สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทดสอบและออกแบบดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่า

Test and Design of Drop - Out Fuse and Lightning Arrester

โดย

นายจักรเพชร แจ่มใส
นายสุพงษ์ วงษ์บุญชา

ปท.
จ 926 ก
2550

เลขหมู่..........
เลขทะเบียน 82992
วัน,เดือน,ปี 30 ก.ค. 2551

b. 11958480
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบและออกแบบดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่า

Test and Design of Drop - Out Fuse and Lightning Arrester

โดย

นายจักรเพชร แจ่มใส

นายสุพงษ์ วงษ์บุญชา

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

อ.นรเศรษฐ พัฒนเดช

อ.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทดสอบและออกแบบตรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่า

ผู้จัดทำ

1. นายจักรเพชร แจ่มใส 48015094
2. นายสุพงษ์ วงษ์บุญชา 48015140

....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ พีรวุฒิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบและออกแบบดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่า

นายจักรเพชร แจ่มใส
นายสุพงษ์ วงษ์บุญชา
รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอการศึกษากระบวนการทดสอบและการออกแบบของดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่า ตัวอย่างดรอบเอาท์ฟิวส์ ระบบ 22 kV พิกัด 27 kV 100 A โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 ในหัวข้อความคงทนของฉนวนและตัวอย่างกับดักฟ้าผ่า พิกัด 21 kV 5 kA และ 24 kV 10 kA ถูกทดสอบตามมาตรฐาน IEEE 60099-4 ในหัวข้อความคงทนของฉนวน ผลการทดสอบทางไฟฟ้าลูกถ้วยของดรอบเอาท์ฟิวส์ปรากฏว่าตัวดรอบเอาท์ฟิวส์มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามมาตรฐานว่าด้วยความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ ในส่วนของกับดักฟ้าผ่าปรากฏว่ากับดักฟ้าผ่าที่นำมาทดสอบมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของมาตรฐาน

จากผลการทดสอบจึงจำเป็นต้องทำการออกแบบลักษณะครีบฉนวนลูกถ้วยของดรอบเอาท์ฟิวส์ใหม่ โดยใช้มาตรฐาน IEC 815 และข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยแบบที่ได้จะใช้โปรแกรม FEMLAB 3.1 วิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้าแล้วนำไปเปรียบเทียบกับลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าบนครีบฉนวนเดิม ซึ่งผลการเปรียบเทียบปรากฏว่าการกระจายสนามไฟฟ้าของครีบฉนวนที่ออกแบบใหม่จะมีการกระจายสนามไฟฟ้าที่ดีกว่าของเดิม เนื่องจากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นก็มีค่าน้อยกว่า ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนที่ออกแบบใหม่จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าครีบฉนวนที่มีใช้อยู่เดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test and Design of Drop-Out Fuse and Lightning Arrester

Jagkapech Jamsai
Supong Vongbooncha
Assoc.Prof.Siriwat Potivejkul Advisor
Norasage Pattanadech Advisor
Peerawut Yutthakowit Advisor
Academic Year 2007

ABSTRACT

This project presents the electrical testing and design of drop-out fuses and lightning arresters. The drop-out fuses (open type), 22 kV 27 kV 100 A ,were tested accordamce with ANSI C-37.42 (1996) standard intopic of insulation test and the lightning arrester 21 kV 5 kA and 24 kV 10 kA, were tested arcording to IEC 60099-4 intopic of insulation test.The test results show that drop-out fuses could not pass. The test in case of impulse voltage withstand and the lightning arresters could pass the

From test result, the insurator of drop-out fuses were redesigned by IEC 815 and specification of PEA. FEMLAB 3.1 program was used to design electrical field stress on the suface of the insulator. The insulator sheds were redesign for reducing electrical field stress. The simulation tests show that the new design has better performance than the conventional one

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช และ อาจารย์พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารที่ปรึกษาโครงงานอย่างสูงที่ให้ความรู้และคอยแนะนำเกี่ยวกับโครงสร้างของโครงงาน ตลอดจนการดูแลและเอาใจใส่เป็นอย่างดีและให้โอกาสในการเรียนรู้และประสบการณ์อันมีค่าในการปฏิบัติงานจริง

ขอขอบคุณ หจก. ส. กมลเทรดดิ้ง ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ในการทดสอบและความร่วมมือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และโครงการ IRPUS ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ปริญญาโท ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาต่างๆเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความร่วมมือและช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

อนึ่งโครงงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องด้วยความช่วยเหลือและมีน้ำใจของทุกท่านที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้ความสนับสนุนและส่งเสริมทางด้านปัจจัยต่างๆจนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้วเสร็จได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ..I
ASBTRACT..II
กิตติกรรมประกาศ..III
สารบัญ..IV
สารบัญภาพ..VII
สารบัญตาราง..XIII
บทที่ 1 บทนำ..1
1.1 บทนำทั่วไป..1
1.2 ที่มาของปัญหา..1
1.3 วัตถุประสงค์..2
1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน..2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงงาน..4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..5
2.1 ทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่า..5
2.1.1 ฟ้าผ่าขึ้นหรือฟ้าผ่าลง..5
2.1.2 ขั้วของกระแสฟ้าผ่า..7
2.1.3 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า..7
2.1.4 ฟ้าผ่าซ้ำหลายลำ..8
2.2 แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า..10
2.2.1 แรงดันเกินภายนอก..10
2.2.2 แรงดันเกินภายใน..10
2.2.3 แรงดันเกินชั่วคราว..11
2.3 ดรอปเอาท์ฟิวส์..11
2.3.1 ชนิดของดรอปเอาท์ฟิวส์..12
2.3.2 ฟิวส์ลิงค์..13
2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา..14
2.4 กับดักฟ้าผ่า..15
2.4.1 กับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป..16
2.4.2 กับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป..17
2.4.3 กับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์..18
2.4.4 ลักษณะสมบัติแรงดัน – กระแสของกับดักฟ้าผ่า..19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 การทดสอบอิมพัลส์.....21
2.5.1 ข้อกำหนดของรูปคลื่นอิมพัลส์.....21
2.5.2 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า.....22
2.6 การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพัลส์โวลเดจดิไวเดอร์.....24
2.6.1 โวลเดจดิไวเดอร์.....25
2.6.2 แท่งตัวนำแรงสูง.....25
2.6.3 ความต้านทานหน่วง.....25
2.6.4 ออสซิลโลสโคป.....26
2.6.5 เคเบิลวัด.....26
2.6.6 ความต้านทานแมชชิ่ง.....26
2.6.7 สายดิน.....27
2.7 การตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน.....27
2.7.1 ผลกระทบของดีสชาร์จบางส่วน.....28
2.7.2 วงจรสมูลของดีสชาร์จบางส่วน.....28
2.7.3 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้.....30
2.7.4 วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดีสชาร์จบางส่วน.....31
2.7.5 การต่อวงจรระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนในวงจรทดสอบ.....35
2.7.6 การแสดงผลดีสชาร์จภายใน.....36
2.8 การออกแบบครีบฉนวนโพลิเมอร์ของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป.....37
2.8.1 ลักษณะมิติที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่า.....38
2.8.2 การใช้งานกับดักฟ้าผ่าในสภาวะเปรอะเปื้อน.....38
2.8.3 แนวทางการแก้ไขการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า อันเนื่องจาก การใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน.....41
2.8.4 การออกแบบกับดักฟ้าผ่าเพื่อใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน.....42
2.9 ไฟไนต์เอลิเมนต์.....44
บทที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป...50
3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดรอบเอาท์ฟิวส์สภาวะปกติผิวแห้งสะอาด...50
3.1.1 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง.....51
3.1.2 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์.....55
3.2 การทดสอบกับดักฟ้าผ่า.....62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1 การทดสอบารดีสชาร์จบางส่วน....63
3.2.2 การทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงาน....73
3.2.3 การทดสอบหากระแสรั่วไหล....75
บทที่ 4 การออกแบบครีบฉนวนดรอปเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่าและ
การวิเคราะห์สนามไฟฟ้า....78
4.1 การออกแบบครีบฉนวนดรอปเอาท์ฟิวส์....78
4.2 การออกแบบครีบฉนวนกับดักฟ้าผ่า....103
บทที่ 5 บทสรุป....107
5.1 สรุปการจัดทำโครงงาน....107
5.2 สรุปผลการทดลอง....107
5.2.1 สรุปการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่องของ
ดรอบเอาท์ฟิวส์....107
5.2.2 สรุปการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์....107
5.2.3 สรุปผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนในกับดักฟ้าผ่า....108
5.2.4 สรุปผลการทดสอบการหาแรงดันเริ่มทำงานของกับดักฟ้าผ่า....108
5.2.5 สรุปผลการทดสอบการหากระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า....108
5.3 สรุปผลการออกแบบและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า....109
5.3.1 สรุปผลการออกแบบและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของดรอบเอาท์ฟิวส์...109
5.3.2 สรุปผลการออกแบบและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่า....117
5.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะที่พบระหว่างดำเนินงาน....121

ภาคผนวก....111
เอกสารอ้างอิง....124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ลักษณะของหัวนำร่อง....6
ภาพที่ 2.2 ลักษณะของฟ้าผ่าขึ้น....6
ภาพที่ 2.3 รูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่า....7
ภาพที่ 2.4 รูปคลื่นของฟ้าผ่าบวกและฟ้าผ่าลบ....8
ภาพที่ 2.5 กระบวนการฟ้าผ่าซ้ำ....9
ภาพที่ 2.6 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก , แรงดันเกินภายใน และแรงดันเกินชั่วคราว....11
ภาพที่ 2.7 การติดตั้งดรอบเอาท์ฟิวส์ที่ใช้งานในระบบไฟฟ้า....12
ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบหลักของดรอปเอาท์ฟิวส์....13
ภาพที่ 2.9 ส่วนประกอบของฟิวส์ลิงค์....13
ภาพที่ 2.10 คุณสมบัติการทำงานของฟิวส์ลิงค์....14
ภาพที่ 2.11 การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบส่งจ่าย....16
ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป....16
ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป....18
ภาพที่ 2.14 ZnO ที่อยู่ภายในกับดักฟ้าผ่า....18
ภาพที่ 2.15 กับดักฟ้าผ่าที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วย คู่ขั้วเบี่ยงอาร์คหรือ อาร์คซิ่งฮอร์นต่ออนุกรมกับซิงค์ออกไซด์....19
ภาพที่ 2.16 การนำกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป....20
ภาพที่ 2.17 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม....22
ภาพที่ 2.18 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด....23
ภาพที่ 2.19 วงจรพื้นฐานการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์....24
ภาพที่ 2.20 รูปแบบของดีสชาร์จบางส่วน....28
ภาพที่ 2.21 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน....29
ภาพที่ 2.22 การดีสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน....30
ภาพที่ 2.23 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ต่อความไวการวัด q_m/q ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_k/C_t.... 32
ภาพที่ 2.24 วงจรพื้นฐานของการวัดดีสชาร์จบางส่วน....33
ภาพที่ 2.25 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของดีสชาร์จบางส่วน....34
ภาพที่ 2.26 วงจรทดสอบดรวจจับดีสชาร์จบางส่วนโดยตรง....35
ภาพที่ 2.27 การแสดงผลการดีสชาร์จบางส่วน....37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.28 ลักษณะทางมิติที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่า....................................38
ภาพที่ 2.29 ความเสียหายที่มีสาเหตุจากการมีสาเหตุจากการเกิดวาบไฟตามผิว ของกับดักฟ้าผ่า....................................38
ภาพที่ 2.30 ขั้นตอนการเกิดวาบไฟตามผิวที่ผิวฉนวนจากสิ่งเปรอะเปื้อน....................................40
ภาพที่ 2.31 ลักษณะการออกแบบครีบตามมาตรฐาน IEC 815....................................43
ภาพที่ 2.32 รูปแบบของครีบประเภทต่าง ๆ 43
ภาพที่ 2.33 ลักษณะของตัวอย่างแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างวิธีการ ผลต่างสืบเนื่องกับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์....................................45
ภาพที่ 2.34 แผ่นอะลูมิเนียมที่วิเคราะห์โดยใช้วิธีการผลต่างสืบเนื่อง (ก) กับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (ข)....................................45
ภาพที่ 2.35 ตัวอย่างการแบ่งขอบเขตรูปร่างเป็นเอลิเมนต์ย่อย....................................47
ภาพที่ 2.36 จุดต่อของเอลิเมนต์ย่อย....................................47
ภาพที่ 3.1 ดรอปเอาท์ฟิวส์ที่ใช้ในการทดสอบพิกัด 27 kV 100 A 50
ภาพที่ 3.2 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง....................................52
ภาพที่ 3.3 แผนภาพที่ใช้ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะปกติ..54
ภาพที่ 3.4 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์....................................56
ภาพที่ 3.5 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของดรอบเอาท์ฟิวส์....................................57
ภาพที่ 3.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ใช้ทดสอบที่ระดับแรงดัน 139.54 kV T1= 1.10 μS, T2 = 47.56 μS....................................58
ภาพที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ใช้ทดสอบที่ระดับแรงดัน 140 kV T1= 1.14 μS, T2 = 46.35 μS....................................58
ภาพที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกของดรอบเอาท์ฟิวส์ตัวอย่างที่ 2 ต่อแบบ เทอร์มินอล -กราวน์ ระดับแรงดัน 139.54 kV ที่เกิดวาบไฟตามผิว....................................59
ภาพที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบของดรอบเอาท์ฟิวส์ตัวอย่างที่ 1 ต่อแบบ เทอร์มินอล - เทอร์มินอล ระดับแรงดัน 139.547 kV ที่เกิดวาบไฟตามผิว........59
ภาพที่ 3.10 กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในการศึกษา กับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5kA....................................62
ภาพที่ 3.11 วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนของกับดักฟ้าผ่า ZnO....................................63
ภาพที่ 3.12 แสดงผลการการปรับเทียบ วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายใน............65
ภาพที่ 3.13 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 1.........66
ภาพที่ 3.14 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับตักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 2...........67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.15 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 3.........68
ภาพที่ 3.16 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 4.........69
ภาพที่ 3.17 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 5.........70
ภาพที่ 3.18 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 6..........71
ภาพที่ 3.19 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 7.........72
ภาพที่ 3.20 วงจรทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มทำงาน..74
ภาพที่ 3.21 วงจรทดสอบหาค่ากระแสรั่วไหล...76
ภาพที่ 4.1 แสดง Dimension ต่าง ๆ ของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 1 ครีบเท่า.....................78
ภาพที่ 4.2 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 1 ครีบเท่า โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์.......................................79
ภาพที่ 4.3 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 1 ครีบ เท่าโดยป้อนแรงดันที่ 21...79
ภาพที่ 4.4 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของ ดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 1 ครีบเท่าโดยป้อนแรงดันที่ 21................................80
ภาพที่ 4.5 แสดง Dimension ต่าง ๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 2 ครีบเท่า........................80
ภาพที่ 4.6 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 2 ครีบเท่าโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..81
ภาพที่ 4.7 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 2 ครีบเท่าโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์...81
ภาพที่ 4.8 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของ ดรอบเอาฟิวส์ แบบที่ 2 ครีบเท่าโดยป้อนแรงดันที่ 21....................................82
ภาพที่ 4.9 แสดง Dimension ต่าง ๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 3 ครีบสลับ......................82
ภาพที่ 4.10 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 3 ครีบสลับ โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์ 83
ภาพที่ 4.11 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 3 ครีบ สลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..83
ภาพที่ 4.12 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของ ดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 3 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์.................84
ภาพที่ 4.13 แสดง Dimension ต่าง ๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 4 ครีบสลับ....................84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.14 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของครอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 4 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........85
ภาพที่ 4.15 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 4 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........85
ภาพที่ 4.16 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 4 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........86
ภาพที่ 4.17 แสดง Dimension ต่างๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 5 ครีบสลับ........86
ภาพที่ 4.18 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 5 ครีบสลับ โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........87
ภาพที่ 4.19 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 5 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........87
ภาพที่ 4.20 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 5 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........88
ภาพที่ 4.21 แสดง Dimension ต่างๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 6 ครีบเท่า........88
ภาพที่ 4.22 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 6 ครีบเท่า โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........89
ภาพที่ 4.23 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 6 ครีบเท่า โดยป้อนแรงดันที่ 21........89
ภาพที่ 4.24 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 6 ครีบเท่าโดยป้อนแรงดันที่ 21........90
ภาพที่ 4.25 แสดง Dimension ต่างๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 7 ครีบสลับ........90
ภาพที่ 4.26 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 7 ครีบสลับ โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........91
ภาพที่ 4.27 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 7 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........91
ภาพที่ 4.28 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 7 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........92
ภาพที่ 4.29 แสดง Dimension ต่างๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 8 ครีบสลับ........92
ภาพที่ 4.30 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 8 ครีบสลับ โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.31 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 8 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........93
ภาพที่ 4.32 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 8 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........94
ภาพที่ 4.33 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1..........95
ภาพที่ 4.34 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........95
ภาพที่ 4.35 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า แบบที่ 1 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........96
ภาพที่ 4.36 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........96
ภาพที่ 4.37 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2..........97
ภาพที่ 4.38 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า แบบที่ 2 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........97
ภาพที่ 4.39 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า แบบที่ 2 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........98
ภาพที่ 4.40 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........98
ภาพที่ 4.41 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3..........99
ภาพที่ 4.42 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........99
ภาพที่ 4.43 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า แบบที่ 3 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........100
ภาพที่ 4.44 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........100
ภาพที่ 4.45 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4..........101
ภาพที่ 4.46 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........101
ภาพที่ 4.47 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า แบบที่ 4 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..........102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.48 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........................102
ภาพที่ 4.49 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 5..103
ภาพที่ 4.50 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 5 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..103
ภาพที่ 4.51 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 5 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..104
ภาพที่ 4.52 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 5 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........................104
ภาพที่ 4.53 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 6..105
ภาพที่ 4.54 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 6 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..105
ภาพที่ 4.55 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 6 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์..106
ภาพที่ 4.56 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 6 โดยป้อนแรงดันที่ 21 กิโลโวลต์........................106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำปริญญานิพนธ์....................................3
ตารางที่ 2.1 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อน..39
ตารางที่ 2.2 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้กับดักผ้าผ่าที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน..............41
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของดรอบเอาท์ฟิวส์ที่นำมาทดสอบ..50
ตารางที่ 3.2 Minimum dielectric withstand test voltages..51
ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งสะอาด กระแสสลับ50 Hz ของดรอบเอาท์ฟิวส์ที่ระดับแรงดัน 42.37 kV..................54
ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ระดับแรงดัน 140 kV ของดรอบเอาท์ฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล..................61
ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ระดับแรงดัน 140 kV ของดรอบเอาท์ฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-กราวน์.....................61
ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ระดับแรงดัน 140 kV ของดรอบเอาท์ฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล................61
ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ระดับแรงดัน 140 kV ของดรอบเอาท์ฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-กราวน์.....................61
ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงานของกับดักฟ้าผ่า..75
ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบหากระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า...77
ตารางที่ 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวฉนวนดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบใหม่เทียบกับภาคอุตสาหกรรม...........................110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเป็นการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง เพื่อที่จะให้เพียงพอต่อความต้องการ และเกิดการสูญเสียที่น้อยที่สุด โดยอุปกรณ์ต่างๆที่นำมาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นที่จะต้องได้รับการออกแบบการฉนวนไฟฟ้าที่ดี ในการทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า รวมทั้งอุปกรณ์นั้นจะต้องได้รับการทดสอบก่อนที่จะนำมาใช้งานจริง เพื่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

กับดักฟ้าผ่า (Surge Arrester) เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในการลดระดับแรงดันเกินหรือจำกัดแรงดันเกิน โดยจะต้องนำกระแสเสิร์จหรือกระแสอิมพัลส์ให้ไหลลงสู่ดิน และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไม่ให้เกินค่าที่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ป้องกันอยู่ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นแบบติดตั้งกลางแจ้ง จึงมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกินเกิดขึ้นในระบบสูง ทั้งด้วยสาเหตุจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Overvoltage) ซึ่งจัดเป็นแรงดันเกินภายนอก (External Overvoltage) และแรงดันเกินจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร เรียกว่า แรงดันเกิน สวิตช์ซิ่ง (Switching Overvoltage) ซึ่งจัดเป็นแรงดันเกินภายใน (Internal Overvoltage) ในปัจจุบัน กับดักฟ้าผ่าได้รับการพัฒนา และนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ด้วยเทคโนโลยีการผลิตภายในประเทศ โดยเฉพาะการนำไปใช้เพื่อป้องกันแรงดันเกิน เนื่องจากฟ้าผ่าในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังและระบบจำหน่ายไฟฟ้า [1]

ดรอบเอาท์ฟิวส์ (Drop-Out Fuse) เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินพิกัดในระบบจำหน่ายแรงสูงที่มีการติดตั้งง่ายและหลักการทำงานไม่ต้องอาศัยกลไกยุ่งยากเหมือนอุปกรณ์ป้องกันชนิดอื่น มีฟิวส์ลิงค์เป็นตัวทำหน้าที่หลอมละลายตัดวงจรออกเมื่อเกิดกระแสเกินพิกัดตั้งแต่ 2 เท่าของขนาดฟิวส์ลิงค์ขึ้นไป ลักษณะการทำงานของฟิวส์ลิงค์จะเป็นแบบ Extremely Inverse Characteristic คือ กระแสเกินพิกัดยิ่งมีค่ามาก เวลาการทำงานของฟิวส์ลิงค์ยิ่งเร็วขึ้น

1.2 ที่มาของปัญหา

ปัจจุบันระบบสายส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทยเป็นแบบติดตั้งภายนอก (Outdoor) จึงมีโอกาสเกิดสภาวะแรงดันเกินขึ้นในระบบทั้งในกรณีแรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันเกินสวิตช์ซิ่ง ดังนั้นจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อสร้างความเชื่อถือได้ของระบบอุปกรณ์ป้องกันที่จะนำมาติดตั้งนั้นจะต้องได้รับการออกแบบและการทดสอบด้วยวิธีการที่เหมาะสมก่อนที่นำมาติดตั้ง รวมทั้งการศึกษาคุณสมบัติการใช้งาน และโครงสร้างส่วนประกอบต่างๆ เพื่อที่จะใช้ประโยชน์อุปกรณ์ป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้งานของกับดักฟ้าผ่าและดรอบเอาท์ฟิวส์นั้น มักจะประสบปัญหาในการเจาะทะลุของเนื้อฉนวนโพลิเมอร์ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากความผิดปกติภายใน เนื่องมาจากความชื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนที่เกิดจาก กระบวนการผลิต หรือคุณสมบัติของเนื้อฉนวนที่ไม่เหมาะสม การทดสอบคุณสมบัติของกับดักฟ้าผ่าและดรอบเอาท์ฟิวส์ก่อนที่จะนำไปติดตั้งใช้งาน จะช่วยลดปัญหาความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังอันเนื่องมาจากความไม่มีคุณภาพของอุปกรณ์ดังกล่าว รวมทั้งการออกแบบครีบ ของเนื้อฉนวนโพลิเมอร์ของกับดักฟ้าผ่าและดรอบเอาท์ฟิวส์ ให้การกระจายสภาพสนามไฟฟ้าดีขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าและดรอบเอาท์ฟิวส์

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะการทำงาน โครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกปและดรอบเอาท์ฟิวส์ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในทรงกระบอก
2. เพื่อศึกษามาตรฐานการทดสอบ กับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกป และดรอปเอาท์ฟิวส์ชนิดที่ตัวฟิวส์ อยู่ในทรงกระบอก
3 เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้แก่ โปรแกรม AutoCAD 2006 [2] ที่ใช้ในการออกแบบครีบของกับดักฟ้าผ่าและดรอบเอาท์ฟิวส์ โปรแกรม FEMLAB 3.1 ที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพการกระจายสนามไฟฟ้า
4. เพื่อทำการทดสอบทางไฟฟ้าของตัวอย่างกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกปและดรอบเอาท์ฟิวส์ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในทรงกระบอก โดยจะใช้อุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. เพื่อทำการออกแบบครีบของเนื้อฉนวนที่ทำด้วยโพลิเมอร์ของกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกปและครีบของเนื้อฉนวนที่ทำด้วยพอร์ตเลนของดรอบเอาท์ฟิวส์ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในทรงกระบอก รวมทั้งการวิเคราะห์สภาพการกระจายสนามไฟฟ้าบนเนื้อฉนวนโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1. ศึกษาลักษณะการทำงาน โครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกปและดรอบเอาท์ฟิวส์ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในทรงกระบอก
2. ศึกษามาตรฐานการทดสอบ กับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกป และดรอบเอาท์ฟิวส์ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในทรงกระบอก
3. ทำการทดสอบทางไฟฟ้าของตัวอย่างกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกปและดรอบเอาท์ฟิวส์ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในทรงกระบอก โดยจะใช้อุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้แก่ โปรแกรม AutoCAD 2006 ที่ใช้ในการออกแบบครีบของกับดักฟ้าผ่าและดรอบเอาท์ฟิวส์ โปรแกรม FEMLAB 3.1 ที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพการกระจายสนามไฟฟ้า
5. ทำการออกแบบครีบของเนื้อฉนวนที่ทำด้วยโพลิเมอร์ของกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกปและครีบของเนื้อฉนวนที่ทำด้วยพอรตเลนของดรอบเอาท์ฟิวส์ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกระบอก รวมทั้งการวิเคราะห์สภาพการกระจายสนามไฟฟ้าบนเนื้อฉนวนโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

6. สรุปผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า
7. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำปริญญานิพนธ์

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	พ.ศ. 2550							พ.ศ. 2551		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาลักษณะการทำงาน ของดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่า										
2. ศึกษามาตรฐานการทดสอบดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่า										
3. ทำการทดสอบทางไฟฟ้าของตัวอย่างดรอปเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่าและวิเคราะห์ผลการทดลอง										
4. ศึกษามาตรฐานที่ใช้ออกแบบครีบฉนวนพร้อมทั้งออกแบบครีบฉนวนขึ้นมาใหม่										
5. นำดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบใหม่ไปทำการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม FEMLAB 3.1 ในการวิเคราะห์										
6. สรุปผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า										
7. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์										
การวางแผน					การดำเนินงานจริง					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในการทำงานของดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่า
2. สามารถทำการทดสอบดรอบเอาท์ฟิวส์ และกับดักฟ้าผ่าโดยใช้ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบังได้
3. สามารถออกแบบครีบฉนวนของกับดักฟ้าผ่าและครีบฉนวนของดรอปเอาท์ฟิวส์ได้
4. มีความเข้าใจในการวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าของครีบฉนวนกับดักฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ ซึ่งมนุษย์รู้จักกันดี จนปี คศ. 1752 เบนจามิน แฟรงคลิน (*Benjamin Franklin*) ได้ทำการพิสูจน์และอธิบายว่า ฟ้าผ่าเป็นผลของการเกิดดิสชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ ทำให้เริ่มมีการศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการเกิดฟ้าผ่าเป็นต้นมา โดยศักย์ไฟฟ้าในการเกิดฟ้าผ่ามีค่าสูงตั้งแต่ 10 เมกะโวลท์ ถึง 100 เมกะโวลท์ มีค่ากระแสหลายร้อยกิโลแอมป์ มีค่าความร้อนสูงถึง 30,000 K จึงเป็นอันตรายอย่างยิ่งเมื่อเกิดฟ้าผ่า ซึ่งจะสามารถทำให้เกิดเพลิงไหม้ นอกจากนี้แล้วยังเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสฟ้าผ่ามีอัตราสูงจึงทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในระบบวงจรไฟฟ้าเป็นแรงดันเสิร์จและเป็นแรงดันเกินวิ่งไปตามสายไฟเข้าสู่อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ที่มีความไวต่อแรงดันทรานเซี้ยนต์ ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ไหลลงสู่ดิน ก็อาจเป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้นอันเนื่องมาจากแรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัสได้ [1] ถึงแม้ว่าจะทราบว่าฟ้าผ่า สิ่งที่ทำได้ก็เพียงป้องกันมิให้เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต แต่มนุษย์ก็ไม่อาจห้ามการเกิดฟ้าผ่าได้ ในทางปฏิบัติจะทำได้ก็เพียงป้องกันมิให้เกิดอันตรายอันเนื่องจากผลการเกิดฟ้าผ่า โดยมีการสร้างระบบป้องกันตามหลักวิชาการ แต่การที่จะออกแบบระบบป้องกันอันตรายอันเนื่องมาจากผลของฟ้าผ่าให้มีประสิทธิผลและประสิทธิภาพนั้น จำต้องทราบและมีความเข้าใจดีเกี่ยวกับลักษณะสมบัติของฟ้าผ่า ซึ่งจะเป็นข้อมูลขั้นพื้นฐานสำคัญที่จะช่วยให้สามารถป้องกันได้เหมาะสมและมีความปลอดภัย ลักษณะสำคัญของฟ้าผ่า อาจจะแบ่งได้ดังนี้

2.1.1 ฟ้าผ่าขึ้นหรือฟ้าผ่าลง

หมายถึง การเกิดฟ้าผ่าอาจจะเริ่มต้นจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดิน (เรียกว่าฟ้าผ่าลง) หรือเริ่มต้น จากพื้นดินขึ้นไปสู่ก้อนเมฆ (เรียกว่าฟ้าผ่าขึ้น)ก็ได้ ซึ่งการเกิดฟ้าผ่านั้นจะเริ่มจากการก่อตัวจากบริเวณจุดหรือบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าวิกฤติของบรรยากาศที่ระดับพื้นโลก จะมีค่าประมาณ 25-30 kV/cm. แต่เมื่อเกิดภาวะฝนฟ้าคะนองจะทำให้มีความดันอากาศต่ำ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติจะลดลงมีค่าเหลือประมาณ 10 kV/cm. [1] โดยส่วนมากจะพบการเกิดฟ้าผ่าในแบบฟ้าผ่าลง โดยเมื่อเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าวิกฤติแล้วก็จะเกิด ลีดเดอร์หรือหัวนำร่อง ขึ้นมาเพื่อนำทางในการเกิดฟ้าผ่าโดยจะเริ่มขยายไปในทางที่เกิดไอออไนเซชั่นของอากาศได้ง่าย

เมื่อหัวนำร่องวิ่งลงมาใกล้พื้นโลกแล้ว จะส่งผลทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่พื้นโลกมีค่าสูง มีการเหนี่ยวนำให้เกิดสตรีมเมอร์ ซึ่งจะเริ่มต้นจากพื้นโลกพุ่งเข้าหาแนวของหัวนำร่องเพื่อมาบรรจบกัน จากนั้นประจุจากก้อนเมฆจะดิสชาร์จลงสู่พื้นโลกตามแนวที่หัวนำร่องได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรุยทางไว้ ประจุที่ดิสชาร์จนี้จะมีลักษณะเป็นแสงจ้า เรียกว่า ลำฟ้าผ่า (Main stoke) และการเคลื่อนที่ของประจุในลำฟ้าผ่านี้ก็คือ กระแสฟ้าผ่า นั่นเอง

การที่ประจุจากก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นดินนั้นเรียกว่า ฟ้าผ่าลง ซึ่งจะมีลักษณะดังภาพที่ 2.1 โดยจะเป็นรูปร่างคล้ายกับรากต้นไม้แตกแขนงลงมา ซึ่งจะมีแนวของหัวนำร่องหลายแนวเนื่องจากการที่หัวนำร่องพยายามที่จะสร้างแนวของลำฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน

ฟ้าผ่าจะเริ่มต้นจากพื้นโลกไปยังก้อนเมฆก็ได้ซึ่งเรียกว่า ฟ้าผ่าขึ้น คือหัวนำร่องจะเริ่มก่อตัวจากสิ่งก่อสร้าง, อาคาร, สูงๆ [1] โดยจะเริ่มจากยอดของโครงสร้างและมีกระบวนการเกิดเช่นเดียวกันกับการเกิดฟ้าผ่าลงเพียงแต่ทิศทางกลับกันเท่านั้น

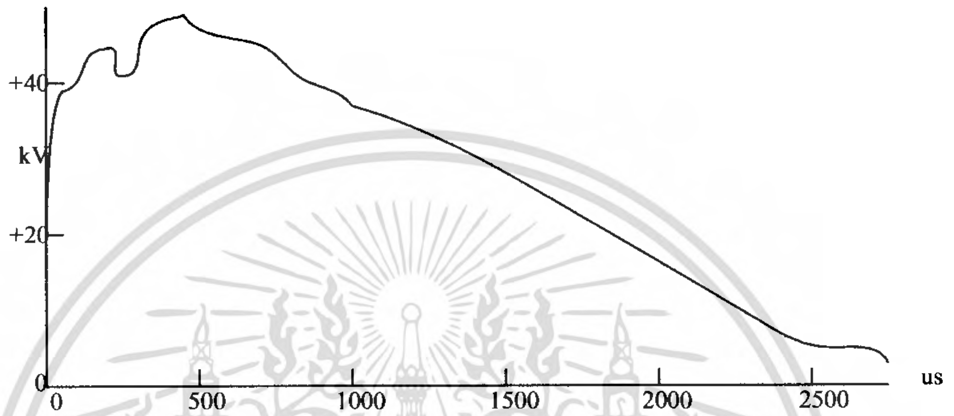
ภาพที่ 2.1 ลักษณะของหัวนำร่อง

ภาพที่ 2.2 ลักษณะของฟ้าผ่าขึ้น

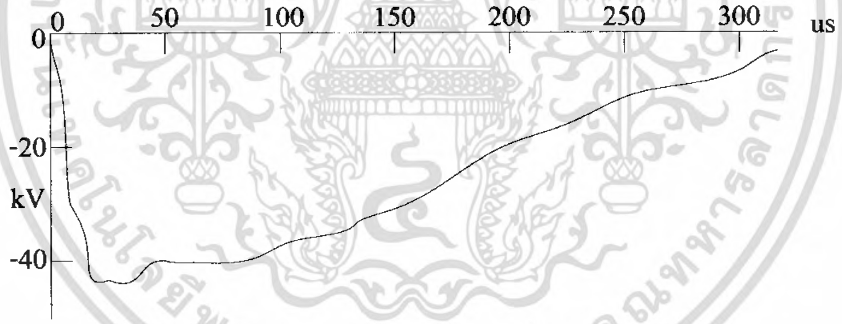
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ขั้วของกระแสฟ้าผ่า

กระแสฟ้าผ่าเป็นกระแสทรานเซี้ยนต์ที่ไหลทางเดียวอาจเป็นบวกหรือเป็นลบก็ได้ กระแสฟ้าผ่าบวกหมายถึง ลำฟ้าผ่าที่นำเอาประจุบวกจากก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลก ดังภาพที่ 2.3 จากการที่มี ผู้บันทึกและรวบรวมข้อมูลฟ้าผ่าจะพบว่าประมาณร้อยละ 80 ของฟ้าผ่าลงสู่พื้นโลกนั้นเป็นฟ้าผ่าลบ [1] และเป็นที่น่าสังเกตประการหนึ่งของลำฟ้าผ่าคือ ฟ้าผ่าลบลงสู่พื้นโลกมักเป็นฟ้าผ่าซ้ำต่อเนื่องหลายครั้ง ถ้าเป็นฟ้าผ่าบวกมักเป็นลำฟ้าผ่าเดี่ยว



ก) ฟ้าผ่าบวก (ประจุ 55 คูลอมบ์)



ข) ฟ้าผ่าลบ (ประจุ 6 คูลอมบ์)

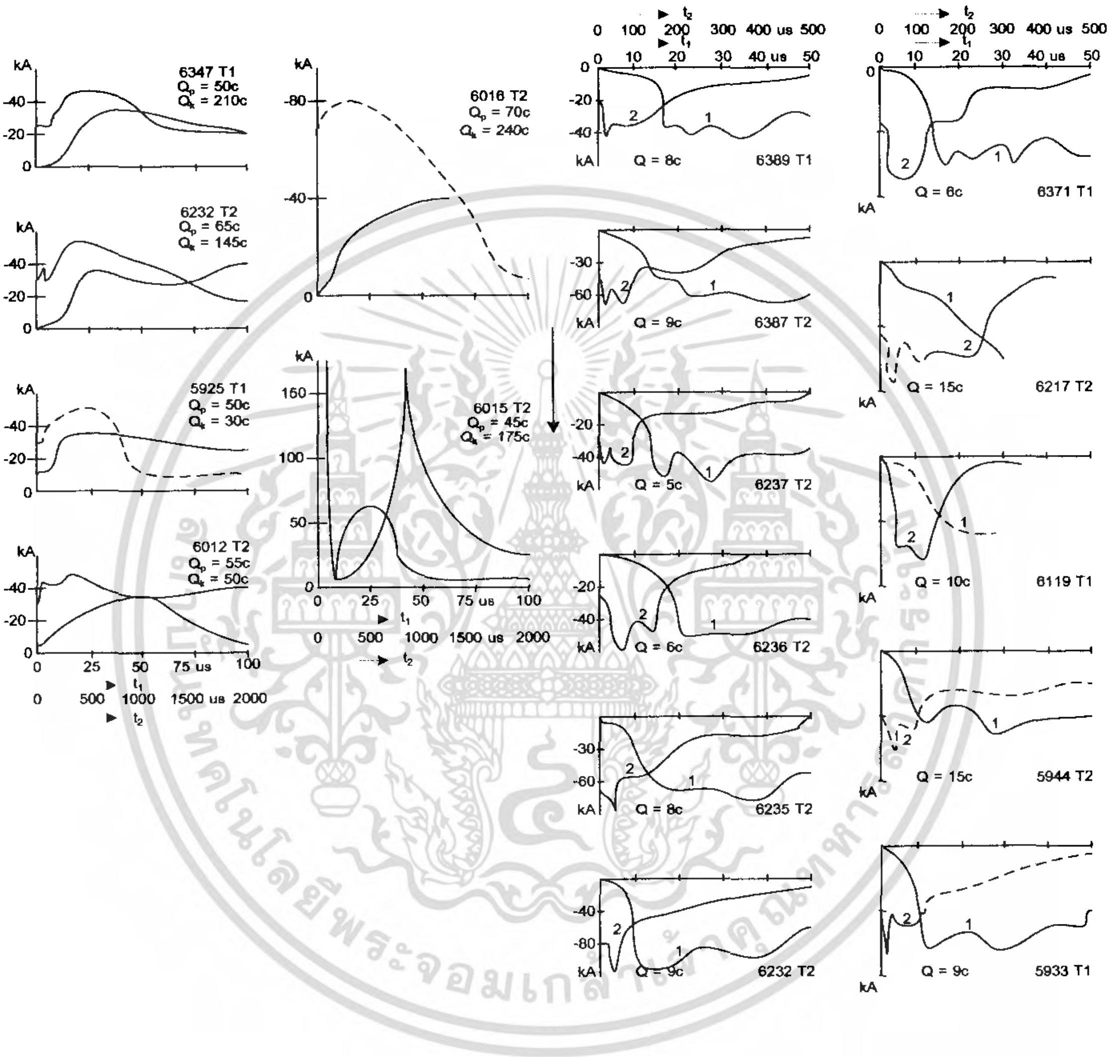
ภาพที่ 2.3 รูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่า

2.1.3 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

ลักษณะรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าอาจกำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่นและเวลาช่วงหางคลื่น ลักษณะที่สำคัญของช่วงหน้าคลื่นคืออัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส เรียกว่า ความชัน วัดเป็นกิโลแอมป์ต่อไมโครวินาที ซึ่งมีผลสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำมากน้อยในสายตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงในการออกแบบระบบสายล่อฟ้า [1] จากการบันทึกรูปคลื่นฟ้าผ่าเป็นจำนวนมาก จะพบว่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและเวลาช่วงหางคลื่นจะมีค่าต่าง ๆกันและขึ้นอยู่กับขั้วของกระแสฟ้าผ่าว่าเป็นบวกหรือเป็นลบด้วย ดังในรูปที่ 2.4 กล่าวคือ ฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลบจะมีช่วงหน้าคลื่นประมาณ 1-18 ไมโครวินาที และเวลาช่วงหางคลื่นประมาณ 5-120 ไมโครวินาที ฟ้าผ่าบวกช่วงเวลาหน้าคลื่นจะอยู่ในช่วงประมาณ 3.5-200 ไมโครวินาที และช่วงเวลาหางคลื่นจะอยู่ในช่วงประมาณ 25-2000 ไมโครวินาทีนั่นคือ โดยเฉลี่ยฟ้าผ่าบวกจะมีความชันของรูปคลื่นน้อยกว่าและช่วงเวลาหางคลื่นยาวกว่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือจำนวนประจุของฟ้าผ่าบวกมากกว่าฟ้าผ่าลบ [1]



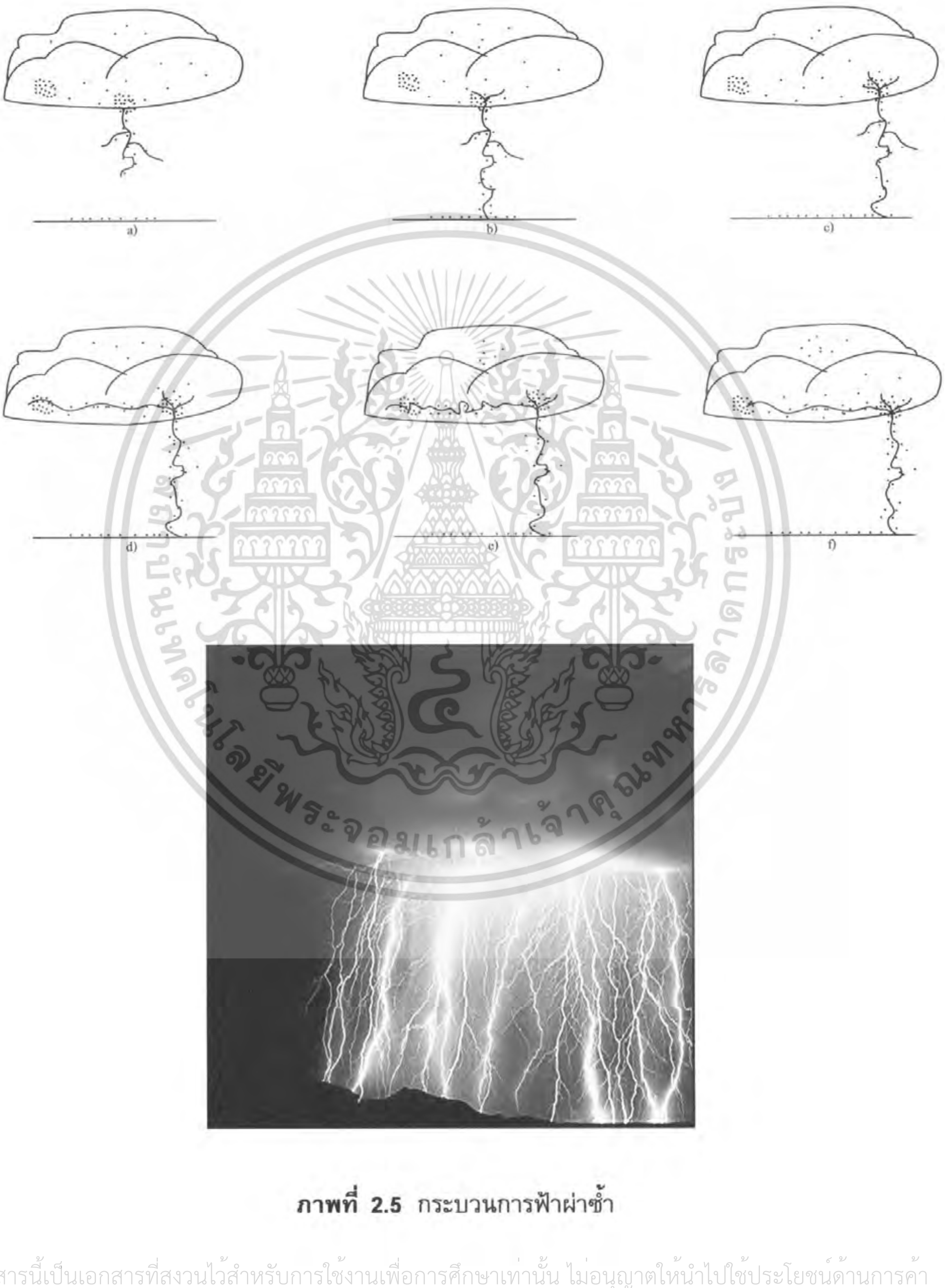
ภาพที่ 2.4 รูปคลื่นของฟ้าผ่าบวกและฟ้าผ่าลบ

2.1.4 ฟ้าผ่าซ้ำหลายลำ (Multi Strokes)

การเกิดฟ้าผ่าซ้ำหลายลำมีลักษณะดังนี้ คือ เมื่อเกิดฟ้าผ่าขึ้นในครั้งแรกจะยังคงหลงเหลือแนวของการเกิดฟ้าผ่าครั้งแรกอยู่ ถ้าประจุที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับที่ถ่ายเทลงมาในครั้งแรกนั้น อาจจะถ่ายเทลงมาตามแนวของการเกิดฟ้าผ่าครั้งแรกอีก ทำให้เกิดฟ้าผ่าอีกครั้ง ซึ่งในครั้งนี้จะไม่เกิดแนวของหัวนำร่อง (Leader) เรียกฟ้าผ่าลักษณะนี้ว่าฟ้าผ่าซ้ำ จากข้อมูลที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ต่างๆ ของฟ้าผ่า [1] ทำให้ทราบว่า ฟ้าผ่าลงพื้นโลกประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

60-70% มีลักษณะเป็นฟ้าผ่าซ้ำหลายลำ มีค่าตั้งแต่ 2 ถึงมากกว่า 20 ลำ โดยเฉลี่ยจะประกอบไปด้วย 3 - 4 ลำต่อแฟลช และแต่ละลำมีช่วงเวลาห่างกัน 15-150 ms โดยเฉลี่ยแล้วประมาณ 30-40 ms



ภาพที่ 2.5 กระบวนการฟ้าผ่าซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันเกินฟ้าผ่า ส่วนประการที่สองเป็นแรงดันเกินจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจรในระบบเรียกว่าแรงดันเกินสวิตชิ่ง เกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้น โดยช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกิน มีค่าแตกต่างกัน การเกิดแรงดันเกินสวิตชิ่งโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2 เท่าของพิกัดแรงดันซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อระบบส่งจ่ายมากนัก แต่แรงดันเกินฟ้าผ่าจะทำอันตรายกับระบบส่งจ่าย เนื่องจากขนาดของแรงดันสูงเป็นล้านโวลต์เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายโดยตรง [1]

2.2.1 แรงดันเกินภายนอก

เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประเทศไทยส่วนใหญ่ เป็นแบบเดินสายอยู่ภายนอกขึงอยู่ในอากาศ ดังนั้นระบบสายส่งจึงมีโอกาสสูงมากที่จะฟ้าผ่าได้ ทั้งในกรณีผ่าลงโดยตรงหรือการดีสชาร์จ ในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าลงบริเวณใกล้เคียง ซึ่งก็จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่งแรงสูง แรงดันเกินนี้สามารถคำนวณได้ถ้าหากทราบรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า โดยจะอาศัยหลักการคิดคำนวณตามทฤษฎีของคลื่นจร (Traveling Wave Theory) และทฤษฎีการคำนวณวงจร RLC ลักษณะรูปคลื่นแรงดันเกินภายนอกหรือแรงดันเกินอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (Lightning Impulse Voltage) นี้จะมีช่วงหน้าคลื่น หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่ายอดนั้นสั้นมาก คือ อยู่ในช่วง 1-2 μs และช่วงหางคลื่น คือ แรงดันลดลงครึ่งหนึ่งของค่ายอดในช่วงเวลาประมาณ 40-60 μs แรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าที่มีค่ายอดคลื่นสูงมากประมาณ 10 เปอร์ยูนิตหรือมากกว่านั้น จะเป็นอันตรายกับระบบส่งจ่ายอย่างมาก ซึ่งจำเป็นที่จะต้องรีบกำจัดออกจากระบบเพื่อป้องกันอุปกรณ์ในระบบส่งจ่าย โดยทั่วไปการบอกขนาดของแรงดันเกินจะบอกด้วยตัวเลข 2 ตัว อยู่ในหน่วยของเวลาซึ่งเขียนอยู่ในรูป T_1/T_2 (T_1 = ช่วงเวลาหน้าคลื่น, T_2 = ช่วงเวลาหางคลื่น) [4]

2.2.2 แรงดันเกินภายใน

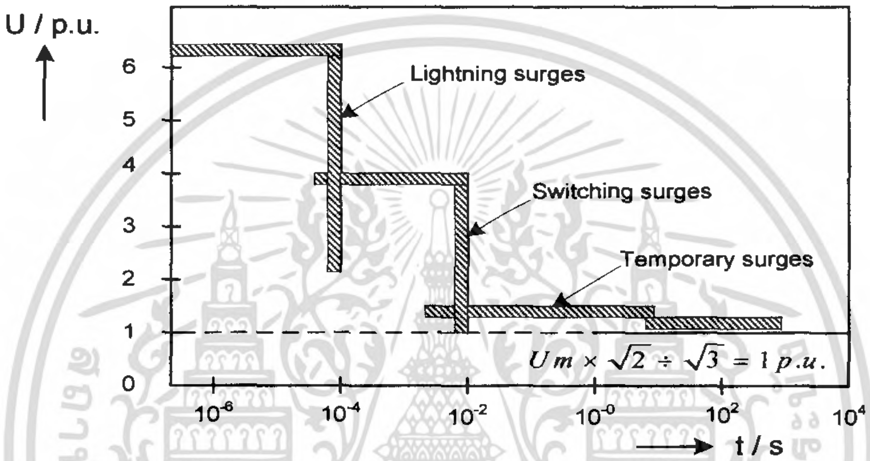
สาเหตุที่เกิดแรงดันเกินภายใน อาจเนื่องจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร ทั้งในกรณีการทำงานของผู้ปฏิบัติงานและการทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อเกิดความบกพร่องขึ้น แรงดันเกินดังกล่าวเกิดจากการทำงานของสวิตช์ เรียกว่าแรงดันเกินสวิตชิ่ง (Switching Overvoltage) หรืออิมพัลส์แบบสวิตชิ่ง (Switching Impulse) หรือเกิดจากการลัดวงจรเนื่องจากความบกพร่องของฉนวน หรือเกิดจากแรงดันเกินภายนอก คือแรงดันฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดสปาร์กหรือวาบไฟตามผิวฉนวนภายนอกที่มีความสกปรก เปียกฝน ชื้นด้วยหมอก น้ำค้าง หรือเกิดลัดวงจรเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอม หรือเกิดจากวงจรรีโซแนนซ์ เพราะค่าคาปาซิแตนซ์และอินดัคแตนซ์ในสายส่งรูปลักษณะของคลื่นแรงดันภายในนี้จะช้ากว่าแรงดันเกินภายนอก คือ ช่วงหน้าคลื่นจะอยู่ในช่วง 100 - 300 μs และช่วงหางคลื่นอยู่ในช่วง 2,000 – 3,000 μs แรงดันเกินสวิตชิ่งนี้ไม่มีความหมายต่อการทดสอบระดับการฉนวนที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำกว่า 300 kV แต่ที่ระบบแรงดันสูงกว่า 300 kV การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตช์ชิ่งจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายมากขึ้นเมื่อเทียบกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า แรงดันเกินที่เกิดจากการสวิตซิ่งมีค่ายอดคลื่นสูงประมาณ 4 เปอร์ยูนิต [1]

2.2.3 แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage)

จะแตกต่างจากแรงดันเกินเนื่องจากคลื่นเสิร์จ ช่วงความถี่ของแรงดันเกินชั่วคราวจะมีตั้งแต่ไม่กี่เฮิรตซ์ไปจนถึงหลายร้อยเฮิรตซ์ และมีช่วงระยะเวลาจากไม่กี่วินาที ไปจนถึงเป็นชั่วโมง (ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดฟอลต์) รูปแบบทั่วไปส่วนใหญ่ของแรงดันเกินชั่วคราวจะเกิดบนเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์ เมื่อมีฟอลต์ลงดินแบบ 1 เฟส หรือ 2 เฟส เกิดขึ้นแรงดันเกินแบบนี้มีค่าไม่เกิน $\sqrt{3}$ เปอร์ยูนิต และไม่มีอันตรายกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



ภาพที่ 2.6 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก , แรงดันเกินภายในและแรงดันเกินชั่วคราว

2.3 ดรอปเอาท์ฟิวส์

ดรอปเอาท์ฟิวส์เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินพิกัดที่ใช้ในระบบจำหน่ายแรงสูง ซึ่งมีการใช้งานทั่วไป เนื่องจากมีราคาถูกและมีหลักการทำงานไม่ซับซ้อนมาก โดยมีฟิวส์ลิงค์เป็นตัวทำหน้าที่หลอม-ละลายตัดวงจรออก [3] โดยดรอปเอาท์ฟิวส์ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ต้องมีค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นฟ้าผ่า ซึ่งหมายถึงค่าสูงสุดของรูปคลื่น
2. แรงดันไฟฟ้าระดับการฉนวนอิมพัลส์มูลฐาน (BIL = Basic Impulse Insulation Level) ที่ฉนวนสามารถจะทนได้
3. ต้องมีโครงสร้างที่แข็งแรง เหมาะสมที่จะติดตั้งกับเสาไฟฟ้าหรือคอนสายได้
4. แรงดันใช้งาน (Operating Voltage) จะต้องเหมาะสมกับระบบแรงดันไฟฟ้าที่ใช้อยู่ เช่น 12 , 22 , 33 กิโลโวลต์ เป็นต้น

การทำงานของดรอปเอาท์ฟิวส์จะเกิดขึ้นเมื่อ มีกระแสเกินพิกัดมากพอที่จะทำให้ส่วนหลอมละลายของฟิวส์ลิงค์เริ่มหลอมละลาย ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ไฟเบอร์ที่บุอยู่ภายในกระบอกฟิวส์ร้อน และทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซภายในกระบอกฟิวส์ ก่อนที่ส่วนหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายจะขาดออกจากกันนั้น จะเกิดอาร์กขึ้น ซึ่งอาร์กนี้จะถูกยืดและทำให้ดับไปโดยการดันออกของก๊าซทางส่วนล่างหรือส่วนหัวของกระบอกฟิวส์ เกิดแรงดึง ทำให้กระบอกฟิวส์ตกลง

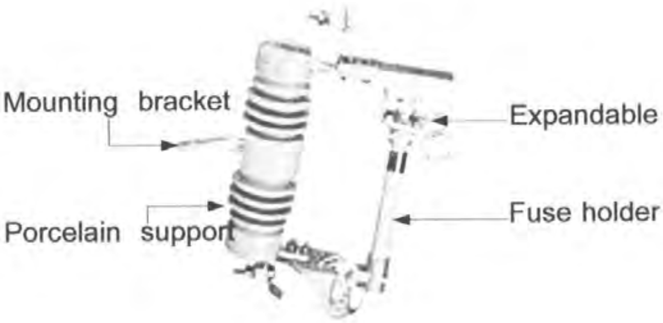
ภาพที่ 2.7 การติดตั้งดรอบเอาท์ฟิวส์ที่ใช้งานในระบบไฟฟ้า

2.3.1 ชนิดของดรอปเอาท์ฟิวส์

ดรอปเอาท์ฟิวส์แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก ชนิดที่ตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอกและชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม ส่วนการเลือกใช้งานจะต้องพิจารณาถึงสิ่งแวดล้อมเป็นหลัก[3]

1. ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก (Open Type) ฟิวส์ประเภทนี้เป็นเอ็กซ์แพนชั่น (Expansion) คือเป็นอุปกรณ์ป้องกันที่มีการพุ่งระบายของไฟและก๊าซ ในขณะที่ตัวฟิวส์หลอมขาดออกจากกันเนื่องจากการลัดวงจร
2. ชนิดที่ตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอก (Open-link Type) เป็นฟิวส์ประเภทเอ็กซ์แพนชั่นเหมือนประเภทแรก เพียงแต่ตัวฟิวส์ลิงค์เป็นชนิดที่ไม่ได้บรรจุในกระบอกฟิวส์
3. ชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม (Enclosed Type) จะเป็นฟิวส์ประเภทเอ็กซ์แพนชั่นแตกต่างจากแบบแรก เพียงแต่กระบอกฟิวส์และขั้วต่อสายใส่บรรจุอยู่ในกล่องล้อมปิด โดยโครงงานนี้เป็นการศึกษาดรอปเอาท์ฟิวส์ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอกซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังภาพที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบหลักของดรอปเอาท์ฟิวส์

จากรูปที่ 2.8 สามารถอธิบายส่วนประกอบหลัก ๆ ได้ดังนี้

1. Mounting bracket สำหรับยึดดรอปเอาท์ฟิวส์เข้ากับคอนสาย
2. Porcelain support เป็นฉนวนสำหรับติดตั้งฟิวส์คัทเอาท์กับ Mounting bracket
3. Fuse holder เป็นกระบอกที่ใส่ฟิวส์ลิงค์ บุภายในด้วยไฟเบอร์
4. Expandable cap เป็นฝาครอบอยู่บนส่วนหัวกระบอกฟิวส์

2.3.2 ฟิวส์ลิงค์

ฟิวส์ลิงค์ทำหน้าที่หลอมละลายตัดวงจรออกเมื่อเกิดกระแสเกินพิกัดมากพอที่จะทำให้ส่วนหลอมละลายของฟิวส์ลิงค์เริ่มหลอมละลายส่วนประกอบของฟิวส์ลิงค์ดังรูปที่ 2.9

ภาพที่ 2.9 ส่วนประกอบของฟิวส์ลิงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

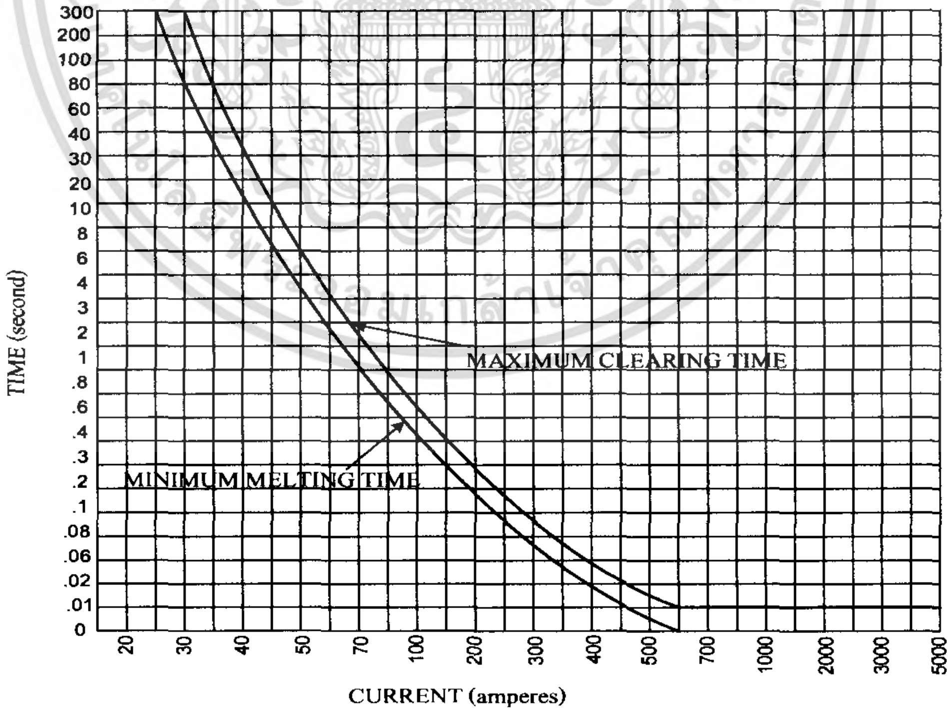
ส่วนประกอบฟิวส์ลิงค์ที่สำคัญมีดังนี้

1. ส่วนหัวของฟิวส์ (Button head) ลักษณะเป็นปุ่ม มีหน้าสัมผัสให้กระแสโหลดไหลผ่านได้สะดวก
2. ส่วนหลอมละลาย (Fusible element) จะอยู่ตอนกลางของฟิวส์ลิงค์ ทำด้วยวัสดุที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดของฟิวส์ลิงค์ เช่น ทำด้วยเงิน ดีบุก เป็นต้น โดยมีความยาวและพื้นที่หน้าตัดเป็นตัวกำหนดลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา (Time-current characteristic curve)
3. ส่วนหางฟิวส์ (Leader) เป็นทองแดงตีเกลียวสำหรับยึดฟิวส์ลิงค์กับตัวกระบอกฟิวส์

ฟิวส์ลิงค์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการทำงานคือแบบ K (แบบขาดเร็ว) และแบบ T (แบบขาดช้า) โดยทั่วไปการใช้งานดรอปเอาท์ฟิวส์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเป็นการใช้ ฟิวส์ลิงค์แบบ K เพียงอย่างเดียว เพื่อสะดวกในการสำรองฟิวส์ลิงค์และไม่ยุ่งยากสับสนในการนำไปติดตั้งใช้งาน

2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา

คุณสมบัติของฟิวส์ลิงค์แต่ละขนาดจะถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของฟิวส์ลิงค์เป็น 2 ช่วงดังรูปที่ 2.10 คือ



ภาพที่ 2.10 คุณสมบัติการทำงานของฟิวส์ลิงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 สามารถอธิบายลักษณะการทำงานของฟิวส์ลิงค์ได้ดังนี้

1. เวลาน้อยที่สุดที่ฟิวส์เริ่มหลอมละลาย (Minimum melting time)กำหนดให้ฟิวส์ลิงค์แบบ K เริ่มหลอมละลายเมื่อมีกระแสไหลผ่านฟิวส์ลิงค์เป็น 2 พิกัดขนาดฟิวส์เป็นเวลา 300 วินาที สำหรับฟิวส์ลิงค์ขนาด 1 ถึง 100 แอมแปร์ และเป็นเวลา 600 วินาที สำหรับฟิวส์ขนาด 140 และ 200 แอมแปร์
2. เวลาที่มากที่สุดที่ฟิวส์ลิงค์ขาดออกจากกัน (Maximum clearing time) เป็นเวลาที่ต้องใช้ตั้งแต่ฟิวส์เริ่มหลอมละลายจนฟิวส์ขาดและหมดอาร์ก หรือเรียกอีกชื่อว่า Total clearing time = Maximum melting time + Arcing time

2.4 กับดักฟ้าผ่า

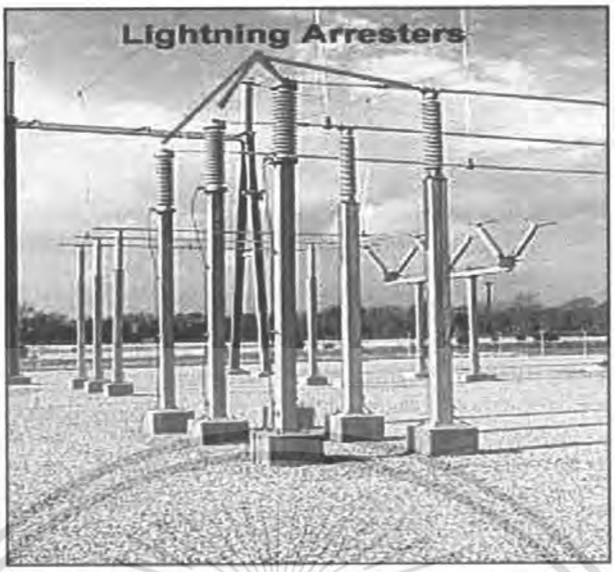
โดยในยุคเริ่มต้นที่มีการใช้ระบบไฟฟ้าแรงสูงการป้องกันแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าจะใช้ร็อคแกป (Rod Gap) ที่มีราคาถูกเพื่อเป็นตัวนำกระแสให้ไหลลงดิน แต่จะเกิดกระแสที่ความถี่กำลังไหลตาม (Power Follow Current) เนื่องจากไม่สามารถดับอาร์กได้ทันที ทำให้เกิดการลัดวงจรลงดิน และอุปกรณ์ป้องกันจะทำงาน เพื่อหยุดการนำไฟฟ้าของร็อคแกป ดังนั้นความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าจึงลดลง แต่ปัจจุบันอุปกรณ์ที่นำมาใช้ป้องกันแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ได้แก่ กับดักฟ้าผ่า โดยจะเป็นทางให้กระแสไหลลงดินเมื่อมีแรงดันเกินเข้ามาในระบบ และตัดกระแสที่ความถี่กำลังไม่ให้ไหลตามลงดินได้

กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในปัจจุบันเป็นชนิดแบบไม่มีแกป ที่มีคุณสมบัติเป็นความต้านทานที่ไม่เป็น เชิงเส้น (Non Linear Resistor) คือ มีความต้านทานต่ำ เมื่อมีแรงดันสูงขึ้น ทำให้กระแสไหลผ่านตัว กับดักฟ้าผ่าลงดินได้ กับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปครั้งแรกถูกนำเสนอโดยมัดสุโอกะในปี ค.ศ. 1971 และในสหรัฐอเมริกา กับดักฟ้าผ่าได้ถูกนำเข้ามาครั้งแรกในปี ค.ศ.1977 โดย Sakshaug et al. เพราะปัญหาเรื่องเสถียรภาพและช่วงชีวิตของสารเมทัลออกไซด์ ในช่วงแรกกับดักฟ้าผ่าจึงเป็นแบบที่มีแกปในการลดแรงดันในระบบที่ป้องกัน และต่อมาได้มีการพัฒนาสูตรและสมการต่างๆ ทำให้การใช้แกปมีความสำคัญลดน้อยลง และได้เข้าสู่การพัฒนาของกับดังฟ้าผ่าที่ไม่ใช้แกป แต่ในปัจจุบันก็ยังคงมีการใช้กับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปในระบบที่มีแรงดันสูงๆ เพื่อจำกัดปัญหาเรื่องกระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปในขณะใช้งานปกติซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานได้

กับดักฟ้าผ่าที่ถูกใช้งานอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะโครงสร้างที่สำคัญ คือ

1. กับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป หรือ Gap-Silicon Carbide Arrester
2. กับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป หรือ Gapless Zinc Oxide Arrester หรือ Metal Oxide Varister
3. กับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์ เรียกว่า Current Limiting Arcing Hom (CLAH)

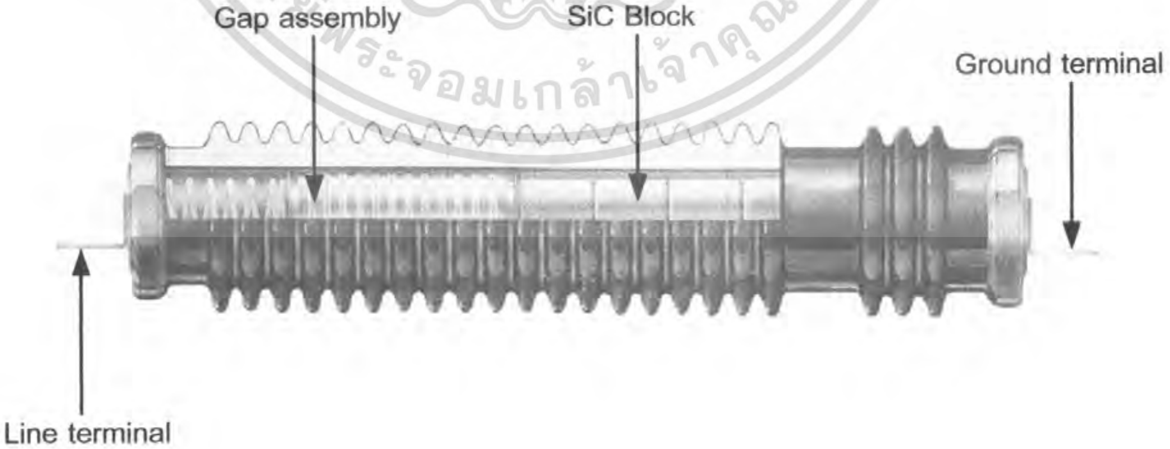
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบส่งจ่าย

2.4.1 กับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป

โครงสร้างที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป จะประกอบด้วย ช่องประกาย (Spark Gap) ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) บรรจุอยู่ภายในโครงสร้างฉนวนที่มักทำด้วยพอร์ทเลน (Porcelain Insulator) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ในการทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินนั้น ส่วนใหญ่กับดักฟ้าผ่าจะถูกติดตั้งไว้กับสายเฟสในระบบสายส่งโดยต่อจากเฟสลงดิน หรือติดตั้งไว้ที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้าในลักษณะต่อขนานกับหม้อแปลงไฟฟ้า [2]



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

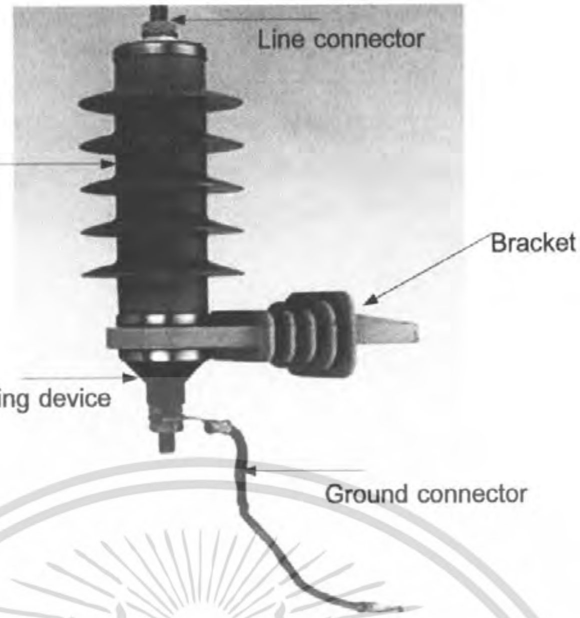
ภายใต้ภาวะระดับแรงดันใช้งานปกติของระบบไฟฟ้า กับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปจะมีความด้านทานสูงมากและไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวมันเลย เมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เช่น แรงดันเกินฟ้าผ่า จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปมีค่าสูงขึ้นหากแรงดันเกินดังกล่าวมีค่าสูงถึงค่าแรงดันประกายข้าม (Sparkover Voltage) ของกับดักฟ้าผ่าช่องประกายจะนำกระแส ทำให้แรงดันเกินทั้งหมดตกคร่อมซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งเมื่อซิลิคอนคาร์ไบด์ได้รับแรงดันสูงขึ้น ค่าความด้านทานจะมีค่าลดลง ทำให้กระแสเสิร์จไหลผ่านลงดินหรืออาจเรียกว่าเป็นการถ่ายเทประจุลงดินก็ได้ ซึ่งจะเป็นการรักษาระดับแรงดันเกินให้อยู่ในที่ระดับปลอดภัยต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ถูกป้องกันอยู่ เมื่อแรงดันมีค่าลดลงซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีค่าความด้านทานที่เพิ่มขึ้น กระแสเสิร์จที่ไหลผ่านลงดินจะมีค่าลดลง ช่องประกายข้ามจะหยุดนำกระแสในเวลาต่อมา ทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์กลับคืนสู่สภาวะทำงานปกติได้เองหลังจากที่แรงดันเกินหมดไปแต่กับดักฟ้าผ่าแบบนี้จะมีปัญหาที่สำคัญเกี่ยวกับกระแสไหลตาม (Follow Current) เนื่องจากไม่สามารถดับอาร์กที่เกิดขึ้นได้ทันที ซึ่งจะมีช่วงเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้อาร์คดับลงทำให้ยังคงมีกระแสไหลผ่านตัวกับดักฟ้าผ่าอีกเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความชำรุดเสียหายได้

2.4.2 กับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป

เนื่องจากโครงสร้างและลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนของกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป ทำให้มีการพัฒนากับดักฟ้าผ่าให้มีประสิทธิภาพ และความเชื่อถือได้ในการทำงานเพิ่มขึ้นโดยได้มีการเลือกใช้ ซิงค์ออกไซด์(ZnO) หรือ เมทัลออกไซด์ (MO) หลายๆ ชนิดมาผสมกัน ทำให้ได้ค่าความด้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น ไม่ต้องใช้ช่องประกายช่วยในการทำงาน สามารถนำกระแสเสิร์จลงดินได้ดีและช่วยให้แรงดันที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จมีขนาดต่ำลงด้วย เป็นผลดีทำให้ระดับแรงดันเกินมีค่าลดลง นอกจากนี้กับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีโครงสร้างที่ง่ายกว่ากับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป ดังภาพที่ 2.13

82992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป

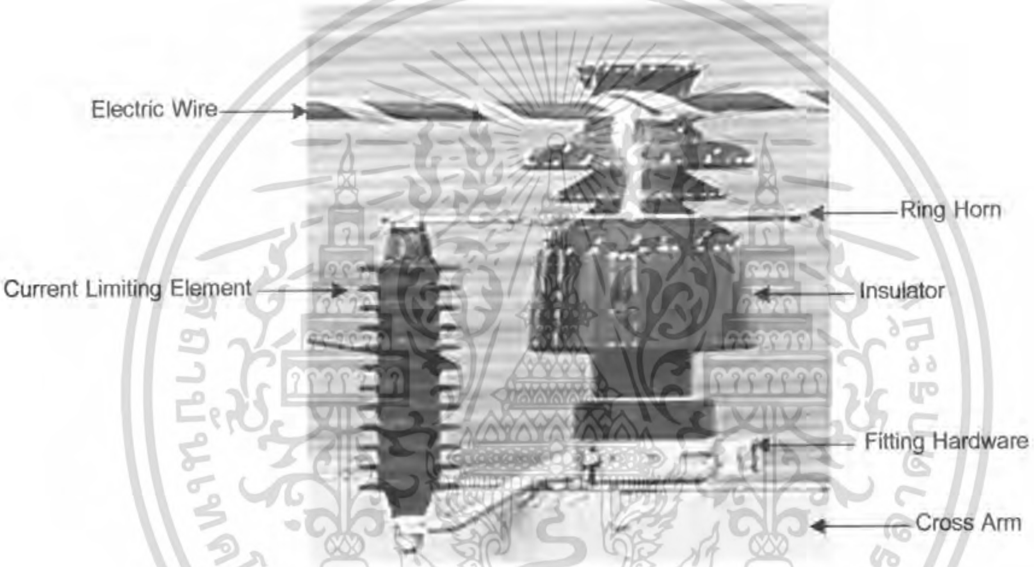
ภาพที่ 2.14 ZnO ที่อยู่ภายในกับดักฟ้าผ่า

2.4.3 กับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์

เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินชนิดหนึ่ง ที่มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วย คู่ขั้วเบี่ยงอาร์กหรือ อาร์กซิ่งฮอร์น (Arcing Horn) ต่ออนุกรมกับซิงค์ออกไซด์เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสายไฟ ในระบบจำหน่ายเนื่องจากฟ้าผ่า โดยติดตั้งไว้กับลูกถ้วยฉนวนที่เสาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหลักการทำงานของอาร์กซิ่งฮอร์นนั้น จะทำหน้าที่ดักจับแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจากการเกิดฟ้าผ่าลงบนสายเฟสโดยตรง เพื่อนำกระแสเสิร์จให้ผ่านวงแหวนอาร์กหรือริงฮอร์น (Ring Horn) ไปสู่ซิงค์ออกไซด์และปล่อยประจุผ่านลงสู่ดิน เมื่อระดับแรงดันเกินมีค่าลดลง ริงฮอร์นก็จะหยุดการประกายข้ามและหยุดนำกระแสเสิร์จลงดินในเวลาต่อมา ทำให้กับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์ กลับคืนสู่สภาวะทำงานปกติได้เองหลังจากแรงดันเกินหมดไป จากลักษณะของโครงสร้างและหลักการทำงานของกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์ ดังกล่าวจึงเปรียบเสมือนเป็นกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปภายนอกที่ทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์



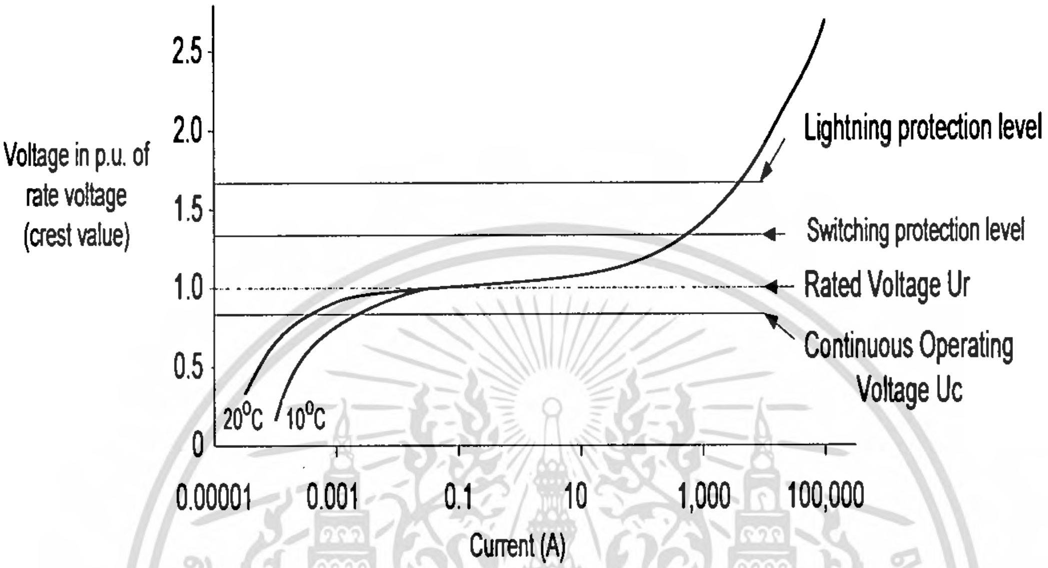
ภาพที่ 2.15 กับดักฟ้าผ่าที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วย คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก หรือ อาร์กซิ่งฮอร์น ต่ออนุกรมกับ ซิงค์ออกไซด์

2.4.4 ลักษณะสมบัติแรงดัน – กระแสของกับดักฟ้าผ่า

ถึงแม้ว่าลักษณะโครงสร้างและกลไกการทำงานของกับดักฟ้าผ่าทั้ง 3 ชนิด จะแตกต่างกันโดยเฉพาะการใช้ช่องประกายข้ามและกลไกการเกิดประกายข้าม จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป และกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์เท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติของแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่า (Residual Voltage) กับกระแสของกับดักฟ้าผ่าแบบ มีแกป และกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกปทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์ หลังจากที่เกิดการประกายข้ามช่องประกายแล้วนั้น กับดักฟ้าผ่าทั้งสองชนิดจะให้ผลตอบสนองแรงดันและกระแสในลักษณะเดียวกันกับ กับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป เนื่องจากกับดักฟ้าผ่าทั้ง 3 ชนิด มีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานที่มีค่าไม่เป็น เชิงเส้นเหมือนกัน นั่นคือที่ระดับแรงดันต่ำค่าความต้านทานจะมีค่าสูง กระแสไหลผ่านได้น้อยเมื่อแรงดันสูงขึ้นค่าความต้านทานจะมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไหลผ่านได้เพิ่มขึ้น และค่าของความต้านทานจะยิ่งมีค่าลดลงต่ำลงมากเมื่อระดับแรงดันเกินมีค่าสูงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.16 การนำกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป

จากภาพที่ 2.16 สามารถอธิบายลักษณะสมบัติการนำกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป สามารถแสดงได้ด้วยเส้นโค้งแรงดัน – กระแส (Volt – Current Curve) ของกับดักฟ้าผ่า ซึ่งจะเห็นว่าการทำงานของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ระบบไฟฟ้ามีระดับแรงดันปกติ ซึ่งจะต่ำกว่าจุดเริ่มทำงานของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป ค่าความต้านทานของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีค่าสูงมาก ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป มีค่าน้อยมากในหน่วยไมโครแอมแปร์ถึงมิลลิแอมแปร์

ช่วงที่ 2 จะมีระดับแรงดันเกินเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นแรงดันเกินที่อยู่ในระดับของแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) และแรงดันเกินสวิตชิ่ง ค่าความต้านทานของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีค่าลดลง ทำให้มีกระแสไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปเพิ่มขึ้นในหน่วยแอมแปร์

ช่วงที่ 3 แรงดันเกินที่ตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีค่าสูงมาก ซึ่งเป็นแรงดันเกินในระดับฟ้าผ่า ค่าความต้านทานของดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีค่าต่ำลงมาก ทำให้มีกระแสเสิร์จไหลผ่านดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปได้เพิ่มมากขึ้นในหน่วยกิโลแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การทดสอบอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันทรานเซี้ยนต์แบบไม่เป็นรายคาบ (Non-periodic Transient Volage) ซึ่งค่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากศูนย์ไปถึงค่ายอดแล้วค่อย ๆ ลดลงไปถึงศูนย์อย่างช้า ๆ ในทางปฏิบัติอาจแบ่งแรงดันอิมพัลส์ตามลักษณะรูปคลื่นหรือสาเหตุที่เกิดได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) มีสาเหตุมากจากแหล่งกำเนิดอื่นภายนอกระบบ ไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติที่ควบคุมไม่ได้
2. แรงดันอิมพัลส์สวิตซิ่ง (Switching Impulse) มีต้นเหตุมาจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดตอนภายในระบบเอง ซึ่งรวมทั้งการทำงานในสภาวะการตัดต่อวงจรตามปกติและในขณะเมื่อเกิดความผิดพร่อง (Fault) ขึ้นในระบบ

แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยทั่วไปจะมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ทดสอบระดับการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนต่อแรงดันเกิน อิมพัลส์ของการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นการทดสอบหาความคงทนต่อแรงดันเกินอิมพัลส์ของการฉนวนก่อนนำอุปกรณ์ไปติดตั้งใช้งานจริง หรือใช้เพื่อการศึกษาวิจัยเป็นหลัก สำหรับแรงดันที่สร้างขึ้นในห้องทดลองจะเป็นแรงดันที่เลียนแบบรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัตินั้นค่าความคงทนต่อแรงดัน อิมพัลส์ของฉนวนไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันเพราะฉะนั้นเพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จึงได้มีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน โดยจะยึดเอาลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติเป็นเกณฑ์

2.5.1 ข้อกำหนดของรูปคลื่นอิมพัลส์

ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ อาจจะกำหนดด้วยคุณสมบัติต่อไปนี้

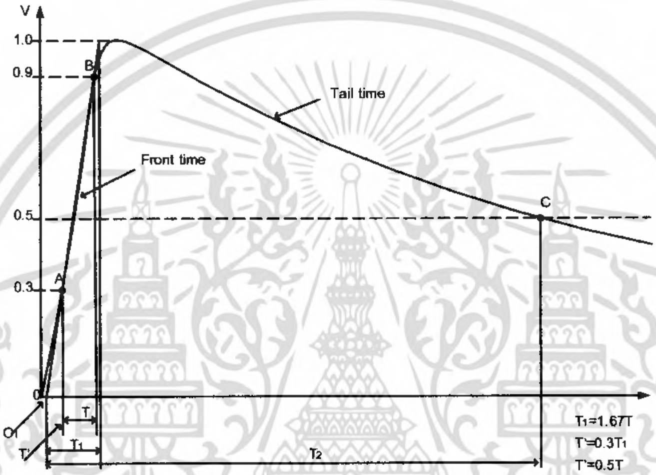
1. ขนาดแรงดัน (V_p) โดยปกติจะหมายถึง ค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่แรงดันมี ลูกระลอกซ้อนซึ่งอาจเกิดจากการออสซิลเลชั่นใกล้ๆ ยอดของรูปคลื่นให้ถือเป็นค่าเฉลี่ยจากค่ายอดของรูปคลื่นระลอกซ้อนนั้น
2. ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
3. พารามิเตอร์ทางเวลา ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดลักษณะของรูปคลื่นแรงดันทดสอบที่แตกต่างกันแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ
   - 3.1 เวลาช่วงหน้าคลื่น (Front time : T_1) คือช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มต้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดสูงสุดของรูปคลื่น
   - 3.2 เวลาช่วงหางคลื่น (Tail time : T_2) คือ ช่วงเวลาที่เริ่มนับจากแรงดันเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดสูงสุด จนกระทั่งมีขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060 -1 (1989) [4] แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (Full Wave Lightning Impulse Voltage) จะมีลักษณะรูปคลื่นตามข้อกำหนด ในรูปที่ 2.17 ซึ่งหมายถึงรูปคลื่นที่มีขนาดแรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดสูงสุด แล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งลดลงเป็นศูนย์



ภาพที่ 2.17 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ 1.67 เท่าของช่วงเวลา T ระหว่างจุดที่อิมพัลส์มีค่า 30% และ 90% ของค่ายอด คือจุด A และ B ดังภาพที่ 2.17 ถ้ารูปคลื่นมีการแกว่งซ้อนอยู่ด้วยให้ลากเส้นโค้งรูปคลื่นเฉลี่ยสัญญาณแกว่งซ้อนเสียก่อนแล้วจึงค่อยหาจุด A และ จุด B

จุดเริ่มต้นเสมือน O_1 (Virtual Origin) ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือจุดที่คิดเป็นเวลาห่างจากจุด A ในรูปที่ 2.17 ไปข้างหน้า เท่ากับ 0.3 T1 หรือ จุดตัดแนวเวลากับเส้นตารางที่ลากผ่านจุด A และ จุด B สำหรับรูปคลื่นแรงดันที่บันทึกโดยแกนเวลาและวาดอย่างเชิงเส้น

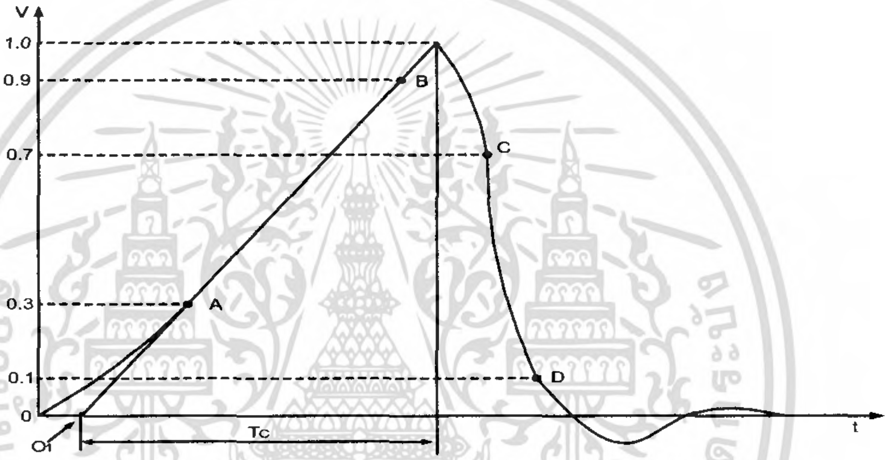
เวลาช่วงหางคลื่น T_2 ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือน O_1 กับจุดที่แรงดันลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดทางดอนหางคลื่น ดังภาพที่ 2.17

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน (Standard Lighting Impulse) ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) [4] คือ แรงดันอิมพัลส์ที่มีช่วงเวลา T_1 /T_2 เป็น 1.2 / 50 μs โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนดังนี้

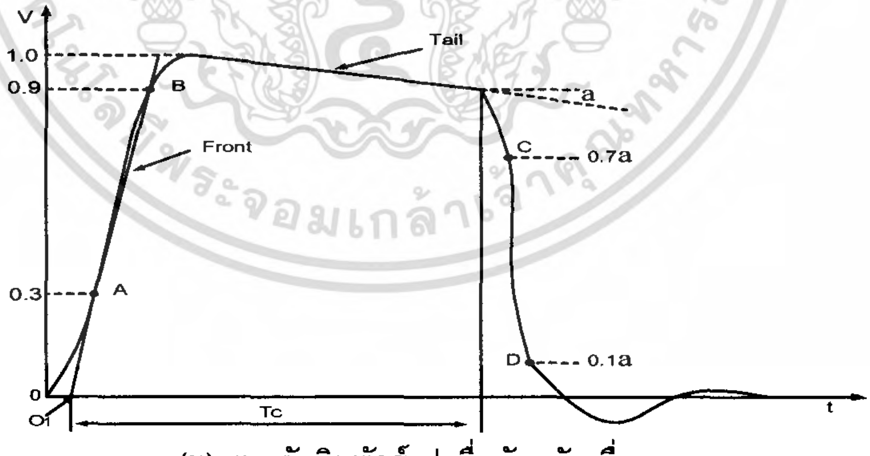
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 = $1.2\mu s \pm 30\%$
- เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 = $50\mu s \pm 20\%$
- ค่ายอดแรงดัน V_p = $1.2\mu s \pm 30\%$

2. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด (Chopped Wave Lightning Impulse Voltage) คือ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่รูปคลื่นเกิดการดีสชาร์จแบบทำลายทำให้แรงดันตกลงสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว การตัดของรูปคลื่นแรงดันอาจเกิดที่หน้าคลื่นหรือส่วนหางคลื่นก็ได้ดังภาพที่ 2.18 โดยแรงดันขณะที่คลื่นตัด (Voltage at The Instant of Chopped) คือ แรงดันในขณะที่เกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นไปรูปคลื่นนั้น เวลาช่วงคลื่นตัด T_C (Time to Chopped) คือช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือนกับช่วงเวลาขณะที่เกิดคลื่นตัด



(ก) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่น



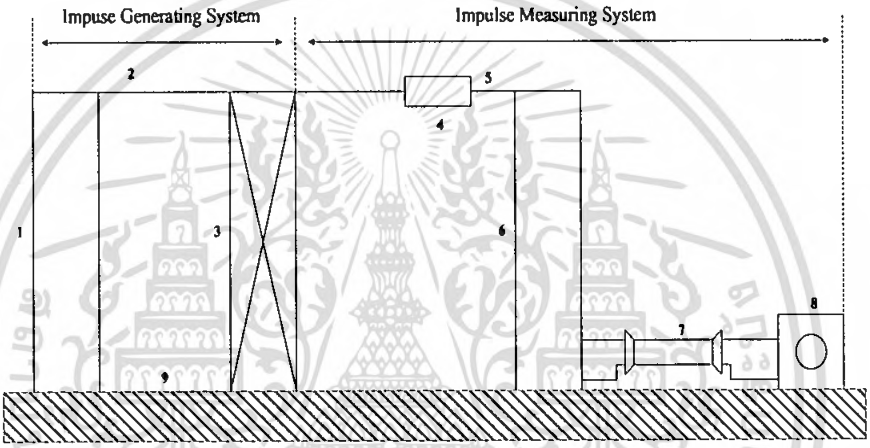
(ข) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหลังคลื่น

ภาพที่ 2.18 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเวลา ดังนั้นในการวัดแรงดันดังกล่าวด้วยอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์สิ่งที่สำคัญ คือ เครื่องมือวัดจะต้องตอบสนองต่อการวัดที่ดี นั่นคือองค์ประกอบของอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์และระบบวัดแรงดัน อิมพัลส์จะต้องออกแบบมาเป็นพิเศษ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของการวัดในย่านทรานเซี้ยนต์ดี มีผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ ที่สำคัญระบบการวัดจะต้องไม่เป็นโหลดหรือส่งผลต่อแหล่งกำเนิด ซึ่งต้องมีการป้องกันผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวเพื่อให้ได้พิกัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันสูงทั้งหมดไปตกคร่อมเฉพาะวัสดุทดสอบเท่านั้นวงจรพื้นฐานที่ใช้ในระบบการวัดแรงดันอิมพัลส์แสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 วงจรพื้นฐานการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์

เมื่อ	1	คือ	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
	2	คือ	สายนำแรงสูงจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไปยังวัสดุทดสอบ
	3	คือ	วัสดุทดสอบ (Test Object)
	4	คือ	ความต้านทานหน่วง
	5	คือ	สายนำแรงสูงที่ต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดิไวเดอร์
	6	คือ	โวลเตจดิไวเดอร์
	7	คือ	เคเบิลวัดแรงดันต่ำ
	8	คือ	เครื่องวัดภาคแรงต่ำ (Oscilloscope)
	9	คือ	ระบบสายดิน (Ground)

องค์ประกอบของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย โวลเตจดิไวเดอร์, ออสซิลโลสโคป, สายนำแรงสูง, ความต้านทานหน่วง, ความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านแรงดันสูง, ความต้านทานด้านแรงดันต่ำ, ความต้านทานแมชชิ่งและระบบกราวด์ของวงจร โดยองค์ประกอบที่สำคัญมีดังนี้

2.6.1 โวลเตจดิไวเดอร์ (Voltage Divider)

โวลเดจดิไวเดอร์ทำหน้าที่ ลดทอนแรงดันสูงให้ต่ำลงในย่านที่เครื่องมือวัดทั่วไปสามารถจะวัดได้ ซึ่งใช้หลักการแบ่งแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงและอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ และนำแรงดันที่ตกคร่อมภาคแรงต่ำไปยังเครื่องมือวัด โวลเดจดิไวเดอร์ส่วนใหญ่จะใช้ช่วงเวลาขาขึ้นของผลตอบสนองรูปคลื่นในการพิจารณาความไวของผลตอบสนองทางเวลา โดยเมื่อพิจารณา อิมพัลส์โวลเตจไวเดอร์แบบความต้านทานพบว่าสเตรย์คาปาซิแตนซ์ (Stray Capacitance) จะมีผลต่อเวลาตอบสนองอย่างมากในช่วงที่มีการอัดประจุและดีสชาร์จประจุผ่านโวลเดจดิไวเดอร์ โวลเดจดิไวเดอร์แบบความต้านทานสามารถลดผลของสเตรย์คาปาซิแตนซ์ได้ โดยการออกแบบให้มีค่าความต้านทานต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้แต่ต้องไม่ส่งผลต่อการเป็นโหลดของแหล่งกำเนิด หรืออาจจะลดผลของสเตรย์- คาปาซิแตนซ์ด้วยการใส่ชิลด์อิเลคโตรดที่ส่วนปลายของโวลเดจดิไวเดอร์

2.6.2 แท่งตัวนำแรงสูง (High-Voltage Lead)

แท่งตัวนำแรงสูงจะต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเดจดิไวเดอร์ ความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวนำอาจจะมีผลต่อการวัดแรงดันอิมพัลส์ โดยควรมีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางที่แน่นอน และที่สำคัญควรจะปรับเทียบค่าทุกครั้งก่อนที่จะทำการทดสอบ ในทางทฤษฎีนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวนำควรมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรน่า (Corona) แท่งตัวนำขนาดเล็กนั้น จะส่งผลทำให้เกิดโคโรน่า และเกิดสัญญาณรบกวนต่อระบบวัดโดยทั่วบริเวณใกล้กับโวลเดจดิไวเดอร์ไม่ควรเกิดดีสชาร์จหรือสตรีมเมอร์ และควรต่อแท่งตัวนำกับวัสดุทดสอบไม่ควรต่อกับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงอิมพัลส์โดยตรง อย่างไรก็ตามเมื่อวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มหรือแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากลักษณะการต่อเชื่อมแท่งตัวนำแรงสูงระหว่างโวลเดจ ดิไวเดอร์กับวัสดุทดสอบนั้นจะไม่นำมาคิด ถ้าเทอม $\sqrt{LC}$ มีค่าน้อยกว่า 0.05 ns โดยที่ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำแฝงในแท่งตัวนำแรงสูง (ประมาณ 1 μH/m) และ C คือค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างแท่งตัวนำแรงสูงลงดิน โดยถือว่าระยะห่างระหว่างโวลเดจดิไวเดอร์กับวัสดุทดสอบก็คือความยาวของแท่งตัวนำแรงสูง มีขนาดเท่ากับความสูงของวัสดุทดสอบนั่นเอง

2.6.3 ความต้านทานหน่วง (Damping Resistance)

ความต้านทานหน่วงทำหน้าที่หน่วงการแกว่ง (Oscillation) ที่สภาวะทรานเซี้ยนต์เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำในสายนำแรงสูงหรือแท่งตัวนำแรงสูงกับค่าความจุไฟฟ้าของโวลเดจดิไวเดอร์เอง ความต้านทานหน่วงที่ใช้จะเป็นแบบมีค่าความเหนี่ยวนำแฝงและค่าความจุไฟฟ้าแฝงต่ำ ความต้านทานหน่วง นี้อาจจะต่อไว้ที่ต้นสายนำแรงสูงดังรูปที่ 2.19 หรืออาจต่อไว้ที่ปลายสายนำแรงสูงติดกับโวลเดจดิไวเดอร์ก็ได้ ถ้าต่อไว้ที่ต้นสายแรงสูงเรียกระบบวัดนี้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"ระบบสามองค์ประกอบ" (Three-Component Sysem) ถ้าต่อไว้ที่ปลายสายนำแรงสูงติดกับโวลเตจดิไวเดอร์ ความต้านทานหน่วงนี้จะถือเป็นส่วนหนึ่งของโวลเตจดิไวเดอร์และเรียกระบบนี้ว่า "ระบบสององค์ประกอบ" (Two-Component System) ถ้าสายแรงสูงมีความยาวมาก การต่อความต้านทานหน่วงแบบสามองค์ประกอบ โดยใช้ค่าความต้านทานหน่วงเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแรงสูง จะช่วยลดการแกว่งที่เกิดขึ้นในสภาวะทรานเซี้ยนต์อันเนื่องมาจากอิมพีแดนซ์ที่ไม่แมชกันของแท่งตัวนำแรงสูงกับวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และโวลเตจดิไวเดอร์

2.6.4 ออสซิลโลสโคป

เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น ดังนั้นออสซิลโลสโคปที่ใช้วัดต้องมีความไว(Sensitivity) ในการวัดสูง ซึ่งแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้อาจมีทั้งรูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัด เมื่อวิเคราะห์ออกมาเป็นสเปกตรัม (Spectrum) จะพบว่ามีความถี่ต่างๆ เป็นช่วงกว้างมาก ซึ่งออสซิลโลสโคปจะต้องมีแบนวิดท์ที่กว้างมากพอและต้องมีการป้องกันหรือไม่ไวต่อคลื่นรบกวนที่เกิดจากสาเหตุอื่นภายนอกและควรจะมีอัตราแรงดันป้อนเข้าสูง เพราะจะเป็นผลดีในการขจัดคลื่นรบกวนให้น้อยลง

2.6.5 เคเบิลวัด

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถต่อออสซิลโลสโคปเข้าโดยตรงกับภาคแรงต่ำของโวลเตจ ดิไวเดอร์ได้ ทั้งนี้เพราะเพื่อความปลอดภัยของผู้วัดและเพื่อลดการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จึงจำเป็นจะต้องวางออสซิลโลสโคปให้ห่างจากโวลเตจดิไวเดอร์พอสมควร ดังนั้นการส่งสัญญาณของอุปกรณ์ทั้งสองจึงต้องใช้สายนำสัญญานแบบแกนร่วม (Coaxial Cable) สายเคเบิลที่ใช้ต้องมีชีลด์อย่างน้อยสองชั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในสายเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดสัญญาณรบกวนปนไปกับสัญญาณที่ต้องการวัด ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์จะต้องพิจารณาเป็นแบบสัญญาณคลื่นจร (Travelling Wave) เมื่อคลื่นจรเข้ามาที่ต้นสายเคเบิลจะมองเห็นเคเบิลเป็นความต้านทานบริสุทธิ์เท่ากับ Z_w (Surge Impedance) ไม่ขึ้นกับโหลดที่ปลายสายเคเบิลว่ามีลักษณะเปิดวงจรหรือลัดวงจรอยู่ในขณะนั้น นั่นคือโหลดที่ปลายทางจะไม่มีผลต่อสัญญาณรบกวนต้นทางจนกว่าจะถึงเวลา 2 เท่าของคลื่นเดินทาง τ (Transit Time) และค่าเวลา τ ของสายเคเบิลวัดจะพิจารณาเป็นแบบเดียวกันกับกรณีของสายส่ง ถ้าเวลา τ นั้นมีค่าใกล้เคียงกับเวลาขาขึ้นของคลื่น (Rise Time)

2.6.6 ความต้านทานแมชชิ่ง (Matching Resistance)

ในการวัดแรงดันทรานเซี้ยนต์ (Transient) ที่ส่งผ่านจากโวลเตจดิไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัดทางด้านแรงต่ำอาจทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นได้ ในที่นี้พิจารณาจากการต่อแมชชิ่งอิมพีแดนซ์เพื่อส่งผ่านแรงดันอิมพัลส์จากโวลเตจดิไวเดอร์ ไปยังเครื่องมือวัด โดยพิจารณาเคเบิลวัดเป็นสายส่งแบบไม่มีพลังงานสูญเสียในสาย (Lossless) ดังนั้นค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z_w = \sqrt{L/C}$ จึงไม่ขึ้นอยู่กับความถี่และเวลาคลื่นเดินทาง $\tau = \sqrt{LC}$ สำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบต้านทานต่อขนานเข้ากับ R_2 ดังนั้นจึงต้องพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์ด้วย

ในกรณีโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ เคเบิลวัดไม่สามารถต่อแมชชิ่งที่ปลายได้ เนื่องจากความต้านทานที่มีค่าต่ำ เมื่อต่อขนานเข้ากับ C_2 จะไปรวมกับภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์และแรงดันขาเข้าจะมีขนาดลดลงตามเวลา เพื่อหลีกเลี่ยงการแกว่งของคลื่นเดินทางเคเบิลวัด จึงควรต่อ แมชชิ่งที่ต้นทาง แรงดันตกคร่อม C_2 สะท้อนกลับมาถึงต้นทางที่มี $R_m = Z_w$ ต่ออนุกรมอยู่ และแรงดัน C_2 เสมือนกับลัดวงจรจึงไม่ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับอีก

2.6.7 สายดิน

สายดินจะทำหน้าที่เชื่อมโยงจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้ระบบทดสอบมีศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานต่ำ เพื่อลดแรงดันตกใน สายดินให้น้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบางขนาดใหญ่ปูบนพื้นห้องทดสอบ เช่น แผ่นทองแดง เป็นต้น

2.7 การตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)

การตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน จัดเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งเป็นการตรวจสอบว่ามีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นหรือไม่ ถ้ามี จะเกิดขึ้นที่แรงดันเท่าใด และเรียกว่าแรงดันดีสชาร์จเริ่มเกิด (U_1)

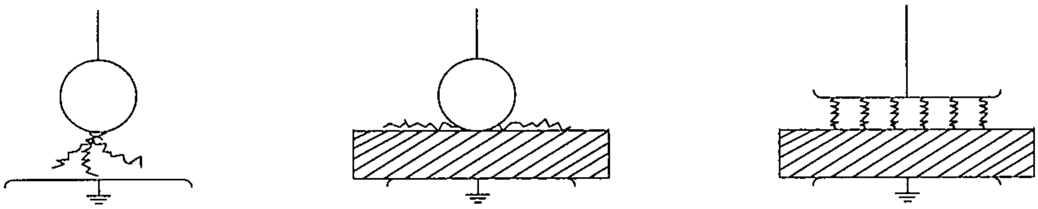
ดิสชาร์จบางส่วน คือ ดีสชาร์จเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดดีสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด จึงเรียกว่า ดีสชาร์จบางส่วน เพราะฉนวนของอิเล็กโตรดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ ยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่

ดีสชาร์จบางส่วน จะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่อาจจะทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้ หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น

ดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และสนามไฟฟ้ากระแสตรง ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ดีสชาร์จจะเกิดขึ้นซ้ำทุกๆ ไซเคิลของแรงดัน โดยปกติจะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่ายอด

ดีสาชาร์จบางส่วน อาจแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือโคโรน่าดีสชาร์จ ดีสชาร์จตามผิว และ ดีสชาร์จภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) โคโรนาดิสชาร์จ   b) ดิสชาร์จตามผิว   c) ดิสชาร์จภายในรอยต่อ

d) ดิสชาร์จภายโพรงก๊าซ   e) ดิสชาร์จภายในสิ่งแปลกปลอม

ภาพที่ 2.20 รูปแบบของดีสชาร์จบางส่วน

2.7.1 ผลกระทบของดีสชาร์จบางส่วน

ดีสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิดพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย และอายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง

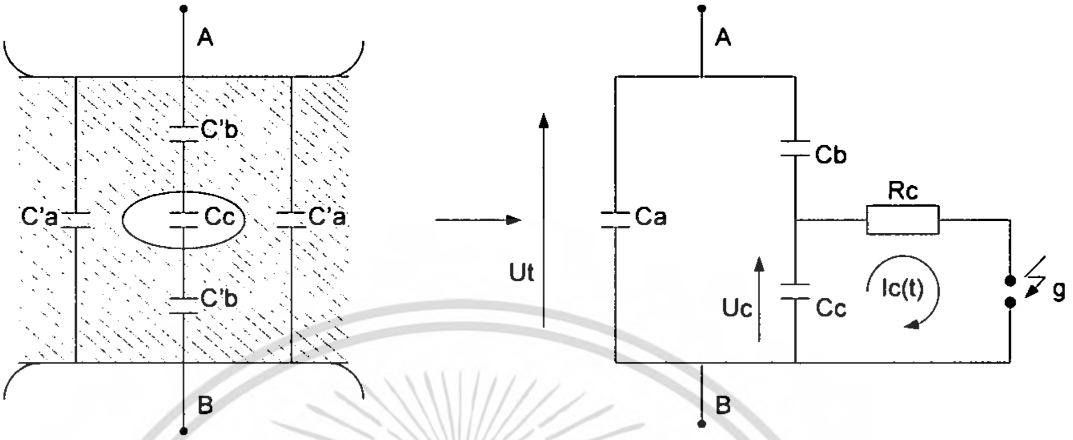
ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้ยาวนาน การออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพดีพอ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติจะต้องต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวน จะต้องไม่มีดิสชาร์จบางส่วนแม้จะมีแรงดันเกินอันเนื่องมาจากแรงดันกระเพื่อมเกิดขึ้น อย่างไรก็ดาม การฉนวนอุปกรณ์แรงสูงมีความยุ่งยากซับซ้อน การดีสชาร์จบางส่วนอาจเกิดขึ้นโดยมิได้ตั้งใจหรืออาจมีความบกพร่องในกระบวนการผลิต หรือคุณภาพของฉนวนไม่ได้ตามกำหนด ฉะนั้นเพื่อความมั่นใจในคุณภาพของการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จำเป็นต้องมีการทดสอบตรวจวัดค่าการดีสชาร์จบางส่วน [1]

2.7.2 วงจรสมูลของดีสชาร์จบางส่วน

โดยเหตุที่ดีสชาร์จบางส่วนภายใน ที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนหรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกต เห็นได้ด้วยตา ฉะนั้นเพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลของฉนวนที่มีดีสชาร์จบางส่วนขึ้น ไม่ว่าจะเป็นดีสชาร์จบางส่วนชนิดใดก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ [1] เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าจึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดีสชาร์จบางส่วนภายใน ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่ 2.21



(ก) (ข)

รูปที่ 2.21 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน

ในรูปที่ 2.21 (ก) แสดงวัสดุฉนวน มีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด A-B โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับฟองก๊าซหรือ C_c เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_b' ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้จะรวมกันได้เป็น C_b ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ดีอยู่โดยรอบของ C_c จะให้เป็นค่า C'_a และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_a ดังรูปที่ 2.21 (ข) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่าๆ กับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มาก ๆ นั่นคือ

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

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

$$\Delta q_c = \delta U_c C_c \tag{2.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta U_c}{C_b + C_a} \qquad (2.2)$$

ค่าแรงดันตกนี้ไม่ให้ข้อมูลอะไรเกี่ยวกับ δq_c เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ $C_b \delta U_c$ แต่ค่า δU_t นี้วัดได้เป็นพัลส์รูปขั้น ขึ้นอยู่กับ i_c(t)

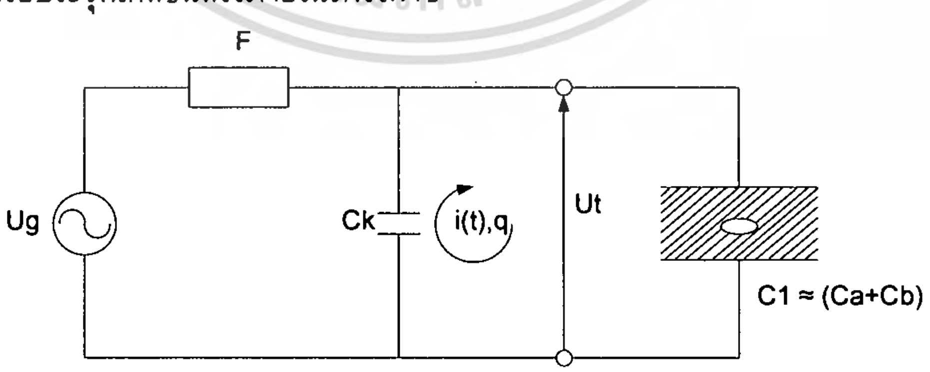
เมื่อแทนค่า $$\delta U_c = \delta q_c$$

จะได้ $$\delta U_t = \frac{C_b \delta q_c}{C_c (C_b + C_a)} \qquad (2.3)$$

ค่าของ δU_t มีค่าเพียงเป็นมิลลิโวลต์ถึงโวลต์ ในขณะที่ δU_c มีค่าเป็นกิโลโวลต์ แต่ไม่ทราบค่า C_c และ C_b จึงไม่อาจหาความสัมพันธ์ของ δU_t กับ δU_c และ δq_c ได้ อย่างไรก็ตาม การดีสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทประจุหรือกระแสในวงจรภายนอกที่สามารถตรวจวัดได้

2.7.3 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ดีสชาร์จบางส่วนภายในเกิดขึ้นในฉนวน หรือภายในอุปกรณ์ที่ห่อหุ้มมิดชิด ฉะนั้น ประจุหรือกระแสที่เกิดจากการดีสชาร์จในโพรงก๊าซนั้นไม่สามารถวัดได้ แต่การดีสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c นั้น มีผลให้เกิดการถ่ายเทประจุ เป็นผลให้เกิดแรงดันตก δU_t ที่ขั้วป้อนแรงดันภายนอก *A-B* และการเคลื่อนที่ของประจุ หรือเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องจากแรงดันตก เป็นค่ากระแสชดเชยที่วัดได้ (measurable current) i(t) ดังรูปที่ 2.22 แต่มิใช่กระแสหรือประจุที่เกิดขึ้นตรงภายในโพรงก๊าซ



ภาพที่ 2.22 การดีสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ U_g คือ ตัวจ่ายแรงดันป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุ ทดสอบ C_t

C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

C_t คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบประกอบด้วย C_a, C_b, และ C_c ดังรูปที่ 2.24

I(t),q คือ กระแสพัลส์ดีสชาร์จบางส่วนที่ถ่ายทอดระหว่าง C_k กับ C_t เพื่อชดเชยแรงดันที่ตก δU_t คร่อม $C_t \approx (C_a + C_b)$

F คือ ตัวกรองสัญญาณ

ค่ากระแสไหลวน i(t) ที่วัดได้นี้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนค่าเก็บประจุ C_k/C_t เพราะประจุจะเคลื่อนที่จากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ที่ชดเชยแรงดันตก $q = (C_a + C_b)\delta U_t$ ในกรณีของอุดมคติ $C_k >> C_t$ และ $C_t \approx C_a + C_b$ ประจุ q จะมีค่ามากที่สุด
ค่า $C_k >> C_t$ ค่า δU_t จะได้รับชดเชยสมบูรณ์และประจุที่ถ่ายเทก็คือ กระแส i(t)

ประจุถ่ายเทหาได้จากสมการ
$$q = \int i(t)dt = \left\{C_a + \frac{C_c C_b}{C_c + C_b}\right\}\delta U_t \tag{2.4}$$

เพราะว่า $C_b < C_c$ จึงได้
$$q = (C_a + C_b)\delta U_t \tag{2.5}$$

เมื่อแทนค่าจาก (2.3) จะได้
$$q = \frac{C_b}{C_c}\delta q_c \tag{2.6}$$

ประจุ q นี้ เรียกว่า ประจุที่ปรากฏของพัลส์การดีสชาร์จ เพราะว่าประจุ q นี้ไม่เท่ากับ ประจุที่เกิดจริงในโพรงก๊าซ C_c แต่สัมพันธ์กับ δq_c ด้วยอัตราส่วนของ C_b / C_c และเป็นพื้นฐานของหลักการวัดการดีสชาร์จบางส่วน ที่มีความเป็นจริงมากกว่า δU_t ในสมการ (2.3) โดยที่ C_a เป็นค่าเก็บประจุหลักของ C_t ซึ่งไม่มีผลเกี่ยวกับค่าการดีสชาร์จบางส่วน

ในทางปฏิบัติ เงื่อนไขที่จะทำให้ได้ $C_k >> C_t$ หมายถึง ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยวมีค่ามากๆ นั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าจะกลายเป็นโหลดให้กับตัวจ่ายแรงดัน และไม่ประหยัด อย่างไรก็ดาม ค่าเก็บประจุ C_k ใหญ่กว่า C_t วัสดุทดสอบเพียงเล็กน้อย จะเป็นผลทำให้ความไวในการตรวจจับ หรือตรวจวัดการดีสชาร์จบางส่วนนั้นน้อยลง เนื่องจากกระแสชดเชย i(t) จะมีค่าน้อยลง

เมื่อพิจารณาจากการถ่ายเทของประจุระหว่าง C_t กับ C_k จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q = C_t \delta U_t \text{ เมื่อ } C_t \approx C_a + C_b$$

นั่นคือ
$$q = (C_t + _k)\delta U_t' \tag{2.7}$$

เมื่อ $\delta U_t'$ คือ แรงดันที่ขั้วหลังจากสิ้นสุดการถ่ายเทประจุ ประจุที่ปล่อยจากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k สามารถวัดได้ และเรียกว่าประจุที่วัดได้ q_m (measurable current)

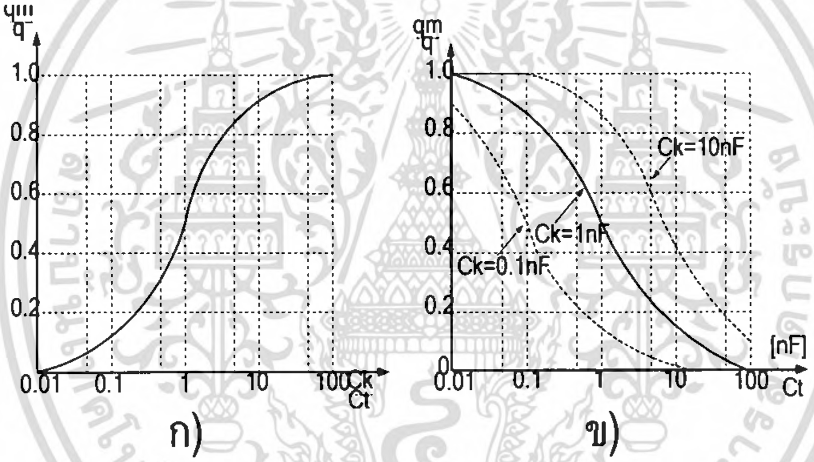
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_m = C_k \delta U_t^{'} \quad (2.8)$$

ฉะนั้น อัตราส่วนของประที่วัดได้ ต่อประจุปรากฏ คือ

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{(C_t + C_k)} \quad (2.9)$$

ความสัมพันธ์ของ q_m/q ในเทอมของ C_k / C_t หรือในเทอมของ C_t ดังแสดงในกราฟภาพที่ 2.22 ซึ่งจะช่วยให้เลือกค่า C_k ให้โดพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_t แฟกเตอร์วงจร q_m /q และความไวการวัดอาจตรวจสอบได้ จึงต้องมีการปรับเทียบวงจรทดสอบ โดยการป้อนประจุที่ทราบค่าแน่นอนและถูกต้องที่วัสดุทดสอบ ผลของ C_k/C_t ต่อความไวในการวัด แสดงโดย q_m/q ดังภาพที่ 2.23

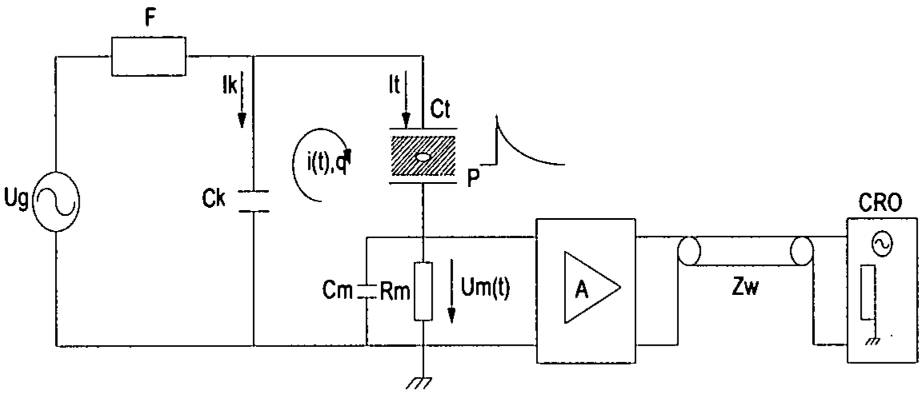


ภาพที่ 2.23 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ต่อความไวการวัด q_m/q ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_k/C_t

2.7.4 วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดีสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับใช้วัดดีสชาร์จบางส่วน จะประกอบไปด้วยตัวจ่ายแรงดันทดสอบ Ug คือ หม้อแปลงทดสอบป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ผ่านตัวกรองความถี่สูง F ดังภาพที่ 2.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



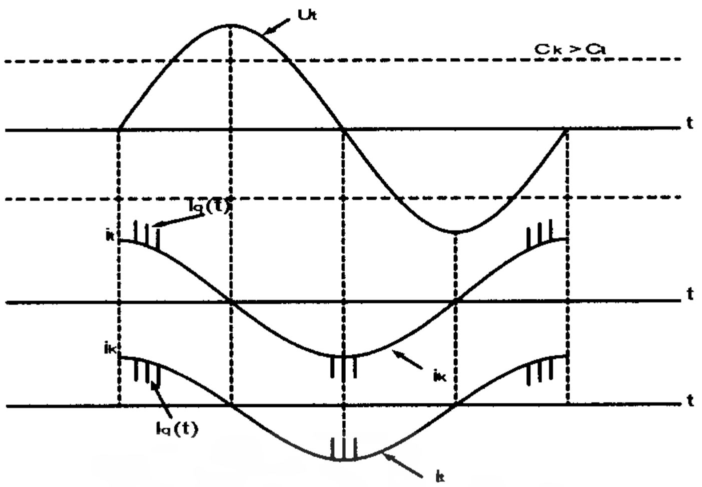
ภาพที่ 2.24 วงจรพื้นฐานของการวัดดีสชาร์จบางส่วน

เมื่อ U_g คือ ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุที่ใช้ทดสอบ P

F คือ ตัวกรอง ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์มีค่าสูงที่ความถี่สูง นั่นคือ ตัวกรองจะทำหน้าที่กันไม่ให้คลื่นรบกวนความถี่สูงจากตัวจ่ายเข้าไปรบกวนวงจรทดสอบแต่ยอมให้กระแสทดสอบความถี่ต่ำไหลผ่านไปได้ ในเวลาเดียวกัน F จะทำหน้าที่กันไม่ให้สัญญาณดีสชาร์จบางส่วน จากวัสดุทดสอบไหลหนีออกไปทางตัวจ่ายแรงดันได้ ตัวกรองนี้ อาจประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L หรือประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C เป็นวงจร π ก็ได้

C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบหรือใหญ่กว่า ในเชิงปฏิบัติ C_k จะมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 1000 pF เพื่อให้มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำพอที่จะทำให้กระแสดีสชาร์จบางส่วน i(t) ซึ่งมีค่า < 100 μA เป็นพัลส์แคบๆ ไหลได้ครบวงจรเป็นกระแสที่วัดได้ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เมื่อเกิดดีสชาร์จในโพรงก๊าซของฉนวน จะทำให้แรงดันที่ขั้วทดสอบ ตกไปเท่ากับ δU_t และเป็นสาเหตุให้เกิดการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุ C_k เข้าไปทดแทน นั่นคือ จะมีกระแสไหลวน i(t) ที่สามารถตรวจจับหรือวัดได้ (Measurable Current) ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ซ้อนอยู่บนรูปคลื่นกระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ i_t และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว i_k (C di/dt) กระแสทั้งสองจะมีมุมเฟสนำหน้าแรงดันที่ป้อนประมาณ 90 องศา ถ้าไม่มีค่าเก็บประจุสเตรย์ขนานกับ C_t กระแสพัลส์ ดีสชาร์จบางส่วน i(t) ที่ซ้อนบนรูปคลื่นกระแสป้อนนี้จะมีขนาดเท่ากันแต่ขั้นตรงกันข้าม ดังภาพที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.25 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของดีสชาร์จบางส่วน

เมื่อ U_t คือ แรงดันที่ป้อน

i_t คือ กระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ Ct

i_k คือ กระแสที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว Ck

$i_q(t)$ คือ กระแสพัลส์ดีสชาร์จบางส่วน (PD) ที่วัดได้

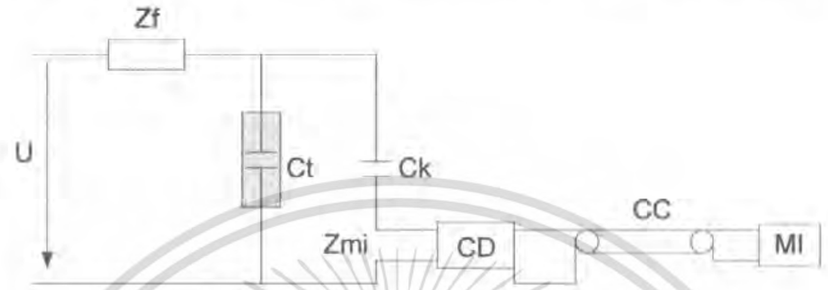
ในการวัดที่ถูกต้องนั้น ค่าความด้านทาน (R_m) ดังภาพที่ 2.25 จะต้องแมช (match) กันกับเคเบิลวัดที่มีอิมพีแดนซ์ (Z_w) ถ้าค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบน้อย แรงดันที่ได้จากกระแสดีสชาร์จบางส่วนนี้ จะจำแนกจากกระแสประจุ i(t) ได้ชัดเจน ในแต่ละครึ่งไซเคิลของแรงดันที่ป้อนจะมีจำนวนพัลส์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ และลักษณะตำแหน่งของการเกิดผิดพร่อง ถ้าวัสดุทดสอบที่มีจุดผิดพร่องหลายแห่ง จำนวนพัลส์การดีสชาร์จบางส่วนจะมีมากขึ้น ซึ่งมีช่วงห่างระหว่างพัลส์เป็น μs หรือเร็วกว่านั้น โดยทั่วไปจะสังเกตเห็นอัตราการเกิดดีสชาร์จ มีค่าสูงมากที่สุดเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน dU_t/dt มีค่าสูงสุดฉะนั้นขั้วของพัลส์จะไม่ขึ้นอยู่กับขั้วของแรงดันทดสอบ U_t แต่จะขึ้นอยู่กับเครื่องหมายการเปลี่ยนแปลง dU_t/dt ตรงกันข้ามในกรณีดีสชาร์จโคโรน่า ซึ่งเป็นการดีสชาร์จบางส่วนเกิดภายนอกจะเกิดที่ยอดของแรงดันทดสอบและเครื่องหมายของพัลส์การดีสชาร์จบางส่วนจะสอดคล้องกับขั้วของแรงดันทดสอบที่ป้อน

ภาพที่ 2.24 เป็นวงจรทดสอบที่ใส่แอมปลิฟายเออร์ที่มีแบนวิดท์สูงมาก ที่ต้นทางเคเบิลวัดจะทำให้เคเบิลวัดสัญญาณไม่ต่อกันทางไฟฟ้ากับความด้านทาน R_m เพราะ R_m มีค่าสูงมาก จะมีผลให้การวัดคลาดเคลื่อน ในการนี้จึงใส่ตัวเก็บประจุ C_m ประมาณ 10 pF ที่ต่อระหว่างปลายล่าง C_t กับดิน และขนาดกับ R_m จึงเป็นทางเบี่ยงของสัญญาณประกอบกับที่มีความถี่สูงมากๆ ของ i(t) ฉะนั้น i(t) เป็นพัลส์สั้นๆ รูปร่างและค่ายอดบิดเบือน C_m จะทำการอินทีเกรด และ R_m ที่ใส่ไว้จะมีผลให้เกิดการหน่วงด้วยเวลาคงตัว $R_mC_tC_k/(C_t + C_k)$ [1]

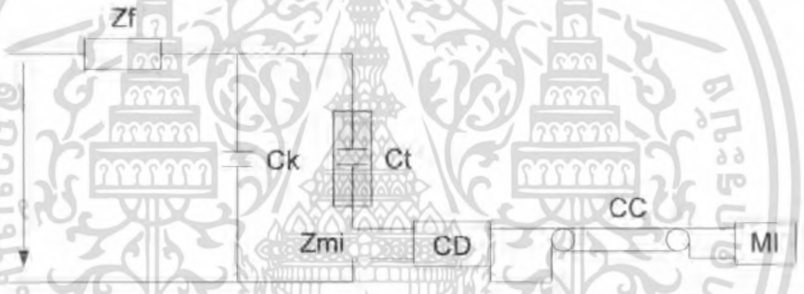
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5 การต่อวงจรระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนในวงจรทดสอบ

ในการต่อวงจรของระบบวัดการดีสชาร์จบางส่วน ในวงจรทดสอบจะมีความแตกต่างกันตรงที่การต่ออิมพีแดนซ์วัด Z_m ซึ่งมาตรฐานการวัดการดีสชาร์จบางส่วน ฉบับใหม่คือ IEC 60270 เรียกว่าอุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling Device) CD ประกอบเป็นอิมพีแดนซ์วัด Z_{mi} ต่อที่ต้นระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบดังรูปที่ 2.26 ซึ่งเป็นวงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนโดยตรง



(ก) CD ต่ออนุกรมกับ Ck



(ข) CD ต่ออนุกรมกับ Ct

ภาพที่ 2.26 วงจรทดสอบตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนโดยตรง

เมื่อ	U	คือ	แรงสูงตัวจ่าย
	Zf	คือ	ตัวกรอง
	Z_{mi}	คือ	อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ
	CC	คือ	เคเบิลวัด
	C_t	คือ	ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ
	C_k	คือ	ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยว
	CD	คือ	อุปกรณ์คาบเกี่ยว

ความแตกต่างของวงจรแบบ (ก) และแบบ (ข) คือ แบบ (ก) ตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมกับ C_k ที่มีศักย์เป็นดิน เป็นแบบที่มีใช้กันมากในทางปฏิบัติ ไม่เสี่ยงต่อการเบรกดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ C_k แต่ความไวในการวัดจะน้อยกว่าแบบ (ข) เพราะการดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นที่วัสดุทดสอบ C_t แบบ (ข) จะมีความไวสูงกว่า เพราะตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมโดยตรงกับวัสดุทดสอบ C_t ค่าเก็บประจุสเตรย์ทั้งหลายด้านแรงสูงกับดินจะเพิ่มค่า C_k ทำให้ความไวของวงจร วัดดีสชาร์จบางส่วนสูงขึ้น แต่จะมีข้อเสียที่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ที่วัสดุทดสอบ จะทำให้เครื่องวัด ดีสชาร์จบางส่วนเสียหายได้

2.7.6 การแสดงผลดีสชาร์จภายใน

ในการวัดค่าดีสชาร์จบางส่วน อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็นไมโครโวลต์ (μV) พิโคคูลอมบ์ (pC) แต่จะทราบเพียงขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนเท่านั้น ซึ่งวิธีที่นิยมใช้แสดงผล การดีสชาร์จบางส่วนในปัจจุบัน คือ การแสดงผลบนจอออสซิโลสโคป ซึ่งอาจจะแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปพัลส์ของการดีสชาร์จบางส่วนปรากฏอยู่บนฐานเวลารูปวงรี ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวก ยอดลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบ หรือแสดงให้รูปคลื่นพัลส์การดีสชาร์จบางส่วนปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ การแสดงการดีสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์จะมีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้องและสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอนการแสดงผลบนฐานเวลารูปวงรีมีข้อดีคือ สามารถแยกได้ว่าการดีสชาร์จบางส่วนเกิดจากสาเหตุอะไร [1]

(ก) ฐานเวลารูปอิลิปส์ (ข) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

(ค) ฐานเวลารูปคลื่นไซน์ (ง) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

ภาพที่ 2.27 การแสดงผลการดีสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การออกแบบครีบฉนวนโพลิเมอร์ของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป

ปัญหาสำคัญยิ่งประการหนึ่งของการใช้ระบบไฟฟ้าแรงสูง ก็คือ การฉนวนซึ่งมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายส่วนใหญ่ จะมาจากความล้มเหลงของฉนวนที่มีคุณภาพไม่ได้มาตรฐานหรือการออกแบบที่ไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งการออกแบบการฉนวนไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับ

1. ชนิดของฉนวน
2. คุณสมบัติของฉนวนต่อลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้า ชนิด แบบหรือรูปคลื่นแรงดัน (กระแสสลับ กระแสตรง และทรานเซี้ยนต์)
3. ระดับแรงดันระบบ HV, EHV และ UHV
4. สภาพแวดล้อม ความเปรอะเปื้อน และสภาพบรรยากาศ รวมทั้งปรากฏการณ์ฟ้าผ่า
5. ความสำคัญของฉนวนที่แตกต่างกัน
6. ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ สายส่ง สถานีจ่ายไฟฟ้าและสายจำหน่าย

2.8.1 ลักษณะมิติที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่า

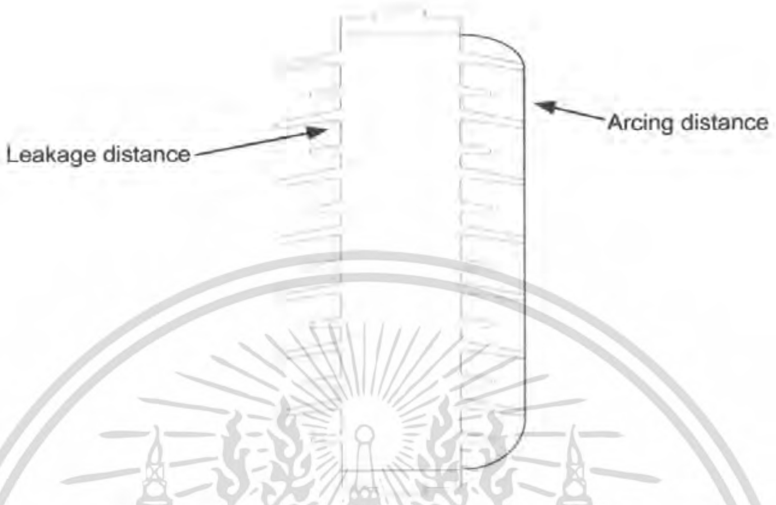
กับฟ้าผ่าถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญยิ่งต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ความบกพร่องหรือความล้มเหลวของกับดักฟ้าผ่าย่อมจะทำให้เกิดความเสียหาย การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหยุดชะงัก ฉะนั้นกับดักฟ้าผ่าที่ดีจะต้องไม่เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดผิดพร่องในระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า กับดักฟ้าผ่าในสภาวะที่ใช้งานจะต้องทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ทุกรูปแบบ ต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ความร้อน แรงทางกล และปฏิกิริยาเคมี ซึ่งลักษณะสมบัติที่สำคัญของ กับดักฟ้าผ่าที่กล่าวมาในที่นี้คือ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมิติและคุณสมบัติของเนื้อฉนวน

ลักษณะสมบัติทางมิติที่เกี่ยวข้อง และมีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าที่ควรทราบความหมายมีดังต่อไปนี้

1. ระยะรั่ว (Leakage distance) คือ ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดได้ตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าระหว่างอิเล็กโทรด โดยส่วนหนึ่งของระยะรั่วจะเป็นส่วนกั้นมิให้ผิวฉนวนเปียกได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาพฝนตก ซึ่งจะช่วยให้กับดักฟ้าผ่ามีความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวได้สูง ดังรูปที่ 2.28
2. ระยะอาร์ก (Arcing distance) คือ ระยะสั้นที่สุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดผ่านอากาศ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือระยะที่วัดตามแนวที่เกิดอาร์กระยะอาร์กแบ่งออกเป็น ระยะอาร์กแห้ง(Dry arcing distance) หมายถึง ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบ ฉนวนกับดักฟ้าผ่าระหว่างอิเล็กโทรดในการทดสอบการวาบไฟตามผิวแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะอาร์กเปียก (Wet arcing distance) หมายถึง ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดผ่านตัวกลางที่ ล้อมรอบฉนวนกับดักฟ้าผ่าระหว่างอิเล็กโทรดในการทดสอบวาบไฟตามผิวเปียก



ภาพที่ 2.28 ลักษณะทางมิติที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่า

2.8.2 การใช้งานกับดักฟ้าผ่าในสภาวะเปรอะเปื้อน

สิ่งเปรอะเปื้อนที่จับเกาะอยู่บนผิวของฉนวนกับดักฟ้าผ่า เมื่อมันเปียกน้ำซึ่งจะเกิดจากหมอก หรือความชื้นในตอนเช้า หรือฝนที่ตกปรอยๆ สภาพนำไฟฟ้าของผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้กระแสรั่วไหลตามผิวของกับดักฟ้าผ่ามีค่าเพิ่มมากขึ้น และเป็นสาเหตุให้เกิดวาบไฟตามผิวได้ง่าย การเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อนขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำ ปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของการเกิดวาบไฟตามผิว

ภาพที่ 2.29 ความเสียหายที่มีสาเหตุจากการมีสาเหตุจากการเกิดวาบไฟตามผิวของกับดักฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแบ่งประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนโดยทั่วไปแล้วนิยมแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ตามสภาพ แวดล้อมที่กับดักฟ้าผ่าติดตั้งใช้งาน ได้แก่ สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเล สิ่งเปรอะเปื้อนจากอุตสาหกรรม สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเลทราย และสิ่งเปรอะเปื้อนจากบริเวณอื่น ๆ การแบ่งระดับความเปรอะเปื้อน ตามมาตรฐาน IEC 815 [5] ได้แบ่งระดับความเปรอะเปื้อนออกเป็น 4 ระดับ ตามสภาพพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อน

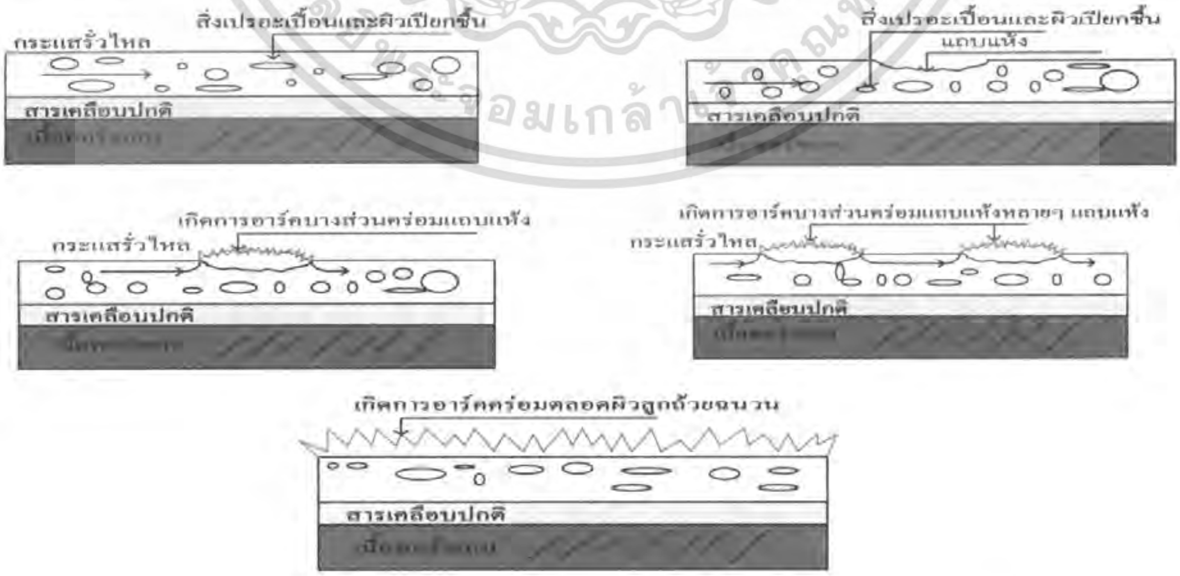
ระดับความเปรอะเปื้อน	ตัวอย่าง
1) เล็กน้อย (Light)	- บริเวณที่ปลอดจากการประกอบอุตสาหกรรม และชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปริมาณน้อย - บริเวณที่มีความหนาแน่นในการประกอบ อุตสาหกรรมหรือที่อยู่อาศัยโดยจะต้องเป็นบริเวณที่มีลมพัดผ่านหรือมีฝนตกบ่อย - บริเวณเขตเกษตรกรรมหรือบริเวณที่อยู่ใกล้ๆ ภูเขาโดยที่พื้นที่ ทั้งหมดเหล่านี้ จะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่น้อยกว่า 10-20 กิโลเมตร และจะต้องไม่ได้รับลมทะเลโดยตรง
2) ปานกลาง (Medium)	- บริเวณเขตอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มีการสร้างฝุ่นหรือควันออกมา และ อาจจะเป็นบริเวณย่านชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อน ปานกลาง - บริเวณย่านชุมชนหรือเขตอุตสาหกรรมหนาแน่น แต่จะต้องมีลม พัด ผ่านหรือฝนตกบ่อย ๆ - บริเวณที่มีลมทะเลพัดผ่าน ซึ่งจะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลพอสมควร (ควรจะห่างหลายๆ กิโลเมตร)
3) สูง (Heavy)	- เขตอุตสาหกรรมหนาแน่น หรือบริเวณชานเมืองของเมืองใหญ่ที่มี อัตราการใช้เครื่องทำความร้อนสูง - บริเวณที่ได้รับลมทะเลที่รุนแรงโดยตรงหรือชายฝั่งทะเล
4) สูงมาก (Very heavy)	- บริเวณที่เป็นเขตรับฝุ่นควันจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรงโดยเฉพาะฝุ่นที่เป็น thick conductive deposit - บริเวณที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลมากๆ ซึ่งมีการรับสิ่งเปรอะเปื้อนที่พัด มาจากทะเลโดยตรง - ทะเลทรายที่มีโอกาสฝนตกน้อยมาก จะต้องรับลมที่นำเอาทรายและ ไอเกลือเข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ

- บริเวณเกษตรกรรมในข้อ 1 ถ้ามีการใช้ปุ๋ยโดยการฉีดพ่นหรือมีการเผาไหม้ของกากธัญพืชต่างๆ เมื่อมีลมพัดนำเอาสิ่งเหล่านั้นมาแพร่กระจายออกไป ระดับความเปรอะเปื้อนอาจจะอยู่ในระดับสูง
- บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลหรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลในข้อที่ 2 หรือ 3 ระยะทางที่พิจารณาจะต้องขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศของชายฝั่งทะเล และลักษณะที่เกิดขึ้นด้วย

กระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิของความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดผิวของฉนวน โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแส บริเวณที่ความหนาแน่นกระแสสูงเช่น บริเวณคอคอดจะเกิดความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าบริเวณนั้นแห้งก่อน ซึ่งมีลักษณะเป็นส่วนเล็กๆ แคบๆ มีความกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตร เรียกว่าแถบแห้ง (Dry band) บริเวณแถบแห้งนี้มีสภาพความต้านสูง ไม่สามารถที่จะนำกระแสได้ ทำให้แรงดันเกือบทั้งหมดตกคร่อมไปที่แถบแห้ง ถ้าความคงทนต่อความเป็นฉนวนของอากาศบริเวณแถบแห้งมีค่าน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้ง จะเกิดการเบรกดาวน์ของอากาศคร่อมแถบแห้งขึ้นเรียกว่าการดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นอาจทำให้ขนาดของแถบแห้งขยายออกไป ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการดีสชาร์จต่อไปอีก การดีสชาร์จบางส่วนจะหยุดลง ถ้ามีแถบแห้งหลายๆ ส่วนที่อยู่ใกล้กันเกิดพัฒนาการจนเชื่อมต่อถึงกันได้ ก็จะเกิดวาบไฟตามผิวตกคร่อมตลอดผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า ขั้นตอนของการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าเนื่องจากสิ่งเปรอะเปื้อนแสดงในดังภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.30 ขั้นตอนการเกิดวาบไฟตามผิวที่ผิวฉนวนจากสิ่งเปรอะเปื้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 แนวทางการแก้ไขการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าอันเนื่องจากการใช้ งานในบริเวณเปรอะเปื้อน

1. ลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า

การป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า โดยใช้วิธีลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อน ได้แก่ การทำความสะอาดผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าตามระยะเวลาที่กำหนดไว้หรือจะใช้ กับดักฟ้าผ่าประเภทที่มีรูปทรงที่ยากแก่การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนและจะต้องทำการฉีดล้างทำความสะอาดกับดักฟ้าผ่าตามระยะเวลาที่เหมาะสม จะทำเมื่อผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าเริ่มสกปรกสามารถทำได้ทั้งในขณะดับกระแสไฟฟ้าและขณะจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยจะต้องพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ใช้ในการฉีด ระยะห่างและแรงดันของน้ำ ทิศทางตลอดจนลักษณะการติดตั้งของกับดักฟ้าผ่า ในการออกแบบปีกฉนวนของกับดักฟ้าผ่าให้มีรูปร่างที่ทำให้การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนทำได้ยากขึ้น

2. การเพิ่มความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า

การเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าจะเกิดได้ยากขึ้น ถ้าผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่ามีความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวสูงขึ้น อาจทำได้โดยการเพิ่มระยะรั่ว (Leakage Distance) ของ กับดักฟ้าผ่า การเพิ่มระยะรั่วของครีบฉนวนของกับดักฟ้าผ่าให้มากขึ้นนั้นทำให้กระแสรั่วไหลเกิดขึ้นได้น้อยลง โดยมาตรฐาน IEC 815 [8] ได้ระบุค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบครีบฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณที่มีความเปรอะเปื้อน โดยเป็นฟังก์ชันของระดับสิ่งเปรอะเปื้อนของสถานที่นั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้กับดักผ้าผ่าที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน

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

โดยที่บริเวณที่ระดับของความเปรอะเปื้อนเบาบาง ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance อาจจะมีค่าน้อยกว่า 16 mm/kV ก็ได้ แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 12 mm/kV (ค่าต่ำสุดที่ยินยอมให้ใช้ได้) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการดูแลบำรุงรักษาและบริเวณที่มีระดับของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรอะเปื้อนสูงมากเป็นพิเศษ ค่าที่ระบุไว้คือ 31 mm/kV อาจจะไม่เพียงพอที่จะสามารถป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวได้ ดังนั้นควรจะพิจารณาใช้ค่า Nominal specific creepage distance เพิ่มขึ้น โดยขึ้นอยู่กับการบำรุงรักษาและผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการและประสบการณ์ของผู้ออกแบบ บางกรณีอาจจะพิจารณาควบคู่ไปกับการวางแผนการทำความสะอาดกับดักฟ้าผ่า หลังจากติดตั้งใช้งานหรือการใช้สายเคลือบผิวฉนวนของ กับดักฟ้าผ่าอีกด้วย

2.8.4 การออกแบบกับดักฟ้าผ่าเพื่อใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน

เกณฑ์การออกแบบครีบฉนวนโพลิเมอร์ของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป จะอาศัยข้อแนะนำตามมาตรฐาน IEC 815 [5] โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1. **คำนวณค่า minimum nominal creepage distance** ตามสมการที่ (2.10)

$$(L_{nc})_{\min} = (L_{sc})_{\min} \times U_m \times k_d \qquad (2.10)$$

เมื่อ $(L_{nc})_{\min}$ คือ minimum nominal sreepage 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 faxtor) ; k_d = 1 เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลูกถ้วน $(D_m) <$ 300 mm.

กับดักฟ้าผ่าฉนวนเป็นแบบปีกสลับ ค่า (D_m) โดยประมาณหาได้จากสมการที่ (2.11)

$$D_m = (D_{e1} + D_{e2} + 2D_i)/4 \qquad (2.11)$$

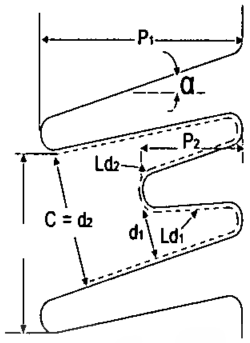
เมื่อ D_{e1} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางปีกใหญ่

D_{e2} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางปีกเล็ก

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกับดักฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ลักษณะรูปร่างของครีบ ตามมาตรฐาน IEC 815 [8] ดังนี้



C	>	30 มม.
S/P	≥	0.8
Ld/d	<	5
P1 – P2	≥	15 มม.
α	>	5°
C.F.	≤	4 ระดับสูงและสูงมาก
P.F.	>	0.7 ระดับสูงและสูงมาก

***ภาพที่* 2.31** ลักษณะการออกแบบครีบตามมาตรฐาน IEC 815

เมื่อ C คือ ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวของครีบไปยังครีบนอกสุดของครีบบน

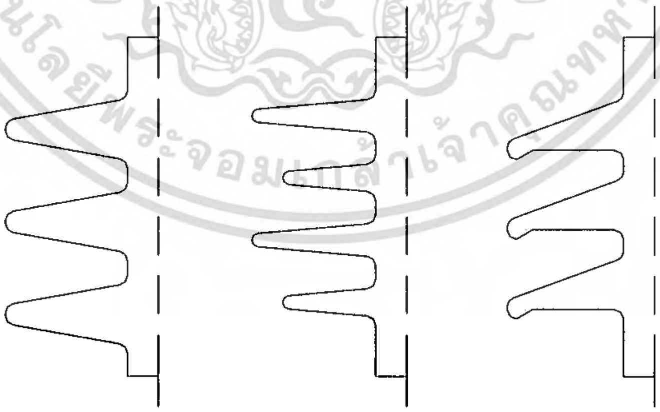
S คือ ระยะห่างระหว่างชั้นครีบในแนวดิ่งของครีบคู่ใด ๆ

P คือ ความกว้างของครีบที่ยื่นออกไปจากคอตันโดยที่ P_1 และ P_2 เป็นความกว้าง ของครีบยาวและครีบสั้นตามลำดับ

d คือ ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของครีบ

L_d คือ ระยะรั่วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนด จุดวัดค่า

3. เลือกลักษณะครีบ ลักษณะของครีบที่ใช้งานโดยทั่วไปจะมี 3 ประเภท



(ก) (ข) (ค)

***ภาพที่* 2.32** รูปแบบของครีบประเภทต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างรูปแบบครีบแต่ละแบบพบว่าครีบแบบ (ก) สิ่งเปรอะเปื้อนมีโอกาสจับเกาะน้อยที่สุด แต่ทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ลมพัดหรือฝนตกได้แย่ที่สุด ส่วนครีบแบบ (ข) การที่มีครีบสั้นมาเสริมสลับกับครีบยาวเพื่อทำหน้าที่ชดเชยระยะรั่วที่หายไป ครีบแบบนี้จะทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าครีบแบบ (ก) สำหรับครีบแบบ (ค) สิ่งเปรอะ-เปื้อนมีโอกาสจับได้เพิ่มขึ้น แต่มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าครีบชนิดแบบอื่นๆ แต่โอกาสที่หยดน้ำจะเชื่อมต่อระหว่างปีกในสภาวะที่ฝนตกหนักมีเพิ่มขึ้น

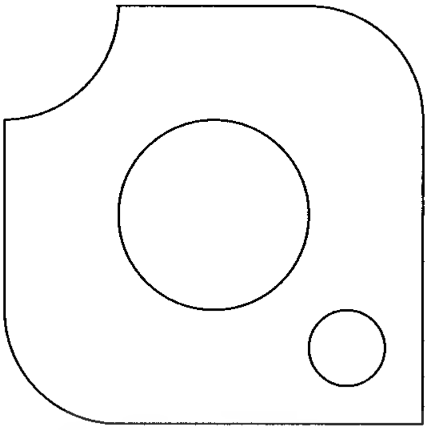
2.9 ไฟไนต์เอลิเมนต์

ปรากฏการณ์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นรอบตัวเรา สามารถอธิบายได้โดยกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์ และทำการประดิษฐ์ขึ้นมาในลักษณะของสมการต่าง ๆได้ ซึ่งอาจจะทำให้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) หรือในรูปแบบของสมการอินทิกรัล (Integral Equation) เป็นต้น ดังตัวอย่างเช่น ในการคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์ อาจเริ่มมาจากสมการอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลในการถ่ายเทความร้อน การคำนวณออกแบบโครงสร้างปีกเครื่องบินอาจเริ่ม มาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลของโครงสร้างนั้นภายใต้แรงกดดันของอากาศในขณะทำการบิน เป็นต้น

สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาต่าง ๆนั้น ปกติแล้วจะประดิษฐ์ขึ้นมาได้โดยไม่ยาก แต่ว่าผลเฉลยแม่นตรง (exact solution) ที่ต้องการจะต้องทำการหาออกมาโดยวิธีการวิเคราะห์ (analytical method) นั้นทำได้ยากและลำบากมากหรืออาจจะหาไม่ได้เลยเหตุผลดังกล่าวก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) ขึ้นมาใช้ วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate method) นั้นมีหลายวิธีการ วิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง ในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีการหาผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method)

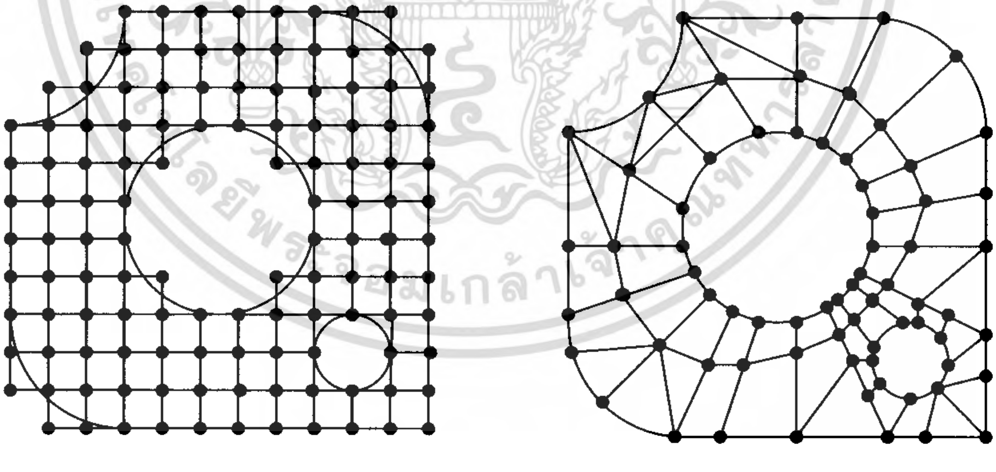
หลักการที่สำคัญของวิธีการผลต่างสืบเนื่องก็คือการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ โดยเริ่มจากการเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการผลต่างสืบเนื่อง (system of difference equation) ข้อดีของวิธีการผลต่างสืบเนื่องก็คือ วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ง่ายแก่การศึกษาและทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้น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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.33 ลักษณะของตัวอย่างแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างวิธีการผลต่างสืบเนื่องกับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมชิ้นหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยส่วนโค้งและส่วนที่เป็นเส้นตรง การวิเคราะห์หาการกระจายของความเค้น (Stress distribution) บนแผ่นอะลูมิเนียมนี้ภายใต้แรงกระทำที่กำหนดให้โดยการใช้วิธีการผลต่างสืบเนื่อง (finite difference methoed) จะเริ่มจากการแบ่งแผ่นอะลูมิเนียมนี้ออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.34 (ก) โดยที่ตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อ (grid points) ตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่าง ๆ และขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่า (number of unknowns) จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง



(ก) (ข)

ภาพที่ 2.34 แผ่นอะลูมิเนียมที่วิเคราะห์โดยใช้วิธีการผลต่างสืบเนื่อง (ก) กับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.34 (ก) นี้ แสดงให้เห็นว่าตารางสี่เหลี่ยมที่ใช้ในวิธีการผลต่างสืบเนื่องไม่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงของแผ่นอะลูมิเนียมดังกล่าวได้อย่างเที่ยงตรงหากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งหมายถึง จะต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นก็จะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสืบเนื่องมากขึ้นด้วย และกระบวนการในการแก้ปัญหามีความจำเป็นที่ต้องการใช้หน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้น รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย

สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าว มีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณวิธีใหม่ที่เรียกว่า วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ที่นิยมเรียกด้วยคำย่อกันว่า FEM ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนเช่นใดก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงเที่ยงตรงกว่า หลักการของวิธีการนี้ในขั้นต้นก็คล้ายกับวิธีการผลต่างสืบเนื่อง กล่าวคือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลาย ๆ ชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ เช่น ในตัวอย่างของแผ่นอลูมิเนียมเดิมนี้สามารถแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ต่าง ๆ กัน โดยเอลิเมนต์ต่าง ๆ นี้ อาจอยู่ในรูปลักษณะของสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ ดังเช่น รูปที่ 2.34 (ข)

ผลประโยชน์สิ่งแรกที่เห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 2.34 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการผลต่างสืบเนื่อง ก็คือ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยเอลิเมนต์ขนาดต่าง ๆ กันที่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของแผ่นอะลูมิเนียมได้เป็นอย่างดี ซึ่งหมายถึงปัญหานี้จะถูกแก้เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ที่มีรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากที่สุด ดังนั้นค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้จะมีความแม่นยำมากขึ้นตามไปด้วย

หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยจะทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องมีความสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นได้มาประกอบกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันจะก่อให้เกิดเป็นรูปร่าง และลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่นี้ แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น

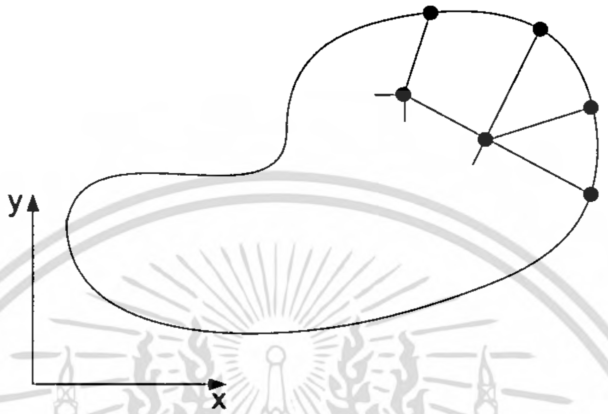
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการไฟไนด์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1

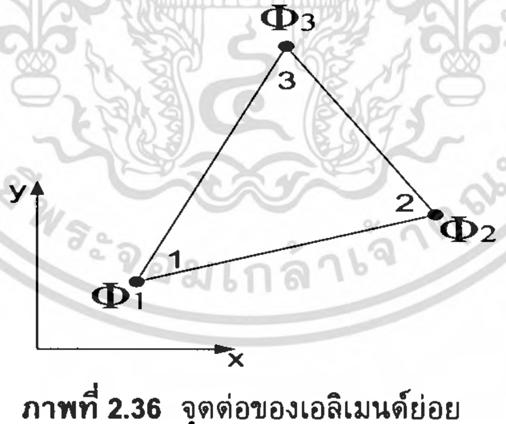
การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์นั้น จะแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังรูปที่ 2.35 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่าง ๆ กัน เช่น ปัญหากระจายตัวของสนามไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 2.35 ตัวอย่างการแบ่งขอบเขตรูปร่างเป็นเอลิเมนต์ย่อย

ขั้นตอนที่ 2

การเลือกฟังก์ชั่นประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม จะประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1,2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.36



ภาพที่ 2.36 จุดต่อของเอลิเมนต์ย่อย

โดยที่จุดต่อนี้จะเป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal unknowns) ซึ่งก็คือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้า หากเราพิจารณาถึงปัญหาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ลักษณะการกระจายตัวของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการฟังก์ชั่นการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ดังสมการ (2.12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi(x,y) = N_1(x,y)\phi_1 + N_2(x,y)\phi_2 + N_3(x,y)\phi_3 \quad (2.12)$$

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

สมการ (2.23) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\phi(x,y) = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix}$$

$$= \underset{(1\times3)}{[N]} \underset{(3\times1)}{[\phi]} \quad (2.13)$$

เมื่อ $[N]$ คือ เมตริกซ์ของฟังก์ชั่นการประมาณภายในเอลิเมนต์

$[\phi]$ คือ เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 3

การสร้างสมการของเอลิเมนต์ ดังตัวอย่างเช่นสมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.38 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

$$[k]_e [\phi]_e = [F]_e \quad (2.14)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการ (2.15) สามารถทำได้โดย

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

ขั้นตอนที่ 4

การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบของสมการพร้อมกันขึ้น (system of simultaneous equations) ในรูปแบบดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum\left(element\ \ equation\right) \ \Rightarrow\ [k]_{sys}[\phi]_{sys} = [F]_{sys} \tag{2.15}$$

ขั้นตอนที่ 5

ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ลงในสมการ (2.25) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $[\phi]_{sys}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ ซึ่งอาจเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้า หากเราพิจารณาถึงปัญหาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6

เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้ว ก็สามารถทำการหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างเราสามารถนำไปใช้ในลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่า

3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดรอบเอาท์ฟิวส์

การทดสอบดรอบเอาท์ฟิวส์ในโครงงานนี้เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ ดรอบเอาท์ฟิวส์ใน ระบบ 22 kV ที่สภาวะปกติผิวและครีบฉนวนแห้งสะอาด ดรอบเอาท์ฟิวส์ที่ใช้ในการศึกษามีพิกัดแรงดัน 27 kV กระแสต่อเนื่อง 100 A ดังภาพที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.1 การทดสอบในสภาวะปกติผิวแห้งสะอาดทดสอบตามมาตรฐาน IEEE std 4 :1995, [6] IEEE C37.41-2000, [7] และ ANSI C37.42 [3]

ภาพที่ 3.1 ดรอบเอาท์ฟิวส์ที่ใช้ในการทดสอบระบบ 22 kV พิกัด 27 kV 100 A

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของดรอบเอาท์ฟิวส์ที่นำมาทดสอบ

RATED VOLTAGE (kV)	RATED CURRENT (A)	BREAKING CURRENT (kA)	IMPULSE WITHSTAND VOLTAGE LINE TO GROUND BIL (kV)	WET WITHSTAND VOLTAGE (kV)	CREEPAGE DISTANCE MIN (mm)	WEIGHT (kg)	DIMENSION L X H (cm)
27	100	8	125	50	320	8.5	500X300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดรอบเอาท์ฟิวส์สภาวะปกติผิวแห้งสะอาด เป็นการทดสอบความคงทนของฉนวน โดยหัวข้อการทดสอบคือ การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่องและการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ แรงดันที่ใช้ในการทดสอบดูจากพิกัดแรงดันใช้งานของตัวครอบเอาท์ฟิวส์ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 Minimum dielectric withstand test voltages

Rated voltage	Terminal-to-ground			Terminal-to-Terminal	
	AC dry 1 min	AC wet 10 s	BIL	AC dry 1 min	BIL
15	35	30	95	35	95
27	42	36	125	42	125
38	70	60	150	70	150

Voltage in kV_{rms} or kV_{peak} as appropriate.

3.1.1 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง

อุปกรณ์การทดสอบ

1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ : 100 kV, 50 mA
- พิกัดกำลัง : 5 kVA
- อินพุท แรงดัน : 235 V
  กระแส : 22 A
- เอาท์พุท แรงดัน : 100 kV 1 PE
  กระแส : 0.05 A
- ความถี่ : 50 Hz

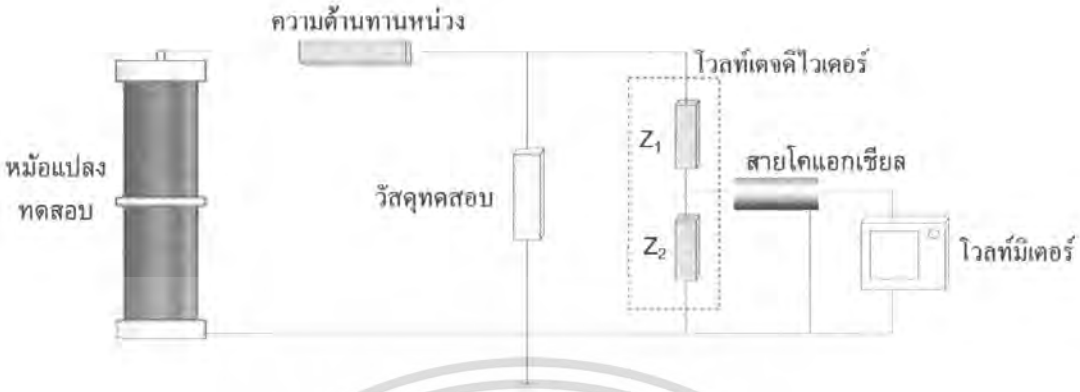
2) ความต้านทานน้ำบริสุทธิ์
- พิกัด : 0.49 $M\Omega$

3) ดรอบเอาท์ฟิวส์
- พิกัดแรงดัน : 22 kV
- พิกัดกระแสต่อเนื่อง : 100 A

4) โวลท์มิเตอร์, สายโคแอกเซียล 75 Ω

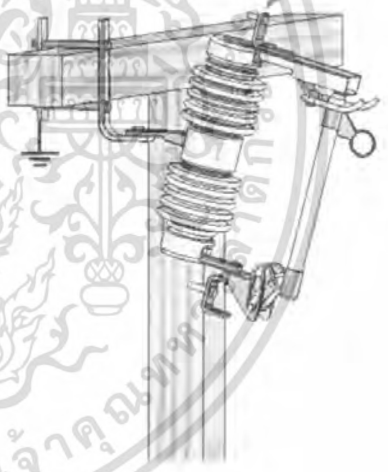
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>วงจรการทดสอบ</u>



(ก) วงจรการทดสอบ

(ข) ลักษณะการป้อนแรงดัน เทอร์มินอล - เทอร์มินอล



(ค) ลักษณะการป้อนแรงดัน เทอร์มินอล - กราวน์

ภาพที่ 3.2 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง

<u>ขั้นตอนการทดสอบ</u>

1) ต่อวงจรดังรูปที่ 3.2 และทำตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 โดยใช้ ดรอบเอาท์ฟิวส์ที่ผ่านการทำความสะอาดครีบของฉนวน ดรอบเอาท์ฟิวส์ต้องไม่ผ่านการใช้งานไม่มีร่องรอยแตกชำรุดหรือทดสอบมาก่อน ส่วนประกอบของดรอบเอาท์ฟิวส์ต้องมาจากโรงงานเดียวกัน อุณหภูมิระหว่างการทดสอบอยู่ระหว่าง -30 °C ถึง40 °C ต้องมีการบันทึกค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดัน ความชื้น อุณหภูมิ แรงดัน ที่ใช้ในการทดสอบเป็นแรงดันรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 50 Hz อัตราส่วน Vpeak/Vrms ต้องมีค่าเท่ากับ $\sqrt{2} \pm 5\%$ กระแส short circuit ของหม้อแปลงทดสอบต้องมีค่าประมาณ 0.1 ถึง 0.5 A การติดตั้งครอบเอาท์ฟิวส์จะติดตั้งบนไม้คอนตามการใช้งานปกติและสูงจากพื้นมากกว่า 1.5 m ไม้คอนที่ใช้จะมีขนาด 9×11cm สายตัวนำเป็นสายเปลือยและมีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถใส่ขั้วต่อบนล่าง หรืออาจเป็นสายแบบอื่นที่ไม่มีผลในการทดสอบ สายตัวนำควรอยู่ในแนวนอนขนานกับไม้คอนอย่างน้อย 30 cm จากขั้วต่อบนและล่าง ขั้วต่อล่างอาจโค้งงอได้ถ้าจำเป็น ตำแหน่งในการทดสอบจะทดสอบทั้งในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล และในกรณีเทอร์มินอล-กราวน์ โดยในการทดสอบจะติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง

2) บันทึกสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบดังนี้

ความดันบรรยากาศ	=	763	มม.ปรอท
อุณหภูมิแวดล้อม	=	32	เซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	=	60	%
ความชื้นสัมบูรณ์	=	20	กรัม/ลูกบาศก์เมตร

3) บันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากหม้อแปลงทดสอบ

4) แก้ค่าเนื่องจาก อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศและความชื้น เพื่อพิจารณาปรับแรงดันที่สภาวะมาตรฐานเป็นแรงดันที่สภาวะห้องทดลองตามสมการที่ 2, 3, 4, 5 ในภาคผนวก ก

<u>ระบบ 22 kV พิกัด 27 kV 100 A</u>

$$g = \frac{U_b}{500L\delta k}$$

$$= \frac{46.2}{500 \times 0.22 \times 0.964 \times 1.117}$$

$$= 0.390$$

จากกราฟรูปที่ ก.2 m = w = 0.12

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

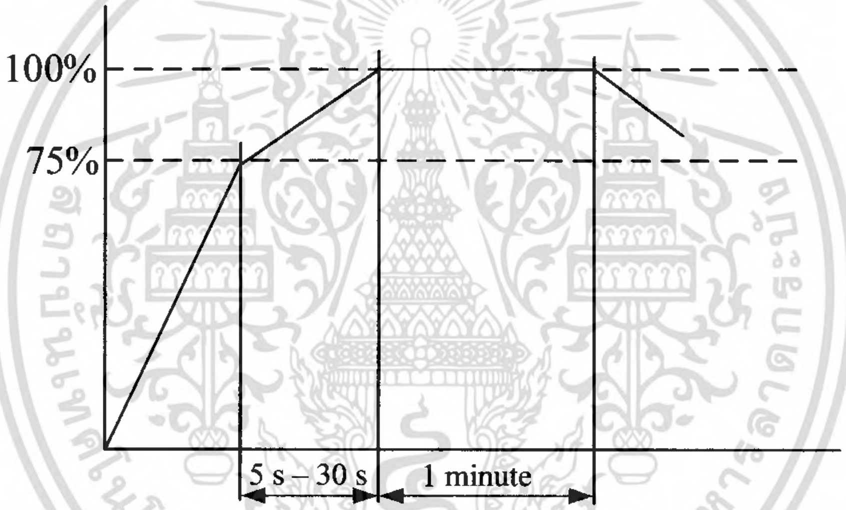
$$= \left[\frac{763 \times (273+20)}{760 \times (273+32)}\right]^{0.12}$$

$$= 0.964^{0.12} = 0.996$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_2 = k^w$$
$$= 1.117^{0.12} = 1.013$$
$$U = Un \times K_1 \times K_2$$
$$= 42 \times 0.996 \times 1.013 = 42.37 \text{ kV}$$

5) ทำการทดสอบในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล และในกรณีเทอร์มินอล-กราวน์ โดยป้อนแรงดันทดสอบกระแสสลับความถี่ 50 เฮิรตซ์ ขนาด 42.37 kV สำหรับระบบ 22 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) โดยการขึ้นแรงดันในการทดสอบจะต้องขึ้นแรงดันอย่างรวดเร็วจนถึงค่าแรงดันที่ 75% หลังจากนั้นค่อยๆ ขึ้นถึงค่าแรงดันถึงค่าแรงดัน 100% ภายใน 5 ถึง 30 วินาที และปล่อยค้างไว้ 1 นาทีดังแผนภาพรูปที่ 3.3



***ภาพที่* 3.3** แผนภาพที่ใช้ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะปกติ

6)บันทึกผลการทดสอบ

<u>ผลการทดสอบ</u>

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งสะอาดกระแสสลับ 50 Hz ของดรอบเอาท์ฟิวส์ที่ระดับแรงดัน 42.37 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง)

ดรอบเอาท์ฟิวส์	ผลการทดสอบ	
	กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล	กรณีเทอร์มินอล-กราวน์
ตัวอย่างที่ 1	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 2	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์และการประเมินผลการทดสอบ

การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่องของดรอบเอาท์ฟิวส์ ระบบ 22 kV พิกัดแรงดัน 27 kV กระแสต่อเนื่อง 100 A ปรากฏว่าเมื่อจ่ายแรงดัน 42.37 kV ให้กับดรอบเอาท์ฟิวส์เป็นเวลา 1 นาที ทั้งการต่อดรอบเอาท์ฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล และกรณีเทอร์มินอล-กราวน์ ไม่เกิดวาบไฟตามผิวทั้ง 2 ตัวอย่าง

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าดรอบเอาท์ฟิวส์ในชุดนี้ผ่านมาตรฐาน ของ ANSI C 37.42 ว่าด้วยการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งสะอาดกระแสสลับ 50 Hz

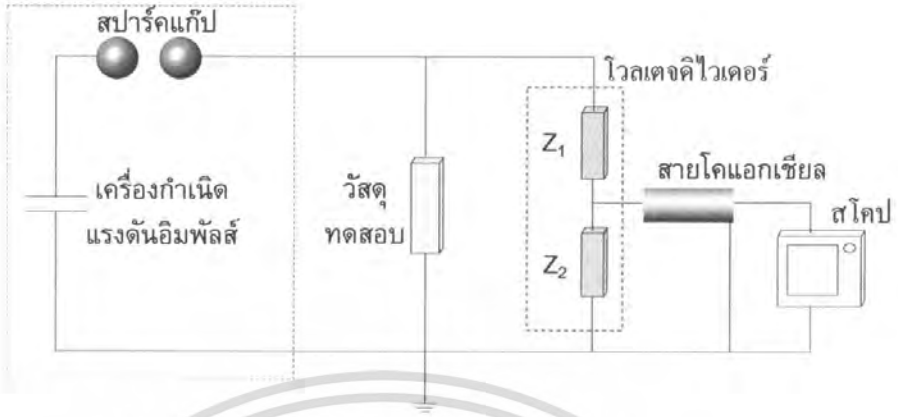
3.1.2 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์

อุปกรณ์การทดสอบ

1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
   - พิกัด 200 kV/2 stage, 5 kJ
   - แรงดันที่ใช้ในการชาร์จ : 200 kV (100 kV/stage)
   - พิกัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสูงสุด : 180 kV
   - พิกัดแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง : 155 kV
   - พลังงานจ่ายสูงสุด : 5 kJ
2) คาปาซิเตอร์โวลท์เตจดิไวเดอร์
   - คาปาซิแตนซ์ : 4200 pF
   - พิกัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า : 200 kV
   - พิกัดแรงดันที่ความถี่ 50 Hz : 50 kV
   - อัตราส่วน(ratio) : 230.5:1
3) ดรอบเอาท์ฟิวส์
   - พิกัดแรงดัน : 22 kV
   - พิกัดกระแสต่อเนื่อง : 100 A
4) โวลท์มิเตอร์, สายโคแอกเซียล 75 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

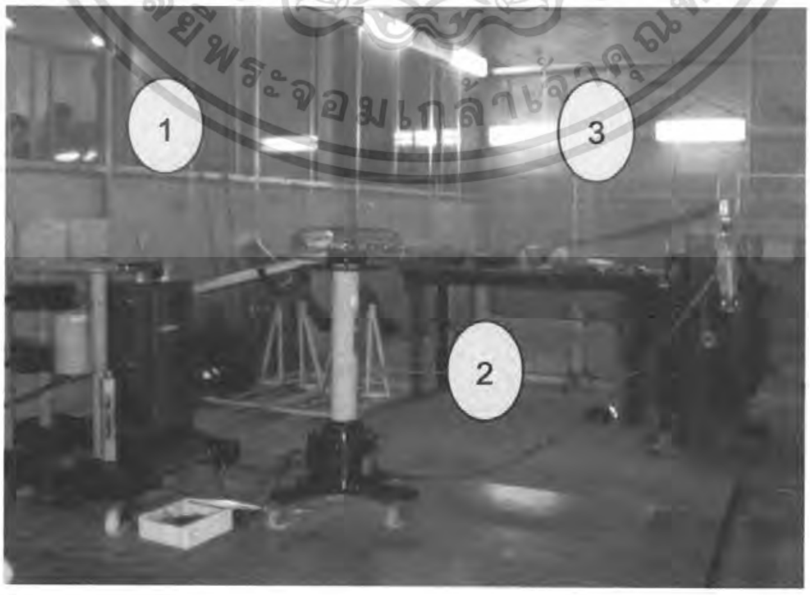
วงจรการทดสอบ



ภาพที่ 3.4 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์

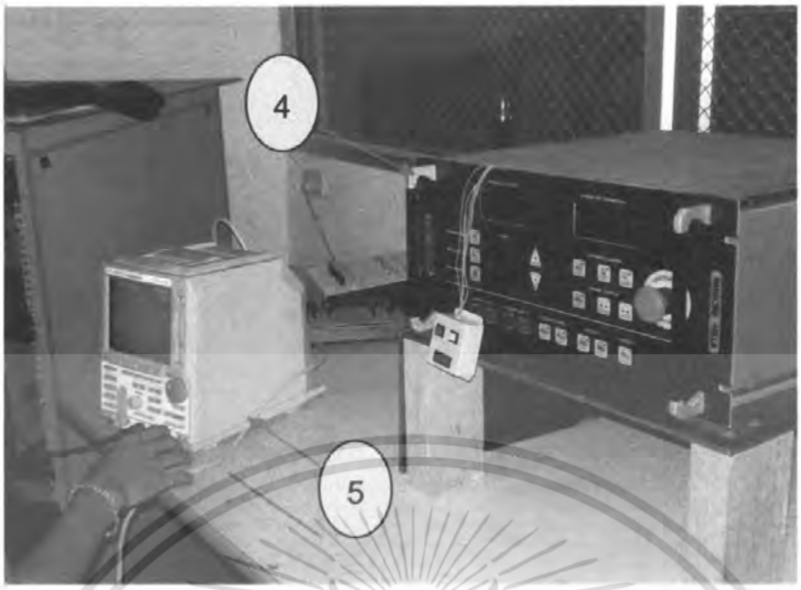
ขั้นตอนการทดสอบ

1) ต่อวงจรดังรูปที่ 3.5 และทำตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบเหมือนกับการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง แต่แรงดันที่ใช้ในการทดสอบเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม 1.2/50 μs ช่วงเวลาหน้าคลื่น $\leq 1.2\mu s$ และช่วงเวลาหางคลื่น $\geq 50\mu s$ ตำแหน่งในการทดสอบจะทดสอบทั้งในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล และในกรณีเทอร์มินอล-กราวน์ ในการทดสอบจะติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง



(ก) วงจรการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ชุดควบคุมเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
2 คือ โวลเตจดิไวเดอร์
3 คือ วัสดุทดสอบ (ครอบเอาท์ฟิวส์)
4 คือ ชุดควบคุมเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
5 คือ ออสซิลโลสโคป

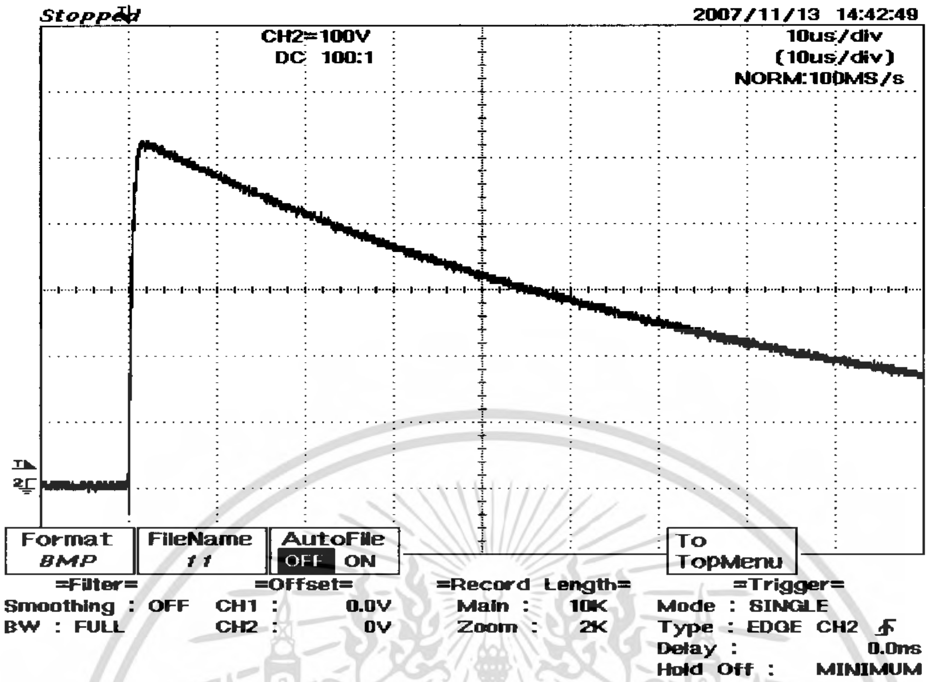
ภาพที่ 3.5 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของครอบเอาท์ฟิวส์

2) บันทึกสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบดังนี้

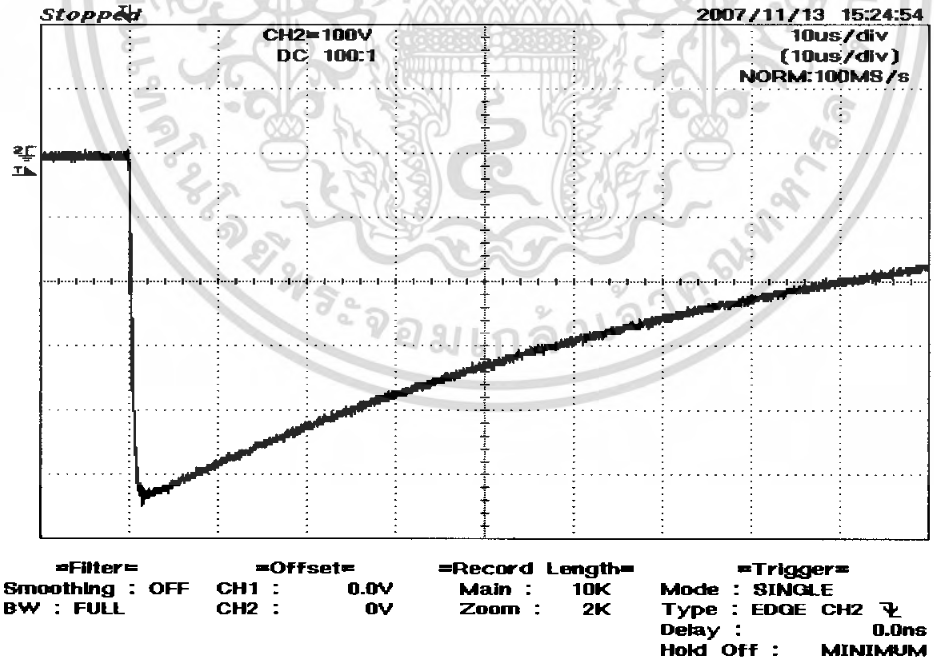
ความดันบรรยากาศ	=	763	มม.ปรอท
อุณหภูมิแวดล้อม	=	32	เซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	=	65	%
ความชื้นสัมบูรณ์	=	20	กรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) บันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

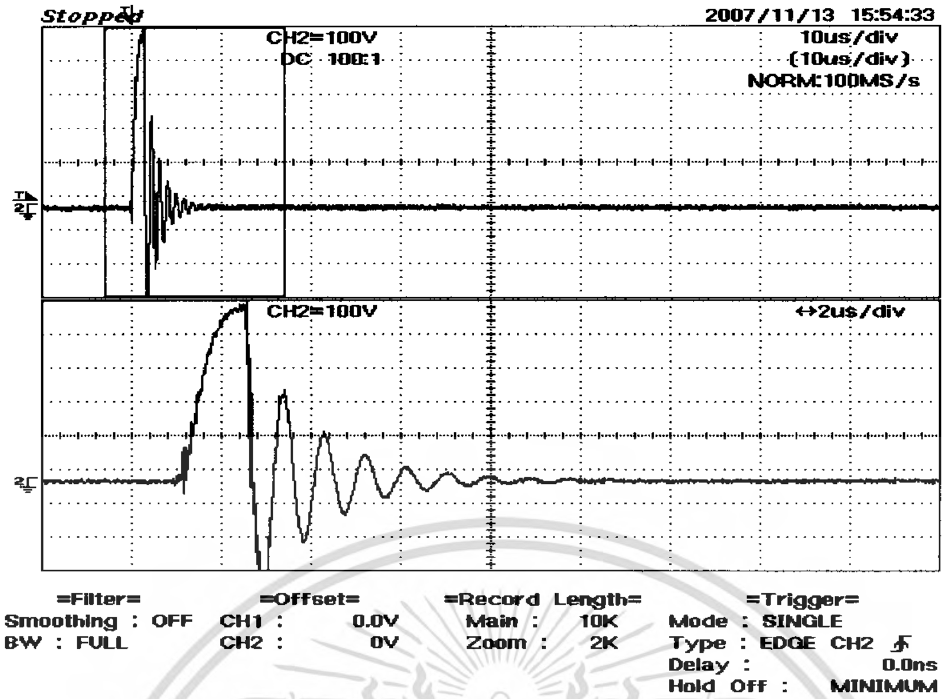


ภาพที่ 3.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ใช้ทดสอบที่ระดับแรงดัน 139.54 kV
T1= 1.10 µS, T2 = 47.56 µS

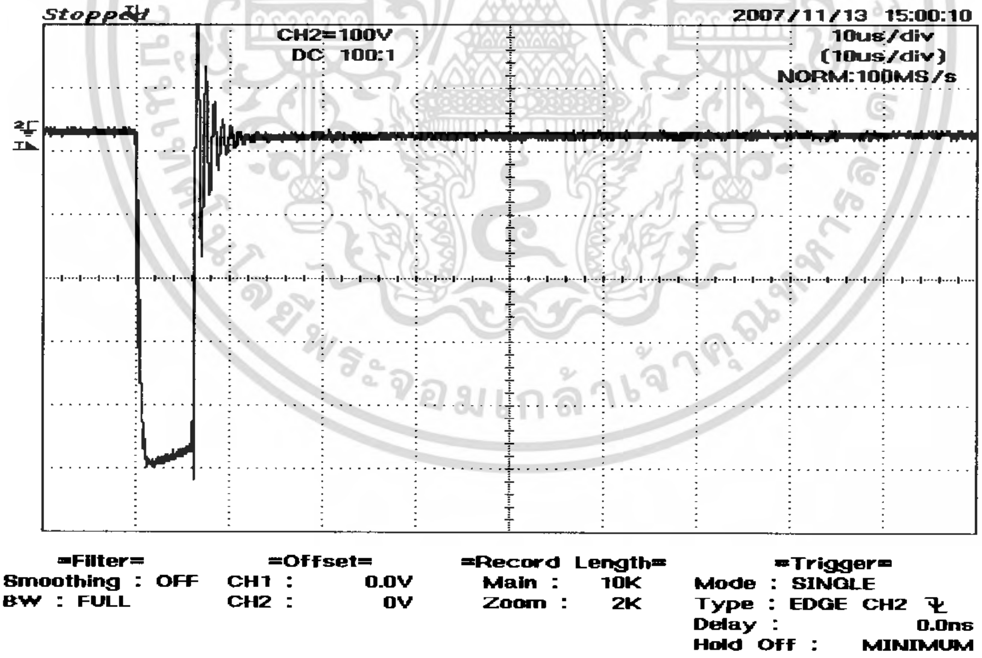


ภาพที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ใช้ทดสอบที่ระดับแรงดัน 140 kV
T1= 1.14 µS, T2 = 46.35 µS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกของดรอบเอาท์ฟิวส์ตัวอย่างที่ 2 ต่อแบบ เทอร์มินอล -กราวน์ ระดับแรงดัน 139.54 kV ที่เกิดวาบไฟดามผิว



ภาพที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบของดรอบเอาท์ฟิวส์ตัวอย่างที่ 1 ต่อแบบ เทอร์มินอล - เทอร์มินอล ระดับแรงดัน 139.547 kV ที่เกิดวาบไฟดามผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) แก้ค่าเนื่องจาก อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศและความชื้น เพื่อพิจารณาปรับแรงดันที่สภาวะมาตรฐานเป็นแรงดันที่สภาวะห้องทดลองตามสมการที่ 2, 3, 4, 5 ในภาคผนวก ก

<u>ระบบ 22 kV พิกัด 27 kV 100 A</u>

$$g = \frac{U_b}{500L\delta k}$$

$$= \frac{137.5}{500 \times 0.22 \times 0.964 \times 1.1}$$

$$= 1.178$$

จากกราฟรูปที่ ก.2 m = w = 1

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

$$= \left[\frac{763 \times (273+20)}{760 \times (273+32)}\right]^1$$

$$= 0.964^1 = 0.964$$

$$K_2 = k^w$$

$$= 1.1^1 = 1.1$$

$$U = Un \times K_1 \times K_2$$

$$= 125 \times 0.964 \times 1.1 = 132.55 \text{ kV}$$

5) ทำการทดสอบในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล และในกรณีเทอร์มินอล-กราวน์ โดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ ขนาด 140 kV สำหรับระบบ 22 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) โดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) บันทึกผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ระดับแรงดัน 140 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของดรอบเอาท์ฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล

ดรอบเอาท์ฟิวส์	ผลการทดสอบ		
พิกัด 27 kV 100 A	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ตัวอย่างที่ 1	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 2	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ระดับแรงดัน 140 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของดรอบเอาท์ฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-กราวน์

ดรอบเอาท์ฟิวส์	ผลการทดสอบ		
พิกัด 27 kV 100 A	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ตัวอย่างที่ 1	เกิดวาบไฟตามผิว	เกิดวาบไฟตามผิว	เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 2	เกิดวาบไฟตามผิว	เกิดวาบไฟตามผิว	เกิดวาบไฟตามผิว

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ระดับแรงดัน 140 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของดรอบเอาท์ฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล

ดรอบเอาท์ฟิวส์	ผลการทดสอบ		
พิกัด 27 kV 100 A	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ตัวอย่างที่ 1	เกิดวาบไฟตามผิว	เกิดวาบไฟตามผิว	เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 2	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ระดับแรงดัน 140 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของดรอบเอาท์ฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-กราวน์

ดรอบเอาท์ฟิวส์	ผลการทดสอบ		
พิกัด 27 kV 100 A	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ตัวอย่างที่ 1	ไม่ทำการทดสอบ	ไม่ทำการทดสอบ	ไม่ทำการทดสอบ
ตัวอย่างที่ 2	ไม่ทำการทดสอบ	ไม่ทำการทดสอบ	ไม่ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

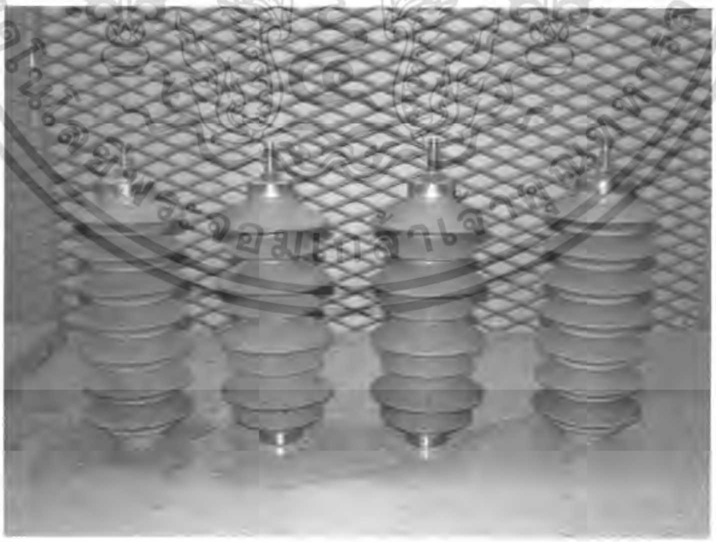
<u>การวิเคราะห์และการประเมินผลการทดสอบ</u>

ในการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของดรอบเอาท์ฟิวส์ระบบ 22 kV พิกัด 27 kV 100 A ทั้งสองตัวอย่างปรากฏว่า การป้อนแรงดันทดสอบที่ 140 kV ขั้วบวก ต่อแบบเทอร์มินอล-เทอร์มินอล ไม่เกิดวาบไฟตามผิว ที่แรงดันขั้วลบตัวอย่างที่ 1 จะเกิดวาบไฟตามผิวที่แรงดัน 139.54 kVตัวอย่างที่ 2 ไม่เกิดวาบไฟตามผิว เมื่อต่อแบบเทอร์มินอล-กราวน์ ที่แรงดันขั้วบวก เกิดวาบไฟตามผิวทั้งสองตัว ที่แรงดัน 139.54 kV

ฉนั้นจึงสรุปได้ว่าดรอปเอาท์ฟิวส์ทั้งสองตัวอย่างไม่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEEEstd4 :1995, IEEE C37.40-1993 IEEE C37.41-2000, IEEE C37.42-1996 และ ANSI C37.42 จึงได้ทำการออกแบบลักษณะของฉนวนขึ้นมาใหม่ตามมาตรฐาน IEC 815 ซึ่งมีรายละเอียดตามบทที่ 4

3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่า

การทดสอบกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปนี้จะใช้กับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5kA และพิกัด 24 kV 10 kA ทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE 60099-4 [8] โดยมีหัวข้อการทดสอบที่สามารถใช้อุปกรณ์ทดสอบที่มีอยู่ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คือ การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน การทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงานและการทดสอบหากระแสรั่วไหล



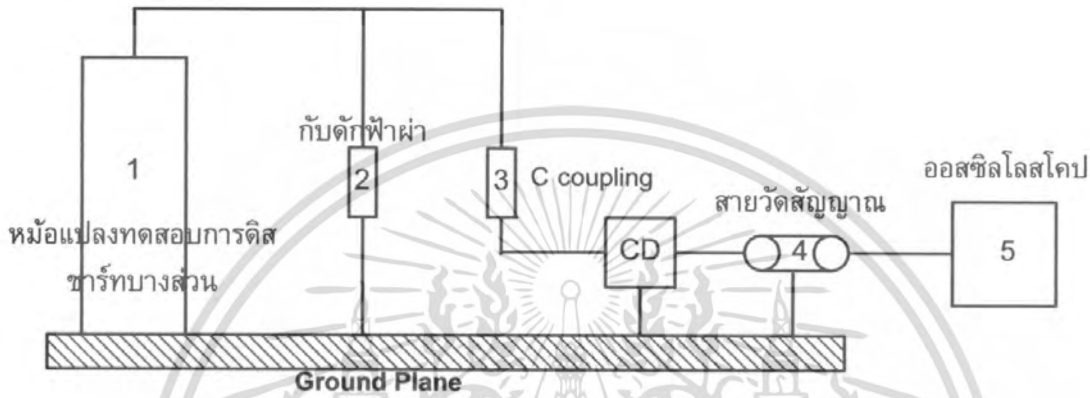
ภาพที่ 3.10 กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในการศึกษาและทำการทดสอบ
พิกัด 21 kV 5 kA และ พิกัด 24 kV 10 kA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การทดสอบการดีสชาร์จบางส่วน (Internal partial discharge)

การทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนจะเป็นการทดสอบเพื่อหาความผิดพร่องภายในของกับดักฟ้าผ่าเพื่อเป็นการยืนยันว่าไม่มีความผิดพร่องภายในกับดักฟ้าผ่า การทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนจะกระทำต่อกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกปเท่านั้น

วงจรการทดสอบ



ภาพที่ 3.11 วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนของกับดักฟ้าผ่า ZnO

1 หม้อแปลงทดสอบพิกัด 40 kVA 460/75 kV 50/60 Hz

2 C coupling พิกัด 100 kV, 0.01 nF

3 กับดักฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ขั้นตอนการทดสอบ</u>

1. ก่อนทำการทดสอบจะต้องทำการปรับเทียบ (Calibration) วงจรทดสอบ และนำอุปกรณ์ปรับเทียบออกจากวงจรทดสอบก่อนทำการทดสอบทุกครั้ง

2. ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ผ่านการทำความสะอาดครีบของฉนวน ตัวตัดวงจร (Disconnector or Fault Indicator) ต้องถูกปลดออกไป และกับดักฟ้าผ่าต้องไม่ผ่านการใช้งานหรือทดสอบมาก่อน

3. ทำการเปรียบเทียบวงจรทดสอบและบันทึกค่าการปรับเทียบดังนี้

<u>การปรับเทียบ</u>

ประจุที่ป้อน 10 pC

ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด 9.97 pC

ค่า Back ground Noise 0.82 pC

ค่าสเกลแฟคเตอร์ของการวัด PD เท่ากับ 0.997

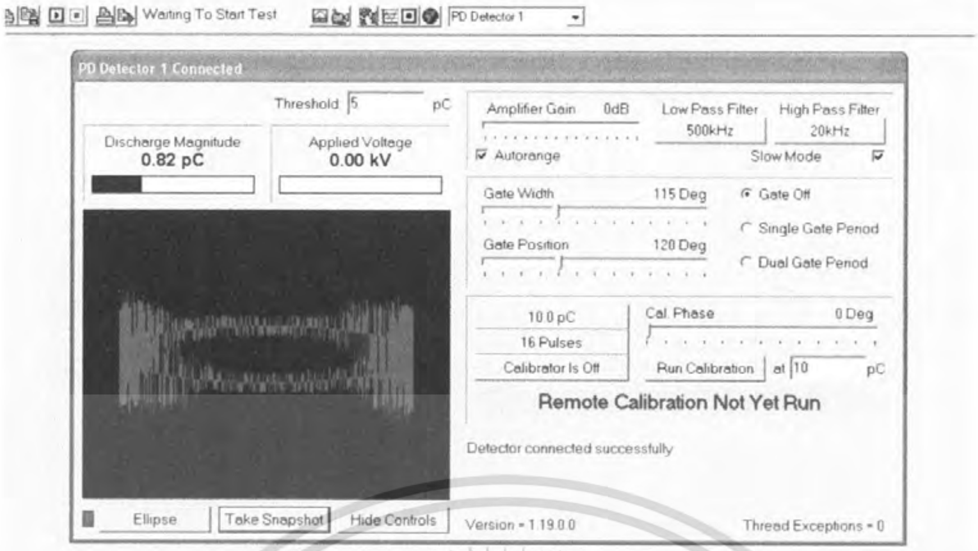
4. ป้อนแรงดันให้กับดักฟ้าผ่าขนาดเท่ากับอัตราแรงดันของกับดักฟ้าผ่า (rate voltage) ค้างไว้ประมาณ 2s – 10s แล้วลดแรงดันลงเหลือ 1.05 เท่าของแรงดันใช้งานต่อเนื่อง (Continous operating voltage) วัดค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

5. บันทึกค่าการเกิดดิสชาร์จ

<u>ผลการทดสอบ</u>

สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ ความดันบรรยากาศของอากาศมีค่าเท่ากับ 764 mmHg อุณหภูมิห้อง 30 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 70 %

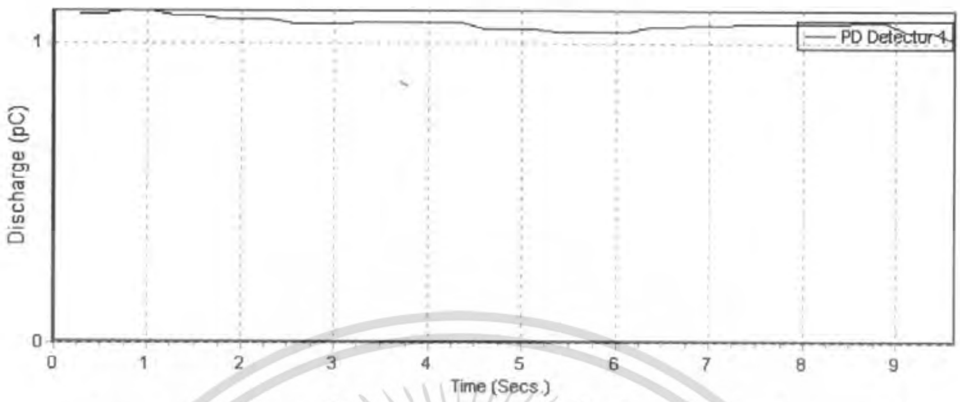
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



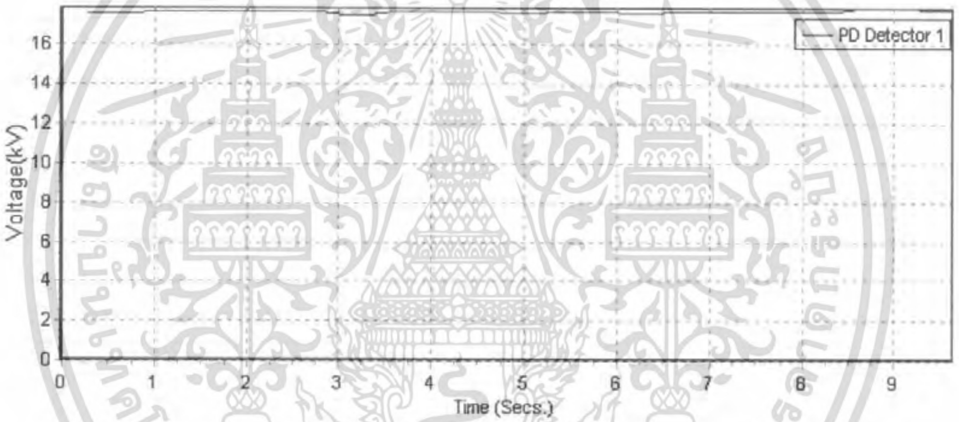
ภาพที่ 3.12 แสดงผลการการปรับเทียบ (Calibration) วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

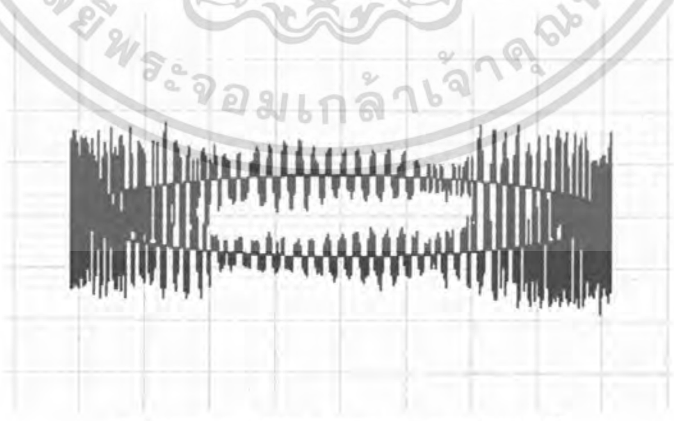
ตัวอย่างที่ 1	พิกัด : 21 kV 5 kA	
	วันที่ทำการทดสอบ : วันอังคารที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550	



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PD ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่ป้อนแรงดัน



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนเทียบกับเวลา



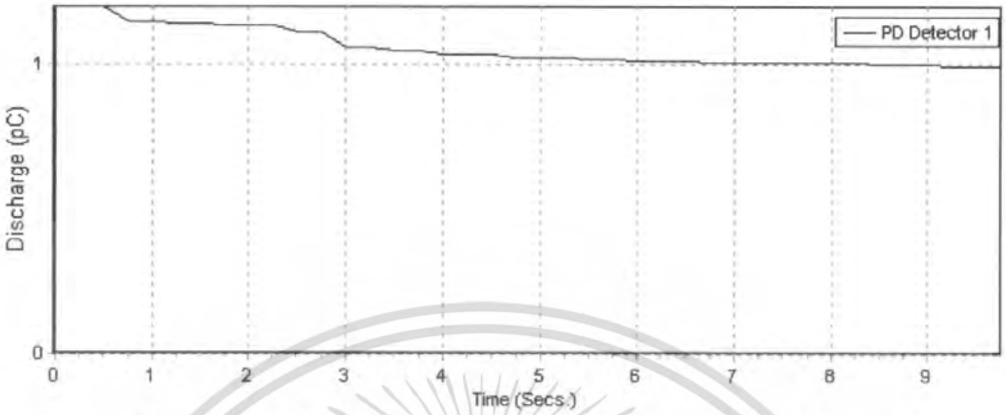
รูปแสดงผล PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

Discharge = 1.07 pC , Voltage = 17.67 kV

ภาพที่ 3.13 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 1

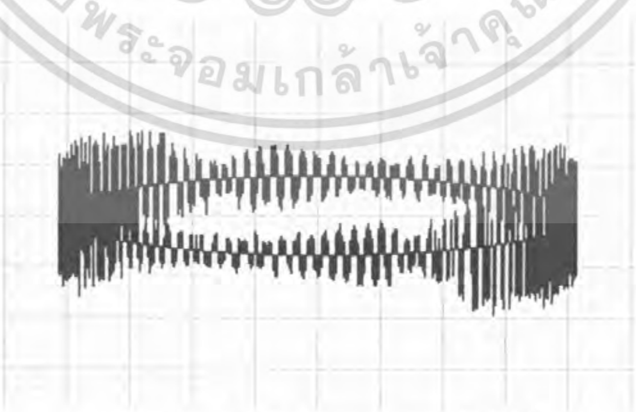
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2	พิกัด : 21 kV 5 kA	
	วันที่ทำการทดสอบ : วันอังคารที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550	



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PD ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่ป้อนแรงดัน

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนเทียบกับเวลา



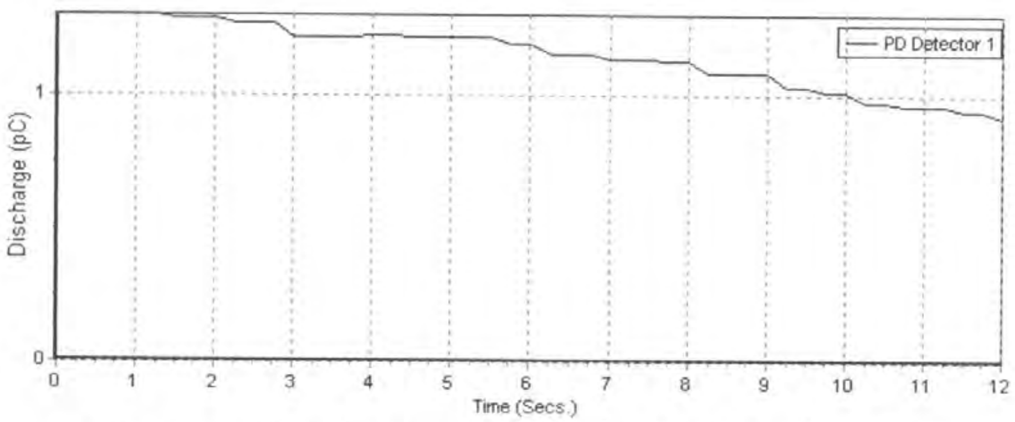
รูปแสดงผล PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

Discharge = 1.02 pC , Voltage = 17.75 kV

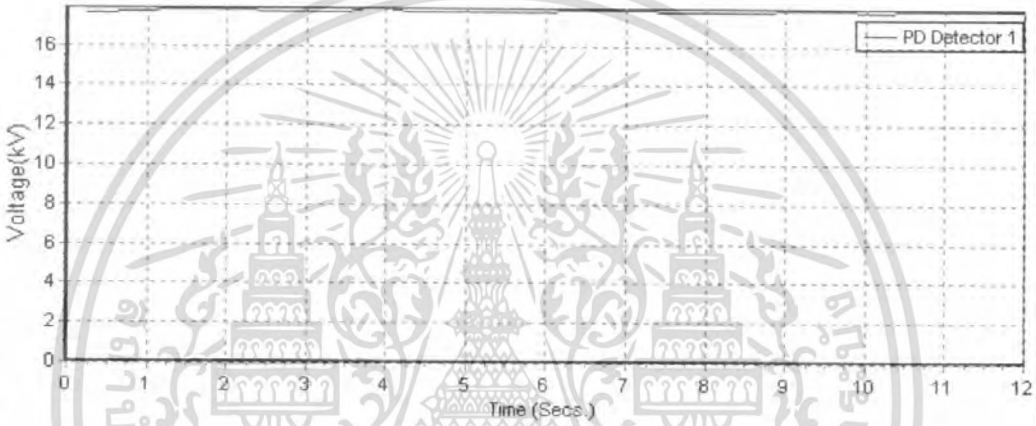
ภาพที่ 3.14 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

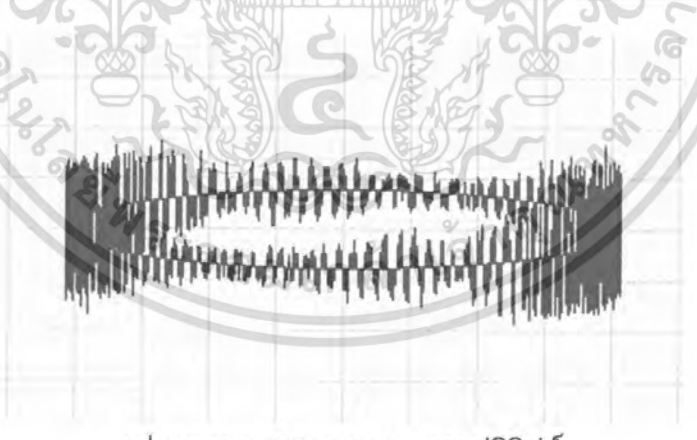
ตัวอย่างที่ 3	พิกัด : 21 kV 5 kA	
	วันที่ทำการทดสอบ : วันอังคารที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550	



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PD ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่ป้อนแรงดัน



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนเทียบกับเวลา



รูปแสดงผล PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

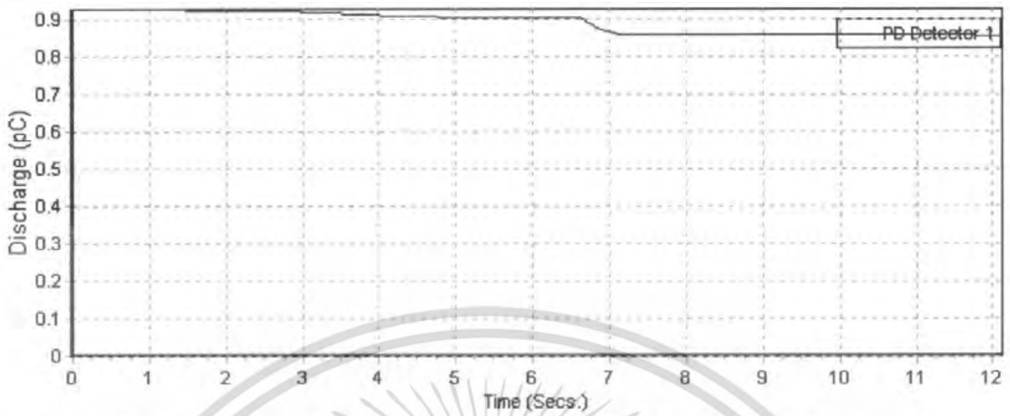
Discharge = 1.00 pC , Voltage = 17.95 kV

ภาพที่ 3.15 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 3

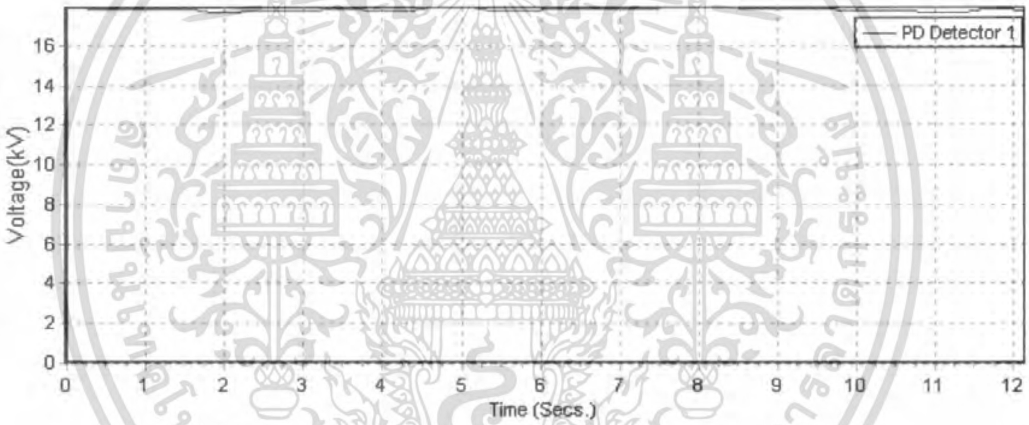
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

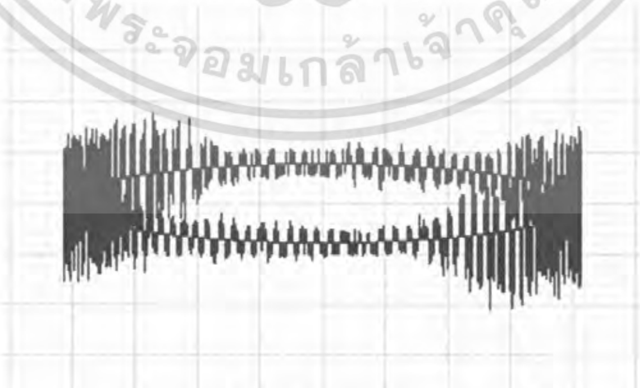
ตัวอย่างที่ 4	พิกัด : 21 kV 5 kA	
	วันที่ทำการทดสอบ : วันอังคารที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550	



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PD ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่ป้อนแรงดัน



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนเทียบกับเวลา



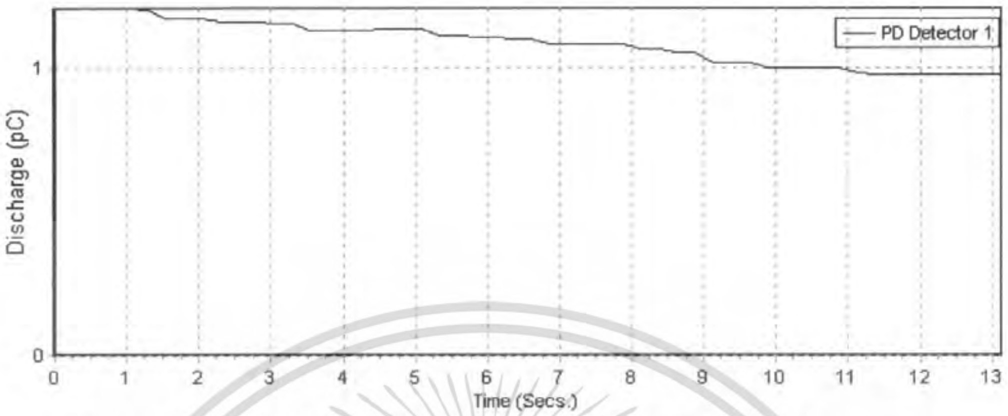
รูปแสดงผล PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

Discharge = 0.86 pC , Voltage = 17.64 kV

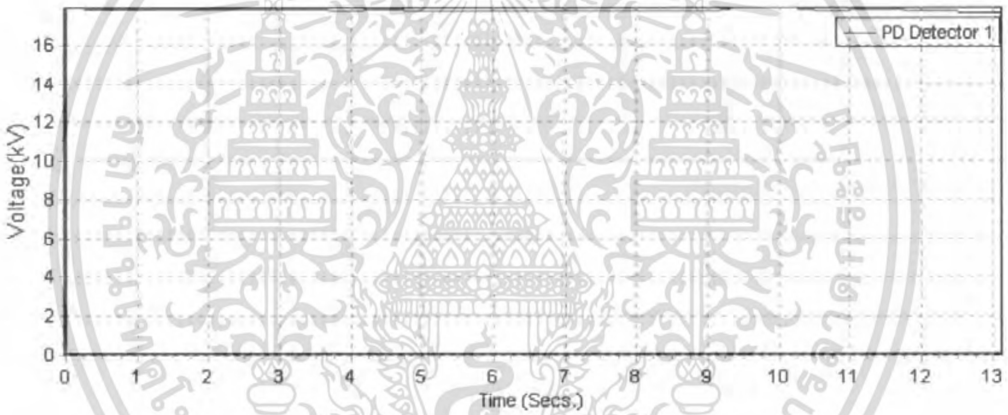
ภาพที่ 3.16 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

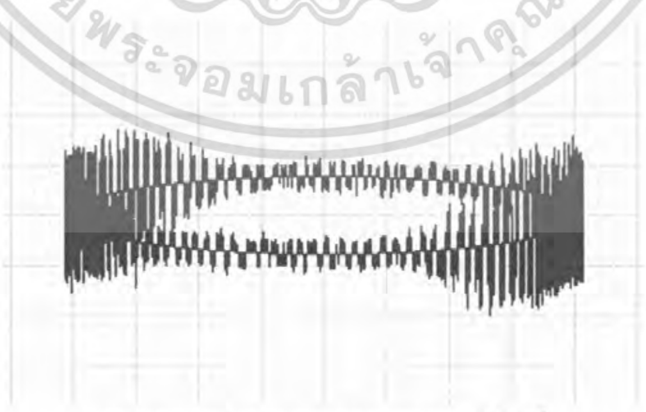
ตัวอย่างที่ 5	พิกัด : 21 kV 5 kA
	วันที่ทำการทดสอบ : วันอังคารที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PD ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่ป้อนแรงดัน



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนเทียบกับเวลา



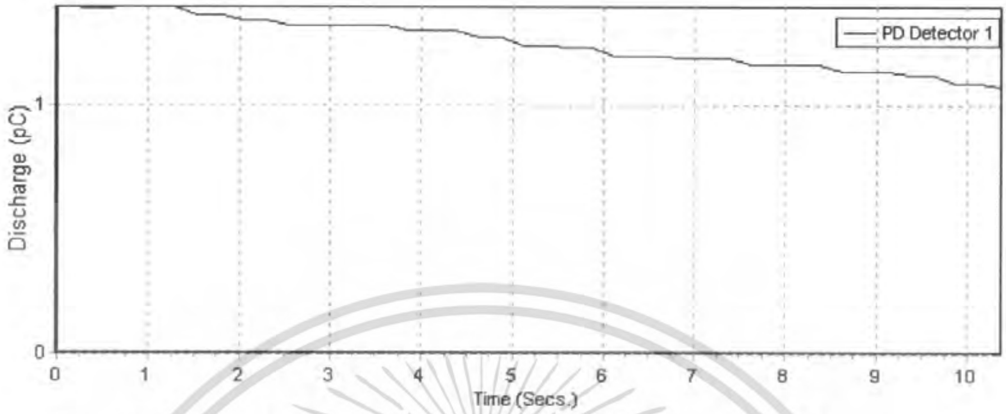
รูปแสดงผล PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

Discharge = 1.00 pC , Voltage = 17.70 kV

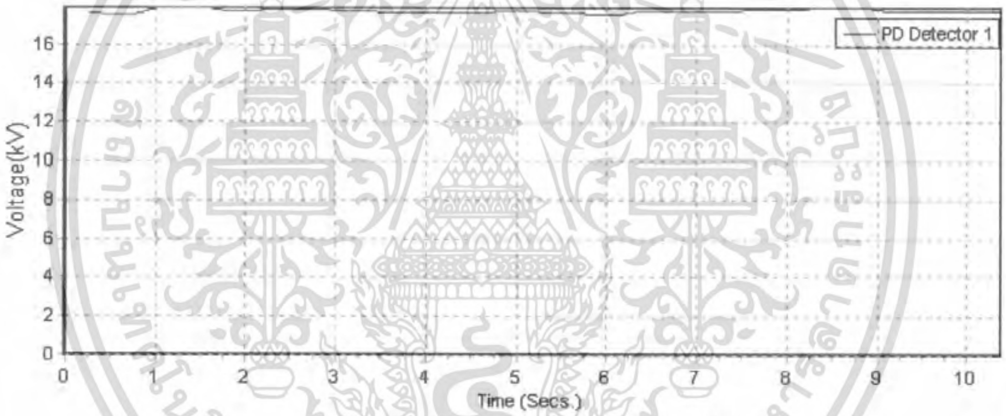
ภาพที่ 3.17 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

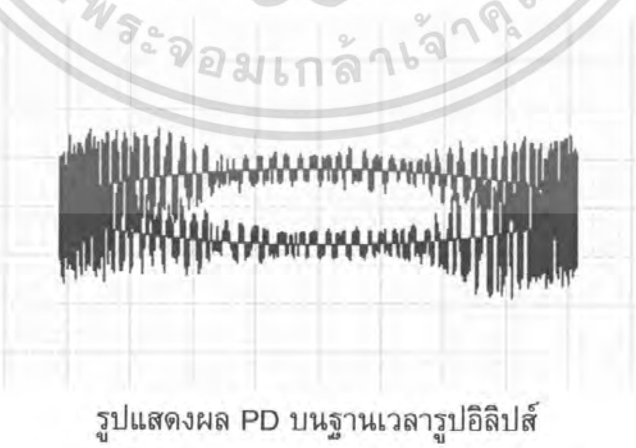
ตัวอย่างที่ 6	พิกัด : 24 kV 10 kA	
	วันที่ทำการทดสอบ : วันอังคารที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550	



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PD ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่ป้อนแรงดัน



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนเทียบกับเวลา



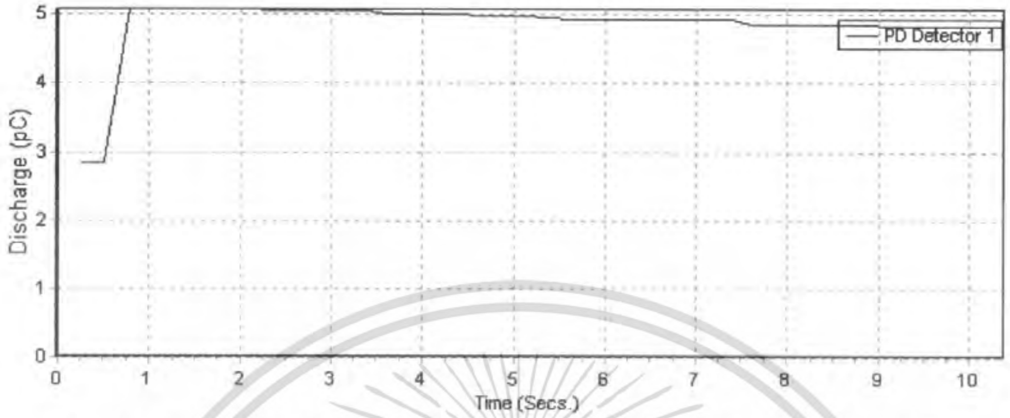
รูปแสดงผล PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

Discharge = 1.14 pC , Voltage = 17.88 kV

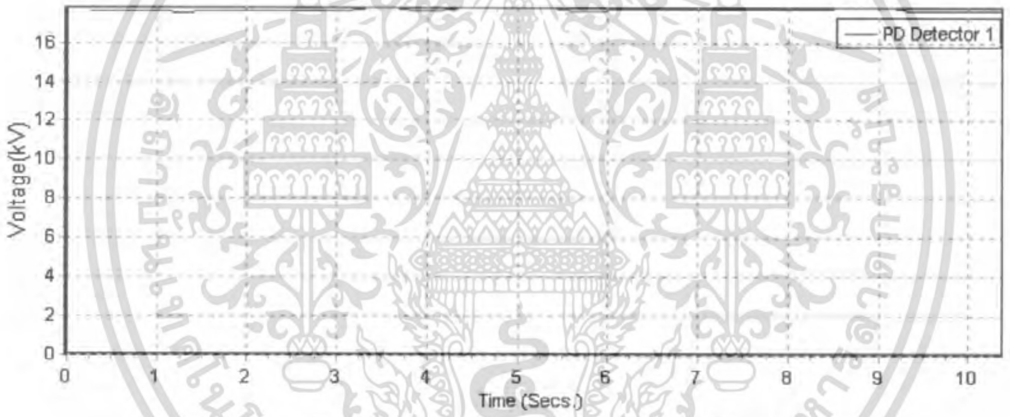
ภาพที่ 3.18 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

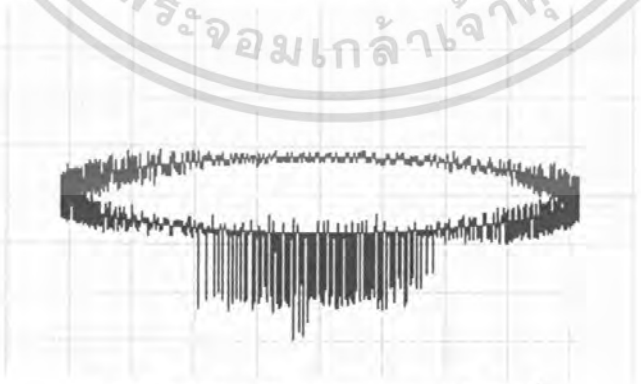
ตัวอย่างที่ 7	พิกัด : 24 kV 10 kA	
	วันที่ทำการทดสอบ : วันอังคารที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550	



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PD ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่ป้อนแรงดัน



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนเทียบกับเวลา



รูปแสดงผล PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

Discharge = 4.83 pC , Voltage = 17.60 kV

ภาพที่ 3.19 ผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดสอบ

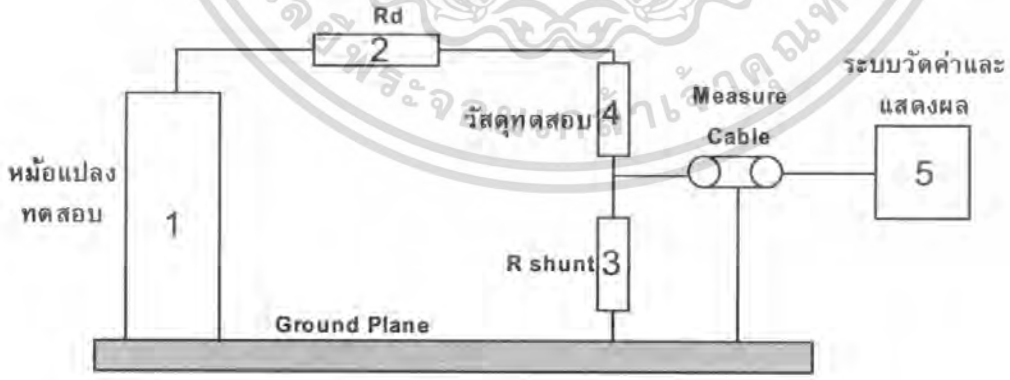
ค่าการดิสชาร์จที่วัดได้จากการทดสอบต้องมีค่าไม่เกินค่ากำหนดในมาตรฐาน IEC 60099-4 คือ ค่าที่วัดได้ต้องมีค่าไม่เกิน 10 pC

จากการทดสอบวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดัน 1.05 เท่า ของแรงดันใช้งานต่อเนื่องของกับดักฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60099-4 พบว่ากับดักฟ้าผ่า พิกัด 21 kV 5kA ทั้ง 5 ตัวอย่างทดสอบ มีค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนอยู่ในช่วงประมาณ 0.86 – 1.07 pC กับดักฟ้าผ่า พิกัด 24kV 10 kA ตัวอย่างที่ 6 มีค่าการดิสชาร์จบางส่วนที่ 1.14 pC ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ 7 ซึ่งเป็นกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA มีค่าการดิสชาร์จบางส่วนสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆมาก ซึ่งมีค่า 4.83 pC เนื่องจากอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ทดสอบ จากรูปการแสดงการดิสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปอีลิปส์ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจพบเป็นการดิสชาร์จภายในตัวกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA ตัวอย่างการทดสอบที่ 1 – 5 และกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA ตัวอย่างทดสอบที่ 6 – 7 ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน

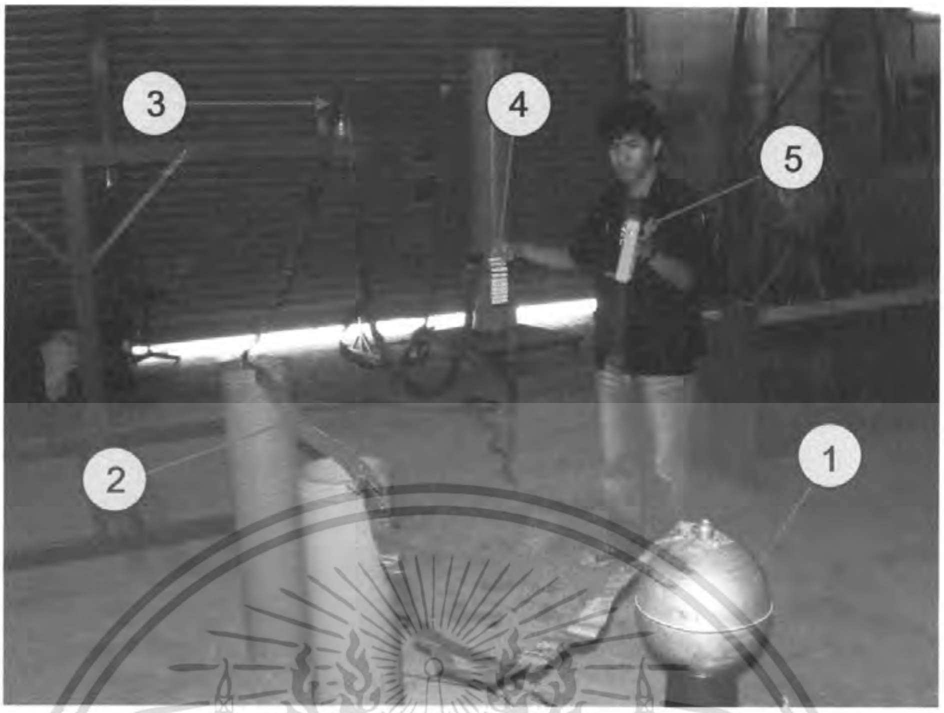
3.2.2 การทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงาน (Reference Voltage)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบแรงดันเริ่มทำงานซึ่งกำหนดมาจากบริษัทผู้ผลิต

วงจรการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.20 วงจรทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มทำงานกับดักฟ้าผ่า

1. หม้อแปลงทดสอบพิกัด 4 kVA 230/100 kV 50 Hz
2. ความต้านทานชันท์ พิกัด 10.15 kΩ 20 W
3. กับดักฟ้าผ่า
4. ความต้านทานจำกัดกระแส พิกัด 0.49 MΩ
5. โวลต์มิเตอร์

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ก่อนทำการทดสอบต้องทำความสะอาดผิวครีบฉนวนของกับดักฟ้าผ่าให้สะอาด เพื่อไม่ให้ความสกปรกทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว
2. ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าตามลักษณะการใช้งาน
3. ป้อนแรงดันให้กับดักฟ้าผ่าในขณะเดียวกันวัดขนาดกระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า ปรับแรงดันเพิ่มขึ้นจนได้ขนาดกระแสรั่วไหลตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด
4. บันทึกผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงานของกับดักฟ้าผ่า

กับดักฟ้าผ่า	ระดับแรงดันเริ่มทำงาน (kV) ที่ 1 mA
1. พิกัด 21 kV 5 kA	35.35
2. พิกัด 21 kV 5 kA	31.96
3. พิกัด 21 kV 5 kA	32.52
4. พิกัด 21 kV 5 kA	32.10
5. พิกัด 21 kV 5 kA	34.64
6. พิกัด 24 kV 10 kA	36.77
7. พิกัด 24 kV 10 kA	37.47

สรุปผลการทดลอง

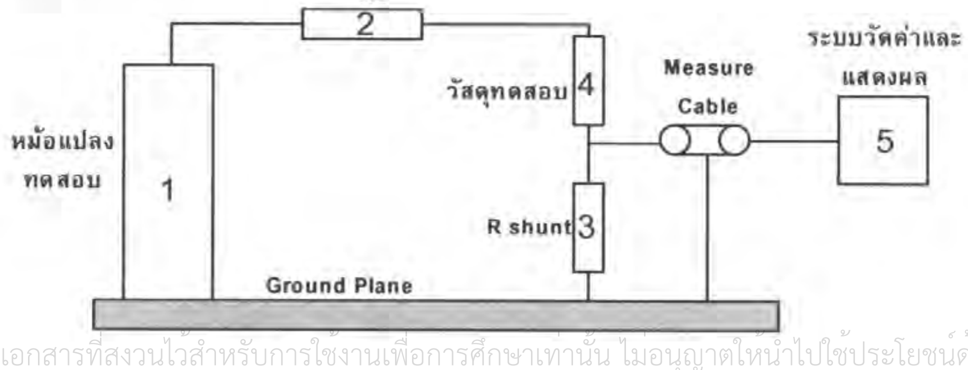
ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับดักฟ้าผ่าจนมีกระแสรั่วไหลตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด จะถูกกำหนดเป็นค่าแรงดันเริ่มทำงาน

จากผลการทดสอบพบว่ากับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA มีระดับแรงดันเริ่มทำงานที่ 1 mA อยู่ในช่วง 32.96 – 35.35 kV ส่วนกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA มีระดับแรงดันเริ่มทำงานที่ 1 mA อยู่ในช่วง 36.77 – 37.47 kV

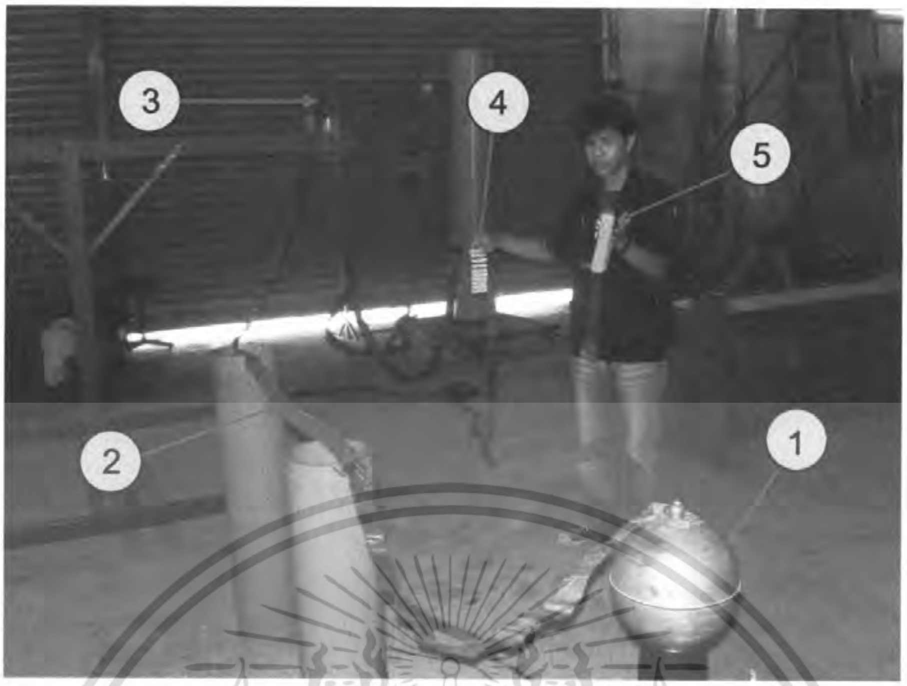
3.2.3 การทดสอบหากระแสรั่วไหล

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่าในขณะใช้งานที่ระดับแรงดันปกติและขณะที่เกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

วงจรการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.21 วงจรทดสอบหาค่ากระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า

1. หม้อแปลงทดสอบพิกัด 4 kVA 230/100 kV 50 Hz
2. ความต้านทานชันท์ พิกัด 10.15 kΩ 20 W
3. กับดักฟ้าผ่า
4. ความต้านทานจำกัดกระแส พิกัด 0.49 MΩ
5. โวลต์มิเตอร์

<u>ขั้นตอนการทดสอบ</u>

1. ก่อนทำการทดสอบต้องทำความสะอาดผิวครีบฉนวนของกับดักฟ้าผ่าให้สะอาด เพื่อไม่ให้ความสกปรกทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว
2. ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าตามลักษณะการใช้งาน
3. ป้อนแรงดันให้กับดักฟ้าผ่ามีค่าเท่ากับค่าแรงดันเฟส – กราวน์ของอัตราแรงดัน ในขณะเดียวกันวัดขนาดกระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า ปรับแรงดันเพิ่มขึ้นจนเท่ากับแรงดันเกินชั่วขณะ โดยกับดักฟ้าผ่าขนาด 21 kV และ 24 kV มีแรงดันใช้งานต่อเนื่องสูงสุดเท่ากับ 17.0 kV และ 19.5 kV ตามลำดับ
4. บันทึกผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบหากระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า

กับดักฟ้าผ่า	ระดับแรงดัน (kV)	ขนาดกระแสรั่วไหล (mA)
1. พิกัด 21 kV 5 kA	12.7	0.170
	17.0	0.220
2. พิกัด 21 kV 5 kA	12.7	0.201
	17.0	0.206
3. พิกัด 21 kV 5 kA	12.7	0.210
	17.0	0.220
4. พิกัด 21 kV 5 kA	12.7	0.175
	17.0	0.220
5. พิกัด 21 kV 5 kA	12.7	0.171
	17.0	0.223
6. พิกัด 24 kV 10 kA	13.8	0.286
	19.5	0.404
7. พิกัด 24 kV 10 kA	13.8	0.283
	19.5	0.414

สรุปผลการทดลอง

กระแสรั่วไหลที่วัดได้ที่ระดับแรงดันที่กำหนด จะกำหนดเป็นกระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่าในขณะใช้งานที่ระดับแรงดันปกติและขณะที่เกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

จากผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA มีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันปกติ (12.7 kV) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.17 – 0.21 mA และมีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันใช้งานต่อเนื่องสูงสุด (17.0 kV) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.22 – 0.223 mA ส่วนกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA มีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันปกติ อยู่ในช่วงระหว่าง 0.283 – 0.286 mA และมีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันใช้งานต่อเนื่องสูงสุด (19.5 kV) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.404 – 0.414 mA

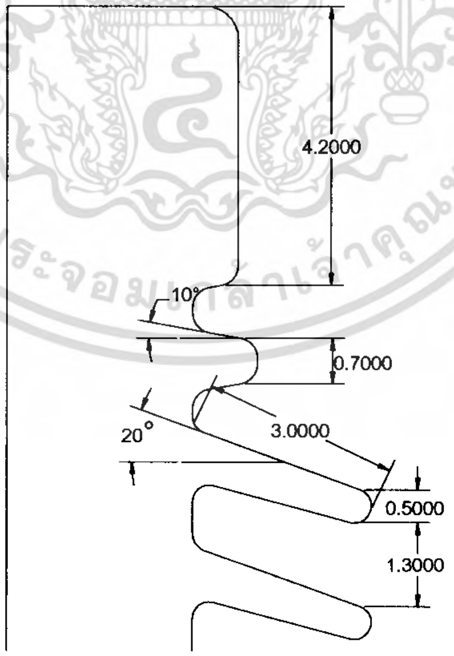
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบครีบฉนวนและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของดรอปเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่า

การออกแบบครีบฉนวนกับดักฟ้าผ่าและดรอปเอาท์ฟิวส์จะต้องคำนึงถึงการกระจายของสนามไฟฟ้าซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการเกิดวาบไฟตามผิว การออกแบบลักษณะมิติครีบของดรอบเอาท์ฟิวส์ที่ดี จะต้องพยายามออกแบบให้ครีบหรือชั้นของครีบมีผิวโค้งไปตามเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า (Equipotential line) เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวมีค่าน้อยและมีการกระจายสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงระดับแรงดันที่ใช้งานและพิจารณาผลของกระแสต่อเนื่องด้วยโดยความสูงจะเป็นการบ่งบอกถึงระดับของแรงดันที่ทนได้ ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางจะเป็นตัวบ่งบอกถึงพิกัดการไหลของกระแส

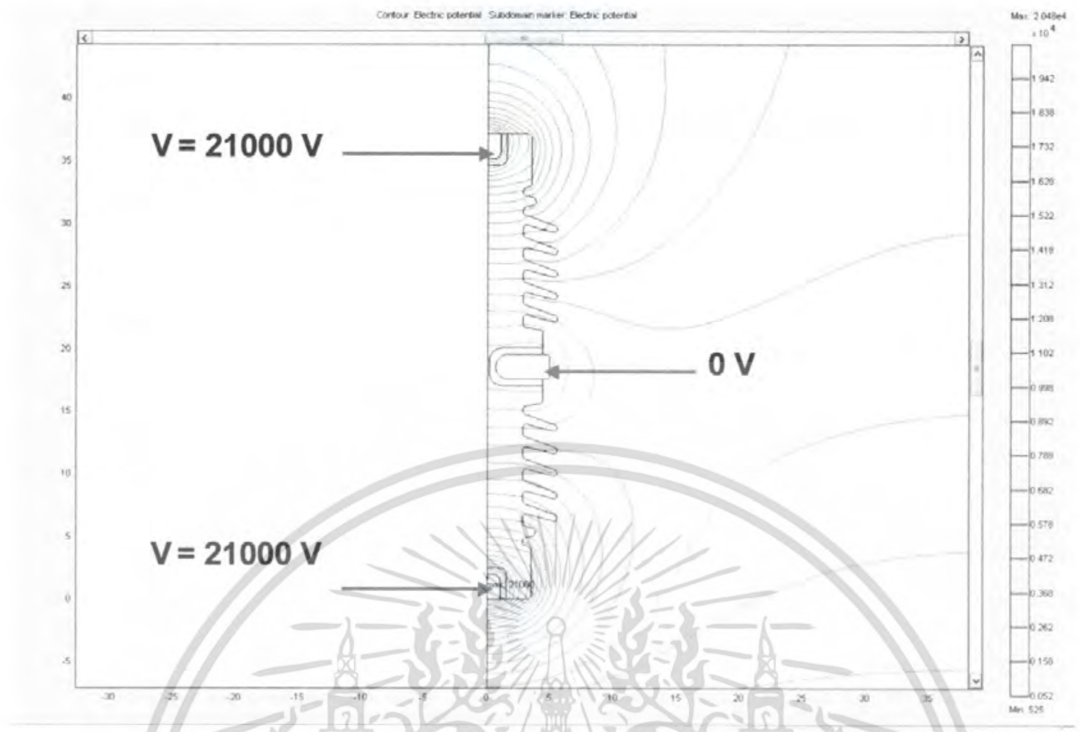
การวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าจะใช้โปรแกรม FEMLAB 3.1 ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าได้สะดวกมากขึ้น ตัวอย่างการวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

4.1 การออกแบบครีบฉนวนและวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอปเอาท์ฟิวส์



ภาพที่ 4.1 แสดง Dimension ต่างๆ ของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 1 ครีบเท่า

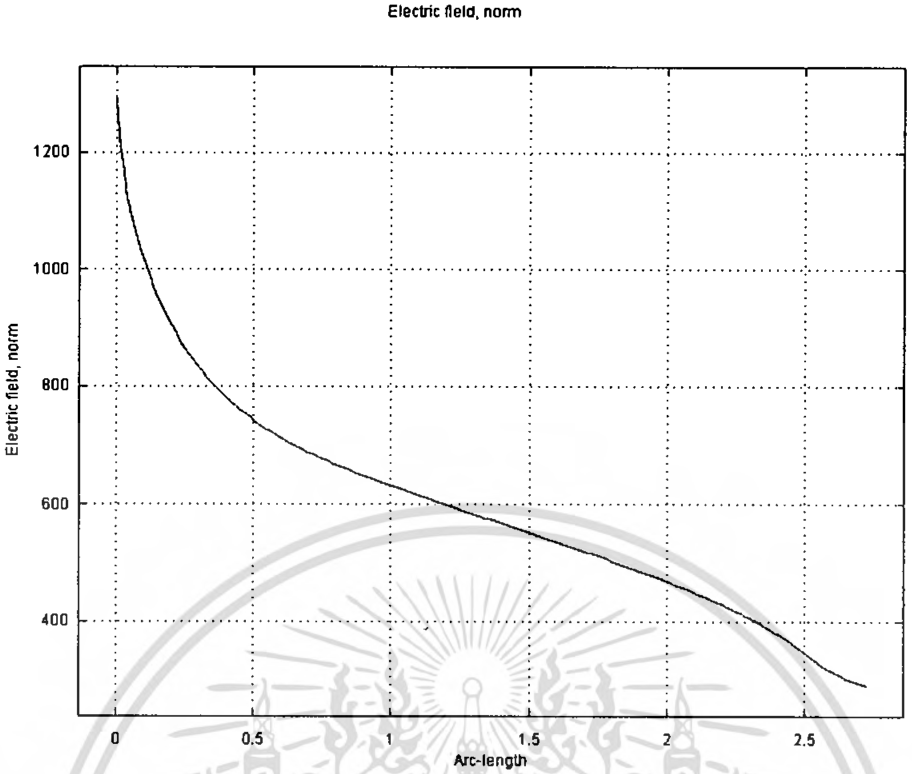
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



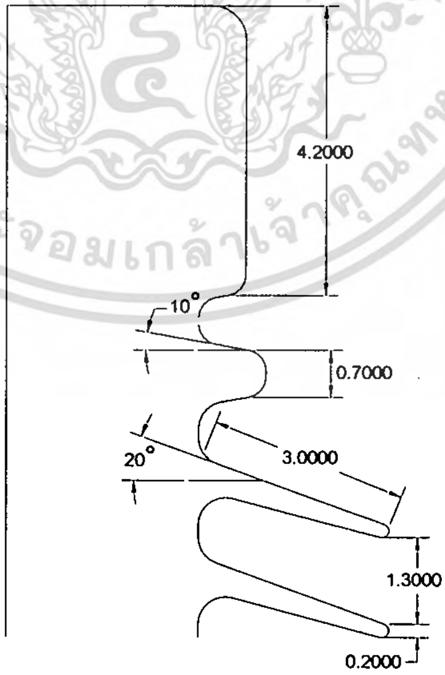
ภาพที่ 4.2 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 1 ครีบเท่า โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

ภาพที่ 4.3 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 1 ครีบ เท่าโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

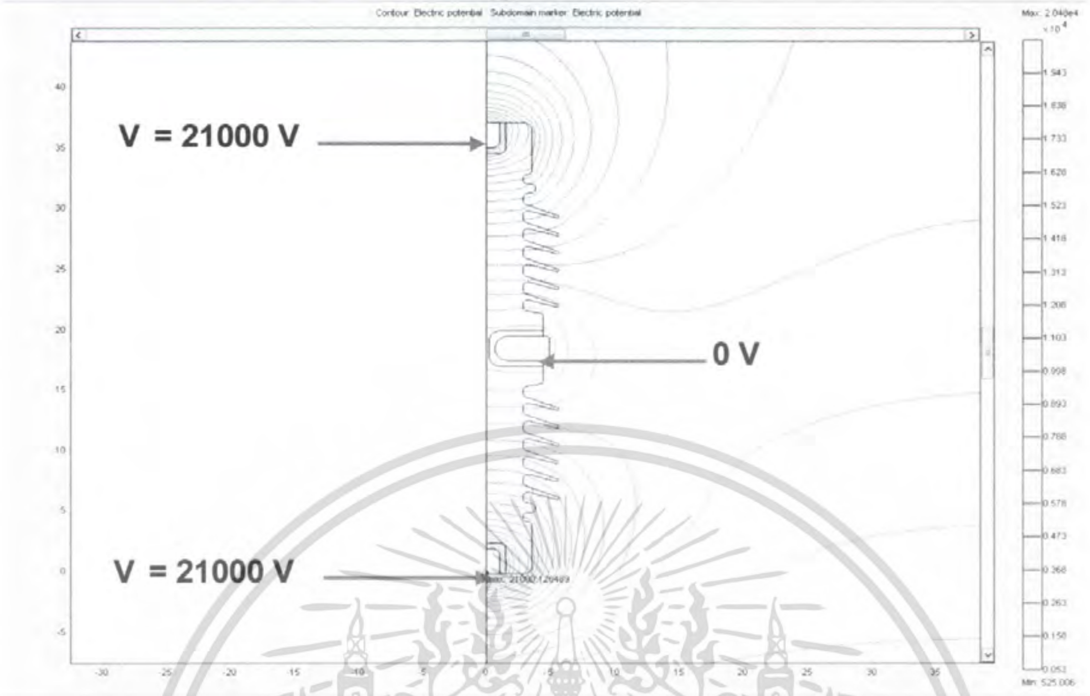


ภาพที่ 4.4 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 1 ครีบเท่าโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

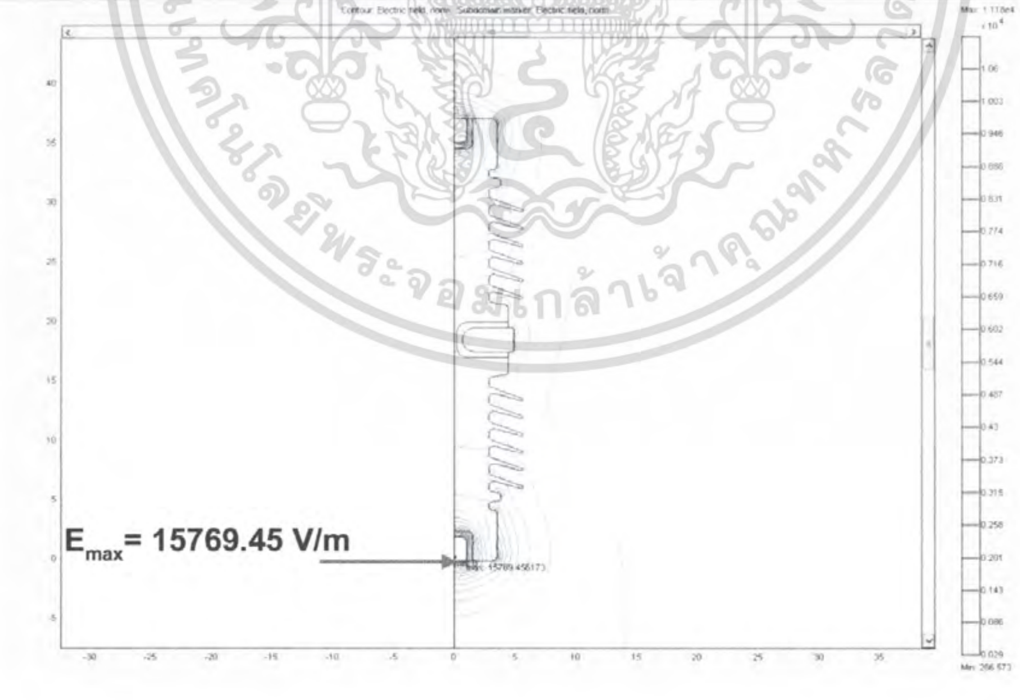


ภาพที่ 4.5 แสดง Dimension ต่าง ๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 2 ครีบเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

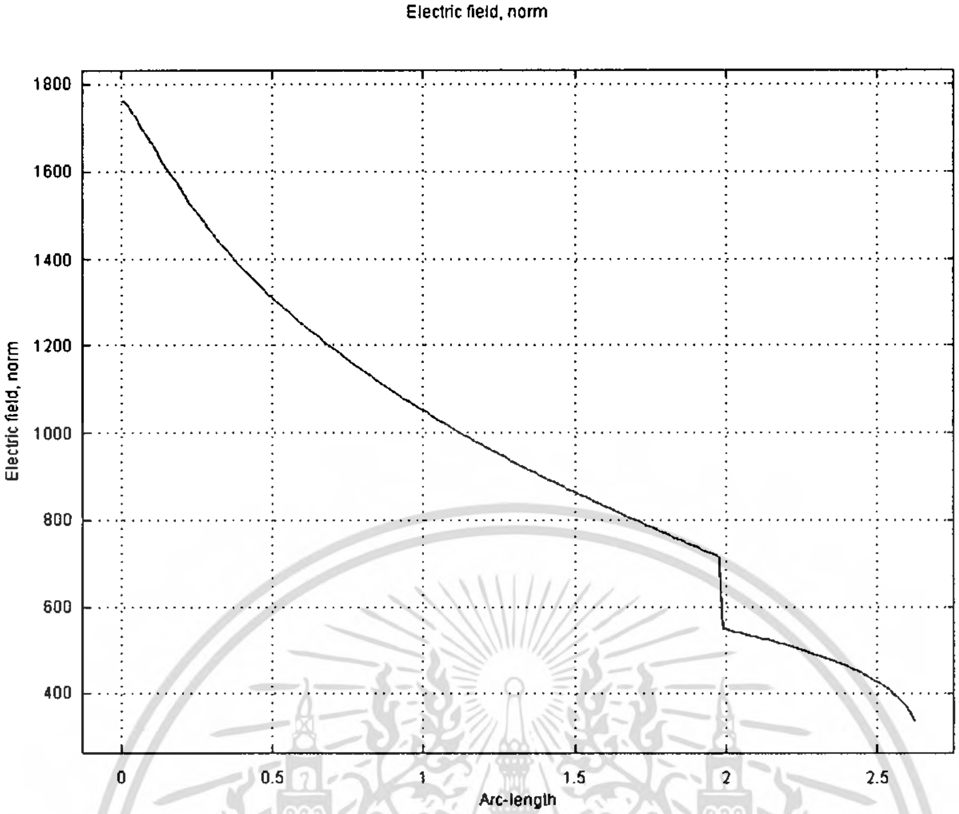


ภาพที่ 4.6 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 2 ครีบเท่า โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

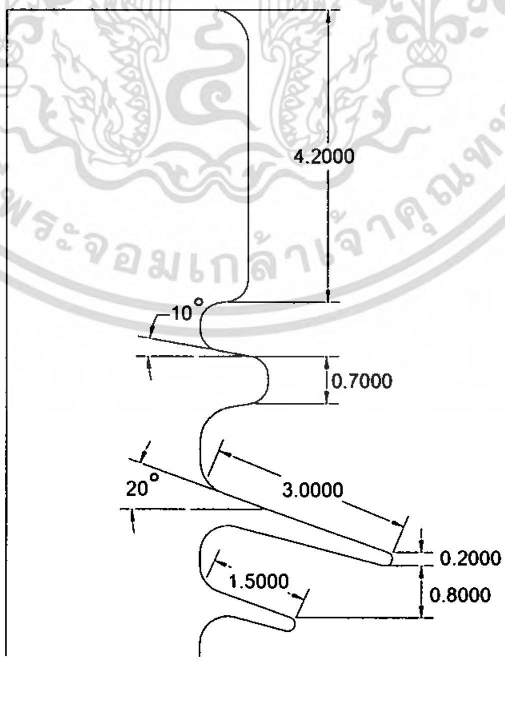


ภาพที่ 4.7 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 2 ครีบเท่าโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

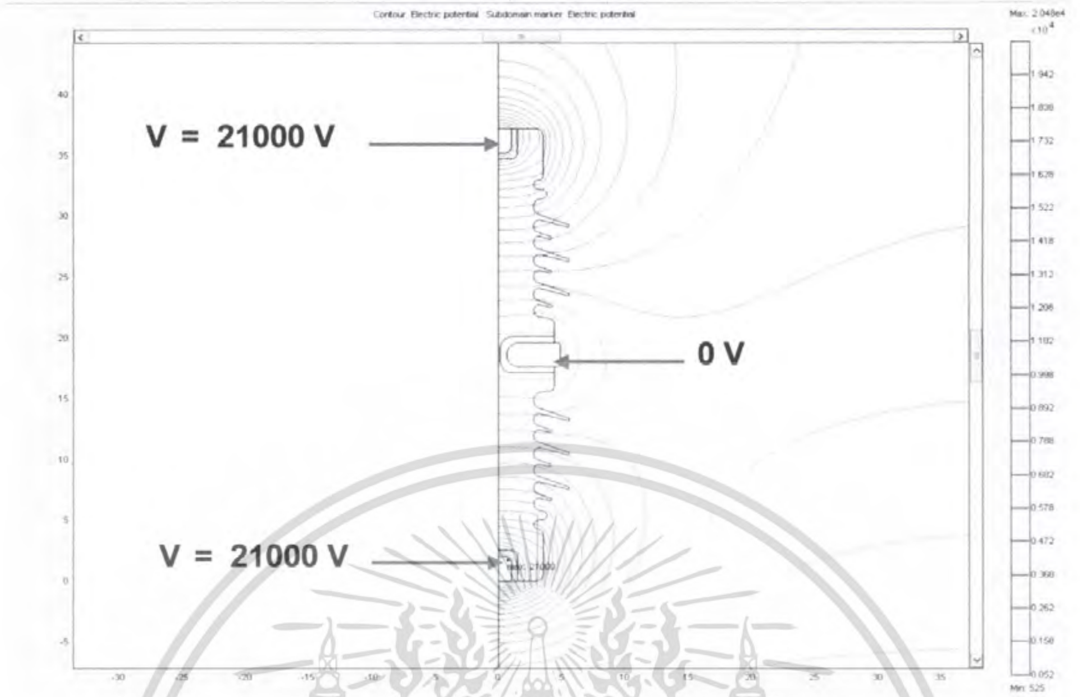


ภาพที่ 4.8 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของครอบเอาฟิวส์ แบบที่ 2 ครีบเท่าโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

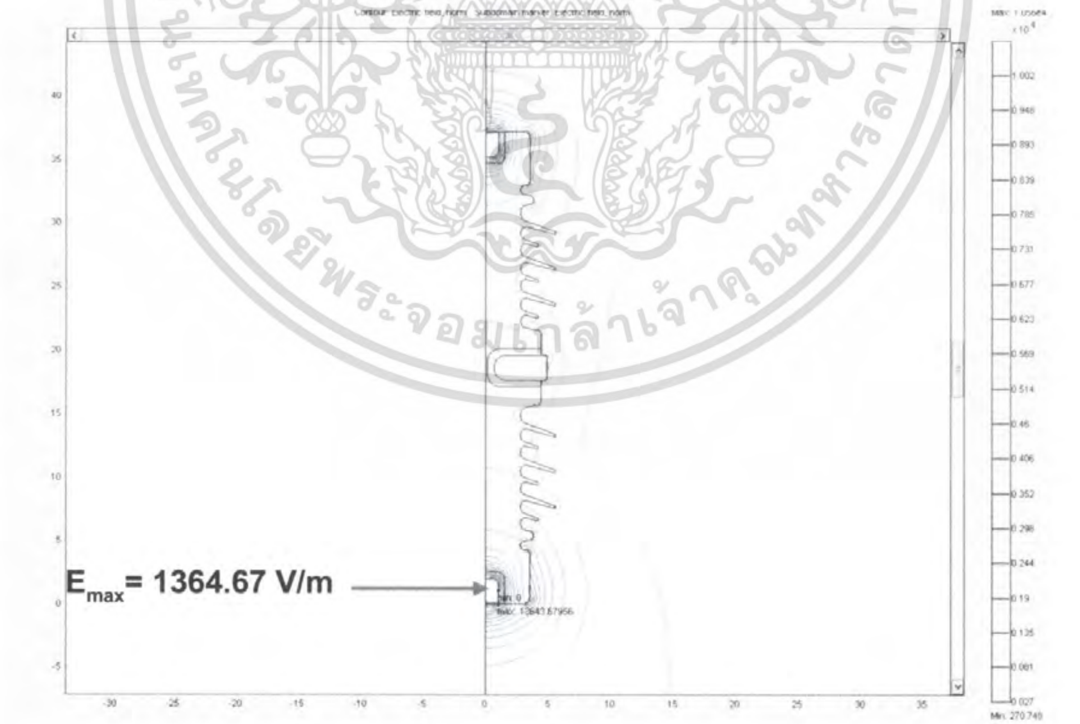


ภาพที่ 4.9 แสดง Dimension ต่างๆของครอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 3 ครีบสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

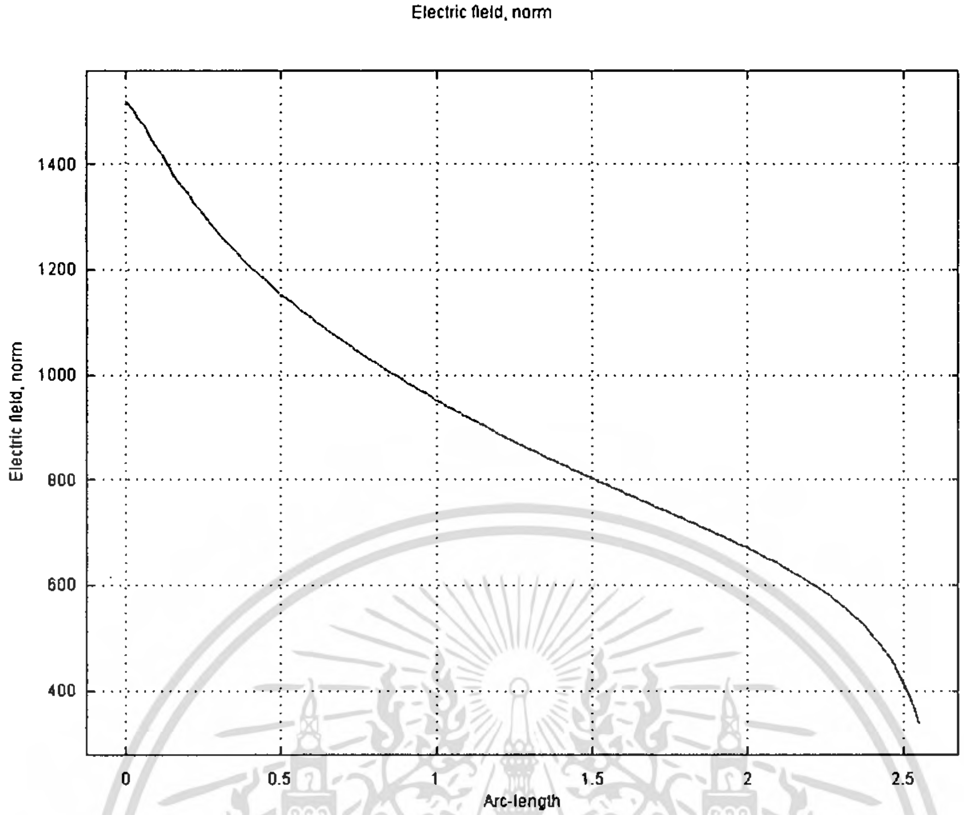


ภาพที่ 4.10 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 3 ครีบสลับ โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

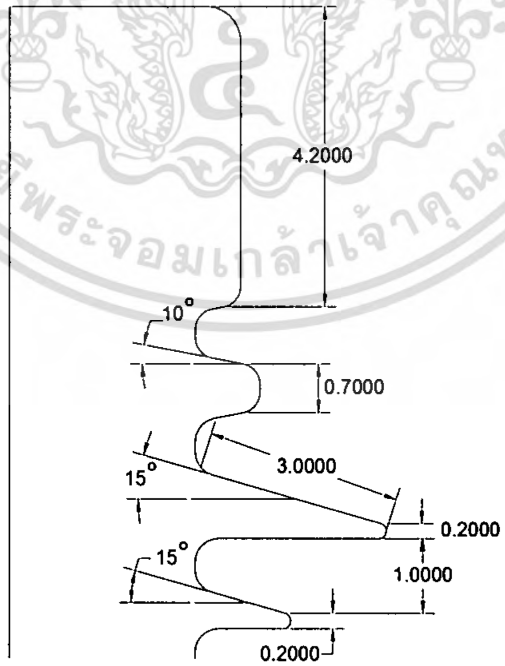


ภาพที่ 4.11 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 3 ครีบ สลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

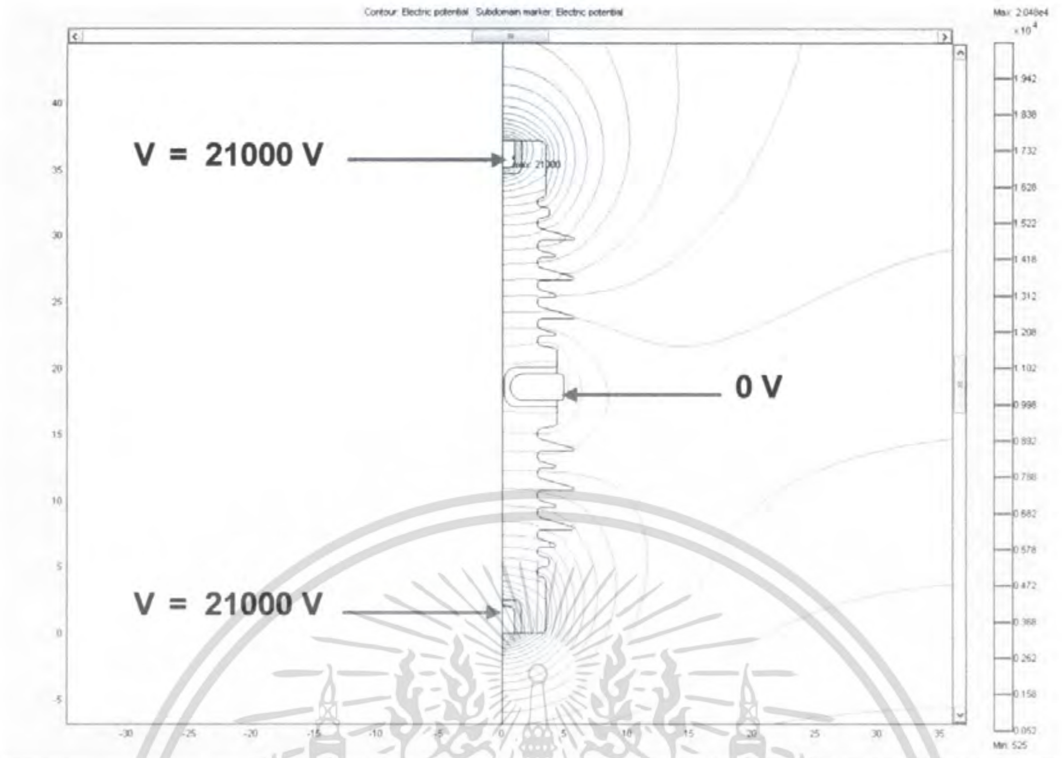


ภาพที่ 4.12 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 3 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

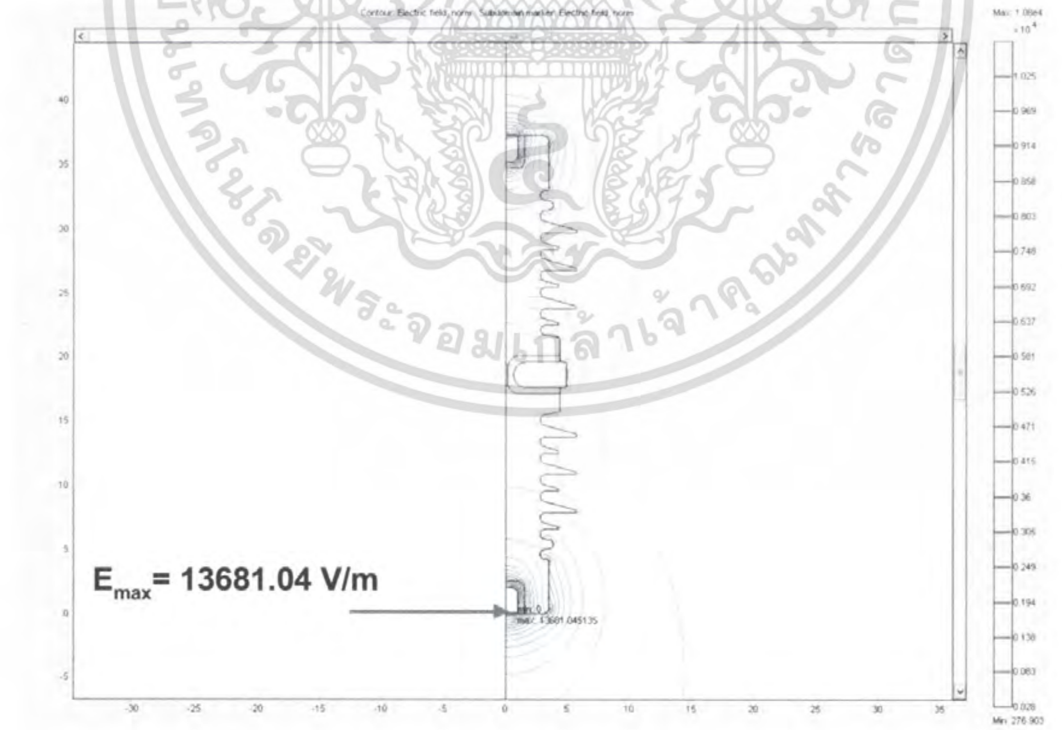


ภาพที่ 4.13 แสดง Dimension ต่างๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 4 ครีบสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

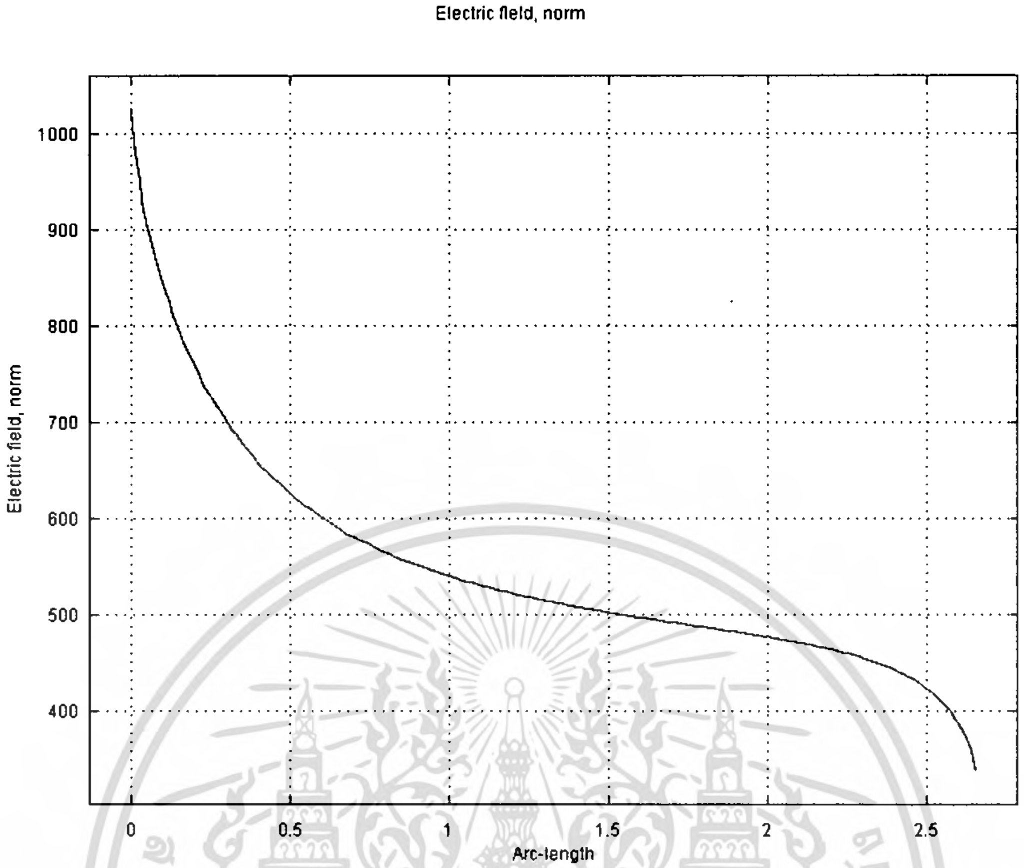


ภาพที่ 4.14 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 4 ครีบสลับ โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

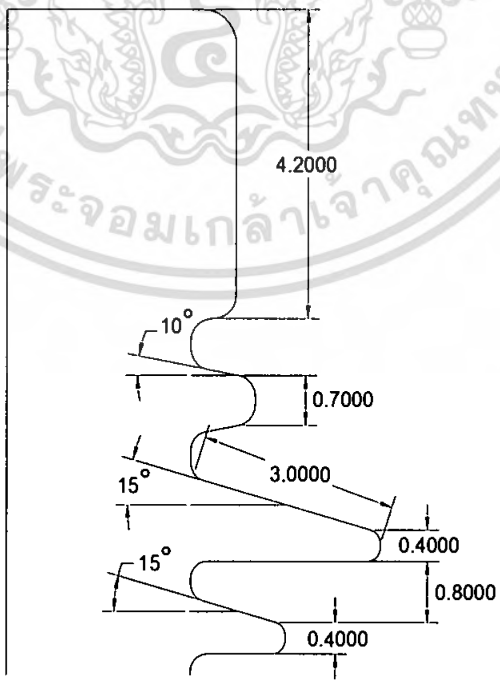


ภาพที่ 4.15 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 4 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

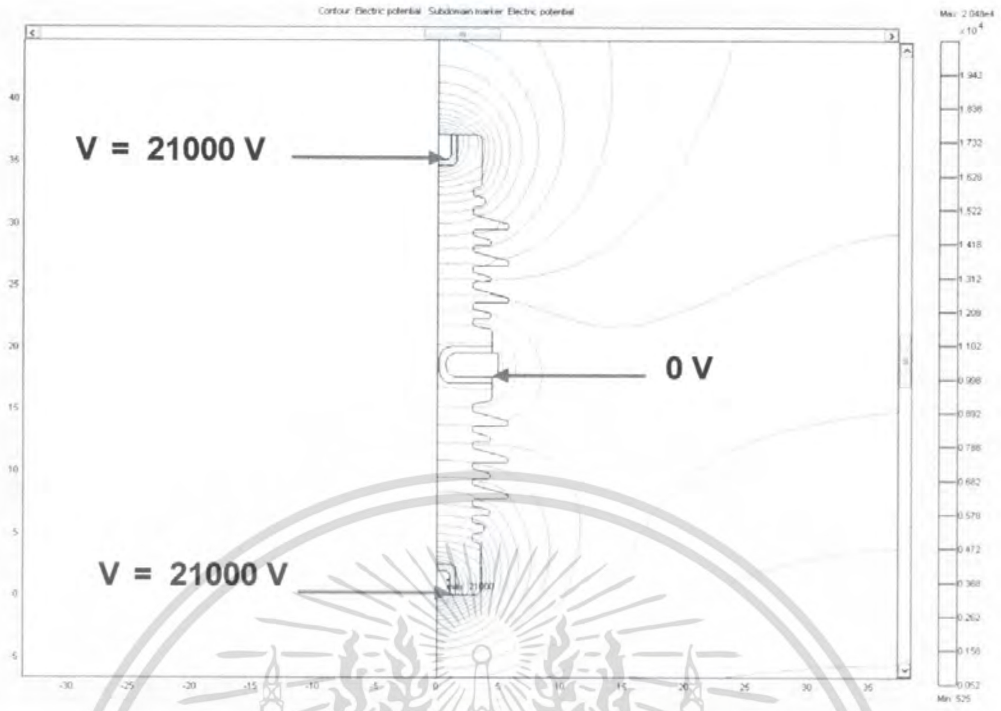


ภาพที่ 4.16 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 4 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

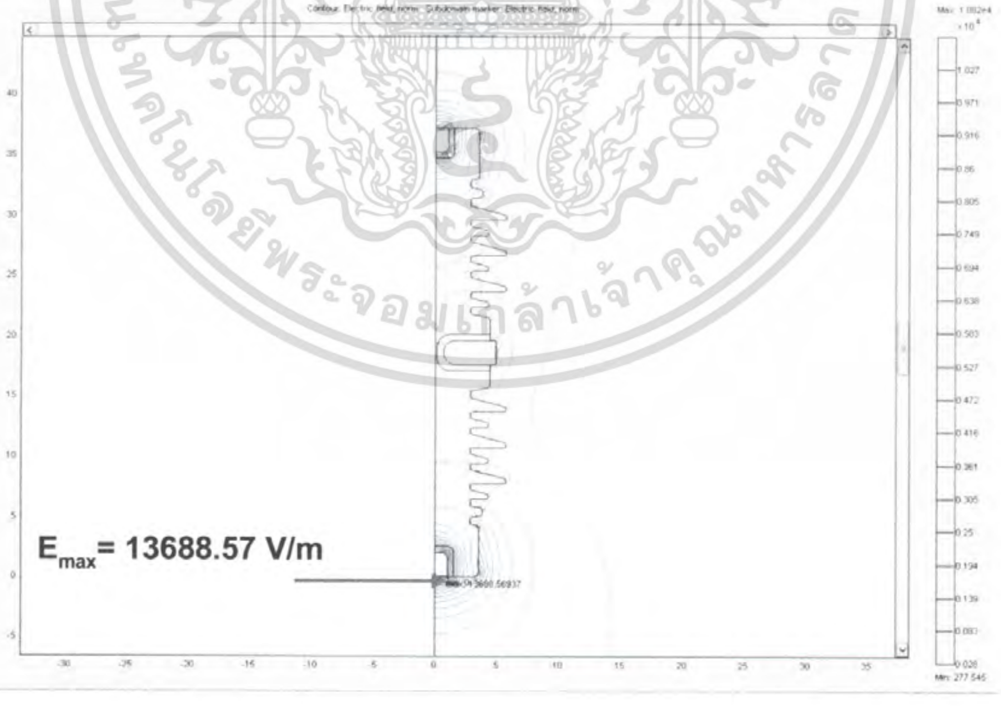


ภาพที่ 4.17 แสดง Dimension ต่าง ๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 5 ครีบสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

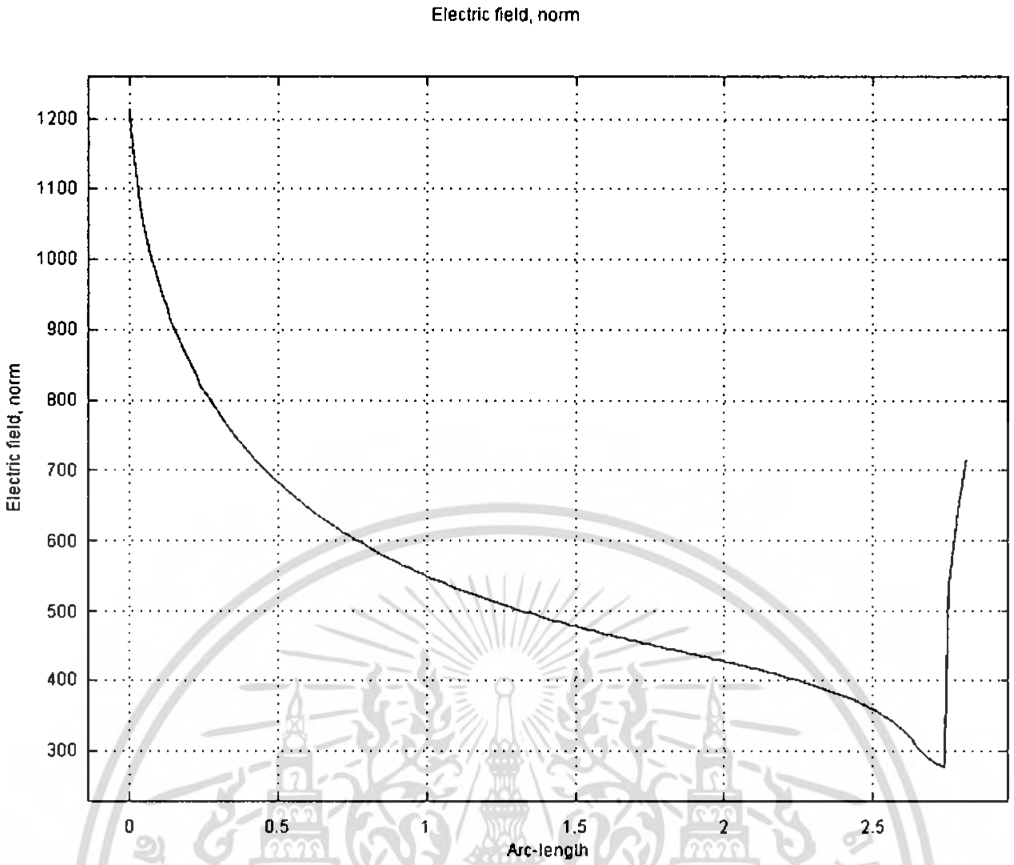


ภาพที่ 4.18 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 5 ครีบสลับ โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

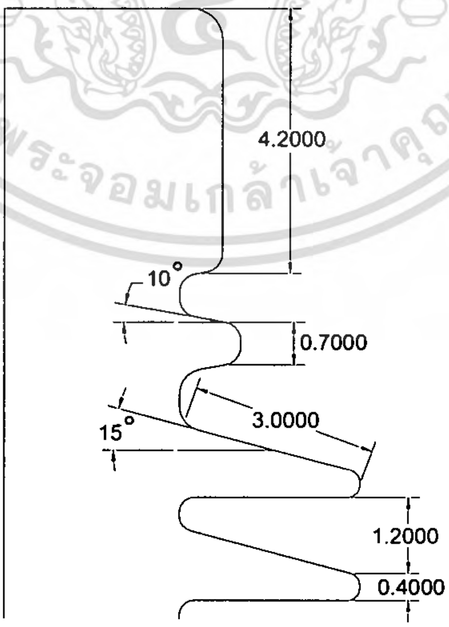


ภาพที่ 4.19 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 5 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

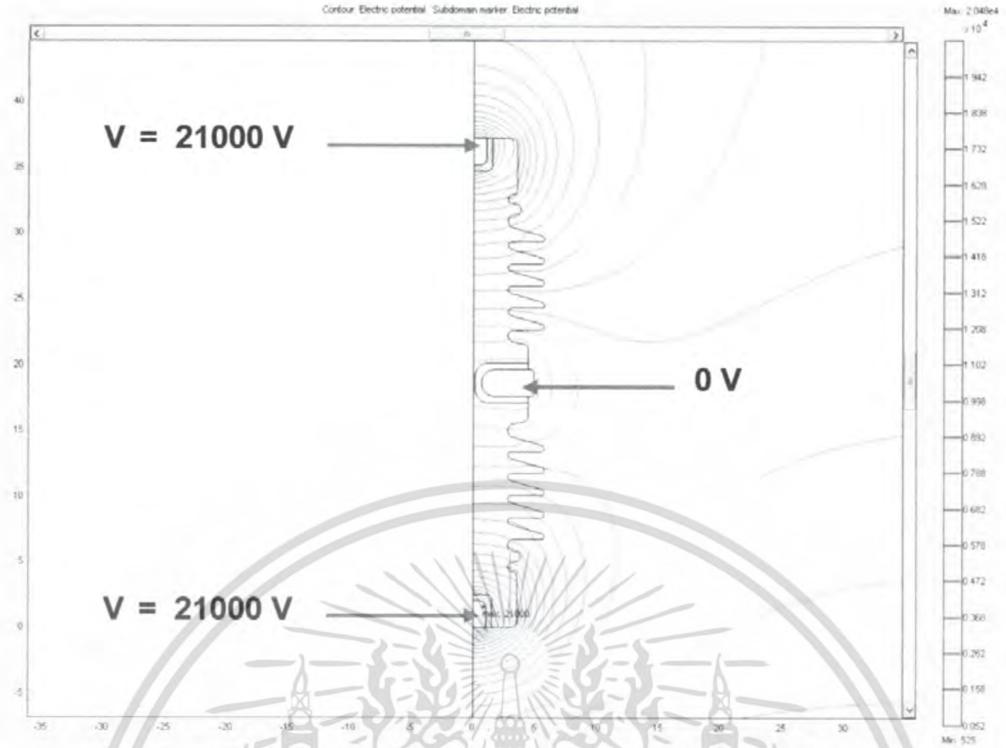


ภาพที่ 4.20 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 5 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

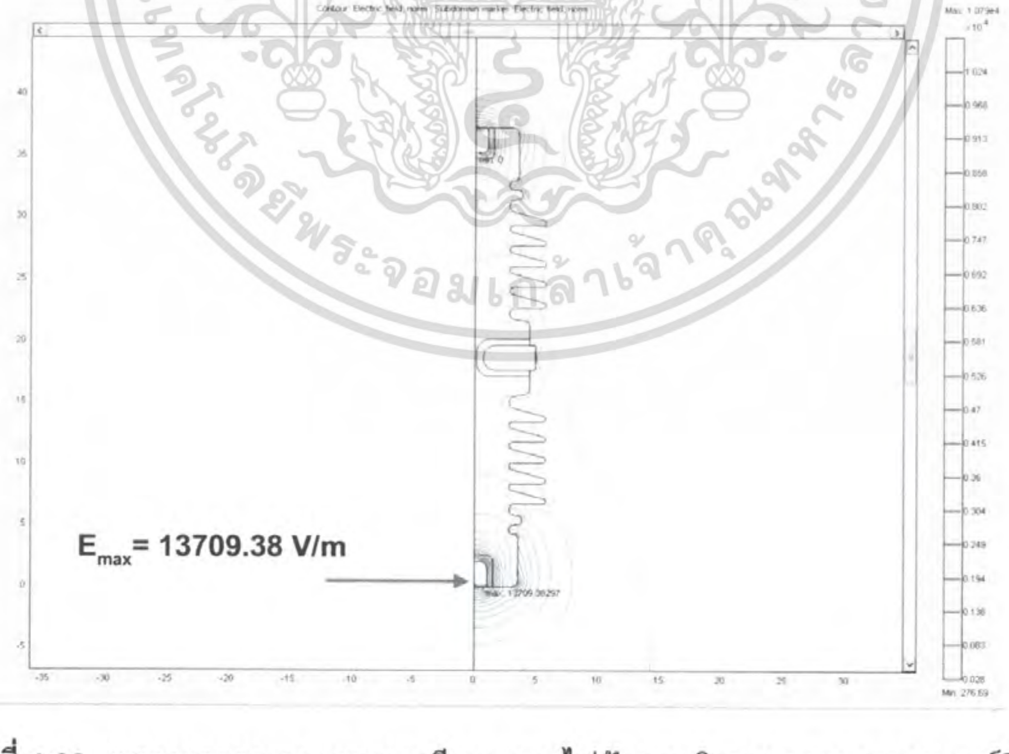


ภาพที่ 4.21 แสดง Dimension ต่าง ๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 6 ครีบเท่า (ภาคอุตสาหกรรม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

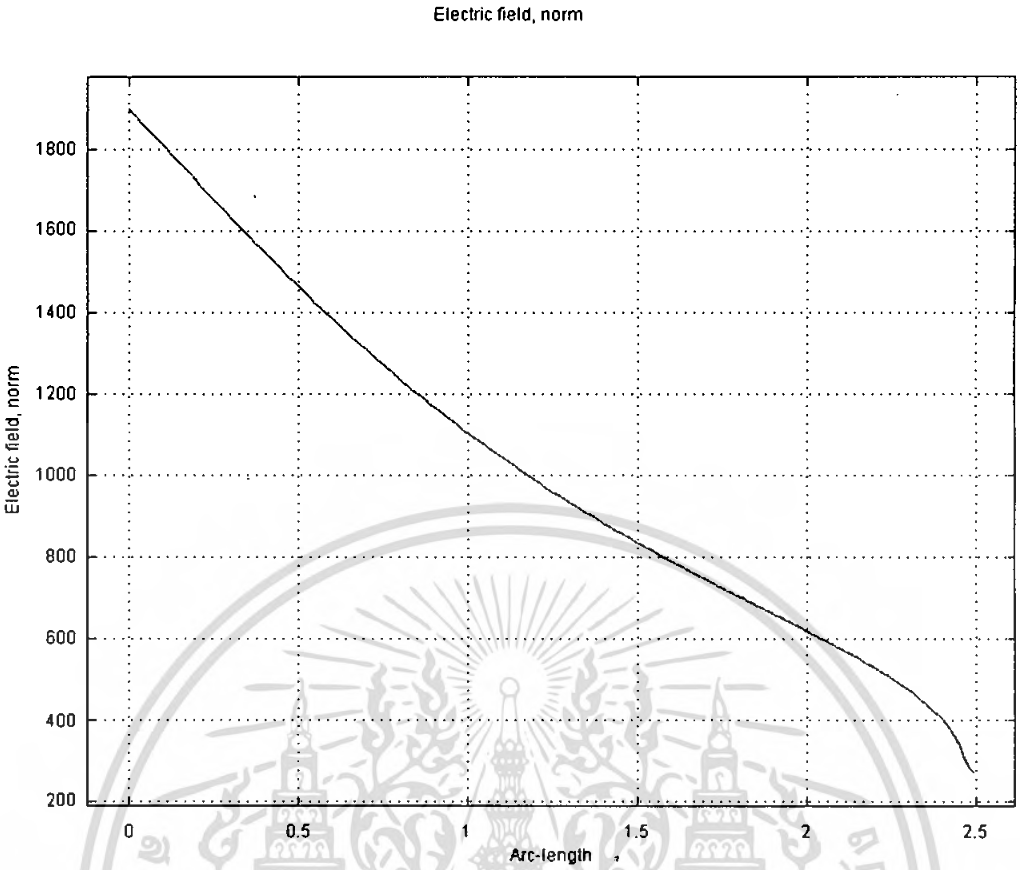


ภาพที่ 4.22 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 6 ครีบเท่า โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV (ภาคอุตสาหกรรม)

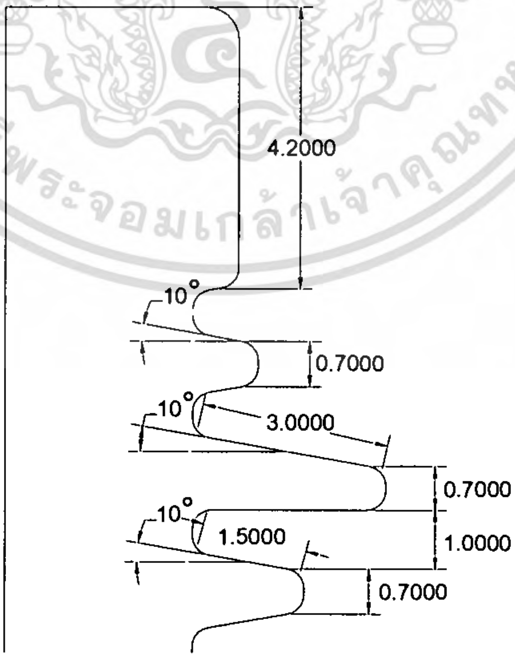


ภาพที่ 4.23 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 6 ครีบเท่า โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV (ภาคอุตสาหกรรม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

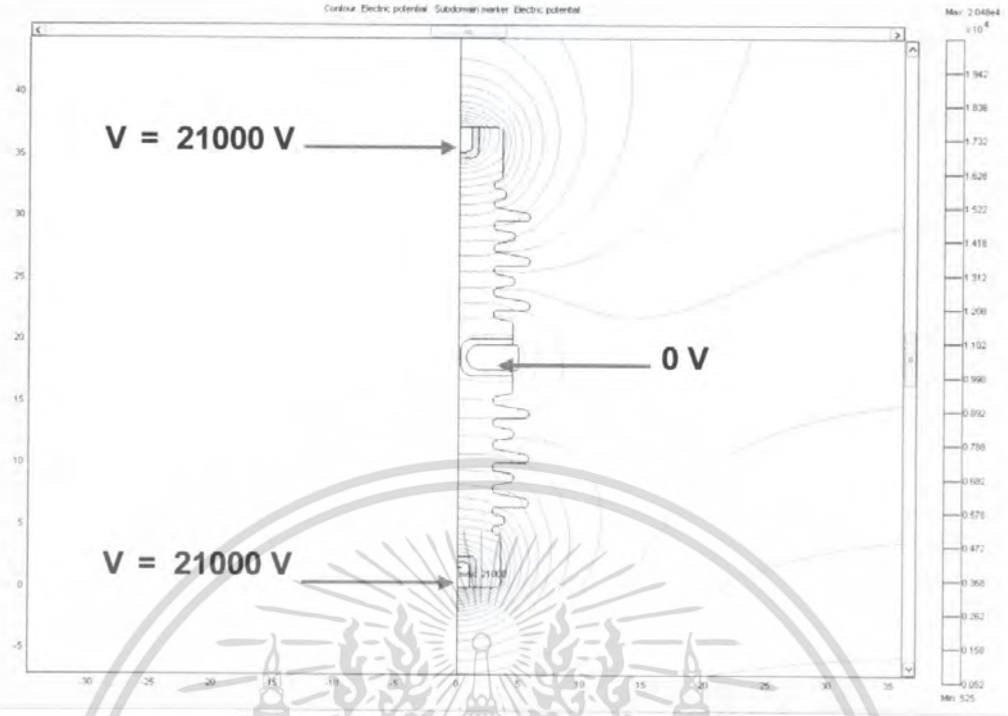


ภาพที่ 4.24 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 6 ครีบเท่าโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV (ภาคอุตสาหกรรม)

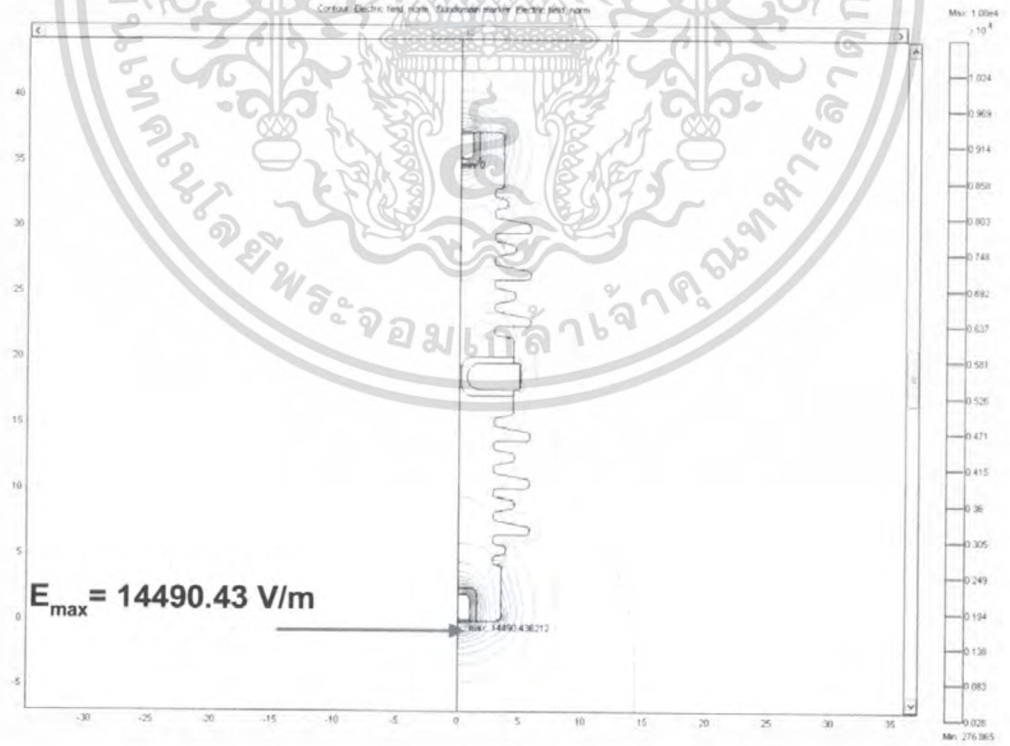


ภาพที่ 4.25 แสดง Dimension ต่าง ๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 7 ครีบสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

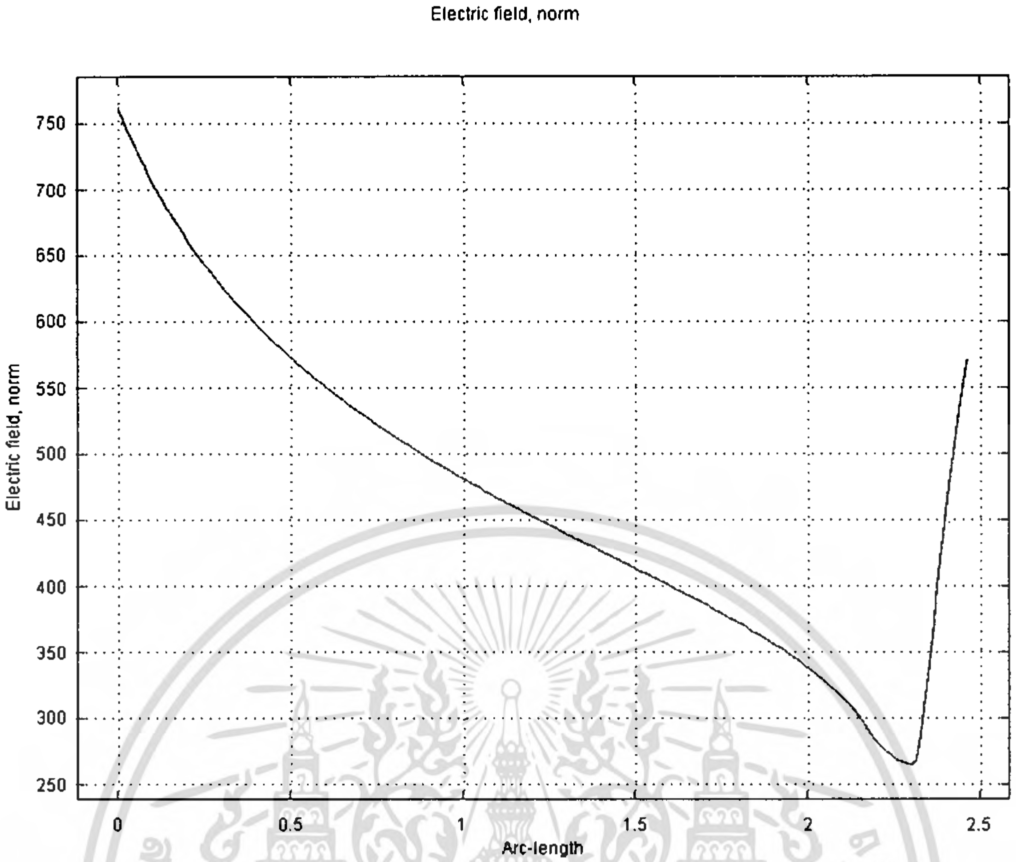


ภาพที่ 4.26 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 7 ครีบสลับ โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

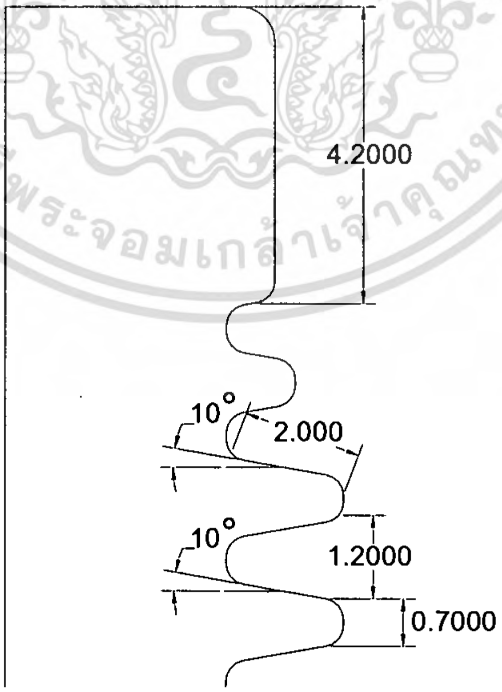


ภาพที่ 4.27 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 7 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

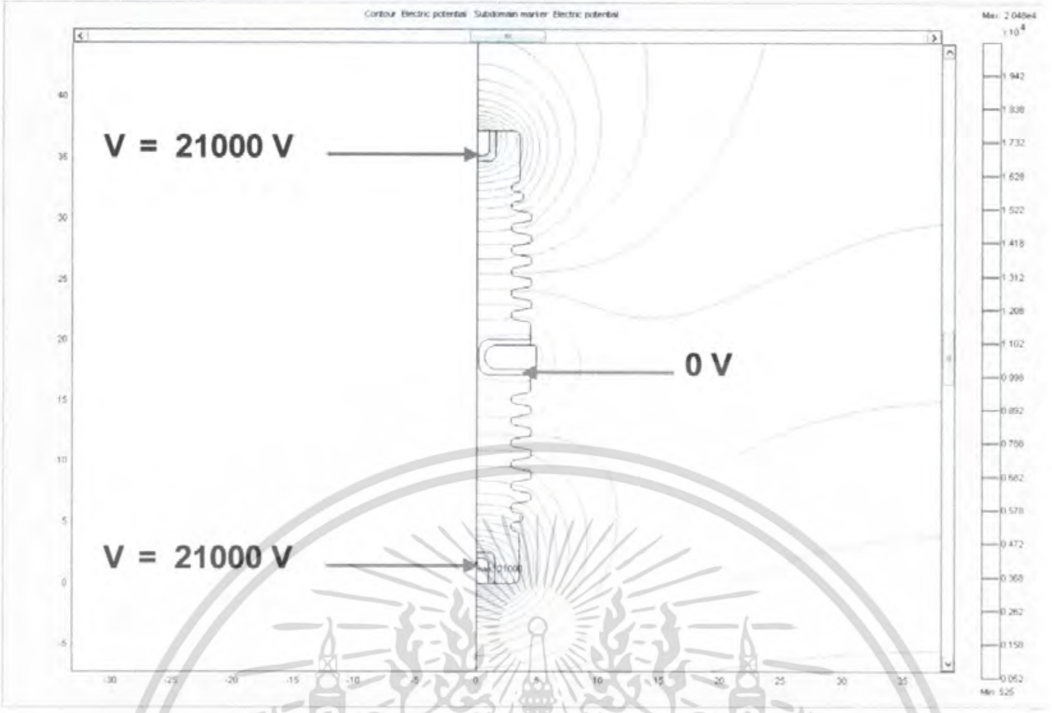


ภาพที่ 4.28 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 7 ครีบสลับโดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

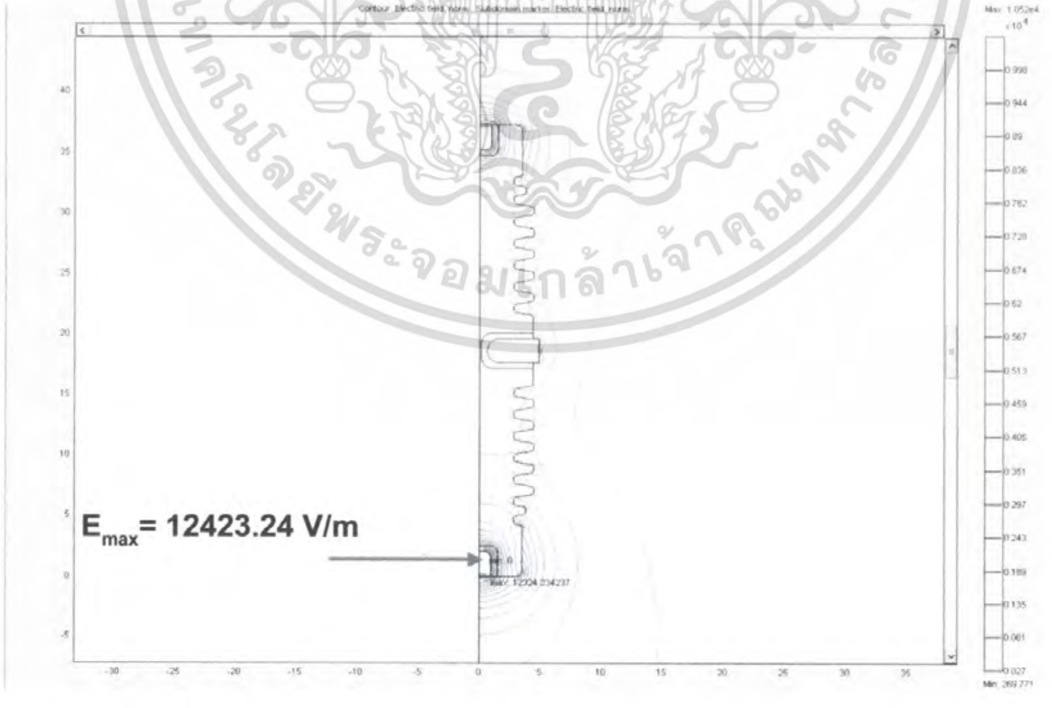


ภาพที่ 4.29 แสดง Dimension ต่างๆของดรอบเอาท์ฟิวส์แบบที่ 8 ครีบเท่า (ออกแบบใหม่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

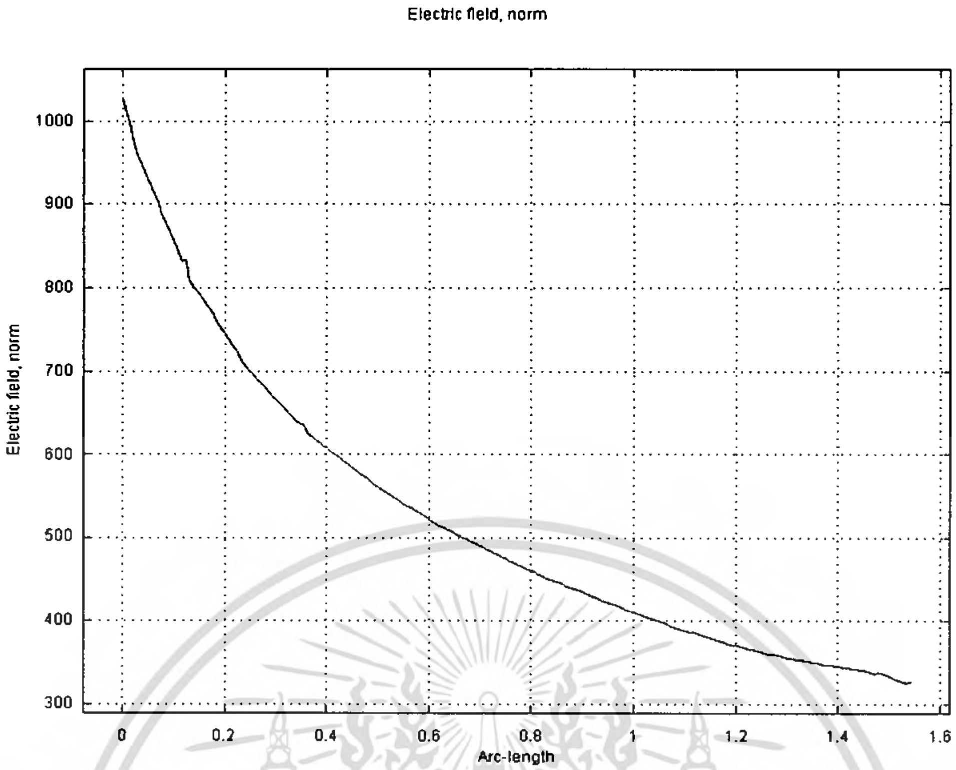


ภาพที่ 4.30 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 8 ครีบเท่า โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV (ออกแบบใหม่)



ภาพที่ 4.31 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 8 ครีบเท่า โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV (ออกแบบใหม่)

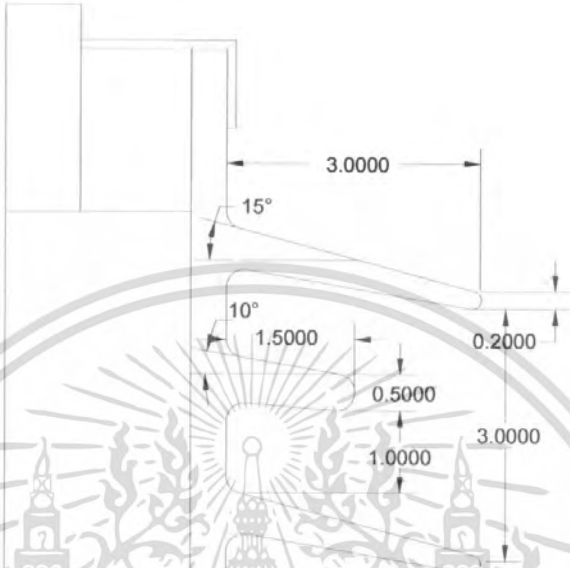
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



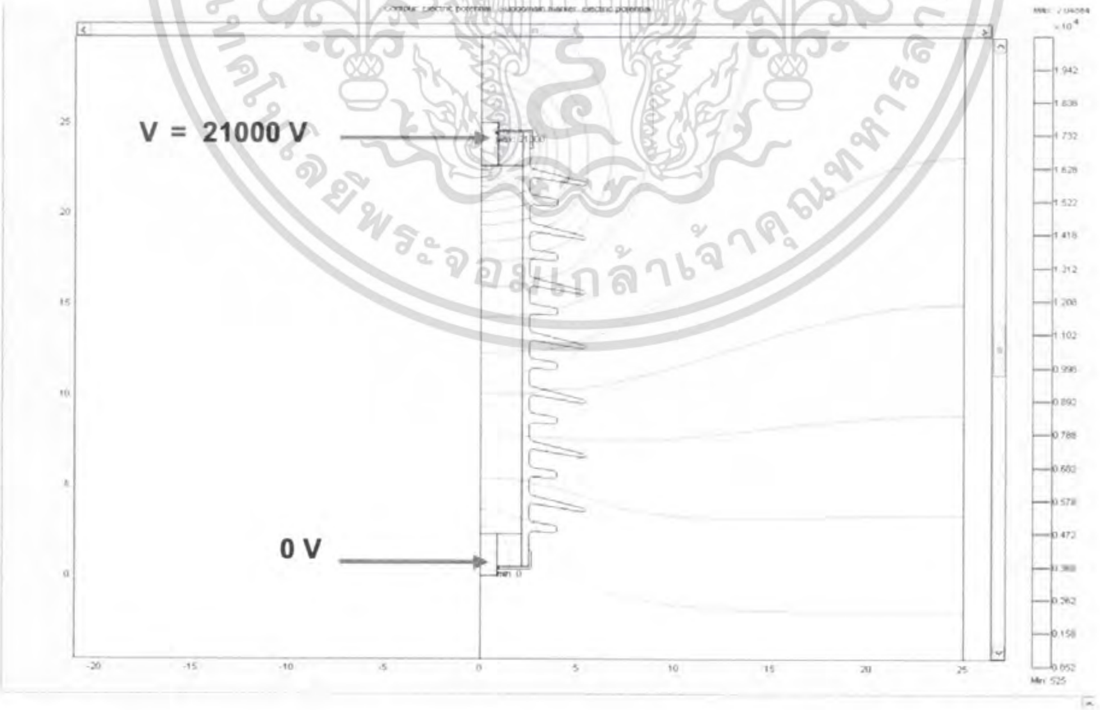
ภาพที่ 4.32 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ แบบที่ 8 ครีบเท่า โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV (ออกแบบใหม่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การออกแบบครีบฉนวนและวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า

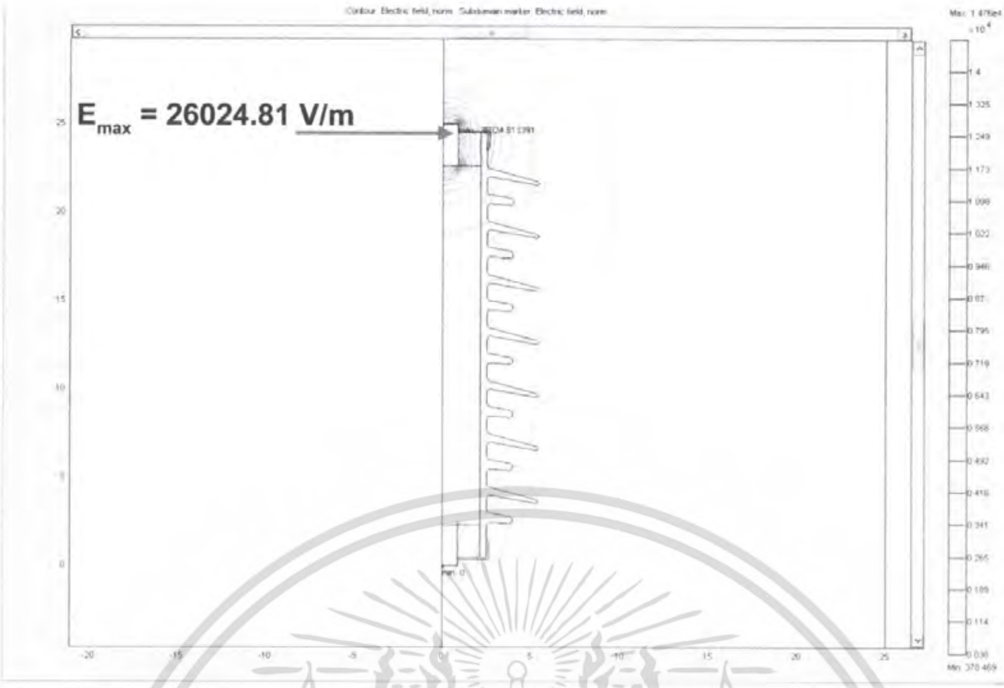


ภาพที่ 4.33 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1



ภาพที่ 4.34 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

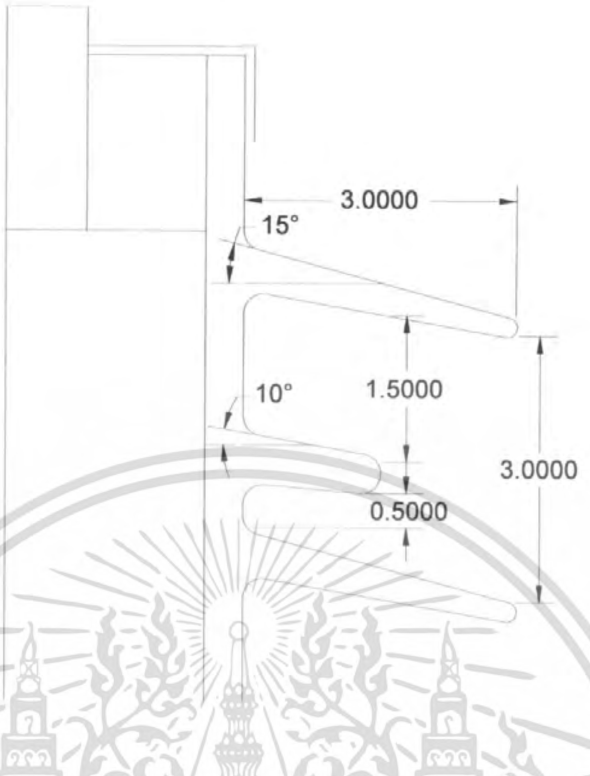
เอกสารนี้เป็นเอกสาร ... เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



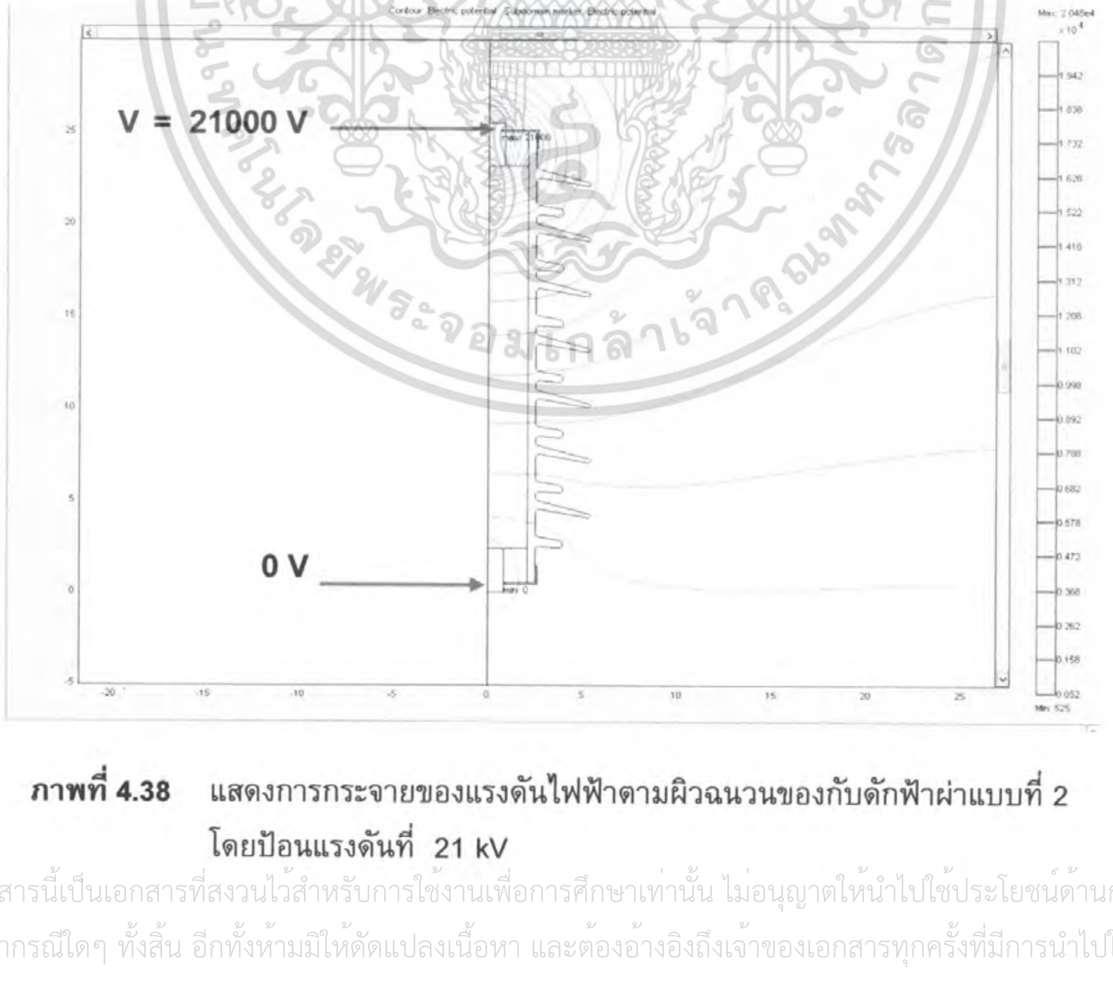
ภาพที่ 4.35 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

ภาพที่ 4.36 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

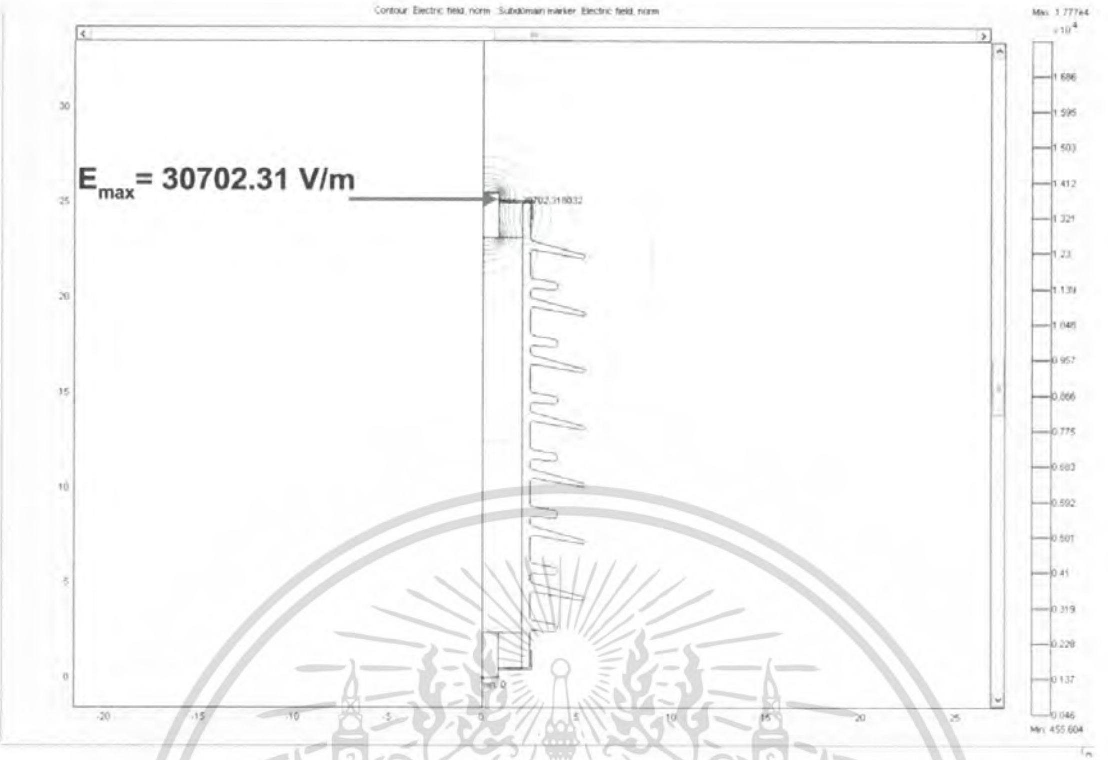


ภาพที่ 4.37 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2

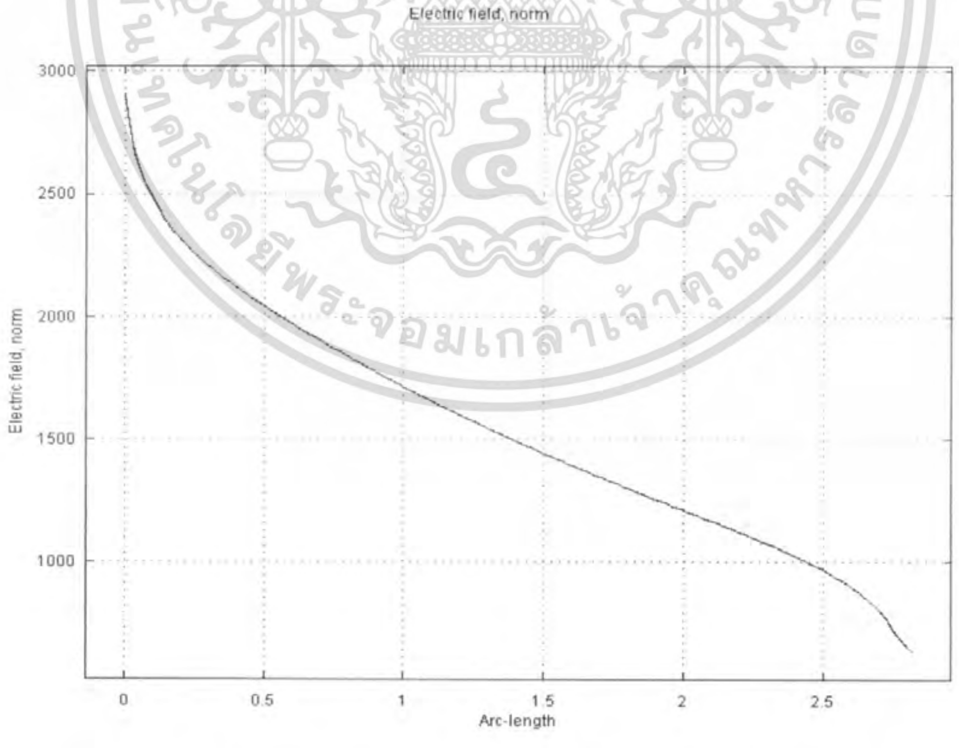


ภาพที่ 4.38 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

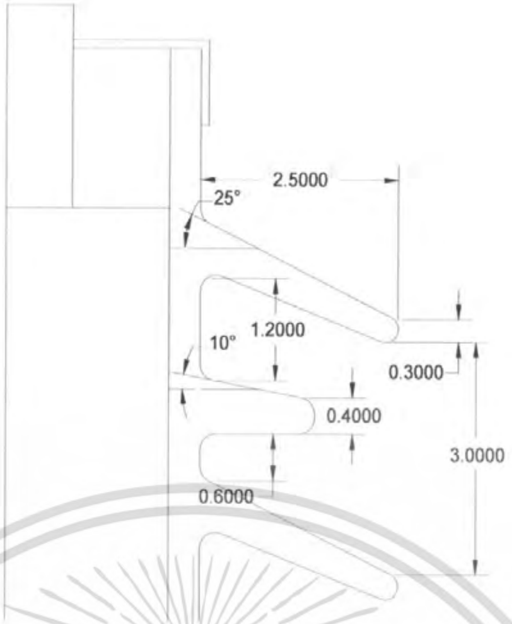


ภาพที่ 4.39 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

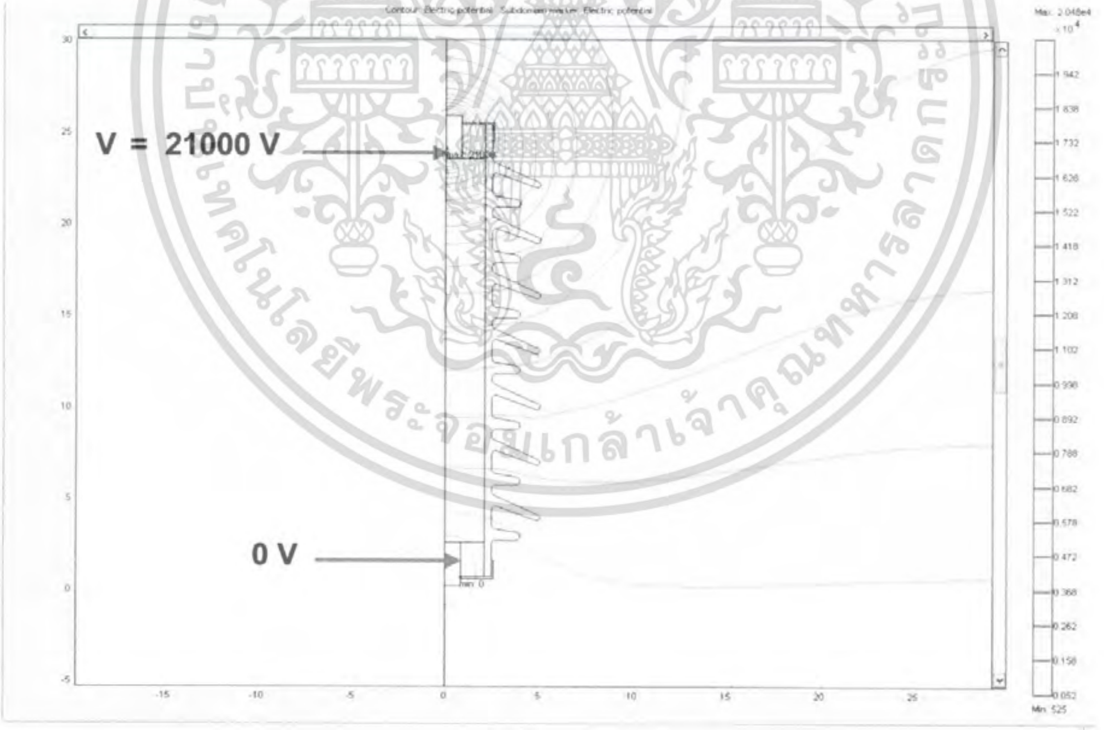


ภาพที่ 4.40 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

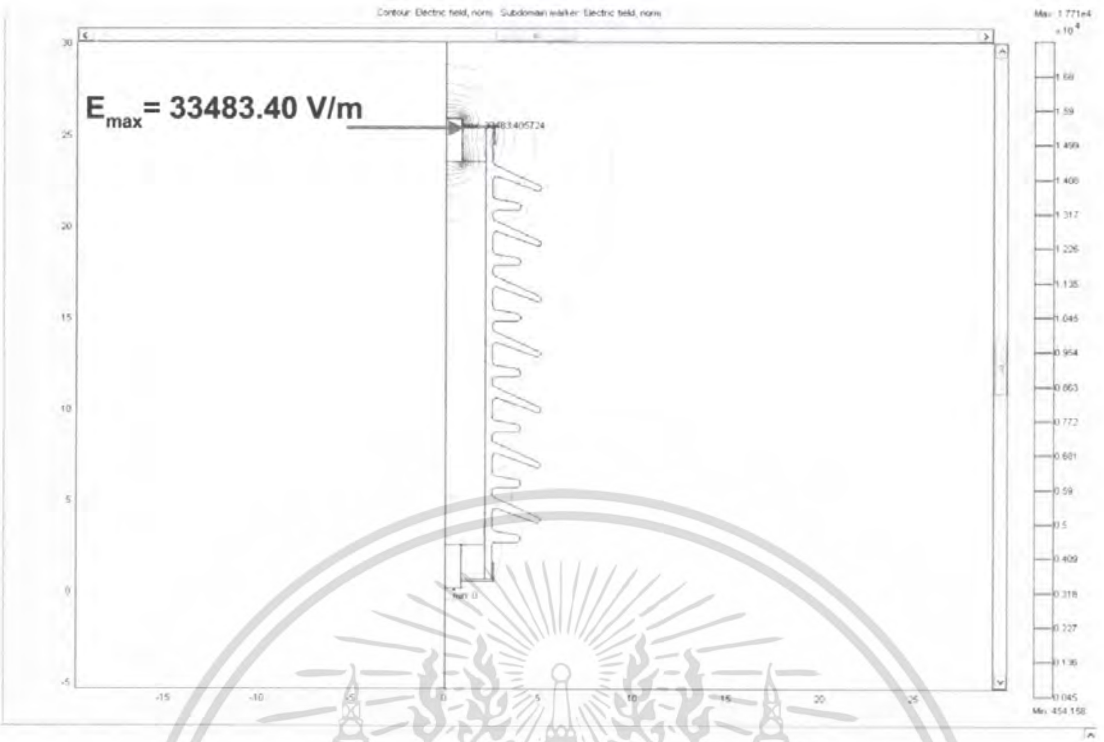


ภาพที่ 4.41 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3

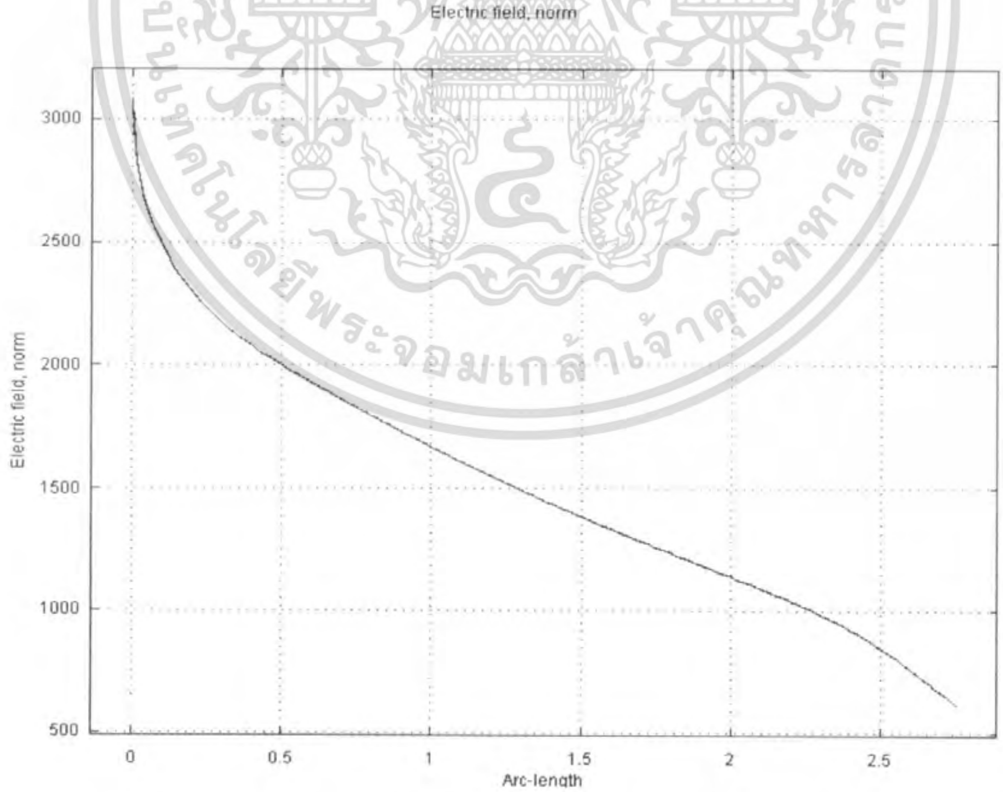


ภาพที่ 4.42 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

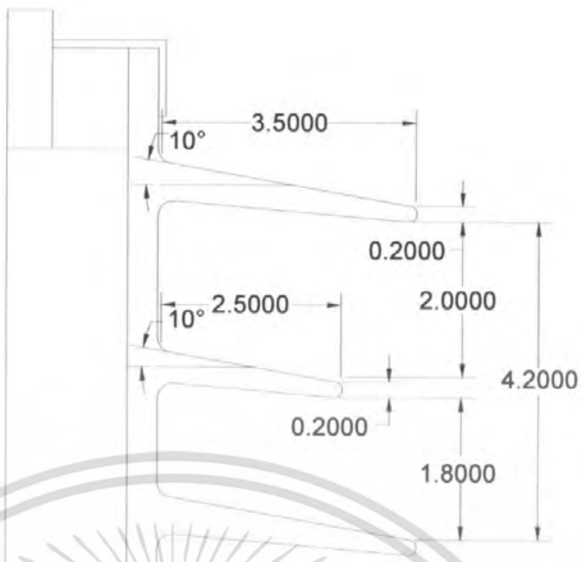


ภาพที่ 4.43 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า แบบที่ 3 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

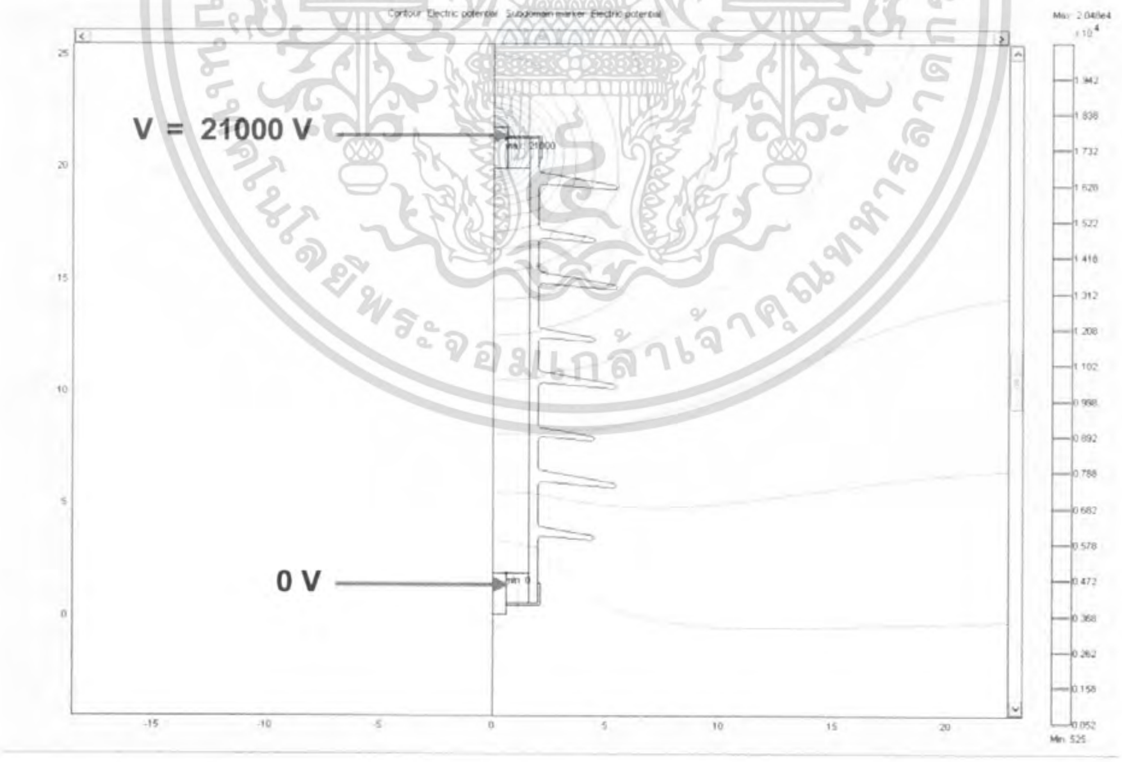


ภาพที่ 4.44 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

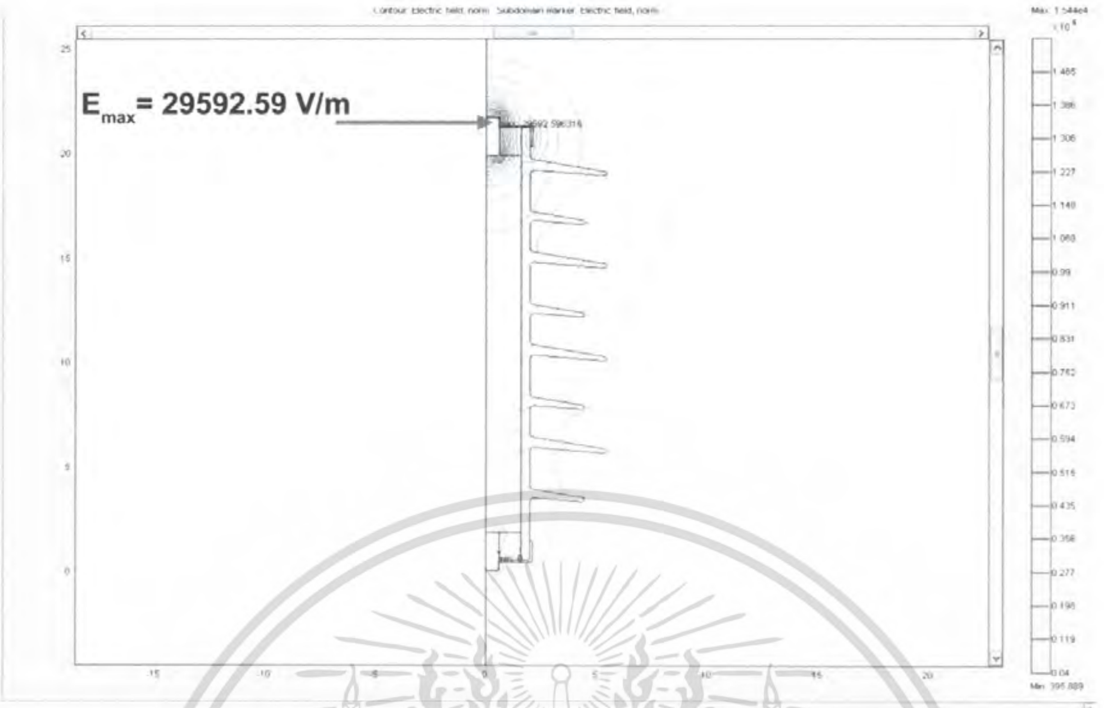


ภาพที่ 4.45 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4

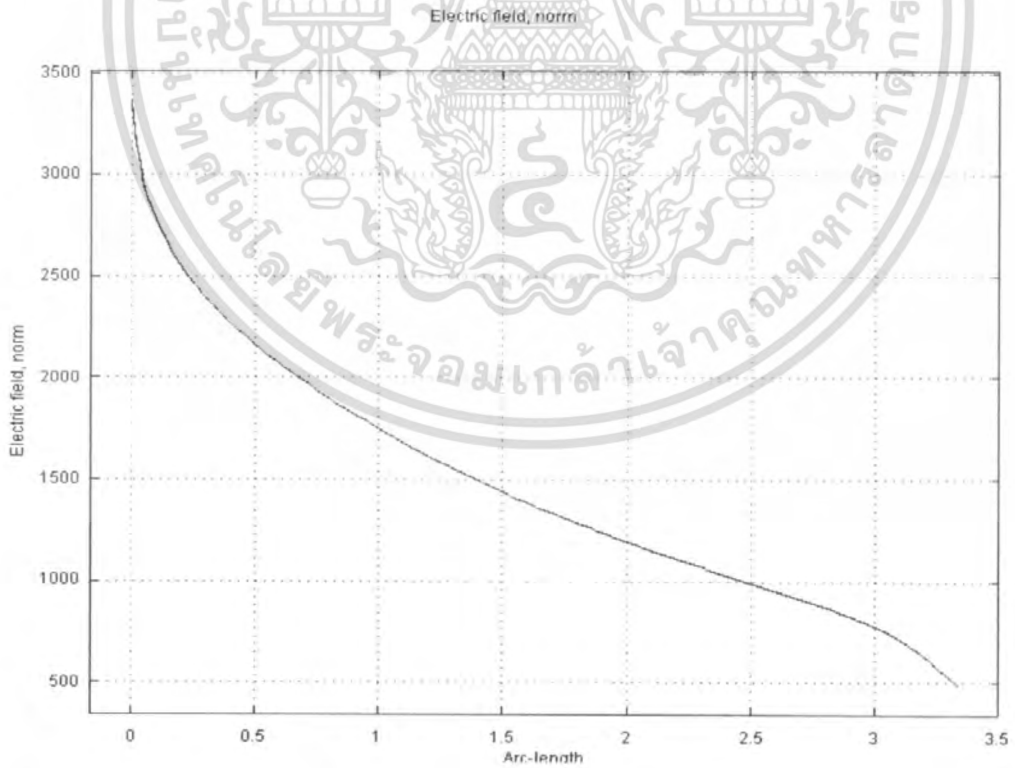


ภาพที่ 4.46 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

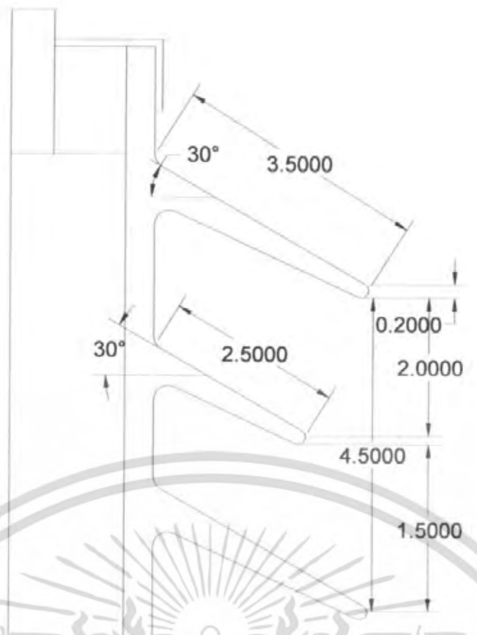


ภาพที่ 4.47 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า แบบที่ 4 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

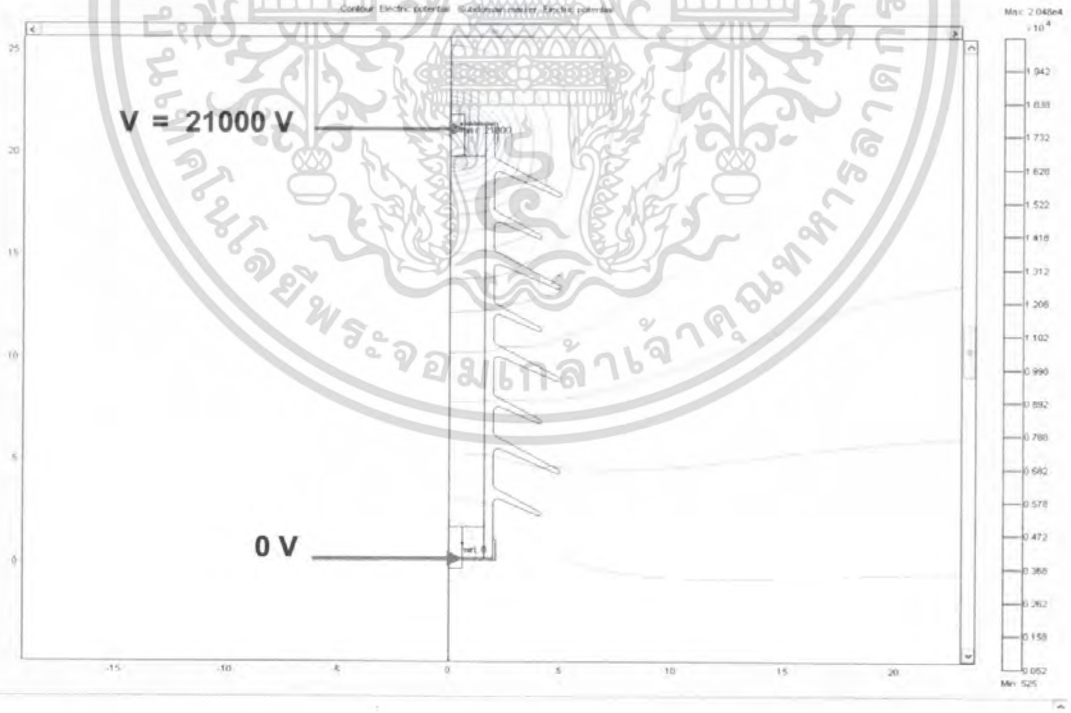


ภาพที่ 4.48 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

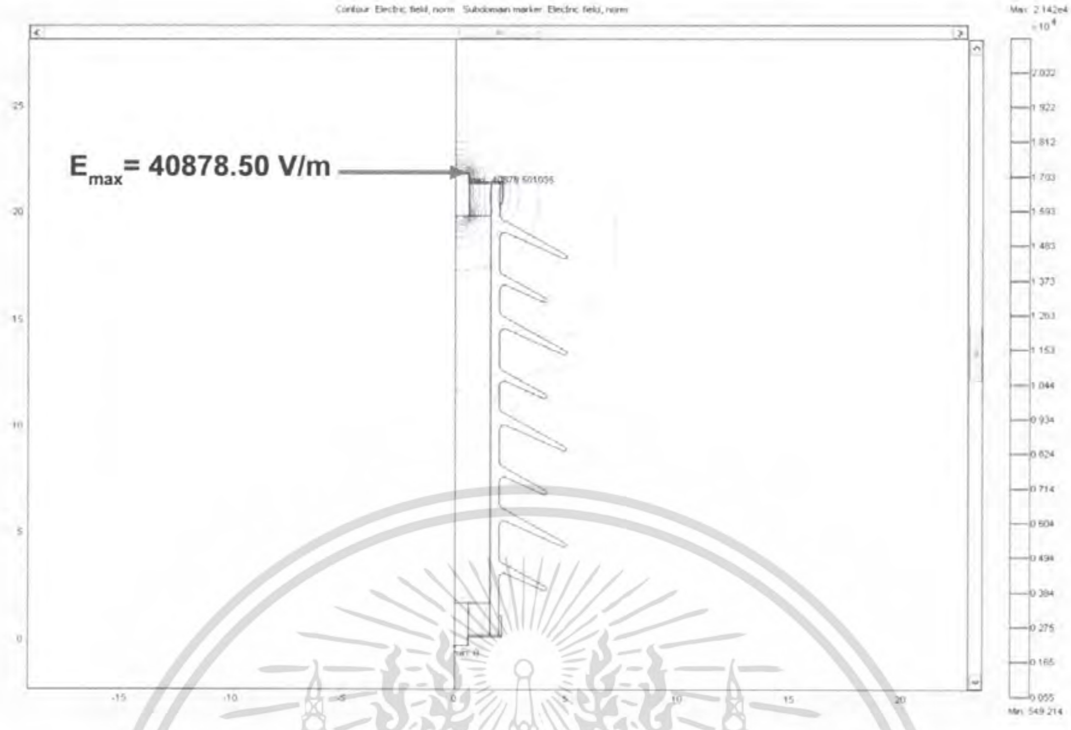


ภาพที่ 4.49 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 5 (ภาคอุตสาหกรรม)

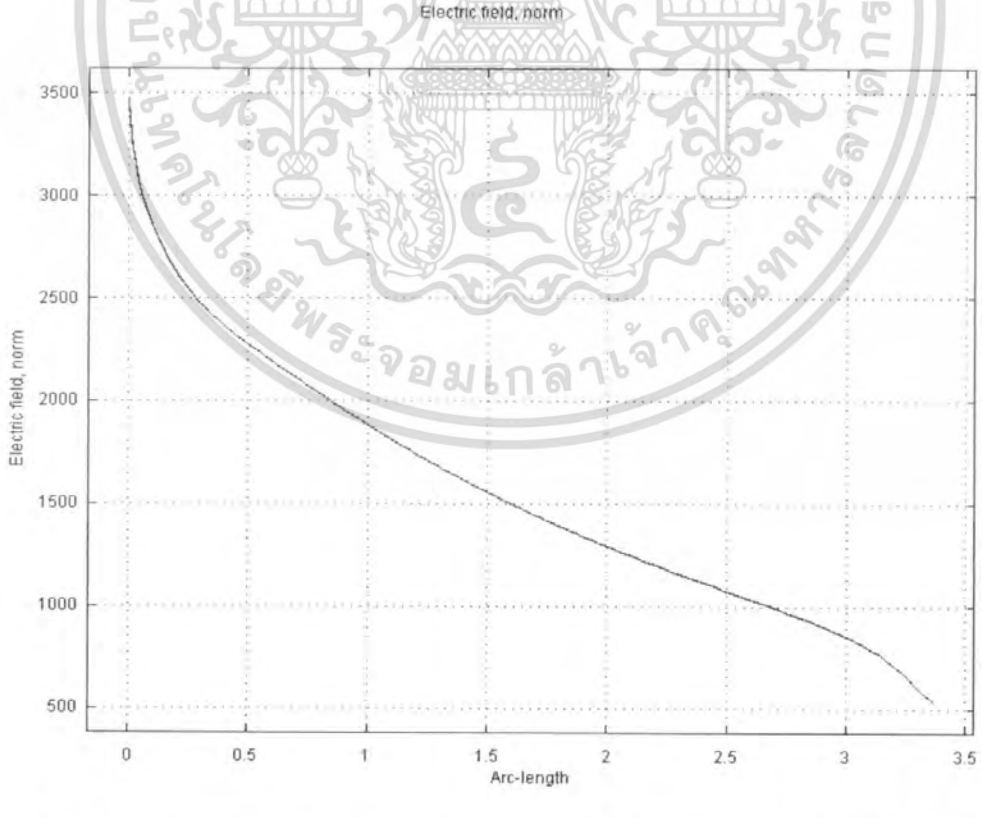


ภาพที่ 4.50 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 5 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV (ภาคอุตสาหกรรม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

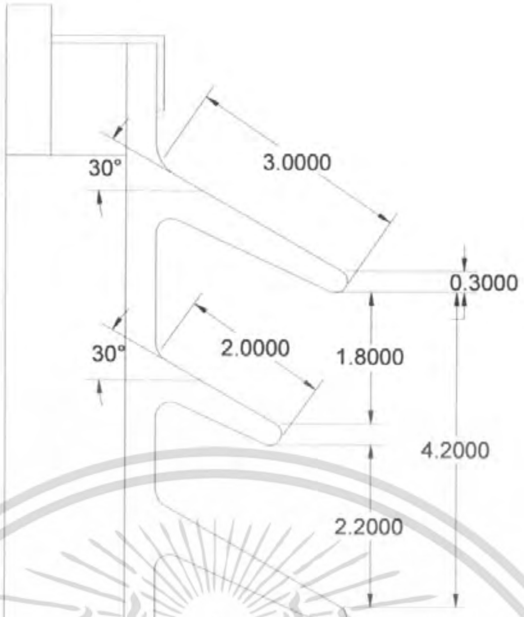


ภาพที่ 4.51 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 5 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV (ภาคอุตสาหกรรม)

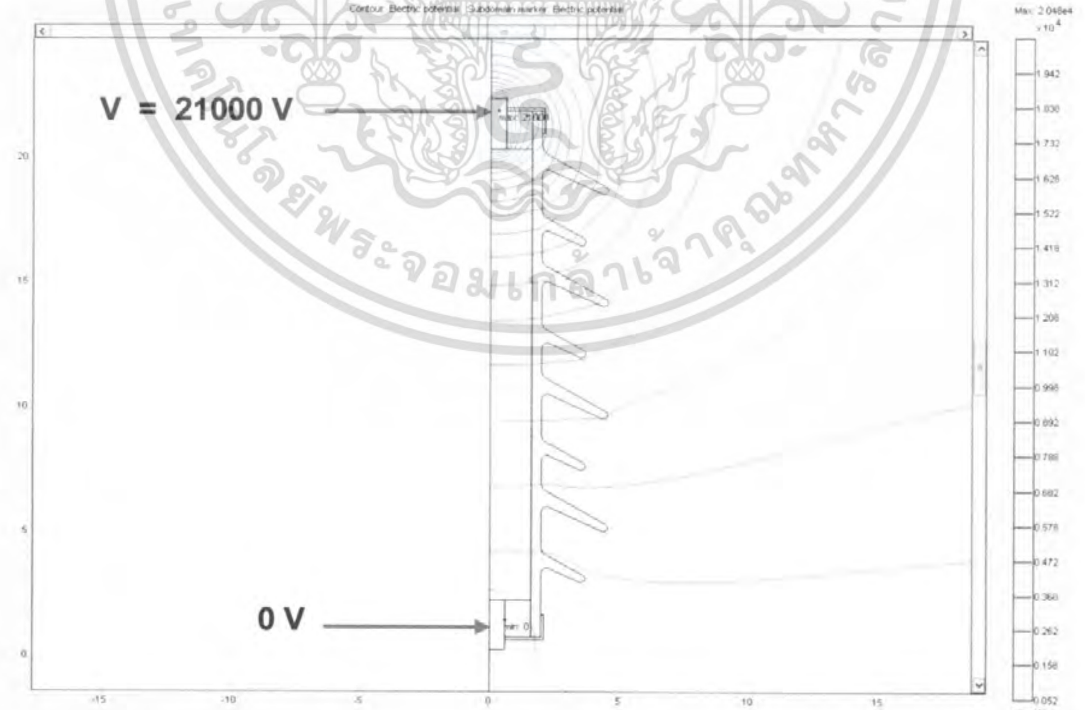


ภาพที่ 4.52 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 5 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV (ภาคอุตสาหกรรม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

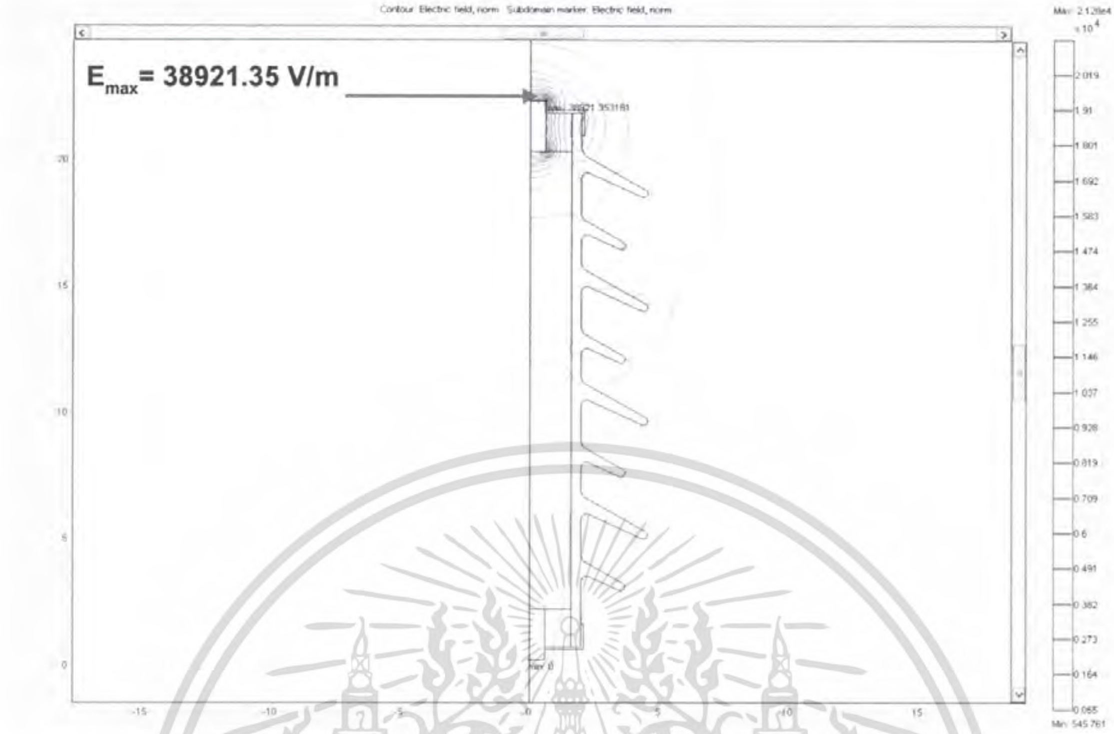


ภาพที่ 4.53 แสดง Dimension ของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 6

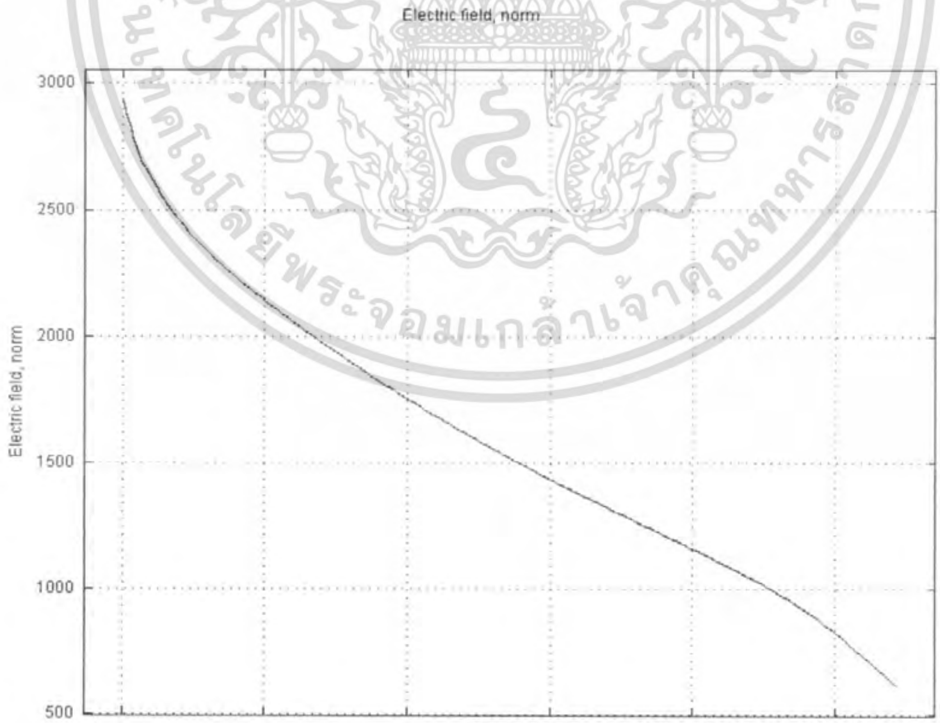


ภาพที่ 4.54 แสดงการกระจายของแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 6 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.55 แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 6 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV



ภาพที่ 4.56 การวิเคราะห์ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตามผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 6 โดยป้อนแรงดันที่ 21 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุปการจัดทำโครงงาน

1. ผู้ปฏิบัติงานมีความเข้าใจในกระบวนการทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 ที่ใช้อ้างอิง ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดรอบเอาท์ฟิวส์และมาตรฐาน IEEE 60099-4 ที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่า
2. มีความเข้าใจในการใช้โปรแกรม Finite Element
3. ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สามารถรองรับการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่าได้ดังนี้

<u>ดรอปเอาท์ฟิวส์</u> - การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง
- การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์

<u>กับดักฟ้าผ่า</u> - การทดสอบการเกิดดิสชาร์ทบางส่วน
- การทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงาน
- การทดสอบหากระแสรั่วไหล

5.2 สรุปผลการทดลอง

5.2.1 สรุปการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่องของดรอบเอาท์ฟิวส์

การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่องของดรอบเอาท์ฟิวส์ระบบ 22 kV พิกัดแรงดัน 27 kV กระแสต่อเนื่อง 100 A ปรากฏว่าเมื่อจ่ายแรงดัน 42.37 kV ให้กับดรอบเอาท์ฟิวส์เป็นเวลา 1 นาที ทั้งการต่อดรอบเอาท์ฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล และ กรณีเทอร์มินอล-กราวน์ ไม่เกิดวาบไฟตามผิวทั้ง 2 ตัวอย่าง

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าดรอบเอาท์ฟิวส์ในชุดนี้ผ่านมาตรฐาน ของ ANSI C 37.42 ว่าด้วยการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งสะอาดกระแสสลับ 50 Hz

5.2.2 สรุปการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์

ในการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของดรอบเอาท์ฟิวส์ระบบ 22 kV พิกัด 27 kV 100 A ทั้งสองตัวอย่างปรากฏว่า การป้อนแรงดันทดสอบที่ 140 kV ขั้วบวก ต่อแบบเทอร์มินอล-เทอร์มินอล ไม่เกิดวาบไฟตามผิว ที่แรงดันขั้วลบตัวอย่างที่ 1 จะเกิดวาบไฟตามผิวที่แรงดัน 139.54 kV ตัวอย่างที่ 2 ไม่เกิดวาบไฟตามผิว เมื่อต่อแบบเทอร์มินอล-กราวน์ที่แรงดันขั้วบวก เกิดวาบไฟตามผิวทั้งสองตัว ที่แรงดัน 139.54 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าดรอปเอาท์ฟิวส์ทั้งสองตัวอย่างไม่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE std 4 :1995, IEEE C37.41-2000, IEEE C37.42-1996 และ ANSI C37.42

5.2.3 สรุปผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนในกับดักฟ้าผ่า

ค่าการดิสชาร์จที่วัดได้จากการทดสอบต้องมีค่าไม่เกินค่ากำหนดในมาตรฐาน IEC 60099-4 คือ ค่าที่วัดได้ต้องมีค่าไม่เกิน 10 pC

จากการทดสอบวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดัน 1.05 เท่า ของแรงดันใช้งานต่อเนื่องของกับดักฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60099-4 พบว่ากับดักฟ้าผ่า พิกัด 21 kV 5kA ทั้ง 5 ตัวอย่างทดสอบ มีค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนอยู่ในช่วงประมาณ 0.86 – 1.07 pC กับดักฟ้าผ่า พิกัด 24kV 10 kA ตัวอย่างที่ 6 มีค่าการดิสชาร์จบางส่วนที่ 1.14 pC ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ 7 ซึ่งเป็นกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA มีค่าการดิสชาร์จบางส่วนสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆมาก ซึ่งมีค่า 4.83 pC เนื่องจากอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ทดสอบ จากรูปการแสดงการดิสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปอีลิปส์ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจพบเป็นการดิสชาร์จภายในตัวกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA ตัวอย่างการทดสอบที่ 1 – 5 และกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA ตัวอย่างทดสอบที่ 6 – 7 ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน

5.2.4 สรุปผลการทดสอบการหาแรงดันเริ่มทำงานของกับดักฟ้าผ่า

ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับดักฟ้าผ่าจนมีกระแสรั่วไหลตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด จะถูกกำหนดเป็นค่าแรงดันเริ่มทำงาน

จากผลการทดสอบพบว่ากับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA มีระดับแรงดันเริ่มทำงานที่ 1 mA อยู่ในช่วง 32.96 – 35.35 kV ส่วนกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA มีระดับแรงดันเริ่มทำงานที่ 1 mA อยู่ในช่วง 36.77 – 37.47 kV

5.2.5 สรุปผลการทดสอบการหากระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า

กระแสรั่วไหลที่วัดได้ที่ระดับแรงดันที่กำหนด จะกำหนดเป็นกระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่าในขณะใช้งานที่ระดับแรงดันปกติและขณะที่เกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

จากผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA มีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันปกติ (12.7 kV) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.17 – 0.21 mA และมีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันใช้งานต่อเนื่องสูงสุด (17.0 kV) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.22 – 0.223 mA ส่วนกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA มีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันปกติ (13.8 kV) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.283 – 0.286 mA และมีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันใช้งานต่อเนื่องสูงสุด (19.5 kV) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.404 – 0.414 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 สรุปผลการออกแบบและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า

5.3.1 สรุปผลการออกแบบและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของดรอบเอาท์ฟิวส์

จากการออกแบบและพิจารณาถึงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวดรอบเอาท์ฟิวส์ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในดรอบเอาท์ฟิวส์ของภาคอุตสาหกรรมเท่ากับ 13709.38 V/m และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ดรอบเอาท์ฟิวส์ที่ออกแบบใหม่เท่ากับ 12423.24 V/m ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงประมาณ 1286.14 V/m คิดเป็น 9.38 % ของแรงดันไฟฟ้าบริเวณผิวครีบฉนวนจุดที่สูงที่สุดของดรอบเอาท์ฟิวส์ของภาคอุตสาหกรรม

และในการพิจารณาถึงความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณครีบฉนวนครีบแรกปรากฏว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าตามครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ของภาคอุตสาหกรรมจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 2000 V/m ในส่วนของดรอบเอาท์ฟิวส์ที่ออกแบบใหม่ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ครีบฉนวนครีบแรกความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงที่สุดเท่ากับ 1100 V/m ซึ่งลดลง 900 V/m และคิดเป็น 45 % ของความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณผิวครีบฉนวนครีบแรกของดรอบเอาท์ฟิวส์ภาคอุตสาหกรรม

5.3.2 สรุปผลการออกแบบและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่า

จากการออกแบบและพิจารณาถึงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวกับดักฟ้าผ่า ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในของภาคอุตสาหกรรมเท่ากับ 40878.50 V/m และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบใหม่เท่ากับ 26024.81 V/m ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงประมาณ 14853.69 V/m คิดเป็น 36.33 % ของแรงดันไฟฟ้าบริเวณผิวครีบฉนวนจุดที่สูงที่สุดของดรอบเอาท์ฟิวส์ของภาคอุตสาหกรรม

และในการพิจารณาถึงความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณครีบฉนวนครีบแรกปรากฏว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าตามครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่า ของภาคอุตสาหกรรมจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 3500 V/m ในส่วนของกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบใหม่ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ครีบฉนวนครีบแรกความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงที่สุดเท่ากับ 2800 V/m ซึ่งลดลง 900 V/m และคิดเป็น 20 % ของความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณผิวครีบฉนวนครีบแรกของกับดักฟ้าผ่าภาคอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวฉนวนดรอบเอาท์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบใหม่เทียบกับภาคอุตสาหกรรม

วัสดุ		ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/m)	ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฉนวนครีบแรก (V/m)
ดรอบเอาท์ฟิวส์	ภาคอุตสาหกรรม	13709.38	2000
	ออกแบบใหม่	12423.24	1100
	ลดลง (%)	9.38	45
กับดักฟ้าผ่า	ภาคอุตสาหกรรม	40878.50	3500
	ออกแบบใหม่	26024.81	2800
	ลดลง (%)	36.33	20

5.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะที่พบระหว่างดำเนินงาน

1. ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง คือ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองยังไม่พร้อมที่จะใช้งานได้ เช่น เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ หม้องแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ อยู่ในช่างระหว่างการซ่อมแซม จึงทำให้การทดลองไม่เป็นไปตามที่วางแผนไว้

2. ผลของสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่มารบกวนการทดสอบซึ่งจะทำให้ค่าที่วัดได้นั้นมีความผิดเพี้ยน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในการทดสอบหาค่าดีสชาร์จบางส่วนในกับดักฟ้าผ่า

ฉนั้นในการทดสอบแต่ละครั้งไม่ควรให้เกิดสนามไฟฟ้าความถี่สูงมารบกวนหรือไม่ควรที่จะมีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าความถี่สูง อยู่ใกล้การทดสอบที่สามารถส่งผลต่อการทดสอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ดร. สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพ, สนพ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547

[2] สัญญา นามี, ศภชัย นิศวอนุดรพันธ์, **AutoCAD Handbook คู่มือการใช้งานโปรแกรม ฉบับสมบูรณ์**, นนทบุรี : ไอดีซีฯ, 2549

[3] ANSI C 37.42 **Specification for High-Voltage Expulsion Type Distribution Class Fuses, Cutout, Fuse Disconnecting Switches and Fuse Link**

[4] IEC 60060 -1, **High – Voltage Test Technique; Part 1 General Definition and Test**

[5] IEC 60815, **Guide for selection of insulator of Polluted conditions, First Edition,** 1998

[6] IEEE Std 4-1995, **IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing**, 1995

[7] IEEE Std C37.41, **IEEE Standard Design Test for High Voltage Fuses Distribution Enclosed Single–Pole air Switchs, Fuse Disconnecting Switch, and Accessories**, 2000

[8] IEC 60099-4, **Metal – oxide surge arresters without gaps for a.c. systems**, 2004-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย จักรเพชร แจ่มใส เกิดเมื่อวันอังคาร ที่ 30 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2527 จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพจาก วิทยาลัยการอาชีพตระการพืชผล จ.อุบลราชธานี ปี 2545 จบการศึกษา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากมหาวิทยาลัยราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จ. ขอนแก่น ปี 2547 และจบการศึกษาระดับ ปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ปี 2550

นาย สุพงษ์ วงษ์บุญชา เกิดเมื่อวัน เสาร์ ที่ 23 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2528 จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพจากวิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี จ.อุดรธานี ปี 2545 จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นสูงจากมหาวิทยาลัยราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จ. ขอนแก่น ปี 2547 และจบการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จ. กรุงเทพมหานคร ปี 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

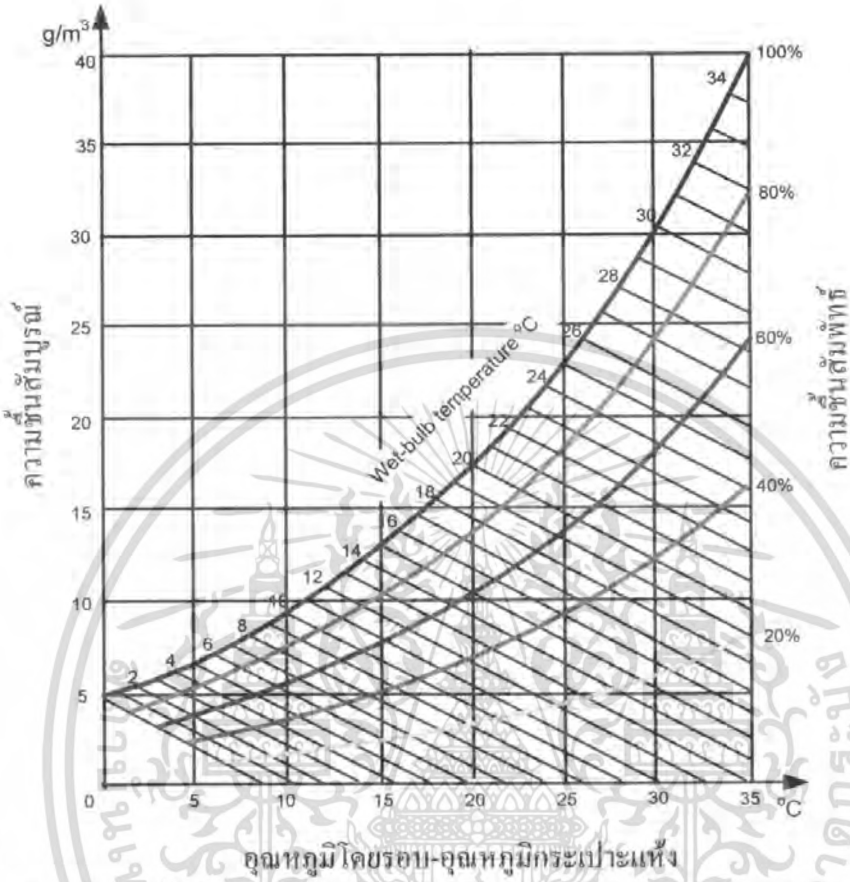
ภาคผนวก ก

กราฟการแปลงค่า

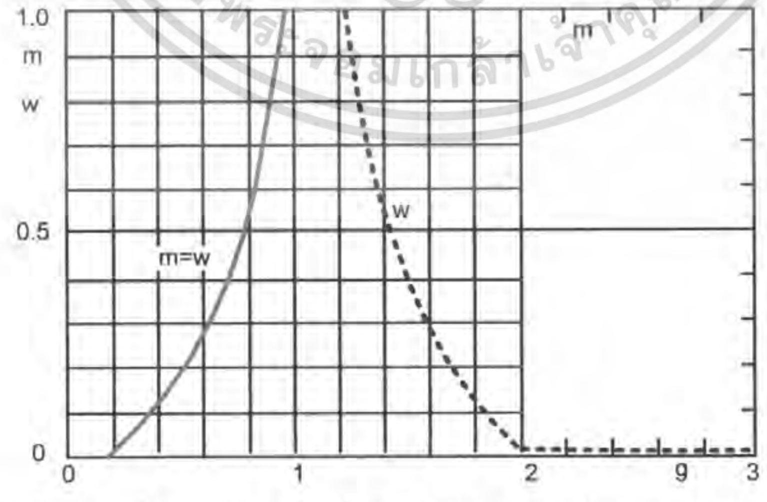
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

กราฟการแปลงค่า

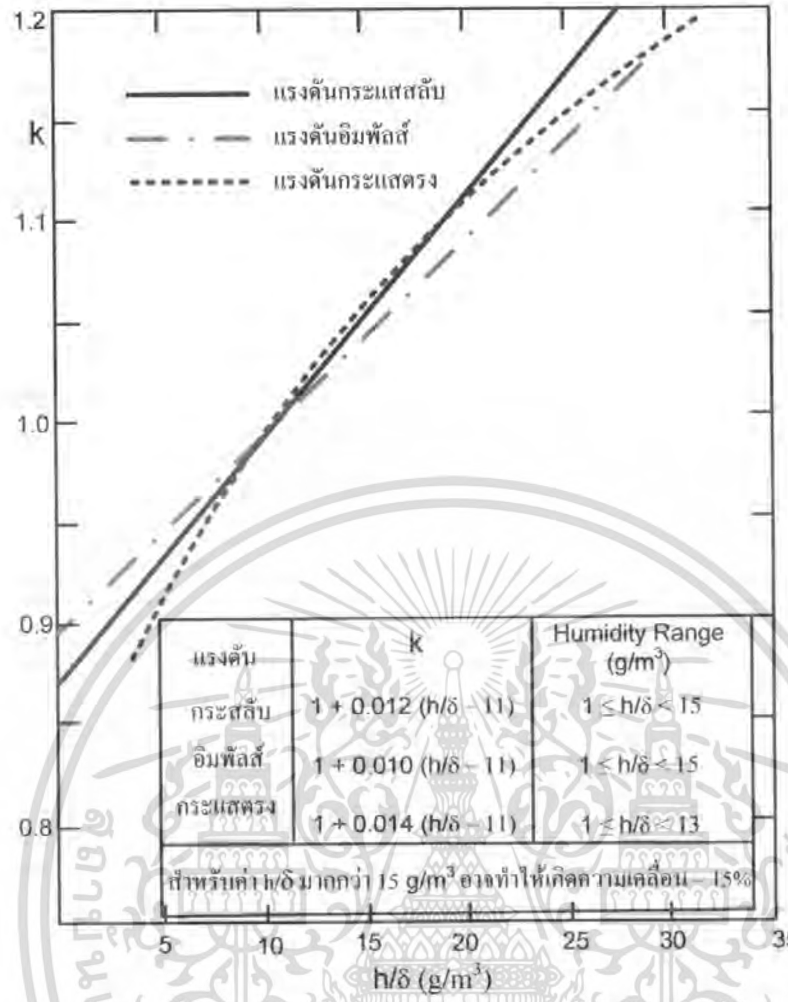


ภาพที่ ก.1 กราฟความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่สภาวะมาตรฐาน



ภาพที่ ก. 2 กราฟการหาค่า m และ w สำหรับแก้ค่าความหนาแน่นอากาศและแก้ค่าความชื้นเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.3 กราฟการหาค่าพารามิเตอร์ k เป็นฟังก์ชันของ h/δ

IEEE sdt 4:1995 กำหนดที่สภาวะมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ (t_0) 20 ^oC และความดันบรรยากาศ (b_0) 101.3 kPa หรือ 1013 mbar หรือ 760 mmHg ที่ 0 ^oC โดยความชื้นสัมบูรณ์ 11 gm $^{-3}$ ถ้า b เป็นความดันบรรยากาศ (kPa) และ H เป็นความสูงของบารอมิเตอร์ (mmHg) จะได้

$$b = 0.1333H \tag{1}$$

ค่าที่สภาวะห้องทดลอง

$$U = U_0 K_1 K_2 \tag{2}$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่สภาวะห้องทดลอง

U_0 คือ แรงดันที่สภาวะมาตรฐาน

K_1 คือ ค่าแก้เนื่องจากความหนาแน่นอากาศ

K_2 คือ ค่าแก้เนื่องจากความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

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

$$K_2 = k^w \quad (4)$$

เมื่อ δ คือ ความหนาแน่นอากาศ

t คือ อุณหภูมิที่สภาวะห้องทดลอง

b คือ ความดันบรรยากาศที่สภาวะห้องทดลอง

m คือ เลขยกกำลังกำหนดจากพารามิเตอร์ g

w คือ เลขยกกำลังกำหนดจากพารามิเตอร์ g

k คือ พารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับประเภทของแรงดันและอัตราส่วน $\frac{h}{\delta}$

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

เมื่อ U_b คือ 1.1เท่าของแรงดันทดสอบ

L คือ ระยะวาบไฟตามผิวที่สั้นที่สุดของวัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์แบบจำลองดรอบเอาท์ฟิวส์ โดยโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

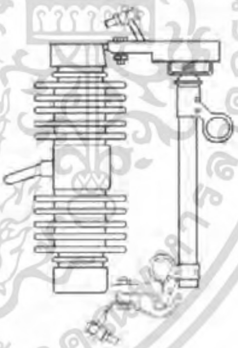
ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์แบบจำลองดรอบเอาท์ฟิวส์ โดยโปรแกรมไฟไนเอลิเมนทต์

ในเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้าแรงสูงนั้น มีความสนใจลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าโครงสร้างของอิเล็กโทรด (Electrode) หรือการกระจายสนามไฟฟ้าโครงสร้างฉนวนไฟฟ้าในแบบต่าง ๆซึ่งเป็นปัญหาในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หากมีการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำให้ได้คำตอบที่เที่ยงตรงแล้วการออกแบบและการนำไปใช้งานก็มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากทีเดียว ในโครงงานนี้จะเป็นการออกแบบปีกฉนวนไฟฟ้าของดรอบเอาท์ฟิวส์ เพื่อแก้ปัญหาการใช้งานในสภาวะที่มีความเปรอะเปื้อน การวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์หาการกระจายของศักย์ไฟฟ้าและการกระจายสนามไฟฟ้า ของดรอบเอาท์ฟิวส์ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันเพื่อทำการตรวจสอบว่าลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่าไรก่อนที่จะไปปรับปรุงคุณลักษณะต่างๆ ของดรอบเอาท์ฟิวส์ เพื่อให้สามารถใช้งานในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงได้ รวมไปถึงการออกแบบดรอบเอาท์ฟิวส์แบบพื้นฐานใหม่เพื่อเปรียบเทียบผลต่างๆ ได้เช่นกัน

ดรอบเอาท์ฟิวส์มีการใช้งานในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงดังแสดงในรูปที่ ข.1(ก) และลักษณะรูปร่างของดรอบเอาท์ฟิวส์ ที่จำลองมาจากแบบจริงดังแสดงในรูป ข.1(ข)

(ก)



(ข)

ภาพที่ ข.1 ลักษณะรูปร่างของดรอบเอาท์ฟิวส์

ตารางที่ ข.1 คุณสมบัติของดรอบเอาท์ฟิวส์

RATED VOLTAGE (kV)	RATED CURRENT (A)	BREAKING CURRENT (kA)	IMPULSE WITHSTAND VOLTAGE LINE TO GROUND BIL (kV)	WET WITHSTAND VOLTAGE (kV)	CREEPAGE DISTANCE MIN (mm)	WEIGHT (kg)	DIMENSION L X H (cm)
27	100	8	125	50	320	8.5	500X300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของรูปร่างที่ใช้ในการจำลอง

-ดรอบเอาท์ฟิวส์

คุณสมบัติขององค์ประกอบแบบย่อยๆ

-Porcelain

- Relative permittivity (ε_r) 5.7
- Conductivity (σ) 1×10^{-14} siemens/meter

-Cement

- Relative permittivity (ε_r) 7
- Conductivity (σ) 1×10^{-7} siemens/meter

-Iron

- Relative permittivity (ε_r) 1
- Conductivity (σ) 1.12×10^{7} siemens/meter

- แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 21000 V

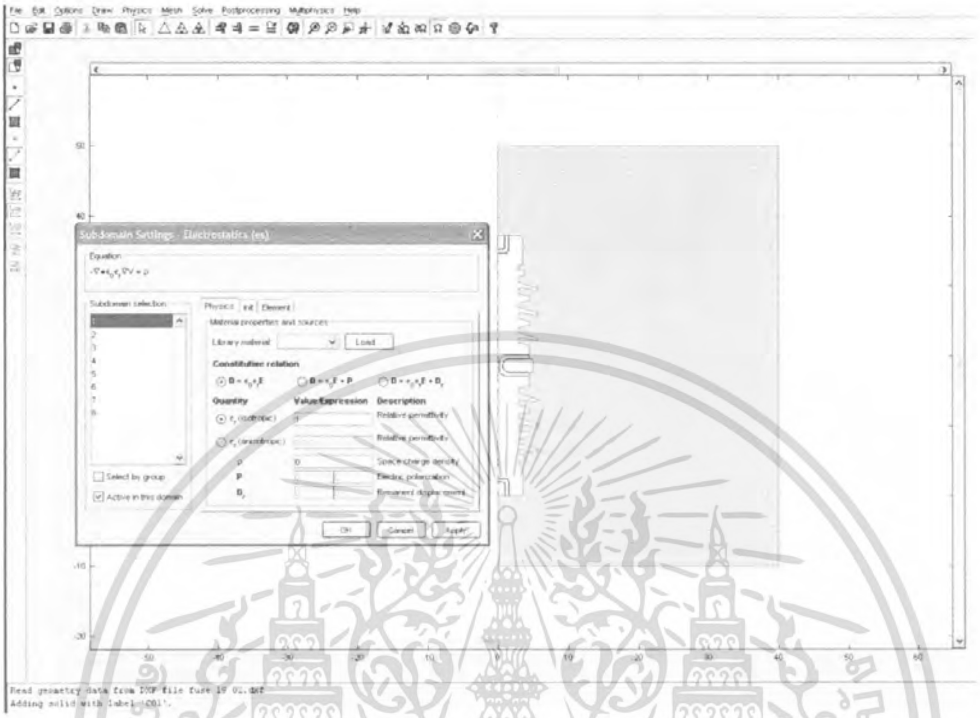
ตัวอย่างการเตรียมข้อมูล และการป้อนค่าสำหรับการจำลองดรอบเอาท์ฟิวส์ เพื่อคำนวณหาค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

1.) ทำการวาดแบบของดรอบเอาท์ฟิวส์และสร้างเอลิเมนทต์

ภาพที่ ข.2 การวาดตัวดรอบเอาท์ฟิวส์ขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

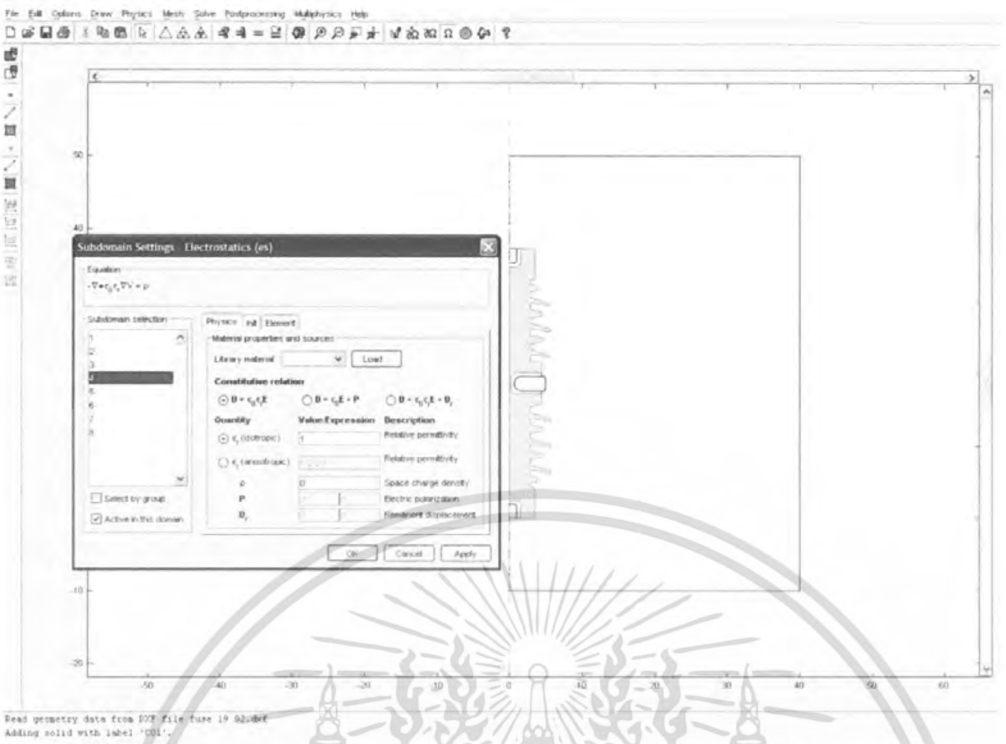
2.) ทำการป้อนค่าคุณสมบัติขององค์ประกอบต่างๆ โดยใช้ฟังค์ชั่น Subdomain setting ดังแสดงในรูป ซึ่งค่าที่จะป้อนให้โปรแกรมมีทั้งหมด 8 ค่า



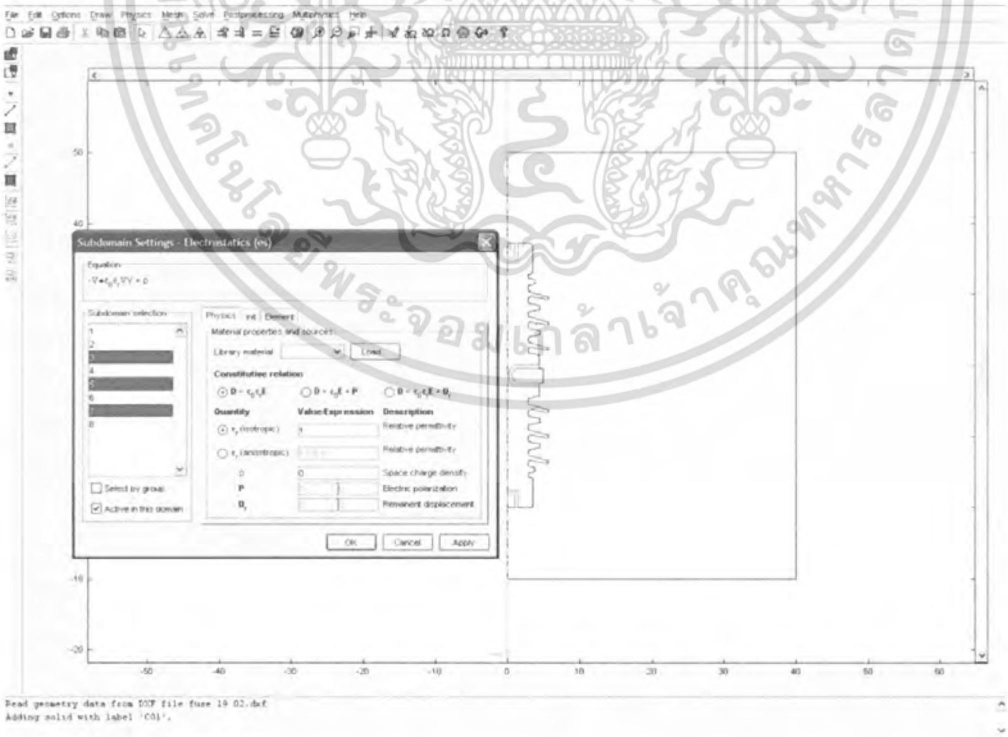
ภาพที่ ข.3 การสร้างขอบเขตให้กับดรอบเอาท์ฟิวส์

ภาพที่ ข.4 กำหนดให้ตัว bracket ให้มีคุณสมบัติเป็นเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส... ...ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

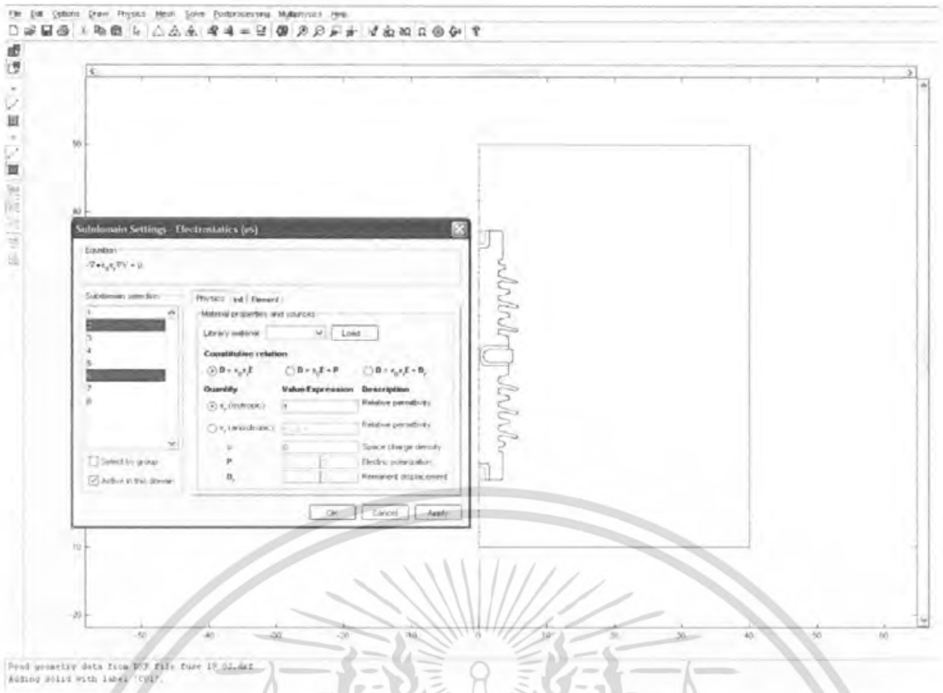


ภาพที่ ข.5 กำหนดให้ porcelain support มีคุณสมบัติเป็น porcelain



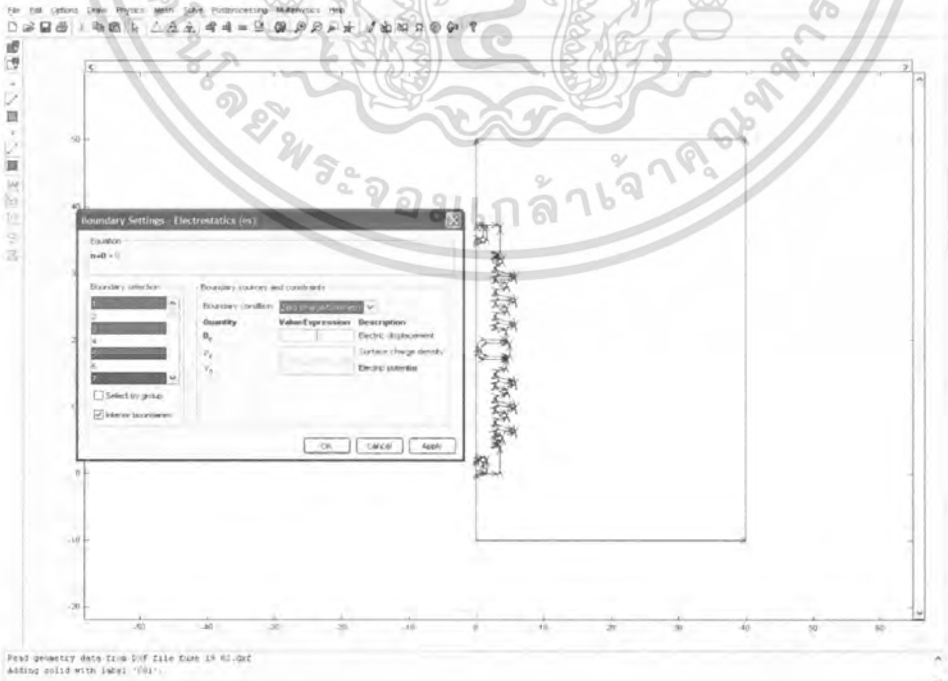
ภาพที่ ข.6 กำหนดให้ส่วนที่ยึด bracket และขั้วบน – ล่าง ให้มีคุณสมบัติเป็นซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



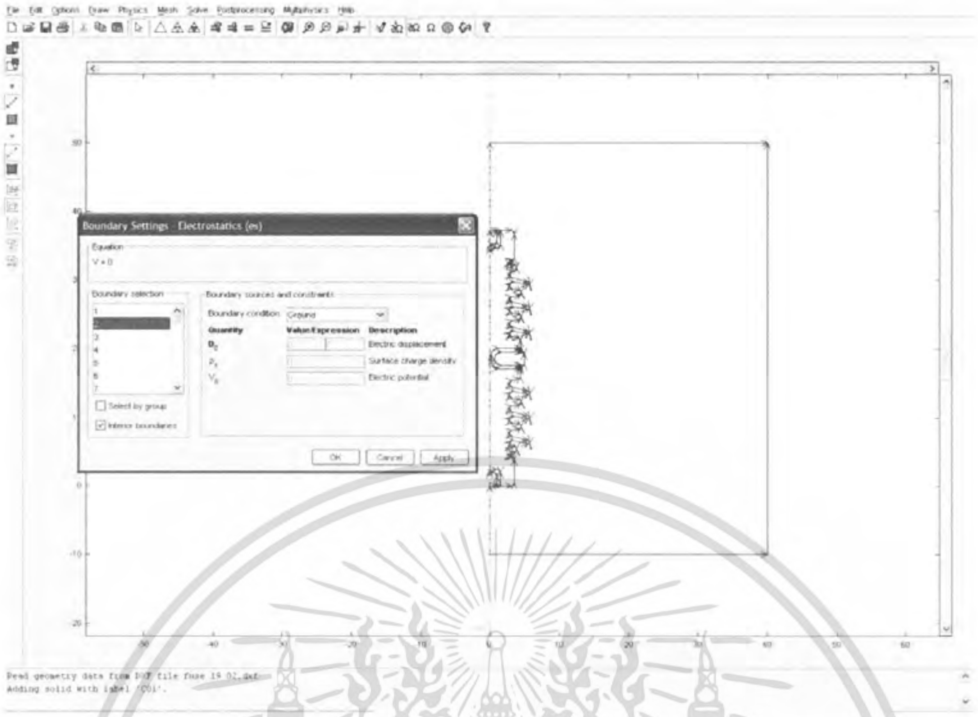
ภาพที่ ข.7 เป็นการกำหนดให้ส่วนขั้วด้านบนและด้านล่างให้มีคุณสมบัติเป็นเหล็ก

2.) ป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าให้ดรอบเอาท์ฟิวส์โดยใช้ฟังค์ชั่น Boundary setting กำหนดให้แรงดัน 100 โวลท์ ให้กับขั้วโลหะด้านบนและขั้วโลหะด้านล่าง มีค่า 100 โวลท์ และ 0 โวลท์ ที่ กราวด์ หรือ bracket ค่าที่จะต้องป้อนให้โปรแกรมมีทั้งหมด 3 ค่า

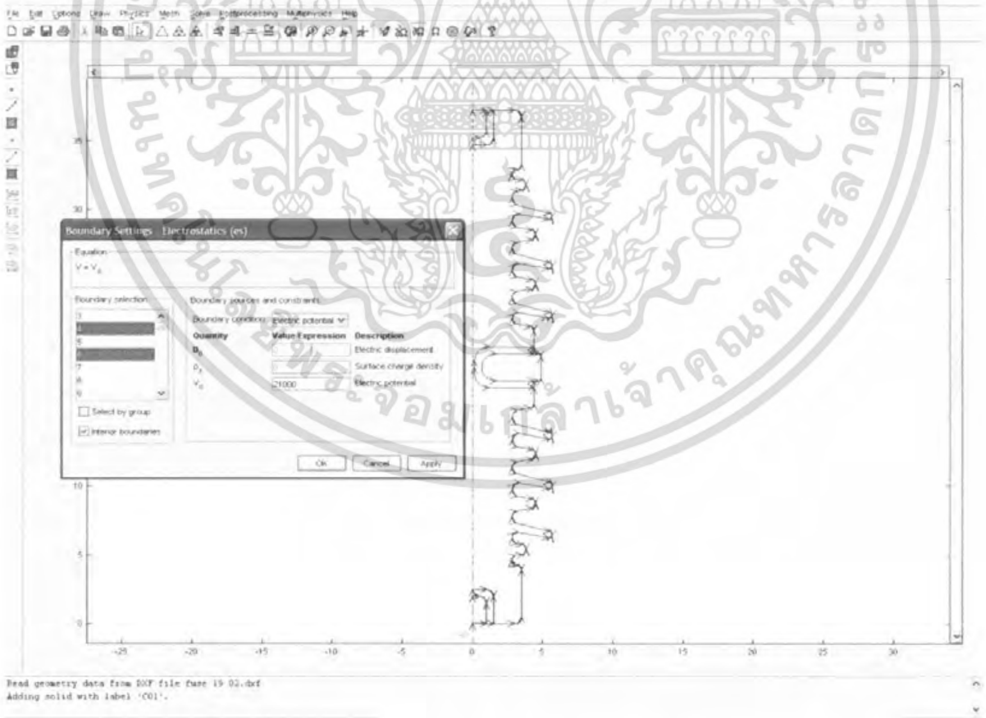


ภาพที่ ข.8 กำหนดค่าขอบเขตให้เป็น Zerocharge /Symmetry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

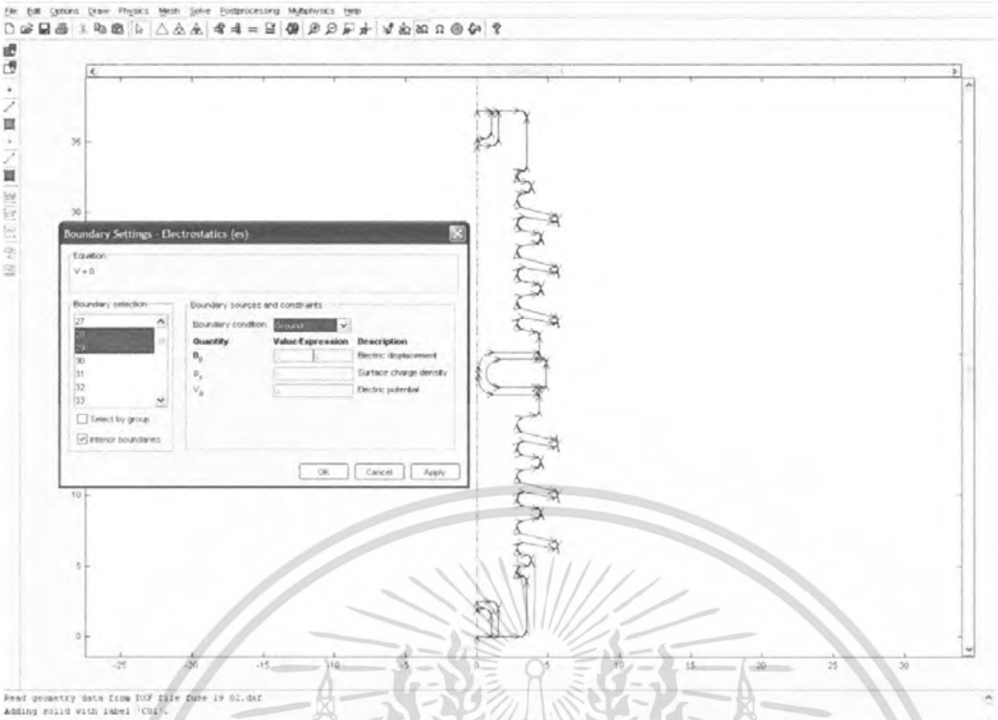


ภาพที่ ข.9 กำหนดค่าพื้นด้านล่างให้เป็นกราวด์



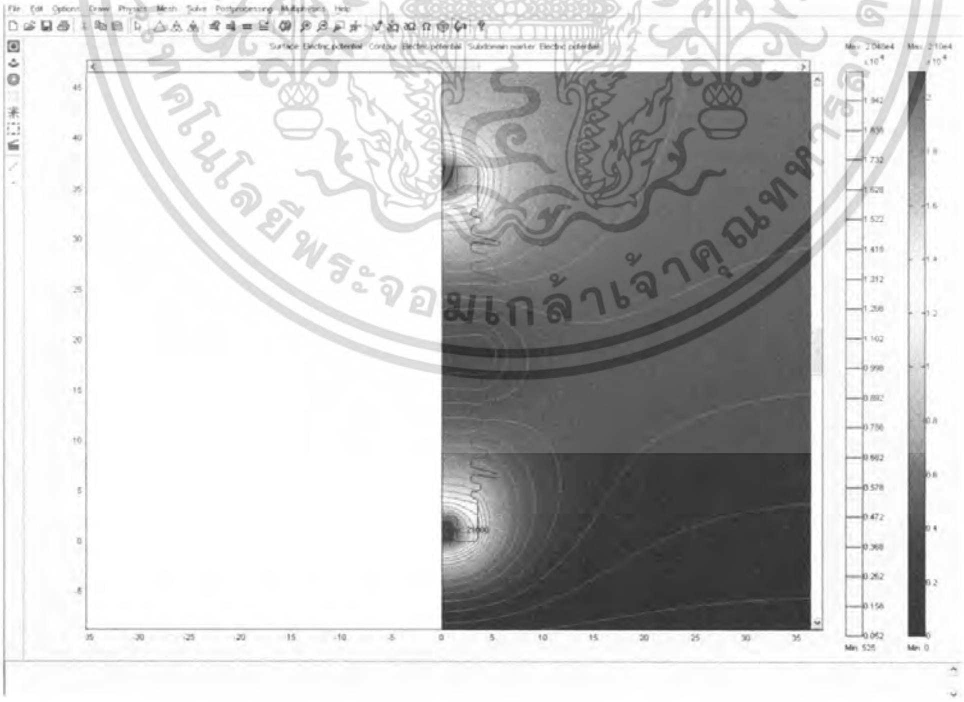
ภาพที่ ข.10 การป้อนแรงดันไฟฟ้า 21 kV ให้ส่วนขั้วด้านบนและด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



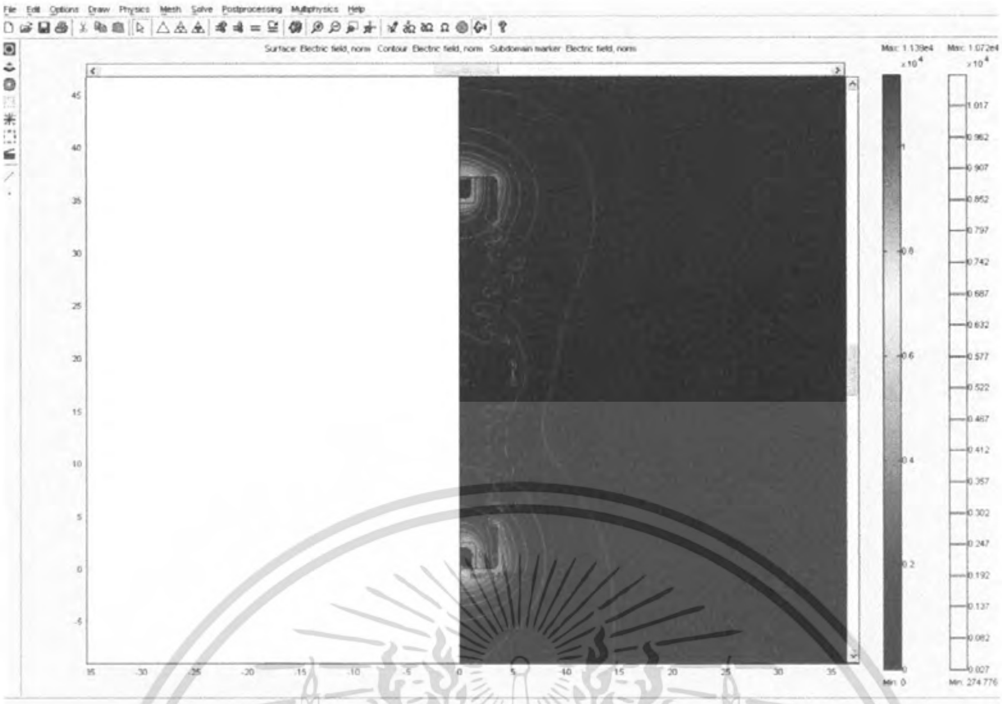
ภาพที่ ข.11 กำหนดค่าของ bracket ให้เป็นกราวด์

5.) ทำการประมวลผล โดยใช้ฟังค์ชั่น Solve problem ดังแสดงในรูป



ภาพที่ ข.12 การแสดงผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ข.13 การแสดงผลการกระจายของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้