between the aluminum-alloy enclosures so that the induced current can bypass through the ground bars instead of flowing through the ground wires.

Keywords: compensator unit module, gas-insulated transmission line (GIL), ground bar, ground wire, induced current

1. Introduction

Tremendous steps and changes in the development of electric power system has been continuously developed for more than 150 years, resulting in three possible high-voltage power transmission; overhead line (OHL), underground cable, and gas-insulated transmission line (GIL).

With much less space requirements and the higher capacity for transmitting AC power, GIL are the safe and high potentially alternative to OHL. Also, because of the minimal electromagnetic radiation and less impact on the landscape, GIL can be used within buildings and can be considered for a wide range of applications. They are even suitable for providing a continuation for OHL underground, connecting power stations to the power network, or as a space-saving way to connect major industrial plants to the public grid.

2. Theoretical background

2.1 Gas-insulated transmission lines (GIL)

Gas-insulated transmission lines (GIL) transmits electrical power through tubular conductors lying at the center of enclosure pipes. The amount of required gas for insulation purposes is very high. However, pure SF₆ has high cost, and is limited to the required minimum for environmental reasons. Therefore, a mixture of N₂ and SF₆ is used as an alternative since it saves cost without reducing the reliability of the system.

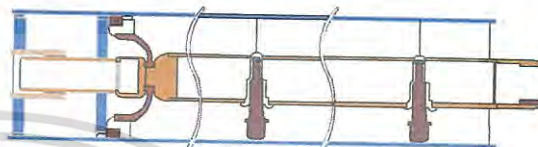


Fig.1 Gas-insulated transmission line diagram [1]

The GIL design is based on the following modules:

- Straight unit modules
- Compensator unit modules
- Disconnecting unit modules
- Angle unit modules

Straight unit modules are the most common used with conductor held in the center of the enclosure by using epoxy resin insulators as supporters. There are two insulator shapes; post-type and conical insulators. A post-type insulator may have one, two, or three legs. A conical insulator can be either gas-tight or non-gas-tight. The enclosure is an aluminum alloy housing for the GIL insulation gas. To reduce transmission losses while possesses high mechanical strength, the conductor is made of extruded aluminum alloy which has a low resistance. As AC current flows mainly in the outer parts of the conductor cross section, the interior is filled with N₂/SF₆ gas mixture. Sliding contacts are used to compensate the conductor movement by the effect of thermal expansion.

Compensator unit modules consist of compensators made by bellows. The purpose of the modules is to handle the effect of thermal expansion of the enclosure. Bellows can take 300-400 meters length of thermal expansion of the enclosure pipe. The bellow cannot carry the full electric current because it takes the movement.

For other two modules, disconnecting units are used to separate gas compartments, while angle unit modules are used to make directional changes of any angle.

2.2 Magnetic energy density

Since the energy density is defined as 'the amount of energy stored in a given system or region of space per unit volume', a prismatic material with the base area A and the length l storing the magnetic energy W_{fld} will have the magnetic energy density, u_m , as

$$u_m = \frac{W_{fld}}{\text{volume}} = \frac{W_{fld}}{Al} \quad (1)$$

The magnetic energy W_{fld} can be written as

$$W_{fld} = \frac{\lambda^2}{2L} = \frac{\lambda i}{2} = \frac{N\phi i}{2} \quad (2)$$

By substituting (2) into (1),

$$u_m = \frac{\phi Ni}{2Al} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi}{A} \cdot \frac{Ni}{l} = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu}$$

Thus, the magnetic energy density, u_m , is

$$u_m = \frac{B^2}{2\mu} \quad (3)$$

2.3 Sheath flux linkage per unit length

Consider an infinitely long straight conductor with a concentric aluminum-alloy enclosure. According to Ampere's law, the magnetic flux density, B , produced from the current, i , flowing through the conductor is

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (4)$$

From the definition of energy density,

$$W_{fld} = \int u_m dVolume \quad (5)$$

For the aluminum enclosure with $\mu_r \approx 1$, substituting (3) and (4) into (5) gives

$$W_{fld} = \int \frac{\mu_0 i^2}{8\pi^2 r^2} dVolume \quad (6)$$

Consider the expression in (6). The only dimensional variable in the integrand is the radius, r . Therefore, the infinitesimal $dVolume$ should be expressed in the term of r as well. Thinking of the infinitesimal volume element as a ring with the longitudinal width ΔZ , inner radius r , and radial thickness dr , the infinitesimal volume will then be

$$dVolume = 2\pi r \cdot dr \cdot \Delta Z \quad (7)$$

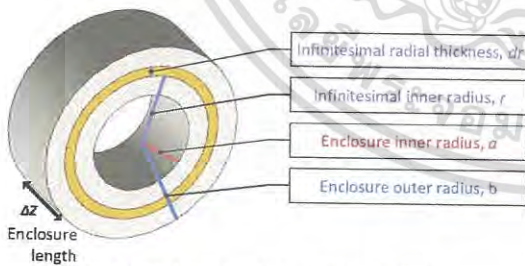


Fig.2 Ring-shaped infinitesimal volume element

Integrating (6) with the infinitesimal volume element (7) from the inner radius, a , of the enclosure to the outer radius, b , gives

$$W_{fld} = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \cdot \Delta Z \quad (8)$$

From (2) and (8), the following expression is obtained,

$$\lambda = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i \ln\left(\frac{b}{a}\right) \cdot \Delta Z$$

Consequently, the flux linkage per unit length of the enclosure is

$$\lambda = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (9)$$

2.4 Sheath voltage per unit length estimation

From Faraday's law

$$E = \frac{d\lambda}{dt}$$

The sheath voltage per unit length on the enclosure of 3-phase GIL becomes

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d\lambda_1}{dt} + \frac{d\lambda_{12}}{dt} + \frac{d\lambda_{13}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{21}}{dt} + \frac{d\lambda_2}{dt} + \frac{d\lambda_{23}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{31}}{dt} + \frac{d\lambda_{32}}{dt} + \frac{d\lambda_3}{dt} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Substituting (9) into (10) with I_n as the RMS value of the time-function current i_n gives

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} I_1 \ln\left(\frac{r_{sh1}}{r_1}\right) + I_2 \ln\left(\frac{S_{12}}{r_2}\right) + I_3 \ln\left(\frac{S_{13}}{r_3}\right) \\ I_1 \ln\left(\frac{S_{21}}{r_1}\right) + I_2 \ln\left(\frac{r_{sh2}}{r_2}\right) + I_3 \ln\left(\frac{S_{23}}{r_3}\right) \\ I_1 \ln\left(\frac{S_{31}}{r_1}\right) + I_2 \ln\left(\frac{S_{32}}{r_2}\right) + I_3 \ln\left(\frac{r_{sh3}}{r_3}\right) \end{bmatrix}$$

Since each I_n is the RMS value of the n^{th} -phase conductor current whose function is sinusoidal, the derivative of each I_n therefore has a 90° phase shift to I_n itself. By assuming the frequency of the current as $\omega/2\pi$, the derivative of I_n is thus $j\omega \cdot I_n$.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} I_1 \ln\left(\frac{r_{sh1}}{r_1}\right) + I_2 \ln\left(\frac{S_{12}}{r_2}\right) + I_3 \ln\left(\frac{S_{13}}{r_3}\right) \\ I_1 \ln\left(\frac{S_{21}}{r_1}\right) + I_2 \ln\left(\frac{r_{sh2}}{r_2}\right) + I_3 \ln\left(\frac{S_{23}}{r_3}\right) \\ I_1 \ln\left(\frac{S_{31}}{r_1}\right) + I_2 \ln\left(\frac{S_{32}}{r_2}\right) + I_3 \ln\left(\frac{r_{sh3}}{r_3}\right) \end{bmatrix}$$

The expression can be written in the form of matrix multiplication as

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{r_{sh1}}{r_1}\right) & \ln\left(\frac{S_{12}}{r_2}\right) & \ln\left(\frac{S_{13}}{r_3}\right) \\ \ln\left(\frac{S_{21}}{r_1}\right) & \ln\left(\frac{r_{sh2}}{r_2}\right) & \ln\left(\frac{S_{23}}{r_3}\right) \\ \ln\left(\frac{S_{31}}{r_1}\right) & \ln\left(\frac{S_{32}}{r_2}\right) & \ln\left(\frac{r_{sh3}}{r_3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.5 Sheath current estimation

Equation (11) may be written as

$$[E_s] = j[X_m][I_{main}] \quad (12)$$

By this, the magnetic reactance $[X_m]$ is

$$[X_m] = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{r_{sh1}}{r_1}\right) \ln\left(\frac{S_{12}}{r_2}\right) \ln\left(\frac{S_{13}}{r_3}\right) \\ \ln\left(\frac{S_{21}}{r_1}\right) \ln\left(\frac{r_{sh2}}{r_2}\right) \ln\left(\frac{S_{23}}{r_3}\right) \\ \ln\left(\frac{S_{31}}{r_1}\right) \ln\left(\frac{S_{32}}{r_2}\right) \ln\left(\frac{r_{sh3}}{r_3}\right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

With both-end bonding, the sheath current per unit length, $[I_{sh}]$, satisfying the following equation,

$$[E_s] = \{[R_{sh}] + j[X_m]\}[I_{sh}] \quad (14)$$

where the sheath resistance per unit length matrix, $[R_{sh}]$, is

$$[R_{sh}] = \begin{bmatrix} R_{sh1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sh2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sh3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

From(12) and (14), the sheath current can be calculated from

$$[I_{sh}] = j\{[R_{sh}] + j[X_m]\}^{-1}[X_m][I_{main}] \quad (16)$$

3. Case study

3.1 GIL induced current estimation

To conduct the research, an existing GIL system was chosen to be investigated. A chosen GIL with aluminum-alloy enclosure have been operating at 230-kV line voltage and 1600-A phase current to be used as a connection between a 230-kV GIS and the 230-kV terminal of a generator step-up transformer. The GIL specifications are given as in TABLE I.

TABLE I
TECHNICAL DATA SHEET OF THE GIL

NO.	Specifications	Values
1	Rated current (Designed ambient: 42°C)	2500 A
2	Configuration	3 Phases, 3 Wires
3	Neutral arrangement	Solidly earthed
4	Enclosure: Inner diameter	309 mm
5	Enclosure: Outer diameter	327 mm
6	Conductor: Inner diameter	25 mm
7	Conductor: Outer diameter	75 mm
8	Resistance per unit length	9.4 μΩ/m

The GIL is arranged in flat formation with distances and dimensions as shown in Fig.3.

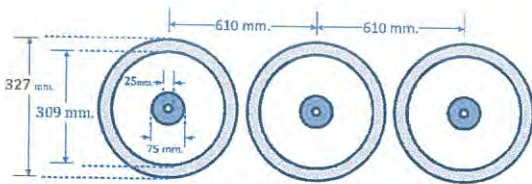


Fig.3 Flat formation with separation arrangement

Applying the derived sheath current estimations equation (13), (15), and (16) , the estimated currents are as followings:

$$[I_{sh}] = \begin{bmatrix} 1620.6 \\ 1612.7 \\ 1620.7 \end{bmatrix} \text{ A}$$

There are differences between the value of induced current from estimation and measurement as summarized in Table II because of the difference in the value of the resistance per unit length, R_{sh} used in the calculation process. The value of R_{sh} here is referred from [3].

TABLE II
COMPARISON BETWEEN MEASURED AND ESTIMATED SHEATH CURRENT IN GIL ENCLOSURE

Phase	I_{main}	$I_{sh,measured}$	$I_{sh,estimated}$	error
A	1603	1432	1620.6	13.17%
B	1609	1484	1612.7	8.67%
C	1615	1565	1620.7	3.56%

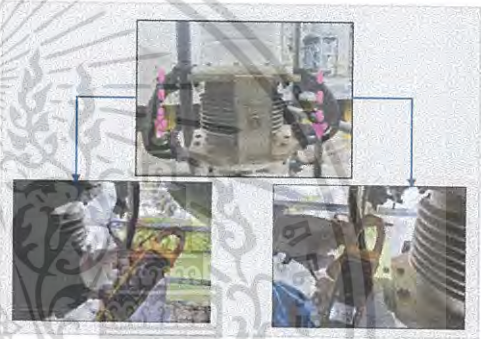


Fig.4 Induced current measurement

Besides, a cause of the error of the current estimation and measured current may lie in the measured current data as well. Observing the installation of the GIL, ground wires had been installed across the compensator to prevent the flow of electric current on the bellow, since the bellow which takes the movement cannot carry the full electric current. However, because a large amount of induced current still flows through the compensator. Therefore, the induced current, the dashed-line arrow in Fig.4, cannot be measured accurately.

3.2 Problems caused by induced current



Fig.5 Ground-wire connection for O-ring seals protection

Typically, O-ring seals are used at GIL termination modules to prevent gas leakage. For example, an O-ring seal is installed between two flanges where the GIL and transformer busing are connected. Bypass connections are connected from each flange to ground to prevent the deterioration of O-ring seals by the effect of temperature.

If the ground wires cannot carry the existed current, it could be burned by the flow of sheath current that is induced from the main current. This problem occurred during a commissioning test.



Fig.6 Burned ground wires during a commissioning test

3.3 Solution

To prevent the ground wires burning, which is caused by high induced current, ground bars are used as electrical bridge at the compartment and terminal of GIL. As the summation of three-phase current vectors tends to zero, only small amount of current flows through ground wires. With this method, the system passed the commissioning test and can operate appropriately.

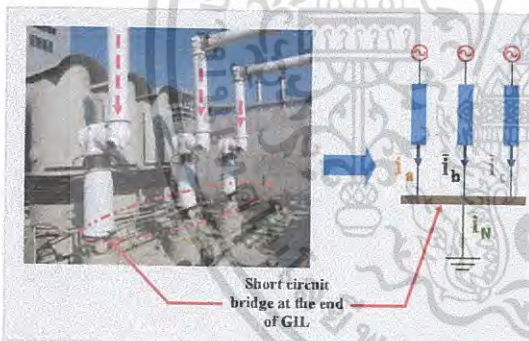


Fig.7 Ground bars as electrical bridges at the of IPB

4. Conclusion

When GIL is in operation, sheath current induced from the conductor current can flow through and burn the ground wires if the current carrying is exceeded the specification. The high efficiency solution which is proved is to use ground bars as electrical bypassing for the induced current. This technique allows the system to pass the commissioning test and operate appropriately.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the contributions of Mr. K. Kraisoemdee for providing the commissioning test data. Besides, the authors would like to express their thanks for project financial support from Meidensha Corporation.

References

- [1] Dirk KUNZE, "Gas-insulated transmission lines – Underground power transmission achieving a maximum of operational safety and reliability," in *Jicable*, Versailles, France, 2007, pp. 3-4.
- [2] Eugene Patronis, "The properties of coaxial cable," *Syn-Aud-Con*, vol. 37, Jan 2009.
- [3] Herman Koch, "Comparison of Transmission Systems," in *Gas-Insulated Transmission Lines (GIL)*, Chichester, West Sussex, England: Wiley, 2012, ch.8, sec. 8.3, pp. 326.
- [4] William H. Hayt, Jr., John A. Buck, "The Steady Magnetic Field," in *Engineering Electromagnetics*, 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2012, ch.7, sec. 7.2.
- [5] Nathan Ida, "Faraday's Law and Induction," in *Engineering Electromagnetics*, New York: Springer, 2000, ch.10, sec. 10.2.

UHF PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT OF GAS-INSULATED LINE

T. Nganpitak, C. Chamnong, C. Chuay-in, N. Sontayananon and N. Pattanadech

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
1 SoiChalongkung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand

Abstract

This paper presents the field experiment of on-line partial discharge (PD) measurement for gas-insulated line (GIL) with an ultra-high frequency (UHF) sensor. In the experiment, an UHF sensor with frequency spectrum of 300-1200 MHz was used for PD measurement of the existing 230kV GIL. The PD patterns obtained from the field test were compared to the PD pattern data base. It was found that the noise signal was a big problem to interpret the measured PD signals. Unfortunately, with a short time performing PD measurement, only noise signals can be detected and reported in this paper.

Keywords: Partial discharge, PD, Gas-insulated, GIL, UHF, Ultra-high frequency, On-line measurement.

1. Introduction

Partial discharge (PD) measurements are widely used to detect insulation problems. PD activity is localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors, so it generally accepted as an early breakdown indicator, which is also accepted in many standards.

In this paper authors describe how to detect partial discharge in Gas Insulated line (GIL) during normal operation in other words it calls on-line partial discharge measurement. The obtained PD patterns will be compared with the data base to search for the problems which may occur.

2. Theoretical Background

2.1 Type of PD

PD can be divided into 2 groups and 7 types as the following:

1. Internal PD:
 - Void in insulation,
 - Sharp surface on conductor
 - Tree growth in insulation
2. External PD:
 - Floating metal work
 - Corona from sharp
 - Discharge induced voltage onto ground
 - Surface discharge

Fig.1 shows the PD types classified.








7 Type of Partial discharges	
Internal PD	External PD
 (a.)	 (d.)
 (b.)	 (e.)
 (c.)	 (f.)
	 (g.)

Fig.1 7 Type of partial discharges
(a.) Void in insulation, (b.) Sharp on conductor, (c.) Tree growth in insulation, (d.) Floating metal work near conductors, (e.) Corona from sharp objects at high voltage, (f.) Discharge from induced voltages onto sharp point at ground, (g.) Surface discharges

2.2 Reaction from partial discharge

When insulation degenerates and PD phenomena appear, PD phenomena normally generate different kinds of signals such as electrical charge, acoustic signal, optical signal, Electromagnetic wave and Chemical by-products as shown in Fig.2. Measuring these reactions, one can detect PD activity by using different kinds of sensors as summarized in TABLE I.



Fig.2 Reaction from partial discharge

TABLE I
REACTION OF PD ENERGY AND HOW TO DETECT IT

Reaction of PD energy	Method / Device
Electrical charge	HFCT, Coupling capacitor
Acoustic	AA, AE
Electromagnetic	TEV, VHF, UHF
Optical PD	Visible detector
Chemical	DGA, Visual inspection
Thermal	Thermal imager

2.3 GIL Structure

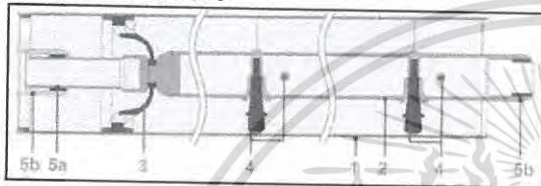


Fig.3 6 GIL structure.

The GIL structure is like gas-insulated substations (GIS) where a high-voltage conductor supported by insulators is positioned within a grounded enclosure and the remaining space between is filled with pressurized gas for electrical insulation.

The GIL has 5 main components as represented in Fig.3

- 1) Enclosure
- 2) Inner conductor
- 3) Conical insulator
- 4) Support insulator
- 5) Sliding contact: provides compensation for thermal expansion of the conductor

2.4 Common defects in GIL

During the GIL operation, there are six common defects which could be introduced in the system as depicted in Fig.4

- 1) Free conductive particle
- 2) HV protrusion
- 3) LV protrusion
- 4) Floating potential
- 5) Particles on insulator
- 6) Void

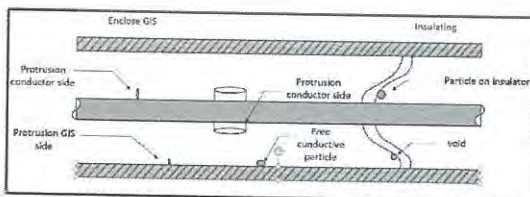


Fig.4 Six common defects in GIL

2.5 UHF sensor

The UHF sensor is a sensor device which detects electromagnetic discharge in frequency range about 200MHz - 1.5GHz. The UHF is suitable to detect PD signal in high voltage gas insulated switchgear or power transformers.



Fig.5 PDS-707 Internal UHF PD Sensor [1]

2.6 Signal comparison

Outside the screened laboratories, PD signals are very often superposed by noise pulses, from this reason it makes more difficult to compare suspected PD signals with library of known patterns.

However, one can reduce these problem by using 2 or more sensors and compared the signals between its as the below example

From Fig.6, it has 3 suspected PD signals

1. Consider signals around 20° of the applied voltage

Internal sensor sees spike and some noise

External sensors also see spike and some noise too, but the magnitude this sensor seen is smaller.

From these points, one can imply it as the same signal because the different in magnitude is due to different sensor and different location.

2. Consider signals from 80° to 120° of the applied voltage

Internal sensor sees 2 loose groups at 100 and 130

External sensor also sees same too but smaller magnitude, so one can imply it as the same signal

3. Consider signals from 260° to 340° of the applied voltage

It similar to case 1 and 2 (same shape of signal but smaller) so one can imply as it is the same signal

From these reasons one can almost decide it doesn't has PD in this situation except the PD pattern is appear but hidden within the external noise.

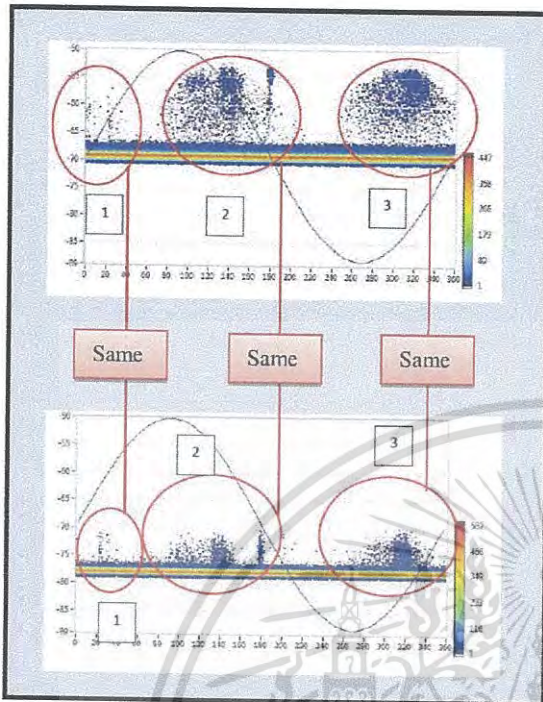


Fig.6 Signal comparison

3. Experiment

To measure PD in the GIL system, five processes need to be performed.

- 1) Connect detection sensors (see Fig.7)
- 2) Acquisition of UHF spectrum (300-1200 MHz)
- 3) Compare spectrums between 2 or more sensors
Then select frequencies to be investigated
[Selection criteria]
 - Select frequencies with stronger signal in internal sensor compared to noise sensor.
 - PD usually manifests in a ranges of frequencies (wideband) instead of individual frequency (narrowband).
 - Frequency that known to be external noise can be ignored.
- 4) Acquisition of UHF time domain
- 5) If suspected PD activity found compared it with library known patterns as shown as TABLE II

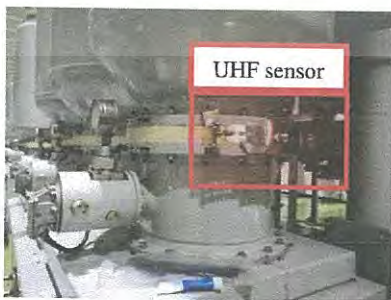
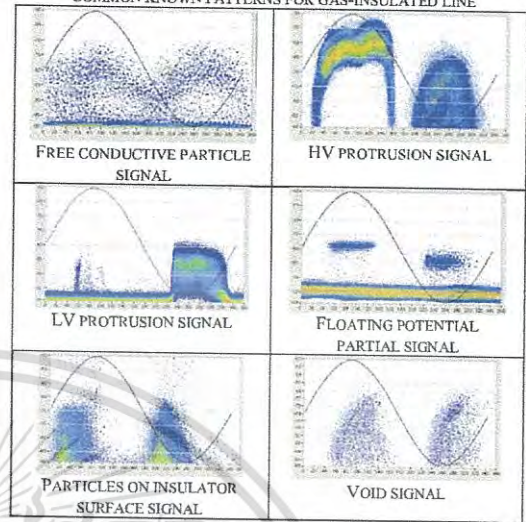


Fig.7 UHF external sensor installed at epoxy cone

TABLE III
COMMON KNOWN PATTERNS FOR GAS-INSULATED LINE



4. Case study

These cases are experiment results from the field tests

4.1 Gas-Insulated Line: A

PD signals obtained from GIL: A is shown in Fig. 8.

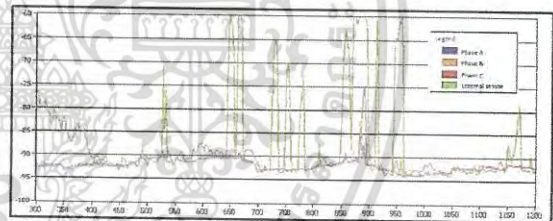


Fig.8 Frequency sweep in GIL A

PD interpretation: no PD activity is detected

4.2 Gas-Insulated Line: B

PD signals obtained from GIL: B is shown in Fig. 9.

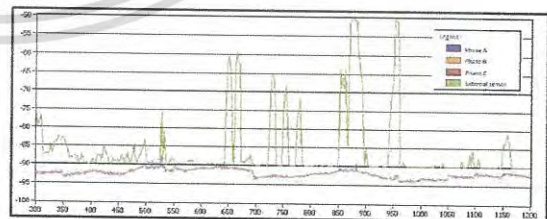


Fig.9 Frequency sweep in GIL B

PD interpretation: no PD activity is detected

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 Gas-Insulated Line: C

PD signals obtained from GIL: C is shown in Fig. 10.

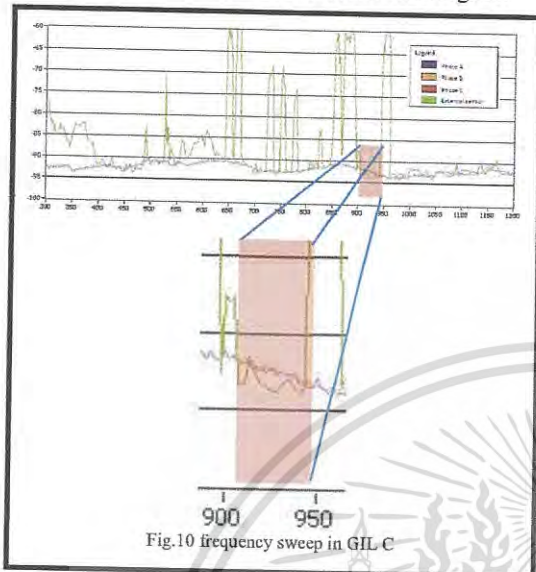


Fig.10 frequency sweep in GIL C

From Fig.10 when comparing the signals obtained from the internal sensor and the external sensor, it can be seen that in the range 910-950 MHz the internal sensor has stronger signals compared to these of external sensor. Then a signal in that range (Phase C, 912.5 MHz) is selected to do acquisition of UHF time domain as shown in Fig.11-Fig. 12.

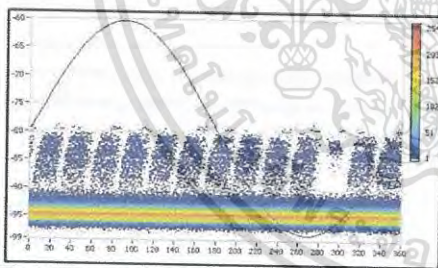


Fig.11 Time domain graph (912.5MHz Phase C)

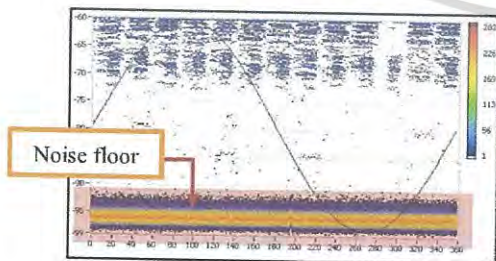


Fig.12 Time domain graph (912.5MHz External noise sensor)

From Fig.11 and Fig.12 when comparing the signals obtained from the internal sensor and the external sensor,

a strong momentary noise is detected by both sensor, so it can interpret that no PD activity is detected

5 Conclusion

According to 3 cases studies, it can be concluded that it is difficult to separate PD signal out of the noise signal in the online PD measurement for GIL system. Besides, at least two UHF sensors are required for effective PD measurement.

6 Acknowledgment

This research was partially supported by Mr. P.Nimsanong and Mr.S. Mongkonlatitpong, who provided insight and expertise that greatly assisted the research. We also much obliged for every people in anonymous company for many techniques supports, and comments. Besides, the authors would like to express their thanks for project financial support from Meidensha Corporation.

7 References

- [1] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Guide for Application and User Guide for Gas-Insulated Transmission Lines, Rated 72.5 kV and Above, 2017.
- [2] http://www.sdmt.co.uk/products_details.asp?S_ID=97
- [3] R. Arora and W. Mosch, "High Voltage and Electrical Insulation Engineering"
- [4] Hermann, Koch, **Gas insulated transmission lines (GIL)**, 1st ed, John Wiley & Sons, 2012.

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล ชนาธิป จำนง (เป็ป)
 วัน เดือน ปีเกิด 8 กันยายน พ.ศ. 2538
 ที่อยู่ 40/2 ถ.อ่างทอง-สิงห์บุรี ต.ตลาดหลวง อ.เมือง จ.อ่างทอง 14000
 ประวัติ ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลวัดอ่างทอง จ.อ่างทอง
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสตรีอ่างทอง จ.อ่างทอง
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 E-mail schnatipp.user@gmail.com



ชื่อ-สกุล ชัยวัช ช่วยอินทร์ (เพลง)
 วัน เดือน ปีเกิด 9 เมษายน พ.ศ. 2539
 ที่อยู่ 1/31 ม.2 ถ.ตรัง-ปะเหลียน ต.โคกหล่อ อ.เมือง จ.ตรัง 92000
 ประวัติ ระดับประถมศึกษา โรงเรียนพรศิริกุล จ.ตรัง
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสภาราษินี จ.ตรัง
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 E-mail Chaitwat09@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-สกุล ญัฐวิทย์วุฒิ สนธยานานนท์ (เคิร์ก)
 วัน เดือน ปีเกิด 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2539
 ที่อยู่ 44/7 ถ.ตาแดง ต.บ้านใหม่ อ.บางใหญ่ จ.นนทบุรี 11140
 ประวัติ ระดับประถมศึกษา โรงเรียน บุณยศรีสวัสดิ์ จ.นครปฐม
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียน ทวีธาภิเศก จ.กรุงเทพมหานครฯ
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 E-mail nath.sontayananon@gmail.com



ชื่อ-สกุล ไตรทศ งานพิทักษ์ (เอิร์ธ)
 วัน เดือน ปีเกิด 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2539
 ที่อยู่ 503/7 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
 ประวัติ ระดับประถมศึกษา โรงเรียนปัญญาทรัพย์ (ดินแดง)
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสาธิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 ประสานมิตร (ฝ่ายมัธยม)
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 E-mail Ng.tritod@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้