

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและออกแบบสร้างกับดักฟ้าผ่า

The Study and Design of Lightning Arrester



รฟ.
๕๒๘๒ก
๒๕๔๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 73007
วัน,เดือน,ปี..... 27 ส.ย. 2550

b. 11๗๙ ๒๒๗๔
i.....

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การศึกษาและออกแบบสร้างกับดักฟ้าผ่า
The Study and Design of Lightning Arrester



อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.นเรศรชฐ พัฒนเดช

ดร.วุฒิชัยชาติพัฒนานันท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและออกแบบสร้างกับดักฟ้าผ่า

ผู้จัดทำ

นายชาลิต	ฤกษ์ดี	47015086
นายบรรเดช	ภูมิผิว	47015096
นายพรเทพ	ปรีชากาศ	47015098
นายภูษิต	ถึงสุข	47015104

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและออกแบบสร้างกับดักฟ้าผ่า

นาย ชวลิต	ฤกษ์ดี	
นาย บวรเดช	ภูมิผิว	
นาย พรเทพ	ปรีชาภาค	
นาย ภูชิต	ถึงสุข	
อ. นรเศรษฐ์	พัฒน์เดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.วุฒิชัย	ชาติพัฒนานันท์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการออกแบบกับดักฟ้าผ่า

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่า จะเป็นการทดสอบ กับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแก๊ส พิกัด 21 kV 5 kA และ 24 kV 10 kA ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 โดยทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของ สจล. ผลจากการทดสอบกับดักฟ้าผ่าที่นำมาทดสอบพบว่า กับดักฟ้าผ่าผ่านมาตรฐานการทดสอบรวมทั้งได้ทำการศึกษากับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในประเทศไทย เรียกว่า Long Flashover Arresters (LFA) และได้ทำการจำลองออกแบบสร้างขึ้นมา 3 แบบด้วยกัน และทำการทดสอบหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด และทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ รายละเอียดการทดสอบกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแก๊ส และผลการศึกษาเกี่ยวกับดักฟ้าผ่าแบบ LFA ดังรายงานอยู่ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study and Desing of Lightning Arrester

Mr. Chowwalit	Leakdee	
Mr. Baworndech	Phoomipiew	
Mr. Pornthep	Preechakad	
Mr. Poochit	Tuengsook	
Lecturer Norasage	Pattanadech	Adviser
Dr.Wuttichai	chatpattananun	Adviser

2006

ABSTRACT

This project presents the study of electrical property and the design of lightning arrester.

A study of electrical property is lightning arrester with no gap type test at rated 21 kV 5 kA and 24 kV 10 kA followed IEC 60099-4. Those tests were done in High Voltage Engineering Laboratory of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. The tested results of lightning arrester pass standard test. This project include a study of lightning arrester from Russia call "Long Flashover Arrester" (LFA). The project simulated and built 3 type of lightning arrester to study the results of corona test and impulse test. The detail of lightning arrester with no gap type test and result of study lightning arrester type LFA is shown in this project.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากการช่วยเหลือ สนับสนุนจากหลาย ๆ ท่าน โดยเฉพาะอาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช ,ดร.วุฒิชัย ชาดิพัฒนานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และ อาจารย์ พีรวุฒิ ยุทธโกวิท ที่คอยกรุณาให้คำปรึกษา และแนวคิดอย่างใกล้ชิดทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ อีกทั้งยังช่วยเหลือแก้ไขปัญหาบางอย่างให้กับคณะผู้จัดทำ โดยมีเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อยและรำคาญใจ และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญา นิพนธ์นี้ให้เป็นที่เรียบร้อย รวมทั้งกองวิจัย กองมาตรฐาน กองทดสอบ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และให้ข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการ ขอขอบคุณ พี่ๆ นิสิตปริญญาโท และเพื่อน ๆทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา รวมทั้งบุคคลอีกหลาย ๆท่านที่ยังมิได้เอ่ยถึงที่ให้คำแนะนำกับคณะผู้จัดทำ

อนึ่งโครงการชิ้นนี้สำเร็จด้วยดีเนื่องจากความดีงามและความมีน้ำใจของทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น และคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและเป็นที่กำลังใจที่ดีเสมอมา

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ปริิญญานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตปริิญญานิพนธ์.....	2
1.5 ขั้นตอนการทำปริิญญานิพนธ์.....	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำปริิญญานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไฟฟ้าคืออะไร.....	4
2.2 กระบวนการเกิดไฟฟ้า.....	5
2.3 ผลจากไฟฟ้า.....	7
2.3.1 ผลทางความร้อน.....	7
2.3.2 ผลทางแรงกล.....	8
2.3.3 ผลทางไฟฟ้า.....	8
2.4 หลักการฟ้าผ่าลงที่ใด.....	11
2.4.1 ระยะฟ้าผ่า.....	11
2.5 แรงแดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	12
2.5.1 แรงแดันเกินภายนอก.....	13
2.5.2 แรงแดันเกินภายใน.....	13
2.5.3 แรงแดันเกินชั่วคราว.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 กั๊บดั๊กฟ้าผ่า.....	14
2.6.1 กั๊บดั๊กฟ้าผ่าแบบมีแก๊บ.....	15
2.6.2 กั๊บดั๊กฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊บ.....	16
2.6.3 กั๊บดั๊กฟ้าผ่าแบบมีแก๊บทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์.....	17
2.7 ลักษณะสมบัตินั้งดัน – กระจแสบองกั๊บดั๊กฟ้าผ่า.....	18
2.7.1 ลักษณะสมบัตินั้งดัน – กระจแสบองกั๊บดั๊กฟ้าผ่าชนิดมีแก๊บ.....	20
2.7.2 ลักษณะสมบัตินั้งดัน – กระจแสบองกั๊บดั๊กฟ้าผ่าชนิดไม่มีแก๊บ.....	20
2.8 การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge).....	21
2.8.1 ผลกระทบของดิสชาร์จบางส่วน.....	22
2.8.2 วงจรสมมูลของดิสชาร์จบางส่วน.....	22
2.8.3 ประจุที่ปารกฎและประจุที่วัดได้.....	24
2.8.4 วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	26
2.8.5 การต้องจรรระบบวัดดิสชาร์จบางส่วนในการทดสอบ.....	28
2.8.6 การแสดงผลดิสชาร์จภายใน.....	29
2.9 การออกแบบดริบฉนวนโพลีเมอรืของกั๊บดั๊กฟ้าผ่า.....	30
2.9.1 ลักษณะมิตินั้งคัญของกั๊บดั๊กฟ้าผ่า.....	30
2.9.2 การใช้งานกั๊บดั๊กฟ้าผ่าในสภาวะเปราะฉือ.....	32
2.9.3 แนวทางการแก้ไขกั๊บดั๊กฟ้าผ่าในสภาวะเปราะฉือ.....	35
2.9.4 การออกแบบกั๊บดั๊กฟ้าผ่าเพื่อใช้งานในบริเวณเปราะฉือ.....	36
2.10 ไฟไนต์เอิลีเมนต์.....	38
บทที่ 3 การทดสอบกั๊บดั๊กฟ้าผ่า.....	44
3.1 การทดสอบกั๊บดั๊กฟ้าผ่า.....	44
3.1.1 การทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Internal partial discharge).....	45
3.1.2 การทดสอบหากระจแสบรั่วไหล (Leakage Current).....	54
3.1.3 การทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงาน (Reference Voltage).....	57
3.1.4 การทดสอบกั๊บดั๊กฟ้าผ่าในสภาวะเปราะฉือ.....	59
บทที่ 4 การออกแบบกั๊บดั๊กฟ้าผ่า.....	62
4.1 การออกแบบกั๊บดั๊กฟ้าผ่า (LFAs).....	62
4.2 วิธีการออกแบบกั๊บดั๊กฟ้าผ่า (LFAs).....	62

เอกสารนั้งเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทังสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ในการออกแบบ.....	63
4.4 ขั้นตอนการสร้างกับดักฟ้าผ่า (LFAs).....	74
4.5 การทดสอบกับดักฟ้าผ่า LFA.....	78
4.5.1 การทดสอบหาโคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่า LFA.....	78
4.5.2 การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ของกับดักฟ้าผ่า LFA.....	84
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผล.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก กราฟการแปลงค่า.....	92
ภาคผนวก ข การคำนวณหาระยะห่างของดั่วลอกกับดักฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดโคโรนา.....	95



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ฟิวส์และฟิวส์	4
รูปที่ 2.2 ฟิวส์	5
รูปที่ 2.3 ภาพสเก็ทการขยายตัวของหัวนำร่อง	6
รูปที่ 2.4 สตรีมเมอร์จะวิ่งขึ้นจากพื้นโลก	6
รูปที่ 2.5 แรงกลอิมพัลส์กระทำต่อตัวนำ	8
รูปที่ 2.6 แสดงแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว	10
รูปที่ 2.7 แรงดันช่วงก้าว U_s (stepped voltage)	11
รูปที่ 2.8 ระยะฟิวส์ในเทอมของกระแส	12
รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก, แรงดันเกินภายในและแรงดันเกินชั่วคราว	14
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกับดักฟิวส์แบบมีแก๊ป	16
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของกับดักฟิวส์แบบไม่มีแก๊ป	16
รูปที่ 2.12 ZnO ที่อยู่ภายในกับดักฟิวส์	17
รูปที่ 2.13 กับดักฟิวส์ที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วย คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก หรือ อาร์กชิงฮอร์น ต่ออนุกรมกับชิ่งค้ออกไซด์	18
รูปที่ 2.14 การนำกระแสและแรงดันที่ดักคร่อมกับดักฟิวส์แบบไม่มีแก๊ป	19
รูปที่ 2.15 รูปแบบของดีสชาร์จบางส่วน	22
รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน	23
รูปที่ 2.17 การดีสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน	24
รูปที่ 2.18 ผลของค่าตัวเก็บประจุความถี่ C_f ต่อความไวการวัด q_m/q	26
รูปที่ 2.19 วงจรพื้นฐานการวัดดีสชาร์จบางส่วน	26
รูปที่ 2.20 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของดีสชาร์จบางส่วน	27
รูปที่ 2.21 วงจรทดสอบตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนโดยตรง	28
รูปที่ 2.22 การแสดงผลการดีสชาร์จบางส่วน	30
รูปที่ 2.23 ลักษณะทางมิติที่สำคัญของกับดักฟิวส์	31
รูปที่ 2.24 ความเสียหายที่มีสาเหตุจากการเกิดวาบไฟตามผิวของกับดักฟิวส์	32
รูปที่ 2.25 ขั้นตอนการเกิดวาบไฟตามผิวที่ผิวฉนวนจากสิ่งเปราะเปื้อน	34
รูปที่ 2.26 ลักษณะการออกแบบครีปตามมาตรฐาน IEC 815	37
รูปที่ 2.27 รูปแบบของครีปประเภทต่าง ๆ	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.28 ลักษณะของตัวอย่างแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างวิธีการผลต่างสปีนเนื่องกับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	39
รูปที่ 2.29 แผ่นอะลูมิเนียมที่วิเคราะห์โดยใช้วิธีการผลต่างสปีนเนื่อง (ก) กับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (ข).....	39
รูปที่ 2.30 ตัวอย่างการแบ่งขอบเขตรูปร่างเป็นเอลิเมนต์ย่อย.....	41
รูปที่ 2.31 จุดต่อของเอลิเมนต์ย่อย.....	41
รูปที่ 3.1 กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในการศึกษา.....	44
รูปที่ 3.2 วงจรทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนของกับดักฟ้าผ่า.....	45
รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 1.....	47
รูปที่ 3.4 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 4.....	48
รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 7.....	49
รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 1.....	50
รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 4.....	51
รูปที่ 3.8 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 7.....	52
รูปที่ 3.9 วงจรทดสอบหาค่ากระแสรั่วไหล.....	54
รูปที่ 3.10 วงจรการทดสอบแรงดันเริ่มทำงาน.....	57
รูปที่ 3.11 วงจรการทดสอบกับดักฟ้าผ่าในสภาวะเปราะ.....	59
รูปที่ 4.1 กับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในประเทศไทย.....	62
รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบต่างๆของกับดักฟ้าผ่า.....	63
รูปที่ 4.3 ขนาดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1.....	63
รูปที่ 4.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1.....	64
รูปที่ 4.5 การกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1.....	64
รูปที่ 4.6 กราฟการกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1.....	65
รูปที่ 4.7 การกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1.....	65
รูปที่ 4.8 กราฟการกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1.....	66
รูปที่ 4.9 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1.....	66
รูปที่ 4.10 ขนาดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2.....	67
รูปที่ 4.11 ความเครียดสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2.....	67
รูปที่ 4.12 การกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 กราฟการกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2.....	68
รูปที่ 4.14 การกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2.....	69
รูปที่ 4.15 กราฟการกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2.....	69
รูปที่ 4.16 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2.....	70
รูปที่ 4.17 ขนาดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3.....	70
รูปที่ 4.18 ความเครียดสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3.....	71
รูปที่ 4.19 การกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3.....	71
รูปที่ 4.20 กราฟการกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3.....	72
รูปที่ 4.21 การกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3.....	72
รูปที่ 4.22 กราฟการกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3.....	73
รูปที่ 4.23 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3.....	73
รูปที่ 4.24 ชั้นส่วนต่างๆที่สร้างขึ้นมาเพื่อรอทำการประกอบ.....	74
รูปที่ 4.25 ทำการเชื่อมต่อทองเหลืองเพื่อทำฐานรองรับ.....	74
รูปที่ 4.26 ฐานรองรับเมื่อทำการเชื่อมต่อเสร็จ.....	75
รูปที่ 4.27 ประกอบฐานรองรับ.....	75
รูปที่ 4.28 สายตัวนำอิเล็กทรอนิกส์แบบที่ 1 (อิเล็กทรอนิกส์แบบเม็ด).....	75
รูปที่ 4.29 สายตัวนำอิเล็กทรอนิกส์แบบที่ 2 (อิเล็กทรอนิกส์มีระยะเท่ากัน).....	76
รูปที่ 4.30 สายตัวนำอิเล็กทรอนิกส์แบบที่ 3 (อิเล็กทรอนิกส์มีระยะไม่เท่ากัน).....	76
รูปที่ 4.31 กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 (อิเล็กทรอนิกส์แบบเม็ด).....	76
รูปที่ 4.32 กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 (อิเล็กทรอนิกส์มีระยะเท่ากัน).....	77
รูปที่ 4.33 กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 (อิเล็กทรอนิกส์มีระยะไม่เท่ากัน).....	77
รูปที่ 4.34 กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในการศึกษา.....	78
รูปที่ 4.35 วงจรการทดสอบหาโคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่า.....	79
รูปที่ 4.36 โคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ที่ระบบ 22 KV.....	81
รูปที่ 4.37 โคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ที่ระบบ 22 KV.....	81
รูปที่ 4.38 โคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ที่ระบบ 22 KV.....	81
รูปที่ 4.39 โคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ที่ระบบ 33 KV.....	82
รูปที่ 4.40 โคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ที่ระบบ 33 KV.....	83
รูปที่ 4.41 โคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ที่ระบบ 33 KV.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.42 วงจรทดสอบการทำงานภายใต้แรงดันฟ้าผ่า.....	85
รูปที่ 4.43 การวัดค่าแรงดัน $U_{b50\%}$ โดยวิธีการปรับขึ้นลง (up and down method) ที่แรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลา.....	86
รูปที่ 4.44 การวัดค่าแรงดัน $U_{b50\%}$ โดยวิธีการปรับขึ้นลง (up and down method) ที่แรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลา.....	87



สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำปริญญานิพนธ์.....	3
ตารางที่ 2.1	การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของกับดักเสิร์จชนิด Sic กับ ZnO.....	21
ตารางที่ 2.2	การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน.....	33
ตารางที่ 2.3	Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้กับดักฟ้าผ่าที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปราะเปื้อน.....	35
ตารางที่ 3.1	ผลการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในกับดักฟ้าผ่าที่แรงดัน $1.05U_c$..	53
ตารางที่ 3.2	ผลการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในกับดักฟ้าผ่าที่แรงดัน $1.05U_p$..	53
ตารางที่ 3.3	ผลการทดสอบหากระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า.....	55
ตารางที่ 3.4	ผลการทดสอบค่าแรงดันเริ่มทำงาน.....	58
ตารางที่ 3.5	ผลการทดสอบการเกิดโคโรนาที่ระดับความเปราะเปื้อนน้อย.....	60
ตารางที่ 3.6	ผลการทดสอบการเกิดโคโรนาที่ระดับความเปราะเปื้อนสูงมาก.....	61
ตารางที่ 4.1	ผลการทดสอบหาโคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าที่ระบบ 22 kV.....	80
ตารางที่ 4.2	เฉลี่ยแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าที่ระบบ 22 kV.....	80
ตารางที่ 4.3	ผลการทดสอบหาโคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าที่ระบบ 33 kV.....	82
ตารางที่ 4.4	เฉลี่ยแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าที่ระบบ 33 kV.....	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะเป็นการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง เพื่อที่จะให้เพียงพอต่อความต้องการ และเกิดความสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อเกิดแรงดันเกินเกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า จะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับสายส่ง ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวเกิดความเสียหายได้ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการป้องกันแรงดันเกินที่เกิดขึ้นไม่ให้ไปทำลายอุปกรณ์ต่างๆให้เกิดความเสียหาย การป้องกันทำได้โดยการใช้กับดักฟ้าผ่า เพื่อใช้ในการลดแรงดันที่เกิดขึ้นนั้นลดระดับความรุนแรงลง

กับดักฟ้าผ่าหรือกับดักเสิร์จ (Surge Arrester) เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในการลดระดับแรงดันเกินหรือจำกัดแรงดันเกิน โดยจะต้องนำกระแสเสิร์จหรือกระแสอิมพัลส์ให้ไหลลงสู่ดิน และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไม่ให้เกินค่าที่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ป้องกันอยู่ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นแบบติดตั้งอยู่กลางแจ้ง จึงมีโอกาที่จะได้รับแรงดันเกินเกิดขึ้นในระบบสูง ทั้งด้วยสาเหตุจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Overvoltage) ซึ่งจัดเป็นแรงดันเกินภายนอก (External Overvoltage) และแรงดันเกินจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร เรียกว่า แรงดันเกินสวิตชิง (Switching Overvoltage) ซึ่งจัดเป็นแรงดันเกินภายใน (Internal Overvoltage) ในปัจจุบันกับดักฟ้าผ่าได้รับการพัฒนาและนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายด้วยเทคโนโลยีการผลิตภายในประเทศ โดยเฉพาะการนำไปใช้เพื่อป้องกันแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังและระบบจำหน่าย [1-2]

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการใช้งานของกับดักฟ้าผ่าคือปัญหาการเจาะทะลุของเนื้อฉนวนโพลีเมอร์ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากความผิดปกติภายในเนื่องจากความชื้นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน เกิดจากกระบวนการผลิต หรือคุณสมบัติของเนื้อฉนวนที่ไม่เหมาะสม การทดสอบคุณสมบัติของกับดักฟ้าผ่าก่อนที่จะนำไปติดตั้งใช้งาน จะช่วยลดปัญหาความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังอันเนื่องมาจากความไม่มีคุณภาพของอุปกรณ์ดังกล่าว รวมทั้งการออกแบบครีปของเนื้อฉนวนโพลีเมอร์ของกับดักฟ้าผ่าให้กระจายสภาพสนามไฟฟ้าดีขึ้นจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่า

1.2 ความสำคัญของปัญหา

กั๊บดั๊กเสีร์จ (Surge Arrester) เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ทำงานโดยการนำกระแสเสีร์จหรือกระแสอิมพัลส์ให้ไหลลงสู่ดิน และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไม่ให้เกินค่าที่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ป้องกันอยู่ ในปัจจุบันกั๊บดั๊กเสีร์จได้รับการพัฒนาและถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการนำไปใช้เพื่อป้องกันแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังและระบบจำหน่าย รวมทั้งการป้องกันแรงดันเกินให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น

1.3 วัตถุประสงค์ปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาโครงสร้าง การทำงานของกั๊บดั๊กฟ้าผ่า
2. เพื่อศึกษาการจำลองสภาพทางไฟฟ้าของกั๊บดั๊กฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
3. เพื่อทดสอบกั๊บดั๊กฟ้าผ่าโดยใช้ห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. เพื่อทำการออกแบบกั๊บดั๊กฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. เพื่อศึกษามาตรฐานเกี่ยวกับกั๊บดั๊กฟ้าผ่า
6. เพื่อนำกั๊บดั๊กฟ้าผ่าที่ทำการออกแบบไปใช้ในงานด้านไฟฟ้าแรงสูง

1.4 ขอบเขตปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาการทำงาน มาตรฐาน การออกแบบและการทดสอบกั๊บดั๊กฟ้าผ่า
2. ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและจำลองทางไฟฟ้าของกั๊บดั๊กฟ้าผ่า
3. ออกแบบและจำลองทางไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นของกั๊บดั๊กฟ้าผ่าแบบเดิมและแบบใหม่ที่ทำการออกแบบขึ้นมา

1.5 ขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์

ในการศึกษาโครงการวิศวกรรมนี้ ได้มีการวางแผนจัดลำดับขั้นตอน การศึกษาไว้ในกรอบของระยะเวลาการศึกษารวมประมาณ 9 เดือน เพื่อให้ได้ข้อมูลผลการศึกษาวิจัยซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์อ้างอิงในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมได้และเพื่อให้การศึกษามีความสมบูรณ์มากที่สุด โดยมีลำดับขั้นตอนของการศึกษาวิจัยแสดงในตารางที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำปริญญานิพนธ์

การทำงาน	พ.ศ. 2549					พ.ศ. 2550				
	ภาคเรียนที่ 1				X	ภาคเรียนที่ 2				
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.		ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.ศึกษามาตรฐานและข้อมูลของกับดักไฟฟ้า					สอบปลายภาคเรียนที่ 1 และเปิดภาคการศึกษา					
2.ศึกษามาตรฐานการออกแบบและทดสอบกับดักไฟฟ้า										
3.ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์										
4.จัดทำข้อมูลนำเสนอภาคเรียนที่ 1										
5.ทดสอบกับดักไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC										
6.ออกแบบและวิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้า										
7.สรุปผลและประเมินผลการทดสอบ										
8.จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์										



วางแผน



ดำเนินการจริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำปริญญานิพนธ์

1. สามารถพัฒนาต้นแบบของกับดักไฟฟ้าชนิดใหม่ขึ้นมา
2. สามารถออกแบบกับดักไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น
3. สามารถที่จะวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดจากกับดักไฟฟ้าแบบเดิมและนำมาพัฒนาให้กับกับดักไฟฟ้าแบบใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
4. เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปวิจัยกับดักไฟฟ้าต่อนักวิจัยรุ่นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟาผ่าคืออะไร [1]

ฟาผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ Benjamin Franklin และลูกชาย Thomas Folger ได้พิสูจน์ให้เห็นชัดเจน ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1752 ที่เมืองฟิลาเดลเฟีย สหรัฐอเมริกาว่า ฟาผ่าก็คือ สปาร์กไฟฟ้า ("lightning is electric spark") อันเป็นผลของการเกิดดิซชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ นับเป็นการเริ่มต้นของการศึกษาเชิงวิทยาศาสตร์ เพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับฟาผ่า การค้นพบนี้ เบนจามินได้พัฒนาหลักการป้องกันฟาผ่าด้วยเสาหล่อฟ้า เรียกว่า Franklin rod มาจนถึงทุกวันนี้

การสะสมประจุในก้อนเมฆมีปริมาณมาก ทำให้ก้อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูง ตั้งแต่ 10 เมกะโวลต์ถึง 100 เมกะโวลต์ และเกิดดิซชาร์จระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก เป็นวาบฟาผ่า (Ground flash) หรือระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือภายในก้อนเมฆเดียวกันเป็น ฟาแลบ (air discharge) ฟาผ่าและฟาแลบมีโอกาสเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยธรรมชาติปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่จะเป็นฟาแลบ การศึกษาและวิจัยของมนุษย์ส่วนมากจะให้ความสนใจเกี่ยวกับฟาผ่ามากกว่า



รูปที่ 2.1 ฟาแลบและฟาผ่า

สิ่งต่างๆทั้งหลายภายในโลกนี้จะมีทั้งคุณและโทษอยู่ในตัว แต่ฟาผ่าเท่าที่ทราบจะมีแต่โทษ เนื่องจากลำฟาผ่ามีความร้อนสูง โดยเฉพาะที่แกนลำฟาผ่ามีอุณหภูมิสูงถึง $30,000^{\circ}\text{K}$ จึงทำให้เกิดเพลิงไหม้แก่สิ่งที่ถูกฟาผ่าได้ จากการวัดกระแสฟาผ่าก็มีค่านับเป็นหลายสิบเป็นร้อยกิโลแอมป์ ซึ่งกระแสขนาดนี้ที่จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นและรวดเร็ว ย่อมทำให้เกิดแรงกลบิตและแรงระเบิดได้มากมาย ฉะนั้นเมื่อฟาผ่าที่ใดก็มักจะทำให้สิ่งที่ถูกฟาผ่าเกิดระเบิดเสียหาย นอกจากนั้นแล้วการเปลี่ยนแปลงของกระแสฟาผ่ามีอัตราสูง จึงทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในระบบ วงจรไฟฟ้าเป็นแรงดันแลร์จ และเกิดเป็นแรงดันเกินวิ่งไปตามสายไฟเข้าไปสู่อุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อแรงดันทรานเซียนต์ ส่วนกระแส ไฟฟ้าที่ไหลลงสู่ดิน ก็อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในบริเวณนั้นอันเนื่องมาจากแรงดัน ชั่วคราว และแรงดันสัมผัสได้ [1]



รูปที่ 2.2 ฟาผ่า

แม้จะทราบว่าฟ้าผ่านั้นทำให้เกิดความพินาศเสียหาย และเป็นอันตรายต่อ สิ่งมีชีวิต แต่มนุษย์ก็ไม่อาจห้ามการเกิดฟ้าผ่าได้ในทางปฏิบัติ จะทำได้ก็เพียงป้องกันมิให้เกิด อันตราย อันเนื่องจากผลของฟ้าผ่าโดยสร้างระบบป้องกันตามมาตรฐาน แต่การจะออกแบบ ระบบป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่าให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องทราบและมีความ เข้าใจดีเกี่ยวกับกระบวนการเกิดฟ้าผ่า ลักษณะสมบัติและพฤติกรรมของฟ้าผ่า ซึ่งจะเป็น ข้อมูลขั้นพื้นฐานสำคัญ ที่จะช่วยให้สามารถป้องกันได้เหมาะสมและมีความปลอดภัย

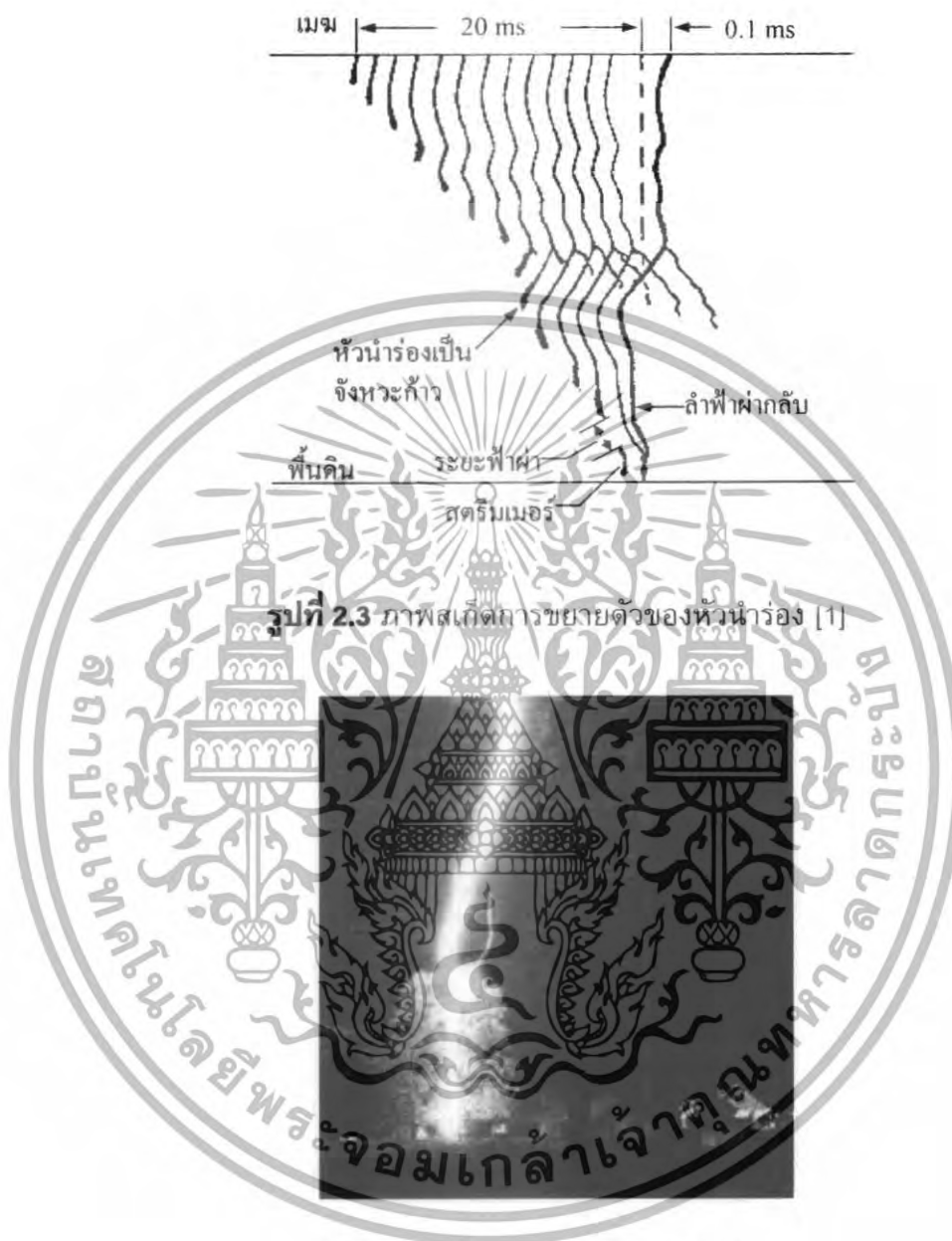
2.2 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า [1]

โดยทั่วไปฟ้าผ่าจะเริ่มต้นในก้อนเมฆที่มีประจุสะสม ระดับสูง 1.5-10 กิโลเมตร เหนือพื้นโลก ซึ่งมีการกระจายของประจุ ที่ฐานของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบ ส่วนบนของก้อน เมฆเป็นประจุบวก ดังรูปที่ 2.3 จุดเริ่มต้นของการเกิดฟ้าผ่า ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ กลุ่มประจุลบ คือ ที่ฐานของก้อนเมฆเพราะอยู่ใกล้พื้นโลก เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าถึงจุดวิกฤติ E_c ใน ก้อนเมฆประมาณ 10 kV/cm (ในบรรยากาศที่ระดับพื้นโลก E_c มีค่าประมาณ 30 -10 kV/cm) ก็ จะเกิดไอออนในเซชันตามหลักการเกิดดิซชาร์จในก๊าซ

การเกิดไอออนในเซชันของอากาศจะเกิดเป็นลีดเดอร์ (leader) หรือหัวนำร่องมี ทิศทางลงสู่พื้นโลกในลักษณะจังหวะก้าว (stepped leader) แบบสุ่มๆดังภาพสเก็ตในรูปที่ 3 มีช่วงก้าวตั้งแต่ 3 เมตร ถึง 200 เมตร เฉลี่ยช่วงก้าวประมาณ 50 เมตร ในทิศทางที่แตกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง่ายที่สุด ความเร็ว 10-100 km/s แต่ละจิ้งหะที่ก้าวจะหยุดพักราว 10-50 μ s ก่อนที่จะกระโดดก้าวต่อไป



รูปที่ 2.3 ภาพสเก็ตการขยายตัวของหัวนาร่อง [1]

รูปที่ 2.4 สตริมเมอร์จะวิ่งขึ้นจากพื้นโลก [1]

เมื่อหัวนาร่องเข้ามาใกล้พื้นโลก จะทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำที่พื้นโลกที่ยอดแหลมของอาคาร สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ เป็นต้น เกิดไอออนไนซ์เป็นสตริมเมอร์ มีความยาว 1-100 m (เฉลี่ย 50 m) วิ่งเข้าหาหัวนาร่อง จนมาพบกันจะเกิดเป็นลำฟ้าผ่า (main stroke) มีแสงจ้า จากพื้นโลกวิ่งไปหาก้อนเมฆ ด้วยความเร็วสูงกว่า 50×10^3 km/s ตามแนวที่หัวนาร่องกรุยทางลงมา การเคลื่อนที่ของประจุในลำฟ้าผ่า ก็คือ กระแสฟ้าผ่านั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะสุดท้ายที่หัวนำร่องกระโดดเข้าหาสตรีมเมอร์ เรียกว่า ระยะฟ้าผ่า (striking distance) มีระยะเฉลี่ยประมาณ 50 เมตร

2.3 ผลจากฟ้าผ่า [1]

ผลจากฟ้าผ่าที่ก่อให้เกิดความเสียหายหรือเกิดอันตรายอาจแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ความร้อนเป็นผลให้เกิดเพลิงไหม้แก่สิ่งที่ถูกผ่า
2. แรงกลบดหรือแรงระเบิดเป็นผลให้สิ่งที่ถูกผ่าพังทลายลงได้
3. ผลทางไฟฟ้า เกิดแรงดันเกินในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลเสียแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ เกิดคลื่นรบกวนต่อระบบสื่อสาร เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเกิดแรงดันช่วงก้าวเป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิต

2.3.1 ผลทางความร้อน

เมื่อเกิดฟ้าผ่าจะมีลำแสงจ้าของฟ้าผ่า ลำแกมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเซนติเมตร และมีอุณหภูมิสูงถึง 30.000 K อุณหภูมิสูงมากขนาดนี้ย่อมก่อให้เกิดเพลิงไหม้แก่วัสดุติดไฟได้ถึงแม้ว่าช่วงระยะเวลาการไหลของกระแสจะสั้นมากก็ตาม

กรณีเกิดฟ้าผ่าลงบนโลหะ มักจะมีร่องรอยของการถูกฟ้าผ่า ณ ตำแหน่งที่ผ่า ทั้งนี้เพราะกระแสฟ้าผ่า เมื่อแปลงเป็นพลังความร้อน มีค่ามากพอที่จะทำให้โลหะนั้นหลอมละลายได้ พลังงานฟ้าผ่าอาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$W = U \int_0^{\infty} i dt = U_{AK} Q \quad (2.1)$$

เมื่อ U_{AK} คือ แรงดันตกคร่อมแอโนด-แคโทดตรงจุดที่ฟ้าผ่ากระทบ

Q คือ ประจุฟ้าเป็นคูลอมบ์ (หรือแอมป์-วินาที)

ถ้าทราบชนิดของโลหะ ก็จะสามารถคำนวณปริมาตรของโลหะที่หลอมละลายได้ เช่น กระแสฟ้าผ่า 1 แอมป์-วินาที (= 1 คูลอมบ์) จะหลอม

ทองแดงได้	5.4	ลูกบาศก์มิลลิเมตร
อะลูมิเนียมได้	12	ลูกบาศก์มิลลิเมตร
เหล็กได้	4.4	ลูกบาศก์มิลลิเมตร

นั้นแสดงว่า ถึงโลหะแผ่นบางทั้งหลาย มีโอกาสถูกฟ้าผ่าหลอมละลายทะลุตรงจุดที่ฟ้าผ่ากระทบได้ ถ้าความหนาไม่พอ ถ้าเป็นถึงเก็บเชื้อเพลิง เช่น ถังน้ำมันก็ย่อมทำให้เกิดการระเบิดเพลิงไหม้ขึ้นได้

ด้วยเหตุผลเดียวกัน การออกแบบระบบสายล่อฟ้า ซึ่งต้องใช้เสาล่อฟ้าเป็นตัวล่อ หรือรับให้ฟ้าผ่าลง และมีสายตัวนำลงดิน (down conductor) เป็นทางนำกระแสฟ้าผ่าให้ลงสู่

ดินโดยเร็วที่สุด โดยไม่ทำให้สายตัวนำลงดินหลอมละลาย หรืออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จนเป็นเหตุให้เกิดเพลิงไหม้ นั่นคือ สายตัวนำลงดิน จะต้องมียพื้นที่ภาคตัดขวางขนาดโตพอ

2.3.2 ผลทางแรงกล

ผลของฟ้าผ่า นอกจากจะเกิดความร้อนแล้ว ในขณะเดียวกันยังเกิดแรงกลระเบิดสองแบบ คือ แบบหนึ่ง เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำแล้ว ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นแก่ตัวนำนั้น เป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักขนาดแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสกำลังสอง I^2 เป็นสัดส่วนกลับกับระยะห่างระหว่างสายตัวนำทั้งสอง d นั่นคือ แรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยความยาวของตัวนำ

เช่นเดียวกัน กระแสฟ้าผ่าที่ไหลในตัวนำที่เป็นบ่วง หรือวงแหวน จะเกิดแรงทำให้บ่วงนั้นขยายยืดวงกว้างออก ส่วนแรงกลแบบที่สองเป็นแรงระเบิด เนื่องจากล้าฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมาก ทำให้อากาศรอบๆ ล้าฟ้าผ่าขยายตัวออกไปรอบล้าฟ้าผ่า เกิดเสียงดังสนั่นหวั่นไหวที่เรียกว่าฟ้าร้องนั่นเอง



รูปที่ 2.5 แรงกลอิมพัลส์กระทำต่อตัวนำ [1]

ในกรณีฟ้าผ่าลงบนวัสดุฉนวนไฟฟ้า กระแสฟ้าผ่าจะวิ่งไปตามแนวที่มีความต้านทานน้อยที่สุด ถ้ามีความชื้นอยู่ในวัสดุนั้น น้ำหรือความชื้นจะเปลี่ยนเป็นไอ เกิดความดันอันอาจทำให้เกิดระเบิดได้ เช่น ฟ้าผ่าลงบนยอดปล่องไฟ ซึ่งไม่มีสายล่อฟ้าที่ถูกต้อง ความชื้นที่ปล่องไฟทำให้เกิดระเบิดแตกראวได้

2.3.3 ผลทางไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่ามีหลายลักษณะ คือ

1. การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference, EMI)

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่าประการแรก ก็คือ เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความไวต่อ

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำถ้าแรงดันเหนี่ยวนำสูงพอก็อาจเกิด สปาร์กได้

2. แรงดันสปาร์กด้านข้าง

ถ้ากระแสไฟฟ้า i ไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ L และมีความต้านทานของดิน R_0 จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ และความต้านทาน

3. แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยตรง ย่อมทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่ง คือ ล้ำฟ้าผ่าเปรียบเสมือนเป็นต้นกำเนิดของตัวจ่ายกระแส เมื่อมีกระแสฟ้าผ่า i วิ่งลงบนสายส่ง ซึ่งมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ Z_w จะเกิดแรงดันสูงเป็นคลื่นจร วิ่งไปบนสายส่งทั้งสองทางของจุดที่ผ่าลง เมื่อวิ่งไปถึงจุดที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่ออยู่ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เหล่านั้นได้

สายดินที่ซึ่งอยู่เหนือสายส่งกำลัง ทำหน้าที่เป็นสายล่อฟ้า ป้องกันมิให้เกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังโดยตรง เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายดิน ถ้าหากตัวนำลงดิน หรือเสาไฟฟ้ามีความเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานของรากสายดินมีค่าสูง ย่อมทำให้เกิดแรงดันเกิน และอาจมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวบนพวงลูกถ้วยฉนวน ที่ใช้ยึดหรือรองรับสายสายไฟได้ เรียกว่า เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (backflashover) เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน อาจทำให้เกิดการเจาะทะลุบนลูกถ้วยฉนวน เกิดลัดวงจรลงดิน เกิดผิวดพรองขึ้นในระบบ อันเป็นผลกระทบต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

4. แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ

แรงดันเกินที่เกิดขึ้น อาจเกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำได้ แรงดันดังกล่าวนี้อาจจะมีค่าไม่สูงเหมือนที่เกิดในระบบสายส่งกำลังแรงสูง แต่ก็มีค่าสูงพอที่จะทำให้ความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในบ้าน ภายในอาคารสำนักงาน หรือโรงงานเพราะอุปกรณ์แรงต่ำการฉนวนมีค่าต่ำ ไม่อาจจะทนแรงดันเกินที่มีค่าเป็นสิบ ๆ กิโลโวลต์ได้ และถ้ายังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ ยังมีความไวต่อแรงดันเกินเป็นอย่างมาก ย่อมก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เหล่านี้ได้ง่าย

5. อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คนโดยตรง

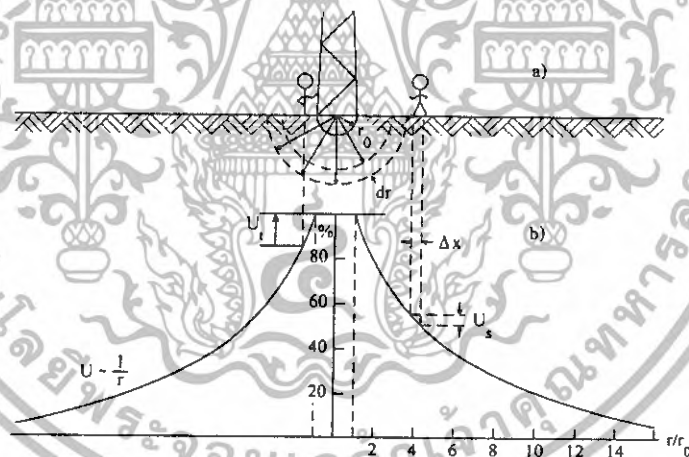
โดยธรรมชาติแล้ว ฟ้าจะผ่าลงสิ่งที่อยู่เด่นกว่าสิ่งอื่น เช่น สิ่งก่อสร้างหรืออาคารสูง ต้นไม้สูงเด่น หรือแม้แต่กระท่อมปลายนาที่ไม่มีต้นไม้ หรือสิ่งอื่นในบริเวณใกล้เคียงที่สูงกว่า หรือคนที่ยืนในที่โล่งแจ้ง อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแก่คนที่อยู่นอกอาคารบ้านเรือนนั้น มีโอกาสเป็นไปได้ถ้าหากไปยืนเด่นในที่กลางแจ้ง เช่น ท้องทุ่งนา สนามบริเวณกว้างปราศจากต้นไม้ ในแม่น้ำกว้างใหญ่ ในทะเล หรือในเส้นทางผ่านของกระแสฟ้าผ่าได้สะดวก เช่น ยืนพิงต้นไม้สูงเด่นที่ถูกฟ้าผ่า หรือหลบฝนอยู่โคนต้นไม้สูงเด่น หรือต้นไม้เตี้ยกลางทุ่งนา ซึ่งมักจะถูกฟ้าผ่าได้ง่าย เกิดอันตรายแก่คนที่หลบใกล้โคนไม้ ทั้งนี้เนื่องจากฟ้าผ่าลงต้นไม้ กระแสฟ้าผ่า

ไหลลงมาตามต้นไม้ลงสู่ดินนั้น ทำให้ต้นไม้มีศักย์ไฟฟ้าสูงมากพอ จึงเกิดสปาร์กผ่านอากาศเข้าหาคนได้

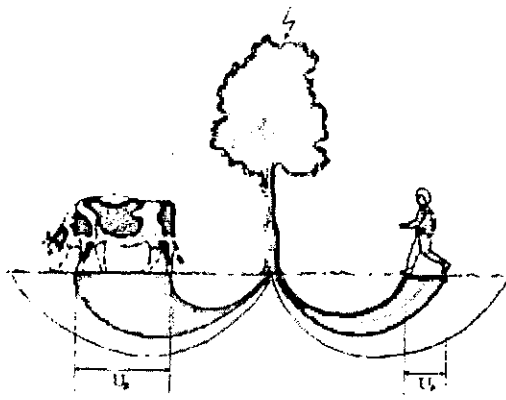
6. อันตรายจากแรงดันช่วงกาวและแรงดันสัมผัส

ผลของฟ้าผ่าที่มีอันตรายต่อคนและสัตว์ นอกเหนือจากถูกฟ้าผ่าโดยตรงแล้ว ในทางอ้อมยังอาจได้รับอันตรายจาก แรงดันช่วงกาว และแรงดันสัมผัส อันเป็นผลมาจากกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่พื้นดิน ซึ่งมีความต้านทาน การออกแบบระบบบรากสายดินที่ดีและถูกต้อง จะต้องคำนึงถึงการป้องกันอันตรายแรงดันช่วงกาว และแรงดันสัมผัสสองประการนี้แก่คนและสัตว์

เมื่อมีกระแสไหลลงสู่ดิน แผ่กระจายออกไปในดิน ซึ่งมีความต้านทาน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างสองจุดบนพื้นดิน โดยที่สองจุดนั้นมีระยะห่างเท่ากับช่วงกาวของคน เกิดความต่างศักย์ระหว่างเท้าซ้ายกับเท้าขวาในขณะที่ก้าวเดิน กรณีนี้จะคิดเท่ากับ 1 เมตร หรือระหว่างเท้าหน้ากับเท้าหลังของสัตว์ เรียกว่า แรงดันช่วงกาว ส่วนแรงดันสัมผัส หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ หรือ โครงสร้างที่กระแสไหลผ่านลงไปสู่บรากสายดิน ที่คนมีโอกาสสัมผัสถึงกับดินที่ยืนอยู่ ดังรูปที่ 2.6 และแรงดันระหว่างระหว่างเท้าหน้ากับเท้าหลังของสัตว์ดังรูปที่ 2.7 แรงดันช่วงกาวและแรงดันสัมผัสจะเป็นอันตรายแก่คนและสัตว์หรือไม่ ก็ขึ้นอยู่กับแรงดันช่วงกาวหรือแรงดันสัมผัสนั้น ทำให้กระแสไหล ผ่านร่างกายเกินขีดกระแสอันตรายหรือไม่



รูปที่ 2.6 แสดงแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงกาว [1]



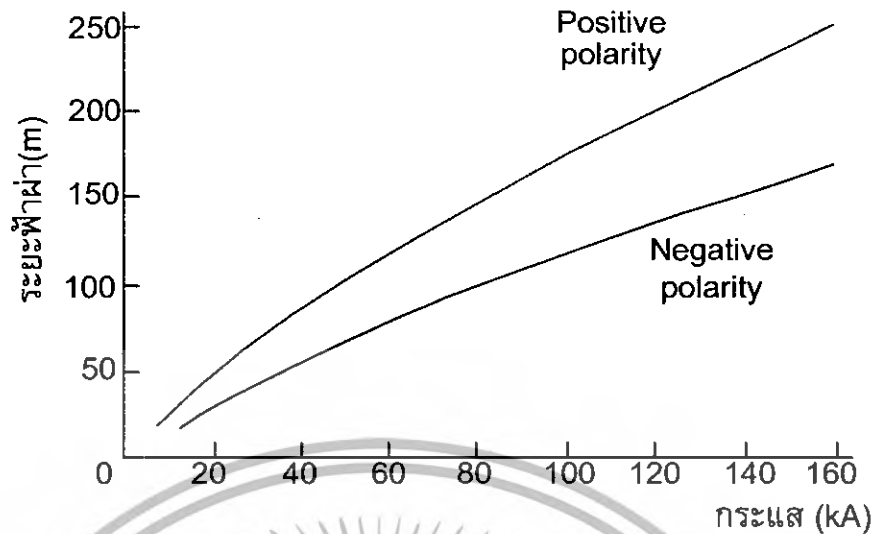
รูปที่ 2.7 แรงดันช่วงก้าว U_s (stepped voltage) [1]

2.4 หลักการฟ้าผ่าลงที่ใด [1]

ลำฟ้าผ่า จะวิ่งไปตามแนวที่หัวนำร่องได้กรุยทางไว้ ด้วยการเกิดแตกตัวของอากาศ และหัวนำร่องเคลื่อนที่เป็นจังหวะก้าวเข้าใกล้พื้นโลก จนถึงระยะหนึ่งจะทำให้เกิดสตรีมเมอร์จากวัตถุหรือสิ่งปลูกสร้างบนพื้นโลก มีแนวและทิศทางเข้าหาหัวนำร่องที่วิ่งลงมา เป็นการชักจูงหรือล่อให้หัวนำร่องวิ่งเข้าหา ระยะห่างช่วงสุดท้ายที่หัวนำร่องถูกล่อหรือชักจูงได้ด้วยลักษณะของวัตถุหรือสิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนดิน จนทำให้เกิดฟ้าผ่าลง ณ จุดนั้น คือ ฟ้าผ่าลงจุดที่ใกล้ที่สุดเมื่อหัวนำร่องมาอยู่ในระยะฟ้าผ่า จึงกล่าวได้ว่า ฟ้าผ่าลงจุดใดขึ้นอยู่กับระยะฟ้าผ่าหรือขนาดกระแสฟ้าผ่านั้นเอง

2.4.1 ระยะฟ้าผ่า

ระยะฟ้าผ่าเป็นระยะช่วงสุดท้ายของหัวนำร่องที่จะวิ่งเข้าหาวัตถุที่อยู่ใกล้ที่สุด จากการบันทึกภาพของฟ้าผ่าธรรมชาติเป็นจำนวนมาก พบว่าระยะฟ้าผ่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 150 เมตร โดยเฉลี่ยประมาณ 50 เมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของประจุในหัวนำร่องนั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ระยะฟ้าผ่าขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฟ้าผ่านั้นเอง ถ้าประจุหรือกระแสมากระยะฟ้าผ่าก็ไกลมากขึ้น ประจุหรือกระแสน้อยระยะฟ้าผ่าก็สั้น ดังที่ Golde ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะฟ้าผ่าอยู่ในฟังก์ชันของกระแสฟ้าผ่า ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระยะฟ้าผ่าในเทอมของกระแส [1]

จะเห็นว่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 30 kA ในรูป จะได้ระยะฟ้าผ่าประมาณ 45 เมตร จากเส้นกราฟนี้สำหรับฟ้าผ่าลบอาจคำนวณระยะฟ้าผ่าโดยประมาณได้จากความสัมพันธ์

$$S = \hat{I} + 15(1 - e^{-0.15\hat{I}}) \quad (2.2)$$

เมื่อ S คือ ระยะฟ้าผ่าเป็นเมตร

\hat{I} คือ ค่ายอดกระแสฟ้าผ่าเป็น kA

Berger และ Vogelsanger ได้บันทึกกระแสด้วยออสซิลโลสโคป และหาระยะฟ้าผ่าด้วยการถ่ายภาพ พบว่าที่กระแสฟ้าผ่า 16 kA และ 27 kA นั้น วัดระยะฟ้าผ่าได้ 27 และ 37 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากสมการ กรณีฟ้าผ่าลบระยะฟ้าผ่าจะหาได้จากสูตร

$$S = 1.5\hat{I} + 20(1 - e^{-0.15\hat{I}}) \quad (2.3)$$

2.5 แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า [2]

แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันเกินฟ้าผ่า ส่วนประการที่สองเป็นแรงดันเกินจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจรในระบบ เรียกว่าแรงดันเกินสวิตช์ เกิดขึ้นในช่วงเวลาอันสั้น โดยช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกิน มีค่าแตกต่างกัน การเกิดแรงดันเกินสวิตช์โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2 เท่าของพิกัดแรงดันซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบส่งจ่ายมากนัก แต่แรงดันเกินฟ้าผ่า

จะทำอันตรายกับระบบส่งจ่าย เนื่องจากขนาดของแรงดันสูงเป็นล้านโวลต์เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายโดยตรง

2.5.1 แรงดันเกินภายนอก [2]

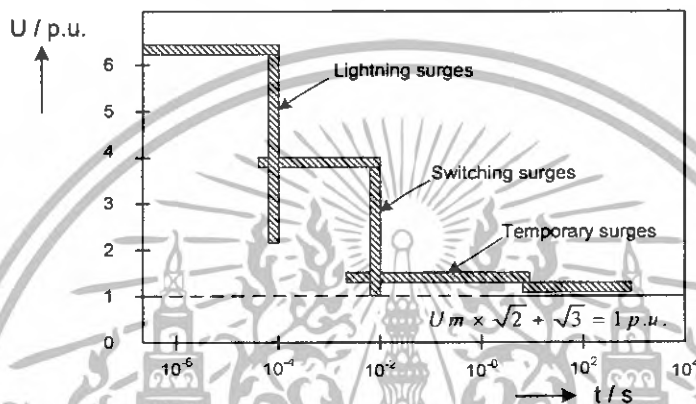
เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแบบเดินสายอยู่ภายนอกซึ่งอยู่ในอากาศ ดังนั้นระบบสายส่งจึงมีโอกาสสูงมากที่จะฟ้าผ่าได้ ทั้งนี้กรณีฟ้าผ่าโดยตรง หรือการดีสชาร์จในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าลงบริเวณใกล้เคียง ซึ่งก็จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่งแรงสูง แรงดันเกินนี้สามารถคำนวณได้ถ้าหากทราบรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า โดยอาศัยหลักการคิดคำนวณตามทฤษฎีของคลื่นจร (Traveling Wave Theory) และทฤษฎีการคำนวณวงจร RLC รูปลักษณะรูปคลื่นแรงดันเกินภายนอกหรือแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (Lightning Impulse Voltage) นี้จะมีช่วงหน้าคลื่น หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่ายอดนั้นสั้นมาก คือ อยู่ในช่วง 1-2 μ s และช่วงหางคลื่น คือ แรงดันลดลงครึ่งหนึ่งของค่ายอดในช่วงเวลาประมาณ 40-60 μ s แรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าที่มีค่ายอดคลื่นสูงมากประมาณ 10 เปรอร์ยูนิตหรือมากกว่านั้น จะเป็นอันตรายกับระบบส่งจ่ายอย่างมาก จำเป็นที่จะต้องรีบกำจัดออกจากระบบเพื่อป้องกันอุปกรณ์ในระบบส่งจ่าย โดยทั่วไปการบอกขนาดของแรงดันเกินจะบอกด้วยตัวเลข 2 ตัว อยู่ในหน่วยของเวลาซึ่งเขียนอยู่ในรูป T_1 / T_2 (T_1 = ช่วงเวลาหน้าคลื่น , T_2 = ช่วงเวลาหางคลื่น)

2.5.2 แรงดันไฟฟ้าเกินภายใน [2]

สาเหตุที่เกิดแรงดันเกินภายใน อาจเนื่องมาจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร ทั้งในกรณีการทำงานของผู้ปฏิบัติงานและการทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อเกิดความบกพร่องขึ้น แรงดันเกินดังกล่าวเกิดจากการทำงานของสวิตช์ เรียกว่าแรงดันเกินสวิตซ์ (Switching Overvoltage) หรืออิมพัลส์แบบสวิตซ์ (Switching Impulse) หรือเกิดจากการลัดวงจรเนื่องจากความบกพร่องของฉนวน หรือเกิดจากแรงดันเกินภายนอก คือแรงดันฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดสปาร์กหรือวาวไฟตามผิวฉนวนภายนอกที่มีความสกปรก เปียกฝน ขึ้นด้วยหมอก น้ำค้าง หรือเกิดลัดวงจรเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอม หรือเกิดจากวงจรรีโซแนนซ์ เพราะค่าคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ในสายส่งลักษณะของคลื่นแรงดันเกินภายในนี้จะช้ากว่าแรงดันเกินภายนอก คือช่วงหน้าคลื่นจะอยู่ในช่วง 100 – 300 μ s และช่วงเวลาหางคลื่นอยู่ในช่วง 2,000 – 3,000 μ s แรงดันเกินสวิตซ์นี้ไม่มีความหมายต่อการทดสอบระดับการฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำกว่า 300 kV แต่ที่ระบบแรงดันสูงกว่า 300 kV การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตซ์จะมีความหมายมากขึ้นเมื่อเทียบกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า แรงดันเกินที่เกิดจากสวิตซ์มีค่ายอดคลื่นสูงประมาณ 4 เปรอร์ยูนิต [2]

2.5.3 แรงดันเกินชั่วคราว

จะแตกต่างจากแรงดันเกินคลื่นเสิร์จ ช่วงความถี่ของแรงดันเกินชั่วคราวจะมีตั้งแต่ไม่กี่เฮิรตซ์ไปจนถึงหลายร้อยเฮิรตซ์ และมีช่วงระยะเวลาจากไม่กี่วินาทีไปจนถึงเป็นชั่วโมง (ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดฟอลต์) รูปแบบทั่วไปส่วนใหญ่ของแรงดันเกินชั่วคราวจะเกิดบนเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์ เมื่อมีฟอลต์ลงดินแบบ 1 เฟส หรือ 2 เฟส เกิดขึ้น แรงดันเกินแบบนี้มีค่าไม่เกิน $\sqrt{2}$ เปอรียูนิต และไม่มีอันตรายกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก, แรงดันเกินภายในและแรงดันเกินชั่วคราว

2.6 กับดักฟ้าผ่า

โดยในยุคเริ่มต้นที่มีการใช้ระบบไฟฟ้าแรงสูง การป้องกันแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าจะใช้รีดแกป (Rod Gap) ที่มีราคาถูกเพื่อเป็นตัวนำกระแสให้ไหลลงดิน แต่จะเกิดกระแสที่ความถี่กำลังไหลตาม (Power Follow Current) เนื่องจากไม่สามารถดับอาร์กได้ทันที ทำให้เกิดการลัดวงจรลงดิน และอุปกรณ์ป้องกันทำงานเพื่อหยุดการนำไฟฟ้าของรีดแกป ดังนั้นความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าจึงลดลง แต่ปัจจุบันอุปกรณ์ที่นำมาใช้ป้องกันแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ได้แก่ กับดักฟ้าผ่า โดยจะเป็นทางให้กระแสไหลลงดินเมื่อมีแรงดันเกินเข้ามาในระบบ และตัดกระแสที่ความถี่กำลังไม่ให้ไหลตามลงดินได้ [3]

กับดักฟ้าผ่าที่ใช้กันในปัจจุบันเป็นชนิดแบบไม่มีแกป ที่มีคุณสมบัติเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Resistor) คือมีความต้านทานต่ำ เมื่อมีแรงดันสูงขึ้น ทำให้กระแสไหลผ่านตัวกับดักฟ้าผ่าลงดินได้ กับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปครั้งแรกถูกนำเสนอโดย มัตสุโอกะ ในปี ค.ศ. 1971 และในสหรัฐอเมริกา กับดักฟ้าผ่าได้ถูกนำเข้ามาครั้งแรกในปี ค.ศ. 1977 โดย Sakshaug et al. [3] เพราะปัญหาเรื่องเสถียรภาพและช่วงชีวิตของสารเมทัลออกไซด์ ในช่วงแรกกับดักฟ้าผ่าจึงเป็นแบบที่มีแกปในการลดแรงดันในระบบที่ป้องกัน และต่อมาได้มีการพัฒนาสูตรและสมการต่าง ๆ ทำให้การใช้แกปมีความสำคัญลดน้อยลง และได้เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

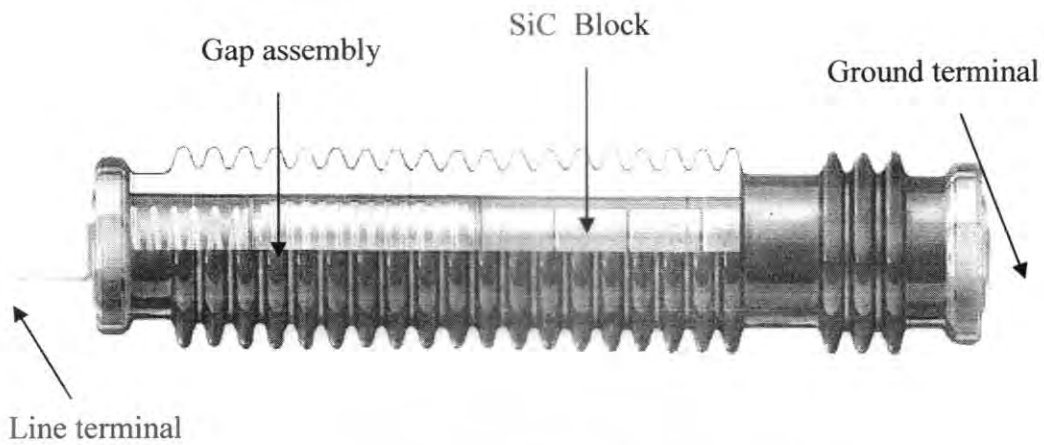
สู่การพัฒนาของกัณฑ์ไฟฟ้าที่ไม่ใช่แกป แต่ปัจจุบันก็ยังมีการใช้กัณฑ์ไฟฟ้าแบบมีแกปในระบบที่มีแรงดันสูงๆ เพื่อจำกัดปัญหาเรื่องกระแสที่ไหลผ่านกัณฑ์ไฟฟ้าแบบมีแกปในขณะที่ใช้งานปกติ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานได้

กัณฑ์ไฟฟ้าที่ถูกใช้งานอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะโครงสร้างที่สำคัญ คือ

1. กัณฑ์ไฟฟ้าแบบมีแกป หรือ Gap – Silicon Carbide Arrester
2. กัณฑ์ไฟฟ้าแบบไม่มีแกป หรือ Gapless Zinc Oxide Arrester หรือ Metal Oxide Varister
3. กัณฑ์ไฟฟ้าแบบมีแกปทำงานร่วมกับชิงค์ออกไซด์ เรียกว่า Current Limiting Arcing Horn (CLAH)

2.6.1 กัณฑ์ไฟฟ้าแบบมีแกป

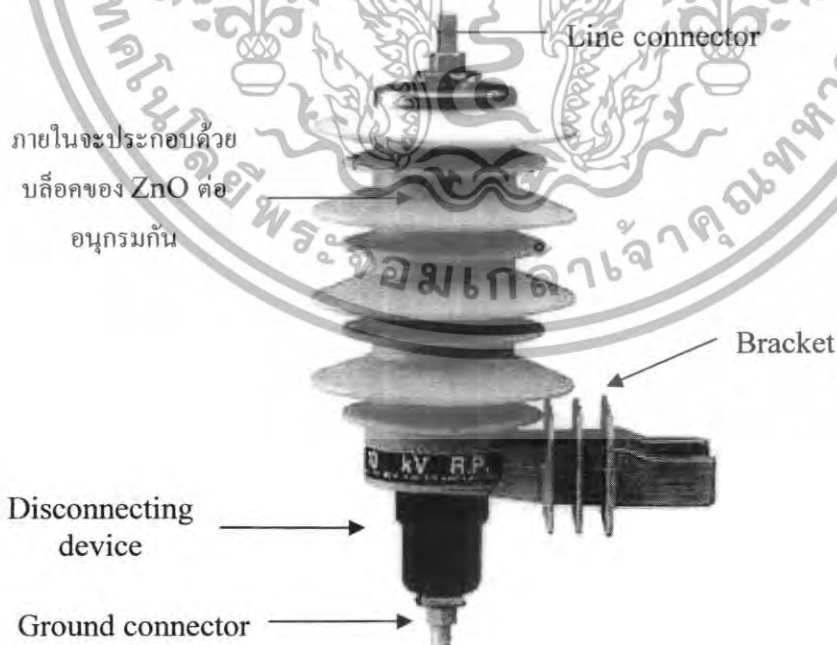
โครงสร้างที่สำคัญของกัณฑ์ไฟฟ้าแบบมีแกป จะประกอบด้วย ช่องประกาย (Spark Gap) ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) บรรจุอยู่ในโครงสร้างฉนวนที่มักทำด้วยพอร์ซเลน (Porcelain Insulator) ในการทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินนั้น ส่วนใหญ่กัณฑ์ไฟฟ้าจะถูกติดตั้งไว้กับสายเฟสในระบบสายส่งโดยต่อจากสายเฟสลงดิน หรือติดตั้งไว้ที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้าในลักษณะที่ต่อขนานกับหม้อแปลงไฟฟ้า [2] ภายใต้สภาวะระดับแรงดันใช้งานปกติของระบบไฟฟ้า กัณฑ์ไฟฟ้าแบบมีแกปจะมีความต้านทานที่สูงมากและไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวมันเลย เมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเช่น แรงดันเกินฟ้าผ่า จะทำให้แรงดันเกินที่ตกคร่อมกัณฑ์ไฟฟ้าแบบมีแกปมีค่าสูงขึ้น หากแรงดันเกินดังกล่าวมีค่าสูงถึงค่าแรงดันประกายข้าม (Sparkover Voltage) ของกัณฑ์ไฟฟ้า ช่องประกายจะนำกระแส ทำให้แรงดันเกินทั้งหมดตกคร่อมซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งเมื่อซิลิคอนคาร์ไบด์ได้รับแรงดันสูงขึ้น ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลง ทำให้กระแสลัดไหลผ่านลงดินหรืออาจเรียกว่าเป็นการถ่ายเทพลังงานลงดินก็ได้ ซึ่งจะเป็นการรักษาระดับแรงดันเกินให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ถูกป้องกันอยู่ เมื่อแรงดันเกินมีค่าลดลงซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีค่าความต้านทานที่เพิ่มมากขึ้น กระแสลัดที่ไหลผ่านลงดินจะมีค่าลดลง ช่องประกายข้ามจะหยุดนำกระแสในเวลาต่อมา ทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์กลับคืนสู่สภาวะทำงานปกติได้เองหลังจากแรงดันเกินหมดไป แต่กัณฑ์ไฟฟ้าแบบมีแกปนี้จะมีปัญหาที่สำคัญเกี่ยวกับกระแสไหลตาม (Follow Current) เนื่องจากไม่สามารถดับอาร์กที่เกิดขึ้นได้ทันที ซึ่งจะมีช่วงเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้อาร์กดับลงทำให้ยังคงมีกระแสไหลผ่านตัวกัณฑ์ไฟฟ้าอีกเป็นระยะเวลาหนึ่งซึ่งอาจจะทำให้เกิดความชำรุดเสียหายได้



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกับดีดฟ้าผ่าแบบมีแกป [4]

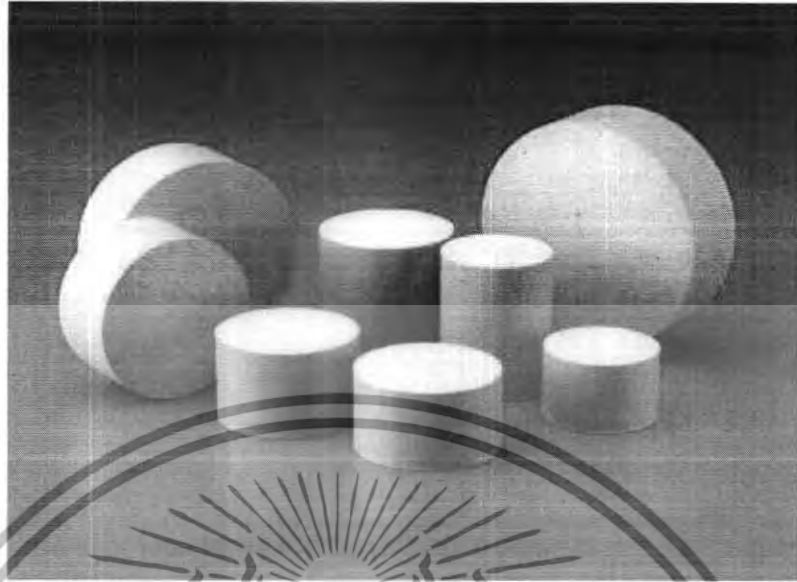
2.6.2 กับดีดฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป

เนื่องจากโครงสร้างและลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนของกับดีดฟ้าผ่าแบบมีแกป ทำให้มีการพัฒนากับดีดฟ้าผ่าให้มีประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ในการทำงานเพิ่มขึ้น โดยมีหลักการเลือกใช้เซรามิกออกไซด์ (ZnO) หรือ เมทัลออกไซด์ (MO) หลายๆชนิดผสมกัน ทำให้ได้ค่าความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น ไม่ต้องใช้ช่องประกายช่วยในการทำงาน สามารถนำกระแสเล็กลงได้ดีและช่วยให้แรงดันที่ตกคร่อมกับดีดฟ้าผ่ามีขนาดต่ำลงด้วย อันเป็นผลดีทำให้ระดับแรงดันเกินมีค่าลดลง นอกจากนี้กับดีดฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีโครงสร้างที่ง่ายกว่ากับดีดฟ้าผ่าแบบมีแกป [2]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของกับดีดฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ZnO ที่อยู่ภายในกับดักฟ้าผ่า

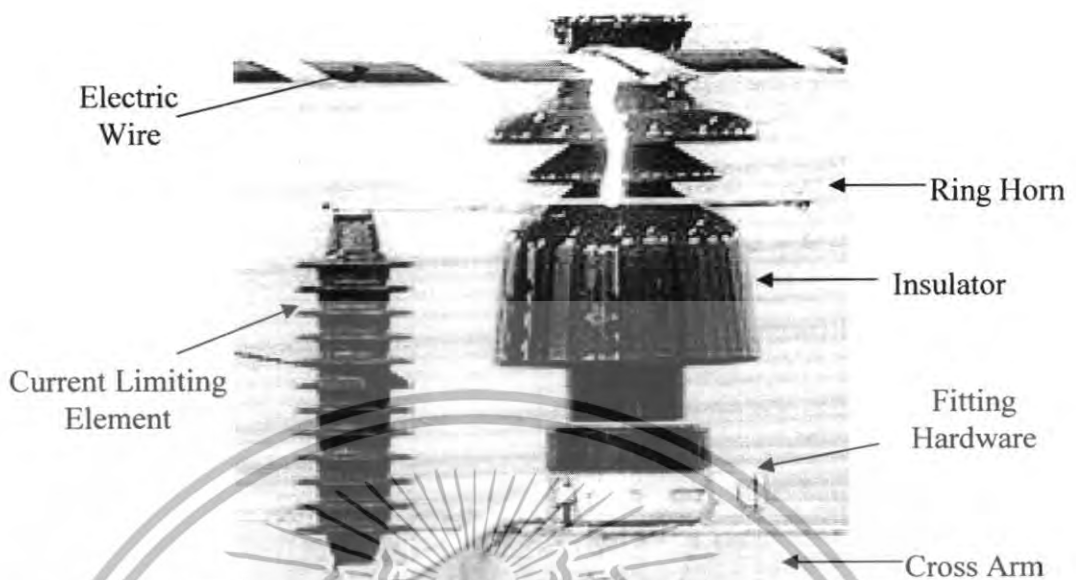
2.6.3 กับดักฟ้าผ่าแบบมีแก๊สทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์

เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วย คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก หรือ อาร์กซิงฮอร์น (Arcing Horn) ต่อขนานกับซิงค์ออกไซด์เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเนื่องจากฟ้าผ่า โดยติดตั้งไว้กับลูกถ้วยฉนวนที่เสาไฟฟ้า [2]

โดยหลักการทำงานของอาร์กซิงฮอร์นนั้น จะทำหน้าที่ดักจับแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจากการเกิดฟ้าผ่าลงบนสายเฟสโดยตรง เพื่อนำกระแสเล็กรั่วให้ผ่านวงแหวนอาร์กหรือริงฮอร์น (Ring Horn) ไปสู่ซิงค์ออกไซด์และปล่อยประจุผ่านลงสู่ดิน เมื่อระดับแรงดันเกินมีค่าลดลงริงฮอร์นก็จะหยุดการประกายข้ามและหยุดนำกระแสเล็กรั่วลงดินในเวลาต่อมา ทำให้กับดักฟ้าผ่าแบบมีแก๊สทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์ กลับคืนสู่สภาวะทำงานปกติได้เองหลังจากแรงดันเกินหมดไป จากลักษณะโครงสร้างและหลักการทำงานของกับดักฟ้าผ่าแบบมีแก๊สทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์ดังกล่าวจึงเปรียบเสมือนเป็นกับดักฟ้าผ่าแบบมีแก๊สภายนอกที่ทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์

73007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

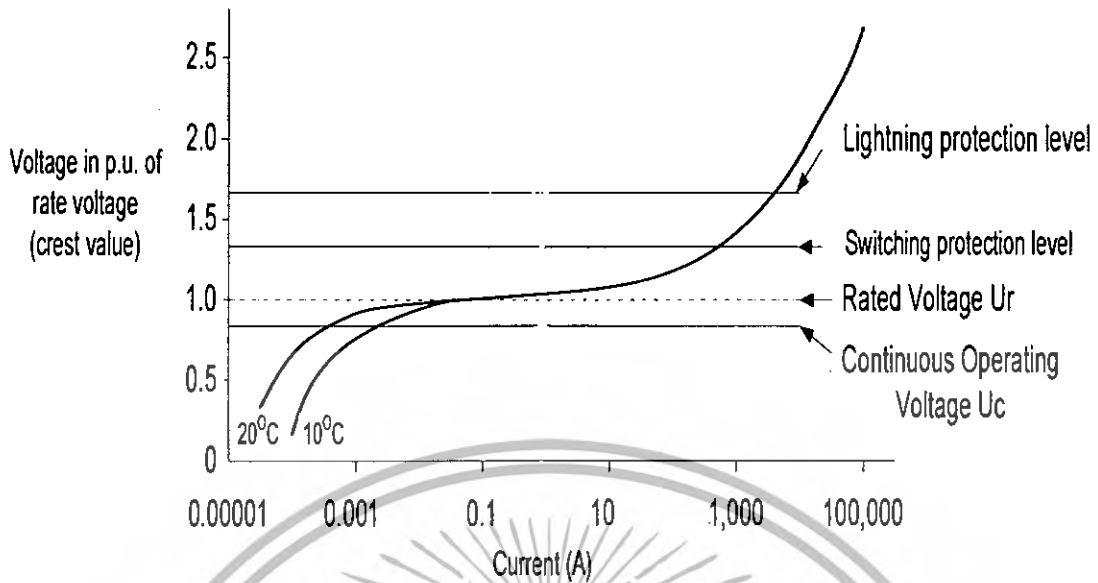


รูปที่ 2.13 กิ่งดักฟ้าผ่าที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วย คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ค หรือ อาร์คซึ่งฮอว์น ต่ออนุกรมกับชิงค์ออกไซด์ [4]

2.7 ลักษณะสมบัติแรงดัน – กระแสของกิ่งดักฟ้าผ่า

ถึงแม้ว่าลักษณะโครงสร้างและกลไกการทำงานของกิ่งดักฟ้าผ่าทั้ง 3 ชนิดจะแตกต่างกันโดยเฉพาะการใช้ช่องประกายและกลไกการเกิดประกายข้าม จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของกิ่งดักฟ้าผ่าชนิดกิ่งดักฟ้าผ่าแบบมีแกป และกิ่งดักฟ้าผ่าแบบมีแกปทำงานร่วมกับชิงค์ออกไซด์เท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาถึงลักษณะสมบัติแรงดันตกคร่อมกิ่งดักฟ้าผ่า (Residual Voltage) กับกระแสกิ่งดักฟ้าผ่าชนิดกิ่งดักฟ้าผ่าแบบมีแกป และกิ่งดักฟ้าผ่าแบบมีแกปทำงานร่วมกับ ชิงค์ออกไซด์ หลังจากที่เกิดประกายข้ามช่องประกายแล้วนั้น กิ่งดักฟ้าผ่าทั้งสองชนิดจะให้ผลตอบสนองแรงดัน-กระแสในลักษณะเดียวกันกับ กิ่งดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป เนื่องจากกิ่งดักฟ้าผ่าทั้ง 3 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานที่มีค่าไม่เป็นเชิงเส้นเหมือนกัน นั่นคือที่ระดับแรงดันต่ำค่าความต้านทานจะมีค่าสูง กระแสไหลผ่านได้น้อย เมื่อแรงดันสูงขึ้นค่าความต้านทานจะมีค่าลดลง กระแสไหลผ่านได้เพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานจะยังมีค่าลดลงต่ำมากเมื่อระดับแรงดันเกินมีค่าสูงเพิ่มขึ้น [2-3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 การนำกระแสและแรงดันที่ดักพร้อมกัับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป

จากรูปที่ 2.14 สามารถอธิบายลักษณะสมบัติการนำกระแสและแรงดันที่ดักพร้อมกัับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป สามารถแสดงได้ด้วยเส้นโค้งแรงดัน-กระแส (Volt-Current Curve) ของกัับดักฟ้าผ่า ซึ่งจะเห็นว่าการทำงานของกัับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

- ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ระบบไฟฟ้ามีระดับแรงดันปกติ ซึ่งจะต่ำกว่าจุดเริ่มทำงานของกัับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป ค่าความต้านทานของกัับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีค่าสูงมาก ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกัับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป มีค่าน้อยมากในหน่วยไมโครแอมป์ถึงมิลลิแอมป์
- ช่วงที่ 2 จะมีระดับแรงดันเกินเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นแรงดันเกินในระดับแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) และแรงดันเกินสวิตชิง (Switching Overvoltage) ค่าความต้านทานของกัับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีค่าลดลง ทำให้มีกระแสไหลผ่านกัับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปเพิ่มขึ้นในหน่วยแอมป์
- ช่วงที่ 3 แรงดันเกินที่เกิดขึ้นคร่อมกัับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีค่าสูงมาก ซึ่งจะเป็นแรงดันเกินในระดับแรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Overvoltage) ค่าความต้านทานของกัับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีค่าต่ำลงมาก ทำให้มีกระแสเสิร์จไหลผ่านกัับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปได้เพิ่มมากขึ้นในหน่วยกิโลแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

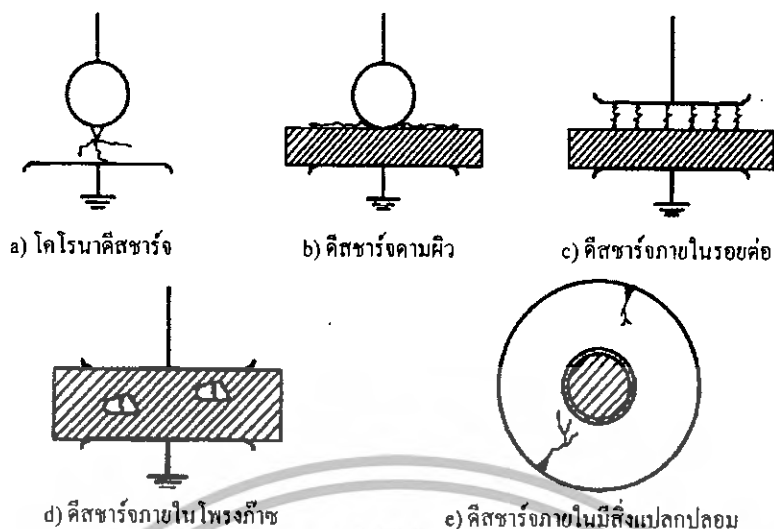
2.7.1 ลักษณะสมบัติแรงดัน – กระแสของกัปดักฟ้าผ่าชนิดมีแกป

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการแทนแบบจำลองทางไฟฟ้าของกัปดักฟ้าผ่าชนิดมีแกป ประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ กลไกการเกิดประกายข้าม ซึ่งจะแทนด้วยค่าแรงดันประกายข้าม (Sparkover Voltage) U_{ss} ของกัปดักฟ้าผ่า และลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของกัปดักฟ้าผ่า ซึ่งจะแทนด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมกัปดักฟ้าผ่า (Residual Voltage) U_r กับกระแสที่ไหลผ่านกัปดักฟ้าผ่า นอกจากนี้ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากตัวนำที่ต่อลงดินของกัปดักฟ้าผ่าต้องนำมาพิจารณาด้วย โดยมีค่าประมาณ 0.5-1.0 μH ต่อเมตร [3]

2.7.2 ลักษณะสมบัติแรงดัน – กระแสของกัปดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกป

ในการแทนแบบจำลองทางไฟฟ้าของกัปดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกป จะไม่มีค่าแรงดันประกายข้าม U_{ss} ของกัปดักเสิร์จ ส่วนลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของกัปดักเสิร์จจะแทนด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของกัปดักฟ้าผ่าเช่นเดียวกับกัปดักฟ้าผ่าแบบมีแกป แต่ความสัมพันธ์ของแรงดัน-กระแสของ ZnO จะมีลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นมากกว่า นอกจากนี้ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากสายตัวนำที่ต่อจากสายเฟสไปยังกัปดักฟ้าผ่าและสายตัวนำที่ต่อลงดินของกัปดักฟ้าผ่าต้องนำมาพิจารณาด้วย โดยมีค่าประมาณ 0.5-1.0 μH ต่อเมตร

นอกจากการแทนแบบจำลองทางไฟฟ้าของกัปดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป (Gapless-ZnO) โดยการใช้ลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสของกัปดักเสิร์จโดยตรงแล้ว IEEE Working Group 3.4.11 ได้เสนอแบบจำลองทางไฟฟ้าของกัปดักฟ้าผ่าที่ขึ้นอยู่กับความถี่ (Frequency Dependent Model) เพื่อให้แบบจำลองที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งการวิเคราะห์แรงดันเกินสวิตชิงและแรงดันเกินฟ้าผ่า ที่มีความถี่แตกต่างกัน โดยจะแทนลักษณะสมบัติแรงดัน-กระแสที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยค่าความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 2 ส่วนคือ A_0 (Lightning Characteristic) และ A_1 (Switching Characteristic) ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้ง 2 ส่วนถูกแยกออกจากกันโดย R-L Filter เพื่อเป็นการแบ่งระดับความสำคัญของค่าความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น A_0 และ A_1 ให้เหมาะกับการวิเคราะห์ระดับแรงดันเกินสวิตชิงและแรงดันเกินฟ้าผ่า ที่มีความถี่แตกต่างกัน ซึ่งแบบจำลองนี้จะให้ความถูกต้องสำหรับกระแสเสิร์จที่มีค่าเวลาหน้าคลื่นในช่วง 0.5 μs ถึง 40 μs ค่าของ A_0 และ A_1 จะหามาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน-กระแสที่ไม่เป็นเชิงเส้นของกัปดักฟ้าผ่าและค่าตัวแปรอื่นๆที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างแบบจำลอง [3]



รูปที่ 2.15 รูปแบบของดีสชาร์จบางส่วน [1]

2.8.1 ผลกระทบของดีสชาร์จบางส่วน

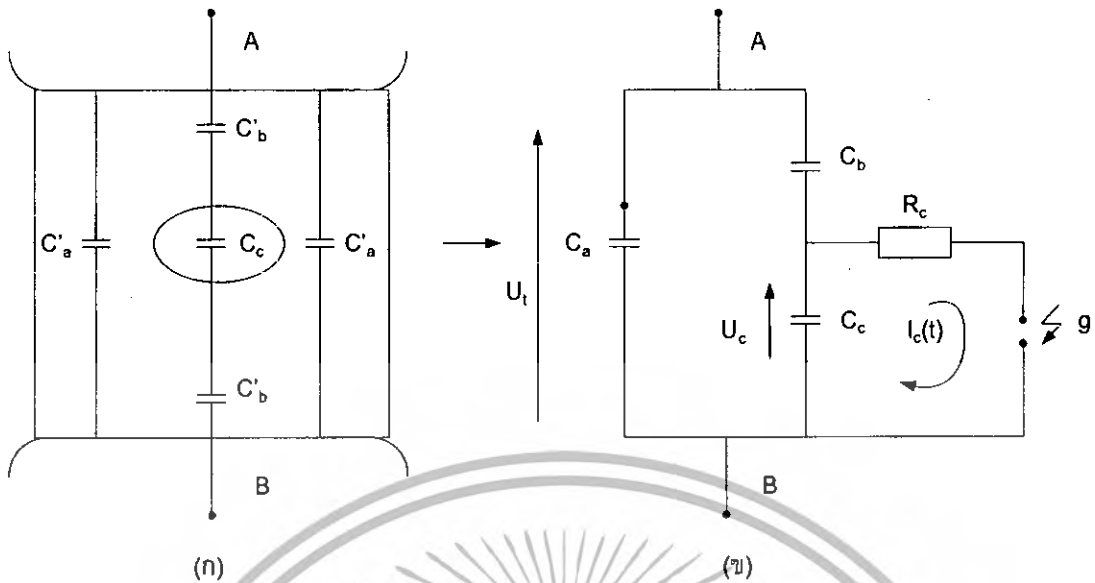
ดีสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุด ๆ และเกิดผิวดพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง

ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้อย่างยาวนาน การออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพดีพอ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติจะต้องต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวน จะต้องไม่มีดีสชาร์จบางส่วน แม้จะมีแรงดันเกินอันเนื่องมาจากแรงดันกระเพื่อมเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม การฉนวนอุปกรณ์แรงสูงมีความยุ่งยากซับซ้อน การดีสชาร์จบางส่วนอาจเกิดขึ้นโดยมิได้ตั้งใจหรืออาจมีความบกพร่องในกระบวนการผลิต หรือคุณภาพของฉนวนไม่ได้ตามกำหนด ฉะนั้นเพื่อความมั่นใจในคุณภาพของการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จำเป็นต้องมีการทดสอบตรวจวัดค่าการดีสชาร์จบางส่วน [1]

2.8.2 วงจรสมมูลของดีสชาร์จบางส่วน

โดยเหตุที่ดีสชาร์จบางส่วนภายในที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน หรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้นเพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลของฉนวนที่มีดีสชาร์จบางส่วนขึ้น ไม่ว่าจะเป็ที่ดีสชาร์จบางส่วนชนิดใดก็สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ [1] เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดีสชาร์จบางส่วนภายใน ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน

ในรูปที่ 2.16 (ก) แสดงวัสดุฉนวน มีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ C_c เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_b' ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้จะรวมกันได้เป็น C_b ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ที่อยู่โดยรอบของ C_c จะให้เป็นค่า C_a' และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_a ดังรูปที่ 2.16 (ข) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่า ๆ กับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มาก ๆ นั่นคือ

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

ถ้าป้อนแรงดัน U_t ที่ขั้ว A-B ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงก๊าซที่แทนด้วย C_c ก็จะเกิดเบรกดาวน์ในโพรงก๊าซ ซึ่งเขียนแทนด้วย แยก g มีความต้านทาน R_c ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสดีสชาร์จ $i_c(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ช่วงกว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก δU_c ที่โพรงก๊าซเกิดการปล่อยประจุออกมาเป็น

$$\Delta q_c = \delta U_c C_c \quad (2.4)$$

กระแส $i_c(t)$ นี้ไหลอยู่ภายในที่ไม่สามารถวัดได้ แต่การดีสชาร์จของ C_c ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ C_b และ C_a ในวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A-B เท่ากับ δU_t ซึ่งหาได้จากประจุใน C_c คือ

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta U_c}{C_b + C_a} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันตกนี้ไม่ให้ข้อมูลอะไรเกี่ยวกับ δq_c เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ $C_b \delta U_c$ แต่ค่า δU , นี้วัดได้เป็นพัลส์รูปซัน ขึ้นอยู่กับ $i_c(t)$

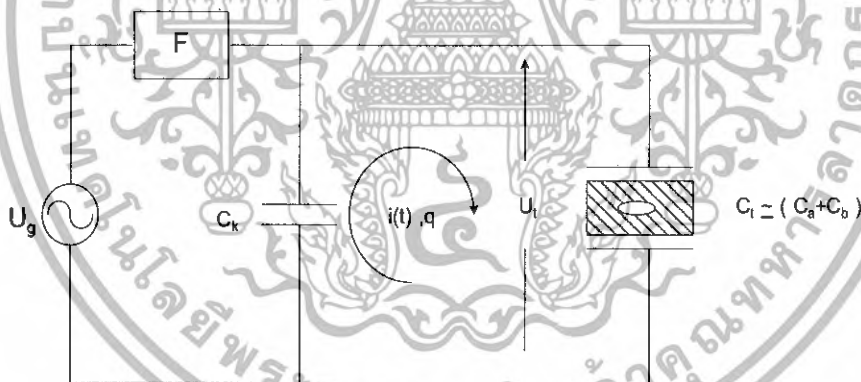
$$\text{เมื่อแทนค่า} \quad \delta U_c = \delta q_c$$

$$\text{จะได้} \quad \delta U_i = \frac{C_b \delta q_c}{C_c(C_b + C_a)} \quad (2.6)$$

ค่าของ δU , มีค่าเพียงเป็นมิลลิโวลต์ถึงโวลต์ ในขณะที่ δU_c มีค่าเป็นกิโลโวลต์ แต่โดยที่ไม่ทราบค่า C_c และ C_b , จึงไม่อาจหาความสัมพันธ์ของ δU_i กับ δU_c และ δq_c ได้ อย่างไรก็ตาม การดีสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทประจุ หรือกระแสในวงจรมานอกที่สามารถตรวจวัดได้

2.8.3 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้

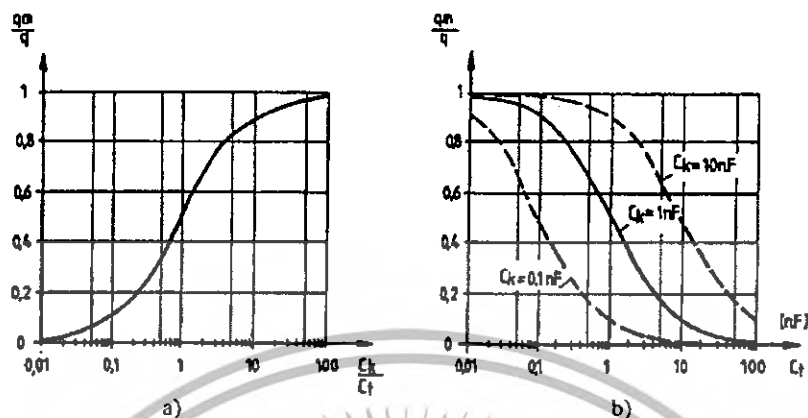
ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดีสชาร์จบางส่วนภายในเกิดขึ้นในฉนวน หรือภายในอุปกรณ์ที่ห่อหุ้มมิดชิด ฉะนั้น ประจุหรือกระแสที่เกิดจากประจุดีสชาร์จในโพรงก๊าซนั้นไม่สามารถวัดได้ แต่การดีสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c นั้น มีผลให้เกิดการถ่ายเทประจุ เป็นผลให้เกิดแรงดันตก δU , ที่ขั้วป้อนแรงดันภายนอก A-B และการเคลื่อนที่ประจุ หรือเกิดกระแสไหลวน อันเนื่องมาจาก แรงดันตก เป็นค่ากระแสชดเชยที่วัดได้ (measurable current) $i(t)$ ดังรูปที่ 2.17 แต่มีใช้กระแสหรือประจุที่เกิดขึ้นจริงภายในโพรงก๊าซ



รูปที่ 2.17 การดีสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน [1]

- เมื่อ U_g คือ ตัวจ่ายแรงดันป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุทดสอบ C_i
 C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว
 C_i คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบประกอบด้วย C_a , C_b และ C_c
 ดังรูปที่ 2.17
 $i(t), q$ คือ กระแสพัลส์ดีสชาร์จบางส่วนที่ถ่ายเทระหว่าง C_k กับ C_i เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกไป δU , คร่อม $C_i \approx (C_a + C_b)$
 F คือ ตัวกรองสัญญาณ

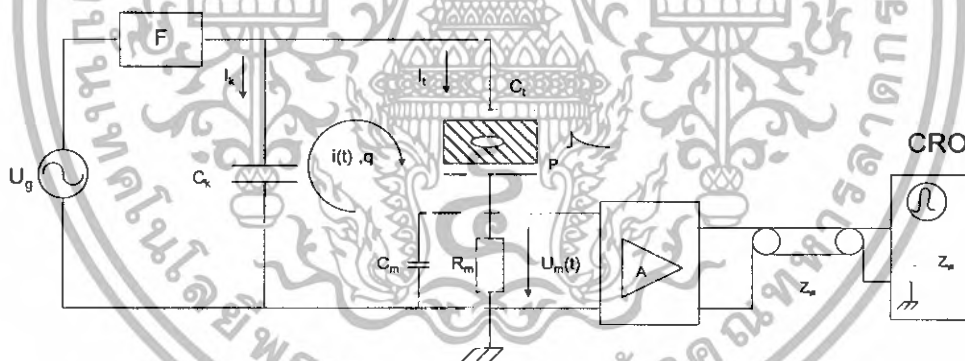
ทราบค่าแน่นอน และถูกต้องที่วัสดุทดสอบ ผลของ C_k/C_t ต่อความไวการวัด แสดงโดย q_m/q ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ต่อความไวการวัด q_m/q

2.8.4 วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดิสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดิสชาร์จบางส่วน จะประกอบด้วยตัวจ่ายแรงดันทดสอบ U_g คือ หม้อแปลงทดสอบป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ผ่านตัวกรองความถี่สูง F ดังรูปที่ 2.19

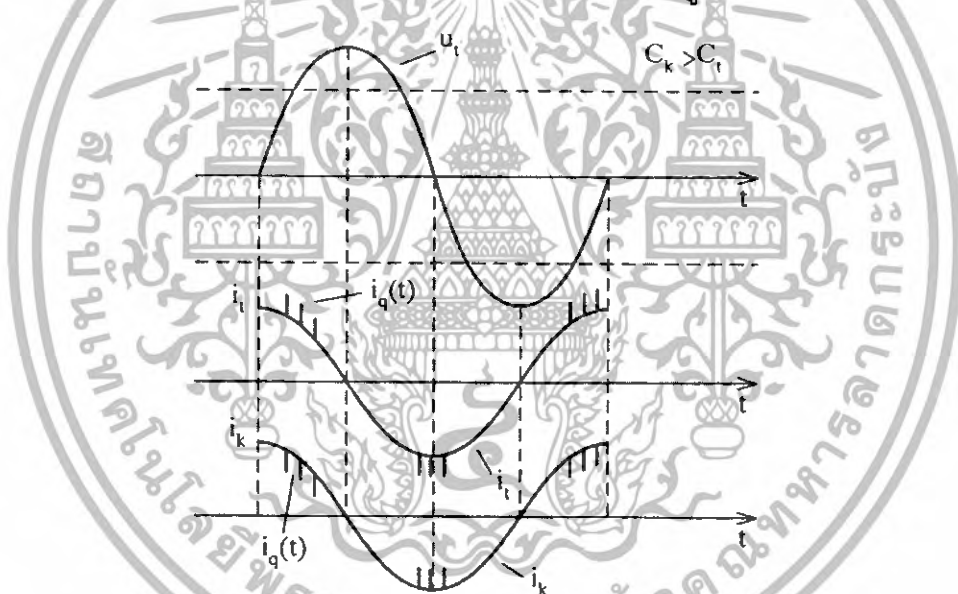


รูปที่ 2.19 วงจรพื้นฐานการวัดดิสชาร์จบางส่วน [1]

เมื่อ U_g คือ ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุทดสอบ P

F คือ ตัวกรอง ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ที่มีความถี่สูง นั่นคือ ตัวกรองจะทำหน้าที่กั้นมิให้คลื่นรบกวนความถี่สูงจากตัวจ่ายเข้าไปรบกวนวงจรทดสอบ แต่ยอมให้กระแสทดสอบความถี่ต่ำไหลผ่านไปได้ ในเวลาเดียวกัน F จะทำหน้าที่กั้นมิให้สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากวัสดุทดสอบไหลหนีออกไปทางตัวจ่ายแรงดันได้ ตัวกรองนี้ อาจประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L หรือประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C เป็นวงจร π ก็ได้

C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณเท่า ๆ กับค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบหรือใหญ่กว่า ในเชิงปฏิบัติ C_k จะมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 1000 pF เพื่อให้มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำพอที่จะทำให้กระแสดีสชาร์จบางส่วน $i(t)$ ซึ่งมีค่า $< 100 \mu\text{A}$ เป็นพัลส์แคบ ๆ ไหลได้ครบวงจรเป็นกระแสที่วัดได้ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เมื่อเกิดดีสชาร์จในโพรงก๊าซของฉนวน จะทำให้แรงดันที่ขั้วทดสอบ ตกไปเท่ากับ δU และเป็นเหตุให้เกิดการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุ C_k เข้าไปทดแทน นั่นคือ จะมีกระแสไหลวน $i(t)$ ที่สามารถตรวจจับหรือวัดได้ (Measurable Current) ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ซ้อนอยู่บนรูปคลื่นกระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ i_i และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว i_k ($C di/dt$) กระแสทั้งสองจะมีมุมเฟสหน้าหน้าแรงดันที่ป้อนประมาณ 90 องศา ถ้าไม่มีค่าเก็บประจุสเตรย์ขนานกับ C_k กระแสพัลส์ ดีสชาร์จบางส่วน $i(t)$ ที่ซ้อนบนรูปคลื่นกระแสป้อนนี้จะมีขนาดเท่ากันแต่ขั้วตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของดีสชาร์จบางส่วน

- เมื่อ
- U_i คือ แรงดันที่ป้อน
 - i_i คือ กระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ C_i
 - i_k คือ กระแสที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k
 - $i_q(t)$ คือ กระแสพัลส์ดีสชาร์จบางส่วน (PD) ที่วัดได้

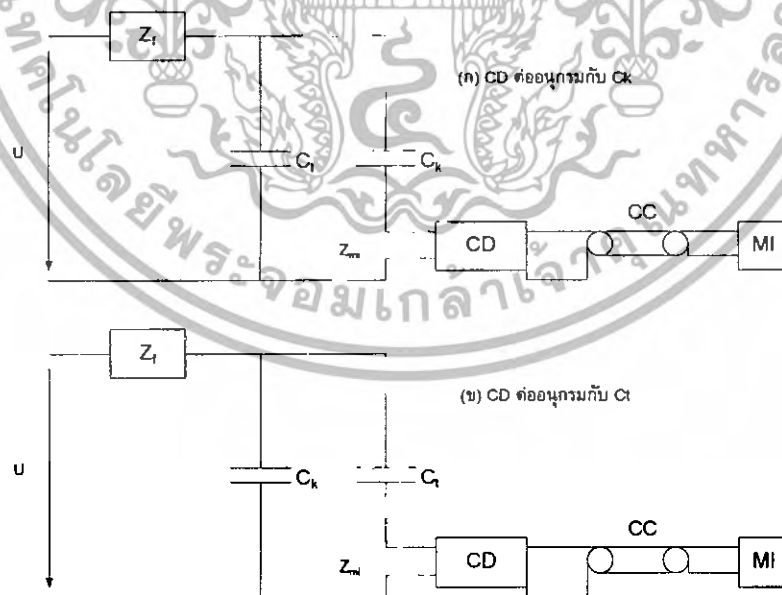
การวัดที่ถูกต้องค่าความต้านทานวัด (R_m) ดังรูปที่ 2.19 จะต้องแมช (match) กันกับเคเบิลวัดที่มีอิมพีแดนซ์ (Z_w) ถ้าค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบน้อย แรงดันที่ได้จากกระแสดีสชาร์จบางส่วนนี้ จะจำแนกจากกระแสประจุ $i(t)$ ได้ชัดเจน ในแต่ละครั้งไซเคิลของแรงดันที่ป้อนจะมีจำนวนพัลส์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบและลักษณะตำแหน่งของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดผิดพร่อง ถ้าวัสดุทดสอบมีจุดผิดพร่องหลายแห่ง จำนวนพัลส์การดีสชาร์จบางส่วนจะมีมากขึ้น ซึ่งมีช่วงห่างระหว่างพัลส์เป็น μs หรือเร็วกว่านั้น โดยทั่วไปจะสังเกตเห็นอัตราการเกิดดีสชาร์จ มีค่าสูงมากที่สุดเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน dU/dt มีค่าสูงสุด ฉะนั้นพัลส์จะไม่ขึ้นอยู่กับพัลส์ของแรงดันทดสอบ U , แต่จะขึ้นอยู่กับเครื่องหมายการเปลี่ยนแปลง dU/dt ตรงกันข้ามในกรณีดีสชาร์จโคโรนา ซึ่งเป็นการดีสชาร์จบางส่วน เกิดภายนอกจะเกิดที่ยอดของแรงดันทดสอบและเครื่องหมายของพัลส์การดีสชาร์จบางส่วนจะสอดคล้องกับพัลส์ของแรงดันทดสอบที่ป้อน รูปที่ 2.19 เป็นวงจรทดสอบที่ใช้แอมพลิฟายเออร์ที่มีแบนด์วิดท์สูงมาก ที่ด้านทางเคเบิลวัดจะทำให้เคเบิลวัดสัญญาณไม่ต่อทางไฟฟ้ากับความต้านทาน R_m เพราะ R_m มีค่าสูงมาก จะมีผลให้การวัดคลาดเคลื่อน ในการนี้จึงใส่ตัวเก็บประจุ C_m ประมาณ 10 pF ที่ต่อระหว่างปลายลวด C_i กับดิน และขนานกับ R_m จึงเป็นทางเบี่ยงของสัญญาณประกอบกับที่มีความถี่สูงมาก ๆ ของ $i(t)$ ฉะนั้น $i(t)$ เป็นพัลส์สั้น ๆ รูปร่างและค่ายอดบิดเบือน C_m จะทำการอินทิเกรต และ R_m ที่ใส่ไว้จะมีผลให้เกิดการหน่วงด้วยเวลาคงตัว $R_m C_i C_k / (C_i + C_k)$ [1]

2.8.5 การต่อวงจรระบบวัดการดีสชาร์จบางส่วนในวงจรทดสอบ

การต่อวงจรระบบวัดการดีสชาร์จบางส่วน ในวงจรทดสอบ จะมีความแตกต่างตรงที่การต่ออิมพีแดนซ์วัด Z_m ซึ่งมาตรฐานการวัดการดีสชาร์จบางส่วน ฉบับใหม่คือ IEC 60270 เรียกว่าอุปกรณ์คัปเปิล (Coupling Device) CD ประกอบเป็นอิมพีแดนซ์วัด Z_{mi} ต่อที่ ด้านระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบดังรูปที่ 2.21 ซึ่งเป็นวงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนโดยตรง



รูปที่ 2.21 วงจรทดสอบตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนโดยตรง

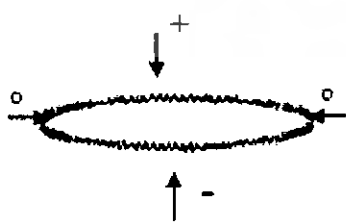
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	U	คือ	แรงสูงตัวจ่าย
	F	คือ	ตัวกรอง
	Z_m	คือ	อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ
	CC	คือ	เคเบิลวัด
	C_r	คือ	ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ
	C_k	คือ	ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยว
	CD	คือ	อุปกรณ์คาบเกี่ยว

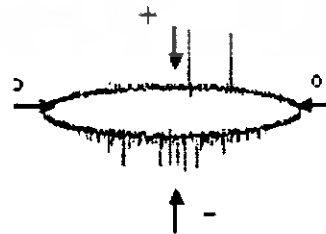
ความแตกต่างของวงจรแบบ (ก) และแบบ (ข) คือ แบบ (ก) ตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมกับ C_k ที่มีศักย์เป็นดิน เป็นแบบที่มีใช้กันมากในทางปฏิบัติ ไม่เสี่ยงต่อการเบรกดาวาร์น เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ C_r แต่ความไวในการวัดจะน้อยกว่าแบบ (ข) เพราะการดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นที่วัสดุทดสอบ C_r แบบ (ข) จะมีความไวสูงกว่า เพราะตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมโดยตรงกับวัสดุทดสอบ C_r ค่าเก็บประจุสเตรย์ทั้งหลายด้านแรงสูงกับดินจะเพิ่มค่า C_k ทำให้ความไวของวงจรวัดดีสชาร์จบางส่วนสูงขึ้น แต่มีข้อเสียที่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวาร์นที่วัสดุทดสอบ จะทำให้เครื่องวัดดีสชาร์จบางส่วนเสียหายได้

2.8.6 การแสดงผลดีสชาร์จภายใน

การวัดค่าดีสชาร์จบางส่วน อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น ไมโครโวลต์ (μV) ที่โคคลอมป์ (pC) แต่จะทราบเพียงขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนเท่านั้น วิธีที่นิยมใช้แสดงผลการดีสชาร์จบางส่วนในปัจจุบัน คือ การแสดงผลบนจอออสซิลอโคป ซึ่งอาจจะแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปพัลส์ของการดีสชาร์จบางส่วนปรากฏอยู่บนฐานเวลารูปวงรี ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวก ยอดลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบหรือแสดงให้รูปคลื่นพัลส์การดีสชาร์จบางส่วนปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ การแสดงผลการดีสชาร์จบางส่วน บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้องและสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน การแสดงผลบนฐานเวลารูปวงรีมีข้อดีคือ แยกได้ว่าการดีสชาร์จบางส่วนเกิดจากสาเหตุอะไร [1]

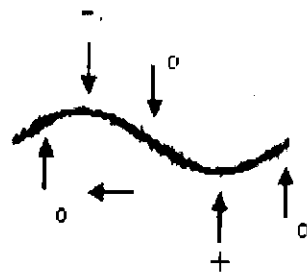


(ก) ฐานเวลารูปอิลิปส์

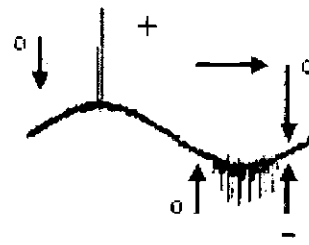


(ข) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ฐานเวลารูปคลื่นไซน์



(ง) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

รูปที่ 2.22 การแสดงผลการดีสชาร์จบางส่วน [5]

2.9 การออกแบบครีมนวนโพลิเมอร์ของกับดักฟ้าผ่า

ปัญหาสำคัญยิ่งประการหนึ่งของการใช้ระบบไฟฟ้าแรงสูง ก็คือ การฉนวนซึ่งมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่าย ส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวนที่มีคุณภาพไม่ได้มาตรฐาน หรือการออกแบบไม่มีประสิทธิภาพ การออกแบบการฉนวนไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ

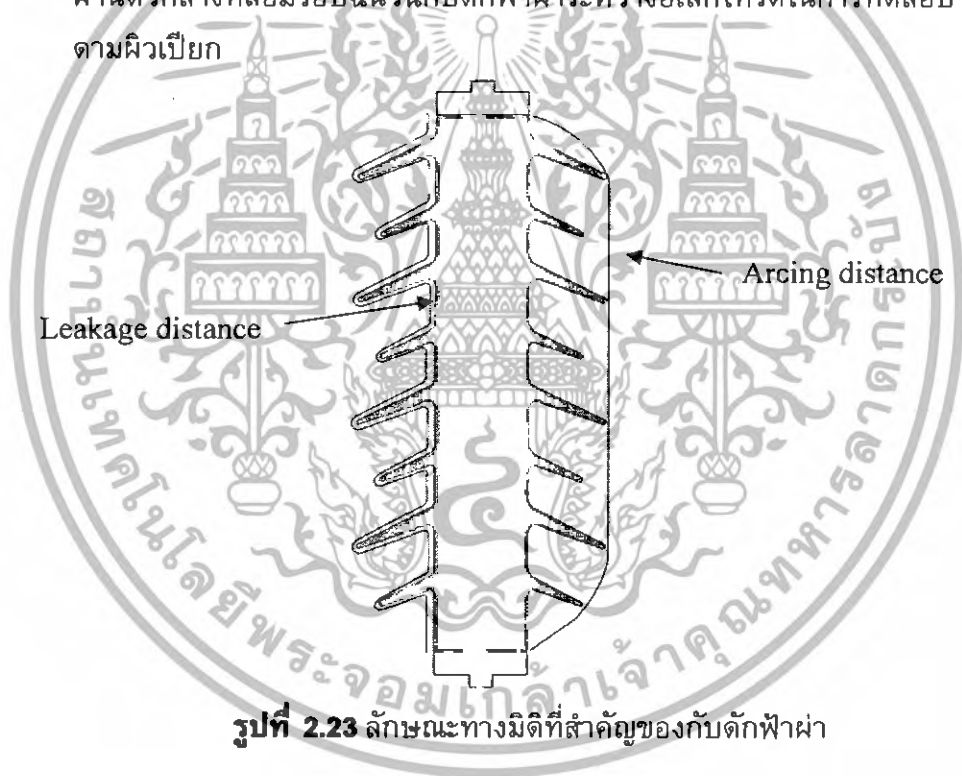
1. ชนิดของฉนวน
2. คุณสมบัติของฉนวนต่อลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้า ชนิดแบบหรือรูปคลื่นแรงดัน (กระแสสลับ กระแสตรง และทรานเซียนต์)
3. ระดับแรงดันระบบ HV , EHV และ UHV
4. สภาพแวดล้อม ความเปรอะเปื้อน และสภาพบรรยากาศ รวมทั้งปรากฏการณ์ฟ้าผ่า
5. ความสำคัญของฉนวนที่แตกต่างกัน
6. ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ สายส่ง สถานีจ่ายไฟฟ้า และสายจำหน่าย

2.9.1 ลักษณะมิตที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่า

กับดักฟ้าผ่าถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญยิ่งต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบ ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ความบกพร่องหรือความล้มเหลวของกับดักฟ้าฝ้าย่อมทำให้เกิดความเสียหาย การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหยุดชะงัก ฉะนั้นกับดักฟ้าผ่าที่ดีจะต้องไม่เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดผิดพร่องในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า กับดักฟ้าผ่าในสภาวะที่ใช้งานจะต้องทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ทุกรูปแบบ ต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ความร้อน แรงกล และปฏิกิริยาเคมี ลักษณะสมบัติที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่าที่กล่าวมาในที่นี้คือ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับมิติและคุณสมบัติของเนื้อฉนวน

ลักษณะสมบัติทางมิติที่เกี่ยวข้อง และมีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าที่ควรทราบความหมายมีดังต่อไปนี้

1. ระยะรั้ว (Leakage distance) คือ ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดได้ตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าระหว่างอิเล็กโทรด โดยส่วนหนึ่งของระยะรั้วจะเป็นส่วนกันมิให้ผิวฉนวนเปียกได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาพฝนตก ซึ่งจะช่วยให้กับดักฟ้าผ่ามีความคงทนต่อแรงดันวาทไฟตามผิวได้สูง ดังรูปที่ 2.23
2. ระยะอาร์ก (Arcing distance) คือ ระยะสั้นที่สุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดผ่านอากาศ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือระยะที่วัดตามแนวที่เกิดอาร์ก ระยะอาร์กแบ่งออกเป็นระยะอาร์กแห้ง (Dry arcing distance) หมายถึง ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบฉนวนกับดักฟ้าผ่าระหว่างอิเล็กโทรดในการทดสอบการวาทไฟตามผิวแห้ง ระยะอาร์กเปียก (Wet arcing distance) หมายถึง ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบฉนวนกับดักฟ้าผ่าระหว่างอิเล็กโทรดในการทดสอบการวาทไฟตามผิวเปียก



รูปที่ 2.23 ลักษณะทางมิติที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 การใช้งานกับดักฟ้าผ่าในสภาวะเปรอะเปื้อน

สิ่งเปรอะเปื้อนที่จับเกาะอยู่บนผิวของฉนวนกับดักฟ้าผ่า เมื่อเปียกน้ำอันอาจจะเกิดจากหมอก หรือความชื้นในตอนเช้า หรือฝนที่ตกปรอยๆ สภาพนำไฟฟ้าของผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้กระแสรั่วไหลตามผิวของกับดักฟ้าผ่ามีค่าเพิ่มมากขึ้น และเป็นสาเหตุให้เกิดความไวตามผิวได้ง่าย การเกิดความไวตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อนขึ้นอยู่กับปริมาณ และประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำ ปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของการเกิดความไวตามผิว



รูปที่ 2.24 ความเสียหายที่มีสาเหตุจากการเกิดความไวตามผิวของกับดักฟ้าผ่า

การแบ่งประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนโดยทั่วไปแล้วนิยมแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามสภาพแวดล้อมที่กับดักฟ้าผ่าติดตั้งใช้งาน ได้แก่ สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเล สิ่งเปรอะเปื้อนจากอุตสาหกรรม สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเลทราย และสิ่งเปรอะเปื้อนจากบริเวณอื่น ๆ การแบ่งระดับความเปรอะเปื้อน ตามมาตรฐาน IEC 815 [6] ได้แบ่งระดับความเปรอะเปื้อนออกเป็น 4 ระดับตามสภาพพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน

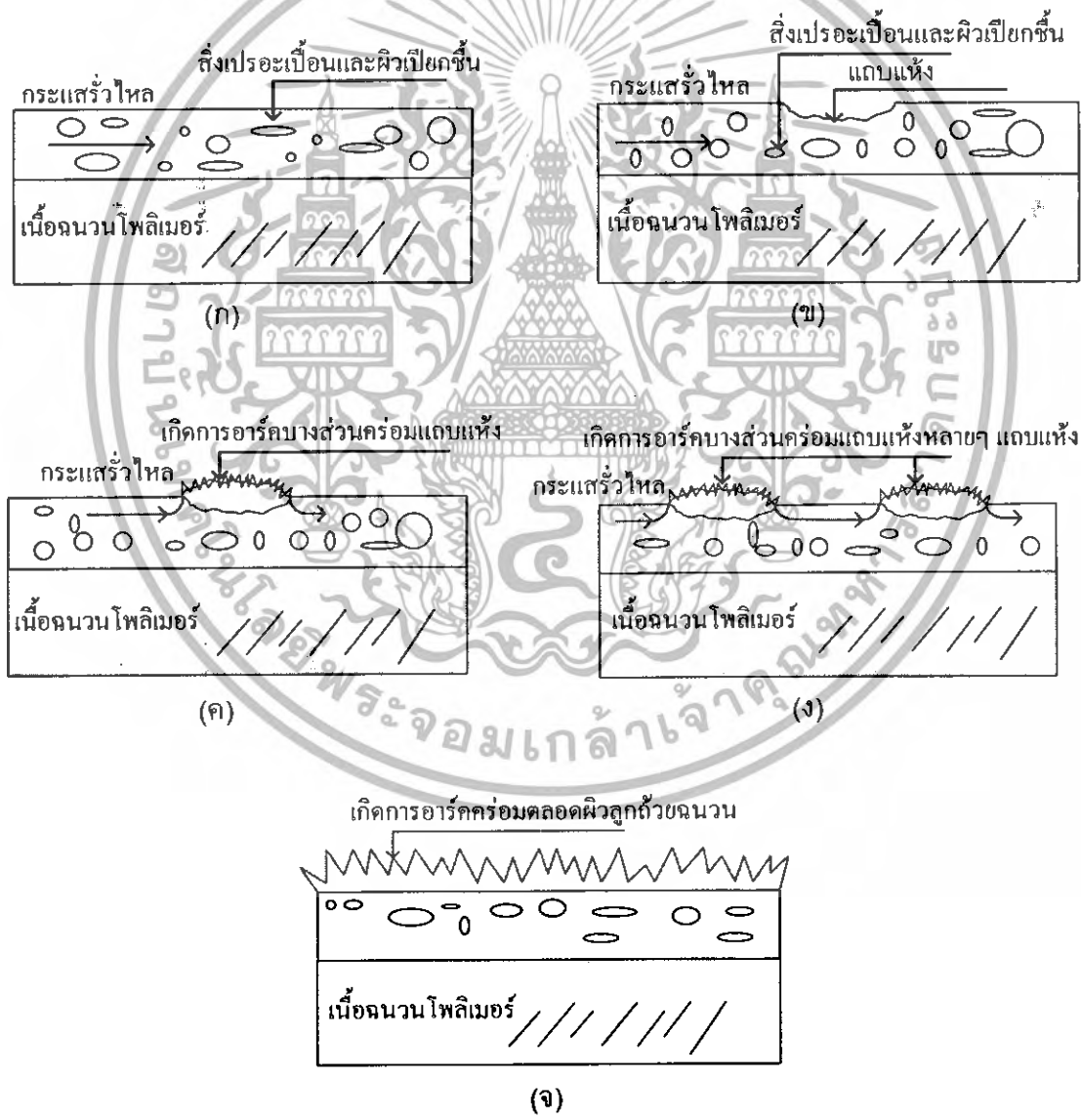
ระดับความเปราะเปื้อน	ตัวอย่าง
1) เล็กน้อย (Light)	-บริเวณที่ปลอดภัยจากการประกอบอุตสาหกรรม และชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปริมาณน้อย - บริเวณที่มีความหนาแน่นในการประกอบ อุตสาหกรรม หรือที่อยู่อาศัยน้อย โดยที่จะต้อง เป็นบริเวณที่มีลมพัดผ่าน หรือมีฝนตกบ่อย - บริเวณเขตเกษตรกรรมหรือบริเวณที่อยู่ใกล้ๆ ภูเขา โดยที่พื้นที่ทั้งหมดเหล่านี้ จะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่น้อยกว่า 10 - 20 กิโลเมตร และจะต้องไม่ได้รับลมทะเลโดยตรง
2) ปานกลาง (Medium)	- บริเวณเขตอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มีการสร้างฝุ่นหรือควันออกมาและ อาจจะเป็นบริเวณย่านชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปานกลาง - บริเวณย่านชุมชนหรือเขตอุตสาหกรรมหนาแน่น แต่จะต้องมีลมพัดผ่านหรือฝนตกปรอยๆ - บริเวณที่มีลมทะเลพัดผ่าน ซึ่งจะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลพอสมควร (ควรจะห่างหลายๆ กิโลเมตร)
3) สูง (Heavy)	- เขตอุตสาหกรรมหนาแน่น หรือบริเวณชานเมืองของเมืองใหญ่ที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนสูง - บริเวณที่ได้รับลมทะเลที่รุนแรงโดยตรงหรือชายฝั่งทะเล
4) สูงมาก (Very heavy)	- บริเวณที่เป็นเขตรับฝุ่นควันจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยเฉพาะฝุ่นที่เป็น thick conductive deposit - บริเวณที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลมากๆ ซึ่งมีการรับเอาสิ่งเปราะเปื้อนที่พัดมาจากทะเลโดยตรง - ทะเลทรายที่มีโอกาสฝนตกน้อยมาก จะต้องรับลมที่นำเอาทรายและไอเกลือเข้ามา

หมายเหตุ

- บริเวณเกษตรกรรมในข้อ 1 ถ้ามีการใช้ปุ๋ยโดยการฉีดพ่นหรือมีการเผาไหม้ของกาก วัสดุพืชต่างๆ เมื่อมีลมพัดนำเอาสิ่งเหล่านั้นมาแพร่กระจายออกไป ระดับความเปราะเปื้อนอาจจะอยู่ในระดับสูง
- บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลหรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลในข้อที่ 2 หรือ 3 ระยะทางที่พิจารณาจะต้องขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศของชายฝั่งทะเล และลักษณะที่เกิดขึ้นด้วย

กระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิของความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดผิวฉนวน โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแส บริเวณที่ความหนาแน่นกระแสสูง เช่นบริเวณคอกอดจะเกิดความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณนั้นแห้งก่อนมีลักษณะเป็นส่วนเล็กๆแคบๆมีความกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตรเรียกว่า แถบแห้ง(Dry band) บริเวณแถบแห้งนี้มีสภาพความดันสูง ไม่สามารถที่จะนำกระแสได้ ทำให้ แรงดันเกือบทั้งหมดตกคร่อมที่แถบแห้งถ้าความคงทนต่อความเป็นฉนวนของอากาศบริเวณ แถบแห้งมีค่าน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้ง จะเกิดการเบรกดาวนซ์ของ อากาศคร่อมแถบแห้งขึ้นเรียกว่าการดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) กระแสรั่วไหลที่ เกิดขึ้นอาจทำให้ขนาดของแถบแห้งขยายออกไป ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบ แห้งมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการดีสชาร์จต่อไปอีกการดีสชาร์จบางส่วนจะหยุดลง ถ้ามี แถบแห้งหลายๆส่วนที่อยู่ใกล้กันเกิดพัฒนาการจนเชื่อมต่อกันได้ ก็เกิดวบไฟตามผิวฉนวน คร่อมตลอดผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า ขั้นตอนของการเกิดวบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า เนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนแสดงในดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ขั้นตอนการเกิดวบไฟตามผิวที่ผิวฉนวนจากสิ่งเปราะเปื้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 แนวทางการแก้ไขการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน

1. การลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า

การป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าโดยใช้วิธีลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนได้แก่การทำความสะอาดผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าตามระยะเวลาที่กำหนด หรือการใช้กับดักฟ้าผ่าประเภทที่มีรูปทรงที่ยากแก่การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน การฉีดล้างทำความสะอาดกับดักฟ้าผ่าตามระยะเวลาที่เหมาะสม จะทำเมื่อผิวฉนวนของ กับดักฟ้าผ่าเริ่มสกปรกสามารถทำได้ทั้งในขณะที่ดับกระแสไฟฟ้าและขณะจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยจะต้องพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ใช้ในการฉีด ระยะห่างและแรงดันของน้ำที่ทิศทางตลอด ลักษณะการติดตั้งของการติดตั้งของกับดักฟ้าผ่า การออกแบบปีกฉนวนของกับดักฟ้าผ่าให้มีรูปร่างที่ทำให้การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนทำได้ยากขึ้น

2. การเพิ่มความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า

การเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าจะเกิดได้ยากขึ้นถ้าผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่ามีความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวสูงขึ้น อาจทำได้โดยการเพิ่มระยะรัว (Leakage Distance) ของกับดักฟ้าผ่า การเพิ่มระยะรัวของครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าให้มากขึ้นนั้นทำให้กระแสรั่วไหลเกิดขึ้นได้น้อยลง โดยมาตรฐาน IEC 815 [6] ได้ระบุค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distanceที่ใช้สำหรับการออกแบบครีบนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน โดยเป็นฟังก์ชันของระดับสิ่งเปรอะเปื้อนของสถานที่นั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้กับดักฟ้าผ่าที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน

ระดับของความเปรอะเปื้อน	ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance(mm/kV)
เล็กน้อย	16
ปานกลาง	20
สูง	25
สูงมาก	31

โดยที่บริเวณที่มีระดับของความเปราะเปื้อนเปื้อนเบาบาง ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance อาจจะมีค่าน้อยกว่า 16 mm/kV ก็ได้ แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 12 mm/kV (ค่าต่ำสุดที่ยินยอมให้ใช้ได้) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การดูแลบำรุงรักษาและบริเวณที่มีระดับของความเปราะเปื้อนสูงมากเป็นพิเศษ ค่าที่ระบุไว้คือ 31 mm/kV อาจจะไม่เพียงพอที่จะสามารถป้องกันการเกิดวาวไฟตามผิวได้ ดังนั้นควรจะพิจารณาใช้ค่า Nominal specific creepage distance เพิ่มขึ้น โดยขึ้นอยู่กับ การบำรุงรักษาและผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ และประสบการณ์ผู้ออกแบบบางกรณีอาจพิจารณาควบคู่ไปกับการวางแผนการทำความสะอาด และประสพการณ์ผู้ออกแบบบางกรณีอาจพิจารณาควบคู่ไปกับการวางแผนการทำความสะอาด กับดักล่อฟ้าหลังจากติดตั้งใช้งานหรือการใช้สารเคลือบผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าอีกด้วย

2.9.4 การออกแบบกับดักฟ้าผ่าเพื่อใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อน

เกณฑ์การออกแบบครีบนวนโพลีเมอร์ของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป อาศัยข้อแนะนำตามมาตรฐาน IEC 815 [6] โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1. คำนวณค่า minimum nominal creepage distance ตามสมการที่ (2.13)

$$(L_{nc})_{\min} = (L_{sc})_{\min} \times U_m \times k_d \quad (2.13)$$

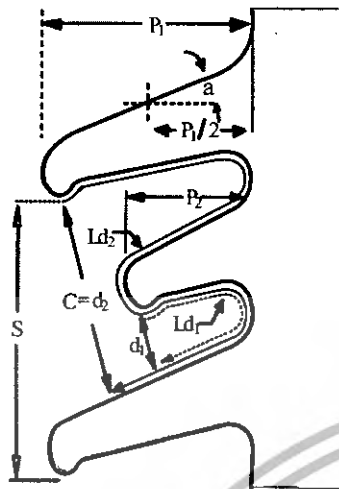
เมื่อ	$(L_{nc})_{\min}$	คือ	minimum nominal creepage distance
	$(L_{sc})_{\min}$	คือ	minimum specific creepage distance
	U_m	คือ	highest system voltage phase-to-phase for the equipment
	k_d	คือ	ตัวประกอบแก้ไข (correction factor) ; $k_d = 1$ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลูกถ้วย (D_m) < 300 mm.

กับดักฟ้าผ่าฉนวนเป็นแบบปีกสลัก ค่า (D_m) โดยประมาณหาได้จากสมการที่ (2.14)

$$D_m = (D_{e1} + D_{e2} + 2D_i) / 4 \quad (2.14)$$

D_{e2}	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางปีกเล็ก
D_i	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกับดักฟ้าผ่า

2. ลักษณะรูปร่างของครีบ ตามมาตรฐาน IEC 815 [6] ดังนี้



C	$>$	30 mm.
S/P	\geq	0.8
Ld/d	$<$	5
$P1-P2$	\geq	15 mm.
α	$>$	5°
$C.F.$	\leq	4 ระดับสูงและสูงมาก
$P.F.$	$>$	0.7 ระดับสูงและสูงมาก

รูปที่ 2.26 ลักษณะการออกแบบครีบตามมาตรฐาน IEC 815

เมื่อ

- C คือ ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวครีบไปยังครีบนอกสุดของครีบบน
- S คือ ระยะห่างระหว่างชั้นครีบในแนวตั้งของครีบลูกใด ๆ
- P คือ ความกว้างของครีบที่ยื่นออกไปจากคอดันโดยที่ P_1 และ P_2 เป็นความกว้างของครีบยาวและครีบสั้นตามลำดับ
- d คือ ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของครีบ
- L_d คือ ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดจุดวัดค่า

3. เลือกลักษณะครีบ ลักษณะของครีบที่ใช้งานโดยทั่วไปจะมี 3 ประเภท



รูปที่ 2.27 รูปแบบของครีบประเภทต่าง ๆ

พิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างรูปแบบครีบแต่ละแบบพบว่าครีบบน (ก) สิ่งเปราะเป็อนมีโอกาสจับเกาะน้อยที่สุด แต่ทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ลมพัดหรือฝนตกได้แย่มากที่สุด ส่วนครีบบน (ข) การที่มีครีบสั้นมาเสริมสลั

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

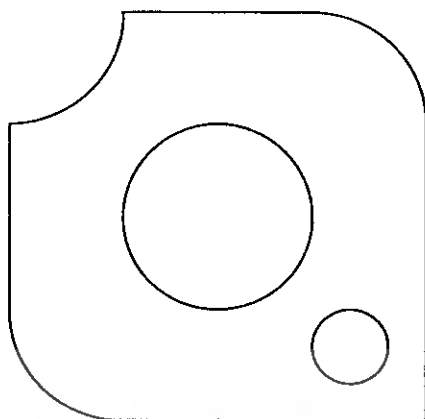
กับครีบบยาวเพื่อทำหน้าที่ชดเชยระยะรั้วที่หายไป ครีบบแบบนี้จะทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่า ครีบบแบบ (ก) สำหรับครีบบแบบ (ค) สิ่งเปราะเปื้อนมีโอกาสจับได้เพิ่มขึ้น แต่มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าครีบบชนิดแบบอื่น ๆ แต่โอกาสที่หยดน้ำจะเชื่อมต่อระหว่างปีกในสภาวะที่ฝนตกหนักมีเพิ่มขึ้น

2.10 ไฟไนต์เอลิเมนต์ [4]

ปรากฏการณ์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นรอบตัวเราสามารถอธิบายได้โดยกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์และทำการประดิษฐ์ขึ้นมาในลักษณะของสมการต่าง ๆ ได้ ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) หรือในรูปแบบของสมการอินทิกรัล (Integral Equation) เป็นต้น ดังตัวอย่างเช่น การคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์อาจเริ่มมาจากสมการอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลในการถ่ายเทความร้อน การคำนวณออกแบบโครงสร้างปีกเครื่องบินอาจเริ่มมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลของโครงสร้างนั้นภายใต้แรงกดดันของอากาศในขณะทำการบิน [7] รวมไปถึงการทำนายทิศทางและความเร็วของกระแสลมจากพายุไต้ฝุ่นเพื่อที่จะออกข่าวเตือนประชาชนในพื้นที่ที่ได้ฝุ่นจะเคลื่อนตัวไปในการอพยพหนี ก็อาจเริ่มมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลของการไหล เป็นต้น

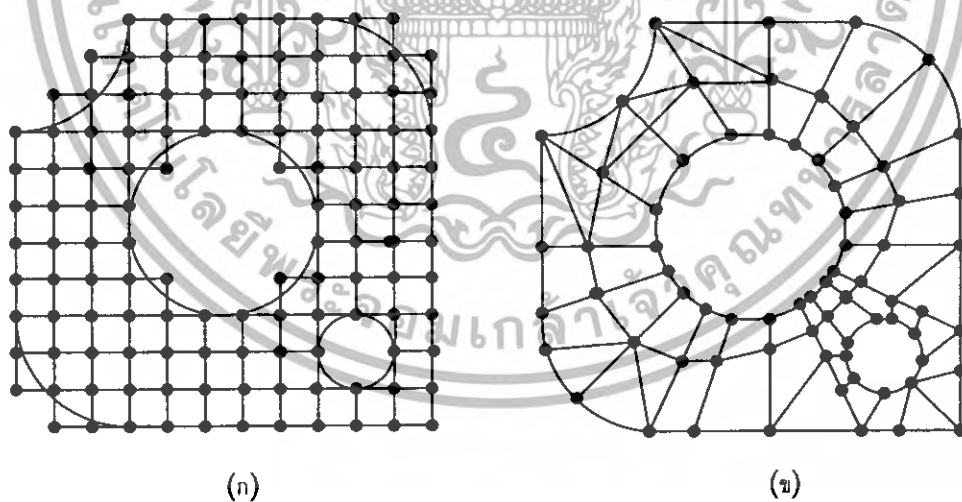
สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาต่าง ๆ นั้น ปกติจะประดิษฐ์ขึ้นมาได้โดยไม่ยาก หากแต่ว่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ที่ต้องการและจำเป็นต้องทำการหาออกมาโดยวิธีการวิเคราะห์ (analytical method) นั้นทำได้ยากและลำบากมากหรืออาจจะหาไม่ได้เลย เหตุผลดังกล่าวก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) ขึ้น วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate method) นั้นมีหลายวิธีการ วิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีการหาผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method)

หลักการที่สำคัญของวิธีการผลต่างสืบเนื่องก็คือการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ โดยเริ่มจากการเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการผลต่างสืบเนื่อง (system of difference equation) ข้อดีของวิธีการผลต่างสืบเนื่องก็คือ วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ง่ายแก่การศึกษาและทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้น ๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีการผลต่างสืบเนื่องก็มีหลายประการ เช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (application of boundary condition) และที่สำคัญที่สุดก็คือความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน ซึ่งการออกแบบสิ่งที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนในปัจจุบันนี้ได้กลายเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพสิ่งของนั้น ๆ ให้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.28 ลักษณะของตัวอย่างแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างวิธีการผลต่างสี่บเนื่องกับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมชิ้นหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วย ส่วนโค้งและส่วนที่เป็นเส้นตรง การวิเคราะห์หาการกระจายของความเค้น (stress distribution) บนแผ่นอะลูมิเนียมนี้ภายใต้แรงกระทำที่กำหนดให้โดยการใช้วิธีการผลต่างสี่บเนื่อง (finite difference method) จะเริ่มจากการแบ่งแผ่นอะลูมิเนียมนี้ออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.29 (ก) โดยที่ตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อ (grid points) ตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่าง ๆ และขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่า (number of unknowns) จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อเนื่อง



รูปที่ 2.29 แผ่นอะลูมิเนียมที่วิเคราะห์โดยใช้วิธีการผลต่างสี่บเนื่อง (ก) กับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (ข)

รูปที่ 2.29 (ก) นี้ แสดงให้เห็นว่าตารางสี่เหลี่ยมที่ใช้ในวิธีการผลต่างสี่บเนื่อง ไม่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงของแผ่นอะลูมิเนียมดังกล่าวได้โดยเที่ยงตรง หากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นก็จะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้นแต่ในขณะเดียวกัน จำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสลับเนื่องมากขึ้นด้วย และกระบวนการ ในการแก้ปัญหาจำเป็นต้องการหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้น รวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย

สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลย โดยประมาณวิธีใหม่ที่เรียกว่า วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ที่นิยมเรียก ด้วยคำย่อกันว่า FEM ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนเช่นใดก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงที่เที่ยงตรงกว่าหลักการของ วิธีการนี้ในขั้นต้นก็คล้ายกับวิธีการผลต่างสลับเนื่อง กล่าวคือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหา ออกเป็นเนื้อที่หลาย ๆ ชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ เช่น ในตัวอย่างของแผ่นอะลูมิเนียมเดิมนี้ สามารถแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ต่าง ๆ กัน โดยเอลิเมนต์ต่าง ๆ นี้ อาจอยู่ในรูปลักษณะของ สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ ดังเช่น รูปที่ 2.29 (ข)

ผลประโยชน์สิ่งแรกที่เห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 2.29 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ ผลต่างสลับเนื่อง ก็คือ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยเอลิเมนต์ขนาดต่าง ๆ กันที่สามารถ จำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของแผ่นอะลูมิเนียมได้เป็นอย่างดี ซึ่งหมายถึงปัญหานี้จะถูกแก้ เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ที่มีรูปร่าง ลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากที่สุด ดังนั้นค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมา ได้จะมีความแม่นยำมากขึ้นตามไปด้วย

หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอ ลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้าง ขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการ ของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งใน ความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็น รูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลง ไปในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลย โดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น

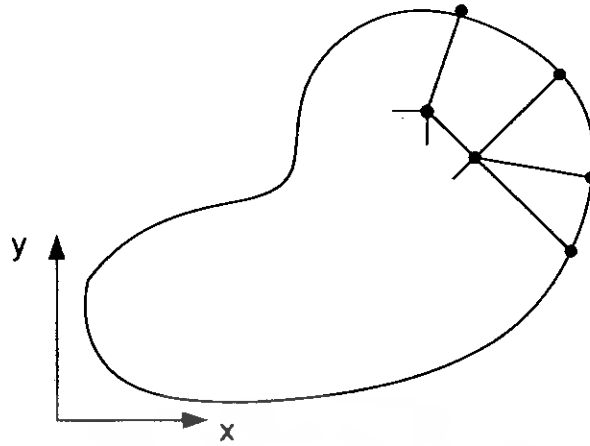
ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน [7] ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1

การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็น เอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังรูปที่ 2.30 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่าง ๆ กัน เช่น ปัญหากระจายตัวของสนามไฟฟ้า เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างการแบ่งขอบเขตรูปร่างเป็นเอลิเมนต์ย่อย

ขั้นตอนที่ 2

การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม จะประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 จุดต่อของเอลิเมนต์ย่อย

โดยที่จุดต่อนี้จะเป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (nodal unknowns) ซึ่งก็คือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้า หากเราพิจารณาถึงปัญหาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ลักษณะการกระจายตัวของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ดังสมการ (2.15)

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.15)$$

เมื่อ $N_i(x, y), i=1,2,3$ คือ ฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์

สมการ (2.16) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} \\ &= \underset{(1 \times 3)}{[N]} \underset{(3 \times 1)}{[\phi]} \end{aligned} \quad (2.16)$$

เมื่อ $[N]$ คือ เมทริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์
 $[\phi]$ คือ เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 3

การสร้างสมการของเอลิเมนต์ ดังตัวอย่างเช่นสมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.31 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}_e$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[k]_e [\phi]_e = [F]_e \quad (2.17)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการ (2.18) สามารถทำได้โดย

1. วิธีการโดยตรง (direct approach)
2. วิธีการแปรผัน (variational approach)
3. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals)

ขั้นตอนที่ 4

การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (system of simultaneous equations) ในรูปแบบดังต่อไปนี้

$$\sum (\text{element equation}) \Rightarrow [k]_{sys} [\phi]_{sys} = [F]_{sys} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5

ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ลงในสมการ (2.18) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $[\phi]_{y_r}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ ซึ่งอาจเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้า หากเราพิจารณาถึงปัญหาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6

เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้ว ก็สามารถทำการหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้าง เราสามารถนำไปใช้หาลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าได้



บทที่ 3

การทดสอบกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกป (ZnO)

3.1 การทดสอบกับดักฟ้าผ่า

การทดสอบกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปนี้จะใช้กับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA และพิกัด 24 kV 10 kA ทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60099 – 4 [8] โดยมีหัวข้อการทดสอบที่สามารถใช้อุปกรณ์ทดสอบที่มีอยู่ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. คือ การทดสอบการเกิดดีเอสอาร์บางส่วน การทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงานและการทดสอบหากระแสรั่วไหล



รูปที่ 3.1 กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในการศึกษา

กับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A. (ก)

กับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA บริษัท A. (ข)

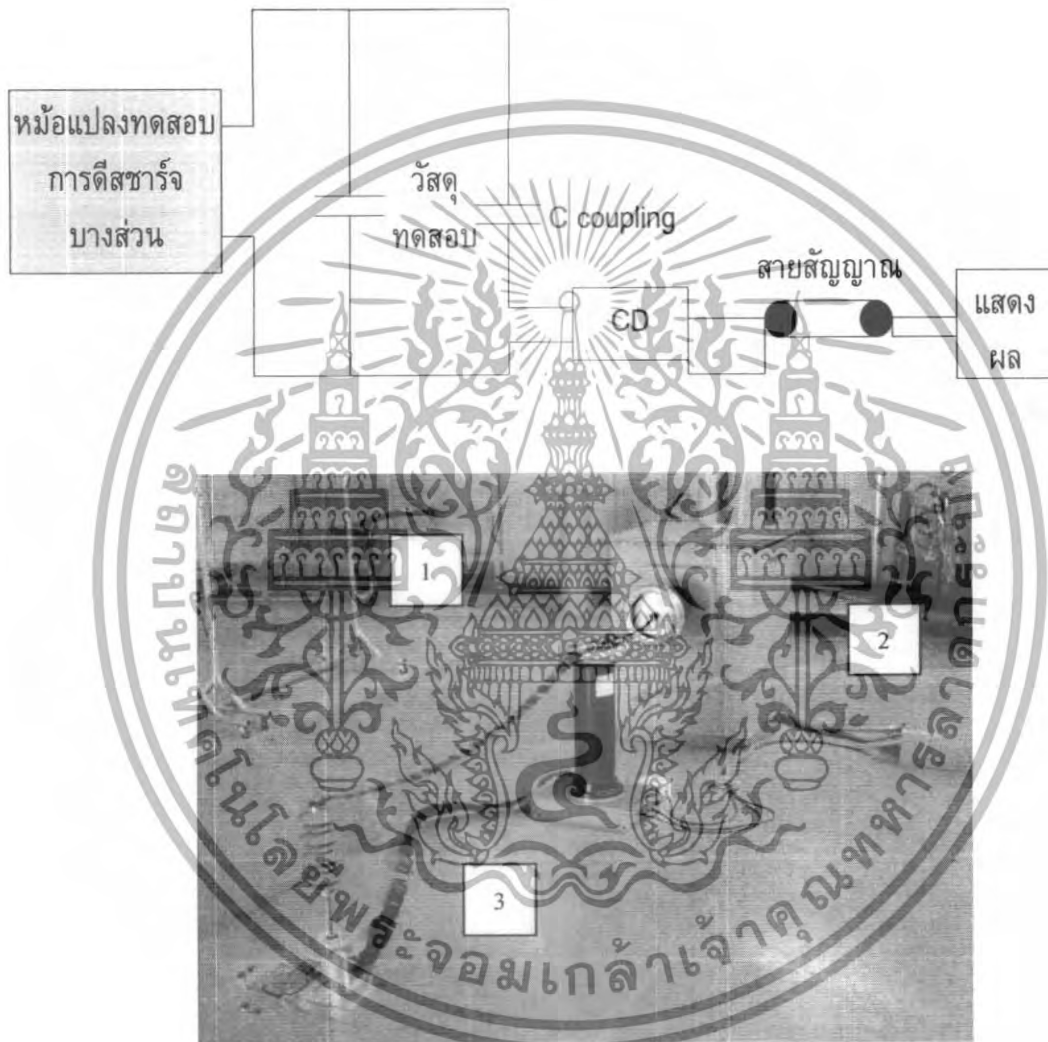
กับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 5 kA บริษัท B. (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Internal partial discharge)

การทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนจะเป็นการทดสอบเพื่อหาความผิดปกติภายในของกับดักฟ้าผ่าเพื่อเป็นการยืนยันว่าไม่มีความผิดปกติภายในกับดักฟ้าผ่า การทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนจะกระทำต่อกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกน [8]

1. วงจรการทดสอบ



รูปที่ 3.2 วงจรทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนของกับดักฟ้าผ่า

- เมื่อ
- 1 คือ หม้อแปลงทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนพิกัด 40 kVA 460 V / 75 kV 50/60 Hz
 - 2 คือ โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100 kV
 - 3 คือ กับดักฟ้าผ่าพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขั้นตอนการทดสอบ

- 2.1** ก่อนทำการทดสอบจะต้องทำการปรับเทียบ (Calibration) วงจรทดสอบ และนำอุปกรณ์ปรับเทียบออกจากวงจรทดสอบก่อนทำการทดสอบทุกครั้ง
- 2.2** ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ผ่านการทำความสะอาดครีบบของฉนวน ตัวตัดวงจร (Disconnect or Fault Indicator) ต้องถูกปลดออกไป และกับดักฟ้าผ่าต้องไม่ผ่านการใช้งานหรือทดสอบมาก่อน
- 2.3** ทำการปรับเทียบวงจรทดสอบและบันทึกค่าการปรับเทียบดังนี้

การปรับเทียบ

ประจุที่ป้อน.....pC

ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด.....pC

ค่า Back ground Noise.....

ค่าสเกลแฟลคเตอร์ของการวัด PD.....

- 2.4** ป้อนแรงดันให้กับดักฟ้าผ่าขนาดเท่ากับอัตราแรงดันของกับดักฟ้าผ่า (rate voltage) ค้างไว้ประมาณ 2 s – 10 s แล้วลดแรงดันลงเหลือ 1.05 เท่าของแรงดันใช้งานต่อเนื่อง (Continuous operating voltage) วัดค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แล้วปรับไปที่ 1.05 เท่าของแรงดันเฟส – ดิน วัดค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
- 2.5** บันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จ

3. ผลการทดสอบ

สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ ความดันของอากาศมีค่าเท่ากับ 779 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 23 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 74 เปอร์เซ็นต์

การปรับเทียบเครื่องทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน

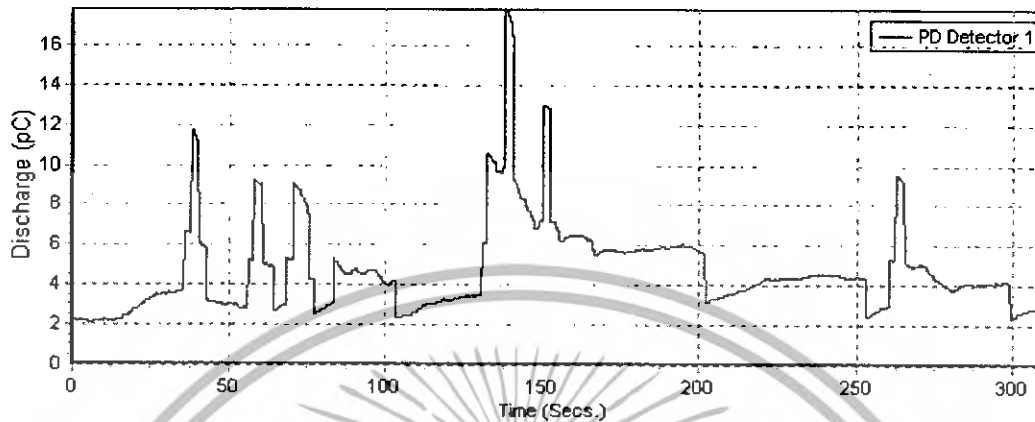
ประจุที่ป้อน 100 pC

ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด 100 pC

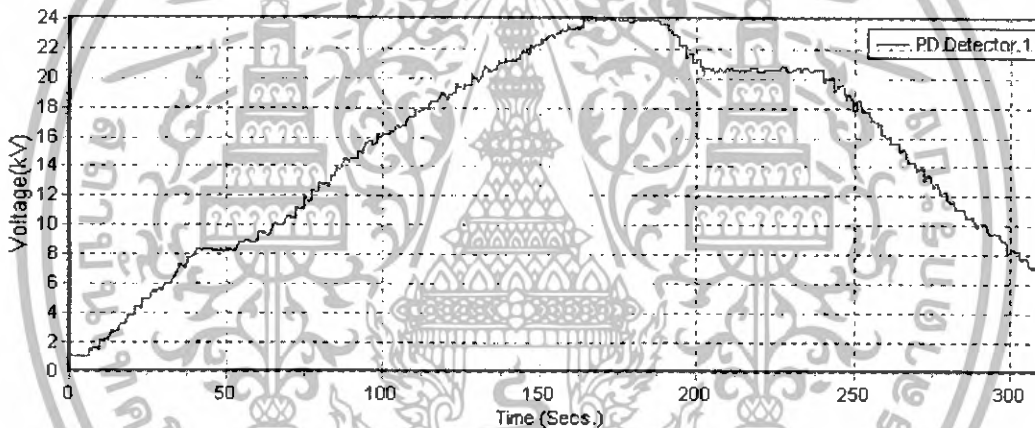
ค่า Back ground Noise 0.8 pC

ค่าสเกลแฟลคเตอร์ของการวัด PD เท่ากับ 1

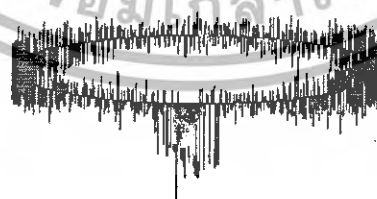
ตัวอย่างที่ 1	พิกัด : 24 kV 10 kA	Voltage.: 1.05 Uc	บริษัท A.
	วันที่ทำการทดสอบ : 17 มกราคม 2550		



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PD ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่ป้อนแรงดัน



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนเทียบกับเวลา

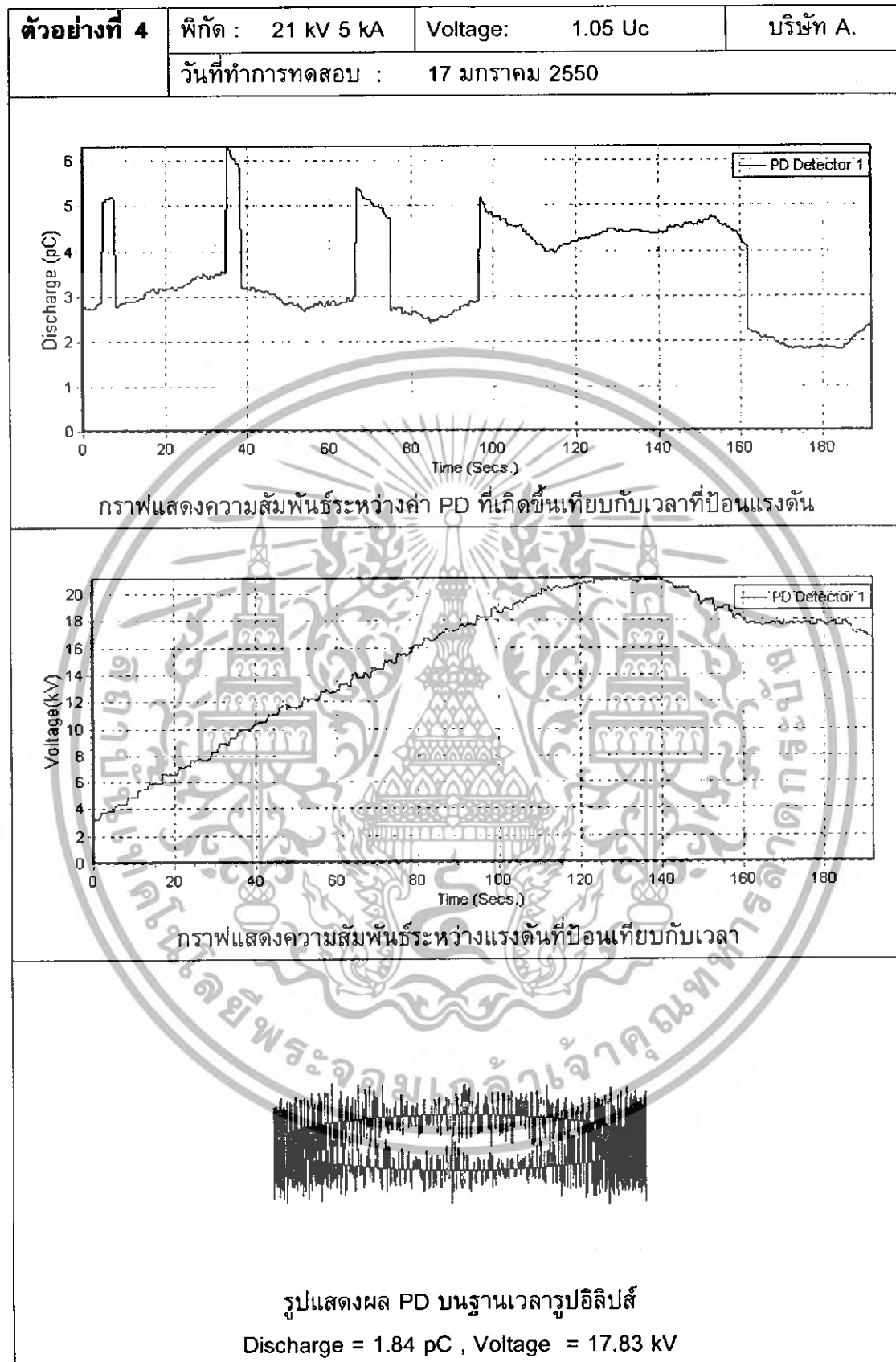


รูปแสดงผล PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

Discharge = 3.74 pC , Voltage = 20.60 kV

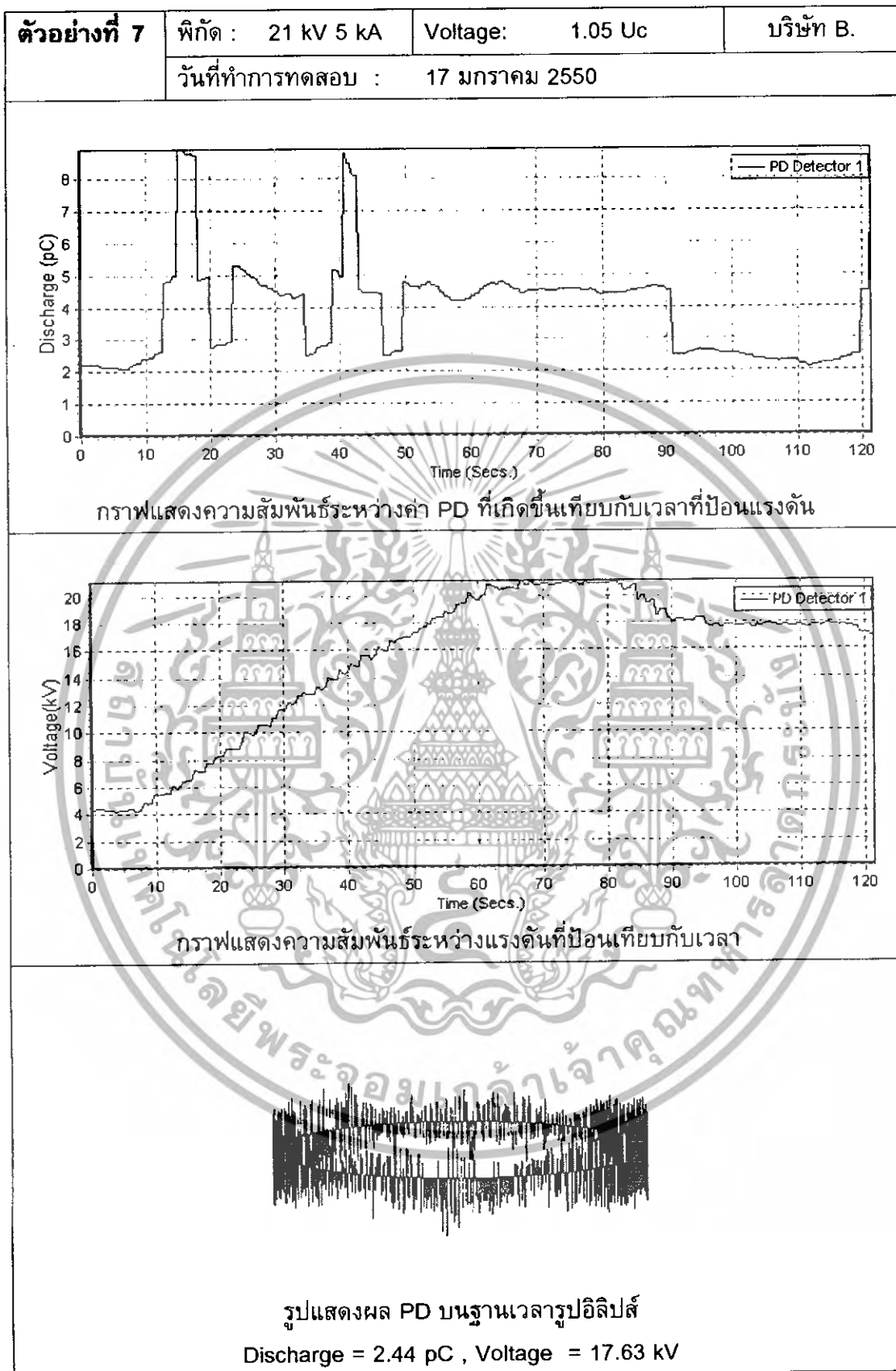
รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกบดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 4

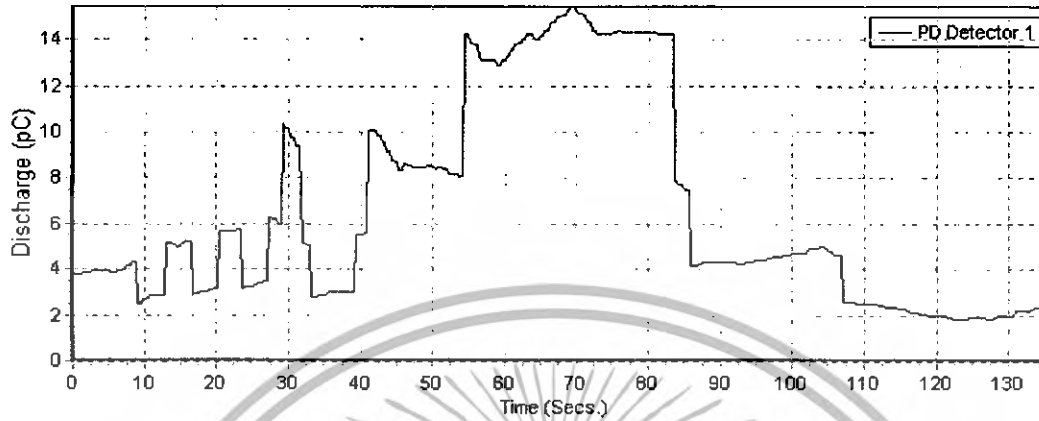
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



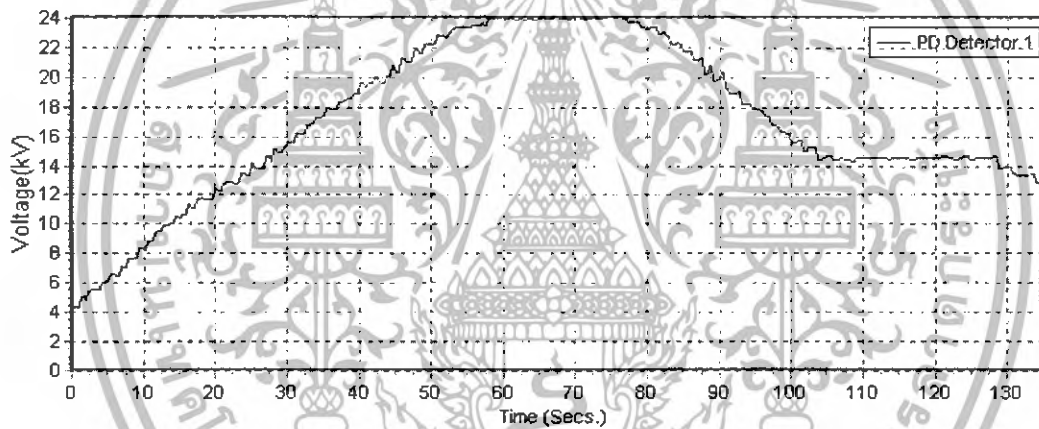
รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

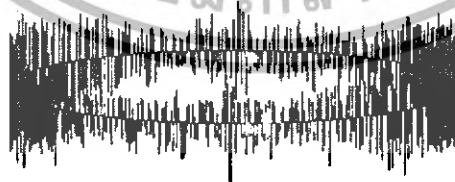
ตัวอย่างที่ 1	พิกัด : 24 kV 10 kA	Voltage: 1.05 Up	บริษัท A.
	วันที่ทำการทดสอบ : 17 มกราคม 2550		



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PD ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่ป้อนแรงดัน



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนเทียบกับเวลา

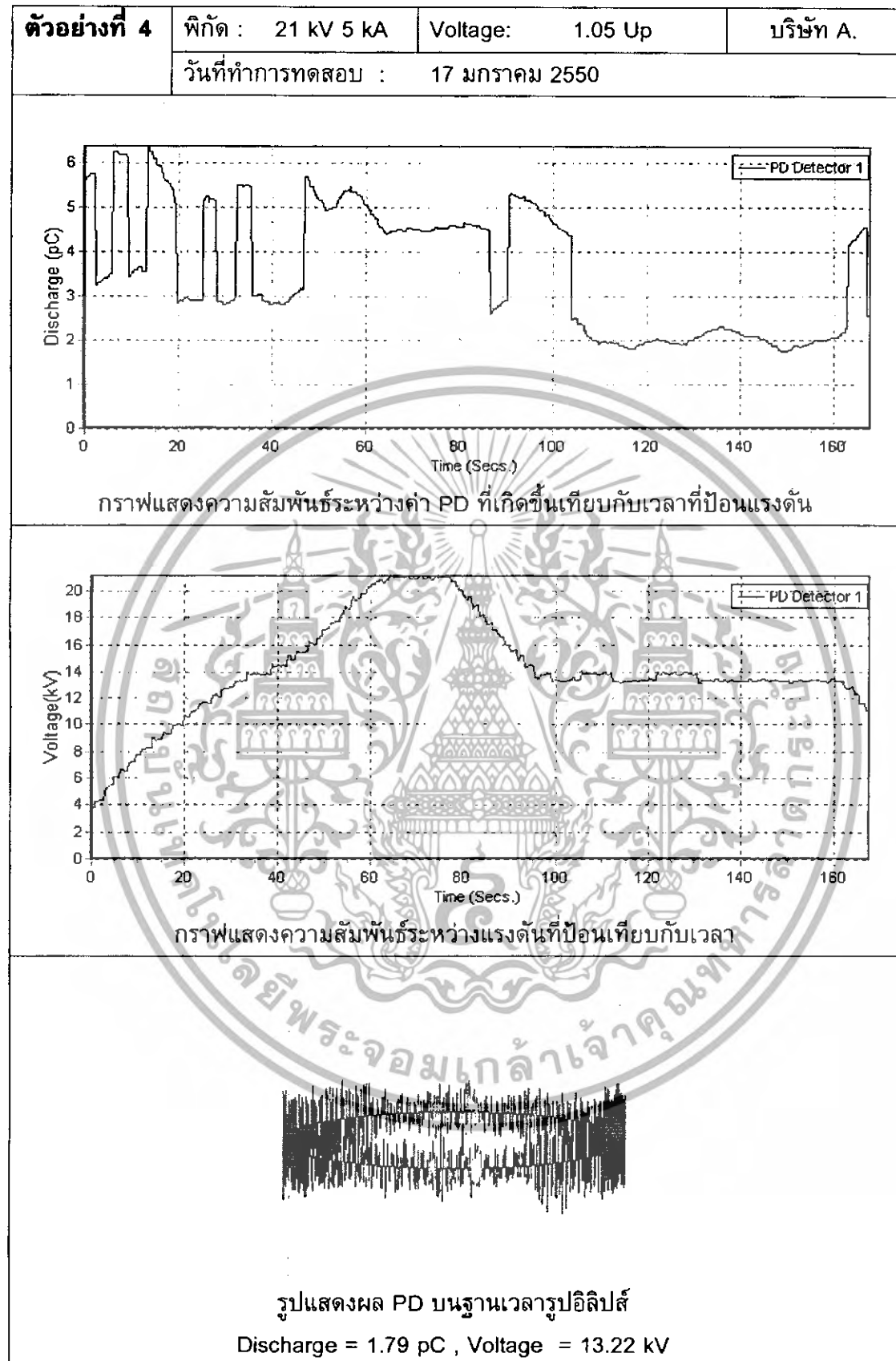


รูปแสดงผล PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

Discharge = 2.30 pC , Voltage = 14.57 kV

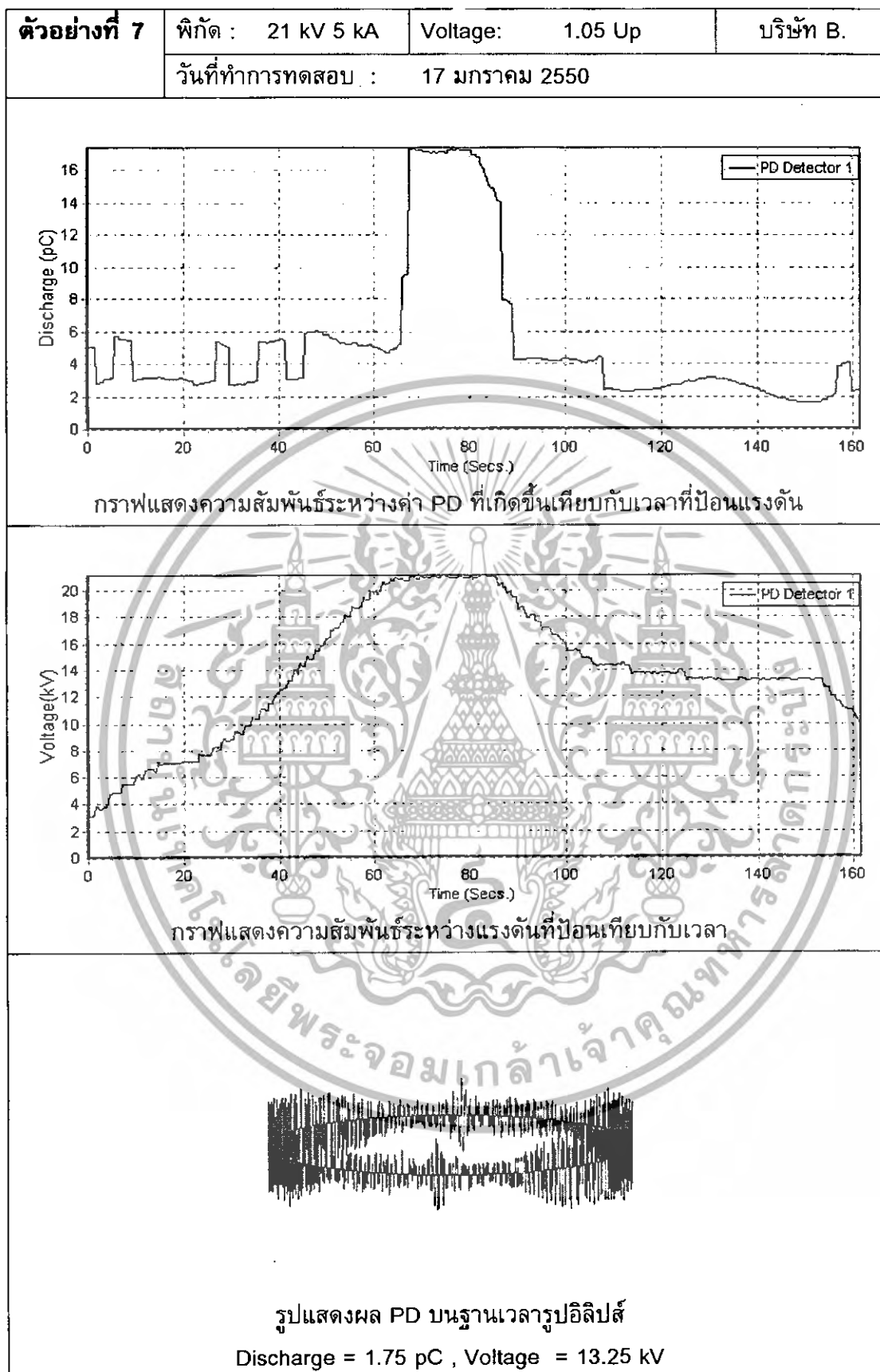
รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าที่แรงดัน 1.05 Uc

ตัวอย่าง	บริษัท	พิกัดแรงดัน	แรงดัน	PD
1	A	24 kV 10 kA	20.60 kV	3.74 pC
2	A	24 kV 10 kA	20.60 kV	4.14 pC
3	A	24 kV 10 kA	20.46 kV	4.50 pC
4	A	21 kV 5 kA	17.83 kV	1.84 pC
5	A	21 kV 5 kA	17.76 kV	2.27 pC
6	A	21 kV 5 kA	17.70 kV	2.45 pC
7	B	21 kV 5 kA	17.63 kV	2.44 pC
8	B	21 kV 5kA	17.77 kV	3.15 pC
9	B	21 kV 5 kA	17.77 kV	3.49 pC

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าที่แรงดัน 1.05 Up

ตัวอย่าง	บริษัท	พิกัดแรงดัน	แรงดัน	PD
1	A	24 kV 10 kA	14.57 kV	2.30 pC
2	A	24 kV 10 kA	14.44 kV	2.19 pC
3	A	24 kV 10 kA	14.49 kV	2.55 pC
4	A	21 kV 5 kA	13.22 kV	1.79 pC
5	A	21 kV 5 kA	13.21 kV	2.09 pC
6	A	21 kV 5 kA	13.24 kV	1.69 pC
7	B	21 kV 5 kA	13.25 kV	1.75 pC
8	B	21 kV 5kA	13.24 kV	2.03 pC
9	B	21 kV 5 kA	13.28 kV	2.07 pC

4. สรุปผลการทดสอบ

ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ค่าการดิสชาร์จที่วัดได้จะต้องไม่เกิน 10 pC ในการทดสอบที่แรงดัน 1.05 ของแรงดันทำงานต่อเนื่อง กับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA จำนวน 3 ตัวอย่าง มีค่าการดิสชาร์จอยู่ในช่วง 3.74 – 4.50 pC และกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA จำนวน 6 ตัวอย่าง มีค่าการเกิดดิสชาร์จอยู่ในช่วง 1.84 – 3.49 pC ซึ่งกับดักฟ้าผ่าทั้งหมดมีค่าการเกิดดิสชาร์จไม่เกิน 10 pC การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจพบเป็นการดิสชาร์จบางส่วนภายในตัวของกับดักฟ้าผ่าเท่านั้น

ในการทดสอบที่แรงดัน 1.05 ของแรงดันเฟส กับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA จำนวน 3ตัวอย่าง มีค่าการเกิดดิสชาร์จอยู่ในช่วง 2.19 – 2.55 pC และกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

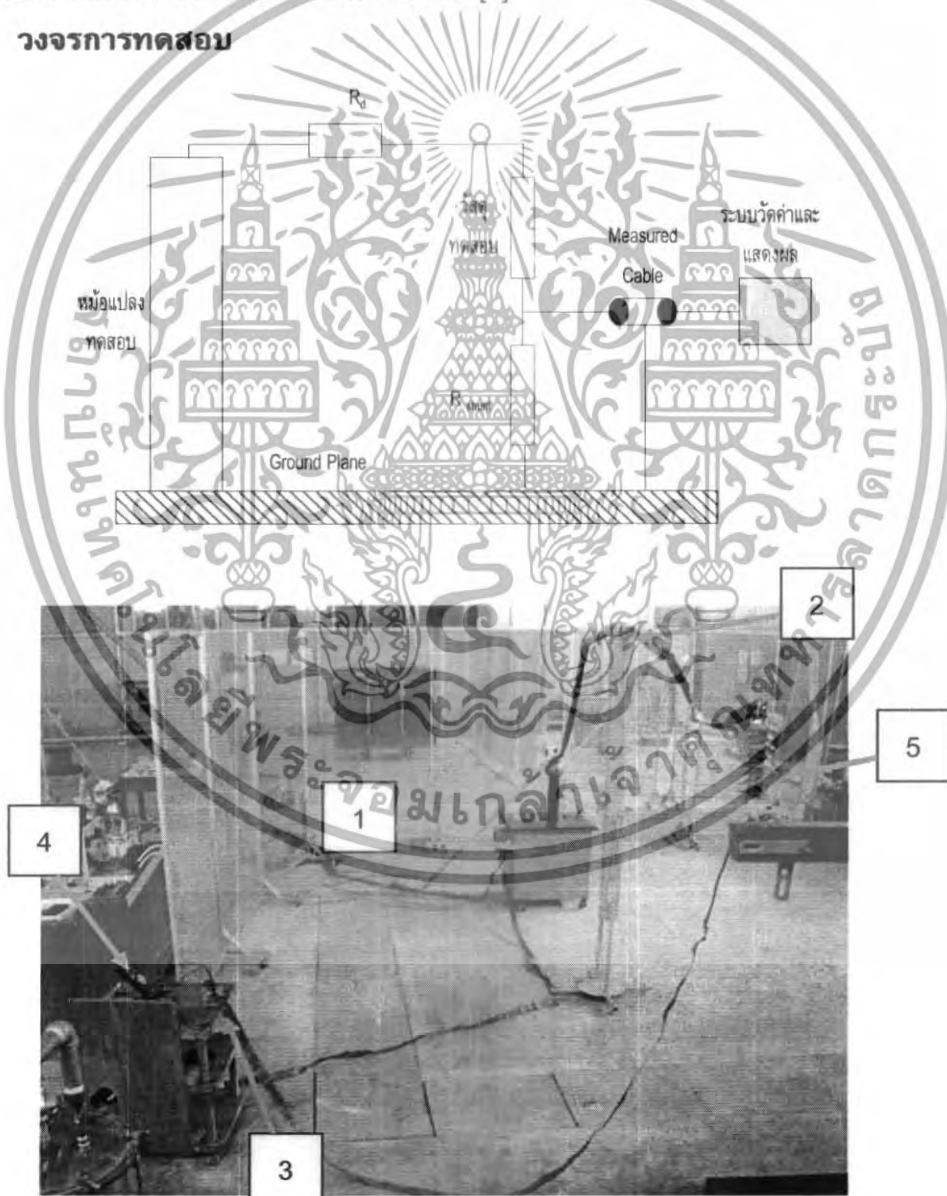
kA จำนวน 6 ตัวอย่าง มีค่าการเกิดดิสชาร์จอยู่ในช่วง 1.69 – 2.09 pC ซึ่งค่าไม่เกินตามมาตรฐานกำหนดที่ 10 pC เช่นกัน

จากการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดการดิสชาร์จภายในตัวของกั๊บดักฟ้าผ่าเท่านั้น ดังนั้นกั๊บดักฟ้าผ่าที่ทำการทดสอบทั้งสองระดับแรงดันคือ ที่ 1.05 ของแรงดันทำงานต่อเนื่อง และ ที่ 1.05 ของแรงดันเฟส กั๊บดักฟ้าผ่าทั้งหมดผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ทุกตัวอย่าง

3.1.2 การทดสอบหากระแสรั่วไหล(Leakage Current)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากระแสรั่วไหลของกั๊บดักฟ้าผ่าในขณะที่ใช้งานที่ระดับแรงดันปกติและขณะที่เกิดแรงดันเกินชั่วขณะ [8]

1. วงจรการทดสอบ



รูปที่ 3.9 วงจรทดสอบหาค่ากระแสรั่วไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ
- 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 5 kVA 230 V / 100 kV 50 Hz
 - 2 คือ ความต้านทานจำกัดกระแส พิกัด 0.49 $M\Omega$
 - 3 คือ ความต้านทานชั้นที่ พิกัด 29.60 $k\Omega$ 30 W
 - 4 คือ โวลต์มิเตอร์
 - 5 คือ กัดักฟ้าผ่า

2. ขั้นตอนการทดสอบ

- 2.1 ก่อนทำการทดสอบต้องทำความสะอาดผิวของกับดักฟ้าผ่าให้สะอาด เพื่อไม่ให้ความสกปรกทำให้เกิดการรวบไฟตามผิว
- 2.2 บันทึกสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบ คำนวณค่าตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ (K_a) และค่าตัวประกอบแปลงความชื้น (K_h) เพื่อพิจารณาปรับแรงดันทดสอบให้ได้สภาวะมาตรฐาน
- 2.3 ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าตามลักษณะการใช้งานจริง
- 2.4 ทำการแก้ค่าแรงดันทดสอบเนื่องจาก อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศและความชื้นตามสมการในภาคผนวก ก
- 2.5 ป้อนแรงดันให้กับกับดักฟ้าผ่าที่ระดับแรงดันปกติ และที่ระดับแรงดันเกินชั่วขณะของแต่ละพิกัดของกับดักฟ้าผ่าที่นำมาทำการทดสอบ
- 2.6 บันทึกผลการทดสอบ

3. ผลการทดสอบ

ทดสอบที่ความดันของอากาศมีค่าเท่ากับ 730 มม.ปรอท อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 24.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 68 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดสอบหากระแสรั่วไหลดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบหากระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า

กับดักฟ้าผ่า	ระดับแรงดัน (kV)	ขนาดกระแสรั่วไหล(mA)
ตัวอย่างที่ 1 พิกัด 21 kV 5 kA	12.7	0.21
	17.0	0.28
ตัวอย่างที่ 2 พิกัด 21 kV 5 kA	12.7	0.21
	17.0	0.28
ตัวอย่างที่ 3 พิกัด 21 kV 5 kA	12.7	0.22
	17.0	0.29
ตัวอย่างที่ 4 พิกัด 21 kV 5 kA	12.7	0.17
	17.0	0.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊ับดักฟ้าผ่า	ระดับแรงดัน (kV)	ขนาดกระแสรั่วไหล (mA)
ตัวอย่างที่ 5 พิกัด 21 kV 5 kA	12.7	0.18
	17.0	0.22
ตัวอย่างที่ 6 พิกัด 21 kV 5 kA	12.7	0.17
	17.0	0.22
ตัวอย่างที่ 7 พิกัด 24 kV 10 kA	13.8	0.28
	19.5	0.41
ตัวอย่างที่ 8 พิกัด 24 kV 10 kA	13.8	0.27
	19.5	0.39
ตัวอย่างที่ 9 พิกัด 24 kV 10 kA	13.8	0.28
	19.5	0.41

4. สรุปผลการทดลอง

กระแสรั่วไหลของก๊ับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานที่ระดับแรงดันปกติและแรงดันเกินชั่วขณะ กระแสที่รั่วไหลจะวัดที่แรงดันที่กำหนด

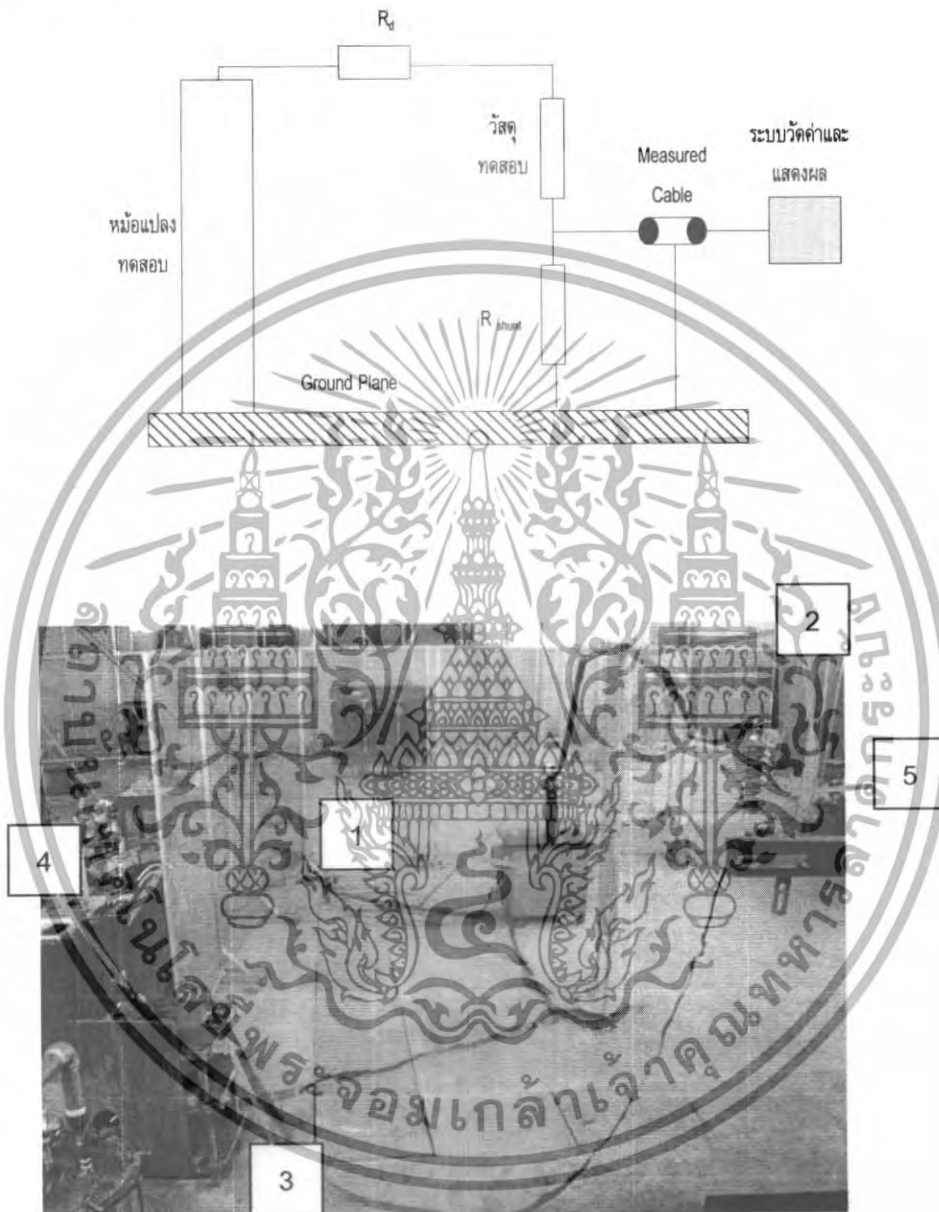
ผลการทดสอบก๊ับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA มีค่าของกระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันปกติที่ 12.7 kV จะมีค่าของกระแสรั่วไหลอยู่ในช่วง 0.17 – 0.22 mA และค่าของกระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันเกินชั่วขณะที่ 17.0 kV จะมีค่าของกระแสรั่วไหลอยู่ในช่วง 0.22 – 0.29 mA

ผลการทดสอบก๊ับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA มีค่าของกระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันปกติที่ 13.8 kV จะมีค่าของกระแสรั่วไหลอยู่ในช่วง 0.27 – 0.28 mA และค่าของกระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันเกินชั่วขณะที่ 19.5 kV จะมีค่าของกระแสรั่วไหลอยู่ในช่วง 0.39 – 0.41 mA

3.1.3 การทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงาน (Reference Voltage)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบแรงดันเริ่มทำงานซึ่งกำหนดมาจากบริษัทผู้ผลิต [8]

1. วงจรการทดสอบ



รูปที่ 3.10 วงจรการทดสอบแรงดันเริ่มทำงาน

- เมื่อ
- 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 5 kVA 230 V / 100 kV 50 Hz
 - 2 คือ ความต้านทานจำกัดกระแส พิกัด 0.49 MΩ
 - 3 คือ ความต้านทานชั๊นท์ พิกัด 29.60 kΩ 30 W
 - 4 คือ โวลต์มิเตอร์
 - 5 คือ กั๊บดักฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขั้นตอนการทดสอบ

- 2.1 ก่อนทำการทดสอบต้องทำความสะอาดผิวของกับดักฟ้าผ่าให้สะอาด เพื่อไม่ให้ความสกปรกทำให้เกิดการรวบไฟตามผิว
- 2.2 บันทึกสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบดังนี้ คำนวณค่าตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ (K_d) และค่าตัวประกอบ แปลงความชื้น (K_h) เพื่อพิจารณาปรับแรงดันทดสอบให้ได้สภาวะมาตรฐาน
- 2.3 ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าตามลักษณะการใช้งานจริง
- 2.4 ป้อนแรงดันให้กับกับดักฟ้าผ่า จนได้ค่ากระแสที่ 1mA แล้วทำการบันทึกค่าของแรงดันเริ่มทำงาน
- 2.5 ทำการแก้ค่าแรงดันให้เป็นระดับแรงดันที่สภาวะมาตรฐาน

3. ผลการทดสอบ

ทำการทดสอบที่ ความดันของอากาศมีค่าเท่ากับ 730 มม.ปรอท อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 24.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 68 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดสอบแรงดันเริ่มทำงานดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบค่าแรงดันเริ่มทำงาน

กับดักฟ้าผ่า	ระดับแรงดันเริ่มทำงาน (kV) ที่ 1 mA
ตัวอย่างที่ 1 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A	21.98
ตัวอย่างที่ 2 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A	22.05
ตัวอย่างที่ 3 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A	22.18
ตัวอย่างที่ 4 พิกัด 24 kV 10 kA บริษัท A	24.94
ตัวอย่างที่ 5 พิกัด 24 kV 10kA บริษัท A	25.02
ตัวอย่างที่ 6 พิกัด 24 kV 10 kA บริษัท A	25.02
ตัวอย่างที่ 7 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B	23.62
ตัวอย่างที่ 8 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B	23.78
ตัวอย่างที่ 9 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B	23.68

4. สรุปผลการทดสอบ

ค่าแรงดันที่ทำการป้อนให้กับตัวกับดักฟ้าผ่าจนได้กระแสรั่วไหลตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดที่ 1 mA จะกำหนดเป็นค่าแรงดันเริ่มทำงาน

จากการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5kA มีค่าแรงดันเริ่มทำงานที่ 1mA อยู่ในช่วง 21.98 – 23.78 kV และกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA มีค่าแรงดันเริ่มทำงานที่ 1mA อยู่ในช่วง 24.94 – 25.02 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

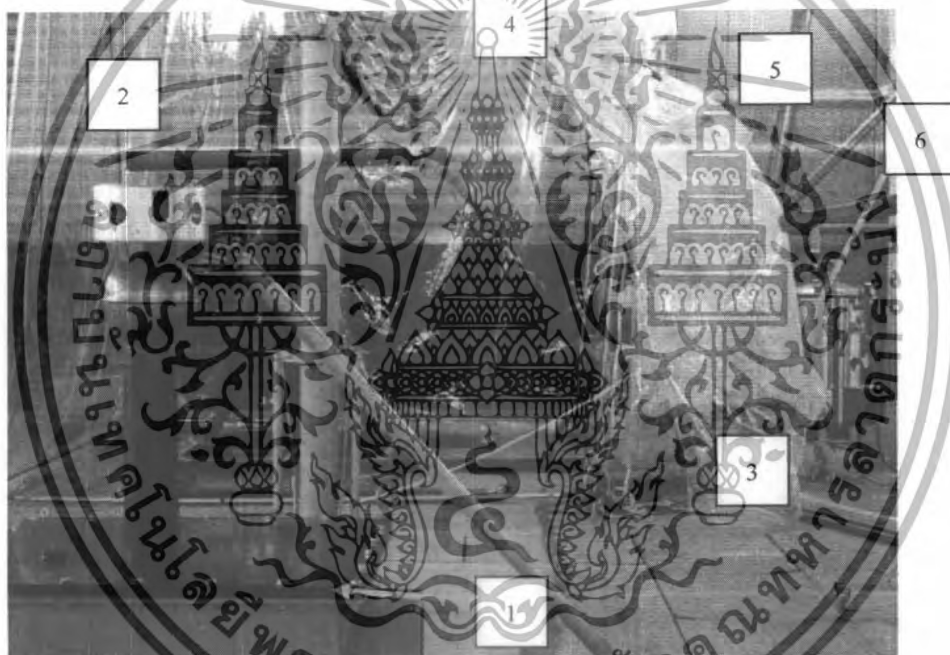
3.1.4 การทดสอบกับดักฟ้าผ่าในสภาวะเปรอะเปื้อน

ทำการทดสอบเพื่อดูการทำงานของกับดีกฟ้าผ่าในสภาวะเปรอะเปื้อนทดสอบภายในกระโจม ซึ่งได้จำลองความเปรอะเปื้อนขึ้นมา 2 ระดับ คือ เปรอะเปื้อนระดับน้อย และ เปรอะเปื้อนระดับสูงมาก ตามมาตรฐาน IEC 507

การจำลองความเปรอะเปื้อนระดับน้อย โดยการใช้ดินเกาลิน 40 กรัม เกลือ 3 กรัม นำมาผสมกับน้ำเปล่า 0.5 ลิตร แล้วนำไปพ่นผิวกับดักฟ้าผ่าให้ทั่วทั้งตัว โดยพ่นเพียงรอบเดียว แล้วอบให้แห้งแล้วนำไปทดสอบ

การจำลองความเปรอะเปื้อนระดับสูงมาก โดยการใช้ดินเกาลิน 40 กรัม เกลือ 60 กรัม นำมาผสมกับน้ำเปล่า 0.5 ลิตร แล้วนำไปพ่นผิวกับดักฟ้าผ่าให้ทั่วทั้งตัว โดยพ่นเพียงรอบเดียว แล้วอบให้แห้งแล้วนำไปทดสอบ

1. วงจรการทดสอบ



รูปที่ 3.11 วงจรการทดสอบกับดักฟ้าผ่าในสภาวะเปรอะเปื้อน

- เมื่อ
- 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 5 kVA 230 V / 100 kV 50 Hz
 - 2 คือ ความต้านทานจำกัดกระแส พิกัด 0.49 $M\Omega$
 - 3 คือ CT
 - 4 คือ กับดีกฟ้าผ่า
 - 5 คือ กระโจมทดสอบ
 - 6 คือ หม้อตัมน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขั้นตอนการทดสอบ

- 2.1 นำกับดักฟ้าผ่าที่ได้ทำการพ่นเสร็จเรียบร้อยแล้ว ติดตั้งในระจอยในลักษณะใช้งาน
- 2.2 บันทึกค่าสภาพแวดล้อมในห้องทดสอบ โดยมีค่าความดันอากาศ อุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์
- 2.3 ป้อนแรงดันให้กับตัวกับดักฟ้าผ่าที่ระดับแรงดันทำงานต่อเนื่อง (U_c) แล้วทำการจ่ายไอเข้าไปในระจอยทิ้งไว้ 10 นาทีแล้วส่งด้วยกล่องโคโรนาดูว่าเกิดโคโรนาหรือไม่ ถ้ายังไม่เกิดโคโรนาก็ทำการจ่ายแรงดันเพิ่มจนเกิดโคโรนา แต่ต้องไม่เกิน 60 KV เพื่อป้องกันหม้อแปลง
- 2.4 บันทึกค่าแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา

3. ผลการทดสอบ

ทำการทดสอบที่ ความดันของอากาศมีค่าเท่ากับ 730 มม.ปรอท อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดสอบแรงดันเริ่มทำงานดังแสดงในตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบการเกิดโคโรนาที่ระดับความเปราะเป็อนน้อย

กับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา	หมายเหตุ
ตัวอย่างที่ 1	27 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง
ตัวอย่างที่ 2	28 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง
ตัวอย่างที่ 3	28 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง

กับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา	หมายเหตุ
ตัวอย่างที่ 4	28 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง
ตัวอย่างที่ 5	28 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง
ตัวอย่างที่ 6	28 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง

หมายเหตุ : โดยที่ ระดับแรงดัน U_c ของกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA คือ 17.1 kV ไม่เกิดโคโรนา
โดยที่ ระดับแรงดัน U_c ของกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA คือ 19.5 kV ไม่เกิดโคโรนา

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการเกิดโคโรนาที่ระดับความเปราะโผลนสูงมาก

กบดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา	หมายเหตุ
ตัวอย่างที่ 1	27 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง
ตัวอย่างที่ 2	26 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง
ตัวอย่างที่ 3	27 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง

กบดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา	หมายเหตุ
ตัวอย่างที่ 4	25 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง
ตัวอย่างที่ 5	25 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง
ตัวอย่างที่ 6	26 kV	เกิดโคโรนาบริเวณเทอร์มินอลทั้งสอง

หมายเหตุ : โดยที่ ระดับแรงดัน U_c ของกบดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA คือ 17.1 kV ไม่เกิดโคโรนา
โดยที่ ระดับแรงดัน U_c ของกบดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 5 kA คือ 19.5 kV ไม่เกิดโคโรนา

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบในระดับความเปราะโผลนทั้งสองระดับ ค่าของแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาจะอยู่ในช่วง 25 – 28 kV ซึ่งในระดับของแรงดันทำงานต่อเนื่องของกบดักฟ้าผ่านั้นไม่เกิดโคโรนา โคโรนาที่เกิดขึ้นจะเกิดที่แรงดันสูงกว่าแรงดันทำงานต่อเนื่อง และเกิดบริเวณเทอร์มินอลของกบดักฟ้าผ่า

ในการทดสอบไม่มีโคโรนาเกิดบริเวณปีกของกบดักฟ้าผ่า แสดงว่าปีกของกบดักฟ้าผ่าออกแบบได้ดียากที่จะเกิดโคโรนาที่บริเวณปีกของกบดักฟ้าผ่า ทำให้กบดักฟ้าผ่าที่นำมาทดสอบผ่านการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบกับดักฟ้าผ่า

4.1 การออกแบบกับดักฟ้าผ่า

ในปัจจุบันกับดักฟ้าผ่าจะประสบปัญหาการเกิดระเบิดของกับดักฟ้าผ่าทั้งแบบมีแก๊สและไม่มีแก๊ส สาเหตุอันเนื่องมาจากมีกระแสสูงไหลภายในตัวของกับดักฟ้าผ่าจึงทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในตัวกับดักฟ้าผ่า แนวทางการแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ ทางโครงการได้ทำการศึกษากับดักฟ้าผ่าที่มีใช้งานในประเทศไทยดังแสดงในรูปที่ 4.1

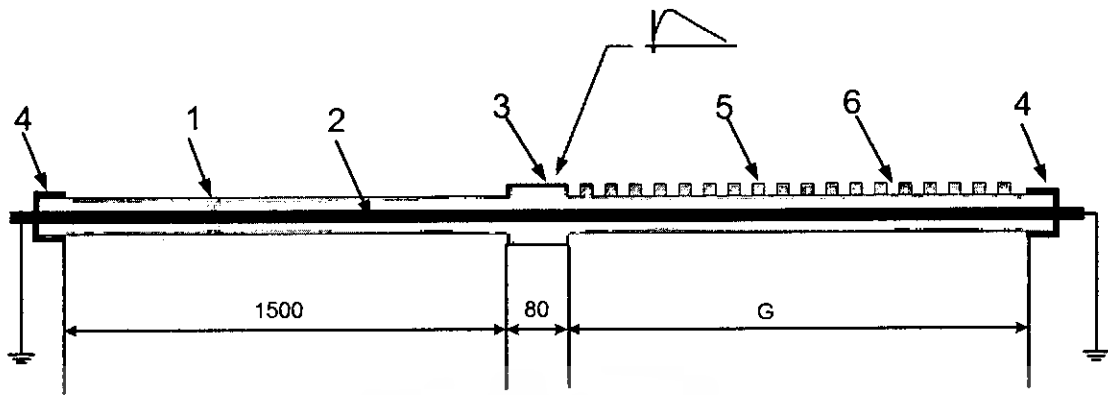


รูปที่ 4.1 กับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในประเทศไทย

4.2 วิธีการออกแบบกับดักฟ้าผ่า [12]

ในการออกแบบจะใช้ cable ยาว 2 ถึง 3 m มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 23 mm. ไขแกนของ cable เป็นอลูมิเนียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.2 mm หุ้มฉนวน 3 ชั้น ประกอบด้วย semiconducting polyethylene , insulating polyethylene , light-resistance polyethylene ส่วนสำคัญใจกลางของ cable หุ้มด้วยท่ออลูมิเนียมเป็น central electrode ปลายของแกนนั้นหุ้มด้วยขั้วอลูมิเนียม central electrode ไว้ใช้ป้อนแรงดันเกินเข้ามา แกนของเคเบิลและขั้วต่อจะลงกราวด์ ความยาว G จะมีค่าระหว่าง 0.4 ถึง 1.5 m. เมื่อป้อนแรงดันเข้าไปจะเกิดดีสชาร์จระหว่าง central electrode และขั้วทางด้านขวามือจะดีสชาร์จผ่านระหว่างอิเล็กโทรดตัวแรกและต่อไปยังตัวอื่น ๆ ลงกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบต่างๆของกับดักฟ้าผ่า

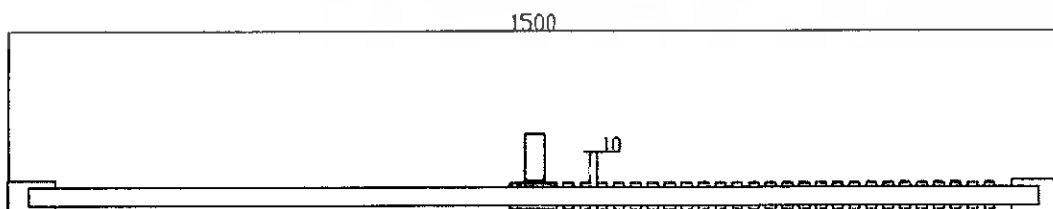
- | | |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1. cable | 4. terminals |
| 2. aluminum core | 5. intermediate electrode |
| 3. central electrode (tube) | 6. discharge channel |

รูปที่ 4.2 เป็นภาพของกับดักฟ้าผ่าชนิด Long Flashover Arrester (LFA) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. ทำเป็นรูปร่าง MES ยึดแหวนเกรียวให้แน่นโดยใช้ M3 screws และ nuts หรือ rivets. แหวนที่นำมายึดให้แน่นนั้นใช้ steel brass และ copper. ระยะห่างของ spark gaps 2 มม. จำนวนของ electrode จาก 100-500 ตัวแล้วถือเป็นรูป

4.3 การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ในการออกแบบ

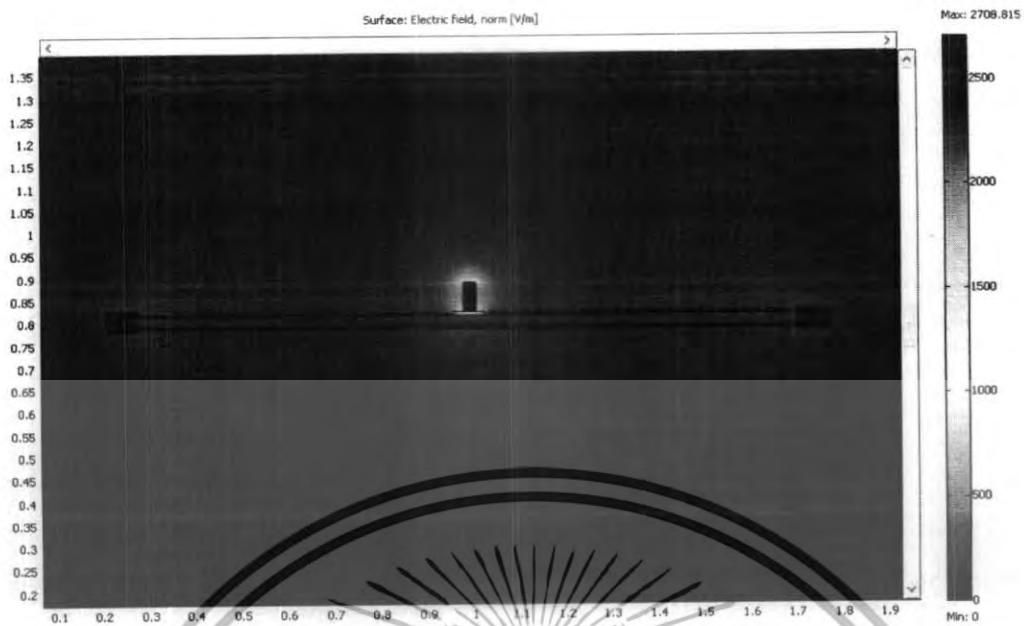
ในการออกแบบโดยการกำหนดความยาวของตัว LFA ต้องมีค่าที่มากกว่าระยะของอาร์คซึ่งดีสแดนซ์ของลูกถ้วยในโครงการจะกำหนดความยาวของ LFA ที่ 1500 ม.ม. และระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดเริ่มที่ 10 ม.ม. LFA จะต้องใช้ติดตั้งในระบบแรงดันกระแสสลับ ผู้ออกแบบจึงได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายแรงดันและสนามไฟฟ้า เมื่อ LFA ติดตั้งใช้งานในสภาพปกติ จึงทำการจำลองแรงดัน 100 V ที่แท่งโลหะส่วนยึดกับสายส่ง จากการออกแบบจะได้ผลดังนี้

1. แบบที่ 1 มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากับ 10 ม.ม.



รูปที่ 4.3 ขนาดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

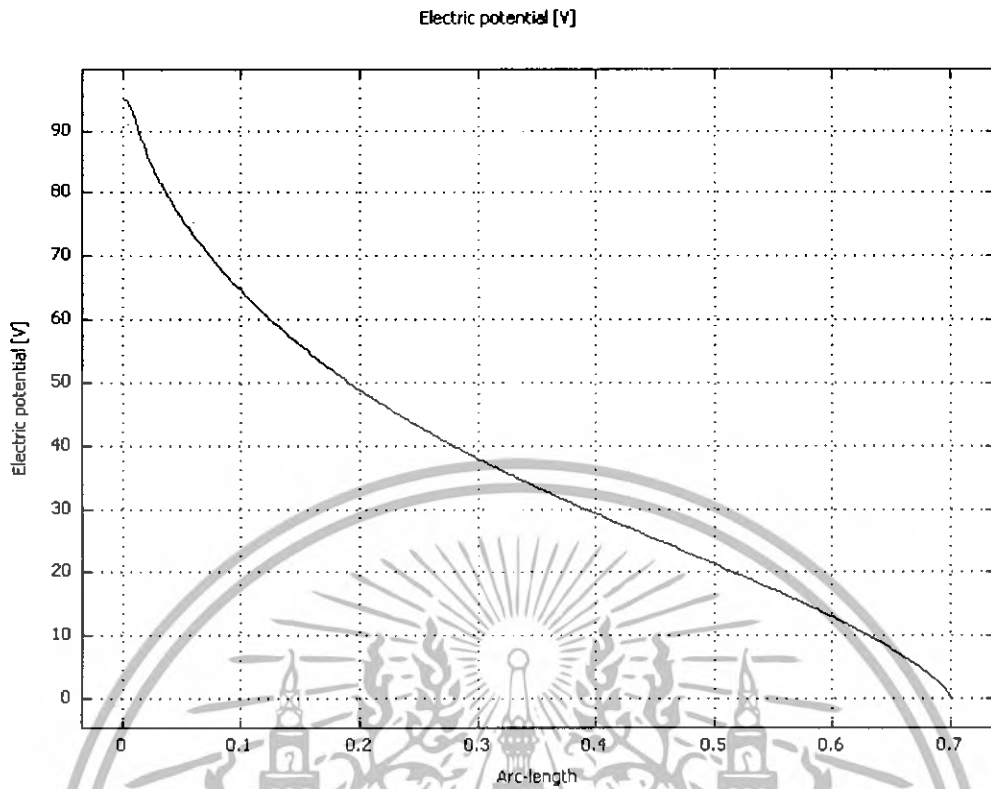


รูปที่ 4.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าของกัณฑ์ฟ้าผ่าแบบที่ 1

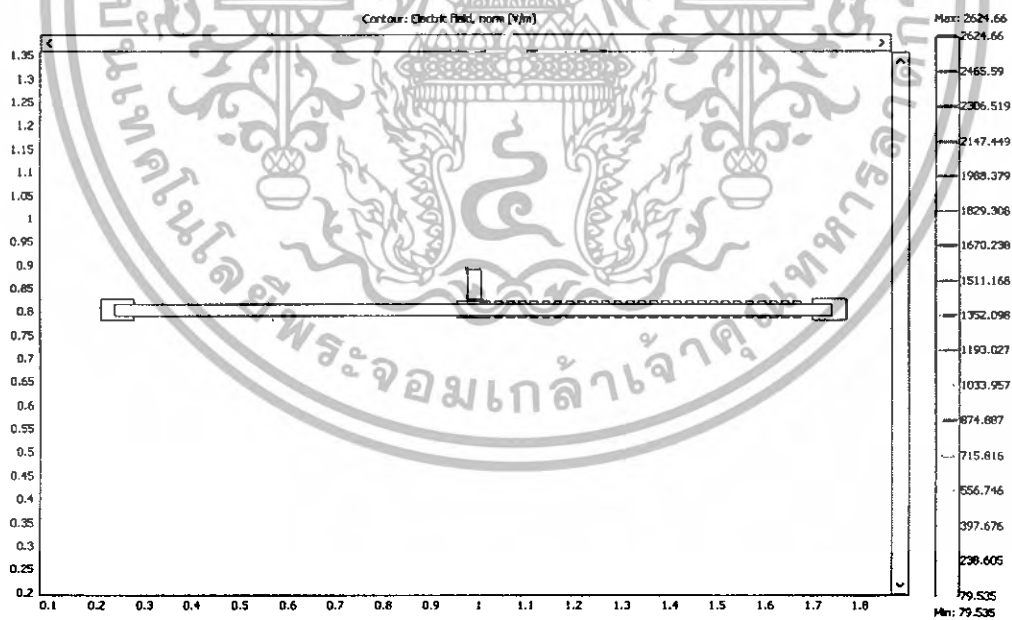


รูปที่ 4.5 การกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกัณฑ์ฟ้าผ่าแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

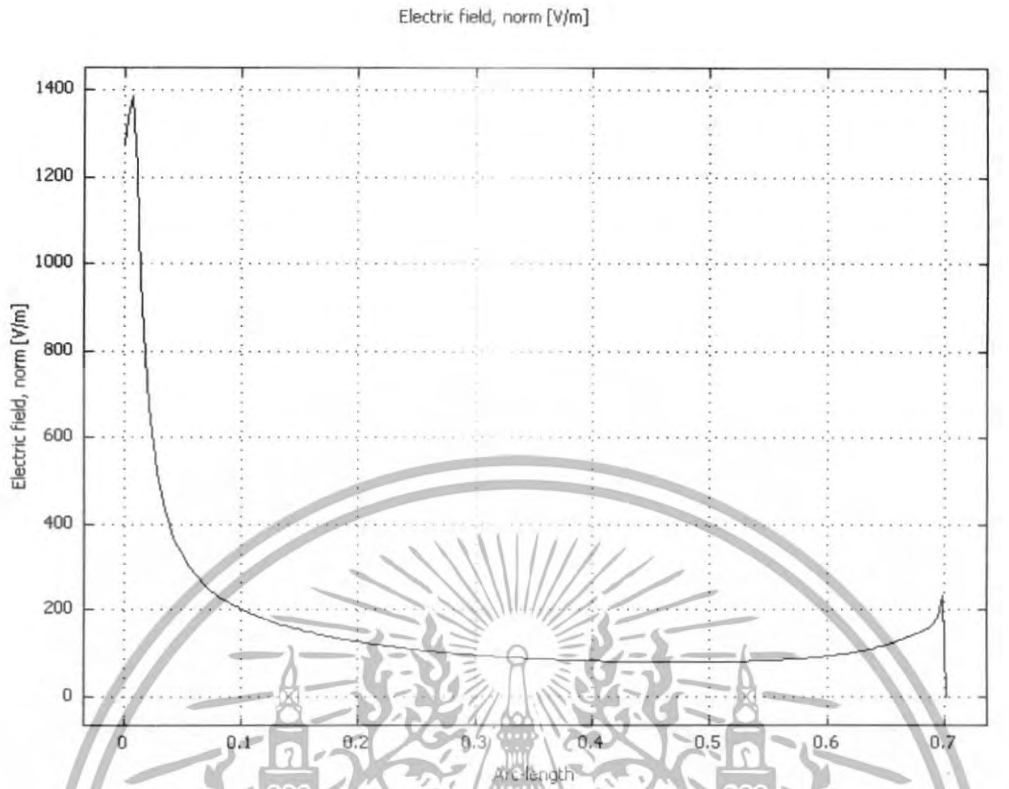


รูปที่ 4.6 กราฟการกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1

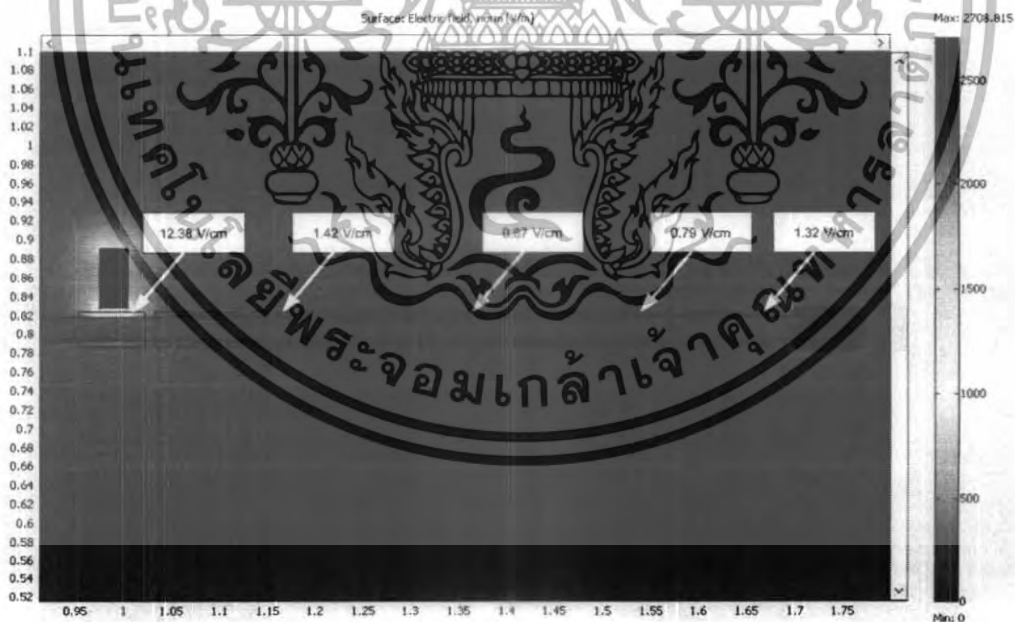


รูปที่ 4.7 การกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



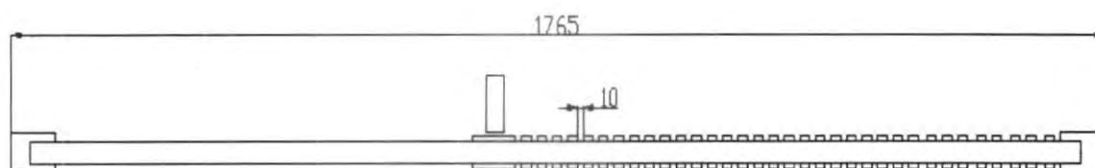
รูปที่ 4.8 กราฟการกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1



รูปที่ 4.9 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบที่ 2 มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 10 มม. และเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดให้มากขึ้น

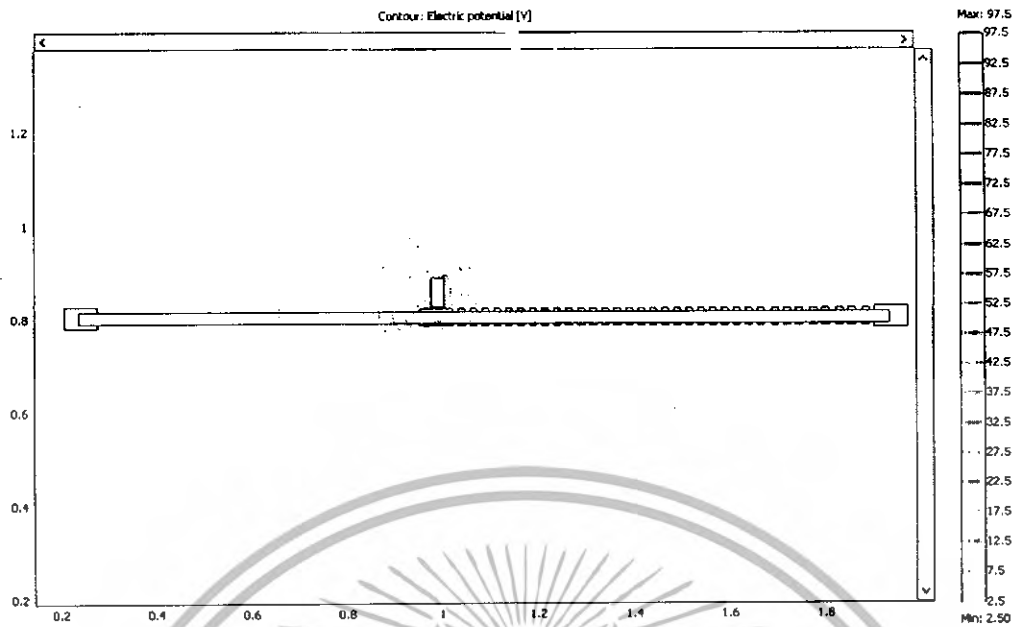


รูปที่ 4.10 ขนาดของกัมดักฟ้าผ่าแบบที่ 2

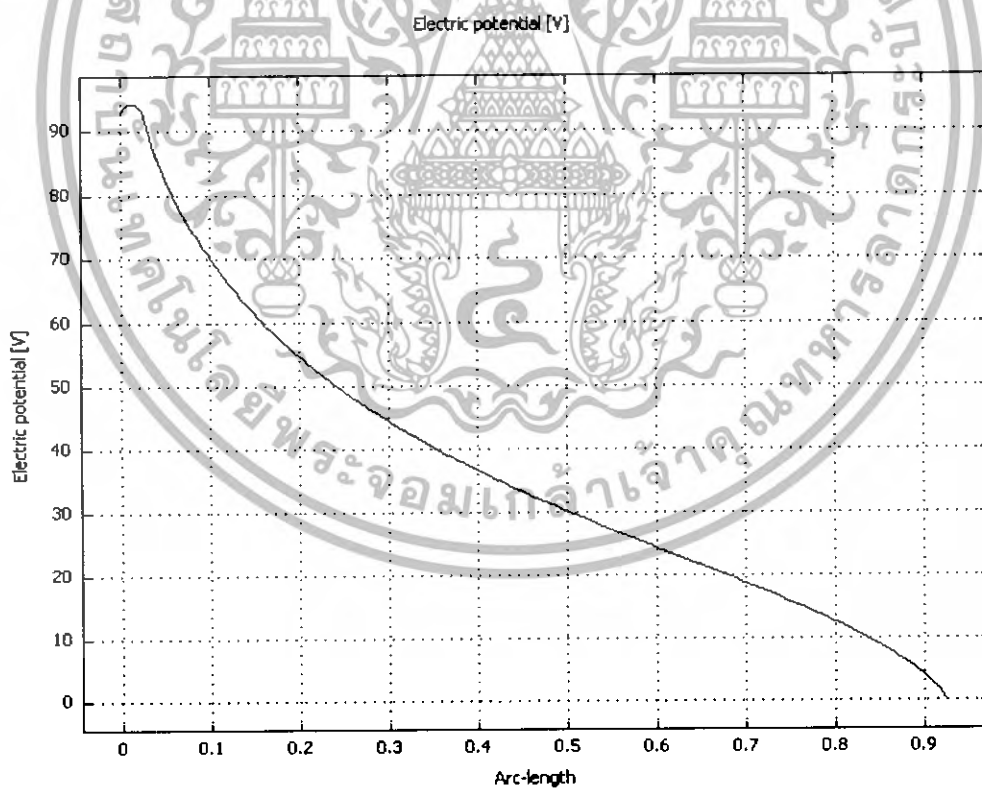


รูปที่ 4.11 ความเครียดสนามไฟฟ้าของกัมดักฟ้าผ่าแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

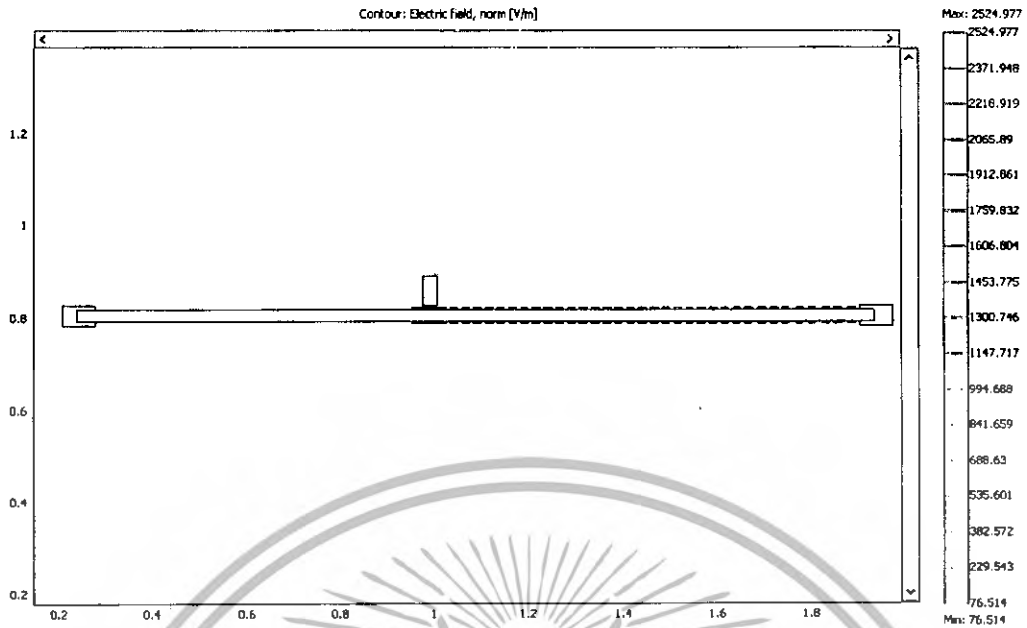


รูปที่ 4.12 การกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2

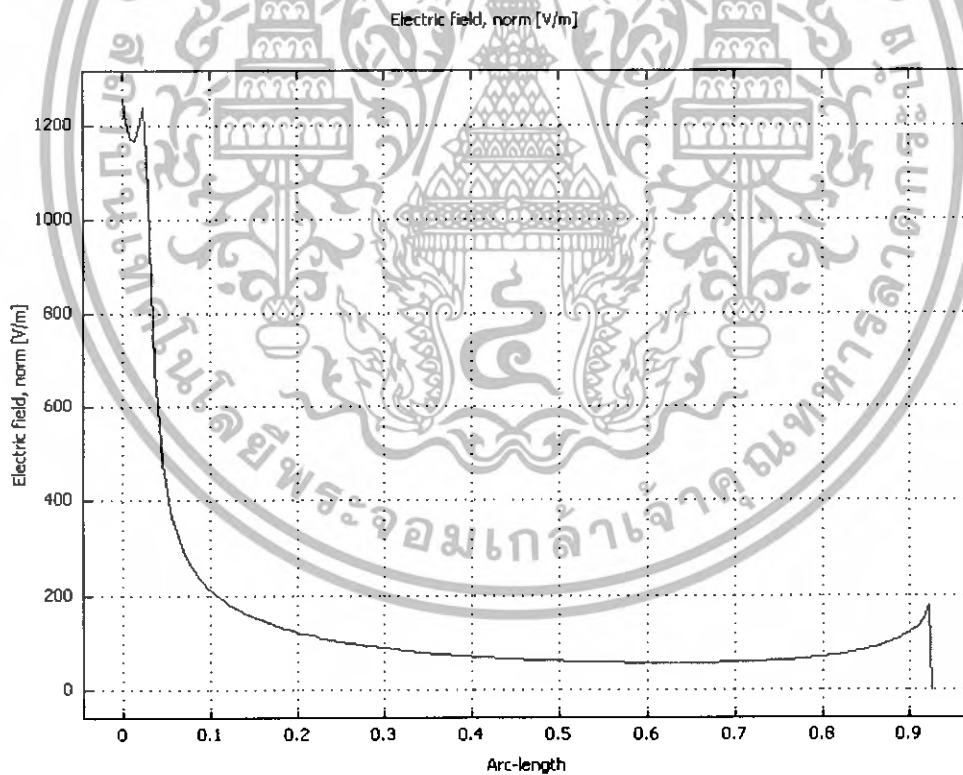


รูปที่ 4.13 กราฟการกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

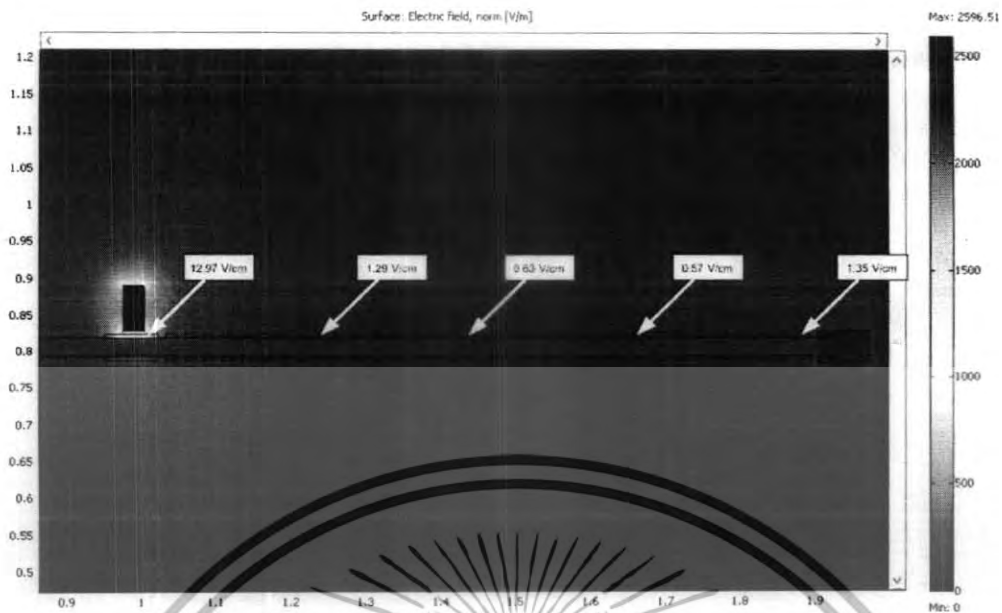


รูปที่ 4.14 การกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2



รูปที่ 4.15 กราฟการกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



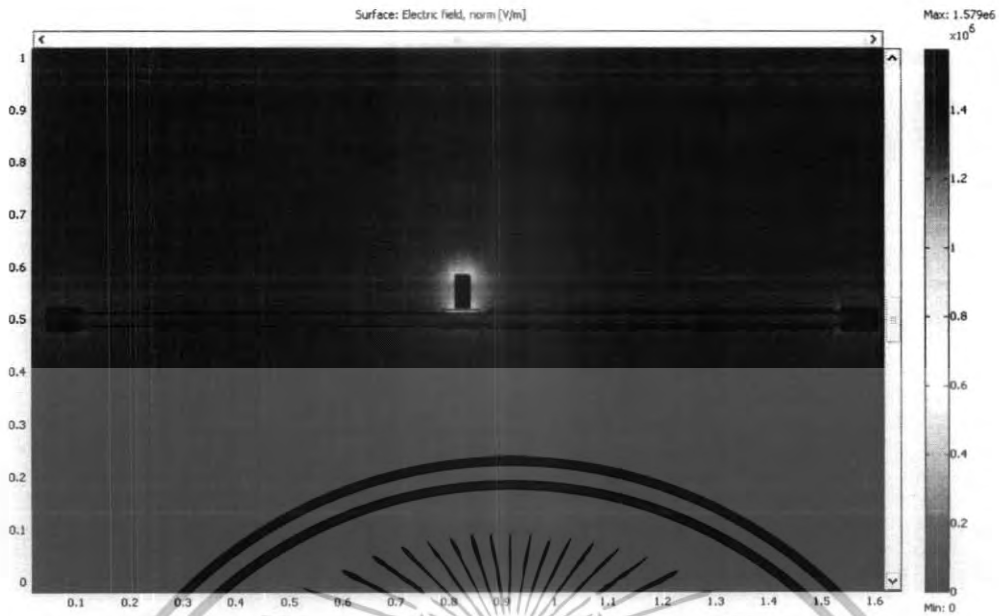
รูปที่ 4.16 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2

3. แบบที่ 3 ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.17 ขนาดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

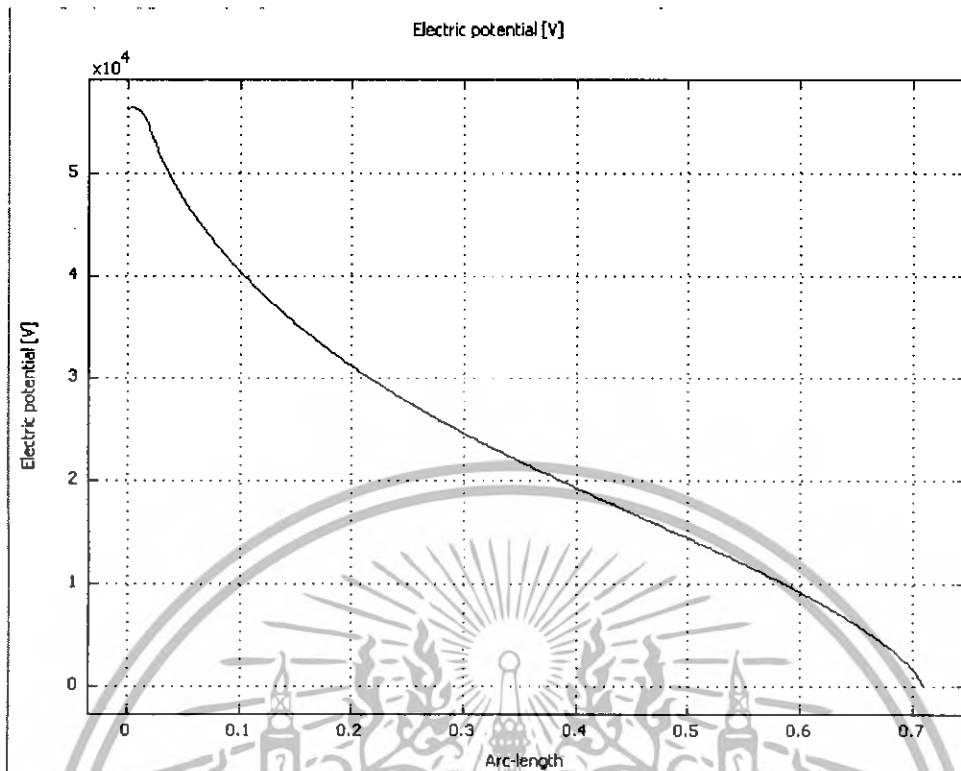


รูปที่ 4.18 ความเครียดสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3

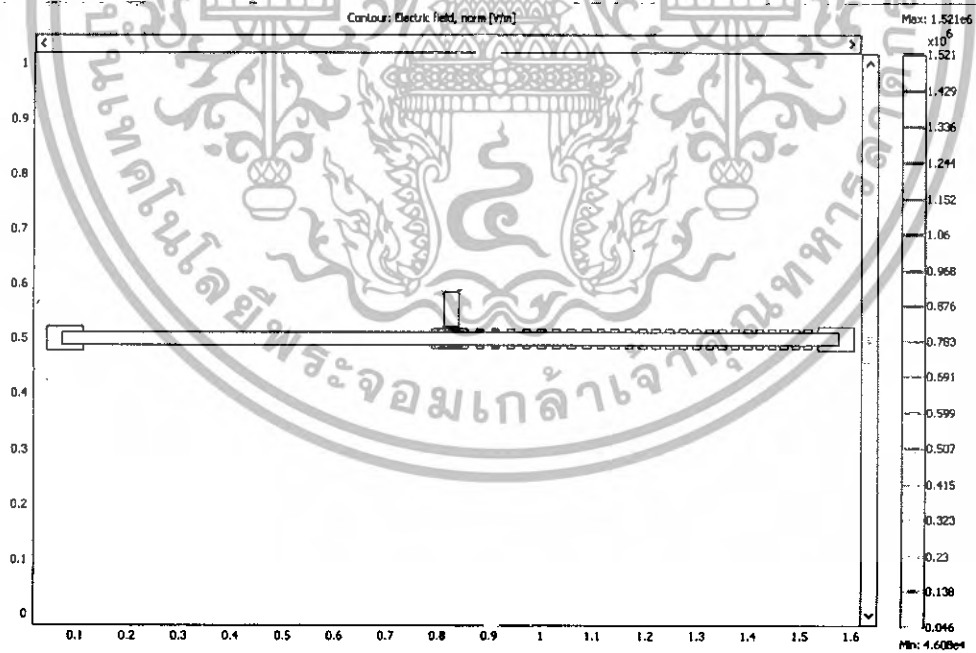


รูปที่ 4.19 การกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

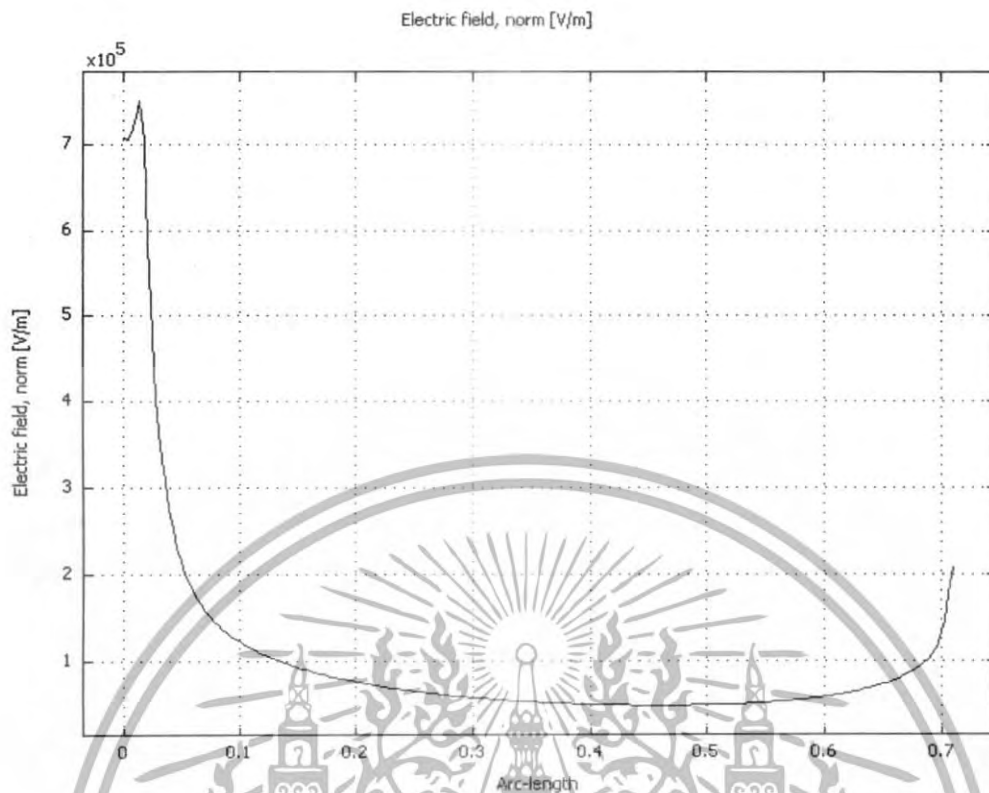


รูปที่ 4.20 กราฟการกระจายของแรงดันไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3

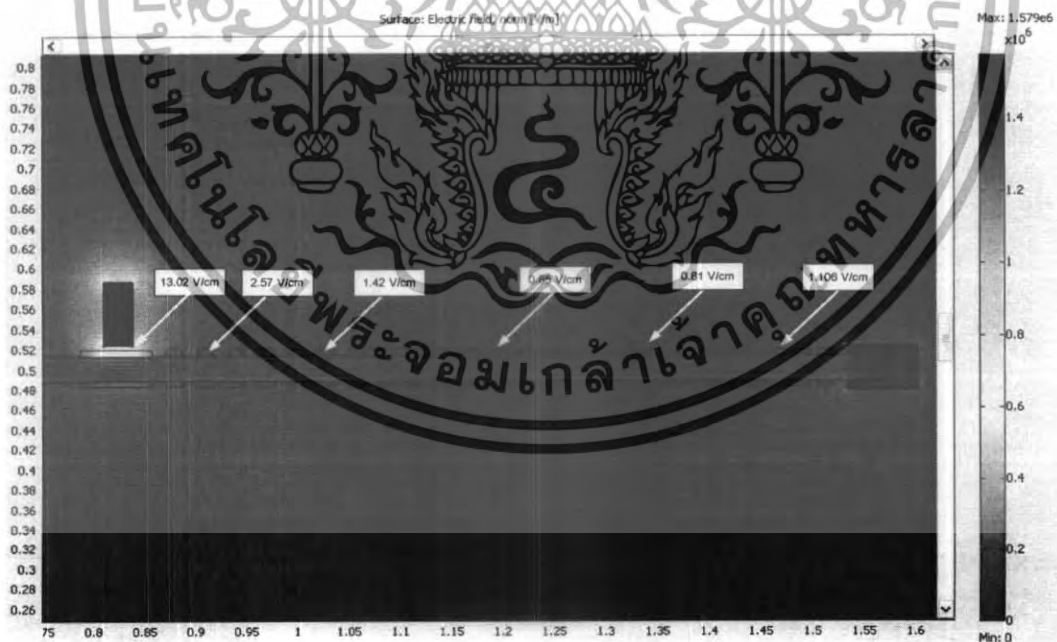


รูปที่ 4.21 การกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟการกระจายของสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3



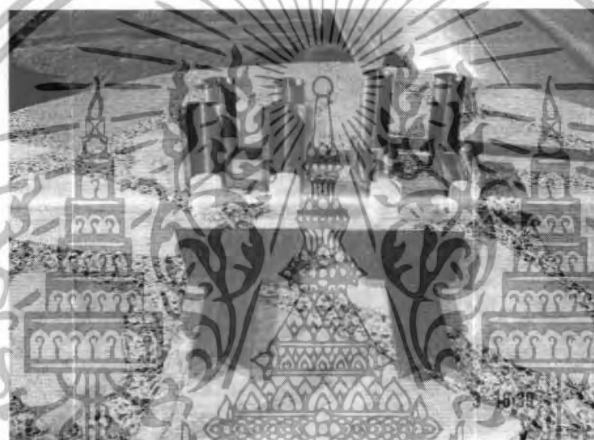
รูปที่ 4.23 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการออกแบบและทำการจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะเห็นได้ว่าการกระจายของสนามไฟฟ้าของแบบที่ 1 และ 2 มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดที่เท่าๆกันนั้นมีการกระจายที่ดีกว่าแบบที่ 3 ซึ่งในแบบที่ 3 นั้นในช่วงของปลายสายจะมีการเพิ่มของสนามไฟฟ้าขึ้นมา จึงได้ทำการสร้างแบบทั้ง 3 แบบขึ้นมาแล้วทำการทดสอบเปรียบเทียบกันว่าผลที่ได้จะเป็นไปตามที่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองขึ้นมาหรือไม่

4.4 ขั้นตอนการสร้างกับดักฟ้าผ่า (LFAs)

1. ทำการจัดซื้อวัสดุในการทำโครงงานกับดักฟ้าผ่า เช่น ทองแดง ทองเหลือง สายเคเบิล
2. นำวัสดุที่ได้จัดหามาไปทำการผลิตชิ้นงานต่างๆออกมาได้ดังนี้

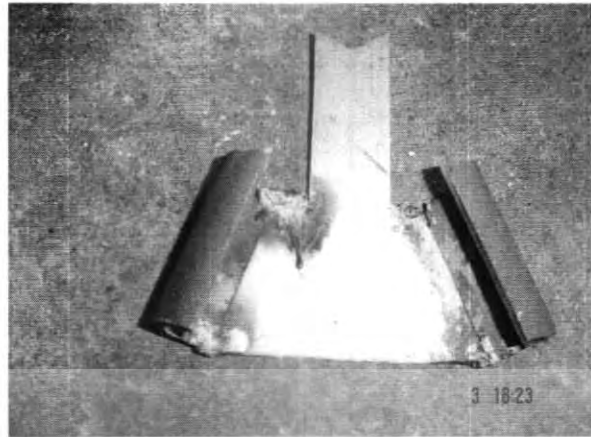


รูปที่ 4.24 ชิ้นส่วนต่างๆที่ทำขึ้นมาเพื่อรอทำการประกอบ



รูปที่ 4.25 ทำการเชื่อมต่อทองเหลืองเพื่อทำฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



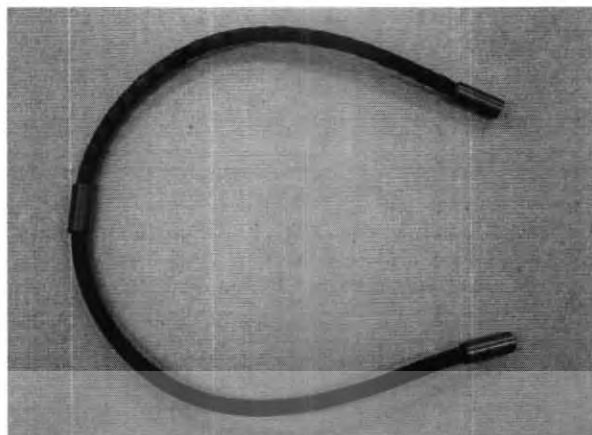
รูปที่ 4.26 ฐานรองรับเมื่อทำการเชื่อมต่อเสร็จ



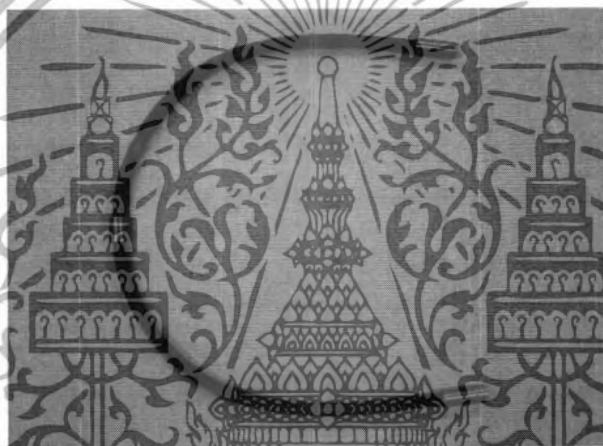
รูปที่ 4.27 ประกอบฐานรองรับ

รูปที่ 4.28 สายตัวนำอิเล็กทรอนิกส์แบบที่ 1 (อิเล็กทรอนิกส์แบบเม็ด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 สายตัวนำอิเล็กทรอนิกส์แบบที่ 2 (อิเล็กทรอนิกส์มีระยะเท่ากัน)

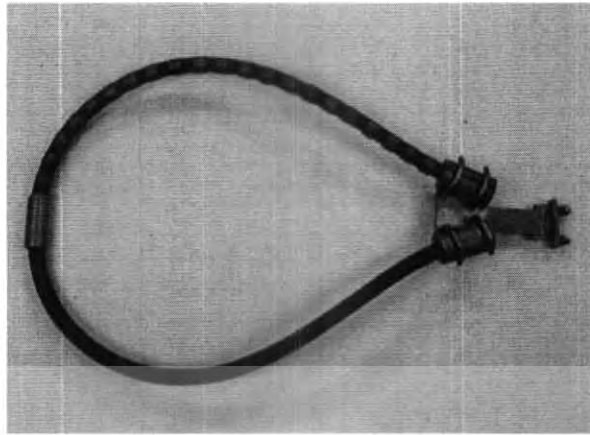


รูปที่ 4.30 สายตัวนำอิเล็กทรอนิกส์แบบที่ 3 (อิเล็กทรอนิกส์มีระยะไม่เท่ากัน)

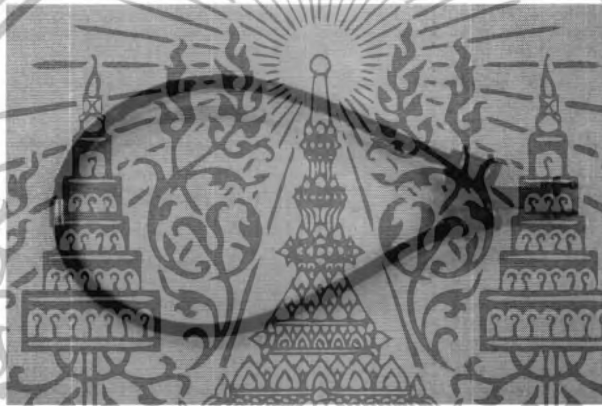


รูปที่ 4.31 กั๊บดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 (อิเล็กทรอนิกส์แบบเม็ด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 กั๊บดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 (อิเล็กทรอนิกส์มีระยะเท่ากัน)

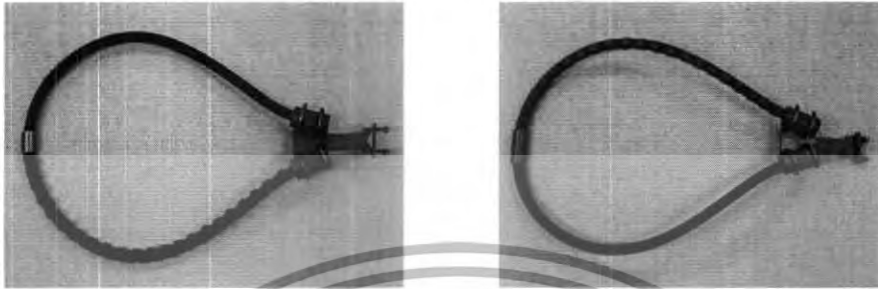


รูปที่ 4.33 กั๊บดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 (อิเล็กทรอนิกส์มีระยะไม่เท่ากัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบกับดักฟ้าผ่า LFA

เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการทำงานของกัبدักฟ้าผ่า และลักษณะข้อบกพร่องของกัبدักฟ้าผ่า LFA ที่แรงดัน 22 kV และ 33 kV



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.34 กัبدักฟ้าผ่าที่ใช้ในการศึกษา

- (ก) กัبدักฟ้าผ่าแบบที่ 1 (อิเล็กทรอนิกส์แบบเม็ด)
- (ข) กัبدักฟ้าผ่าแบบที่ 2 (อิเล็กทรอนิกส์มีระยะเท่ากัน)
- (ค) กัبدักฟ้าผ่าแบบที่ 3 (อิเล็กทรอนิกส์มีระยะไม่เท่ากัน)

4.5.1 การทดสอบหาโคโรนาเริ่มเกิดของกัبدักฟ้าผ่า LFA

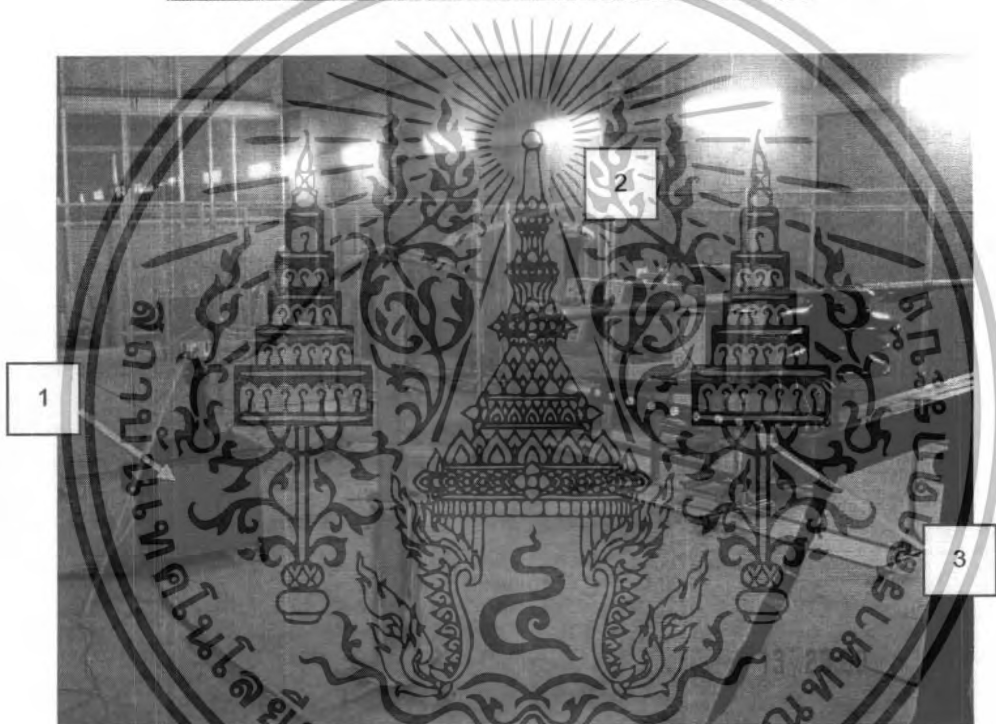
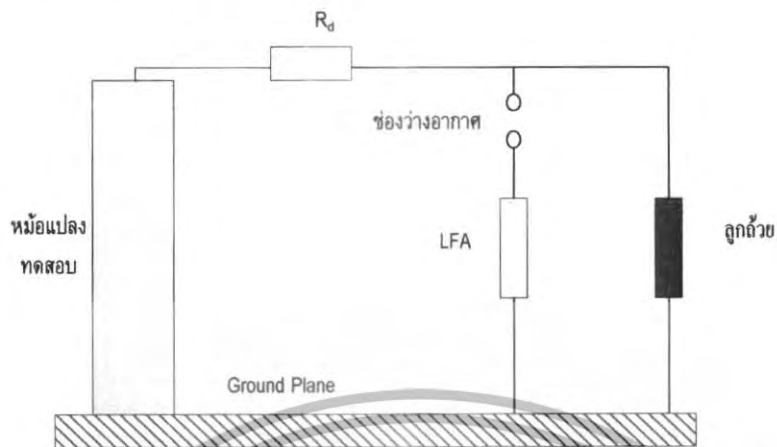
การทดสอบหาโคโรนาเริ่มเกิดของกัبدักฟ้าผ่า LFA เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการเกิดโคโรนาบนตัวกัبدักฟ้าผ่า

1. อุปกรณ์การทดสอบ

- 1) หม้อแปลงทดสอบ 235 V / 100 kV ; 5 kVA
- 2) ความต้านทานจำกัดกระแส
- 3) กัبدักฟ้าผ่า
- 4) กล้องโคโรนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วงจรการทดสอบ



รูปที่ 4.35 วงจรการทดสอบหาโคโรนาเริ่มเกิดของกัับดักฟ้าผ่า

- เมื่อ
- 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 5 kVA 230 V / 100 kV 50 Hz
 - 2 คือ ความต้านทานจำกัดกระแส พิกัด $0.49 \text{ M}\Omega$
 - 3 คือ กัับดักฟ้าผ่าติดตั้งอยู่กับลูกถ้วยพิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ขั้นตอนการทดสอบ

3.1 ก่อนทำการทดสอบต้องทำความสะอาดกับดักฟ้าผ่าให้สะอาด เพื่อไม่ให้มีความสกปรกตามผิว

3.2 บันทึกค่า ความดันบรรยากาศ 742 mmHg
อุณหภูมิแวดล้อม 24 °C
ความชื้นสัมพัทธ์ 70 %
ความชื้นสัมบูรณ์ 27.5 g / m² (เทียบจากภาคผนวก ก.)

3.3 จำนวนระยะห่างของแก๊ประหว่างตัวล่อกับตัวกับดักฟ้าผ่า ดังภาคผนวก ข. ซึ่งกับดักฟ้าผ่าจะต้องไม่ทำงานที่แรงดัน TOV ซึ่งในระบบ 22 kV จะมีค่าแรงดัน TOV ที่ระดับแรงดัน 23 kV_{peak} และในระบบ 33 kV จะมีค่าแรงดัน TOV ที่ระดับแรงดัน 34 kV_{peak}

3.4 ป้อนแรงดันทดสอบที่ 23 kV_{peak} ในระบบ 22 kV ที่ระยะแก๊ประหว่างตัวล่อกับตัวกับดักฟ้าผ่า 1.5 c.m. และ ป้อนแรงดันทดสอบที่ 34 kV_{peak} ในระบบ 33 kV ที่ระยะแก๊ประหว่างตัวล่อกับตัวกับดักฟ้าผ่า 2.27 c.m. และทำการตรวจสอบโคโรนาด้วยกล้องโคโรนา

4. ผลการทดสอบ

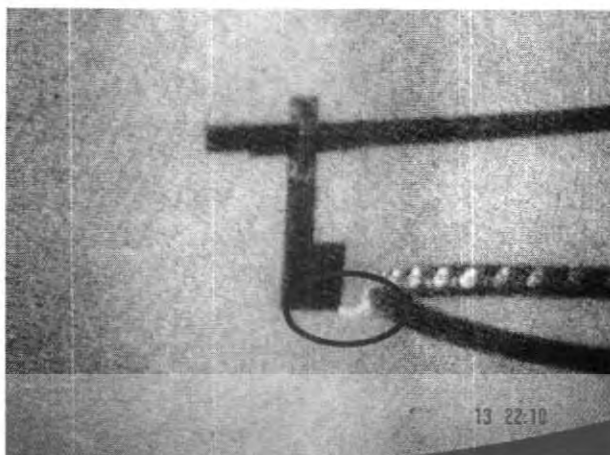
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาโคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าที่ระบบ 22 kV

จำนวนครั้ง	แรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา (kV _{peak})		
	กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1	กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2	กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3
1	16.62	23.44	16.57
2	16.91	23.54	16.75
3	16.42	23.49	16.43
4	16.88	23.67	16.50
5	17.09	23.37	16.19

ตารางที่ 4.2 แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดเฉลี่ยของกับดักฟ้าผ่าที่ระบบ 22 kV

กับดักฟ้าผ่า	เฉลี่ยแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา	
	kV _{peak}	ความเครียดสนามไฟฟ้า kV _{peak} / cm
แบบที่ 1	16.78	11.19
แบบที่ 2	23.51	13.83
แบบที่ 3	16.49	10.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 โครนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ที่ระบบ 22 kV



รูปที่ 4.37 โครนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ที่ระบบ 22 kV



รูปที่ 4.38 โครนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ที่ระบบ 22 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาโคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าที่ระบบ 33 kV

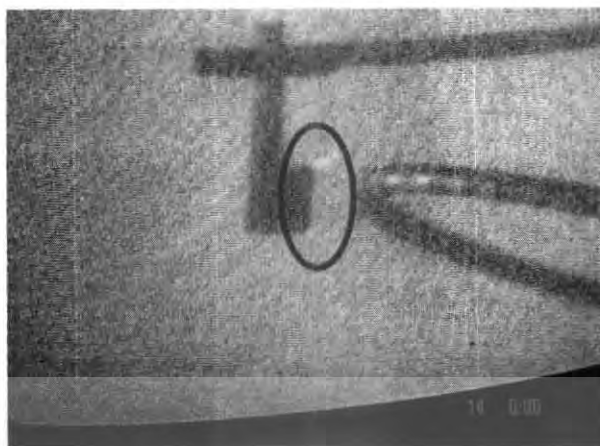
จำนวนครั้ง	แรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา (kV _{peak})		
	กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1	กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2	กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3
1	18.93	24.16	19.34
2	20.19	23.95	19.46
3	19.57	24.04	19.30
4	19.63	24.11	19.06
5	19.44	23.68	19.40

ตารางที่ 4.4 แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดเฉลี่ยของกับดักฟ้าผ่าที่ระบบ 33 kV

กับดักฟ้าผ่า	เฉลี่ยแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา	
	kV _{peak}	ความเครียดสนามไฟฟ้า kV _{peak} / cm
แบบที่ 1	19.71	8.56
แบบที่ 2	24	10.43
แบบที่ 3	19.32	8.4

รูปที่ 4.39 โคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ที่ระบบ 33 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 โครนาเริ่มเกิดของกัับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ที่ระบบ 33 kV



รูปที่ 4.41 โครนาเริ่มเกิดของกัับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ที่ระบบ 33 kV

5. สรุปผลการทดสอบ

แรงดันที่เริ่มเกิดโครนานั้นจะต้องทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในสภาวะบรรยากาศคือ $15 \text{ kV}_{\text{peak}}/\text{cm}$ ถ้าแรงดันที่เริ่มเกิดโครนาทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเกิน $15 \text{ kV}_{\text{peak}}/\text{cm}$ จะต้องทำการปรับปรุงระยะห่างระหว่างตัวล่อกับตัวกับดักฟ้าผ่าใหม่ เพื่อหาแรงดันที่เริ่มเกิดโครนาใหม่ และทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าไม่เกิน $15 \text{ kV}_{\text{peak}}/\text{cm}$

จากผลการทดสอบทั้งในระบบ 22 kV และ 33 kV เห็นได้ชัดเจนว่ากัับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ซึ่งเป็นแบบที่มีอิเล็กโตรดระยะห่างเท่าๆกัน จะมีค่าแรงดันเริ่มเกิดโครนาที่สูงกว่ากัับดักฟ้าผ่าทั้ง 3 แบบ ในขณะที่กัับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ซึ่งมีอิเล็กโตรดแบบเม็ด และแบบที่ 2 ซึ่งมีอิเล็กโตรดที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดที่ไม่เท่ากัน จะมีค่าแรงดันที่เริ่มเกิดโครนาที่ค่าใกล้เคียงกันมาก เกือบจะเป็นค่าเดียวกัน และค่าน้อยกว่ากัับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 แสดงให้เห็นถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์มีผลต่อการเกิดโคโรนา ยิ่งระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ไม่เท่ากันเท่าไร โครนาก็จะยิ่งเกิดง่ายขึ้น และอาจจะทำให้กับดักฟ้าผ่าทำงานที่แรงดัน TOV ได้ ดังนั้นในการออกแบบกับดักฟ้าผ่า LFA นั้นจะต้องทำการออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ให้มีระยะที่เท่ากันให้มากที่สุด และไม่ทำงานที่แรงดัน TOV

4.5.2 การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ของกับดักฟ้าผ่า LFA

การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ เป็นการทดสอบตรวจสอบความสามารถในการดีสชาร์จกระแสของกับดักฟ้าผ่าที่เกิดการดีสชาร์จไปตามผิวของกับดักฟ้าผ่า

1. อุปกรณ์การทดสอบ

1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

- พิกัด 200 kV / 2 stage, 5kJ
- แรงดันที่ใช้ในการชาร์จ 200 kV (100 kV / stage)
- พิกัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสูงสุด 180 kV
- พิกัดแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง 155 kV
- พลังงานจ่ายสูงสุด 5 kJ

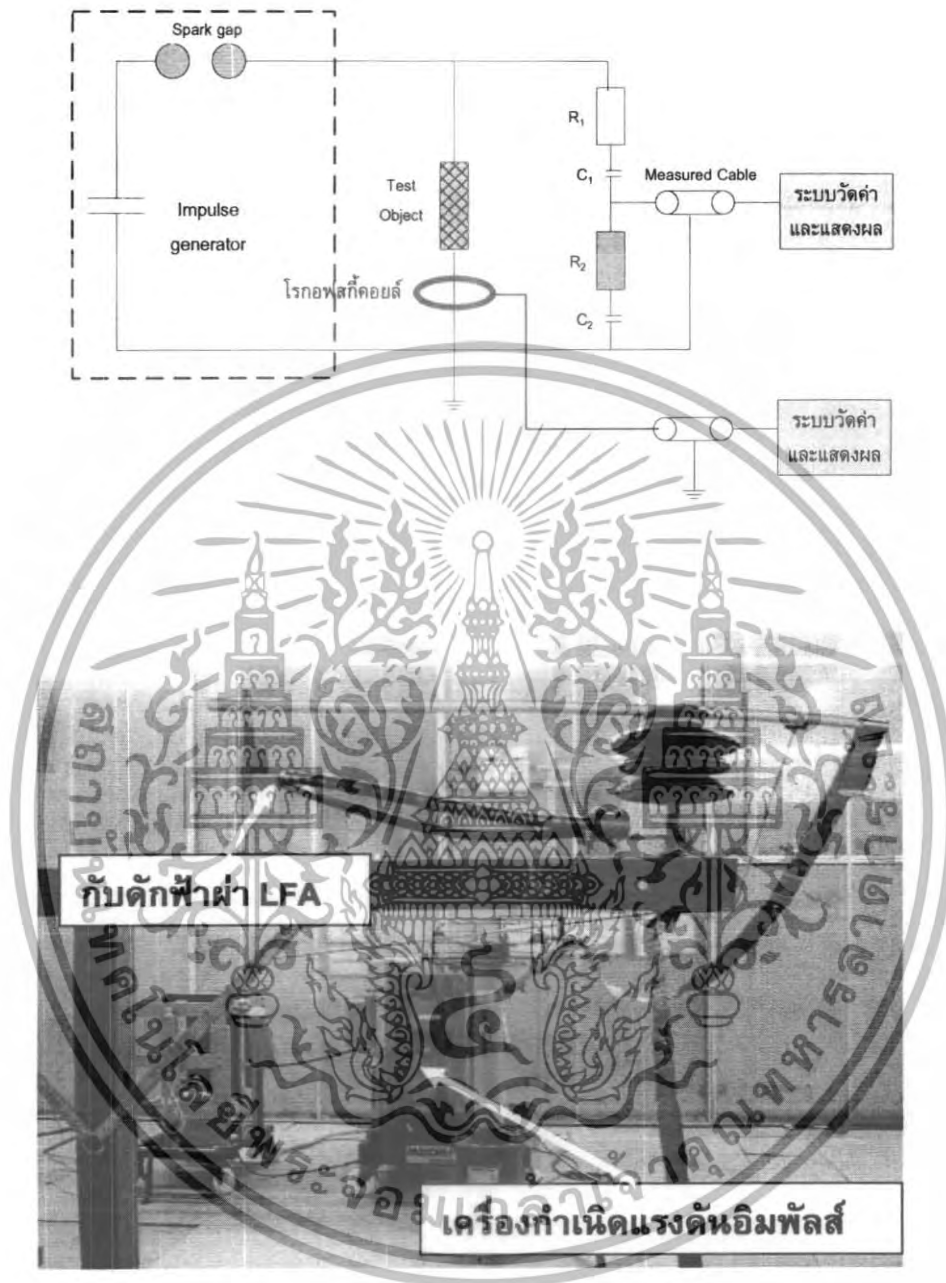
2) คาปาซิเตอร์โวลต์เดจดีไวเดอร์

- คาปาซิแตนซ์ 4200 pF
- พิกัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 200 kV
- พิกัดแรงดันที่ความถี่ 50 kV
- อัตราส่วน (ratio) 230.5 : 1

3) กับดักฟ้าผ่า LFA

4) โวลท์มิเตอร์ , สายโคแอกเชียล 75 Ω

2. วงจรการทดสอบ



รูปที่ 4.42 วงจรทดสอบการทำงานภายใต้แรงดันฟ้าผ่า

- เมื่อ
- 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 - 2 คือ โวลเตจดีไวเดอร์
 - 3 คือ ชุดเครื่องอัดประจุ
 - 4 คือ กัมดักฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วิธีการทดสอบ

3.1 ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า โดยใช้กับดักฟ้าผ่าที่ผ่านการทำความสะอาด

3.2 บันทึกสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบดังนี้

ความดันบรรยากาศ =.....มม.ปรอท

อุณหภูมิแวดล้อม =..... องศาเซลเซียส

ความชื้นสัมพัทธ์ =.....%

ความชื้นสัมบูรณ์ =.....กรัม/ลูกบาศก์เมตร

คำนวณค่าตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ (K_d) และค่าตัวประกอบแปลงความชื้น (K_h) เพื่อพิจารณาปรับแรงดันอิมพัลส์ทดสอบให้ได้สภาวะมาตรฐาน

3.3 ก่อนที่จะป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้กับดักฟ้าผ่าเพื่อทดสอบ จะต้องมีการปรับรูปคลื่นของอิมพัลส์ให้ได้ตามมาตรฐาน IEC 60-1 คือ รูปคลื่นของแรงดันทดสอบอิมพัลส์ช่วงเวลานำคลื่นต่อช่วงเวลาหลังคลื่นจะต้องเป็น 1.2/50 μ s (เต็มลูกคลื่น) ขนาด 125 kV (ที่สภาวะมาตรฐาน) และทำการแก้ค่าเนื่องจาก อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศและความชื้นตามสมการในภาคผนวก ก หากค่าความชื้นสัมบูรณ์จากรูปที่ ก.1 เท่ากับ 27 กรัม / ลูกบาศก์เมตร

3.4 ป้อนแรงดันอิมพัลส์

3.5 บันทึกผลการทดสอบ

4. ผลการทดสอบ

จากการทดสอบได้ทำการทดสอบที่ความดันบรรยากาศ 748 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส

● เกิดการ Flash
 ✕ ไม่เกิดการ Flash

ระดับแรงดัน (kv)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	ครั้งที่ 11	ครั้งที่ 12	ครั้งที่ 13	ครั้งที่ 14	ครั้งที่ 15	ครั้งที่ 16	ครั้งที่ 17	ครั้งที่ 18	ครั้งที่ 19	ครั้งที่ 20
54.5																				
53	●																●			
51.5		●				●										✕		●		
50			●		✕		○						●		✕					●
48.5				✕				○		●		✕		✕						●
47									✕		✕									

รูปที่ 4.43 การวัดค่าแรงดัน $U_{b50\%}$ โดยวิธีการปรับขึ้นลง (up and down method) ที่แรงดันอิมพัลส์ซ้ำลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{b50\%} = 99.7 \text{ kV}$$

$$U_{b90\%} = 99.7 + 1.28 (2.991) = 103.53 \text{ kV}$$

$$\text{ทำการปรับแก้เพื่อให้ได้ค่าแรงดันตามสภาวะมาตรฐาน} = \frac{103.53}{0.965} \text{ kV} = 107.3 \text{ kV}$$

ระดับแรงดัน (kV)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	ครั้งที่ 11	ครั้งที่ 12	ครั้งที่ 13	ครั้งที่ 14	ครั้งที่ 15	ครั้งที่ 16	ครั้งที่ 17	ครั้งที่ 18	ครั้งที่ 19	ครั้งที่ 20
57.5							○													
56			●		×		○													
54.5	●		×		×				○						●					
53		×							●		●		×		●					
51.5									×		×					●		●		●
50																		×		●

● เกิดการ Flash

× ไม่เกิดการ Flash

รูปที่ 4.44 การวัดค่าแรงดัน $U_{b50\%}$ โดยวิธีการปรับขึ้นลง (up and down method) ที่แรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว

$$U_{b50\%} = 107 \text{ kV}$$

$$U_{b90\%} = 107 + 1.28 (3.21) = 111.1 \text{ kV}$$

$$\text{ทำการปรับแก้เพื่อให้ได้ค่าแรงดันตามสภาวะมาตรฐาน} = \frac{111.1}{0.965} \text{ kV} = 115.14 \text{ kV}$$

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LFA เพื่อทำการหาค่า $U_{b90\%}$ หรือ BIL90% ซึ่งต้องทำการหาค่า $U_{b50\%}$ โดยใช้วิธีการปรับขึ้นลง ซึ่งในการทดสอบจะทำการป้อนแรงดันค่าหนึ่งทีละค่าว่าเป็นแรงดันเบรกดาวนที่ 50% หรือ U_k ถ้าไม่เกิดการเบรกดาวนให้เพิ่มแรงดันขึ้น U มีค่าประมาณ 3% จึงป้อนแรงดันใหม่ด้วย $U_k + U$ ถ้าเกิดการเบรกดาวนก็ลดแรงดันให้เหลือเพียง $U_k - U$ ทำการปฏิบัติเช่นนี้จนกระทั่งครั้งที่ป้อนแรงดันมากพอคือที่ประมาณ 20 ครั้งก็จะทำการคำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวนที่ 50% จากนั้นก็ทำการคำนวณหาค่า BIL ที่ 90%

จากการหาค่า BIL ที่ 90 % ของกับดักฟ้าผ่า LFA ซึ่งจะใช้แรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วคราวและชั่วคราว เพื่อใช้ในการทดสอบผลปรากฏว่า กับดักฟ้าผ่า LFA จะทำงานก่อน Rate Lightning Impulse Withstand Voltage ที่ 125 kV ซึ่งแสดงว่า เมื่อเกิด Surge เข้ามาในระบบกับดักฟ้าผ่า LFA สามารถที่จะป้องกันอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

1. การทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า

การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ได้ทำการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA จำนวน 6 ตัวอย่าง และพิกัด 24 kV 10 kA จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยผลการทดสอบพบว่ากับดักฟ้าผ่าทั้งหมดมีค่าดีสชาร์จบางส่วนไม่เกิน 10 pC ตามที่มาตรฐานกำหนดถือว่าผ่านมาตรฐานการทดสอบ

การทดสอบหาค่ากระแสรั่วไหล จากผลการทดสอบในบทที่ 3 พบว่ากระแสรั่วไหลในระดับแรงดันใช้งานปกติและระดับแรงดันใช้งานต่อเนื่องสูงสุดมีค่าต่ำกว่าข้อมูลจากผู้ผลิต

การทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มทำงาน สามารถทำการทดสอบได้ทั้งกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA และกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60099-4 กำหนดว่าค่าแรงดันเริ่มทำงานที่ระดับกระแสรั่วไหล (กำหนดจากผู้ผลิต) จะต้องไม่มากกว่าข้อมูลจากผู้ผลิต จากผลการทดสอบในบทที่ 3 พบว่ากับดักฟ้าผ่าทุกตัวอย่างทดสอบผ่านการทดสอบ

การทดสอบกับดักฟ้าผ่าในสภาวะเปราะเปื้อน ได้ทำการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA จำนวน 3 ตัวอย่าง และพิกัด 24 kV 10 kA จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบในระดับความเปราะเปื้อนน้อย และระดับความเปราะเปื้อนสูงมาก โดยผลการทดสอบพบว่าในระดับแรงดันใช้งานต่อเนื่องนั้นจะไม่เกิดโคโรนา แต่จะเกิดโคโรนาที่ระดับแรงดันที่สูงกว่าระดับแรงดันทำงานต่อเนื่อง และจะเกิดบริเวณของเทอร์มินอลของกับดักฟ้าผ่าเท่านั้น ซึ่งสามารถที่จะแก้ปัญหาโดยการปรับปรุงเทอร์มินอลให้มีความโค้งมนมากยิ่งขึ้น

2. การออกแบบกับดักฟ้าผ่า (LFA)

จากการออกแบบและนำไปจำลองวิเคราะห์หาการกระจายสนามไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวผลที่ได้คือการกระจายของสนามไฟฟ้าของแบบที่ 1 และ 2 มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดที่เท่าๆกันนั้นมีการกระจายที่ดีกว่าแบบที่ 3 ซึ่งในแบบที่ 3 นั้นในช่วงของปลายสายจะมีการเพิ่มของสนามไฟฟ้าขึ้นมาจึงได้ทำการสร้างแบบทั้ง 3 แบบขึ้นมาแล้วทำการทดสอบเปรียบเทียบกันว่าผลที่ได้จะเป็นไปตามที่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองขึ้นมาหรือไม่

2.1 การทดสอบหาโคโรนาเริ่มเกิดของกับดักฟ้าผ่า LFA

โดยทำการทดสอบกับดักฟ้าผ่าทั้ง 3 แบบที่จำลองสร้างขึ้นมาจากผลการทดสอบทั้งในระบบ 22 kV และ 33 kV เห็นได้ชัดเจนว่ากับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ซึ่งเป็นแบบที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์ระยะห่างเท่าๆกัน จะมีค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาที่สูงกว่ากับดักฟ้าผ่าทั้ง 3 แบบ ในขณะที่กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ซึ่งมีอิเล็กทรอนิกส์แบบเม็ด และแบบที่ 3 ซึ่งมีอิเล็กทรอนิกส์ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่เท่ากัน จะมีค่าแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนาที่ค่าใกล้เคียงกันมาก เกือบจะเป็นค่าเดียวกัน และค่าน้อยกว่ากับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 แสดงให้เห็นถึงระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์มีผลต่อการเกิดโคโรนา ยิ่งระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ไม่เท่ากันเท่าไร โคโรนาก็จะยิ่งเกิดง่ายขึ้น และอาจจะทำให้กับดักฟ้าผ่าทำงานที่แรงดัน TOV ได้ ดังนั้นในการออกแบบกับดักฟ้าผ่า LFA นั้นจะต้องทำการออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ให้มีระยะที่เท่าๆกันให้มากที่สุด และไม่ทำงานที่แรงดัน TOV

2.2 การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ของกับดักฟ้าผ่า LFA

จากการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LFA เพื่อทำการหาค่า $U_{b90\%}$ หรือ BIL90%ซึ่งต้องทำการหาค่า $U_{b50\%}$ โดยใช้วิธีการปรับขึ้นลง ซึ่งในการทดสอบจะทำการป้อนแรงดันค่าหนึ่งทีละค่าว่าเป็นแรงดันเบรกดาวนที่ 50% หรือ U_k ถ้าไม่เกิดการเบรกดาวนให้เพิ่มแรงดันขึ้น U มีค่าประมาณ 3% จึงป้อนแรงดันใหม่ด้วย $U_k + U$ ถ้าเกิดการเบรกดาวนก็ลดแรงดันให้เหลือเพียง $U_k - U$ ทำการปฏิบัติเช่นนี้จนกระทั่งครั้งที่ป้อนแรงดันมากพอคือที่ประมาณ 20 ครั้งก็จะทำการคำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวนที่ 50% จากนั้นก็ทำการคำนวณหาค่า BIL ที่ 90%

จากการหาค่า BIL ที่ 90 % ของกับดักฟ้าผ่า LFA ซึ่งจะใช้แรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วคราวและชั่วคราว เพื่อใช้ในการทดสอบผลปรากฏว่า กับดักฟ้าผ่า LFA จะทำงานก่อน Rate Lightning Impulse Withstand Voltage ที่ 125 kV ซึ่งแสดงว่า เมื่อเกิด Surge เข้ามาในระบบกับดักฟ้าผ่า LFA สามารถที่จะป้องกันอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ให้นักศึกษากลุ่มต่อไปทำการศึกษาปรับปรุงคุณสมบัติของ LFA เพิ่มเติมให้สามารถใช้งานได้
2. ควรมีการปรับปรุงห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. ให้มีความพร้อมและประสิทธิภาพที่ดีกว่านี้ จากการศึกษาถึงประสิทธิภาพของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.พบว่าอุปกรณ์ทดสอบภายในห้องสามารถใช้งานได้ มีเพียง 3-4 ชุด เท่านั้นและในจำนวนนี้มีประสิทธิภาพการใช้งานได้เต็มที่ ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบได้ครบถ้วนตามข้อกำหนด

เอกสารอ้างอิง

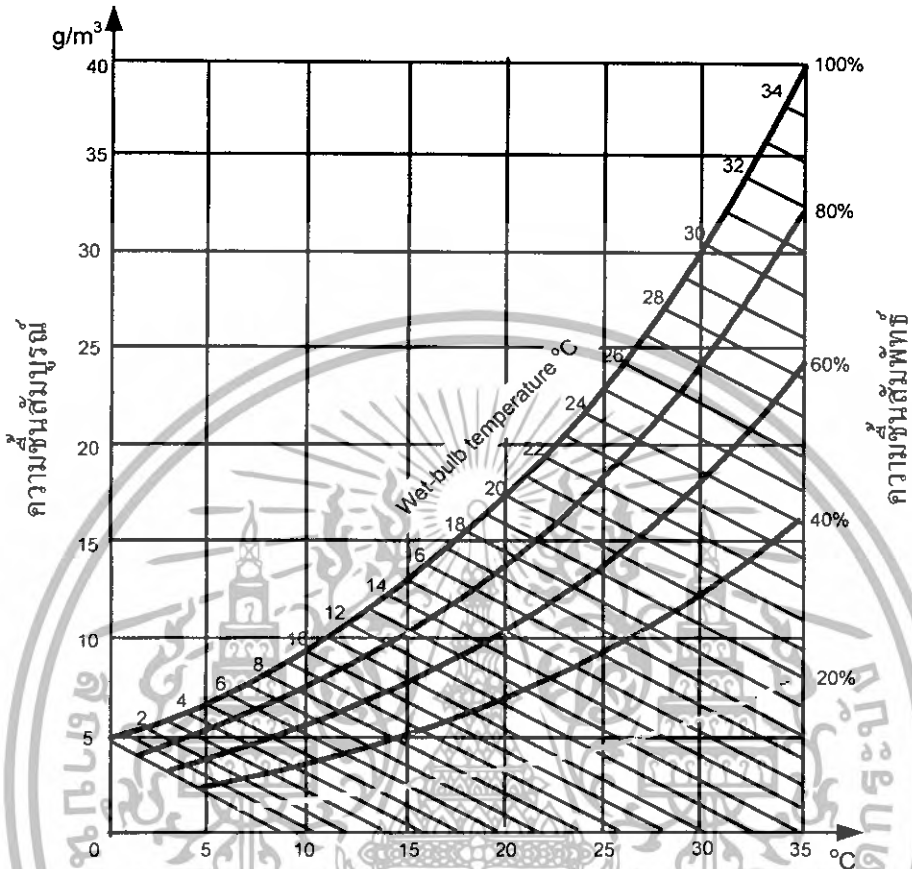
- [1] ดร.สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, สนพ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [2] กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, **โครงการวิจัยเพื่อป้องกันแรงดันเกินสำหรับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า**, รายงานการวิจัย , 2546
- [3] กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, **อุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายของ กฟภ.**, เอกสารประกอบการบรรยาย, 2545
- [4] **การศึกษาและออกแบบครอบเอาต์พิวส์และกับดักฟ้าผ่า**, ปริญาณิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
- [5] ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล., **Electrical Power Engineering Laboratory II**, เอกสารประกอบการเรียนวิชาภาคปฏิบัติ Electrical Power Engineering Laboratory II
- [6] IEC 60815, **Guide for the selection of insulator of Polluted conditions, First Edition**, 1996
- [7] ไชยพร หล่อทองคำ, **การศึกษาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นต่อระบบป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแก๊ป**, วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [8] IEC 60099-4, **Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. system**, 2004-05
- [9] G.V.Podporkin, V.E. Pilshikov, A.D. Sivaev, **"Development of Long Flashover Arresters with Multi - Electrode System for Lightning Overvoltage and Conductor - Burn Protection of 6 to 35 kV Overhead Line"**, Streamer Electric Company.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



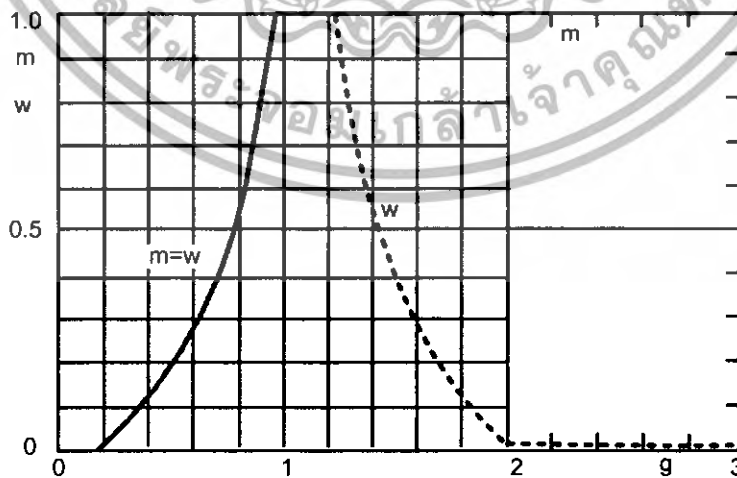
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
กราฟการแปลงค่า



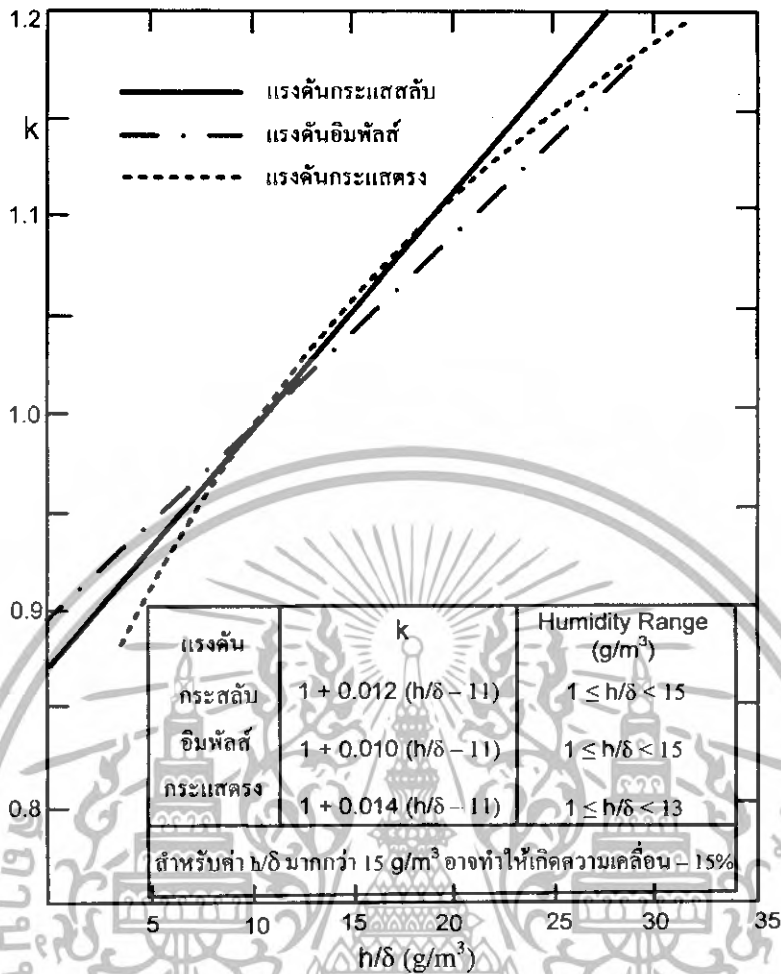
อุณหภูมิโดยรอบ-อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

รูปที่ ก.1 กราฟความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่สภาวะมาตรฐาน



รูปที่ ก.2 กราฟการหาค่า m และ w สำหรับแก้ค่าความหนาแน่นอากาศและแก้ค่าความชื้นเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 กราฟการหาค่าพารามิเตอร์ k เป็นฟังก์ชันของ h/d

IEEE sdt 4:1995 กำหนดที่สภาวะมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ (t_0) 20 °C และความดันบรรยากาศ (b_0) 101.3 kPa หรือ 1013 mbar หรือ 760 mmHg ที่ 0 °C โดยความชื้นสัมบูรณ์ 11 gm⁻³ ถ้า b เป็นความดันบรรยากาศ (kPa) และ H เป็นความสูงของบารอมิเตอร์ (mmHg) จะได้

$$b = 0.1333H \tag{ก.1}$$

ค่าที่สภาวะห้องทดลอง
$$U = U_0 K_1 K_2 \tag{ก.2}$$

- เมื่อ U คือ แรงดันที่สภาวะห้องทดลอง
- U_0 คือ แรงดันที่สภาวะมาตรฐาน
- K_1 คือ ค่าแก้เนื่องจากความหนาแน่นอากาศ
- K_2 คือ ค่าแก้เนื่องจากความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่
$$K_1 = \delta^m = \left[\frac{b(273+t_0)}{b_0(273+t)} \right]^m \quad (ก.3)$$

$$K_2 = k^w \quad (ก.4)$$

เมื่อ

δ	คือ ความหนาแน่นอากาศ
t	คือ อุณหภูมิที่สภาวะห้องทดลอง
b	คือ ความดันบรรยากาศที่สภาวะห้องทดลอง
m	คือ เลขยกกำลังกำหนดจากพารามิเตอร์ g
w	คือ เลขยกกำลังกำหนดจากพารามิเตอร์ g
k	คือ พารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับประเภทของแรงดันและอัตราส่วน $\frac{h}{\delta}$

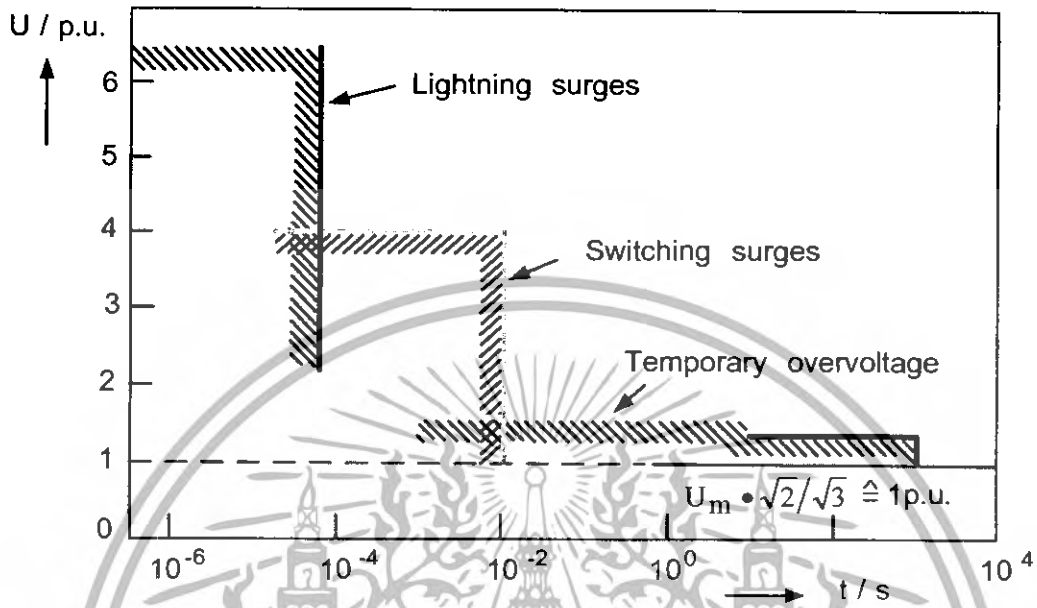
$$g = \frac{U_b}{500L\delta k} \quad (ก.5)$$

เมื่อ U_b คือ 1.1 เท่าของแรงดันทดสอบ

L คือ ระยะวาปไฟตามผิวที่สั้นที่สุดของวัสดุทดสอบ

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาระยะห่างของตัวล่อกับตัวกับดักฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดโคโรนา



รูปที่ ข.1 ช่วงระยะเวลาและขนาดแรงดันเกินแบบต่างๆ [1]

1. การคำนวณระยะห่างของตัวล่อกับตัวกับดักฟ้าผ่าในระบบ 22 kV

แปลงเป็นแรงดันเฟสค่ายอด

$$\frac{22}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 18 \text{ kV}_{\text{peak}}$$

แรงดันเกินชั่วคราวมีความสำคัญต่อการเลือกค่าที่กำหนดของกับดักฟ้าผ่า มีเงื่อนไขว่า กับดักฟ้าผ่าจะต้องไม่ทำงานที่แรงดัน TOV จากรูปที่ ข.1 ค่า TOV มีค่าประมาณ 1.25 V / pu.

ดังนั้น

$$\begin{aligned} 1.25 \text{ V/pu} \times 18 \text{ kV}_{\text{peak}} &= 22.5 \text{ kV}_{\text{peak}} \\ &\approx 23 \text{ kV}_{\text{peak}} \\ &= 16 \text{ kV}_{\text{rms}} \text{ (เป็นแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา)} \end{aligned}$$

ความเครียดสนามไฟฟ้า ที่สภาวะบรรยากาศประมาณ 25 – 30 kV_{peak} / cmความเครียดสนามไฟฟ้า ที่สภาวะบรรยากาศเปียกชื้นหรือฝนตกประมาณ 15 kV_{peak} / cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ทำการทดสอบที่สภาวะบรรยากาศต่ำ
ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ระยะห่างระหว่างตัวล่อกับตัวกับดักฟ้าผ่า} &= \frac{23\text{kV}_{\text{peak}} \times 1\text{cm}}{15\text{kV}_{\text{peak}}} \\ &= 1.5\text{ cm} \quad (\text{เป็นระยะที่เริ่มเกิดโคโรนา}) \end{aligned}$$

ดังนั้นในระบบ 22 kV จะทำการขึ้นแรงดันที่ 16 kVrms (HV) ที่ระยะห่างระหว่างตัวล่อกับตัวกับดักฟ้าผ่า 1.5 cm

2. การคำนวณระยะห่างของตัวล่อกับตัวกับดักฟ้าผ่าในระบบ 33 kV

แปลงเป็นแรงดันเฟสค่ายอด

$$\frac{33}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 27\text{ kV}_{\text{peak}}$$

แรงดันเกินชั่วครู่มีความสำคัญต่อการเลือกค่าที่กำหนดของกับดักฟ้าผ่า มีเงื่อนไขว่า กับดักฟ้าผ่าจะต้องไม่ทำงานที่แรงดัน TOV จากรูปที่ ข.1 ค่า TOV มีค่าประมาณ 1.25 V / pu.

ดังนั้น

$$\begin{aligned} 1.25\text{ V/pu} \times 27\text{ kV}_{\text{peak}} &= 33.68\text{ kV}_{\text{peak}} \\ &\approx 34\text{ kV}_{\text{peak}} \\ &= 24\text{ kV}_{\text{rms}} \quad (\text{เป็นแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา}) \end{aligned}$$

ความเครียดสนามไฟฟ้า ที่สภาวะบรรยากาศประมาณ 25 – 30 kV_{peak} / cm

ความเครียดสนามไฟฟ้า ที่สภาวะบรรยากาศเปียกชื้นหรือฝนตกประมาณ 15 kV_{peak} / cm

ได้ทำการทดสอบที่สภาวะบรรยากาศต่ำ
ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ระยะห่างระหว่างตัวล่อกับตัวกับดักฟ้าผ่า} &= \frac{34\text{kV}_{\text{peak}} \times 1\text{cm}}{15\text{kV}_{\text{peak}}} \\ &= 2.27\text{ cm} \quad (\text{เป็นระยะที่เริ่มเกิดโคโรนา}) \end{aligned}$$

ดังนั้นในระบบ 33 kV จะทำการขึ้นแรงดันที่ 24 kVrms (HV) ที่ระยะห่างระหว่างตัวล่อกับตัวกับดักฟ้าผ่า 2.27 cm