

ปีการศึกษา 2548

การศึกษาและออกแบบดรอปเอาต์ฟิวส์ และกับดักฟ้าผ่า
The Study and Design of Drop-Out Fuse and Lightning Arrester

โดย

นายภูชิต	บุญโท
นายสกลวุฒิ	ภูผาสุข
นายสรายุทธ	บุรีแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล
อ.นรเศรษฐ	พัฒนเดช

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและออกแบบครอบเอาท์พิวส์ และกับดักฟ้าผ่า

ผู้จัดทำ

นาย ภูชิต บุญโท รหัส 45010593

นาย สกลวุฒิ ภูผาสุข รหัส 45010790

นาย สรายุทธ บุรีแก้ว รหัส 45010809

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

การศึกษาและออกแบบครอบเอาต์ฟิวส์ และกับดักฟ้าผ่า

นาย ภูชิต	บุญโท	
นาย สกลวุฒิ	ภูผาสุข	
นาย สรายุทธ	บุรีแก้ว	
รศ. ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548		

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการออกแบบครอบเอาต์ฟิวส์ และกับดักฟ้าผ่า

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของครอบเอาต์ฟิวส์ และกับดักฟ้าผ่า จะเป็นการทดสอบครอบเอาต์ฟิวส์แบบเปิด พิกัด 22 kV ตามมาตรฐาน ANSI C-37.42-1996 และกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแก๊ส พิกัด 21 kV 5 kA และ 24 kV 10 kA ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 โดยทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของ สจล. ผลจากการทดสอบครอบเอาต์ฟิวส์ตัวอย่างจากบริษัทผู้ผลิต 2 บริษัทพบว่าครอบเอาต์ฟิวส์มีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของมาตรฐานการทดสอบในกรณีของกับดักฟ้าผ่าที่นำมาทดสอบพบว่า กับดักฟ้าผ่าจำนวน 1 ตัวอย่างไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ ดังรายงานอยู่ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

การออกแบบรูปร่างครีบนวนโพลีเมอร์ ของกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแก๊สพิกัด 21kV 5 kA ใช้มาตรฐาน IEC 815 และข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยแบบที่ได้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้านำไปเปรียบเทียบกับ ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าของครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าที่ได้จากภาคอุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์พบว่ารูปร่างครีบนวนที่ออกแบบมีการกระจายสนามไฟฟ้าที่ดีกว่าการกระจายสนามไฟฟ้าของแบบกับดักฟ้าผ่าที่ได้จากภาคอุตสาหกรรม และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของครีบนวนที่ออกแบบยังมีค่าน้อยกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างอีกด้วย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าของครีบนวนที่ออกแบบมีคุณสมบัติที่ดีกว่าครีบนวนที่มีอยู่ในภาคอุตสาหกรรม

The Study and Design of Drop-Out Fuse and Lightning Arrester

Mr. Poochit	Boontho	
Mr. Sakonvoot	Poopasuk	
Mr. Sarayut	Bureekaew	
Assoc. Prof. Siriwat	Potivejkul	Adviser
Lecturer Norasage	Pattanadech	Adviser

2005

ABSTRACT

This project presents the electrical property study and design of drop-out fuse and surge arrester.

The test of drop-out fuse (open type) 22 kV followed ANSI C-37.42 1996. The test of surge arrester 21 kV 5 kA and 24 kV 10 kA followed IEC 60099-4. Those tests were done in High Voltage Engineering Laboratory of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

The tested results show that drop-out fuses from two manufactures meet the international standard. Most of surge arrester also passed the standard while another one did not in which its detail is shown in this project.

Design of the weather sheds of surge arrester (gapless) 21 kV 5 kA followed IEC 815 and PEA requirements. This design was analyzed by a computer program to analyze its electric field distribution. This analysis is used to compare with the standard industry design of weather shed surge arrester. The analysis shows that the project designed surge arrester performed in electric field distribution better than the standard industry design. Also the electric field stress of this project design is lower than the standard industry design. This can conclude that the project designed surge arrester sheds is better than the standard industry design.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากการช่วยเหลือ สนับสนุนจากหลายๆ ท่าน
หลายๆ หน่วยงาน ผู้จัดทำขอขอบคุณ

รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และอาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้
คำปรึกษา แนะนำ และเกี่ยวข้องในการทำงาน

กองวิจัย กองมาตรฐาน กองทดสอบ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะ
แนวทาง และให้ข้อมูลต่างๆ

ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (บางพลี) ที่ให้ความอนุเคราะห์ เข้าชม
การทดสอบกับดักฟ้าผ่า

บริษัท พีรีไซซ อิเล็กตริกแมนูแฟคเจอร์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อกับดักฟ้าผ่าที่นำมาใช้ทดสอบ
รวมทั้งแบบ drawing ของกับดักฟ้าผ่า

บริษัท ชัมมิทแมนูแฟคเจอร์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อครอบเอาท์พิวส์ที่นำมาใช้ทดสอบ รวมทั้ง
แบบ drawing ของครอบเอาท์พิวส์

ห้างหุ้นส่วนจำกัด ส.กมลเทรตติ้ง ที่เอื้อเฟื้อครอบเอาท์พิวส์ และกับดักฟ้าผ่าที่นำมาใช้
ทดสอบ

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ อบรมสั่งสอน ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ ป.โท ที่ให้
คำแนะนำปรึกษา ช่วยเหลือต่างๆ และท้ายสุดนี้ขอขอบคุณ พ่อ แม่ที่คอยช่วยให้เป็นกำลังใจ
และสนับสนุนด้านทุนทรัพย์ที่ดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	1
1.3 ขอบข่ายปริญญาณิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการทำปริญญาณิพนธ์.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำปริญญาณิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	5
2.1.1 แรงดันเกินภายนอก.....	5
2.1.2 แรงดันเกินภายใน.....	6
2.1.3 แรงดันเกินชั่วคราว.....	6
2.2 ครอบเอาต์ฟิวส์.....	6
2.2.1 ชนิดของครอบเอาต์ฟิวส์.....	7
2.2.2 ฟิวส์ลิงค์.....	8
2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา.....	9
2.3 กับดีกฟ้าผ่า.....	10
2.3.1 กับดีกฟ้าผ่าแบบมีแกป.....	11
2.3.2 กับดีกฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป.....	12
2.3.3 กับดีกฟ้าผ่าแบบมีแกปทำงานร่วมกับชิงค์ออกไซด์.....	13
2.3.4 ลักษณะสมบัติแรงดัน – กระแสของกับดีกฟ้าผ่า.....	13
2.4 การทดสอบอิมพัลส์.....	15
2.4.1 ข้อกำหนดของรูปคลื่นอิมพัลส์.....	15
2.4.2 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 หลักการสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	17
2.5.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	18
2.5.2 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์.....	19
2.5.3 การคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจร.....	21
2.6 การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์.....	22
2.6.1 โวลเตจดีไวเดอร์ (Voltage Divider).....	23
2.6.2 แท่งตัวนำแรงสูง (High – Voltage Lead).....	23
2.6.3 ความต้านทานหน่วง (Damping Resistance).....	23
2.6.4 ออสซิลโลสโคป.....	24
2.6.5 เคเบิลวัด.....	24
2.6.6 ความต้านทานแมชชิง (Matching Resistance).....	25
2.6.7 สายดิน.....	25
2.7 การตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)	25
2.7.1 ผลกระทบของดีสชาร์จบางส่วน.....	26
2.7.2 วงจรสมมูลของดีสชาร์จบางส่วน.....	27
2.7.3 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้.....	28
2.7.4 วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดีสชาร์จบางส่วน.....	31
2.7.5 การต่อวงจรระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนในวงจรทดสอบ.....	33
2.7.6 การแสดงผลดีสชาร์จภายใน.....	34
2.8 การออกแบบครีบนวนโพลีเมอร์ของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป.....	35
2.8.1 ลักษณะมิติที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่า.....	35
2.8.2 การใช้งานกับดักฟ้าผ่าในสภาวะเปรอะเปื้อน.....	36
2.8.3 แนวทางการแก้ไขการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า เนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน.....	39
2.8.4 การออกแบบกับดักฟ้าผ่าเพื่อใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน.....	40
2.9 ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	38
บทที่ 3 การทดสอบรอบเอาท์พิวส์และกับดักฟ้าผ่า และการออกแบบกับดักฟ้าผ่า.....	47
3.1 การทดสอบรอบเอาท์พิวส์.....	47
3.1.1 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์.....	48
3.1.2 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง.....	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การทดสอบกับดักฟ้าผ่า.....	58
3.2.1 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน.....	59
3.2.2 การทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงาน.....	71
3.2.3 การทดสอบหากระแสรั่วไหล.....	73
บทที่ 4 การออกแบบและจำลองวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าของครีบนวนกับดักฟ้าผ่า..	76
4.1 การออกแบบลักษณะครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าและจำลองวิเคราะห์ทาง ไฟฟ้า.....	76
4.2 การเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าระหว่าง ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่ายกับครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ ออกแบบ แบบที่ 3 และแบบที่ 4.....	92
4.1.1 การเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวน กับดักฟ้าผ่าครีบนวนแรกด้านบน.....	93
4.1.2 การเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดัก ฟ้าผ่าครีบนวนแรกด้านล่าง.....	95
4.1.3 การเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดัก ฟ้าผ่าครีบนวนที่สองด้านบน.....	97
4.1.4 การเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดัก ฟ้าผ่าครีบนวนที่สองด้านล่าง.....	99
4.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการออกแบบและจำลองวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของ ครีบนวน.....	101
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	102
5.1 สรุป.....	102
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	103
เอกสารอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก.....	105
ภาคผนวก ก. การทดสอบแรงดันคงเหลือเนื่องจากอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่ห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (บางพลี).....	106
ภาคผนวก ข. หัวข้อการทดสอบเบื้องต้นสำหรับกับดักฟ้าผ่าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค..	109
ภาคผนวก ค. หัวข้อการทดสอบเบื้องต้นสำหรับครอบเอาท์พิวส์ของ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	110

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง. การตรวจสอบทางมิติของดรอเอท์พีวส์และกับดักฟ้าผ่า.....	111
ภาคผนวก จ. การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวของดรอเอท์พีวส์ กรณีเทอร์มินอล – กราวนด์.....	113
ภาคผนวก ฉ. การเปรียบเทียบลักษณะมิติของครีบนวนกับดักฟ้าผ่า.....	118
ภาคผนวก ช. การจำลองวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าของครีบนวนดรอเอท์พีวส์.....	122

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก,แรงดันเกินภายในและแรงดันเกินชั่วคราว..	6
2.2 การติดตั้งครอบเอาต์ไฟวส์ที่ใช้งานในระบบไฟฟ้า.....	7
2.3 ส่วนประกอบหลักของครอบเอาต์ไฟวส์.....	8
2.4 ส่วนประกอบของไฟวส์ลิงค์.....	8
2.5 คุณสมบัติการทำงานของไฟวส์ลิงค์.....	9
2.6 การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่ายร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า.....	11
2.7 โครงสร้างของกับดักฟ้าผ่าแบบมีแกป.....	11
2.8 โครงสร้างของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป.....	12
2.9 กับดักฟ้าผ่าที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วย คู่หัวเปียงอาร์ก หรือ อาร์กชิงฮอร์น (Arcing Horn) ต่ออนุกรมกับ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO).....	13
2.10 กราฟแสดงการนำกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป.....	14
2.11 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม.....	16
2.12 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด.....	17
2.13 วงจรพื้นฐานของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	18
2.14 วงจรสมมูลการแปลงลาปลาซของวงจรในรูปที่ 2.9 (ก).....	19
2.15 วงจรพื้นฐานการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์.....	22
2.16 รูปแบบของดีสชาร์จบางส่วน.....	26
2.17 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน.....	27
2.18 การดีสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน.....	29
2.19 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ต่อความไวการวัด q_m/q ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_k/C_i	30
2.20 วงจรพื้นฐานการวัดดีสชาร์จบางส่วน.....	31
2.21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของดีสชาร์จบางส่วน.....	32
2.22 วงจรทดสอบตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนโดยตรง.....	33
2.23 การแสดงผลการดีสชาร์จบางส่วน.....	34
2.24 ลักษณะทางมิติที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่า.....	36
2.25 ความเสียหายที่มีสาเหตุจากการเกิดวาบไฟตามผิวของกับดักฟ้าผ่า.....	36
2.26 ขั้นตอนการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน.....	38
2.27 ลักษณะการออกแบบครีปตามมาตรฐาน IEC 815.....	40
2.28 รูปแบบของครีปประเภทต่าง ๆ.....	41

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.29 ลักษณะของตัวอย่างแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่าง วิธีการผลต่างสืบเนื่องกับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	42
2.30 แผ่นอะลูมิเนียมที่วิเคราะห์โดยใช้วิธีการผลต่างสืบเนื่อง (ก) กับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (ข).....	43
2.31 ตัวอย่างการแบ่งขอบเขตรูปร่างเป็นเอลิเมนต์ย่อย.....	44
2.32 จุดต่อของเอลิเมนต์ย่อย.....	45
3.1 ครอบเอาต์พิวส์ที่ใช้ในการศึกษาครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A บริษัท A. (ก) และครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A บริษัท B. (ข).....	47
3.2 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของครอบเอาต์พิวส์.....	48
3.3 การติดตั้งครอบเอาต์พิวส์ตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996.....	49
3.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 1 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 126.3 kV โดยที่ $T_1 = 1.18 \mu s$ $T_2 = 62.3 \mu s$..	51
3.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 2 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 127.8 kV โดยที่ $T_1 = 1.19 \mu s$ $T_2 = 65.2 \mu s$..	51
3.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 3 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 127.1 kV โดยที่ $T_1 = 1.22 \mu s$ $T_2 = 65.9 \mu s$..	52
3.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 4 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 125.6 kV โดยที่ $T_1 = 1.26 \mu s$ $T_2 = 59.8 \mu s$..	52
3.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 5 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 128.3 kV โดยที่ $T_1 = 1.26 \mu s$ $T_2 = 61.6 \mu s$..	53
3.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 1 บริษัท B. ที่ระดับแรงดัน 127.8 kV โดยที่ $T_1 = 1.12 \mu s$ $T_2 = 62.9 \mu s$..	53
3.10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 ตัวอย่างที่ 2 บริษัท B. ที่ระดับแรงดัน 128.4 kV โดยที่ $T_1 = 1.12 \mu s$ $T_2 = 63.9 \mu s$..	54
3.11 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 ตัวอย่างที่ 3 บริษัท B. ที่ระดับแรงดัน 128.5 kV โดยที่ $T_1 = 1.14 \mu s$ $T_2 = 61.5 \mu s$..	54
3.12 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง.....	56
3.13 กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในการศึกษา กับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A. (ก) กับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B. (ข) กับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10kA บริษัท B. (ค).....	58
3.14 วงจรทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนของกับดักฟ้าผ่า ZnO.....	59

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.15 ผลการทดสอบการดีสซาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 1.....	61
3.16 ผลการทดสอบการดีสซาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 2.....	62
3.17 ผลการทดสอบการดีสซาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 3.....	63
3.18 ผลการทดสอบการดีสซาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 4.....	64
3.19 ผลการทดสอบการดีสซาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 5.....	65
3.20 ผลการทดสอบการดีสซาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 6.....	66
3.21 ผลการทดสอบการดีสซาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 7.....	67
3.22 ผลการทดสอบการดีสซาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 8.....	68
3.23 ผลการทดสอบการดีสซาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 9.....	69
3.24 วงจรทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มทำงาน.....	71
3.25 วงจรทดสอบหาค่ากระแสรั่วไหล.....	73
4.1 การออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ครีบท่า.....	77
4.2 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมตักย์ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ครีบท่า.....	77
4.3 การจำลองวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ครีบท่า.....	78
4.4 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ครีบท่า.....	78
4.5 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ครีบท่า พิจารณาครีบทที่ 1 ถึงครีบทที่ 2.....	79
4.6 การออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีบทลับ.....	80
4.7 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมตักย์ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีบทลับ.....	80
4.8 การจำลองวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีบทลับ.....	81
4.9 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีบทลับ.....	81
4.10 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีบทลับ พิจารณาครีบทที่ 1 ถึงครีบทที่ 3.....	82
4.11 ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่าย.....	83
4.12 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมตักย์ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ใน ระบบจำหน่าย.....	83
4.13 การจำลองวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครีบนวนที่ใช้ในระบบจำหน่าย.....	84
4.14 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่าย.....	84

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.15 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่าย พิจารณาครีปที่ 1 ถึงครีปที่ 3.....	85
4.16 การออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีปสลับ.....	86
4.17 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมคักย์ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีปสลับ.....	86
4.18 การจำลองวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีปสลับ.....	87
4.19 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีปสลับ.....	87
4.20 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีปสลับ พิจารณาครีปที่ 1 ถึงครีปที่ 3.....	88
4.21 การออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีปสลับ.....	89
4.22 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมคักย์ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีปสลับ.....	89
4.23 การจำลองวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครีบนวนแบบที่ 4 ครีปสลับ.....	90
4.24 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีปสลับ.....	90
4.25 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีปสลับ พิจารณาครีปที่ 1 ถึงครีปที่ 3.....	91
4.26 ตำแหน่งของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ทำการเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้า..	92
4.27 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีปแรกด้านบน ของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่าย.....	93
4.28 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีปแรกด้านบน ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีปสลับ.....	93
4.29 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีปแรกด้านบน ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีปสลับ.....	94
4.30 เปรียบเทียบการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่า ครีปแรกด้านบนของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่ายกับครีบนวนกับดักฟ้าผ่า ที่ออกแบบแบบที่ 3 และแบบที่ 4.....	94
4.31 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีปแรกด้านล่าง ของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่าย.....	95

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.32 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบแรกด้านล่างของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีบลับ.....	95
4.33 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบแรกด้านล่างของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีบลับ.....	96
4.34 เปรียบเทียบการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบแรกด้านล่างของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่ายกับครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบแบบที่ 3 และแบบที่ 4.....	96
4.35 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบที่สองด้านบนของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่าย.....	97
4.36 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบที่สองด้านบนของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีบลับ.....	97
4.37 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบที่สองด้านบนของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีบลับ.....	98
4.38 เปรียบเทียบการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบที่สองด้านบนของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่ายกับครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบแบบที่ 3 และแบบที่ 4.....	98
4.39 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบที่สองด้านล่างของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่าย.....	99
4.40 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบที่สองด้านล่างของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีบลับ.....	99
4.41 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบที่สองด้านล่างของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีบลับ.....	100
4.42 เปรียบเทียบการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบที่สองด้านล่างของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่ายกับครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบแบบที่ 3 และแบบที่ 4.....	100
ก.1 กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ทดสอบหาค่าแรงดันคงเหลือเนื่องจากอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	106
ก.2 การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในวงจรทดสอบ.....	106
ก.3 เครื่องกำเนิดแรงอิมพัลส์ฟ้าผ่าและโวลเตจดีไวเดอร์.....	107
ก.4 อุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	107
ก.5 อุปกรณ์แสดงผลรูปคลื่นของอิมพัลส์ที่จ่ายและแรงดันคงเหลือที่วัดได้.....	108
ก.6 วงจรสมมูลของการทดสอบหาค่าแรงดันคงเหลือเนื่องจากอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	108

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
จ.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 1 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 94 kV โดยที่ $T_1= 1.20 \mu s$ $T_2= 58.7 \mu s$	113
จ.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 2 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 98.65 kV โดยที่ $T_1= 1.22 \mu s$ $T_2= 61.7 \mu s$...	114
จ.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 3 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 100.5 kV โดยที่ $T_1= 1.23 \mu s$ $T_2= 60.2 \mu s$...	114
จ.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 4 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 94 kV โดยที่ $T_1= 1.27 \mu s$ $T_2= 58.5 \mu s$	115
จ.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 5 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 105.1 kV โดยที่ $T_1= 1.23 \mu s$ $T_2= 61.1 \mu s$...	115
จ.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 5 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 105.1 kV โดยที่ $T_1= 1.25 \mu s$ $T_2= 59.5 \mu s$..	116
จ.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 5 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 115.7 kV โดยที่ $T_1= 1.20 \mu s$ $T_2= 60.6 \mu s$..	116
จ.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 5 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 122.1 kV โดยที่ $T_1= 1.17 \mu s$ $T_2= 60.4 \mu s$..	117
ฉ.1 ลักษณะมิติของครีบนวนกับดักฟ้าผ่า.....	118
ช.1 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมตักย์ของครีบนวนครอบเอาต์พิวส์.....	122
ช.2 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน ครอบเอาต์พิวส์.....	123
ช.3 บริเวณวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครอบเอาต์พิวส์.....	123
ช.4 การจำลองวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครีบนวนครอบเอาต์พิวส์ (ด้านบน).....	124
ช.5 การจำลองวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครีบนวนครอบเอาต์พิวส์ (ด้านล่าง).....	124

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำปฏิญญาพันธ.....	3
2.1 ค่าคงที่ K_1 , K_2 และ $1/\alpha_1$, $1/\alpha_2$ ที่เหมาะสมสำหรับรูปคลื่นต่าง ๆ ตามมาตรฐาน...	21
2.2 การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน.....	37
2.3 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้กับดักฟ้าผ่าที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปราะเปื้อน.....	39
3.1 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์(ชั่วคราว)ที่ระดับแรงดัน 124 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของครอบเอาต์ไฟวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล.....	50
3.2 การเกิดวابلไฟตามผิวแห้งกระแสสลับ 50 Hz ของครอบเอาต์ไฟวส์ที่ระดับแรงดัน 43 kV (ที่สภาวะห้องทดสอบ).....	57
3.3 ผลการทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงานของกับดักฟ้าผ่า.....	72
3.4 ผลการทดสอบหากระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า.....	74
ข.1 ตารางบันทึกค่าการตรวจสอบกับดักฟ้าผ่าเบื้องต้น.....	109
ค.1 ตารางบันทึกค่าการตรวจสอบครอบเอาต์ไฟวส์เบื้องต้น.....	110
ง.1 ผลการตรวจสอบลักษณะมิติของครอบเอาต์ไฟวส์พิกัด 22 kV 100 A บริษัท A.....	111
ง.2 ผลการตรวจสอบลักษณะมิติของครอบเอาต์ไฟวส์พิกัด 22 kV 100 A บริษัท B.....	111
ง.3 ผลการตรวจสอบลักษณะมิติของกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA.....	111
ง.4 ผลการตรวจสอบลักษณะมิติของกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA.....	112
ฉ.1 เปรียบเทียบลักษณะมิติของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบและครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่าย.....	121

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเป็นการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง เพื่อให้จะให้เพียงพอต่อความต้องการ และเกิดการสูญเสียที่น้อยที่สุด โดยอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำมาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นที่จะต้องได้รับการออกแบบการฉนวนไฟฟ้าที่ดี ในการทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า รวมทั้งอุปกรณ์นั้นจะต้องได้รับการทดสอบก่อนที่จะนำมาใช้งานจริง เพื่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

กับดักฟ้าผ่า (Surge Arrester) เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในการลดระดับแรงดันเกินหรือจำกัดแรงดันเกิน โดยจะต้องนำกระแสหรือกระแสอิมพัลส์ให้ไหลลงสู่ดิน และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไม่ให้เกินค่าที่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ป้องกันอยู่ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นแบบติดตั้งอยู่กลางแจ้ง จึงมีโอกาที่จะได้รับแรงดันเกินเกิดขึ้นในระบบสูง ทั้งด้วยสาเหตุจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Overvoltage) ซึ่งจัดเป็นแรงดันเกินภายนอก (External Overvoltage) และแรงดันเกินจาก การทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร เรียกว่า แรงดันเกินสวิตซ์ (Switching Overvoltage) ซึ่งจัดเป็นแรงดันเกินภายใน (Internal Overvoltage) ในปัจจุบันกับดักฟ้าผ่าได้รับการพัฒนาและนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายด้วยเทคโนโลยีการผลิตภายในประเทศ โดยเฉพาะการนำไปใช้เพื่อป้องกันแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังและระบบจำหน่าย [1-3]

ดรอปเอาต์ฟิวส์ (Drop-Out Fuse) เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินพิกัดในระบบจำหน่ายแรงสูงที่มีการติดตั้งง่าย และหลักการทำงานไม่ต้องอาศัยกลไกยุ่งยากเหมือนอุปกรณ์ป้องกันชนิดอื่น มีฟิวส์ลิงค์เป็นตัวทำหน้าที่หลอมละลายตัดวงจรออกเมื่อเกิดกระแสเกินพิกัดตั้งแต่ 2 เท่าของขนาดฟิวส์ลิงค์ขึ้นไป ลักษณะการทำงานของฟิวส์ลิงค์จะเป็นแบบ Extremely Inverse Characteristic คือ กระแสเกินพิกัดยิ่งมีค่ามาก เวลาการทำงานของฟิวส์ลิงค์ยิ่งเร็วขึ้น

1.2 ที่มาของปัญหา

ปัจจุบันระบบสายส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทยเป็นแบบติดตั้งภายนอก (Outdoor) จึงมีโอกาสเกิดสภาวะแรงดันเกินขึ้นในระบบทั้งในกรณีแรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันเกินสวิตซ์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อสร้างความเชื่อถือได้ของระบบ อุปกรณ์ป้องกันที่จะนำมาติดตั้งนั้นจะต้องได้รับการออกแบบ และการทดสอบด้วยวิธีการที่เหมาะสมก่อนที่จะนำมาติดตั้ง รวมทั้งการศึกษาคุณสมบัติการใช้งาน และโครงสร้างส่วนประกอบต่างๆ เพื่อที่จะใช้ประโยชน์อุปกรณ์ป้องกันอย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้งานของกับดักฟ้าผ่ามักจะประสบปัญหาการเจาะทะลุของเนื้อฉนวนโพลีเมอร์ ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากความผิดปกติภายในเนื่องมาจากความชื้นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน

เกิดจากกระบวนการผลิต หรือคุณสมบัติของเนื้อฉนวนที่ไม่เหมาะสม การทดสอบคุณสมบัติของ กั๊บดักฟ้าผ่าก่อนที่จะนำไปติดตั้งใช้งาน จะช่วยลดปัญหาความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า กำลังอันเนื่องมาจากความไม่มีคุณภาพของอุปกรณ์ดังกล่าว รวมทั้งการออกแบบครีบบของเนื้อ ฉนวนโพลีเมอร์ของกั๊บดักฟ้าผ่าให้การกระจายสภาพสนามไฟฟ้าดีขึ้นจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าของกั๊บดักฟ้าผ่า

1.3 ขอบเขตปริญญาณิพนธ์

ขอบข่ายปริญญาณิพนธ์นี้ คือทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้า โครงสร้าง ส่วนประกอบต่าง ๆ ของกั๊บดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแก๊บ Gapless Zinc Oxide Arrester (ZnO) หรือ Metal Oxide Varister (MOV) และครอบเอาท่ฟิวส์ชนิดตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก (Open Type) และทำการทดสอบคูณสมบัติทางไฟฟ้าโดยการใช้อุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ของ สจล. การทดสอบกั๊บดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแก๊บจะทำตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ส่วนการ ทดสอบครอบเอาท่ฟิวส์ ชนิดตัวฟิวส์อยู่ในกระบอกจะทำตามมาตรฐาน ANSI C-37.42-1996 และ IEEE Std C 37.41 รวมทั้งทำการออกแบบครีบบของเนื้อฉนวนที่ทำด้วยโพลีเมอร์สำหรับ กั๊บดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแก๊บ สำหรับใช้งานในสภาวะเปราะเปื้อนจะกระทำตามมาตรฐาน IEC 815 และการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังแสดง รายละเอียดดังนี้

1. ศึกษาลักษณะการทำงาน โครงสร้าง และคูณสมบัติทางไฟฟ้ากั๊บดักฟ้าผ่าชนิดไม่มี แก๊บ และครอบเอาท่ฟิวส์ชนิดตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก
2. ศึกษามาตรฐานการทดสอบกั๊บดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแก๊บ และครอบเอาท่ฟิวส์ชนิดตัว ฟิวส์อยู่ในกระบอก
3. ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โปรแกรม AutoCAD 2005 ใช้ในการออกแบบ ครีบบของกั๊บดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊บ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ในการวิเคราะห์ สภาพสนามไฟฟ้า
4. ทำการทดสอบทางไฟฟ้าของตัวอย่างกั๊บดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแก๊บ และครอบเอาท่ ฟิวส์ชนิดตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก โดยใช้อุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงของ สจล. ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้บางหัวข้อเท่านั้น
5. ทำการออกแบบครีบบของเนื้อฉนวนที่ทำด้วยโพลีเมอร์ของกั๊บดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแก๊บ และการวิเคราะห์สภาพของสนามไฟฟ้า โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
6. ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ
7. สรุปผล

1.4 ขั้นตอนของการทำปฏิญานิพนธ์

ในการศึกษาโครงการงานวิศวกรรมนี้ ได้มีการวางแผนจัดลำดับขั้นตอน การศึกษาไว้ในกรอบของระยะเวลาการศึกษาประมาณ 8 เดือน เพื่อให้ได้ข้อมูลผลการศึกษาวิจัยซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์อ้างอิงในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมได้และเพื่อให้นักศึกษามีความสมบูรณ์มากที่สุด โดยมีลำดับขั้นตอนของการศึกษาวิจัยแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำปฏิญานิพนธ์

การทำงาน	พ.ศ.2548					พ.ศ.2549			
	ภาคเรียนที่ 1				X	ภาคเรียนที่ 2			
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษาข้อมูลการทำงานคุณสมบัติของอุปกรณ์					สอบปลายภาคเรียนที่ 1 และปิดภาคการศึกษา				
2. ศึกษามาตรฐานในการทดสอบและออกแบบ									
3. ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์									
4. จัดทำข้อมูลนำเสนอภาคเรียนที่ 1									
5. ทดสอบทางไฟฟ้าตัวอย่างอุปกรณ์									
6. ออกแบบและวิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้า									
7. สรุปและวิเคราะห์ผล									
8. จัดทำปฏิญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์									

วางแผน

ดำเนินการจริง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำปริญญานิพนธ์

1. มีความรู้ความเข้าใจในการทำงานของไดรอปเอาร์ทไฟวส์และกับดักฟ้าผ่า
2. สามารถทำการทดสอบไดรอปเอาร์ทไฟวส์และกับดักฟ้าผ่าโดยใช้ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.ได้
3. สามารถออกแบบครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าได้
4. มีความเข้าใจในการวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันเกินฟ้าผ่า ส่วนประการที่สองเป็นแรงดันเกินจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจรในระบบ เรียกว่าแรงดันเกินสวิตซ์ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น โดยช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกิน มีค่าแตกต่างกัน การเกิดแรงดันเกินสวิตซ์โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2 เท่าของพิกัดแรงดันซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อระบบส่งจ่ายมากนัก แต่แรงดันเกินฟ้าผ่าจะทำอันตรายกับระบบส่งจ่าย เนื่องจากขนาดของแรงดันสูงเป็นล้านโวลต์เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายโดยตรง [1-3]

2.1.1 แรงดันเกินภายนอก

เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแบบเดินสายอยู่ภายนอกซึ่งอยู่ในอากาศ ดังนั้นระบบสายส่งจึงมีโอกาสสูงมากที่จะฟ้าผ่าได้ ทั้งในกรณีผ่าลงโดยตรง หรือการดีสชาร์จในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าลงบริเวณใกล้เคียง ซึ่งก็จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่งแรงสูง แรงดันเกินนี้สามารถคำนวณได้ถ้าหากทราบรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า โดยอาศัยหลักการคิดคำนวณตามทฤษฎีของคลื่นจร (Traveling Wave Theory) และทฤษฎีการคำนวณวงจร RCL รูปลักษณะรูปคลื่นแรงดันเกินภายนอกหรือแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (Lightning Impulse Voltage) นี้จะมีช่วงหน้าคลื่น หมายถึงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่ายอดนั้นสั้นมาก คือ อยู่ในช่วง 1 - 2 μs และช่วงหางคลื่น คือ แรงดันลดลงครึ่งหนึ่งของค่ายอดในช่วงเวลาประมาณ 40 - 60 μs แรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าที่มีค่ายอดคลื่นสูงมากประมาณ 10 เปอรีย์นิตหรือมากกว่านั้น จะเป็นอันตรายกับระบบส่งจ่ายอย่างมาก จำเป็นที่จะต้องรีบกำจัดออกจากระบบเพื่อป้องกันอุปกรณ์ในระบบส่งจ่าย โดยทั่วไปการบอกขนาดของแรงดันเกินจะบอกด้วยตัวเลข 2 ตัว อยู่ในหน่วยของเวลาซึ่งเขียนอยู่ในรูป T_1/T_2 (T_1 = ช่วงเวลาหน้าคลื่น , T_2 = ช่วงเวลาหางคลื่น) [2]

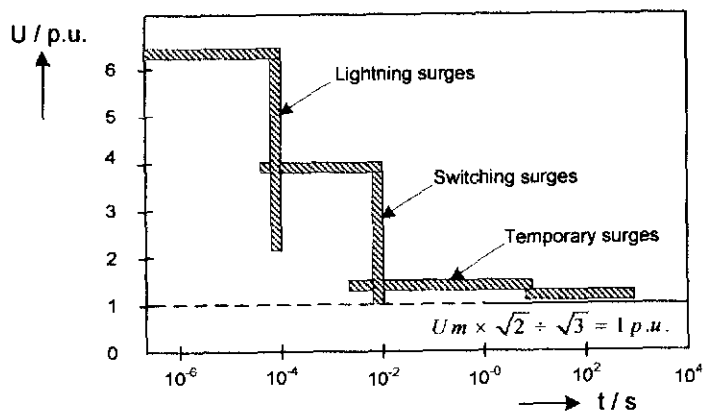
2.1.2 แรงดันเกินภายใน

สาเหตุที่เกิดแรงดันเกินภายใน อาจเนื่องจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร ทั้งในกรณีการทำงานของผู้ปฏิบัติงานและการทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อเกิดความบกพร่องขึ้น แรงดันเกินดังกล่าวเกิดจากการทำงานของสวิตซ์ เรียกว่าแรงดันเกินสวิตซ์ (Switching Overvoltage) หรืออิมพัลส์แบบสวิตซ์ (Switching Impulse) หรือเกิดจากการลัดวงจรเนื่องจากความบกพร่องของฉนวน หรือเกิดจากแรงดันเกินภายนอก คือแรงดันฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดสปาร์กหรือวาบไฟตามผิวฉนวนภายนอกที่มีความสกปรก เปียกฝน ชื้นด้วยหมอก น้ำค้าง หรือเกิดลัดวงจรเนื่องจากมี

สิ่งแปลกปลอม หรือเกิดจากวงจรรีโซแนนซ์ เพราะค่าคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ในสายส่ง รูปลักษณะของคลื่นแรงดันเกินภายในนี้จะช้ากว่าแรงดันเกินภายนอก คือช่วงหน้าคลื่นจะอยู่ในช่วง $100 - 300 \mu s$ และช่วงหางคลื่นอยู่ในช่วง $2,000 - 3,000 \mu s$ แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งนี้ไม่มีความหมายต่อการทดสอบระดับการฉนวนที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำกว่า $300 kV$ แต่ที่ระบบแรงดันสูงกว่า $300 kV$ การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตช์ซึ่งจะมีความหมายมากขึ้นเมื่อเทียบกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า แรงดันเกินที่เกิดจากการสวิตช์ซึ่งมีค่ายอดคลื่นสูงประมาณ 4 เปอรียูนิต [2]

2.1.3 แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage)

จะแตกต่างจากแรงดันเกินเนื่องจากคลื่นเสิร์จ ช่วงความถี่ของแรงดันเกินชั่วคราวจะมีตั้งแต่ไม่กี่เฮิรตซ์ไปจนถึงหลายร้อยเฮิรตซ์ และมีช่วงระยะเวลาจากไม่กี่วินาทีไปจนถึงเป็นชั่วโมง (ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดฟอลต์) รูปแบบทั่วไปส่วนใหญ่ของแรงดันเกินชั่วคราวจะเกิดบนเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์ เมื่อมีฟอลต์ลงดินแบบ 1 เฟส หรือ 2 เฟส เกิดขึ้น แรงดันเกินแบบนี้มีค่าไม่เกิน $\sqrt{3}$ เปอรียูนิต และไม่มีอันตรรกะกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก ,แรงดันเกินภายในและแรงดันเกินชั่วคราว

2.2 ครอบเอาต์พิวส์

ครอบเอาต์พิวส์เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินพิกัดในระบบจำหน่ายแรงสูงที่มีการใช้งานโดยทั่วไปเนื่องจากมีราคาถูกและมีหลักการทำงานไม่ซับซ้อนมาก โดยมีพิวส์ลิ่งค์เป็นตัวทำหน้าที่หลอมละลายตัดวงจรออก [3] โดยครอบเอาต์พิวส์ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

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

การทำงานของครอบเอาต์ฟิวส์จะเกิดขึ้นเมื่อ มีกระแสเกินพิกัดมากพอที่จะทำให้ ส่วนหลอมละลายของฟิวส์ลิ่งค์เริ่มหลอมละลาย ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ไฟเบอร์ที่บู่อยู่ ภายในกระบอกริวส์ร้อน และทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซภายในกระบอกริวส์ ก่อนที่ส่วน หลอมละลายจะขาดออกจากกัน จะเกิดอาร์กขึ้น ซึ่งอาร์กนี้จะถูกยึดและทำให้ดับไปโดยการดัน ออกของก๊าซทางส่วนล่างหรือส่วนหัวของกระบอกริวส์ เกิดแรงดึง ทำให้กระบอกริวส์ตกลงมา



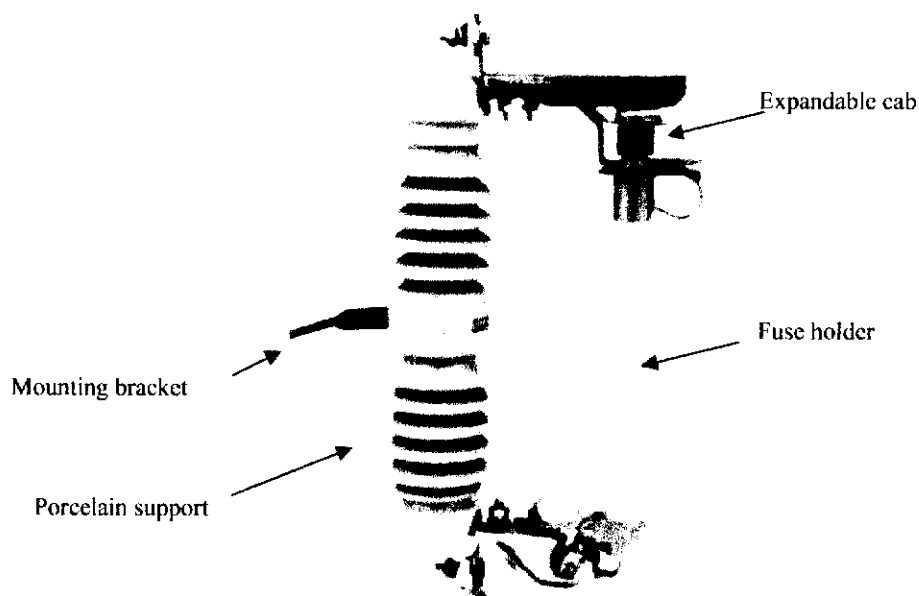
รูปที่ 2.2 การติดตั้งครอบเอาต์ฟิวส์ที่ใช้งานในระบบไฟฟ้า

2.2.1 ชนิดของครอบเอาต์ฟิวส์

ครอบเอาต์ฟิวส์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอกริวส์ ชนิดที่ตัวฟิวส์ ไม่ได้อยู่ในกระบอกริวส์และชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม ส่วนการเลือกใช้งานจะต้องพิจารณา สิ่งแวดล้อมเป็นหลัก [3]

1. ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอกริวส์ (Open Type) ฟิวส์ประเภทนี้เป็นเอ็กซ์แพนชัน (Expansion) คือเป็นอุปกรณ์ป้องกันที่มีการพุ่งระบายของไฟและก๊าซ ในขณะที่ ตัวฟิวส์หลอมขาดออกจากกันเนื่องจากการลัดวงจร
2. ชนิดที่ตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอกริวส์ (Open-link Type) เป็นฟิวส์ประเภทเอ็กซ์แพนชันเหมือนประเภทแรก เพียงแต่ตัวฟิวส์ลิ่งค์เป็นชนิดที่ไม่ได้บรรจุในกระบอกริวส์
3. ชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม (Enclosed Type) เป็นฟิวส์ประเภทเอ็กซ์แพนชัน แตกต่างจากแบบแรก เพียงแต่กระบอกริวส์ขั้วต่อสายใส่บรรจุอยู่ในกล่องล๊อมปิด

โดยโครงการนี้เป็นการศึกษาครอบเอาต์ฟิวส์ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอกริวส์ ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบหลักของตรอบเอาท์ฟิวส์

จากรูปที่ 2.3 สามารถอธิบายส่วนประกอบหลัก ๆ ได้ดังนี้

1. Mounting bracket สำหรับยึดตรอบเอาท์ฟิวส์เข้ากับคอนสาย
2. Porcelain support เป็นฉนวนสำหรับติดตั้งฟิวส์คัทเอาท์กับ Mounting bracket
3. Fuse holder เป็นกระบอกที่ใส่ฟิวส์ลิงค์ ภายใต้วัยไฟเบอร์
4. Expandable cap เป็นฝาครอบอยู่บนส่วนหัวของกระบอกฟิวส์

2.2.2 ฟิวส์ลิงค์

ฟิวส์ลิงค์ทำหน้าที่หลอมละลายตัดวงจรออกเมื่อเกิดกระแสเกินพิกัดมากพอที่จะทำให้ส่วนหลอมละลายของฟิวส์ลิงค์เริ่มหลอมละลายส่วนประกอบของฟิวส์ลิงค์ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของฟิวส์ลิงค์ [3]

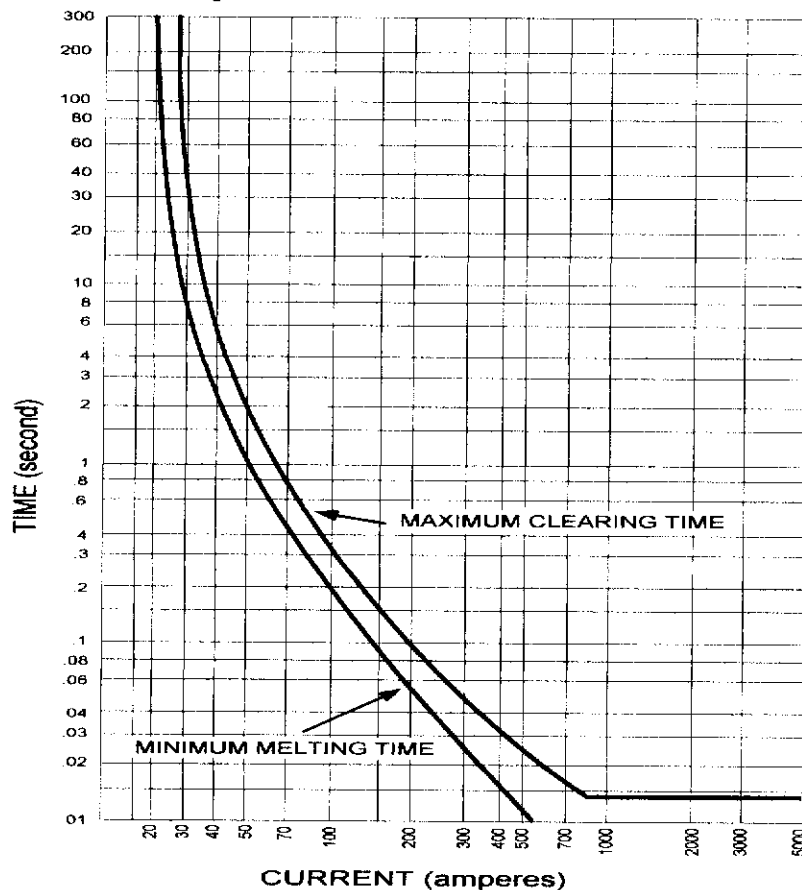
ส่วนประกอบฟิวส์ลิงค์ที่สำคัญมีดังนี้

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

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

2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา

คุณสมบัติของฟิวส์ลิงค์แต่ละขนาดจะถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของฟิวส์ลิงค์เป็น 2 ช่วงดังรูปที่ 2.5 คือ



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติการทำงานของฟิวส์ลิงค์ [3]

จากรูปที่ 2.5 สามารถอธิบายลักษณะการทำงานของฟิวส์ลิงค์ได้ดังนี้

1. เวล่าน้อยที่สุดที่ฟิวส์เริ่มหลอมละลาย (Minimum melting time) กำหนดให้ฟิวส์ลิงค์แบบ K เริ่มหลอมละลายเมื่อมีกระแสไหลผ่านฟิวส์ลิงค์เป็น 2 เท่า 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

2.3 กับดีกฟ้าผ่า

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

กับดีกฟ้าผ่าที่ใช้ในปัจจุบันเป็นชนิดแบบไม่มีแกป ที่มีคุณสมบัติเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Resistor) คือ มีความต้านทานต่ำ เมื่อมีแรงดันสูงขึ้น ทำให้กระแสไหลผ่านตัวกับดีกฟ้าผ่าลงดินได้ กับดีกฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปครั้งแรกถูกนำเสนอโดยมัตสึโอกะ ในปี ค.ศ.1971 และในสหรัฐอเมริกา กับดีกฟ้าผ่าได้ถูกนำเข้ามาครั้งแรกในปี ค.ศ.1977 โดย Sakshaug et al. [3] เพราะปัญหาเรื่องเสถียรภาพและช่วงชีวิตของสารเมทัลออกไซด์ ในช่วงแรกกับกับดีกฟ้าผ่าจึงเป็นแบบที่มีแกปในการลดแรงดันในระบบที่ป้องกัน และต่อมาได้มีการพัฒนาสูตรและสมการต่าง ๆ ทำให้การใช้แกปมีความสำคัญลดน้อยลง และได้เข้าสู่การพัฒนาของกับดีกฟ้าผ่าที่ไม่ใช้แกป แต่ในปัจจุบันก็ยังคงมีการใช้กับดีกฟ้าผ่าแบบมีแกปในระบบที่มีแรงดันสูง ๆ เพื่อจำกัดปัญหาเรื่องกระแสที่ไหลผ่านกับดีกฟ้าผ่าแบบมีแกปในขณะที่ใช้งานปกติซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานได้

กับดีกฟ้าผ่าที่ถูกใช้งานอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะโครงสร้างที่สำคัญ คือ

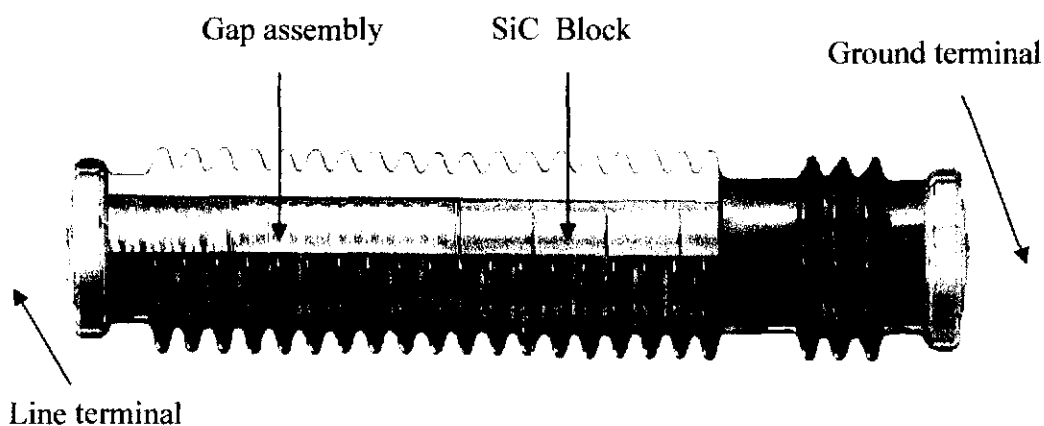
1. กับดีกฟ้าผ่าแบบมีแกป หรือ Gap-Silicon Carbide Arrester
2. กับดีกฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป หรือ Gapless Zinc Oxide Arrester หรือ Metal Oxide Varister
3. กับดีกฟ้าผ่าแบบมีแกปทำงานร่วมกับชิ่งค้อออกไซด์ เรียกว่า Current Limiting Arcing Horn (CLAH)



รูปที่ 2.6 การติดตั้งกั๊บดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่ายร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า

2.3.1 กั๊บดักฟ้าผ่าแบบมีแกป

โครงสร้างที่สำคัญของกั๊บดักฟ้าผ่าแบบมีแกป จะประกอบด้วย ช่องประกาย (Spark Gap) ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) บรรจุอยู่ภายใน โครงสร้างฉนวนที่มักทำด้วยพอร์ตเลน (Porcelain Insulator) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในการทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินนั้น ส่วนใหญ่กั๊บดักฟ้าผ่าจะถูกติดตั้งไว้กับสายเฟสในระบบสายส่ง โดยต่อจากสายเฟสลงดิน หรือติดตั้งไว้ที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้าในลักษณะต่อขนานกับหม้อแปลงไฟฟ้า [2]



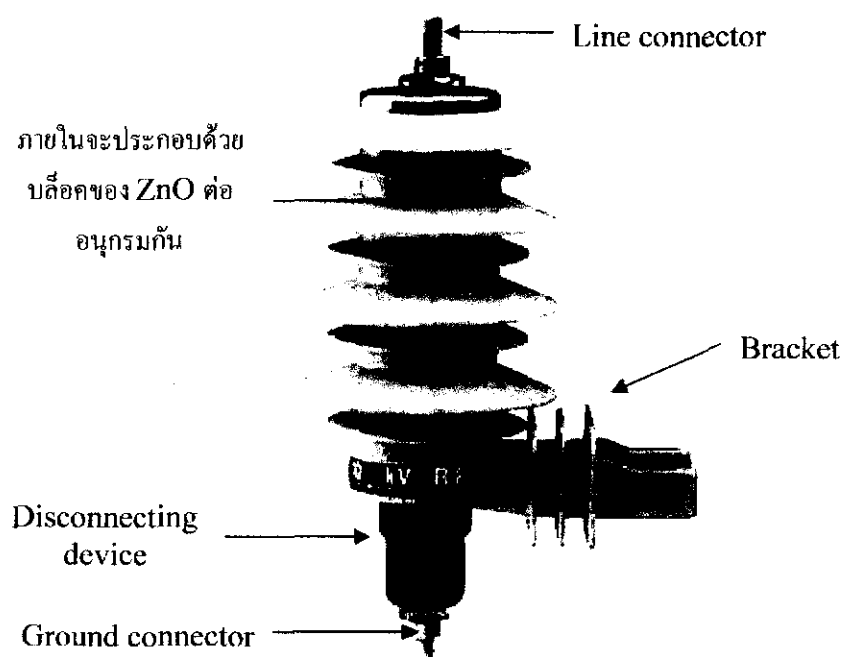
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของกั๊บดักฟ้าผ่าแบบมีแกป

ภายใต้สภาวะระดับแรงดันใช้งานปกติของระบบไฟฟ้า กั๊บดักฟ้าผ่าแบบมีแกปจะมีความต้านทานสูงมากและไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวมันเลย เมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เช่น แรงดันเกินฟ้าผ่า จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมกั๊บดักฟ้าผ่าแบบมีแกปมีค่าสูงขึ้น หากแรงดันเกินดังกล่าวมีค่าสูงถึงค่าแรงดันประกายข้าม (Sparkover Voltage) ของกั๊บดักฟ้าผ่า

ช่องประกายจะนำกระแส ทำให้แรงดันเกินทั้งหมดตกคร่อมซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งเมื่อซิลิคอนคาร์ไบด์ได้รับแรงดันสูงขึ้น ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลง ทำให้กระแสไหลผ่านลงดินหรืออาจเรียกว่าเป็นการถ่ายเทประจุลงดินก็ได้ ซึ่งจะเป็นการรักษาระดับแรงดันเกินให้อยู่ในระดับปลอดภัยต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ถูกป้องกันอยู่ เมื่อแรงดันมีค่าลดลงซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้น กระแสเสิร์จที่ไหลผ่านลงดินจะมีค่าลดลง ช่องประกายข้ามจะหยุดนำกระแสในเวลาต่อมา ทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์กลับคืนสู่สภาวะทำงานปกติได้เองหลังจากแรงดันเกินหมดไป แต่กับดักฟ้าผ่าแบบมีแก๊ปนี้จะมีปัญหาที่สำคัญเกี่ยวกับกระแสไหลตาม (Follow Current) เนื่องมาจากไม่สามารถดับอาร์กที่เกิดขึ้นได้ทันที ซึ่งจะมีช่วงเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้อาร์กดับลงทำให้ยังคงมีกระแสไหลผ่านตัวกับดักฟ้าผ่าอีกเป็นระยะเวลาหนึ่งซึ่งอาจจะทำให้เกิดความชำรุดเสียหายได้

2.3.2 กับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊ป

เนื่องจากโครงสร้างและลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนของกับดักฟ้าผ่าแบบมีแก๊ป ทำให้มีการพัฒนากับดักฟ้าผ่าให้มีประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ในการทำงานเพิ่มขึ้นโดยได้มีการเลือกใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) หรือ เมทัลออกไซด์ (MO) หลายๆ ชนิดผสมกัน ทำให้ได้ค่าความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น ไม่ต้องใช้ช่องประกายช่วยในการทำงาน สามารถนำกระแสเสิร์จลงดินได้ดีและช่วยให้แรงดันที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จมีขนาดต่ำลงด้วย อันเป็นผลดีทำให้ระดับแรงดันเกินมีค่าลดลง นอกจากนี้กับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊ปจะมีโครงสร้างที่ง่ายกว่ากับดักฟ้าผ่าแบบมีแก๊ป ดังรูปที่ 2.8 [2]

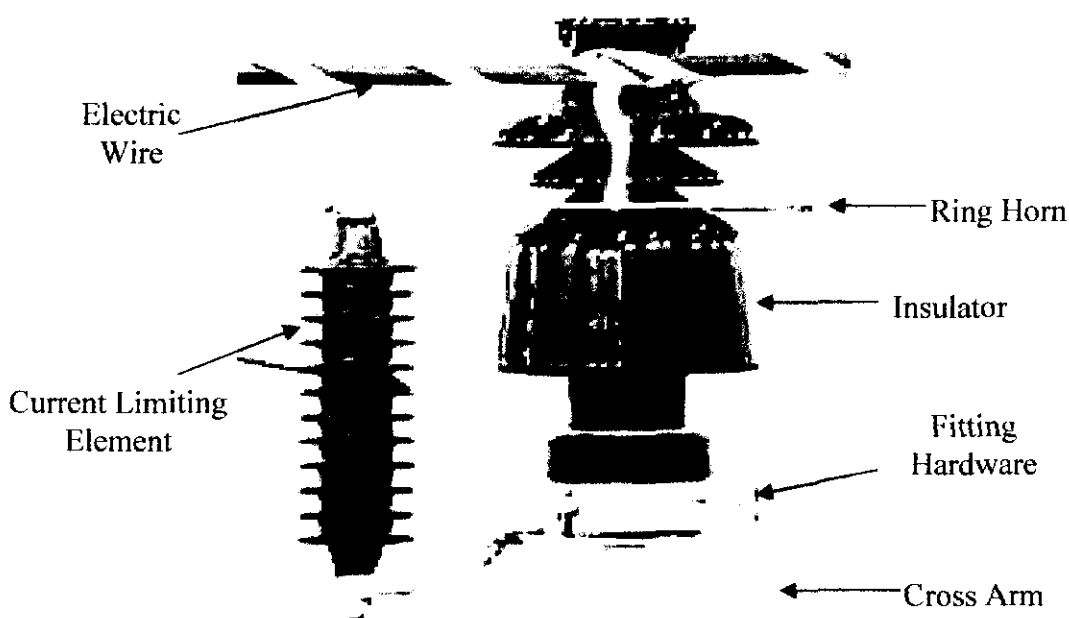


รูปที่ 2.8 โครงสร้างของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊ป

2.3.3 กั๊บดั๊กฟ้าผ่าแบบมีแก็บทำงานร่ว้บกับซิงค์ออกไซด์

เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินชนิดหนึ่ง ที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วย คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก หรือ อาร์กซิงฮอร์น (Arcing Horn) ต่ออนุกรมกับซิงค์ออกไซด์เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเนื่องจากฟ้าผ่า โดยติดตั้งไว้กับลูกถ้วยฉนวนที่เสาไฟฟ้า [2]

โดยหลักการทำงานของอาร์กซิงฮอร์นนั้น จะทำหน้าที่ดั๊กจับแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจากการเกิดฟ้าผ่าลงบนสายเฟสโดยตรง เพื่อนำกระแสเสร็จให้ผ่านวงแหวนอาร์กหรือริงฮอร์น (Ring Horn) ไปสู่ซิงค์ออกไซด์และปล่อยประจุผ่านลงสู่ดิน เมื่อระดับแรงดันเกินมีค่าลดลง ริงฮอร์นก็จะหยุดการประกายข้ามและหยุดนำกระแสเสร็จลงดินในเวลาต่อมา ทำให้กั๊บดั๊กฟ้าผ่าแบบมีแก็บทำงานร่ว้บกับซิงค์ออกไซด์ กลับคืนสู่สภาวะทำงานปกติได้เองหลังจากแรงดันเกินหมดไป จากลักษณะโครงสร้างและหลักการทำงานของกั๊บดั๊กฟ้าผ่าแบบมีแก็บทำงานร่ว้บกับซิงค์ออกไซด์ ดังกล่าวจึงเปรียบเสมือนเป็นกั๊บดั๊กฟ้าผ่าแบบมีแก็บภายนอกที่ทำงานร่ว้บกับซิงค์ออกไซด์

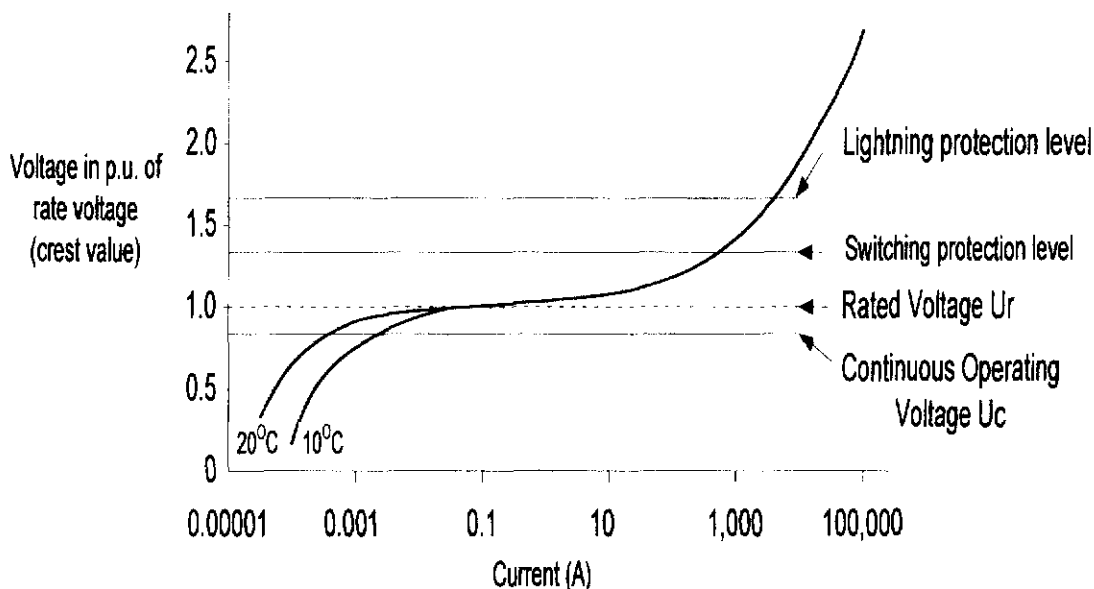


รูปที่ 2.9 กั๊บดั๊กฟ้าผ่าที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วย คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก หรือ อาร์กซิงฮอร์น ต่ออนุกรมกับ ซิงค์ออกไซด์

2.3.4 ลักษณะสมบัติแรงดัน - กระแสของกั๊บดั๊กฟ้าผ่า

ถึงแม้ว่าลักษณะโครงสร้างและกลไกการทำงานของกั๊บดั๊กฟ้าผ่าทั้ง 3 ชนิดจะแตกต่างกันโดยเฉพาะการใช้ช่องประกายข้ามและกลไกการเกิดประกายข้าม จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของกั๊บดั๊กฟ้าผ่าชนิดกั๊บดั๊กฟ้าผ่าแบบมีแก็บ และกั๊บดั๊กฟ้าผ่าแบบมีแก็บทำงานร่ว้บกับ

ซิงค์ออกไซด์ เท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่า (Residual Voltage) กับกระแสของกับดักฟ้าผ่าชนิดกับดักฟ้าผ่าแบบมีแก๊ส และกับดักฟ้าผ่าแบบมีแก๊สทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์ หลังจากที่เกิดการประกายข้ามช่องประกายแล้วนั้น กับดักฟ้าผ่าทั้งสองชนิดจะให้ผลตอบสนองแรงดัน – กระแสในลักษณะเดียวกันกับ กับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊ส เนื่องจากกับดักฟ้าผ่าทั้ง 3 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานที่มีค่าไม่เป็นเชิงเส้นเหมือนกัน นั่นคือที่ระดับแรงดันต่ำค่าความต้านทานจะมีค่าสูง กระแสไหลผ่านได้น้อย เมื่อแรงดันสูงขึ้นค่าความต้านทานจะมีค่าลดลง กระแสไหลผ่านได้เพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานจะยิ่งมีค่าลดลงต่ำลงมากเมื่อระดับแรงดันเกินมีค่าสูงเพิ่มขึ้น [2-3]



รูปที่ 2.10 การนำกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊ส

จากรูปที่ 2.10 สามารถอธิบายลักษณะสมบัติการนำกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊ส สามารถแสดงได้ด้วยเส้นโค้งแรงดัน – กระแส (Volt – Current Curve) ของกับดักฟ้าผ่า ซึ่งจะเห็นว่าการทำงานของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊สสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ระบบไฟฟ้ามีระดับแรงดันปกติ ซึ่งจะต่ำกว่าจุดเริ่มทำงานของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊ส ค่าความต้านทานของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊สจะมีค่าสูงมาก ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊ส มีค่าน้อยมากในหน่วยไมโครแอมแปร์ ถึงมิลลิแอมแปร์

ช่วงที่ 2 จะมีระดับแรงดันเกินเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นแรงดันเกินในระดับแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) และแรงดันเกินสวิตชิง ค่าความต้านทานของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊สจะมีค่าลดลง ทำให้มีกระแสไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแก๊สเพิ่มขึ้นในหน่วยแอมแปร์

ช่วงที่ 3 แรงดันเกินที่เกิดพร้อมกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีค่าสูงมาก ซึ่งเป็นแรงดันเกินในระดับฟ้าผ่า ค่าความต้านทานของดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปจะมีค่าต่ำลงมาก ทำให้มีกระแสเล็กรไหลผ่านดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกปได้เพิ่มมากขึ้นในหน่วยกิโลแอมแปร์

2.4 การทดสอบอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันทรานเซียนต์แบบไม่เป็นรายคาบ (Non-periodic Transient Voltage) ซึ่งค่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากศูนย์ไปถึงค่ายอดแล้วค่อย ๆ ลดลงไปถึงศูนย์อย่างช้า ๆ ในทางปฏิบัติอาจแบ่งแรงดันอิมพัลส์ตามลักษณะรูปคลื่นหรือสาเหตุที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) มีสาเหตุมาจากแหล่งกำเนิดอื่นภายนอกระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติที่ควบคุมไม่ได้
2. แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (Switching Impulse) มีต้นเหตุมาจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อภายในระบบเอง ซึ่งรวมทั้งการทำงานในสภาวะการตัดต่อวงจรตามปกติและในขณะที่เกิดผิดพร่อง (Fault) ขึ้นในระบบ

แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ทดสอบระดับการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นการทดสอบหาความคงทนต่อแรงดันเกินอิมพัลส์ของการฉนวนก่อนนำอุปกรณ์ไปติดตั้งใช้งานจริง หรือใช้เพื่อการศึกษาวิจัยเป็นหลัก แรงดันที่สร้างขึ้นในห้องทดลองเป็นแรงดันที่เลียนแบบรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ ซึ่งค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของฉนวนไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันค่ายอดสูงสุดเท่านั้น หากแต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะการแปรไปตามเวลาของขนาดแรงดันอีกด้วย ฉะนั้นเพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบจึงได้มีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน โดยยึดถือเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติเป็นเกณฑ์

2.4.1 ข้อกำหนดของรูปคลื่นอิมพัลส์

ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ อาจจะกำหนดด้วยคุณสมบัติดังต่อไปนี้

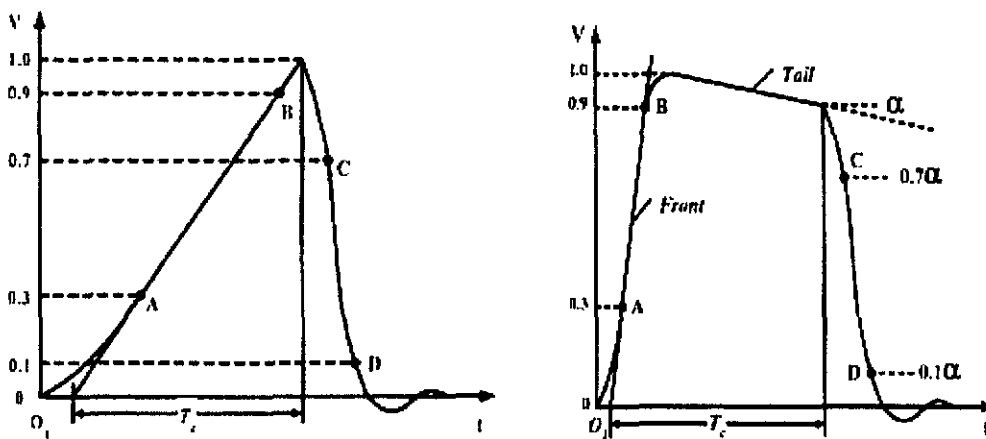
1. ขนาดแรงดัน (V_p) โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่แรงดันมีลูกกระลอกซ้อนซึ่งอาจเกิดจากการออสซิลเลชันใกล้เคียง ๆ ยอดรูปคลื่นให้ถือเป็นค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอกซ้อนนั้น
2. ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
3. พารามิเตอร์ทางเวลา ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะของรูปคลื่นแรงดันทดสอบที่แตกต่างกันแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ

เวลาช่วงหางคลื่น T_2 ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือน O_1 กับจุดที่แรงดันลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดทางตอนหางคลื่น ดังรูปที่ 2.11

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

- เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu s \pm 30\%$
- เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 50 \mu s \pm 20\%$
- ค่ายอดแรงดัน $V_p \pm 3\%$

2. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด (Chopped Wave Lightning Impulse Voltage) คือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่รูปคลื่นเกิดการดีสชาร์จแบบทำลายทำให้แรงดันตกลงสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว การตัดของรูปคลื่นแรงดันอาจเกิดที่หน้าคลื่นหรือส่วนหางคลื่นก็ได้ ดังรูปที่ 2.12 โดยแรงดันขณะทีคลื่นตัด (Voltage at The Instant of Chopped) คือ แรงดันในขณะที่เกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในรูปคลื่นนั้น เวลาช่วงคลื่นตัด T_c (Time to Chopped) คือช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือนกับช่วงเวลาขณะที่เกิดคลื่นตัด



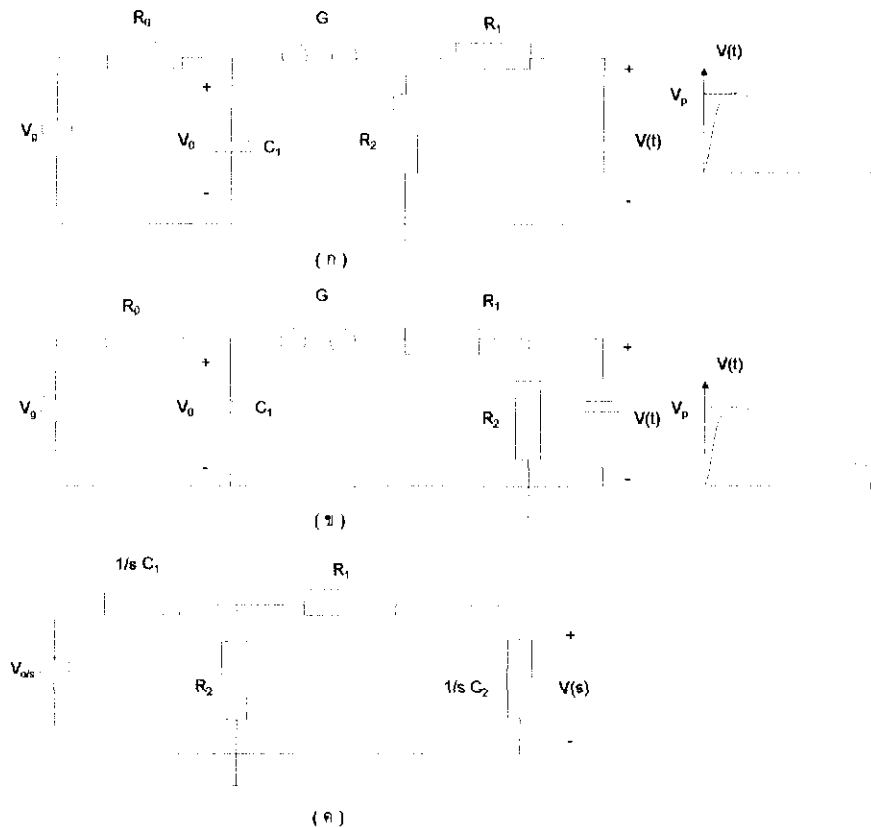
รูปที่ 2.12 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด [5]

2.5 หลักการสร้างแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์อาจสร้างขึ้นโดยอาศัยวงจรทรานเซียนต์ (Transient) RC หรือ RLC โดยทั่วไปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นมาใช้งานกัน ส่วนใหญ่จะได้จากวงจรทรานเซียนต์ RC โดยอาศัยหลักการอัดประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ ($V = Q/C$) แล้วปล่อยให้คายประจุหรือดีสชาร์จผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้ได้รูปคลื่นตามต้องการ

2.5.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามี 2 วงจร ดังรูปที่ 2.13 (ก) และ (ข) ข้อแตกต่างระหว่างวงจรทั้งสอง คือ ลักษณะการต่อตัวความต้านทาน R_1 และ R_2 ซึ่งทำให้การคำนวณค่าคงตัวเวลา (Time Constant) แตกต่างกัน วงจรทั้งสองชนิดเป็นวงจรแบบขั้นเดียว (Single-stage Impulse Generator) ซึ่งใช้เป็นวงจรพื้นฐานของวงจรแบบหลายขั้น (Multistage) สำหรับใช้สร้างแรงดันสูงอิมพัลส์ต่อไป ในทางปฏิบัติเราอาจเขียนวงจรสมมูลของวงจรในรูปที่ 2.13 (ก) และ (ข) ได้เป็นดังรูป 2.13 (ค)



รูปที่ 2.13 วงจรพื้นฐานของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ [6]

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในรูปที่ 2.13 สามารถอธิบายได้ ดังนี้

- V_K คือ แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสตรง เพื่อใช้อัดประจุ
- R_0 คือ ความต้านทานหน่วงการอัดประจุ
- V_0 คือ ขนาดแรงดันอัดประจุกระแสตรง
- C_1 คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- C_2 คือ ตัวเก็บประจุไหลดวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์
- R_1 คือ ความต้านทานหน่วงเวลาหน้าคลื่น
- R_2 คือ ความต้านทานปล่อยประจุตอนดีสชาร์จหน่วงเวลาหลังคลื่น
- $V(t)$ คือ แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น
- G คือ สปาร์กแกปทรงกลมทำหน้าที่เป็นสวิตช์แรงสูง

หลักการทํางานของวงจร คือ คาปาซิเตอร์ C_1 ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุที่ได้รับ การอัดประจุอย่างช้า ๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง V_0 จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ ขึ้นที่สปาร์กแก๊ป (Spark Gap : G) โดยสปาร์กแก๊ปจะทำหน้าที่คล้ายสวิตช์แรงสูง เพื่อควบคุม ระดับแรงดันอัดประจุ V_0 การเกิดสปาร์กจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ด้านออกจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบตัวความต้านทาน (R_1 และ R_2) และคาปาซิเตอร์ C_2 ของ วงจร โดยความต้านทาน R_1 จะช่วยหน่วงเวลาและปรับช่วงเวลาด้านคลื่น T_1 ส่วนความต้านทาน R_2 จะควบคุมเวลาการคายประจุจาก C_2 คือ เป็นตัวกำหนดช่วงเวลาหางคลื่น T_2 นั้นเอง ในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุ C_2 หมายถึง ตัวเก็บโหลดของวงจร ซึ่งแทนในกรณี Full Load เพื่อ หลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นแรงดัน (T_1/T_2) จากผลของวงจรทดสอบรวมทั้งวงจรการ วัดแรงดันอิมพัลส์ที่ต่อขนานเข้ากับวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการ วิเคราะห์วงจรเพื่อออกแบบพารามิเตอร์อาจพิจารณาได้จากการใช้ Laplace's Transformation จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.13 (ก) พิจารณาที่เวลา $t \leq 0$ คาปาซิเตอร์ C_1 มีค่าแรงดันเท่ากับ V_0 และที่เวลา $t > 0$ จะเกิดการดีสชาร์จผ่านแก๊ปทรงกลมเกิดประกายข้ามคล้ายกับปิดสวิตช์ พลังงานสูงสุดที่เกิดจากการถ่ายเทประจุจาก C_1 จึงมีค่าเท่ากับ W นั่นคือ

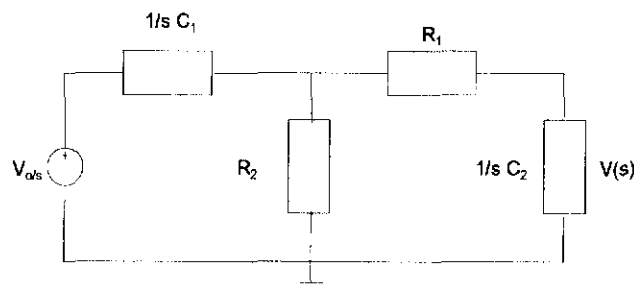
$$W = \frac{1}{2} C_1 V_{(max)}^2 \quad (2.1)$$

- เมื่อ W คือ พลังงานอัดประจุ (J)
 C_1 คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (F)
 V_0 คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง (V)

2.5.2 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์

การแปรของแรงดันในเทอมของเวลา อาศัยการวิเคราะห์จากวงจรพื้นฐานสร้าง แรงดันอิมพัลส์ เช่น วงจรพื้นฐาน (ก) ในรูปที่ 2.13 เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 ด้วย แรงดันอัดประจุ V_0 จนกระทั่งเกิดสปาร์กขึ้นที่ช่องว่างแก๊ปทรงกลม G ทำให้มีกระแสไหลใน ส่วนต่าง ๆ ของวงจร

การวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม อาจพิจารณาได้จากการใช้ เทคนิคการแปลงลาปลาซ (Laplace's Transformation) ดังตัวอย่างเช่น จากวงจรรูปที่ 2.13 (ก) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลการแปลงลาปลาซได้ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลการแปลงลาปลาซของวงจรในรูปที่ 2.13 (ก) [6]

จากรูปที่ 2.14 จะได้ว่า

$$v(s) = \frac{V_o}{k} \frac{1}{s^2 + as + b} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$a = \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1}$$

$$b = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$k = R_1 C_2$$

จากสมการที่ 2.2 เมื่อทำการแปลงกลับลาปลาซให้อยู่ในรูปของโดเมนเวลา (Time Domain) เราจะได้ความสัมพันธ์ใหม่เป็นดังนี้

$$v(t) = \frac{V_o}{k} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} [e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}] \quad (2.3)$$

เมื่อ α_1 และ α_2 คือรากของสมการ $s^2 + as + b = 0$ หรือก็คือ

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.3 จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเทอมของเอ็กโปเนนเชียลฟังก์ชันลดสองเทอมรวมกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ในการลดเป็น $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ตามลำดับ เราเรียกค่าดังกล่าวว่า "ค่าคงตัวเวลาของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์" $v(t)$ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปคลื่นนั้นคือ T_1/T_2 หรือ T_{cr}/T_2 ความสัมพันธ์ต่าง ๆ เหล่านี้สามารถหาได้โดย

$$T_1 = K_2 \cdot \frac{1}{\alpha_2} \quad (2.5)$$

$$T_2 = K_1 \cdot \frac{1}{\alpha_1} \quad (2.6)$$

จากคุณสมบัติของค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ตามที่กล่าวมา ดังนั้นลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ จึงถูกกำหนดในรูปของฟังก์ชันค่าคงตัวเวลาของรูปคลื่น แต่เนื่องจากโดยทั่วไปค่า $1/\alpha_1 \gg 1/\alpha_2$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของนิยามการคำนวณค่า $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ เมื่อพิจารณาเทียบกับแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานค่าคงตัวเวลาที่เหมาะสมสำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้สามารถหาได้โดยนิยามและอาศัยเทคนิคนอร์มัลไลซ์ (Normalized) เข้าช่วย [6]

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ K_1, K_2 และ $1/\alpha_1, 1/\alpha_2$ ที่เหมาะสมสำหรับรูปคลื่นต่างๆตามมาตรฐาน

T_1/T_2	K_1	K_2	$1/\alpha_1$ (μs)	$1/\alpha_2$ (μs)
1.2 / 5	1.44	1.49	3.48	0.805
1.2 / 50	0.73	2.96	68.5	0.405
1.2 / 200	0.70	3.15	248	0.381
250 / 2500	0.87	2.41	2877	104

2.5.3 การคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจร

ในการหาค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 ที่เหมาะสม โดยทั่วไปจะต้องทราบค่า C_1 และ C_2 ก่อน สำหรับเครื่องกำเนิดขนาดใหญ่จะต้องมีค่าตัวเก็บประจุดีสซายาร์จที่เหมาะสม เพื่อจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องสูง โดยจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ $C_1/(C_1 + C_2)$ ทั้งนี้สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานที่ยังไม่ทราบค่าได้ ซึ่งจะมีค่าเป็นดังสมการที่ (2.7) และ (2.8) สำหรับวงจรในรูปที่ 2.13 (ก) นั่นคือ

$$R_1 = \frac{1}{2C_1} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \left(\frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1} \right)} \right] \quad (2.7)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \left(\frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1} \right)} \right] \quad (2.8)$$

และมีค่าดังสมการที่ (2.9) และ (2.10) สำหรับวงจรในรูปที่ 2.13 (ข) นั่นคือ

$$R_1 = \frac{1}{2C_1} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \left(\frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1} \right)} \right] \quad (2.9)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \left(\frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1} \right)} \right] \quad (2.10)$$

ในกรณีที่ทราบค่า C_1 และ C_2 และประมาณว่า $R_2 C_1 \gg R_1 C_2$ บางครั้งเราอาจใช้วิธีการประมาณค่าเวลาคงตัว $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ของรูปคลื่นและประสิทธิภาพ (η) ของวงจรสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้จากสมการต่อไปนี้

สำหรับวงจรในรูปที่ 2.13 (ก)

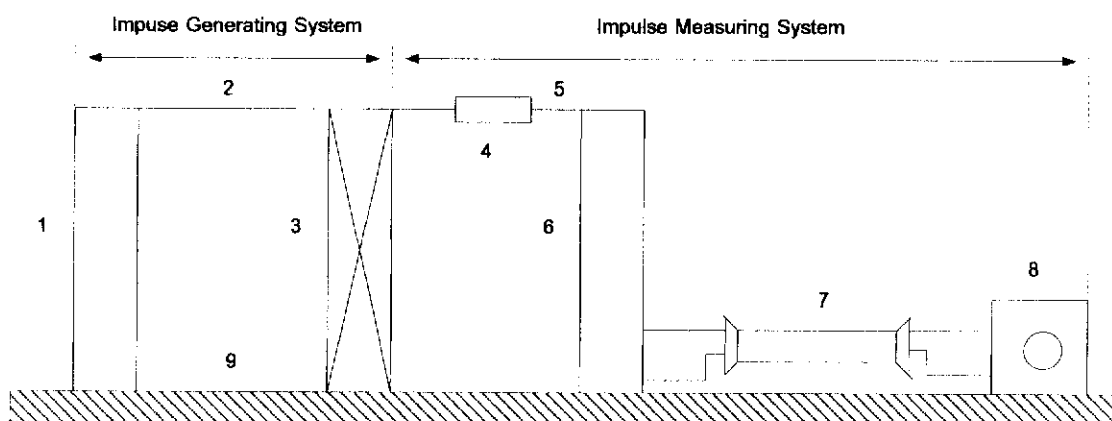
$$\frac{1}{\alpha_1} \approx R_2 (C_1 + C_2) \quad , \quad \frac{1}{\alpha_2} \approx R_1 \frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_2)} \quad \text{และ} \quad \eta \approx \frac{C_1}{(C_1 + C_2)}$$

สำหรับวงจรในรูปที่ 2.13 (ข)

$$\frac{1}{\alpha_1} \approx (R_1 + R_2)(C_1 + C_2) \quad , \quad \frac{1}{\alpha_2} \approx \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} \frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_2)} \quad \text{และ} \quad \eta \approx \frac{C_1}{(C_1 + C_2)} \frac{R_2}{(R_1 + R_2)}$$

2.6 การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันอิมพัลส์สวิตซึ่งจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเวลา ดังนั้นในการวัดแรงดันดังกล่าวด้วยอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์สิ่งที่สำคัญ คือ เครื่องมือวัดจะต้องตอบสนองต่อการวัดที่ดี นั่นคือองค์ประกอบอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์และระบบวัดแรงดันอิมพัลส์จะต้องออกแบบมาเป็นพิเศษ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของการวัดในย่านทรานเซียนต์ดี มีผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ ที่สำคัญระบบการวัดจะต้องไม่เป็นโหลดหรือส่งผลกระทบต่อแหล่งกำเนิด ซึ่งต้องมีการป้องกันผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวเพื่อให้ได้พิกัด การเปลี่ยนแปลงแรงดันสูงทั้งหมดไปตกคร่อมเฉพาะวัสดุทดสอบเท่านั้น วงจรพื้นฐานที่ใช้ในระบบการวัดแรงดันอิมพัลส์แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรพื้นฐานการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ [6]

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

องค์ประกอบของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์โดยทั่วไปจะประกอบด้วย โวลเตจดีไวเดอร์ , ออสซิลโลสโคป , สายนำแรงสูง , ความต้านทานหน่วง , ความต้านทานด้านแรงดันสูง , ความต้านทานด้านแรงดันต่ำ , ความต้านทานแมชชิงและระบบกราวด์ของวงจร โดยองค์ประกอบที่สำคัญมีดังนี้

2.6.1 โวลเตจดีไวเดอร์ (Voltage Divider)

โวลเตจดีไวเดอร์ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงให้ต่ำลงในย่านที่เครื่องมือวัดทั่วไปสามารถวัดได้ ซึ่งใช้หลักการแบ่งแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงและอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ และนำแรงดันที่ตกคร่อมภาคแรงต่ำไปยังเครื่องมือวัด โวลเตจดีไวเดอร์ส่วนใหญ่จะใช้ช่วงเวลาขาขึ้นของผลตอบสนองรูปคลื่นในการพิจารณาความไวของผลตอบสนองทางเวลา โดยเมื่อพิจารณาอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานพบว่าสเตรย์คาปาซิแตนซ์ (Stray Capacitance) จะมีผลต่อเวลาตอบสนองอย่างมาก ในช่วงที่มีการอัดประจุและดีสชาร์จประจุผ่านโวลเตจดีไวเดอร์ อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานสามารถลดผลของสเตรย์คาปาซิแตนซ์ได้โดยการออกแบบให้มีค่าความต้านทานต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ต้องไม่ส่งผลกระทบต่อความเป็นไหลดของแหล่งกำเนิด หรืออาจจะลดผลของสเตรย์คาปาซิแตนซ์ด้วยการใส่ซิลด์อิเล็กโตรดที่ส่วนปลายของโวลเตจดีไวเดอร์

2.6.2 แท่งตัวนำแรงสูง (High – Voltage Lead)

แท่งตัวนำแรงสูงจะต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดีไวเดอร์ ความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวนำอาจจะมีผลต่อการวัดแรงดันอิมพัลส์ โดยควรมีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางที่แน่นอนและที่สำคัญควรจะปรับเทียบค่าทุกครั้งก่อนที่จะทำการทดสอบ ในทางทฤษฎีนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวนำควรมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนา (Corona) แท่งตัวนำขนาดเล็กนั้นจะส่งผลทำให้เกิดโคโรนาและเกิดสัญญาณรบกวนต่อระบบวัด โดยทั่วบริเวณใกล้กับโวลเตจดีไวเดอร์ไม่ควรเกิดดีสชาร์จหรือสตีมเมอร์ และควรต่อแท่งตัวนำกับวัสดุทดสอบไม่ควรต่อกับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงอิมพัลส์โดยตรง อย่างไรก็ตามเมื่อวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มหรือแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่ทางคลื่น ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากลักษณะการต่อเชื่อมแท่งตัวนำแรงสูงระหว่างโวลเตจดีไวเดอร์กับวัสดุทดสอบนั้นจะไม่นำมาคิด ถ้าเทอม \sqrt{LC} มีค่าน้อยกว่า 0.05 ns โดยที่ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำแฝงในแท่งตัวนำแรงสูง (ประมาณ $1 \mu\text{H}/\text{m}$) และ C คือค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างแท่งตัวนำแรงสูงลงดิน โดยถือวาระยะห่างระหว่างโวลเตจดีไวเดอร์กับวัสดุทดสอบ หรือก็คือความยาวของแท่งตัวนำแรงสูง มีขนาดเท่ากับค่าความสูงของวัสดุทดสอบนั่นเอง

2.6.3 ความต้านทานหน่วง (Damping Resistance)

ความต้านทานหน่วงทำหน้าที่หน่วงการแกว่ง (Oscillation) ที่สภาวะทรานเซียนต์ เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำในสายนำแรงสูงหรือแท่งตัวนำแรงสูงกับค่าความจุไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์เอง ความต้านทานหน่วงที่ใช้จะเป็นแบบที่มีค่าความเหนี่ยวนำแฝงและค่า

ความจุไฟฟ้าแฝงต่ำ ความต้านทานหน่วงนี้อาจจะต่อไว้ที่ต้นสายนำแรงสูง ดังรูปที่ 2.15 หรืออาจจะต่อไว้ที่ปลายสายนำแรงสูงติดกับโวลเตจดีไวเดอร์ก็ได้ ถ้าต่อไว้ที่ต้นสายนำแรงสูง เรียกระบบวัดนี้ว่า “ระบบสามองค์ประกอบ” (Three-Component System) ถ้าต่อไว้ที่ปลายสายนำแรงสูงติดกับโวลเตจดีไวเดอร์ ความต้านทานหน่วงนี้จะถือเป็นส่วนหนึ่งของโวลเตจดีไวเดอร์ และเรียกระบบนี้ว่า “ระบบสององค์ประกอบ” (Two-Component System) ถ้าสายแรงสูงมีความยาวมาก การต่อความต้านทานหน่วงแบบสามองค์ประกอบ โดยใช้ค่าความต้านทานหน่วงเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแรงสูงจะช่วยลดการแกว่งที่เกิดขึ้นในสภาวะทรานเซียนต์อันเนื่องมาจากอิมพีแดนซ์ที่ไม่แมช (Matching) กันของแท่งตัวนำแรงสูงกับวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และโวลเตจดีไวเดอร์

2.6.4 ออสซิลโลสโคป

เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น ดังนั้นออสซิลโลสโคปที่ใช้วัดต้องมีความไว (Sensitivity) ในการวัดสูง ซึ่งแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้อาจมีทั้งรูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัด เมื่อวิเคราะห์ออกมาเป็นสเปกตรัม (Spectrum) จะพบว่ามีความถี่ต่าง ๆ เป็นช่วงกว้างมาก ซึ่งออสซิลโลสโคปจะต้องมีแบนวิดท์ที่กว้างมากพอและต้องมีการป้องกันหรือไม่วิตต่อคลื่นรบกวนที่เกิดจากเหตุอื่นภายนอก และควรจะมีอัตราแรงดันป้อนเข้าสูง เพราะจะเป็นผลดีในการขจัดคลื่นรบกวนให้น้อยลง

2.6.5 เคเบิลวัด

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถต่อออสซิลโลสโคปเข้าโดยตรงกับภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ได้ ทั้งนี้เพราะเพื่อความปลอดภัยของผู้วัดและเพื่อลดการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องวางออสซิลโลสโคปให้ห่างจากโวลเตจดีไวเดอร์พอสมควร ดังนั้นการส่งสัญญาณของอุปกรณ์ทั้งสองจึงต้องใช้สายนำสัญญาณแรงต่ำเชื่อมกัน ซึ่งปกตินิยมใช้สายนำสัญญาณแบบแกนร่วม (Coaxial Cable) สายเคเบิลที่ใช้ต้องมีshieldอย่างน้อยสองชั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในสายเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนปนไปกับสัญญาณที่ต้องการวัด ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์จะต้องพิจารณาเป็นแบบสัญญาณคลื่นจร (Travelling Wave) เมื่อคลื่นจรเข้ามาที่ต้นสายเคเบิลจะมองเห็นเคเบิลเป็นความต้านทานบริสุทธิ์เท่ากับ Z_c (Surge Impedance) ไม่ขึ้นกับโหลดที่ปลายสายเคเบิลว่ามีลักษณะเปิดวงจรหรือลัดวงจรอยู่ในขณะนั้น นั่นคือโหลดที่ปลายทางจะไม่มีผลต่อสัญญาณรบกวนต้นทางจนกว่าจะถึงเวลา 2 เท่าของคลื่นเดินทาง τ (Transit Time) และค่าเวลา τ ของสายเคเบิลวัดจะพิจารณาเป็นแบบเดียวกันกับกรณีของสายส่ง ถ้าเวลา τ นั้นมีค่าใกล้เคียงกับเวลาขาขึ้นของคลื่น (Rise Time)

2.6.6 ความต้านทานแมชชิง (Matching Resistance)

ในการวัดแรงดันทรานเซียนต์ (Transient) ที่ส่งผ่านจากโวลเตจดีไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัดภาคแรงต่ำอาจทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นได้ ในที่นี้พิจารณาจากการต่อแมชชิงอิมพีแดนซ์เพื่อส่งผ่านแรงดันอิมพัลส์จากโวลเตจดีไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัด โดยพิจารณาเคเบิลวัดเป็นสายส่งแบบไม่มีพลังงานสูญเสียในสาย (Lossless) ดังนั้นค่าเสรีจอิมพีแดนซ์ $Z_c = \sqrt{L_c/C_c}$ จึงไม่ขึ้นอยู่กับความถี่และเวลาคลื่นเดินทาง $\tau_c = \sqrt{L_c C_c}$ สำหรับโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานต่อแมชชิงสามารถทำได้ง่าย ๆ โดยการต่อความต้านทาน $R_m = Z_c$ ค่าความต้านทานนี้จะต่อขนานเข้ากับ R_2 ดังนั้นจึงต้องพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ด้วย

ในกรณีโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ เคเบิลวัดไม่สามารถต่อแมชชิงที่ปลายได้เนื่องจากความต้านทานที่มีค่าต่ำ เมื่อต่อขนานเข้ากับ C_2 จะไปรวมกับภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์และแรงดันขาเข้าจะมีขนาดลดลงตามเวลา เพื่อหลีกเลี่ยงการแกว่งของคลื่นเดินทางเคเบิลวัด จึงควรต่อแมชชิงที่ต้นทาง แรงดันตกคร่อม C_2 จะถูกแบ่งครึ่งโดย $R_m = Z_c$ ที่ต้นทางของเคเบิลวัด เมื่อแรงดันที่แบ่งครึ่งนี้เดินทางไปถึงปลายเคเบิลวัด ซึ่งมีลักษณะเป็นวงจรมีเปิดจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเท่าตัว ดังนั้นแรงดันที่ปรากฏต่อเครื่องมือวัดจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อม C_2 สะท้อนกลับมาถึงต้นทางที่มี $R_m = Z_c$ ต่ออนุกรมอยู่ และแรงดัน C_2 เสมือนกับลัดวงจรจึงไม่ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับอีก

2.6.7 สายดิน

สายดินทำหน้าที่เชื่อมโยงจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบทดสอบให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำเพื่อลดแรงดันตกในสายดินให้น้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบางขนาดใหญ่ปูบนพื้นห้องทดสอบ เช่น ทองแดงแผ่นบาง เป็นต้น

2.7 การตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)

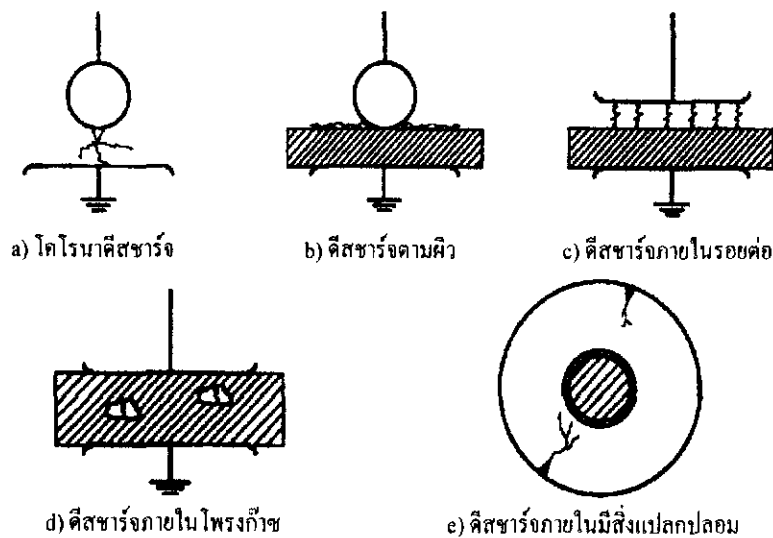
การตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน จัดเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นการตรวจสอบว่ามีดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นหรือไม่ ถ้ามีเกิดขึ้นที่แรงดันเท่าใด และเรียกว่าแรงดันดีสชาร์จเริ่มเกิด (U_i)

ดีสชาร์จบางส่วน คือ ดีสชาร์จเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดดีสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด จึงเรียกว่า ดีสชาร์จบางส่วน เพราะฉนวนของอิเล็กโตรดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้านซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ ยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่

ดีสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้ หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น

ดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และสนามไฟฟ้ากระแสตรง ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ดีสชาร์จจะเกิดขึ้นซ้ำทุก ๆ ไซเคิลของแรงดัน โดยปกติจะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่ายอด

ดีสชาร์จบางส่วน อาจแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ โคโรนาดีสชาร์จ ดีสชาร์จตามผิว และ ดีสชาร์จภายใน



รูปที่ 2.16 รูปแบบของดีสชาร์จบางส่วน [1]

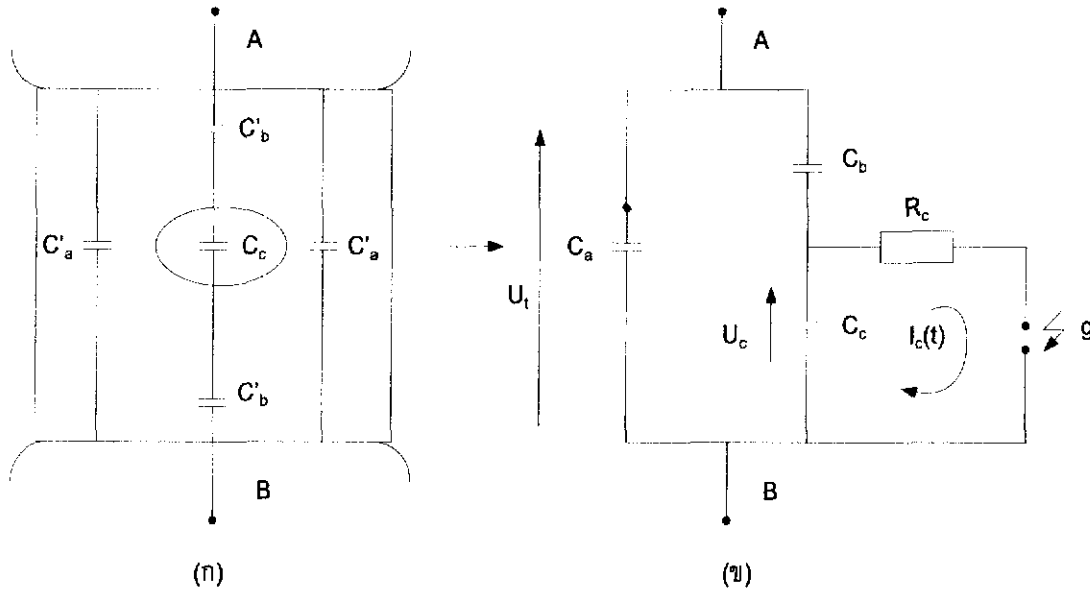
2.7.1 ผลกระทบของดีสชาร์จบางส่วน

ดีสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุด ๆ และเกิดผิวดพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง

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

2.7.2 วงจรสมมูลของดีสชาร์จบางส่วน

โดยเหตุที่ดีสชาร์จบางส่วนภายในที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน หรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้นเพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลของฉนวนที่มีดีสชาร์จบางส่วนขึ้น ไม่ว่าจะเป็อดีสชาร์จบางส่วนชนิดใดก็สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ [1] เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดีสชาร์จบางส่วนภายใน ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน

ในรูปที่ 2.17 (ก) แสดงวัสดุฉนวน มีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ C_c เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_a ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้จะรวมกันได้เป็น C_b ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ที่อยู่โดยรอบของ C_c จะให้เป็นค่า C_a' และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_a ดังรูปที่ 2.17 (ข) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่า ๆ กับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มาก ๆ นั่นคือ

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

ถ้าป้อนแรงดัน U_t ที่ขั้ว A-B ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาว์นของโพรงก๊าซที่แทนด้วย C_c ก็เกิดเบรกดาว์นในโพรงก๊าซ ซึ่งเขียนแทนด้วย แกป g มีความต้านทาน R_c ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสดีสชาร์จ $i_c(t)$

ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ช่วงกว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก δU_c ที่โพรงก๊าซเกิดการปล่อยประจุออกมาเป็น

$$\Delta q_c = \delta U_c C_c \quad (2.11)$$

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

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta U_c}{C_b + C_a} \quad (2.12)$$

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

เมื่อแทนค่า

$$\delta U_c = \delta q_c$$

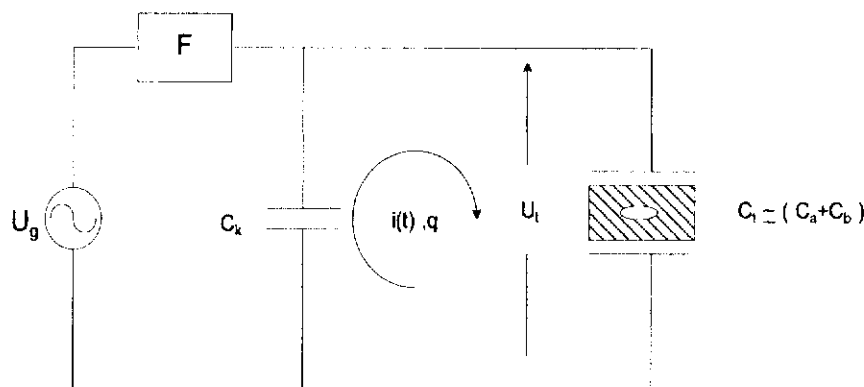
จะได้

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta q_c}{C_c (C_b + C_a)} \quad (2.13)$$

ค่าของ δU_t มีค่าเพียงเป็นมิลลิโวลต์ถึงโวลต์ ในขณะที่ δU_c มีค่าเป็นกิโลโวลต์ แต่โดยที่ไม่ทราบค่า C_c และ C_b จึงไม่อาจหาความสัมพันธ์ของ δU_t กับ δU_c และ δq_c ได้อย่างไรก็ตาม การดีสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทประจุหรือกระแสในวงจรภายนอกที่สามารถตรวจวัดได้

2.7.3 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดีสชาร์จบางส่วนภายในเกิดขึ้นในฉนวน หรือภายในอุปกรณ์ที่ห่อหุ้มมิดชิด ฉะนั้น ประจุหรือกระแสที่เกิดจากประจุดีสชาร์จในโพรงก๊าซนั้นไม่สามารถวัดได้ แต่การดีสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c นั้น มีผลให้เกิดการถ่ายเทประจุ เป็นผลให้เกิดแรงดันตก δU_t ที่ขั้วป้อนแรงดันภายนอก A-B และการเคลื่อนที่ประจุ หรือเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องมาจากแรงดันตก เป็นค่ากระแสชดเชยที่วัดได้ (measurable current) $i(t)$ ดังรูปที่ 2.18 แต่มิใช่กระแสหรือประจุที่เกิดขึ้นจริงภายในโพรงก๊าซ



รูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่ของประจุบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน [1]

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

ค่ากระแสไหลวน $i(t)$ ที่วัดได้นี้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนค่าเก็บประจุ C_k/C_t เพราะประจุจะเคลื่อนที่จากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ที่ชดเชยแรงดันตก δU ในกรณีอุดมคติ $C_k \gg C_t$ และ $C_t \approx C_a + C_b$ ประจุ q จะมีค่ามากที่สุด

ค่า $C_k \gg C_t$ ค่า δU จะได้รับชดเชยสมบูรณ์และประจุที่ถ่ายเท ก็คือ กระแส $i(t)$

$$\text{ประจุถ่ายเทหาได้จากสมการ} \quad q = \int i(t) dt = \left\{ C_a + \frac{C_c \cdot C_b}{C_c + C_b} \right\} \delta U, \quad (2.14)$$

$$\text{เพราะว่า } C_b < C_c \text{ จึงได้} \quad q \approx (C_a + C_b) \delta U, \quad (2.15)$$

$$\text{เมื่อแทนค่าจาก (2.13) จะได้} \quad q = \frac{C_b}{C_c} \delta q_c \quad (2.16)$$

ประจุ q นี้ เรียกว่า ประจุที่ปรากฏของพัลส์การเคลื่อนที่ เพราะประจุ q นี้ไม่เท่ากับประจุที่เกิดจริงในโพรงก๊าซ C_c แต่สัมพันธ์กับ δq_c ด้วยอัตราส่วนของ C_b/C_c และเป็นพื้นฐานของหลักการวัดการเคลื่อนที่บางส่วน ที่มีความเป็นจริงมากกว่า δU ในสมการ (2.13) โดยที่ C_a เป็นค่าเก็บประจุหลักของ C_t ซึ่งไม่มีผลเกี่ยวกับค่าการเคลื่อนที่บางส่วน

ในทางปฏิบัติ เรือ่นไขที่จะทำได้ $C_k \gg C_t$ หมายถึง ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยวมีค่ามาก ๆ นั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าจะกลายเป็นโหลดให้กับตัวจ่ายแรงดัน และไม่ประหยัดอย่างไรก็ตาม ค่าเก็บประจุ C_k ใหญ่กว่า C_t ของวัสดุทดสอบเพียงเล็กน้อย จะเป็นผลทำให้

ความไวในการตรวจจับ หรือตรวจวัดการดีสชาร์จบางส่วนนั้นน้อยลง เนื่องจากกระแสชดเชย $i(t)$ จะมีค่าน้อยลง

เมื่อพิจารณาจากการถ่ายเทของประจุระหว่าง C_i กับ C_k จะได้ความสัมพันธ์

$$Q = C_i \delta U_i \quad \text{เมื่อ } C_i \approx C_a + C_b$$

นั่นคือ
$$q \approx (C_i + C_k) \delta U_i' \quad (2.17)$$

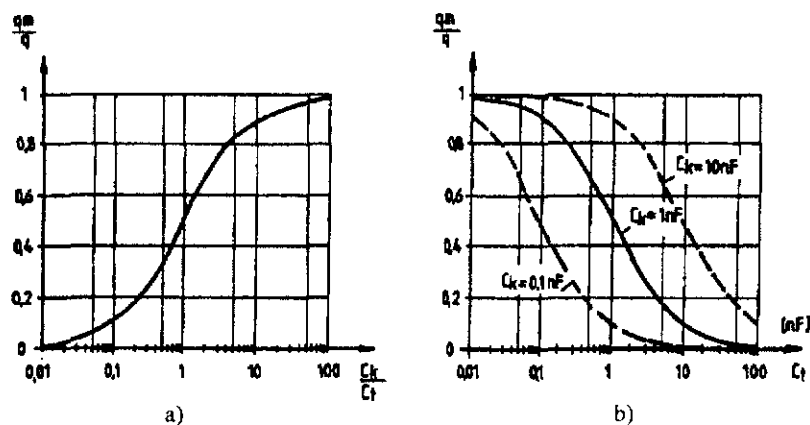
เมื่อ $\delta U_i'$ คือ แรงดันที่ชั่วหลังจากสิ้นสุดการถ่ายเทประจุ ประจุที่ปล่อยจากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k สามารถวัดได้ และเรียกว่าประจุที่วัดได้ q_m (measurable current)

$$q_m = C_k \delta U_i' \quad (2.18)$$

ฉะนั้น อัตราส่วนของประจุที่วัดได้ ต่อประจุปรากฏ คือ

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_i + C_k} \quad (2.19)$$

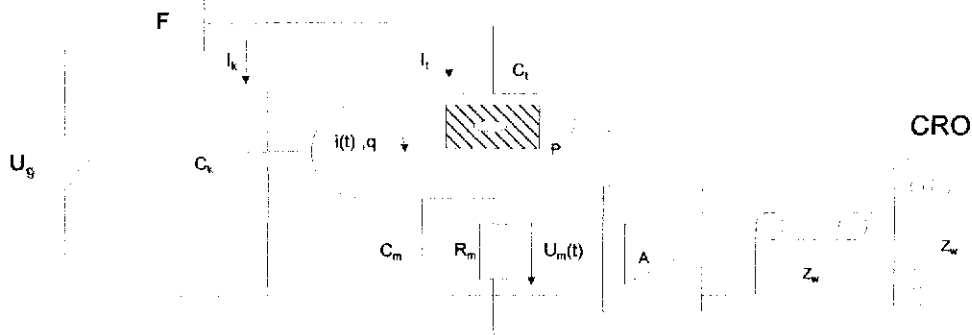
ความสัมพันธ์ของ q_m/q ในเทอมของ C_k/C_i หรือในเทอมของ C_i ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2.19 ซึ่งจะช่วยให้เลือกค่า C_k ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าความไวตามที่ต้องการ ถ้าต้องการความไวสูง จะต้องใช้ C_k ให้โตพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_i แפקเตอร์วงจร q_m/q และความไวการวัดอาจตรวจสอบได้ จึงต้องมีการปรับเทียบวงจรทดสอบ โดยการป้อนประจุที่ทราบค่าแน่นอน และถูกต้องที่วัสดุทดสอบ ผลของ C_k/C_i ต่อความไวการวัด แสดงโดย q_m/q ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ต่อความไวการวัด q_m/q ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_k/C_i

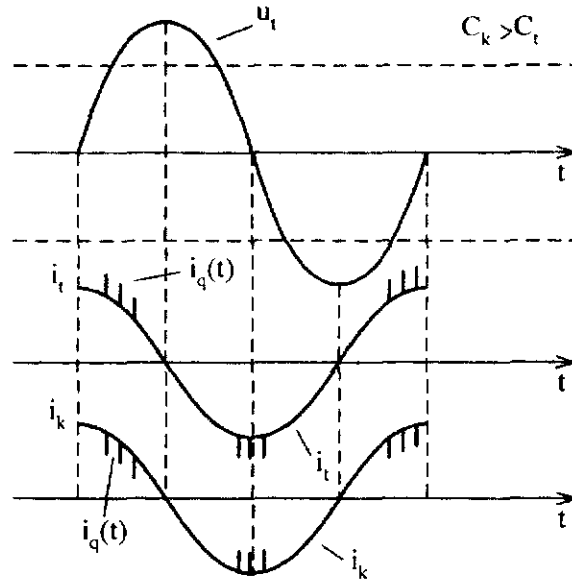
2.7.4 วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดิสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดิสชาร์จบางส่วน จะประกอบด้วยตัวจ่ายแรงดันทดสอบ U_g คือ หม้อแปลงทดสอบป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ผ่านตัวกรองความถี่สูง F ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 วงจรพื้นฐานการวัดดิสชาร์จบางส่วน [1]

- เมื่อ U_g คือ ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสลับป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุทดสอบ P
- F คือ ตัวกรอง ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ที่มีความถี่สูง นั่นคือ ตัวกรองจะทำหน้าที่กันมิให้คลื่นรบกวนความถี่สูงจากตัวจ่ายเข้าไปรบกวนวงจรทดสอบ แต่ยอมให้กระแสทดสอบความถี่ต่ำไหลผ่านไปได้ ในเวลาเดียวกัน F จะทำหน้าที่กันมิให้สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากวัสดุทดสอบไหลหนีออกไปทางตัวจ่ายแรงดันได้ ตัวกรองนี้ อาจประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L หรือประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C เป็นวงจร π ก็ได้
- C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณเท่า ๆ กับค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบหรือใหญ่กว่า ในเชิงปฏิบัติ C_k จะมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 1000 pF เพื่อให้มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำพอที่จะทำให้กระแสดิสชาร์จบางส่วน $i(t)$ ซึ่งมีค่า $< 100 \mu A$ เป็นพัลส์แคบ ๆ ไหลได้ครบวงจรเป็นกระแสที่วัดได้ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เมื่อเกิดดิสชาร์จในโพรงก๊าซของฉนวน จะทำให้แรงดันที่ขั้วทดสอบ ตกไปเท่ากับ δU , และเป็นเหตุให้เกิดการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุ C_k เข้าไปทดแทน นั่นคือ จะมีกระแสไหลวน $i(t)$ ที่สามารถตรวจจับหรือวัดได้ (Measurable Current) ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ซ้อนอยู่บนรูปคลื่นกระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ i_k และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว $i_k (C di/dt)$ กระแสทั้งสองจะมีมุมเฟสหน้าหน้าแรงดันที่ป้อนประมาณ 90 องศา ถ้าไม่มีค่าเก็บประจุตรงขนานกับ C_k กระแสพัลส์ ดิสชาร์จบางส่วน $i(t)$ ที่ซ้อนบนรูปคลื่นกระแสป้อนนี้จะมีขนาดเท่ากันแต่ขั้วตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของดีสชาร์จบางส่วน

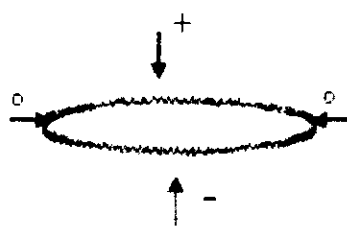
- เมื่อ U_t คือ แรงดันที่ป้อน
 i_t คือ กระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ C_t
 i_k คือ กระแสที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k
 $i_q(t)$ คือ กระแสพัลส์ดีสชาร์จบางส่วน (PD) ที่วัดได้

การวัดที่ถูกต้องค่าความต้านทานวัด (R_m) ดังรูปที่ 2.21 จะต้องแมช (match) กันกับเคเบิลวัดที่มีอิมพีแดนซ์ (Z_w) ถ้าค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบน้อย แรงดันที่ได้จากกระแสดีสชาร์จบางส่วนนี้ จะจำแนกจากกระแสประจุ $i(t)$ ได้ชัดเจน ในแต่ละครึ่งไซเคิลของแรงดันที่ป้อนจะมีจำนวนพัลส์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบและลักษณะตำแหน่งของการเกิดผิดพร่อง ถ้าวัสดุทดสอบมีจุดผิดพร่องหลายแห่ง จำนวนพัลส์การดีสชาร์จบางส่วนจะมีมากขึ้น ซึ่งมีช่วงห่างระหว่างพัลส์เป็น μs หรือเร็วกว่านั้น โดยทั่วไปจะสังเกตเห็นอัตราการเกิดดีสชาร์จ มีค่าสูงมากที่สุดเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน dU_t/dt มีค่าสูงสุด ฉะนั้นช่วงของพัลส์จะไม่ขึ้นอยู่กับช่วงของแรงดันทดสอบ U_t แต่จะขึ้นอยู่กับเครื่องหมายการเปลี่ยนแปลง dU_t/dt ตรงกันข้ามในกรณีดีสชาร์จโคโรนา ซึ่งเป็นการดีสชาร์จบางส่วนเกิดภายนอกจะเกิดที่ยอดของแรงดันทดสอบและเครื่องหมายของพัลส์การดีสชาร์จบางส่วนจะสอดคล้องกับช่วงของแรงดันทดสอบที่ป้อน

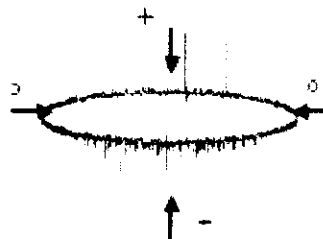
รูปที่ 2.20 เป็นวงจรทดสอบที่ใส่แอมพลิฟายเออร์ที่มีแบนด์วิดท์สูงมาก ที่ด้านทางเคเบิลวัดจะทำให้เคเบิลวัดสัญญาณไม่ต่อทางไฟฟ้ากับความต้านทาน R_m เพราะ R_m มีค่าสูงมาก จะมีผลให้การวัดคลาดเคลื่อน ในการนี้จึงใส่ตัวเก็บประจุ C_m ประมาณ 10 pF ที่ต่อระหว่างปลายล่าง C_t กับดิน และขนานกับ R_m จึงเป็นทางเบี่ยงของสัญญาณประกอบกับที่มีความถี่สูงมาก ๆ ของ $i(t)$ ฉะนั้น $i(t)$ เป็นพัลส์สั้น ๆ รูปร่างและค่ายอดบิดเบือน C_m จะทำการอินทิเกรต และ R_m ที่ใส่ไว้จะมีผลให้เกิดการหน่วงด้วยเวลาคงตัว $R_m C_t C_k / (C_t + C_k)$ [1]

2.7.6 การแสดงผลดีสชาร์จภายใน

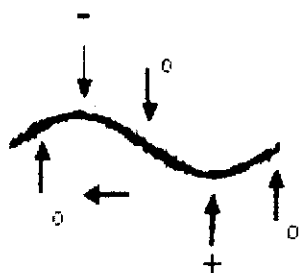
การวัดค่าดีสชาร์จบางส่วน อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น ไมโครโวลต์ (μV) พิโคคูลอมป์ (pC) แต่จะทราบเพียงขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนเท่านั้น วิธีที่นิยมใช้แสดงผลการดีสชาร์จบางส่วนในปัจจุบัน คือ การแสดงผลบนจอออสซิลอสโคป ซึ่งอาจจะแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้อุปกรณ์พัลส์ของการดีสชาร์จบางส่วนปรากฏอยู่บนฐานเวลารูปวงรี ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวก ยอดลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบหรือแสดงให้อุปกรณ์พัลส์การดีสชาร์จบางส่วนปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ การแสดงการดีสชาร์จบางส่วน บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้องและสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน การแสดงผลบนฐานเวลารูปวงรีมีข้อดีคือ แยกได้ว่าการดีสชาร์จบางส่วนเกิดจากสาเหตุอะไร [1]



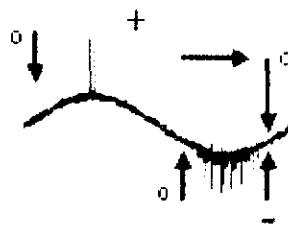
(ก) ฐานเวลารูปอิลลิปส์



(ข) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปอิลลิปส์



(ค) ฐานเวลารูปคลื่นไซน์



(ง) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

รูปที่ 2.23 การแสดงผลการดีสชาร์จบางส่วน [5]

2.8 การออกแบบครีบนวนโพลีเมอร์ของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแถบ

ปัญหาสำคัญยิ่งประการหนึ่งของการใช้ระบบไฟฟ้าแรงสูง ก็คือ การฉนวนซึ่งมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่าย ส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวนที่มีคุณภาพไม่ได้มาตรฐาน หรือการออกแบบไม่มีประสิทธิภาพ การออกแบบการฉนวนไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ

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

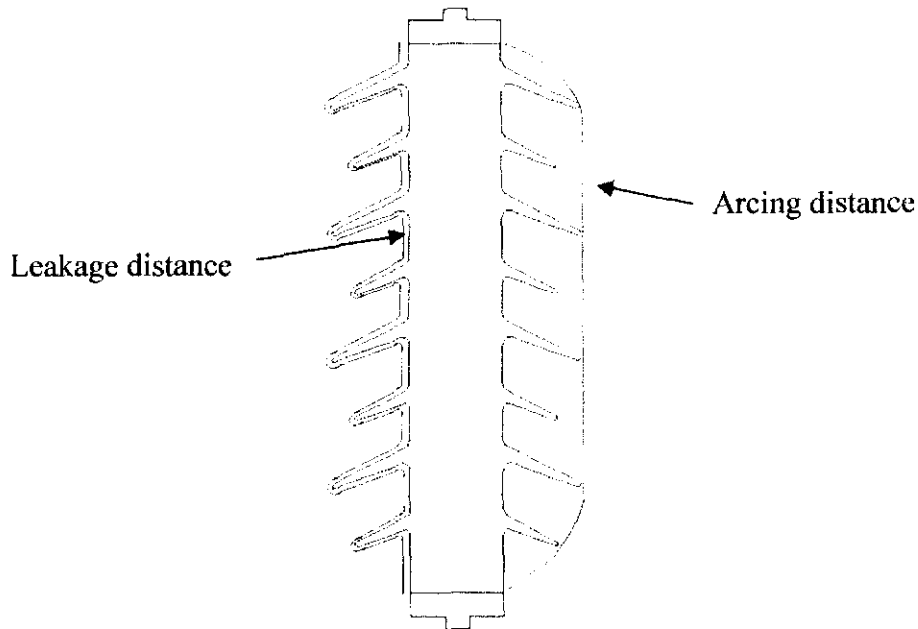
2.8.1 ลักษณะมิติที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่า

กับดักฟ้าผ่าถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญยิ่งต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบ ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ความบกพร่องหรือความล้มเหลวของกับดักฟ้าเผ่าย่อมทำให้เกิดความเสียหาย การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหยุดชะงัก ฉะนั้นกับดักฟ้าผ่าที่ดีจะต้องไม่เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดผิดพลาดในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า กับดักฟ้าผ่าในสถานะที่ใช้งานจะต้องทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ทุกรูปแบบ ต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ความร้อน แรงแกล และปฏิกิริยาเคมี ลักษณะสมบัติที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่าที่กล่าวมาในที่นี้คือ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับมิติและคุณสมบัติของเนื้อฉนวน

ลักษณะสมบัติทางมิติที่เกี่ยวข้อง และมีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าที่ควรทราบความหมายมีดังต่อไปนี้

1. ระยะรั้ว (Leakage distance) คือ ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดได้ตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าระหว่างอิเล็กโทรด โดยส่วนหนึ่งของระยะรั้วจะเป็นส่วนกันมิให้ผิวฉนวนเปียกได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาพฝนตก ซึ่งจะช่วยให้กับดักฟ้าผ่ามีความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวได้สูง ดังรูปที่ 2.24
2. ระยะอาร์ก (Arcing distance) คือ ระยะสั้นที่สุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดผ่านอากาศหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือระยะที่วัดตามแนวที่เกิดอาร์ก ระยะอาร์กแบ่งออกเป็นระยะอาร์กแห้ง (Dry arcing distance) หมายถึง ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบฉนวนกับดักฟ้าผ่าระหว่างอิเล็กโทรดในการทดสอบการวาบไฟตามผิวแห้ง

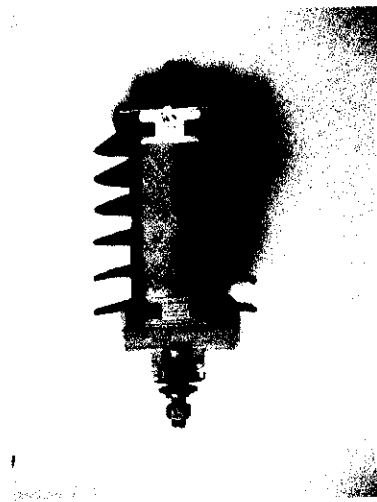
ระยะอาร์กเปียก (Wet arcing distance) หมายถึง ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบฉนวนกับดักฟ้าผ่าระหว่างอิเล็กโทรดในการทดสอบวาวไฟตามผิวเปียก



รูปที่ 2.24 ลักษณะทางมิติที่สำคัญของกับดักฟ้าผ่า

2.8.2 การใช้งานกับดักฟ้าผ่าในสภาวะเปราะเปื้อน

สิ่งเปราะเปื้อนที่จับเกาะอยู่บนผิวของฉนวนกับดักฟ้าผ่า เมื่อเปียกน้ำอันอาจเกิดจากหมอก หรือความชื้นในคอนกรีต หรือฝนที่ตกปรอยๆ สภาพนำไฟฟ้าของผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้กระแสรั่วไหลตามผิวของกับดักฟ้าผ่ามีค่าเพิ่มมากขึ้น และเป็นสาเหตุให้เกิดวาวไฟตามผิวได้ง่าย การเกิดวาวไฟตามผิวเนื่องจากความเปราะเปื้อนขึ้นอยู่กับปริมาณ และประเภทของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำ ปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของการเกิดวาวไฟตามผิว



รูปที่ 2.25 ความเสียหายที่มีสาเหตุจากการเกิดวาวไฟตามผิวของกับดักฟ้าผ่า

การแบ่งประเภทของสิ่งเปราะเปื้อนโดยทั่วไปแล้วนิยมแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ตามสภาพแวดล้อมที่กับดักฟ้าผ่าติดตั้งใช้งาน ได้แก่ สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเล สิ่งเปราะเปื้อนจากอุตสาหกรรม สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเลทราย และสิ่งเปราะเปื้อนจากบริเวณอื่น ๆ การแบ่งระดับความเปราะเปื้อน ตามมาตรฐาน IEC 815 [7] ได้แบ่งระดับความเปราะเปื้อนออกเป็น 4 ระดับตามสภาพพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน

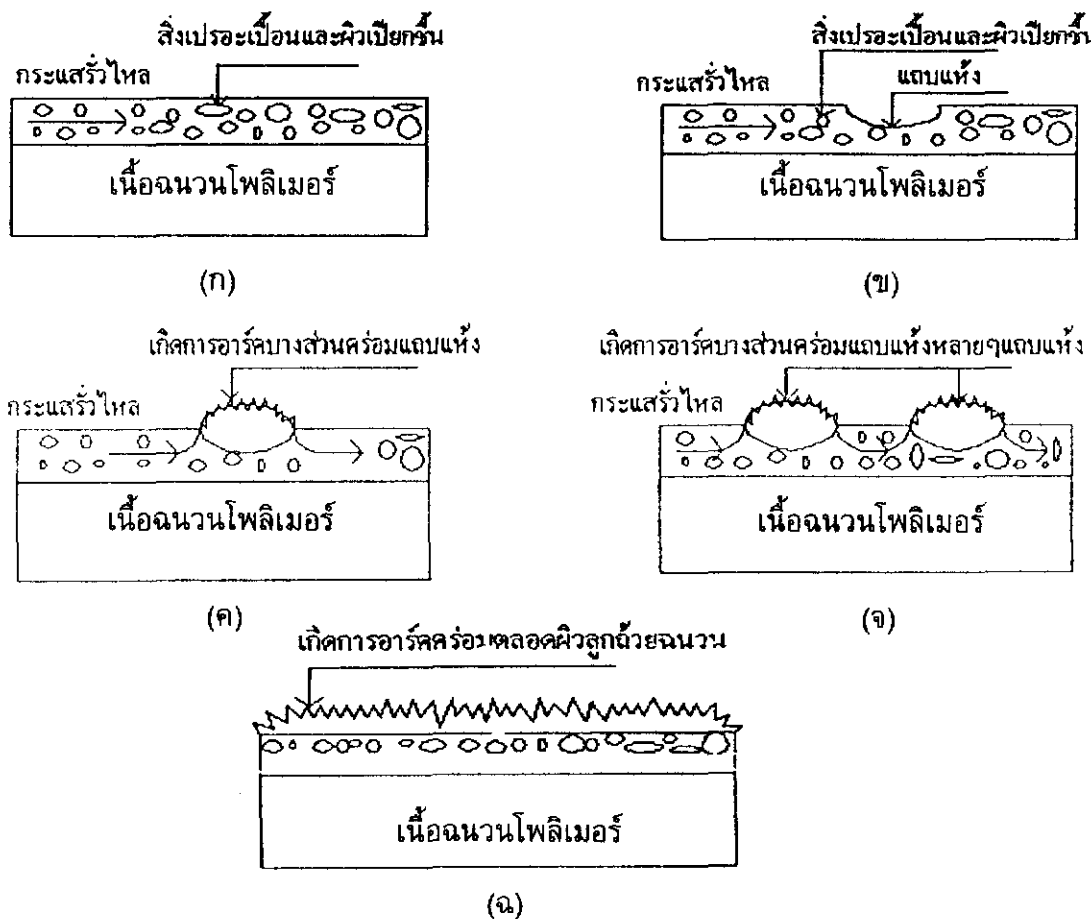
ระดับความเปราะเปื้อน	ตัวอย่าง
1) เล็กน้อย (Light)	<ul style="list-style-type: none"> - บริเวณที่ปลอดภัยจากการประกอบอุตสาหกรรม และชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปริมาณน้อย - บริเวณที่มีความหนาแน่นในการประกอบ อุตสาหกรรม หรือที่อยู่อาศัยน้อย โดยที่ จะต้อง เป็นบริเวณที่มีลมพัดผ่าน หรือมีฝนตกบ่อย - บริเวณเขตเกษตรกรรมหรือบริเวณที่อยู่ใกล้ๆ ภูเขา โดยที่พื้นที่ทั้งหมดเหล่านี้ จะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่น้อยกว่า 10 - 20 กิโลเมตร และจะต้องไม่ได้รับลมทะเลโดยตรง
2) ปานกลาง (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> - บริเวณเขตอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มีการสร้างฝุนหรือควันออกมาและอาจจะเป็นบริเวณย่านชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปานกลาง - บริเวณย่านชุมชนหรือเขตอุตสาหกรรมหนาแน่น แต่จะต้องมีลมพัดผ่านหรือฝนตกปรอยๆ - บริเวณที่มีลมทะเลพัดผ่าน ซึ่งจะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลพอสมควร (ควรจะห่างหลายๆ กิโลเมตร)
3) สูง (Heavy)	<ul style="list-style-type: none"> - เขตอุตสาหกรรมหนาแน่น หรือบริเวณชานเมืองของเมืองใหญ่ที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนสูง - บริเวณที่ได้รับลมทะเลที่รุนแรงโดยตรงหรือชายฝั่งทะเล
4) สูงมาก (Very heavy)	<ul style="list-style-type: none"> - บริเวณที่เป็นเขตรับฝุนควันจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยเฉพาะฝุนที่เป็น thick conductive deposit - บริเวณที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลมากๆ ซึ่งมีการรับเอาสิ่งเปราะเปื้อนที่พัดมาจากทะเลโดยตรง - ทะเลทรายที่มีโอกาสฝนตกน้อยมาก จะต้องรับลมที่นำเอาทรายและไอเกลือเข้ามา

หมายเหตุ

- บริเวณเกษตรกรรมในข้อ 1 ถ้ามีการใช้ปุ๋ยโดยการฉีดพ่นหรือมีการเผาไหม้ของกากวัชพืชต่างๆ เมื่อมีลมพัดนำเอาสิ่งเหล่านั้นมาแพร่กระจายออกไป ระดับความเปราะเปื้อนอาจจะอยู่ในระดับสูง

- บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลหรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลในข้อที่ 2 หรือ 3 ระยะทางที่พิจารณาจะต้องขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศของชายฝั่งทะเล และลักษณะที่เกิดขึ้นด้วย

กระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิของความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดผิวฉนวน โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแส บริเวณที่ความหนาแน่นกระแสสูง เช่นบริเวณคอคอดจะเกิดความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ผิวฉนวนของกัปดักฟ้าผ่าบริเวณนั้นแห้งก่อนมีลักษณะเป็นส่วนเล็กๆแคบๆมีความกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตรเรียกว่าแถบแห้ง (Dry band) บริเวณแถบแห้งนี้มีสภาพความต้านสูง ไม่สามารถที่จะนำกระแสได้ ทำให้แรงดันเกือบทั้งหมดตกคร่อมที่แถบแห้งถ้าความคงทนต่อความเป็นฉนวนของอากาศบริเวณแถบแห้งมีค่าน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้ง จะเกิดการเบรกดาว์นของอากาศคร่อมแถบแห้งขึ้นเรียกว่าการดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นอาจทำให้ขนาดของแถบแห้งขยายออกไป ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้การดีสชาร์จต่อไปอีกการดีสชาร์จบางส่วนจะหยุดลง ถ้ามีแถบแห้งหลายๆส่วนที่อยู่ใกล้กันเกิดพัฒนาการจนเชื่อมต่อถึงกันได้ ก็เกิดวาบไฟตามผิวฉนวนตลอดผิวฉนวนของกัปดักฟ้าผ่า ขั้นตอนของการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของกัปดักฟ้าผ่า เนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนแสดงในดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ขั้นตอนการเกิดวาบไฟตามผิวที่ผิวฉนวนจากสิ่งเปราะเปื้อน

2.8.3 แนวทางการแก้ไขการเกิดวาทไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน

1. การลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า

การป้องกันการเกิดวาทไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าโดยใช้วิธีลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนได้แก่การทำความสะอาดผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าตามระยะเวลาที่กำหนด หรือการใช้กับดักฟ้าผ่าประเภทที่มีรูปทรงที่ยากแก่การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน การฉีดล้างทำความสะอาดกับดักฟ้าผ่าตามระยะเวลาที่เหมาะสม จะทำเมื่อผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าเริ่มสกปรกสามารถทำได้ทั้งในขณะที่ดับกระแสไฟฟ้าและขณะจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยจะต้องพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ใช้ในการฉีด ระยะห่างและแรงดันของน้ำทิศทางตลอด ลักษณะการติดตั้งของการติดตั้งของกับดักฟ้าผ่า การออกแบบปีกฉนวนของกับดักฟ้าผ่าให้มีรูปร่างที่ทำให้การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนทำได้ยากขึ้น

2. การเพิ่มความคงทนต่อแรงดันวาทไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่า

การเกิดวาทไฟตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าจะเกิดได้ยากขึ้นถ้าผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่ามีความคงทนต่อแรงดันวาทไฟตามผิวสูงขึ้น อาจทำได้โดยการเพิ่มระยะรั่ว(Leakage Distance) ของกับดักฟ้าผ่า การเพิ่มระยะรั่วของครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าให้มากขึ้นนั้นทำให้กระแสรั่วไหลเกิดขึ้นได้น้อยลง โดยมาตรฐาน IEC 815 [7] ได้ระบุค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distanceที่ใช้สำหรับการออกแบบครีบนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน โดยเป็นฟังก์ชันของระดับสิ่งเปรอะเปื้อนของสถานที่นั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้กับดักฟ้าผ่าที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน

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

โดยที่บริเวณที่มีระดับของความเปรอะเปื้อนเป็นเบาบาง ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance อาจจะมีค่าน้อยกว่า 16 mm/kV ก็ได้ แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 12 mm/kV (ค่าต่ำสุดที่ยินยอมให้ใช้ได้) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การดูแลบำรุงรักษาและบริเวณที่มีระดับของความเปรอะเปื้อนสูงมากเป็นพิเศษ ค่าที่ระบุไว้คือ 31 mm/kV อาจจะไม่เพียงพอที่จะสามารถป้องกันการเกิดวาทไฟตามผิวได้ ดังนั้นควรพิจารณาใช้ค่า Nominal specific creepage distance เพิ่มขึ้น โดยขึ้นอยู่กับ การบำรุงรักษาและผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ

และประสบการณ์ผู้ออกแบบบางกรณีอาจพิจารณาควบคู่ไปกับการวางแผนการทำความสะอาดกับดักล่อฟ้าหลังจากติดตั้งใช้งานหรือการใช้สารเคลือบผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าอีกด้วย

2.8.4 การออกแบบกับดักฟ้าผ่าเพื่อใช้งานในบริเวณประะเบียน

เกณฑ์การออกแบบครีบนวนโพลีเมอร์ของกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป อาศัยข้อแนะนำตามมาตรฐาน IEC 815 [7] โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1. คำนวณค่า minimum nominal creepage distance ตามสมการที่ (2.20)

$$(L_{nc})_{\min} = (L_{sc})_{\min} \times U_m \times k_d \quad (2.20)$$

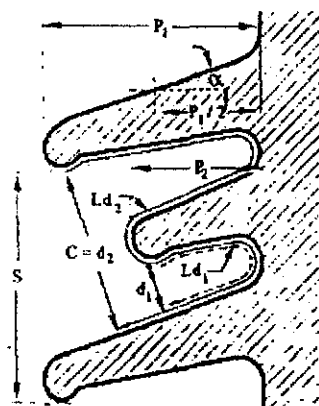
เมื่อ	$(L_{nc})_{\min}$	คือ	minimum nominal creepage distance
	$(L_{sc})_{\min}$	คือ	minimum specific creepage distance
	U_m	คือ	highest system voltage phase-to-phase for the equipment
	k_d	คือ	ตัวประกอบแก้ไข (correction factor) ; $k_d = 1$ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลูกถ้วย (D_m) < 300 mm.

กับดักฟ้าผ่าฉนวนเป็นแบบปีกสลับ ค่า (D_m) โดยประมาณหาได้จากสมการที่ (2.21)

$$D_m = (D_{e1} + D_{e2} + 2D_f) / 4 \quad (2.21)$$

เมื่อ	D_{e1}	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางปีกใหญ่
	D_{e2}	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางปีกเล็ก
	D_f	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกับดักฟ้าผ่า

2. ลักษณะรูปร่างของครีบนวน ตามมาตรฐาน IEC 815 [7] ดังนี้



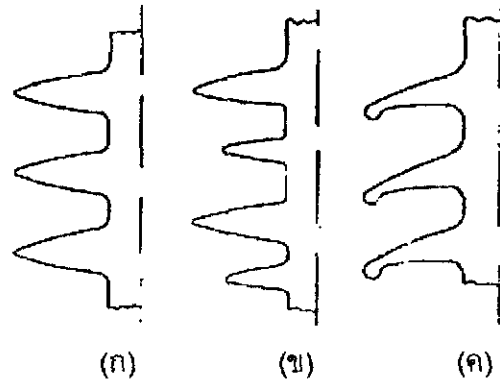
C	> 30 มม.
S/P	≥ 0.8
Ld/d	< 5
$P_1 - P_2$	≥ 15 มม.
α	$> 5^\circ$
C.F.	≤ 4 ระดับสูงและสูงมาก
P.F.	> 0.7 ระดับสูงและสูงมาก

รูปที่ 2.27 ลักษณะการออกแบบครีบนวนตามมาตรฐาน IEC 815

เมื่อ	C	คือ	ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวครีบนวนไปยังครีบนวนนอกสุดของครีบนวน
	S	คือ	ระยะห่างระหว่างชั้นครีบนวนในแนวตั้งของครีบนวนใด ๆ

- P คือ ความกว้างของครีบบนที่ยื่นออกไปจากคอดันโดยที่ P_1 และ P_2 เป็นความกว้างของครีบบยาวและครีบบสั้นตามลำดับ
- d คือ ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของครีบบ
- L_d คือ ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดจุดวัดค่า

3. เลือกลักษณะครีบบ ลักษณะของครีบบที่ใช้งานโดยทั่วไปจะมี 3 ประเภท



รูปที่ 2.28 รูปแบบของครีบบประเภทต่าง ๆ

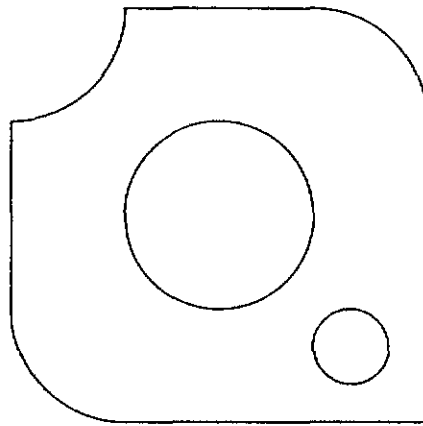
พิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างรูปแบบครีบบแต่ละแบบพบว่าครีบบแบบ (ก) สิ่งเปราะเปื้อนมีโอกาสดับเกาะน้อยที่สุด แต่ทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ลมพัดหรือฝนตกได้แย่มากที่สุด ส่วนครีบบแบบ (ข) การที่มีครีบบสั้นมาเสริมสลักับครีบบยาวเพื่อทำหน้าที่ชดเชยระยะรั้วที่หายไป ครีบบแบบนี้จะทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าครีบบแบบ (ก) สำหรับครีบบแบบ (ค) สิ่งเปราะเปื้อนมีโอกาสดับได้เพิ่มขึ้น แต่มีคุณสมบัติในการทำทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าครีบบชนิดแบบอื่น ๆ แต่โอกาสที่หยดน้ำจะเชื่อมต่อระหว่างปีกในสภาวะที่ฝนตกหนักก็มีเพิ่มขึ้น

2.9 ไฟไนต์เอลิเมนต์

ปรากฏการณ์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นรอบตัวเราสามารถอธิบายได้โดยกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์และทำการประดิษฐ์ขึ้นมาในลักษณะของสมการต่าง ๆ ได้ ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) หรือในรูปแบบของสมการอินทิกรัล (Integral Equation) เป็นต้น ดังตัวอย่างเช่น การคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์อาจเริ่มมาจากสมการอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลในการถ่ายเทความร้อน การคำนวณออกแบบโครงสร้างปีกเครื่องบินอาจเริ่มมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลของโครงสร้างนั้นภายใต้แรงกดดันของอากาศในขณะที่ทำการบิน [9] รวมไปถึงการทำนายทิศทางและความเร็วของกระแสลมจากพายุไต้ฝุ่นเพื่อที่จะออกข่าวเตือนประชาชนในพื้นที่ที่ได้ฝุ่นจะเคลื่อนตัวไปในการอพยพหนี ก็อาจเริ่มมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลของการไหล เป็นต้น

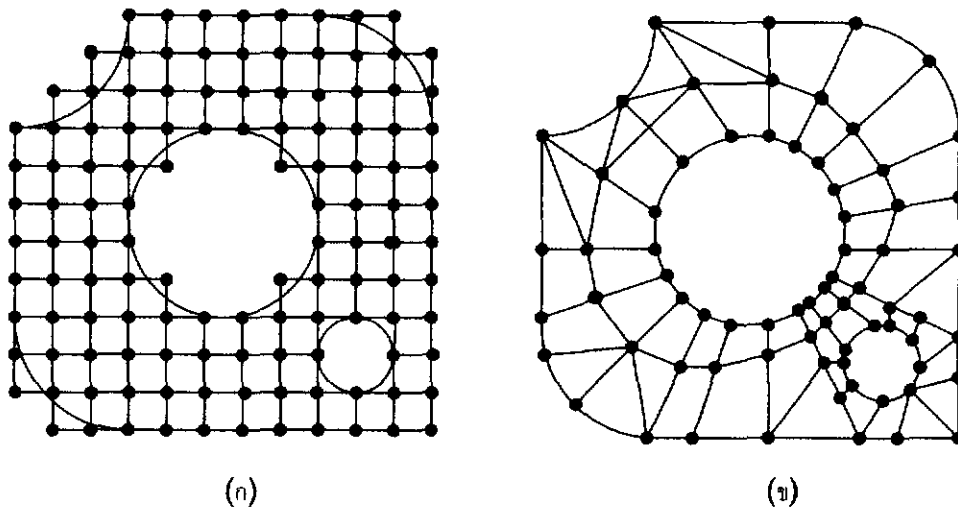
สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาต่าง ๆ นั้น ปกติจะประดิษฐ์ขึ้นมาได้โดยไม่ง่าย หากแต่ว่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ที่ต้องการและจำเป็นต้องการหาออกมาโดยวิธีการวิเคราะห์ (analytical method) นั้นทำได้ยากและลำบากมากหรืออาจจะหาไม่ได้เลย เหตุผลดังกล่าวก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) ขึ้น วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate method) นั้นมีหลายวิธีการ วิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีการหาผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference method)

หลักการที่สำคัญของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมก็คือการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ โดยเริ่มจากการเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการผลต่างสี่เหลี่ยม (system of difference equation) ข้อดีของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมก็คือ วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ง่ายแก่การศึกษาและทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้น ๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมก็มีหลายประการ เช่น ความสะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (application of boundary condition) และที่สำคัญที่สุดก็คือความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน ซึ่งการออกแบบสิ่งที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนในปัจจุบันนี้ได้กลายเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพสิ่งของนั้น ๆ ให้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.29 ลักษณะของตัวอย่างแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมกับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมชิ้นหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยส่วนโค้งและส่วนที่เป็นเส้นตรง การวิเคราะห์หาการกระจายของความเค้น (stress distribution) บนแผ่นอะลูมิเนียมนี้ภายใต้แรงกระทำที่กำหนดให้โดยการใช้วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference method) จะเริ่มจากการแบ่งแผ่นอะลูมิเนียมนี้ออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.30 (ก) โดยที่ตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อ (grid points) ตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่าง ๆ และขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่า (number of unknowns) จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง



รูปที่ 2.30 แผ่นอะลูมิเนียมที่วิเคราะห์โดยใช้วิธีการผลต่างสับสนึง (ก)
กับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (ข)

รูปที่ 2.30 (ก) นี้ แสดงให้เห็นว่าตารางสี่เหลี่ยมที่ใช้ในวิธีการผลต่างสับสนึงไม่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงของแผ่นอะลูมิเนียมดังกล่าวได้โดยเที่ยงตรง หากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นก็จะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้นแต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสับสนึงมากขึ้นด้วย และกระบวนการในการแก้ปัญหาจำเป็นต้องการหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้น รวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย

สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณวิธีใหม่ที่เรียกว่า วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ที่นิยมเรียกด้วยคำย่อกันว่า FEM ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนเช่นใดก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงเที่ยงตรงกว่าหลักการของวิธีการนี้ในขั้นต้นก็คล้ายกับวิธีการผลต่างสับสนึง กล่าวคือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลาย ๆ ชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ เช่น ในตัวอย่างของแผ่นอะลูมิเนียมเดิมนี้สามารถแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ต่าง ๆ กัน โดยเอลิเมนต์ต่าง ๆ นี้ อาจอยู่ในรูปลักษณะของสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ ดังเช่น รูปที่ 2.30 (ข)

ผลประโยชน์สิ่งแรกที่ได้เห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 2.30 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการผลต่างสับสนึง ก็คือ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยเอลิเมนต์ขนาดต่าง ๆ กันที่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของแผ่นอะลูมิเนียมได้เป็นอย่างดี ซึ่งหมายถึงปัญหานี้จะถูกแก้เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ที่มีรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากที่สุด ดังนั้นค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้จะมีความแม่นยำมากขึ้นตามไปด้วย

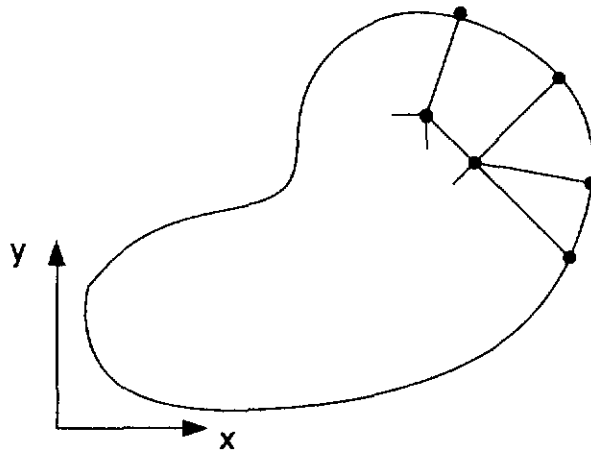
หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น

ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน [9] ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1

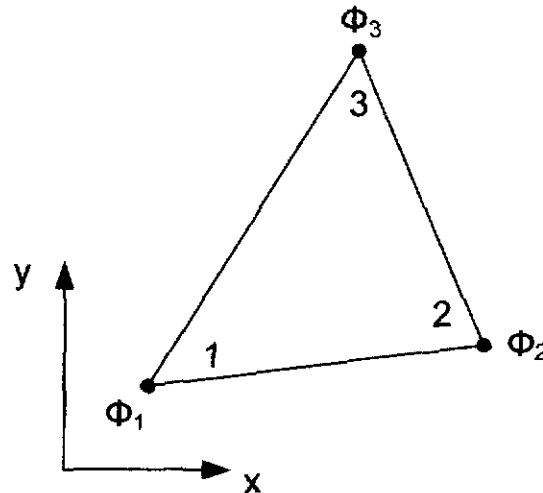
การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังรูปที่ 2.31 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่าง ๆ กัน เช่น ปัญหากระจายตัวของสนามไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างการแบ่งขอบเขตรูปร่างเป็นเอลิเมนต์ย่อย

ขั้นตอนที่ 2

การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม จะประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 จุดต่อของเอลิเมนต์ย่อย

โดยที่จุดต่อนี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (nodal unknowns) ซึ่งก็คือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้า หากเราพิจารณาถึงปัญหาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ลักษณะการกระจายตัวของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ดังสมการ (2.22)

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.22)$$

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

สมการ (2.23) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} \\ &= \underset{(1 \times 3)}{[N]} \underset{(3 \times 1)}{[\phi]} \end{aligned} \quad (2.23)$$

เมื่อ $[N]$ คือ เมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์
 $[\phi]$ คือ เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 3

การสร้างสมการของเอลิเมนต์ ดังตัวอย่างเช่นสมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.32 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

$$[k]_e [\phi]_e = [F]_e \quad (2.24)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการ (2.25) สามารถทำได้โดย

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

ขั้นตอนที่ 4

การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (system of simultaneous equations) ในรูปแบบดังต่อไปนี้

$$\sum \left(\text{element equation} \right) \Rightarrow [k]_{\text{sys}} [\phi]_{\text{sys}} = [F]_{\text{sys}} \quad (2.25)$$

ขั้นตอนที่ 5

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

ขั้นตอนที่ 6

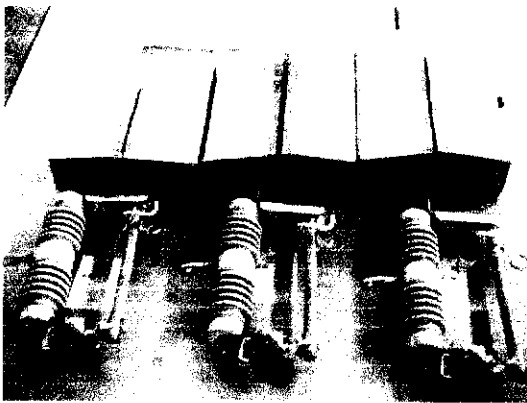
เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้ว ก็สามารถทำการหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้าง เราสามารถนำไปใช้หาลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าได้

บทที่ 3

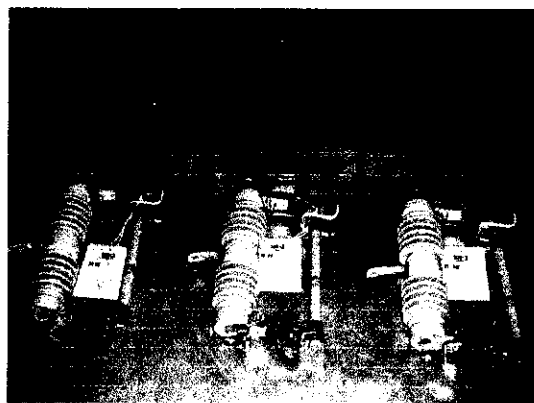
การทดสอบครอบเอาต์ฟิวส์และกับดักฟ้าผ่า

3.1 การทดสอบครอบเอาต์ฟิวส์

ครอบเอาต์ฟิวส์ที่ศึกษาเป็นครอบเอาต์ฟิวส์ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก ปิดัดแรงดัน 22 กิโลโวลต์ กระแสต่อเนื่อง 100 แอมแปร์ดังรูปที่ 3.1 ในการทดสอบนั้นจะใช้มาตรฐาน ANSI เป็นมาตรฐานหลัก ซึ่งจะอ้างถึงมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 [10] , IEEE Std C37.41-2000 [11] โดยมีหัวข้อการทดสอบที่สามารถใช้อุปกรณ์ทดสอบที่มีอยู่ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.ได้คือ การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ และการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง



(ก)



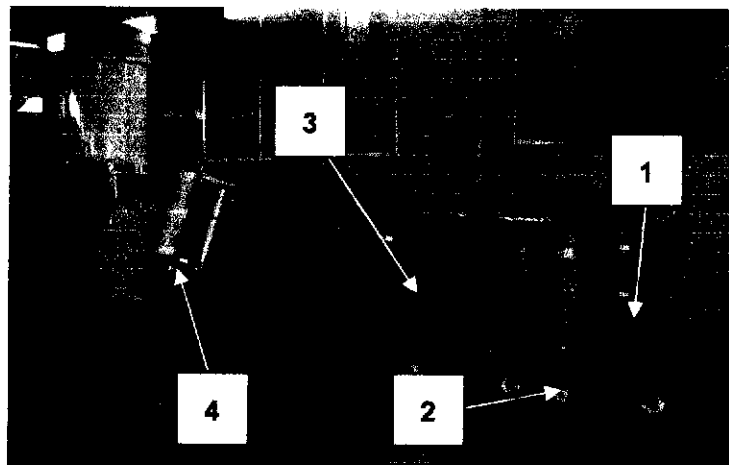
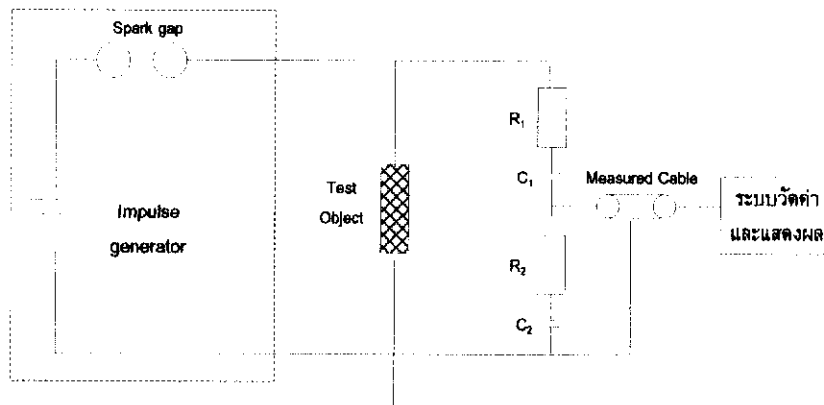
(ข)

รูปที่ 3.1 ครอบเอาต์ฟิวส์ที่ใช้ในการศึกษาครอบเอาต์ฟิวส์ ปิดัด 22 kV 100 A บริษัท A. (ก) และครอบเอาต์ฟิวส์ ปิดัด 22 kV 100 A บริษัท B. (ข)

3.1.1 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์

การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ เป็นการทดสอบตรวจสอบความสามารถในการดีสชาร์จกระแสของฉนวนเอพ็อกซีไฟวส์ [10]

1. วงจรการทดสอบ

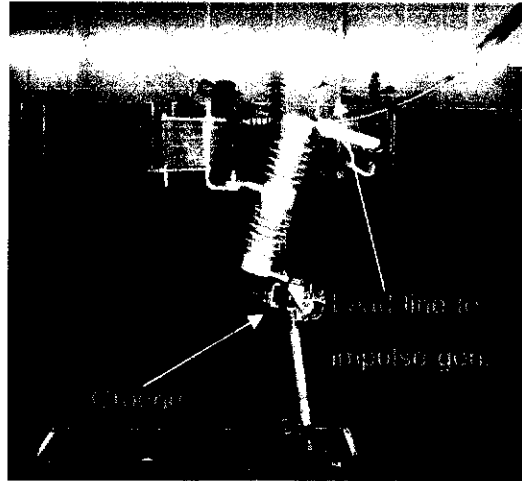
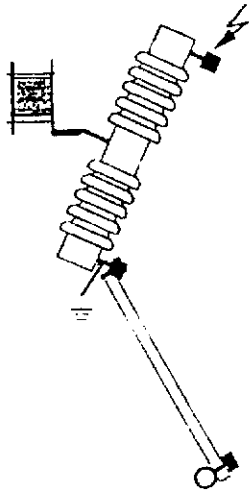


รูปที่ 3.2 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของฉนวนเอพ็อกซีไฟวส์

- เมื่อ
- 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 200 kV 5 kJ
 - 2 คือ โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 200 kV 420 pF ratio 1:230.5
 - 3 คือ ชุดเครื่องอัดประจุ พิกัด 100 kV
 - 4 คือ ฉนวนเอพ็อกซีไฟวส์

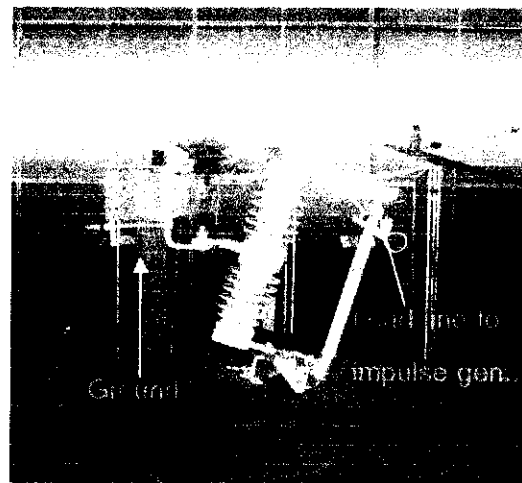
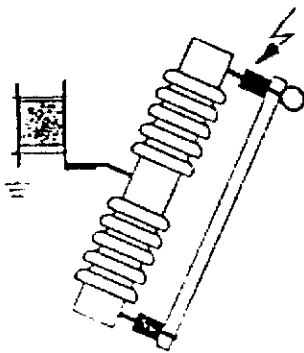
2. วิธีการทดสอบ

- 2.1 ติดตั้งฉนวนเอพ็อกซีไฟวส์ และการทดลองตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 โดยใช้ฉนวนเอพ็อกซีไฟวส์ที่ผ่านการทำความสะอาดครีปของฉนวน ฉนวนเอพ็อกซีไฟวส์ต้องไม่ผ่านการใช้งานหรือทดสอบมาก่อน และจะต้องทำการทดสอบทั้งในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล (terminal-terminal) และในกรณีเทอร์มินอล-กราวนด์ (terminal-ground)



(ก) ไดอะแกรมการติดตั้งครอบเอาต์ไฟวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล

(ข) การติดตั้งครอบเอาต์ไฟวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล



(ค) ไดอะแกรมการติดตั้งครอบเอาต์ไฟวส์ กรณีเทอร์มินอล-กราวนด์

(ง) การติดตั้งครอบเอาต์ไฟวส์ กรณีเทอร์มินอล-กราวนด์

รูปที่ 3.3 การติดตั้งครอบเอาต์ไฟวส์ตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996

2.2 บันทึกสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบดังนี้

ความดันบรรยากาศ = มม.ปรอท

อุณหภูมิแวดล้อม = เซลเซียส

ความชื้นสัมพัทธ์ = %

ความชื้นสัมบูรณ์ = กรัม/ลูกบาศก์เมตร

คำนวณค่าตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ (K_d) และค่าตัวประกอบแปลงความชื้น (K_h) เพื่อพิจารณาปรับแรงดันอิมพัลส์ทดสอบให้ได้สภาวะมาตรฐาน

- 2.3 ก่อนที่จะป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้ครอบเอาต์ไฟวส์เพื่อทดสอบ จะต้องมีการปรับรูปคลื่นของอิมพัลส์ให้ได้ตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 คือ รูปคลื่นของแรงดันทดสอบอิมพัลส์ช่วงเวลานำคลื่นต่อช่วงเวลาหลังคลื่นจะต้องเป็น $1.2 / 50 \mu s$ (เต็มลูกคลื่น) ขนาด 125 kV (ที่สภาวะมาตรฐาน) สำหรับครอบเอาต์ไฟวส์ที่ใช้งานกับระบบแรงดันสูงสุด 27 kV
- 2.4 ป้อนแรงดันอิมพัลส์ตามข้อกำหนดให้กับครอบเอาต์ไฟวส์
- 2.5 บันทึกผลการทดสอบ

3. ผลการทดสอบ

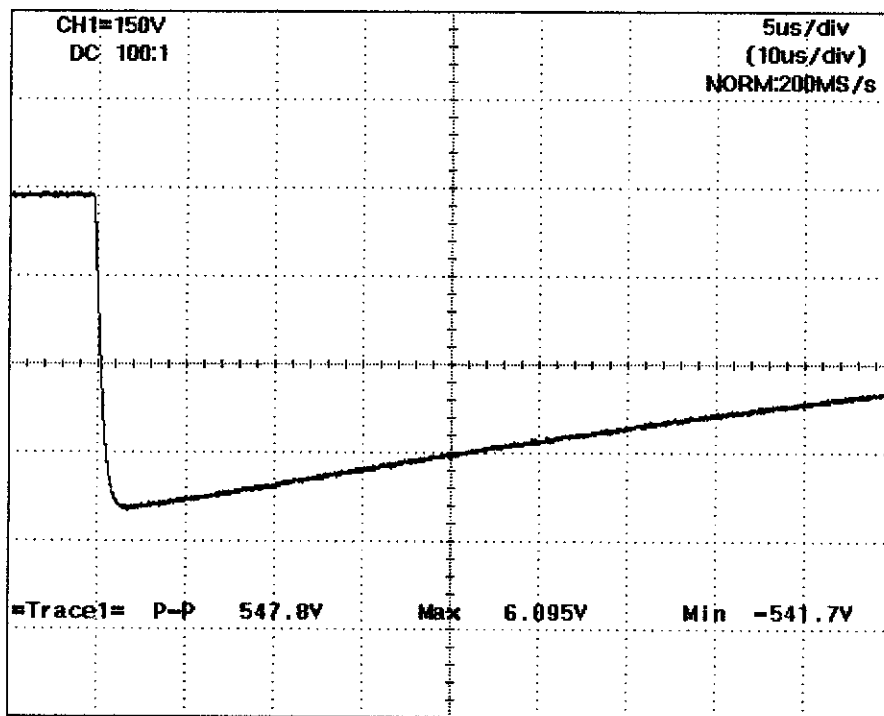
สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ ความดันของอากาศมีค่าเท่ากับ 751 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 28.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 63.5 เปอร์เซ็นต์ ผลการคำนวณค่าตัวประกอบแปลงความหนาแน่นอากาศ ; K_d มีค่าเท่ากับ 0.96 และค่าตัวประกอบแปลงผืนความชื้น ; K_h มีค่าเท่ากับ 0.97

ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบของครอบเอาต์ไฟวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล แสดงในตารางที่ 3.1

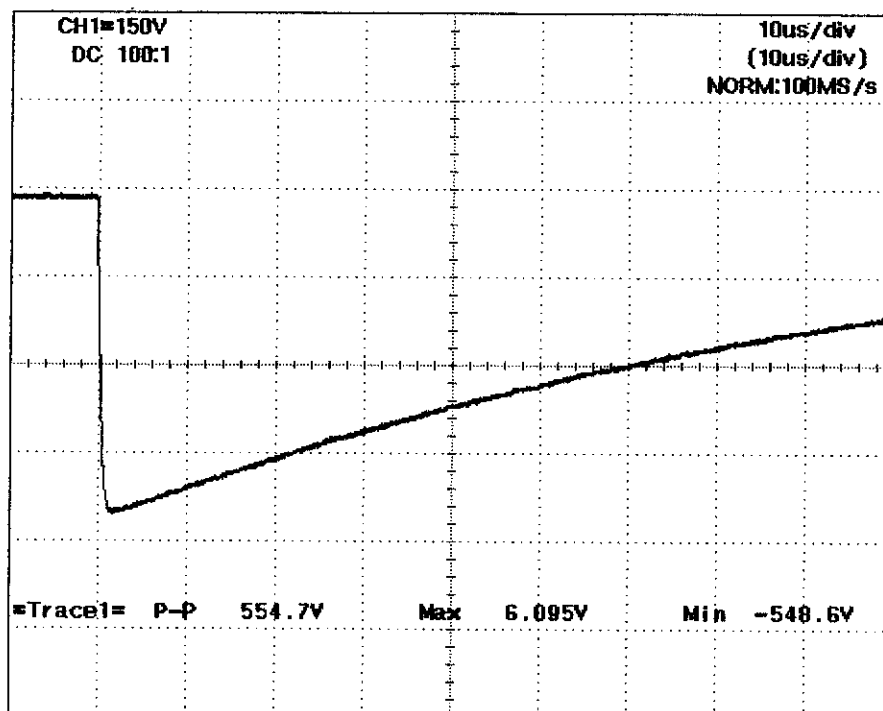
ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์(ชั่วลบ)ที่ระดับแรงดัน 124 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของครอบเอาต์ไฟวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล

ครอบเอาต์ไฟวส์ พิกัด 22 kV 100 A	ผลการทดสอบ
ตัวอย่างที่ 1 บริษัท A.	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 2 บริษัท A.	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 3 บริษัท A.	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 4 บริษัท A.	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 5 บริษัท A.	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 1 บริษัท B.	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 2 บริษัท B.	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 3 บริษัท B.	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว

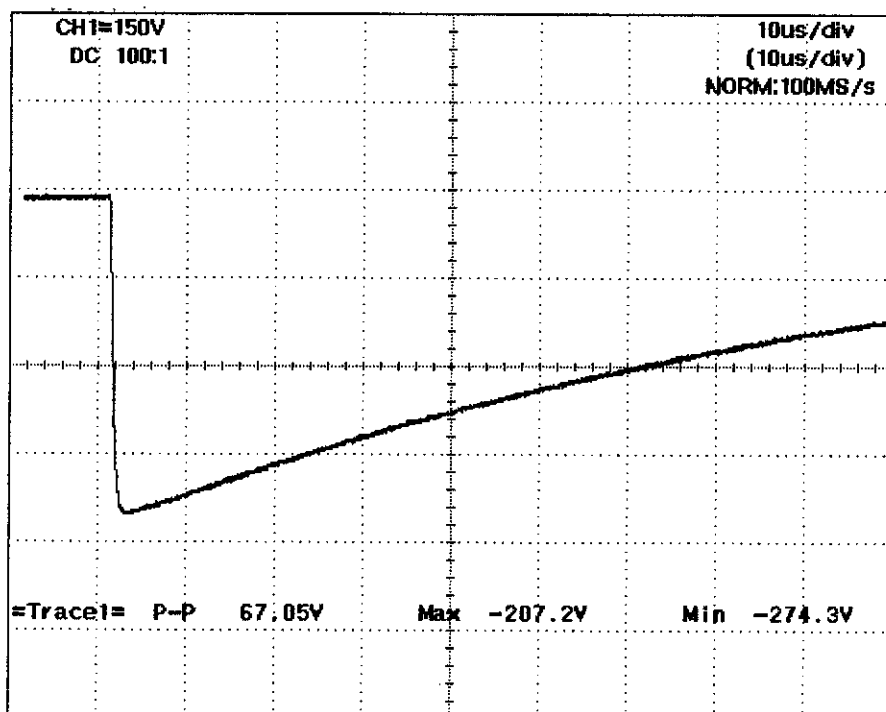
รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลที่ใช้ทดสอบตัวอย่างกรอบเอาท์พิวส์



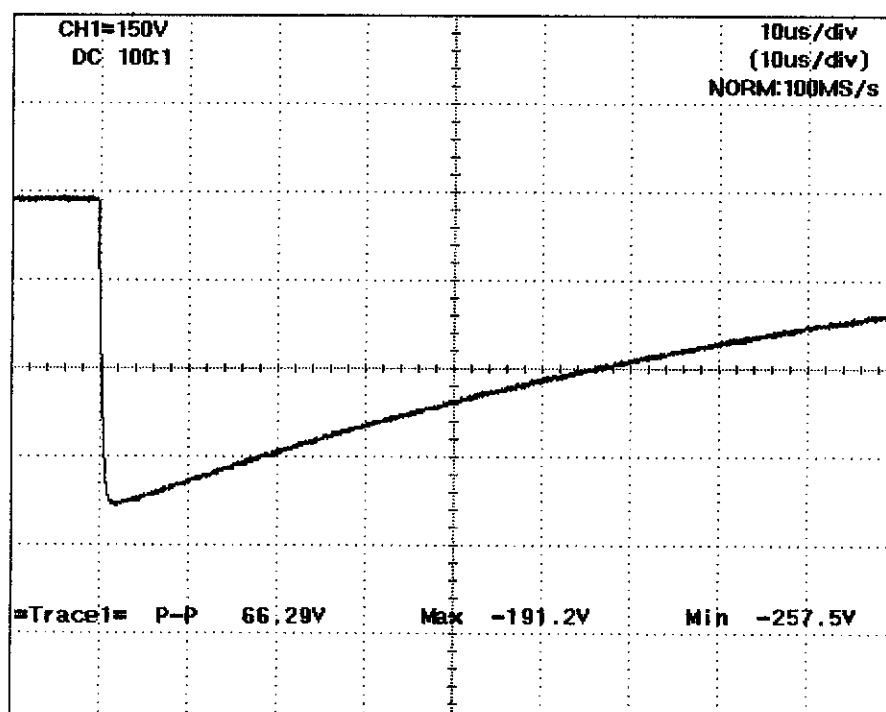
รูปที่ 3.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลที่ใช้ทดสอบกรอบเอาท์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 1 ปริมาณ A. ที่ระดับแรงดัน 126.3 kV โดยที่ $T_1 = 1.18 \mu s$ $T_2 = 62.3 \mu s$



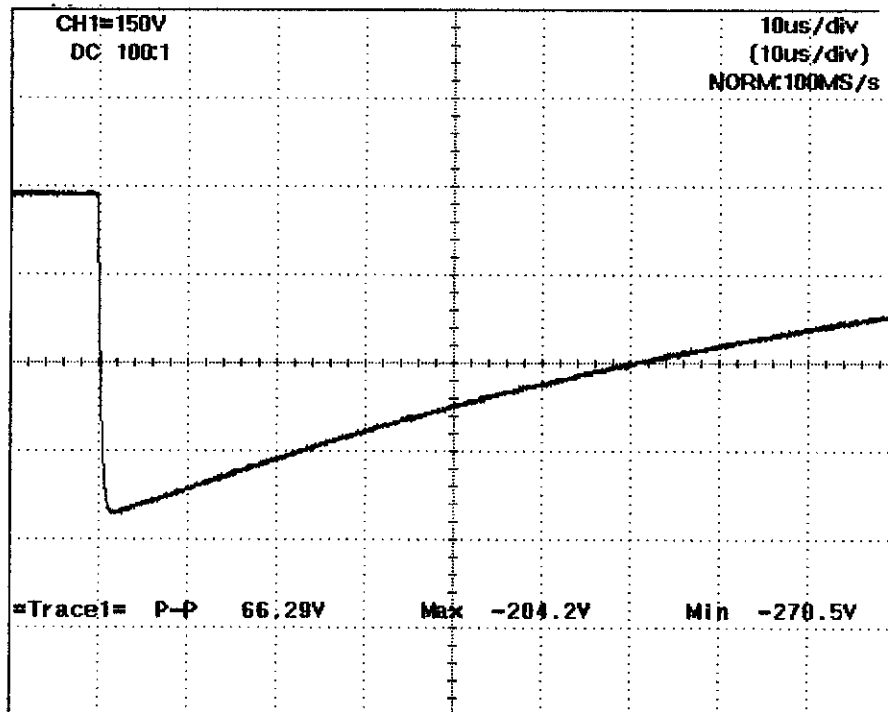
รูปที่ 3.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลที่ใช้ทดสอบกรอบเอาท์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 2 ปริมาณ A. ที่ระดับแรงดัน 127.8 kV โดยที่ $T_1 = 1.19 \mu s$ $T_2 = 65.2 \mu s$



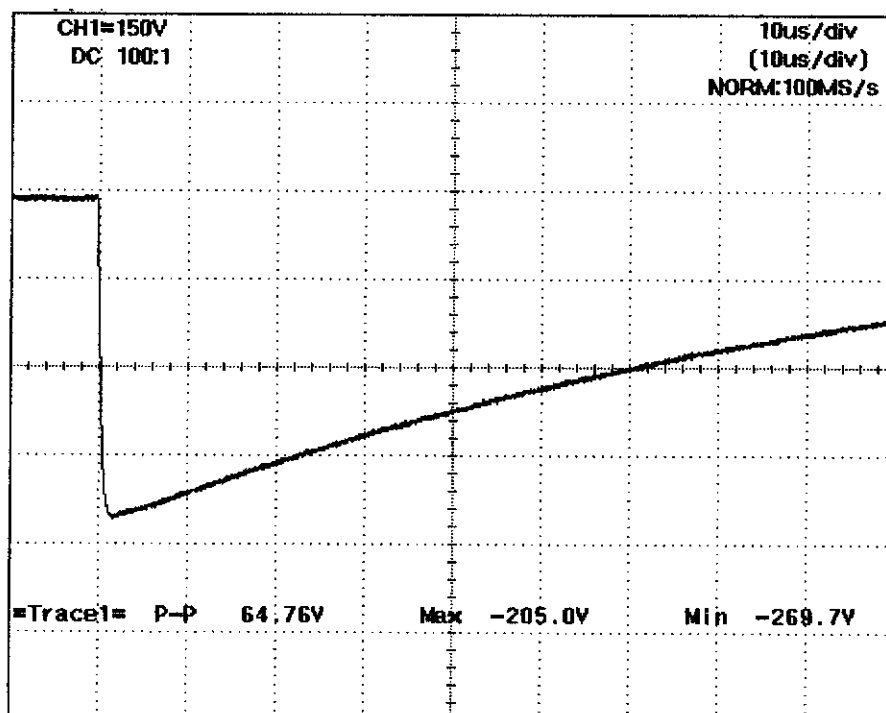
รูปที่ 3.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 3 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 127.1 kV โดยที่ $T_1 = 1.22 \mu s$ $T_2 = 65.9 \mu s$



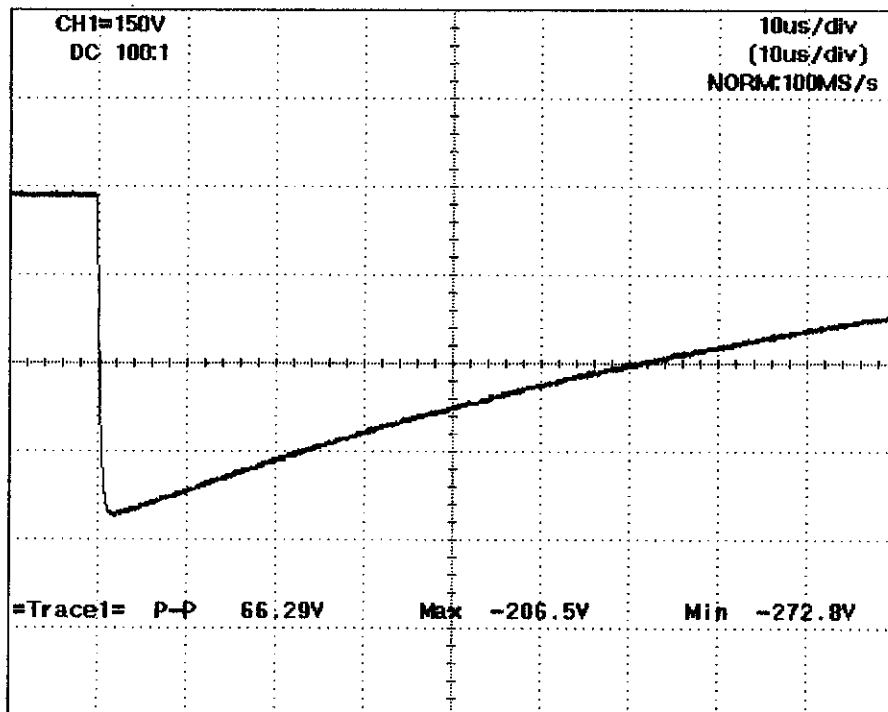
รูปที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 4 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 125.6 kV โดยที่ $T_1 = 1.26 \mu s$ $T_2 = 59.8 \mu s$



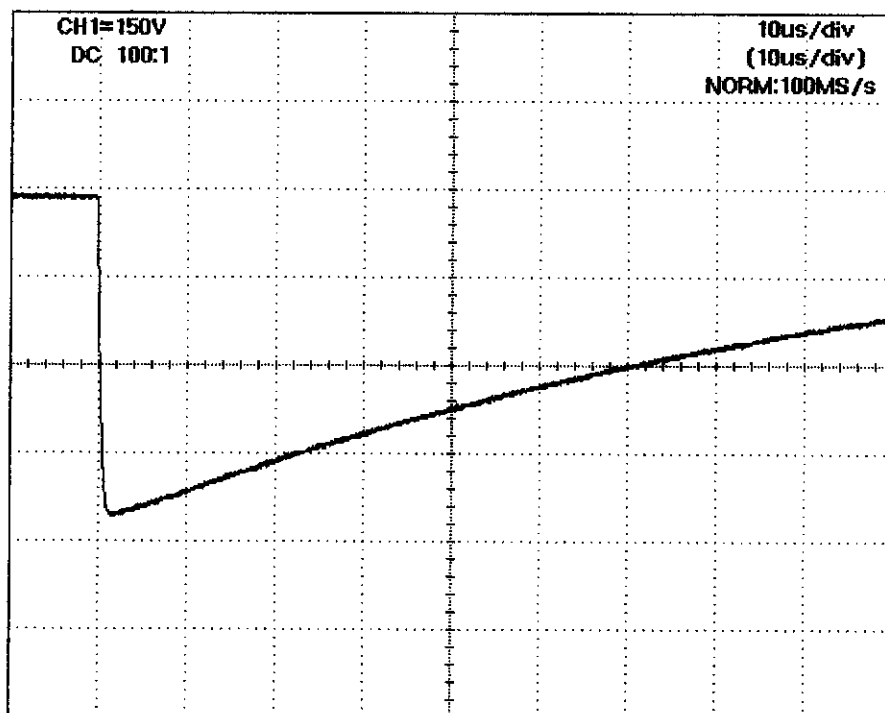
รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 5 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 128.3 kV โดยที่ $T_1 = 1.26 \mu s$ $T_2 = 61.6 \mu s$



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A ตัวอย่างที่ 1 บริษัท B. ที่ระดับแรงดัน 127.8 kV โดยที่ $T_1 = 1.12 \mu s$ $T_2 = 62.9 \mu s$



รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ใช้ทดสอบรอบเอาต์พุต พิกัด 22 kV 100 ตัวอย่างที่ 2 บริษัท B. ที่ระดับแรงดัน 128.4 kV โดยที่ $T_1 = 1.12 \mu s$ $T_2 = 63.9 \mu s$



รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ใช้ทดสอบรอบเอาต์พุต พิกัด 22 kV 100 ตัวอย่างที่ 3 บริษัท B. ที่ระดับแรงดัน 128.5 kV โดยที่ $T_1 = 1.14 \mu s$ $T_2 = 61.5 \mu s$

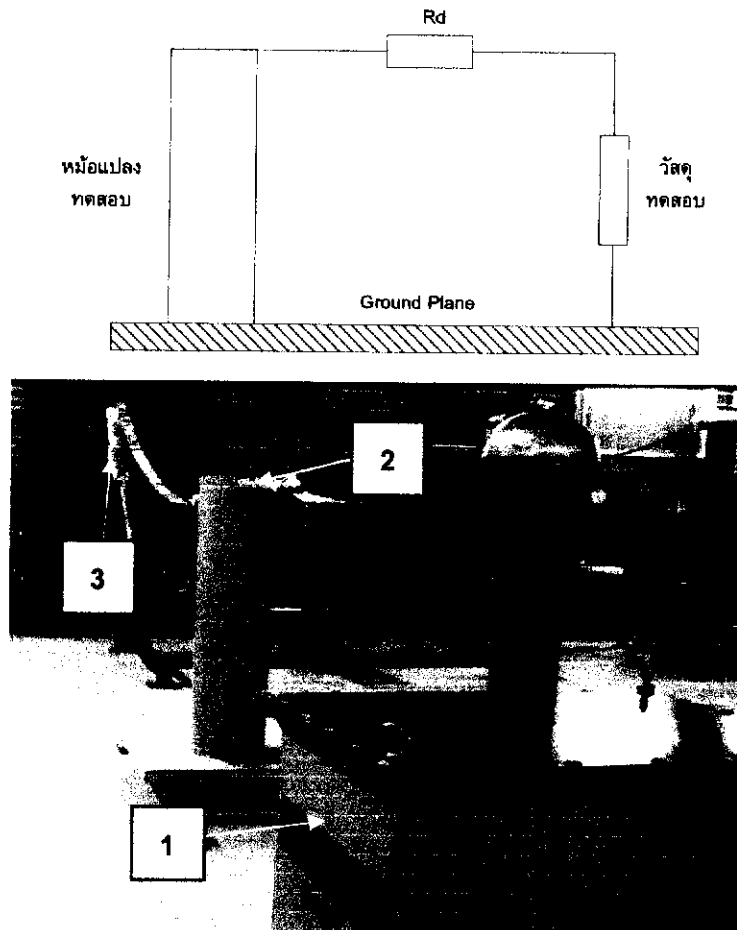
4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ครอบเอาท์พิวส์จะต้องไม่เกิดวาทไฟตามผิวระหว่างการทดสอบ แต่ถ้าเกิดวาทไฟตามผิวขึ้นระหว่างการทดสอบ ถือว่าครอบเอาท์พิวส์ที่ทดสอบนั้นไม่ผ่าน แต่สามารถทำการทดสอบซ้ำได้โดยการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ให้อีก 9 ครั้ง กรณีที่ไม่เกิดวาทไฟขึ้นซ้ำอีกระหว่างการทดสอบ ถือว่าอุปกรณ์นั้นผ่านเกณฑ์การทดสอบ กรณีที่อุปกรณ์ทดสอบนั้นยังเกิดวาทไฟตามผิวขึ้นอีก เนื่องจากการไม่คืนสู่สภาพนวน ให้ถือว่าอุปกรณ์ทดสอบนั้นไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบ [10]

จากผลการทดสอบ ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้เพียงกรณีเดียว คือ การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบของครอบเอาท์พิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล เนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ต่ำ ทำให้ไม่สามารถปรับขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นได้ตามมาตรฐานกำหนด หากทำการทดสอบต่ออาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ โดยผลการทดสอบจากการบ่อนแรงดันอิมพัลส์ให้กับครอบเอาท์พิวส์ทั้ง 8 ตัวอย่าง พบว่าไม่เกิดวาทไฟตามผิวกับครอบเอาท์พิวส์ สรุปได้ว่าครอบเอาท์พิวส์ผ่านเกณฑ์การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบของครอบเอาท์พิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอลตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996

3.1.2 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง
เป็นการทดสอบความทนอยู่ได้ระยะสั้นต่อแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ เพื่อ
ตรวจสอบความคงทนของฉนวน [11]

1. วงจรการทดสอบ



รูปที่ 3.12 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง

- เมื่อ
- 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 5 kVA 235 V / 100kV 50 Hz
 - 2 คือ ความต้านทานน้ำบริสุทธิ์ พิกัด 0.49 MΩ
 - 3 คือ ครอบเอาร์ทไฟวส์

2. วิธีการทดสอบ

- 2.1 ติดตั้งครอบเอาร์ทไฟวส์ และลำดับขั้นตอนการทดลองปฏิบัติตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 โดยใช้ครอบเอาร์ทไฟวส์ที่ผ่านการทำความสะอาดครีบบของฉนวน ครอบเอาร์ทไฟวส์ต้องไม่ผ่านการใช้งานหรือทดสอบมาก่อน และจะต้องทำการทดสอบทั้งในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล (terminal-terminal) และในกรณีเทอร์มินอล-กราวน์ (terminal-ground)

2.2 ป้อนแรงดันทดสอบกระแสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ขนาด 42 kV (ที่สภาวะมาตรฐาน) ตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 สำหรับครอบเอาต์พิวส์ที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าขนาด 22 kV โดยทำการเพิ่มแรงดันจนถึงระดับแรงดันที่กำหนดให้กับครอบเอาต์พิวส์เป็นเวลา 1 นาที โดยใช้เวลาในการเพิ่มแรงดันไม่น้อยกว่า 5 วินาที และไม่เกินกว่า 30 วินาที

2.3 บันทึกผลการทดสอบ

3. ผลการทดสอบ

สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ ความดันของอากาศมีค่าเท่ากับ 752 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 64 เปอร์เซ็นต์ ผลการคำนวณค่าตัวประกอบแปลงความหนาแน่นอากาศ ; K_a มีค่าเท่ากับ 0.973 และค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้น ; K_h มีค่าเท่ากับ 0.995 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การเกิดวาบไฟตามผิวแห้งกระแสลับ 50 Hz ของครอบเอาต์พิวส์ที่ระดับแรงดัน 43 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง)

ครอบเอาต์พิวส์ ตัวอย่างที่	ผลการทดสอบ	
	Terminal - Terminal	Terminal - Ground
1	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
2	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
3	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
4	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
5	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
6	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
7	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
8	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว

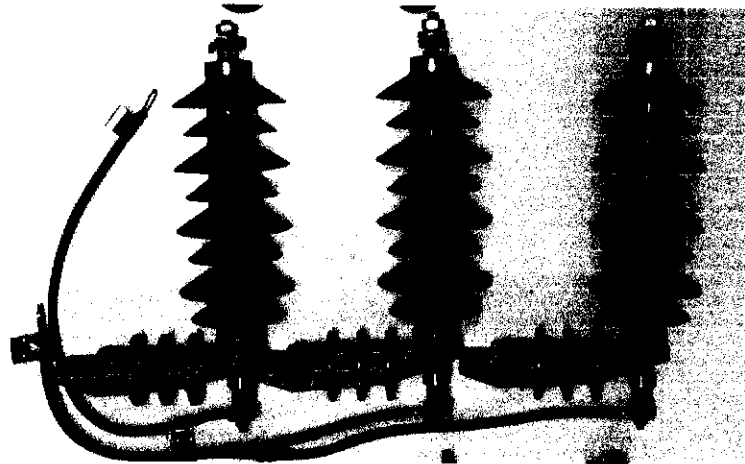
4. สรุปผลการทดสอบ

ครอบเอาต์พิวส์จะต้องไม่เกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) หรือเกิดความเสียหายของฉนวน [10]

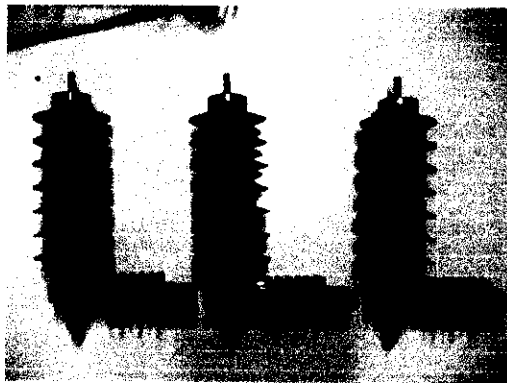
จากผลการทดสอบป้อนแรงดันกระแสลับ 50 Hz ที่ระดับแรงดันทดสอบ 45 kV (ที่สภาวะมาตรฐาน) ให้กับครอบเอาต์พิวส์ทั้งในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล พบว่าครอบเอาต์พิวส์ทั้งหมดไม่เกิดวาบไฟตามผิว และเมื่อทำการทดสอบในกรณีเทอร์มินอล-กราวนด์ พบว่าครอบเอาต์พิวส์ทั้งหมดไม่เกิดวาบไฟตามผิวเช่นเดียวกับกรณีแรก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าครอบเอาต์พิวส์ผ่านการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่องตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996

3.2 การทดสอบกับดักฟ้าผ่า

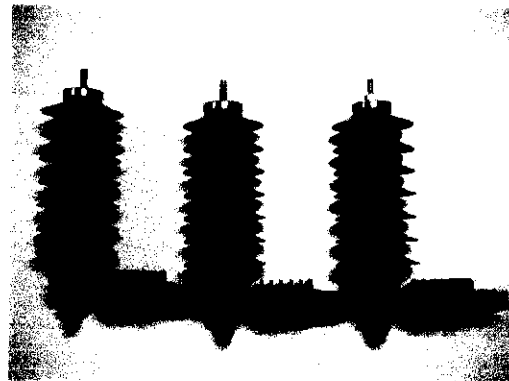
การทดสอบกับดักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกนนี้จะใช้กับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA และพิกัด 24 kV 10 kA ทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60099 – 4 [12] โดยมีหัวข้อการทดสอบที่สามารถใช้อุปกรณ์ทดสอบที่มีอยู่ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. คือ การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน การทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงานและการทดสอบหากระแสรั่วไหล



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.13 กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในการศึกษา กับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A. (ก)

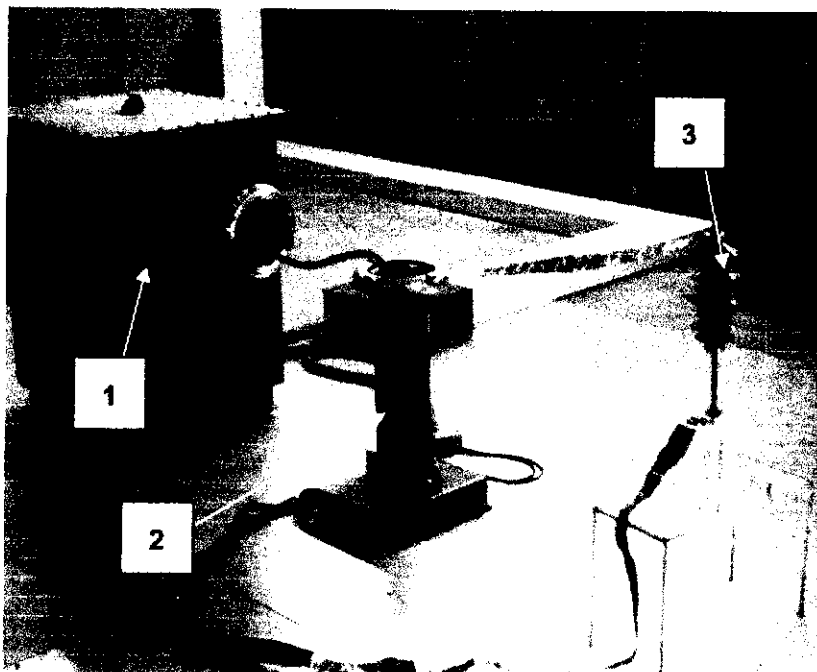
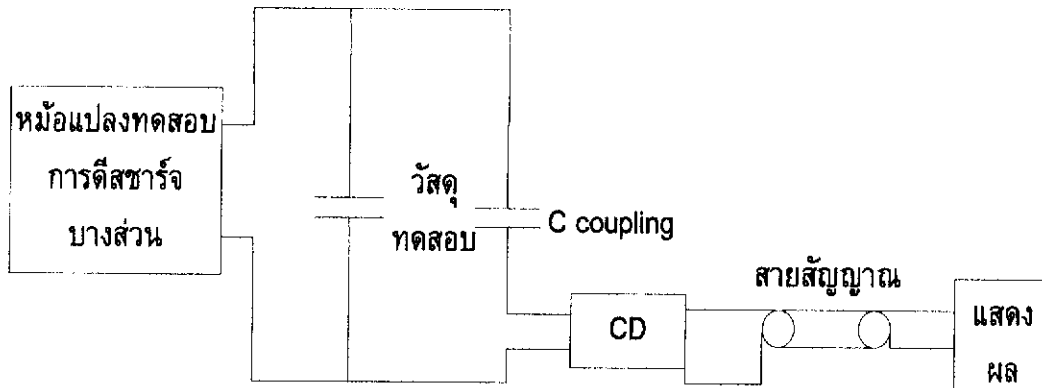
กับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B. (ข)

กับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA บริษัท B. (ค)

3.2.1 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Internal partial discharge)

การทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนจะเป็นการทดสอบเพื่อหาความผิดปกติภายในของกับดักฟ้าผ่าเพื่อเป็นการยืนยันว่าไม่มีความผิดปกติภายในกับดักฟ้าผ่า การทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนจะกระทำต่อกับดักฟ้าผ่าชนิดไม่มีแกนเท่านั้น [12]

1. วงจรการทดสอบ



รูปที่ 3.14 วงจรทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนของกับดักฟ้าผ่า ZnO

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

2. ขั้นตอนการทดสอบ

- 2.1 ก่อนทำการทดสอบจะต้องทำการปรับเทียบ (Calibration) วงจรทดสอบ และ นำอุปกรณ์ปรับเทียบออกจากวงจรทดสอบก่อนทำการทดสอบทุกครั้ง
- 2.2 ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ผ่านการทำความสะอาดครีบบของฉนวน ตัวตัดวงจร (Disconnect or Fault Indicator) ต้องถูกปลดออกไป และกับดักฟ้าผ่าต้องไม่ผ่านการใช้งานหรือทดสอบมาก่อน
- 2.3 ทำการปรับเทียบวงจรทดสอบและบันทึกค่าการปรับเทียบดังนี้
 การปรับเทียบ
 ประจุที่ป้อน.....pC
 ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด.....pC
 ค่าBack ground Noise.....
 ค่าสเกลแฟคเตอร์ของการวัด PD.....
- 2.4 ป้อนแรงดันให้กับกับดักฟ้าผ่าขนาดเท่ากับอัตราแรงดันของกับดักฟ้าผ่า (rate voltage) ค้างไว้ประมาณ 2 s – 10 s แล้วลดแรงดันลงเหลือ 1.05 เท่าของแรงดันใช้งานต่อเนื่อง (Continuous operating voltage) วัดค่าการเกิดดีสชาร์จบางส่วน
- 2.5 บันทึกค่าการเกิดดีสชาร์จ

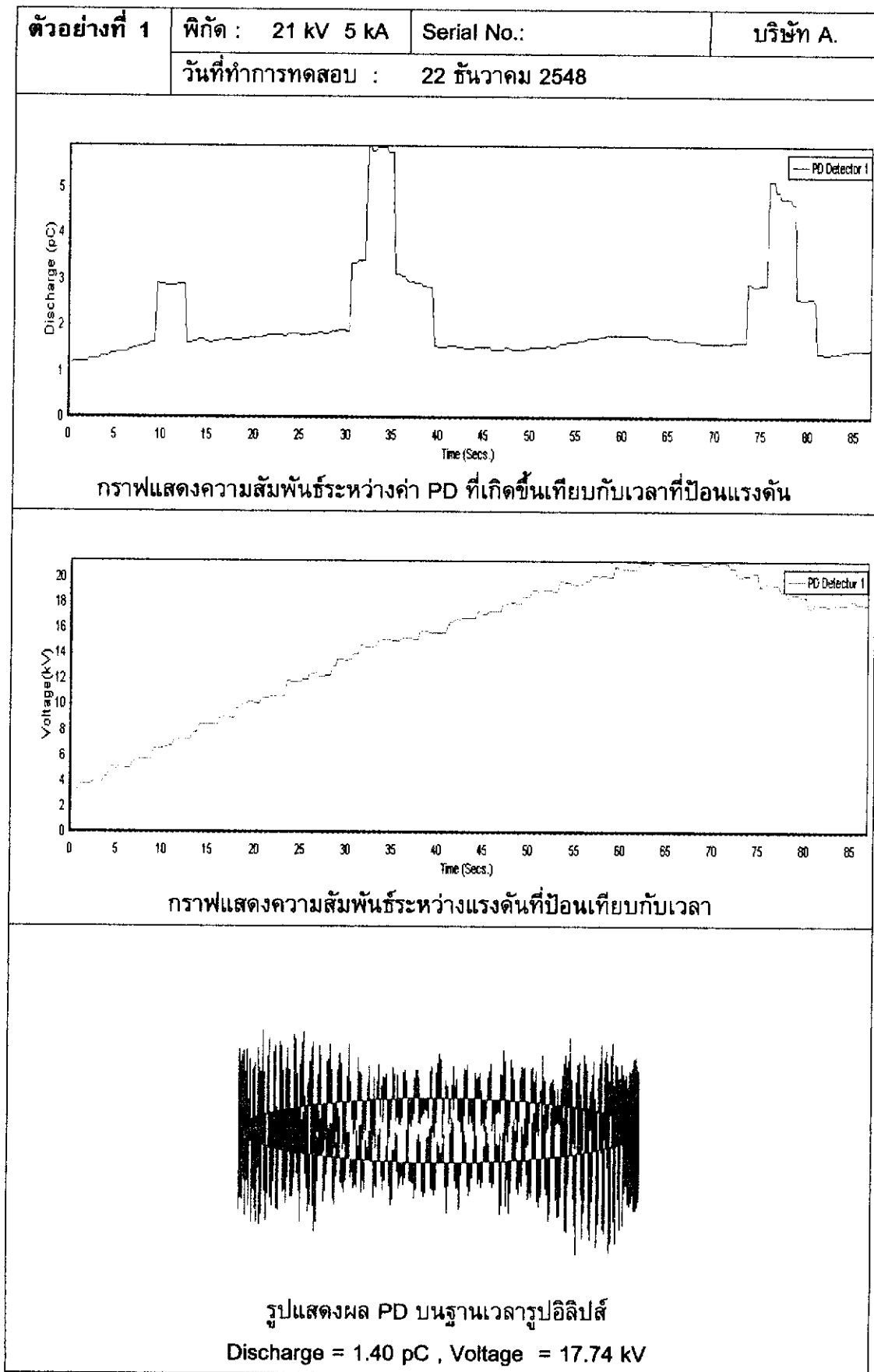
3. ผลการทดสอบ

สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ ความดันของอากาศมีค่าเท่ากับ 763 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 27.7 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์

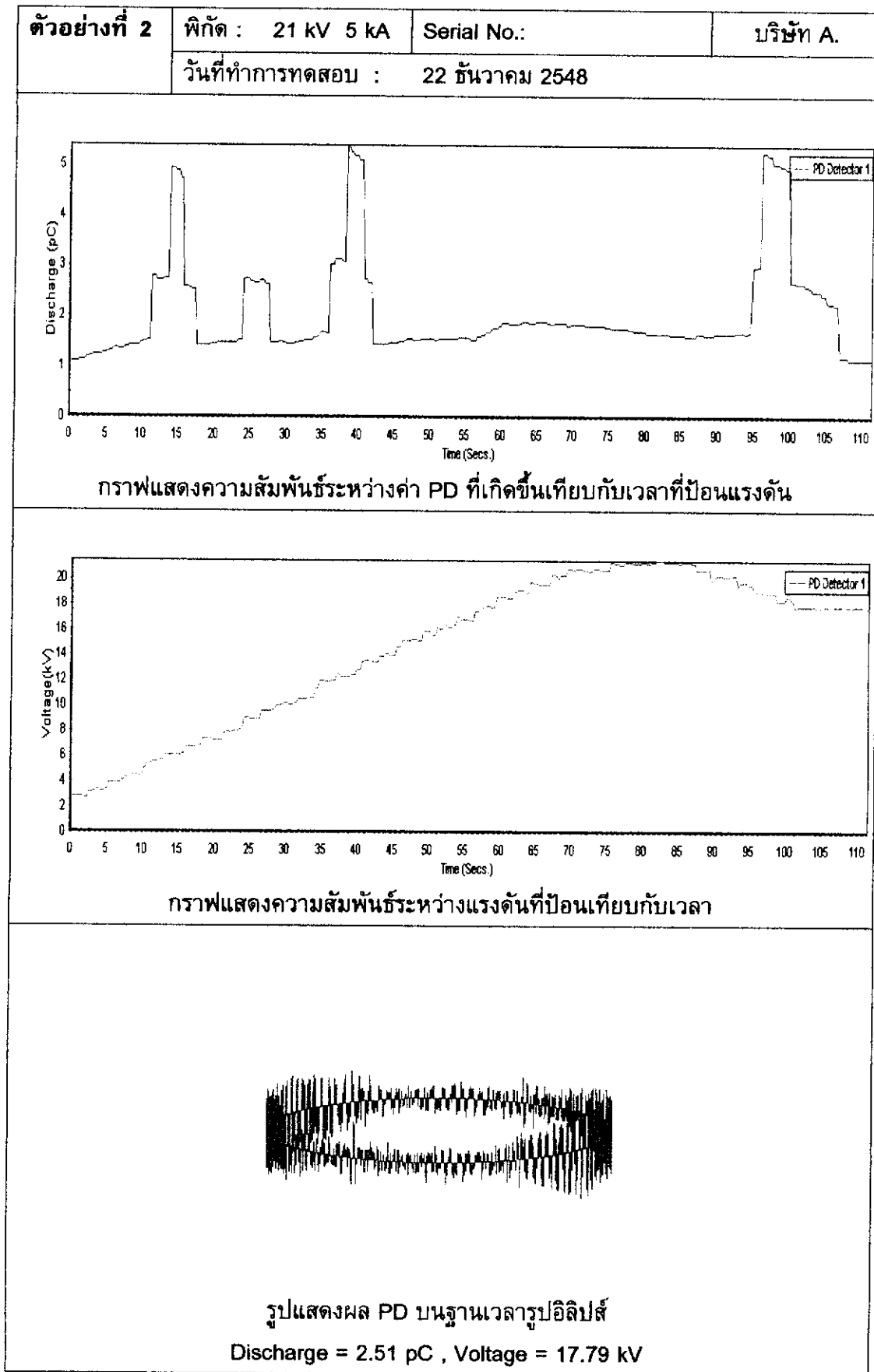
การปรับเทียบ

- ประจุที่ป้อน 100 pC
- ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด 100 pC
- ค่า Back ground Noise 0.83 pC
- ค่าสเกลแฟคเตอร์ของการวัด PD เท่ากับ 1

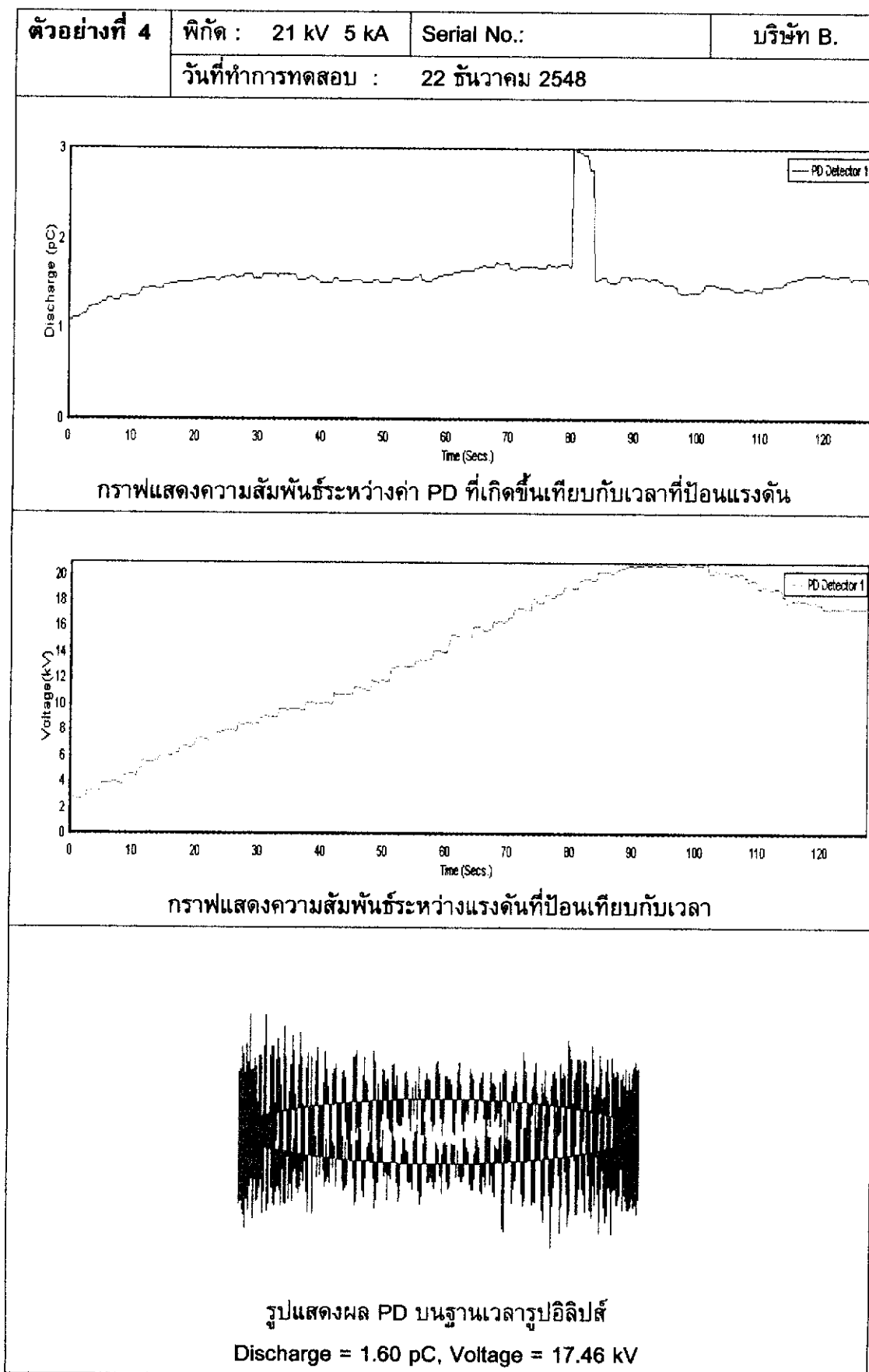
ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของกับดักฟ้าผ่า พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A. ดังแสดงในรูปที่ 3.15 – รูปที่ 3.17 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของกับดักฟ้าผ่า พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B. ดังแสดงในรูปที่ 3.18 – รูปที่ 3.20 และผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของกับดักฟ้าผ่า พิกัด 24 kV 10 kA บริษัท B. ดังแสดงในรูปที่ 3.21 – รูปที่ 3.23



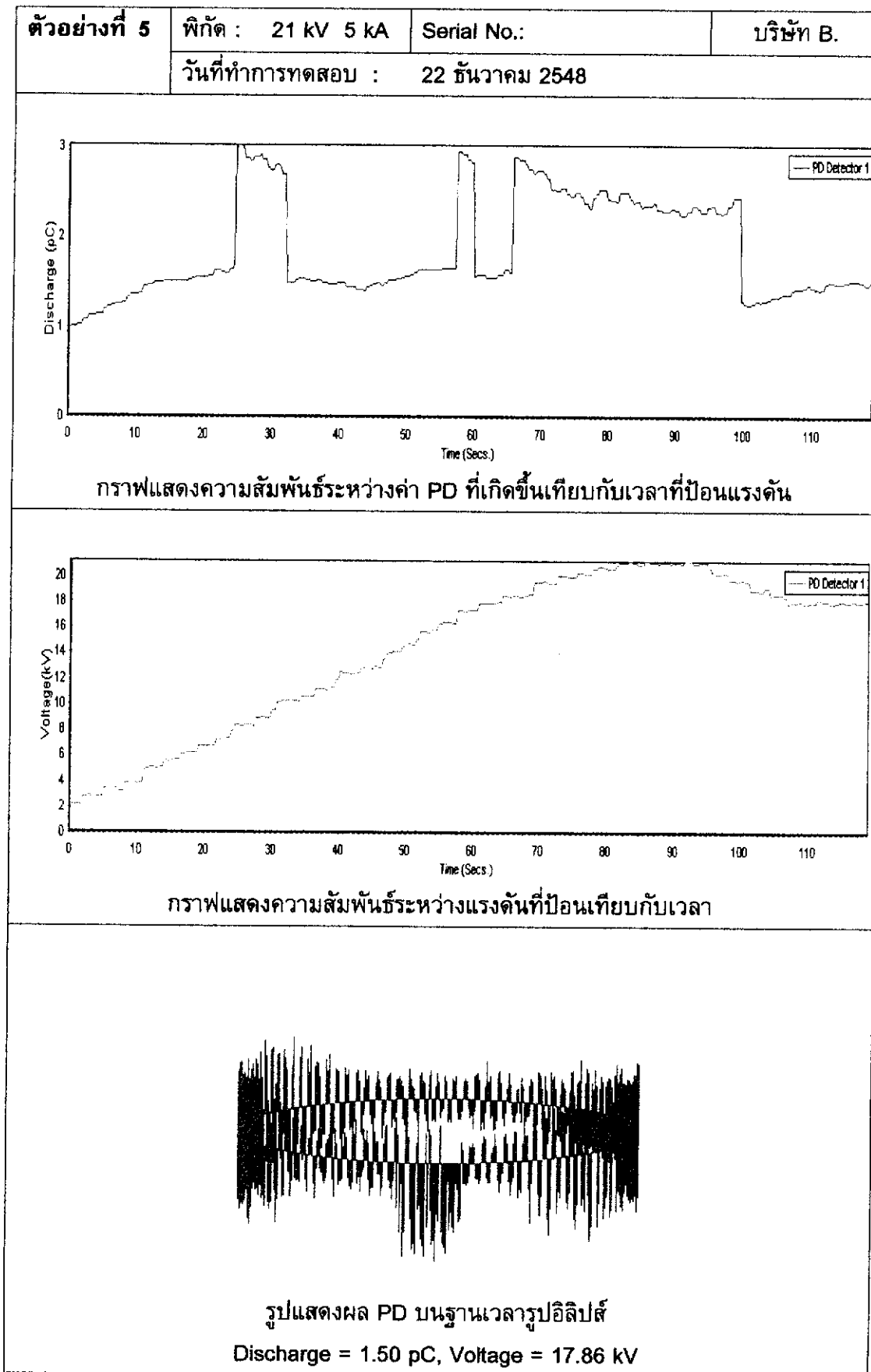
รูปที่ 3.15 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกักเก็บไฟฟ้าผ้ตัวอย่างที่ 1



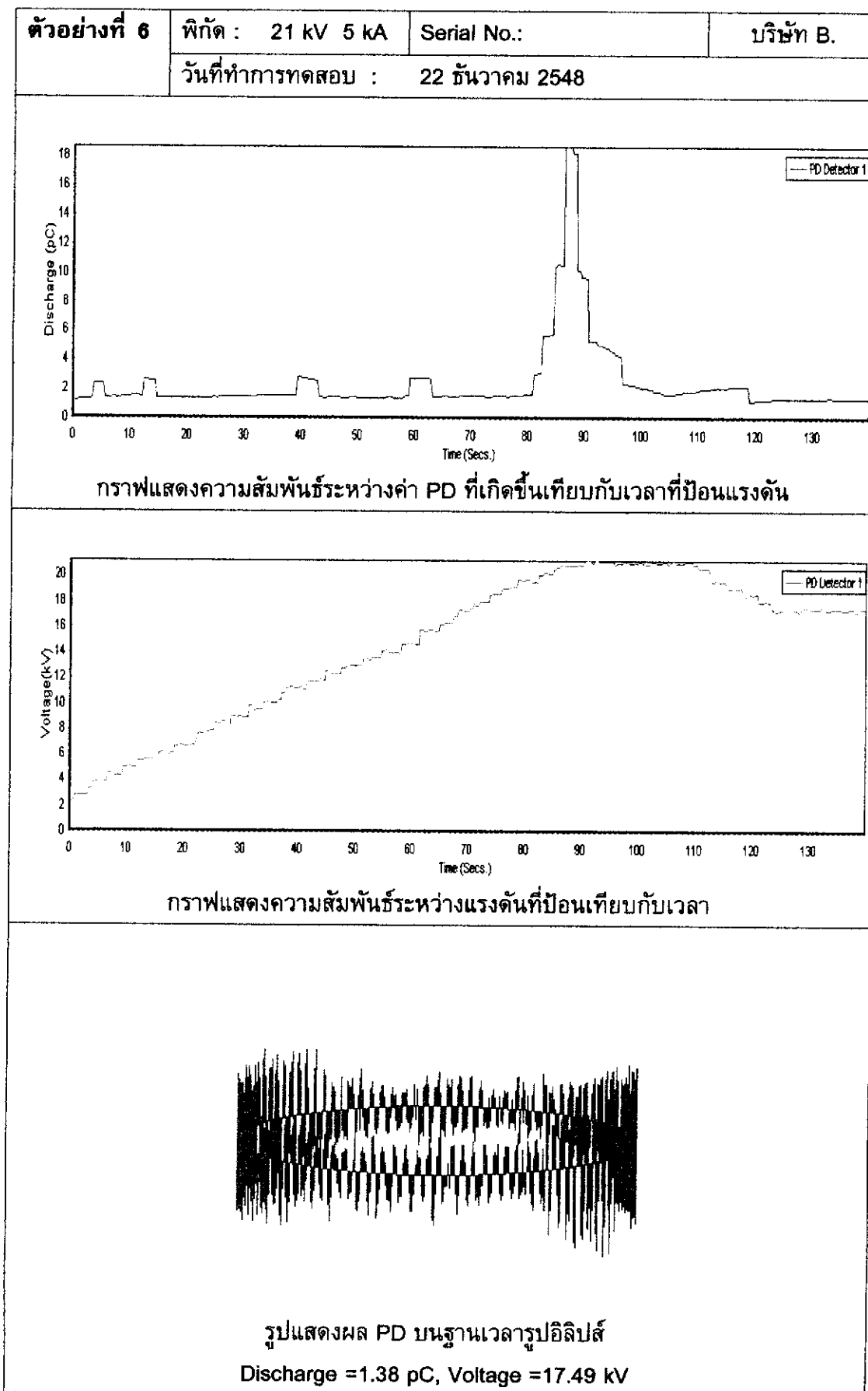
รูปที่ 3.16 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 2



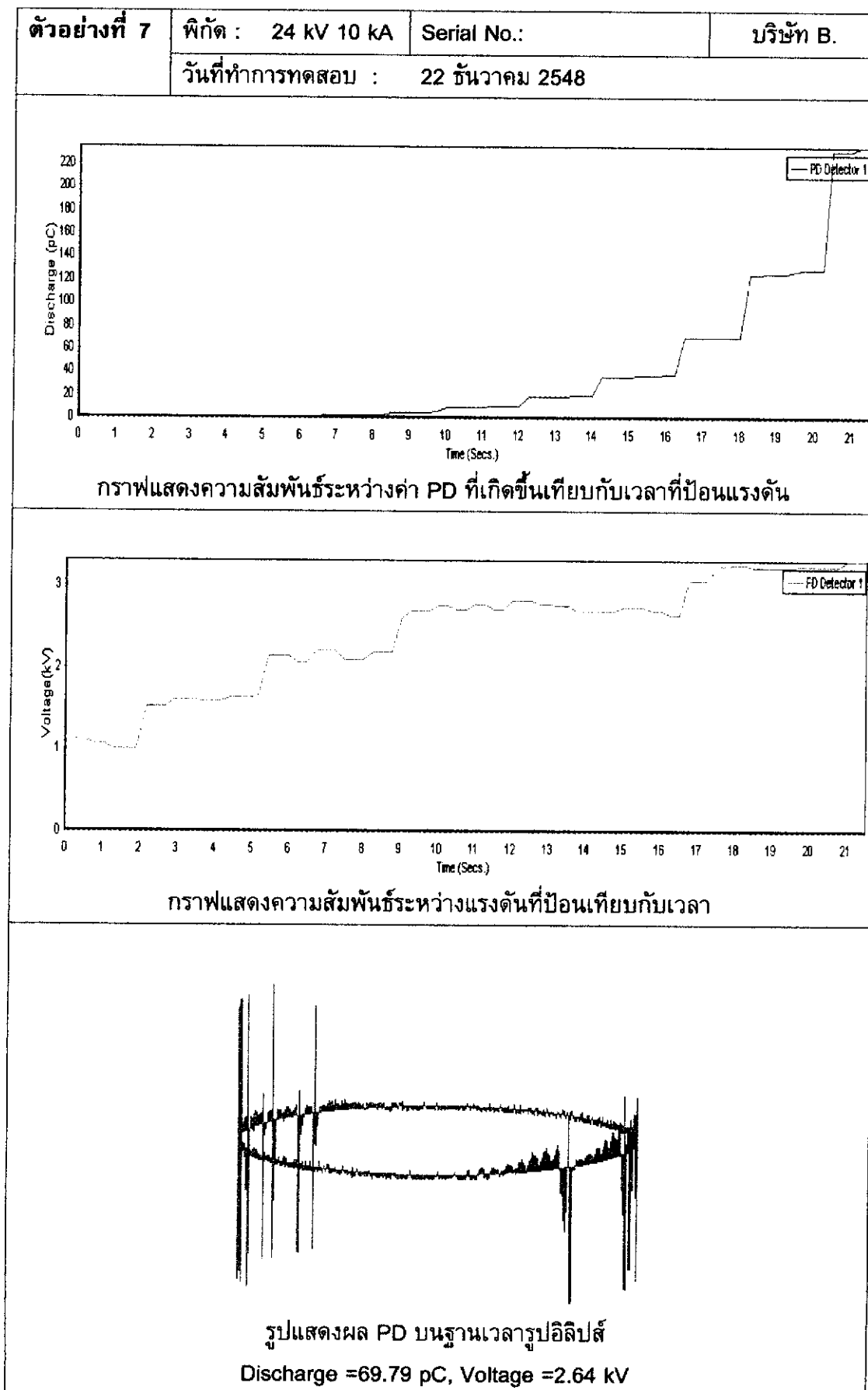
รูปที่ 3.18 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 4



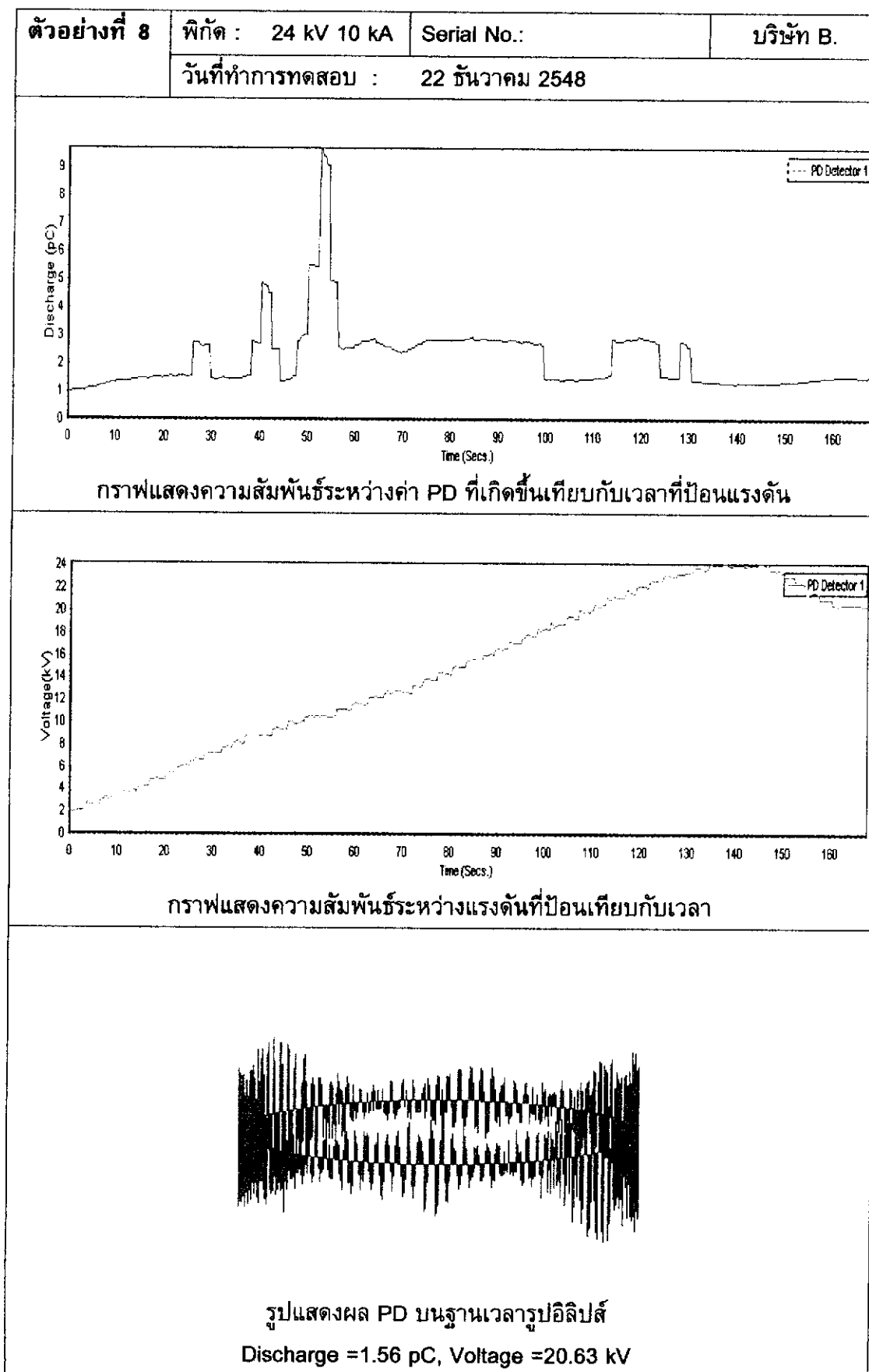
รูปที่ 3.19 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 5



รูปที่ 3.21 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 6

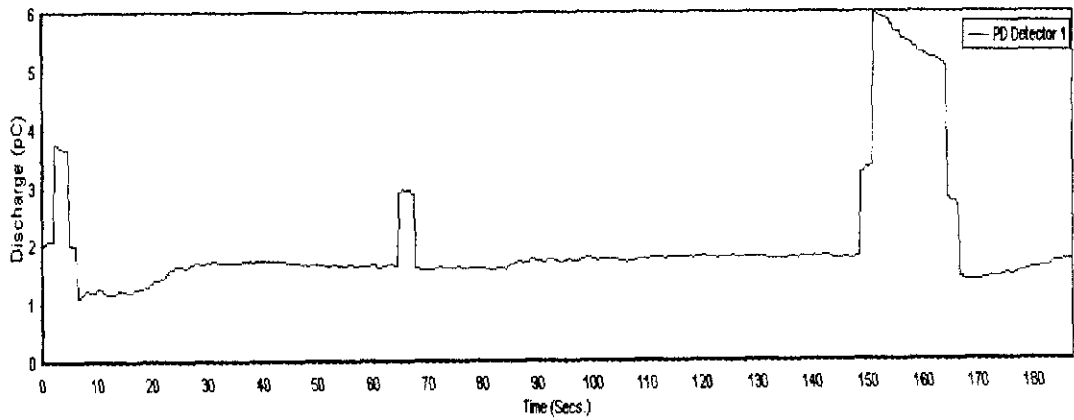


รูปที่ 3.20 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 7

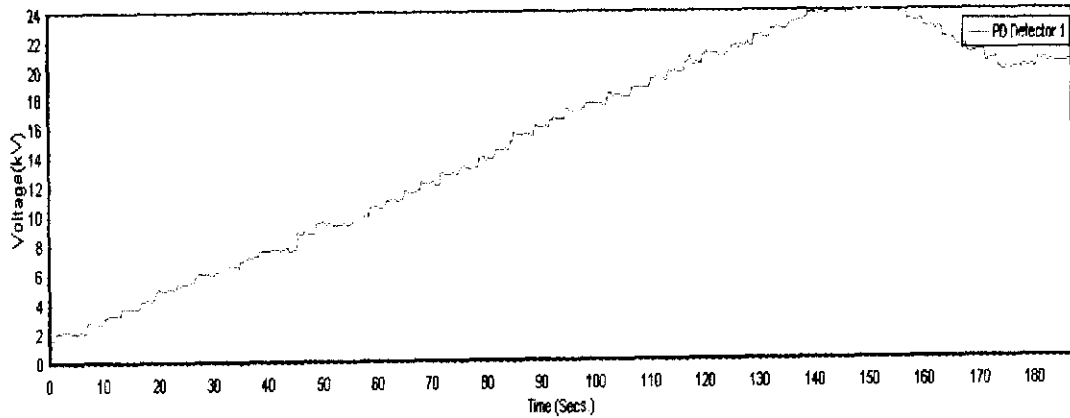


รูปที่ 3.22 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 8

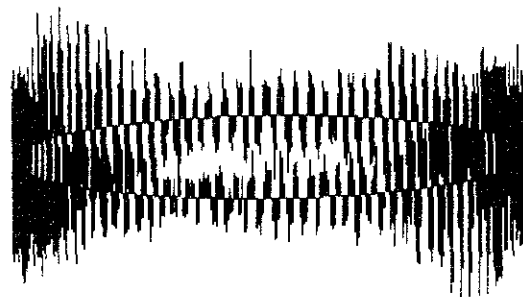
ตัวอย่างที่ 9	พิกัด : 24 kV 10 kA	Serial No.:	บริษัท B.
	วันที่ทำการทดสอบ : 22 ธันวาคม 2548		



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PD ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่ป้อนแรงดัน



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนเทียบกับเวลา



รูปแสดงผล PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์
Discharge = 1.64 pC, Voltage = 20.64 kV

รูปที่ 3.23 ผลการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนภายในของกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 9

4. สรุปผลการทดสอบ

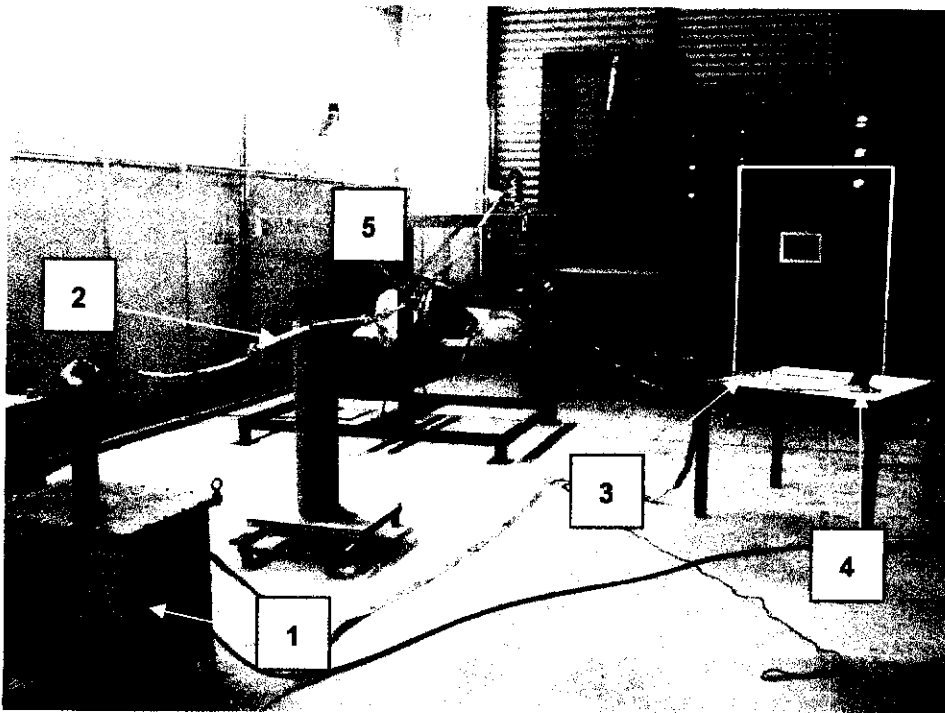
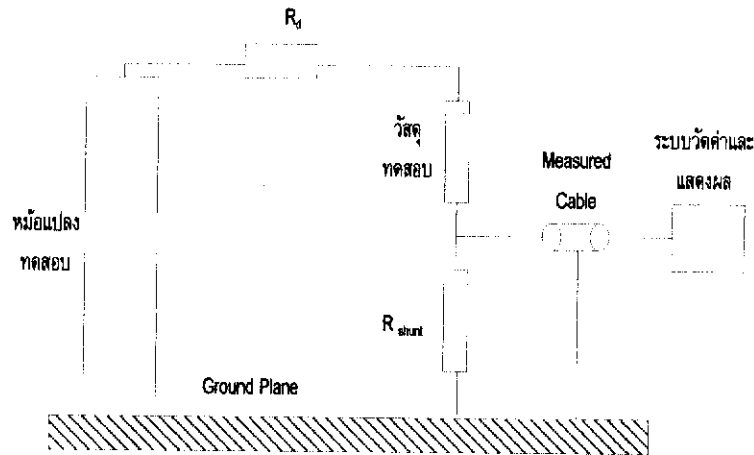
ค่าการดิสชาร์จที่วัดได้จากการทดสอบต้องมีค่าไม่เกินค่ากำหนดในมาตรฐาน IEC 60099-4 คือ ค่าที่วัดได้ต้องมีค่าไม่เกิน 10 pC [12]

จากการทดสอบวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดัน 1.05 เท่าของแรงดันใช้งานต่อเนื่องของกับดักฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60099-4 พบว่ากับดักฟ้าผ่า พิกัด 21 kV 5 kA ทั้ง 6 ตัวอย่างทดสอบ มีค่าการดิสชาร์จบางส่วนอยู่ในช่วงประมาณ 1.40 – 2.51 pC และกับดักฟ้าผ่า พิกัด 24 kV 10 kA จำนวน 2 ตัวอย่างทดสอบมีค่าการดิสชาร์จบางส่วนอยู่ในช่วง 1.56 – 1.64 pC ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ 7 ซึ่งเป็นกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA มีค่าการดิสชาร์จบางส่วนสูงมากประมาณ 69.79 pC ที่ระดับแรงดัน 2.64 kV ทำให้ไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันได้อีก เนื่องจากอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ทดสอบ แต่ได้ทำการทดสอบซ้ำอีกครั้งก็ได้ผลเช่นเดียวกับการทดสอบครั้งแรก จากรูปการแสดงการดิสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปอิลิปส์ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจพบเป็นการดิสชาร์จภายในตัวกับดักฟ้าผ่า [1] ดังนั้นกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA ตัวอย่างทดสอบที่ 1 – 6 และกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA ตัวอย่างทดสอบที่ 8 และ 9 ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ส่วนกับดักฟ้าผ่า พิกัด 24 kV 10 kA ตัวอย่างทดสอบที่ 7 ไม่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60099-4

3.2.2 การทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงาน (Reference Voltage)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบแรงดันเริ่มทำงานซึ่งกำหนดมาจากบริษัทผู้ผลิต [12]

1. วงจรการทดสอบ



รูปที่ 3.24 วงจรทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มทำงาน

- เมื่อ
- 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 5 kVA 230 V / 100 kV 50 Hz
 - 2 คือ ความต้านทานจำกัดกระแส พิกัด 0.49 M Ω
 - 3 คือ ความต้านทานชั๊นท์ พิกัด 29.65 k Ω 30 W
 - 4 คือ โวลต์มิเตอร์
 - 5 คือ กั๊บดั๊กฟ้าผ่า

2. ขั้นตอนการทดสอบ

- 2.1 ก่อนทำการทดสอบต้องทำความสะอาดผิวครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าให้สะอาด เพื่อไม่ให้ความสกปรกทำให้เกิดการวาวไฟตามผิว
- 2.2 ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าตามลักษณะการใช้งาน
- 2.3 ป้อนแรงดันให้กับกับดักฟ้าผ่าในขณะเดียวกันวัดขนาดกระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า ปรับแรงดันเพิ่มขึ้นจนได้ขนาดกระแสรั่วไหลตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด
- 2.4 บันทึกผลการทดสอบ

3. ผลการทดสอบ

สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ ความดันของอากาศมีค่าเท่ากับ 763 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 27.7 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงานของกับดักฟ้าผ่า ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบหาแรงดันเริ่มทำงานของกับดักฟ้าผ่า

กับดักฟ้าผ่า	ระดับแรงดันเริ่มทำงาน (kV) ที่ 1 mA
ตัวอย่างที่ 1 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A.	32.91
ตัวอย่างที่ 2 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A.	33.23
ตัวอย่างที่ 3 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A.	33.17
ตัวอย่างที่ 4 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B.	32.15
ตัวอย่างที่ 5 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B.	32.15
ตัวอย่างที่ 6 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B.	32.21
ตัวอย่างที่ 7 พิกัด 24 kV 10 kA บริษัท B.	36.08
ตัวอย่างที่ 8 พิกัด 24 kV 10 kA บริษัท B.	36.08
ตัวอย่างที่ 9 พิกัด 24 kV 10 kA บริษัท B.	36.25

4. สรุปผลการทดสอบ

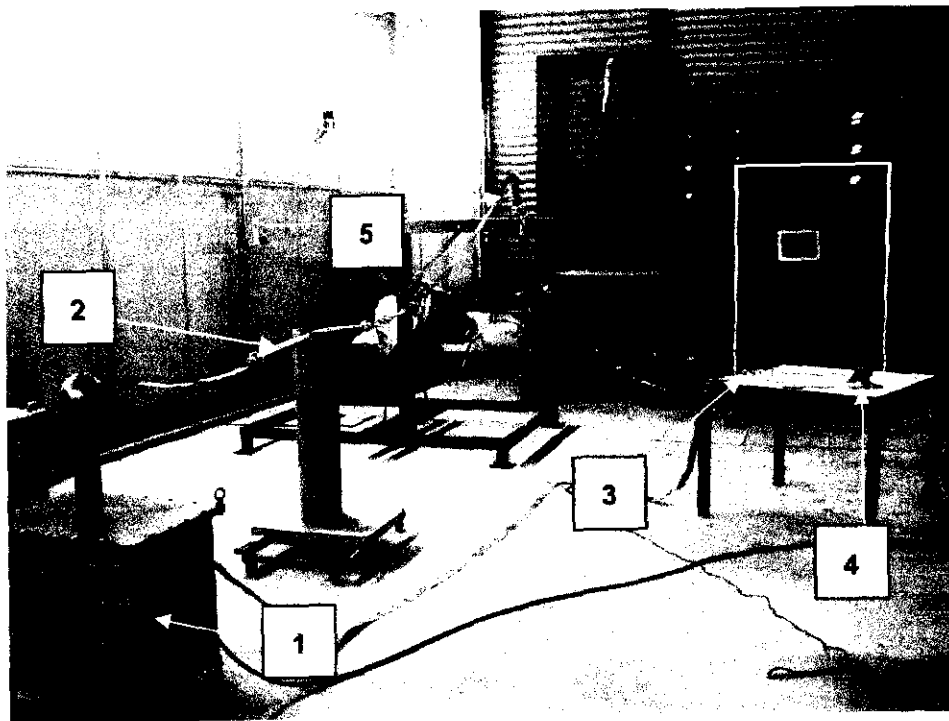
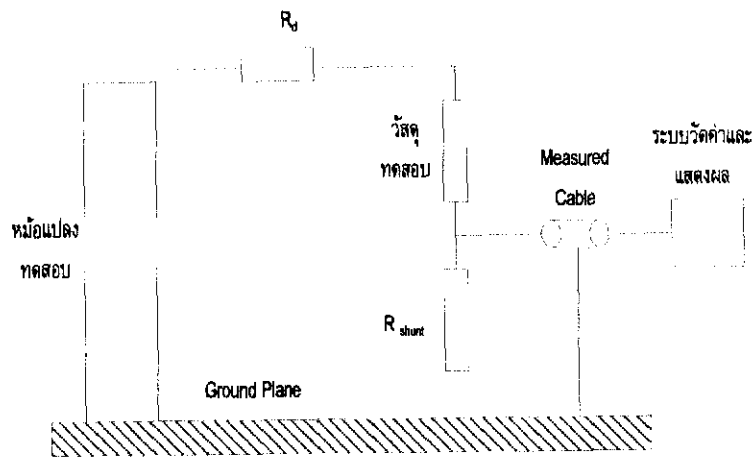
ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับกับดักฟ้าผ่าจนมีกระแสรั่วไหลตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด จะถูกกำหนดเป็นค่าแรงดันเริ่มทำงาน [12]

จากผลการทดสอบพบว่ากับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA มีระดับแรงดันเริ่มทำงานที่ 1 mA อยู่ในช่วง 32.15 – 32.91 kV ส่วนกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA มีระดับแรงดันเริ่มทำงานที่ 1 mA อยู่ในช่วง 36.08 – 36.25 kV

3.2.3 การทดสอบหากระแสรั่วไหล (Leakage Current)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่าในขณะที่ใช้งานที่ระดับแรงดันปกติและขณะที่เกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

1. วงจรการทดสอบ



รูปที่ 3.25 วงจรทดสอบหาค่ากระแสรั่วไหล

- เมื่อ
- 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 5 kVA 230 V / 100 kV 50 Hz
 - 2 คือ ความต้านทานจำกัดกระแส พิกัด 0.49 M Ω
 - 3 คือ ความต้านทานฉันท์ พิกัด 29.65 k Ω 30 W
 - 4 คือ โวลต์มิเตอร์
 - 5 คือ กับดักฟ้าผ่า

2. ขั้นตอนการทดสอบ

- 2.1 ก่อนทำการทดสอบต้องทำความสะอาดผิวครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าให้สะอาด เพื่อไม่ให้ความสกปรกทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว
- 2.2 ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าตามลักษณะการใช้งานจริง
- 2.3 ป้อนแรงดันให้กับกับดักฟ้าผ่ามีค่าเท่ากับค่าแรงดันเฟส – กราวน์ของอัตราแรงดัน ในขณะเดียวกันวัดขนาดกระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า ปรับแรงดันเพิ่มขึ้นจนเท่ากับแรงดันเกินชั่วขณะ โดยกับดักฟ้าผ่าขนาด 21 kV และ 24 kV มีแรงดันใช้งานต่อเนื่องสูงสุดเท่ากับ 17.0 kV และ 19.5 kV ตามลำดับ
- 2.4 บันทึกผลการทดสอบ

3. ผลการทดสอบ

สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ ความดันของอากาศมีค่าเท่ากับ 751 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 28.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 63.5 เปอร์เซ็นต์ ผลการคำนวณค่าตัวประกอบแปลงความหนาแน่นอากาศ ; K_d มีค่าเท่ากับ 0.96 และค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้น ; K_h มีค่าเท่ากับ 0.97 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบของครอบเอาท์พิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบหากระแสรั่วไหลของกับดักฟ้าผ่า

กับดักฟ้าผ่า	ระดับแรงดัน (kV)	ขนาดกระแสรั่วไหล (mA)
ตัวอย่างที่ 1 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A.	12.7	0.17
	17.0	0.22
ตัวอย่างที่ 2 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A.	12.7	0.17
	17.0	0.22
ตัวอย่างที่ 3 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท A.	12.7	0.17
	17.0	0.22
ตัวอย่างที่ 4 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B.	12.7	0.22
	17.0	0.29
ตัวอย่างที่ 5 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B.	12.7	0.20
	17.0	0.28
ตัวอย่างที่ 6 พิกัด 21 kV 5 kA บริษัท B.	12.7	0.20
	17.0	0.27

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) ผลการทดสอบหากระแสรั่วไหลของกัปดักฟ้าผ่า

กัปดักฟ้าผ่า	ระดับแรงดัน (kV)	ขนาดกระแสรั่วไหล (mA)
ตัวอย่างที่ 7 พิกัด 24 kV 10 kA บริษัท B.	13.8	0.25
	19.5	0.38
ตัวอย่างที่ 8 พิกัด 24 kV 10 kA บริษัท B.	13.8	0.26
	19.5	0.39
ตัวอย่างที่ 9 พิกัด 24 kV 10 kA บริษัท B.	13.8	0.26
	19.5	0.39

4. สรุปผลการทดสอบ

กระแสรั่วไหลที่วัดได้ที่ระดับแรงดันที่กำหนด จะถูกกำหนดเป็นค่ากระแสรั่วไหลของกัปดักฟ้าผ่าในขณะที่ใช้งานที่ระดับแรงดันปกติและขณะที่เกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

จากผลการทดสอบพบว่ากัปดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA มีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันปกติ (12.7 kV) อยู่ในช่วง 0.17 – 0.22 mA และมีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันใช้งานต่อเนื่องสูงสุด (17.0 kV) อยู่ในช่วง 0.22 - 0.29 mA ส่วนกัปดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA มีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันปกติ (13.8 kV) อยู่ในช่วง 0.25 – 0.26 mA และมีค่ากระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันใช้งานต่อเนื่องสูงสุด (19.5 kV) อยู่ในช่วง 0.38 – 0.39 mA

บทที่ 4

การออกแบบและจำลองวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าของครีบนวนกับดักฟ้าผ่า

4.1 การออกแบบลักษณะครีบนวนของกับดักฟ้าผ่า

การออกแบบลักษณะครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าจะต้องคำนึงถึงการกระจายของสนามไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการเกิดควาบไฟตามผิว การออกแบบลักษณะมิติครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าที่ดีจะต้องพยายามออกแบบให้ครีบนวนหรือชั้นของครีบนวนมีผิวโค้งไปตามเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า (Equipotential lines) เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวมีค่าน้อยและมีการกระจายสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงระดับแรงดันที่ใช้งานและพิกัดกระแสต่อเนื่อง โดยที่ความสูงของตัวกับดักฟ้าผ่าจะเป็นการบ่งบอกถึงระดับแรงดัน ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางจะเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงาน (พิกัดกระแส)

การวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าในโครงการนี้จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าได้สะดวกมากขึ้น โดยการวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าที่แสดงต่อไปนี้จะใช้กับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบขึ้น ในเบื้องต้นซึ่งอาศัยข้อมูลจากมาตรฐานข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จากนั้นจะนำข้อมูลครีบนวนจากบริษัทผู้ผลิตมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ แล้วจึงออกแบบปรับปรุงต่อไป

ข้อกำหนดเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 กิโลโวลต์ 10 กิโลแอมแปร์ ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังนี้

ความสูงของตัวกับดักฟ้าผ่า = $251 \pm 10\%$ มิลลิเมตร

ความกว้างของครีบนวน = $103 \pm 10\%$ มิลลิเมตร

ระยะของครีบนวน (creepage distance) ต้องมีระยะไม่น้อยกว่า 600 มิลลิเมตร

กำหนดค่าเปอร์มิตติวิตี ของฉนวนกับดักฟ้าผ่าในการจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมศักย์ และการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของครีบนวนดังนี้

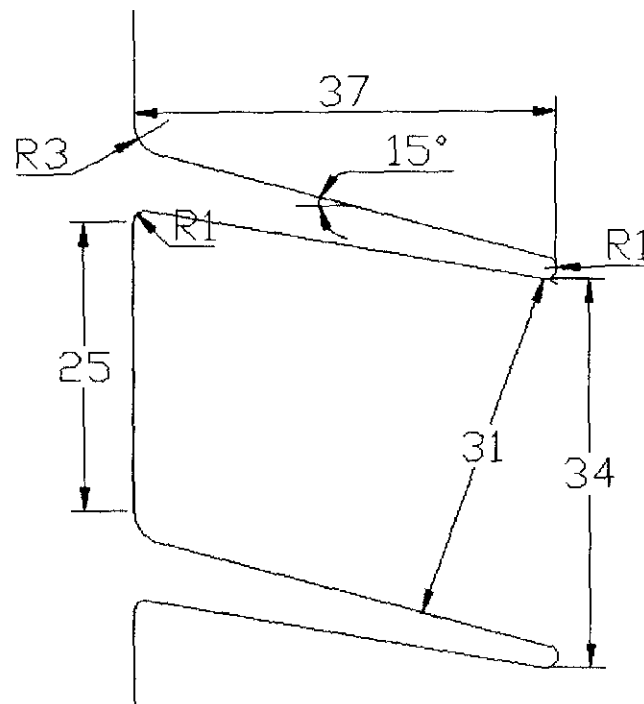
ค่าเปอร์มิตติวิตี ของอากาศ = 1

ค่าเปอร์มิตติวิตี ของซิลิโคน = 4.3

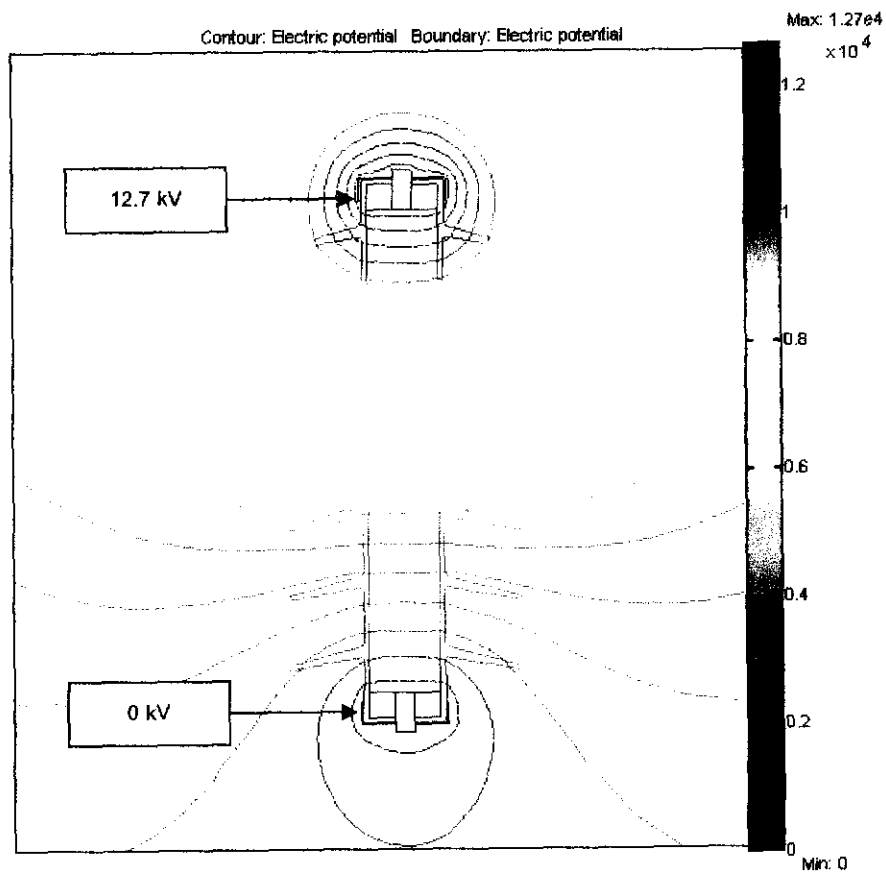
ค่าเปอร์มิตติวิตี ของซิงค์ออกไซด์ = 4

ค่าเปอร์มิตติวิตี ของอลูมิเนียม = 1

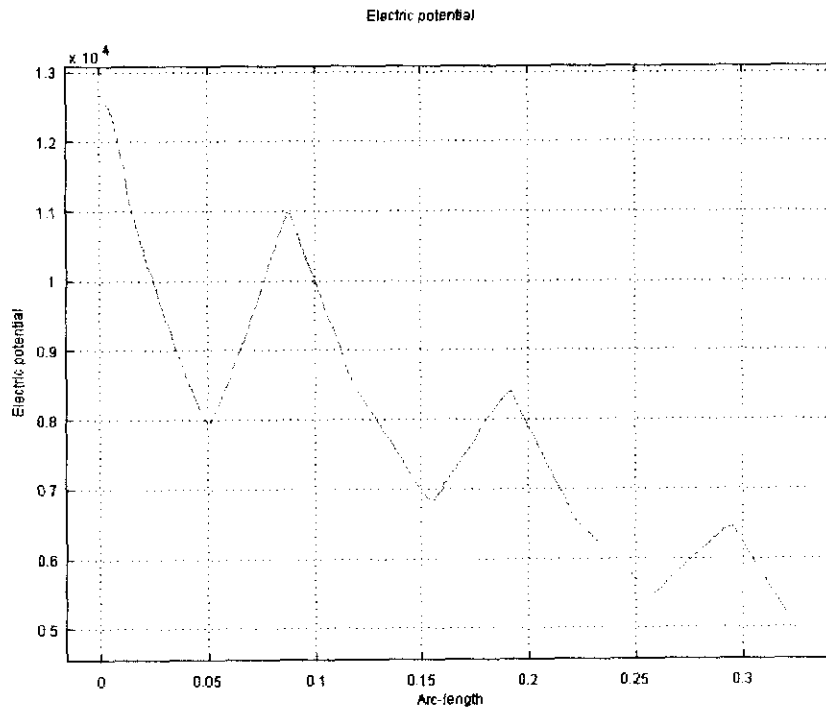
ตัวอย่างที่ 1 ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ครีบนเท่า



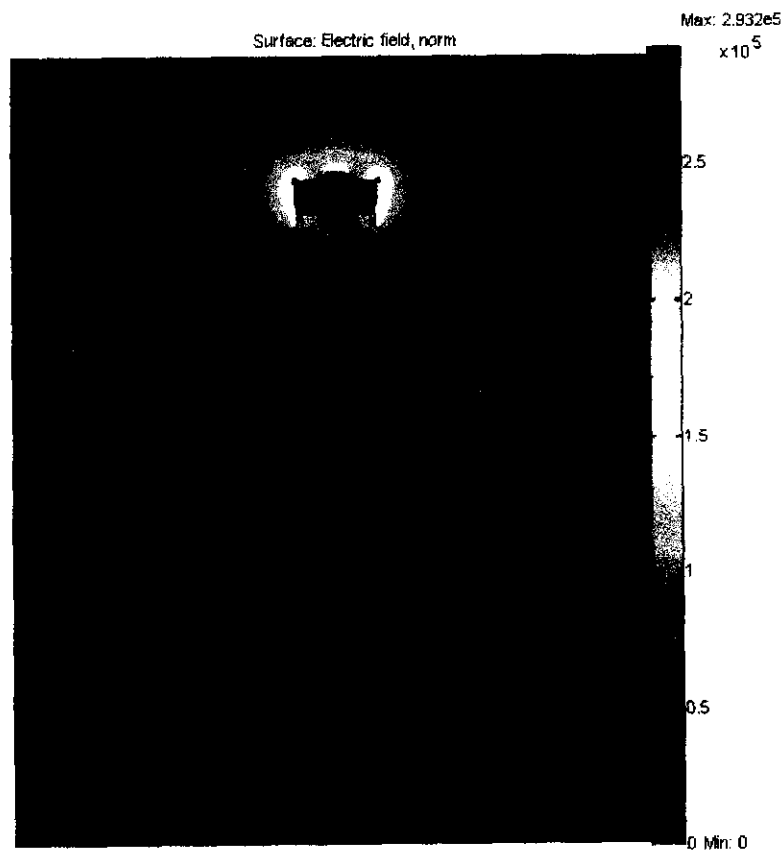
รูปที่ 4.1 การออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ครีบนเท่า



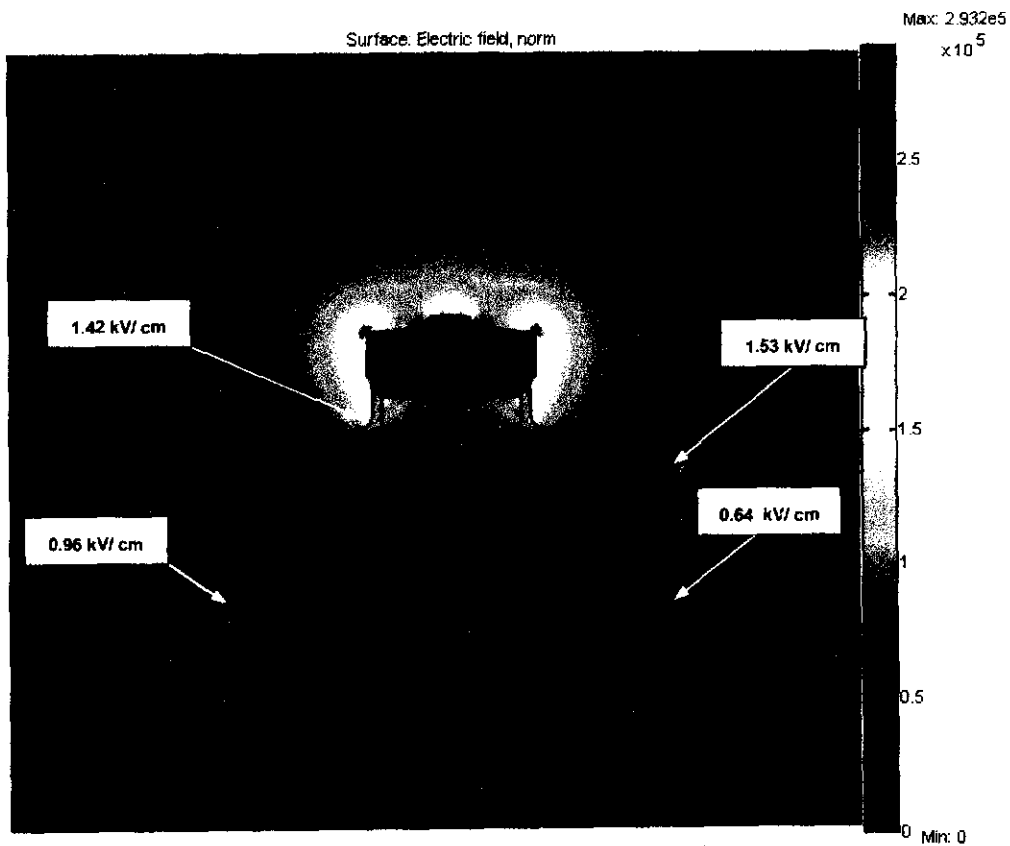
รูปที่ 4.2 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมศักย์ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ครีบนเท่า



รูปที่ 4.3 การจำลองวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ครีบท่อ



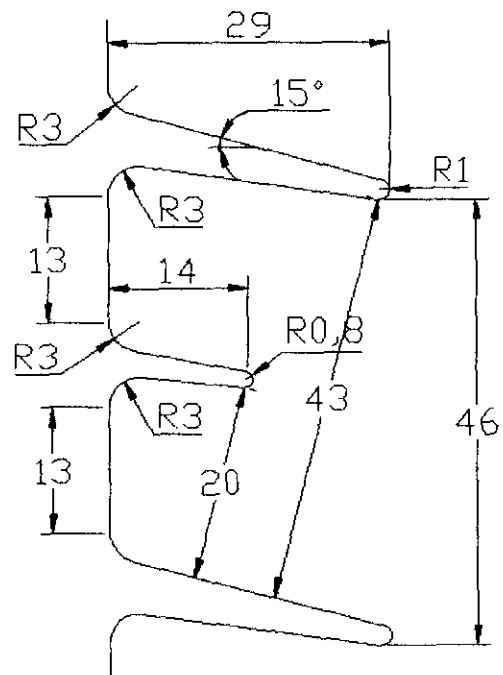
รูปที่ 4.4 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ครีบท่อ



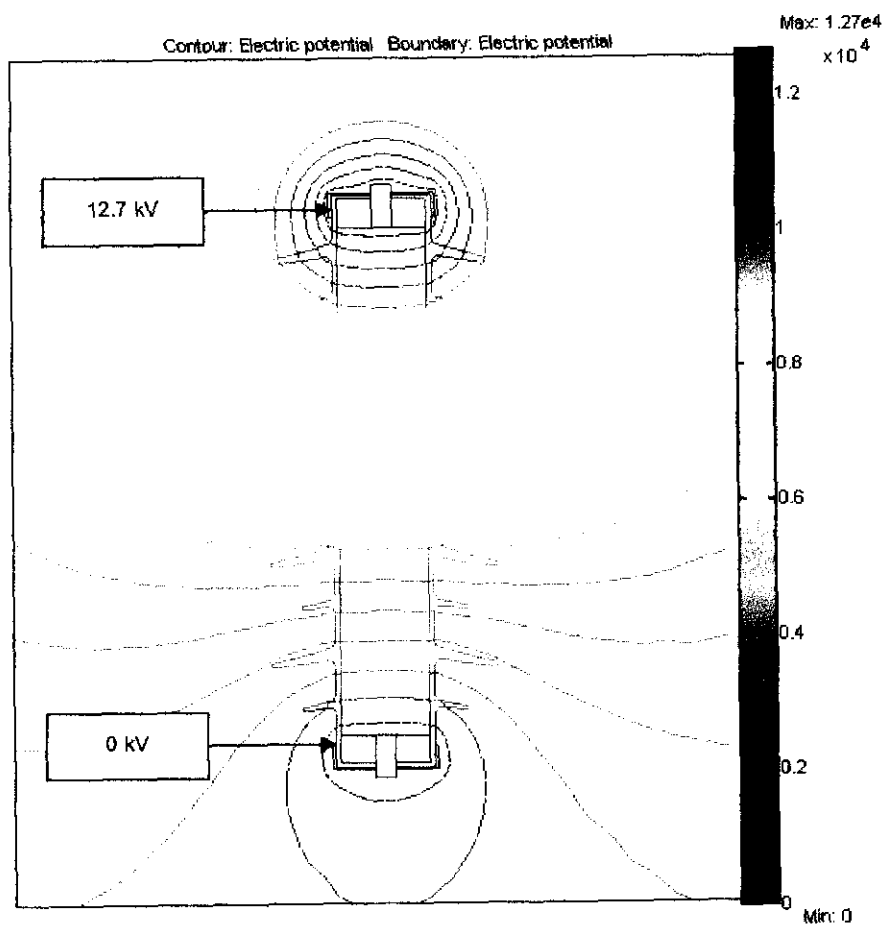
รูปที่ 4.5 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน
กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1 ครีบนวน พิจารณาครีบนวนที่ 1 ถึงครีบนวนที่ 2

จากการออกแบบและวิเคราะห์ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 1 พบว่า
ครีบนวนมีระยะครีบนวนเท่ากับ 740.56 มม. และจากรูปที่ 4.5 พบว่า ที่ผิวครีบนวนมีค่า
ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 1.53 kV/cm ที่บริเวณปลายครีบนวนแรก

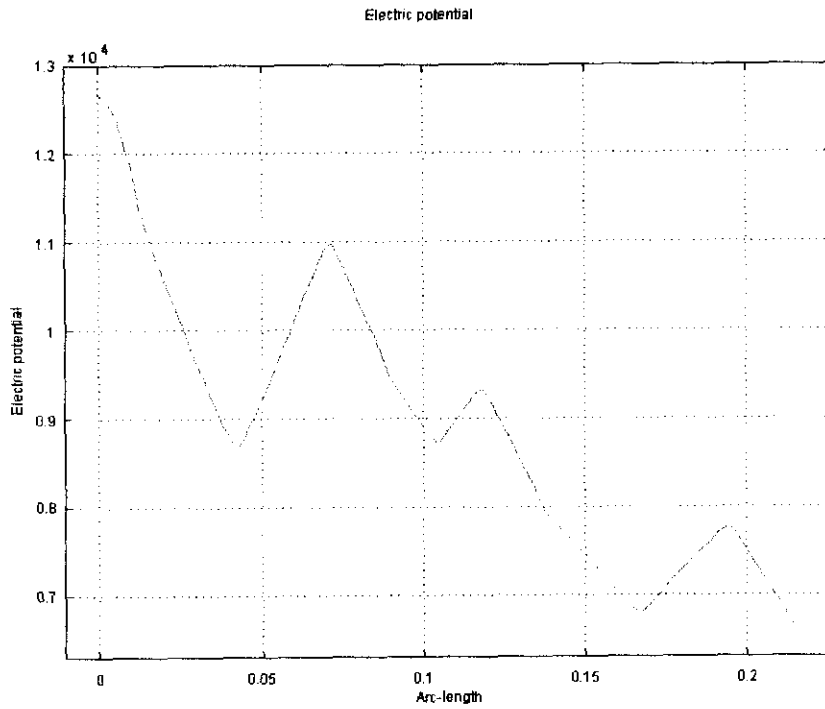
ตัวอย่างที่ 2 ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีบลับ



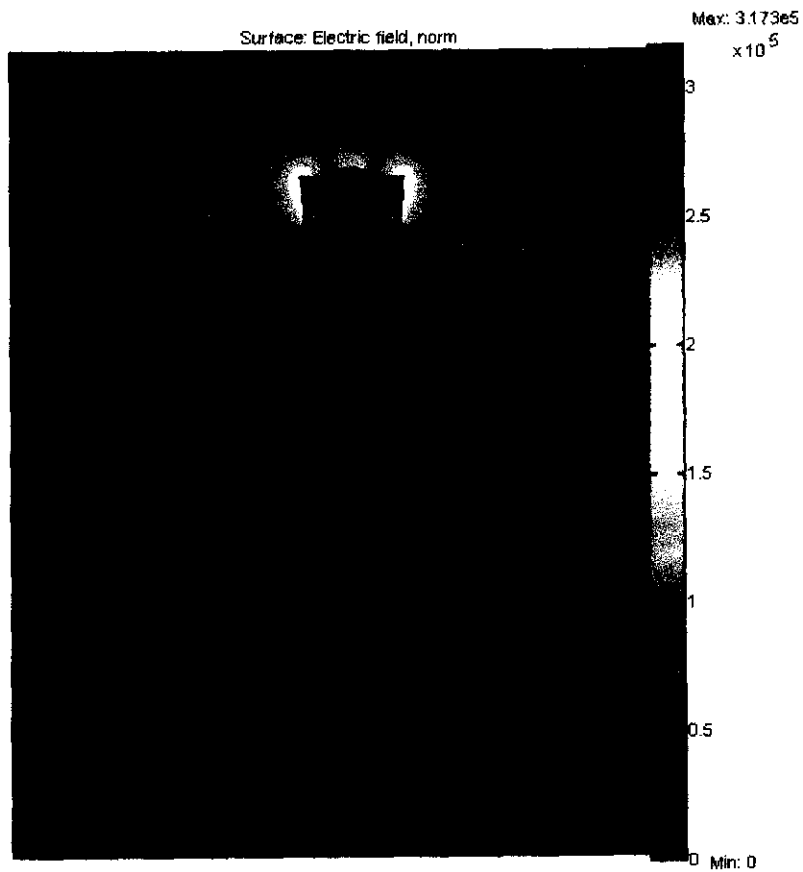
รูปที่ 4.6 การออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีบลับ



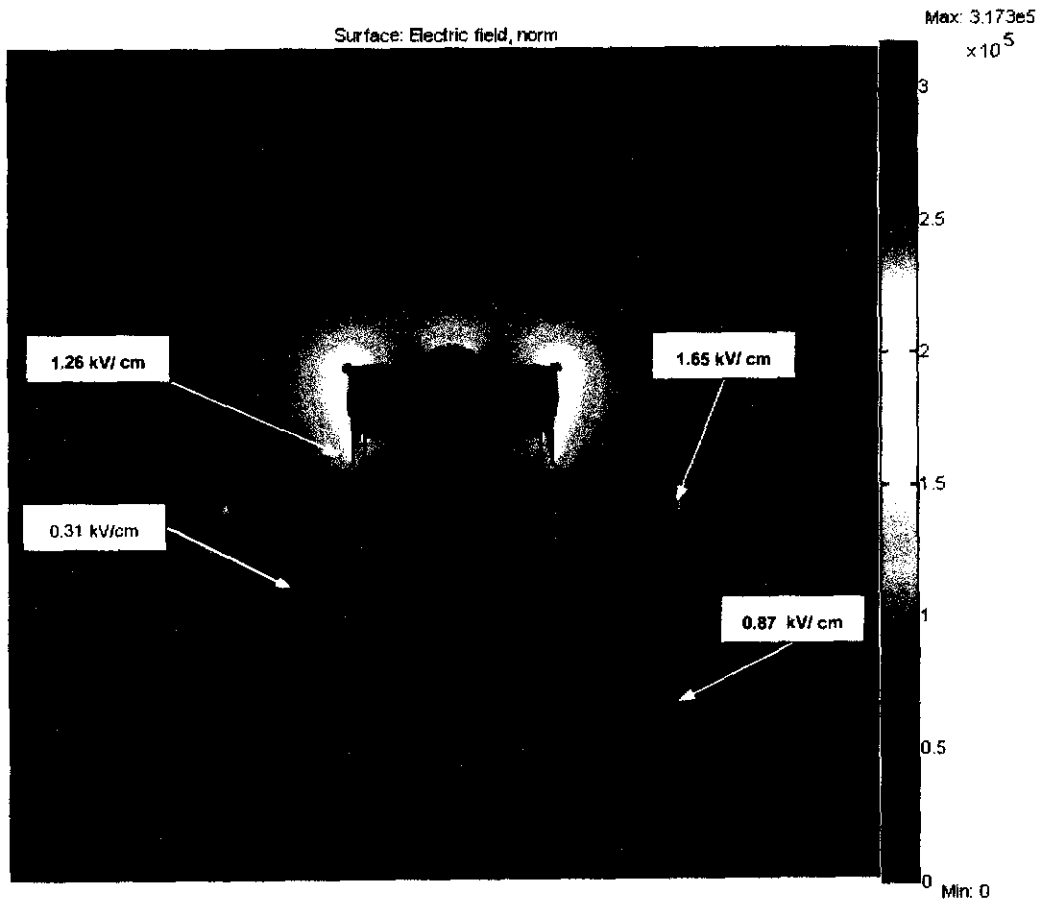
รูปที่ 4.7 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมศักย์ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีบลับ



รูปที่ 4.8 การจำลองวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีบนวน



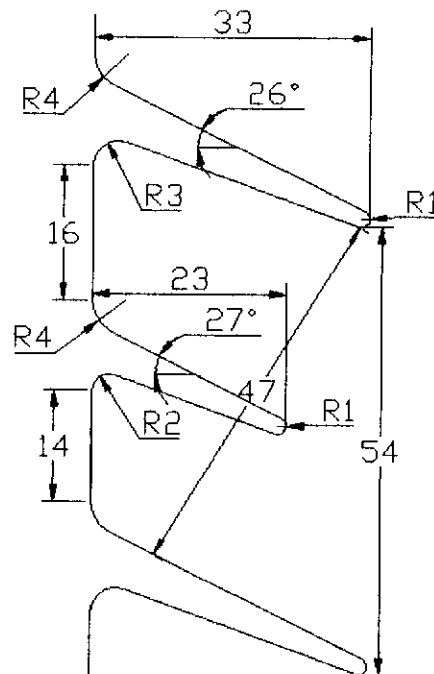
รูปที่ 4.9 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีบนวน



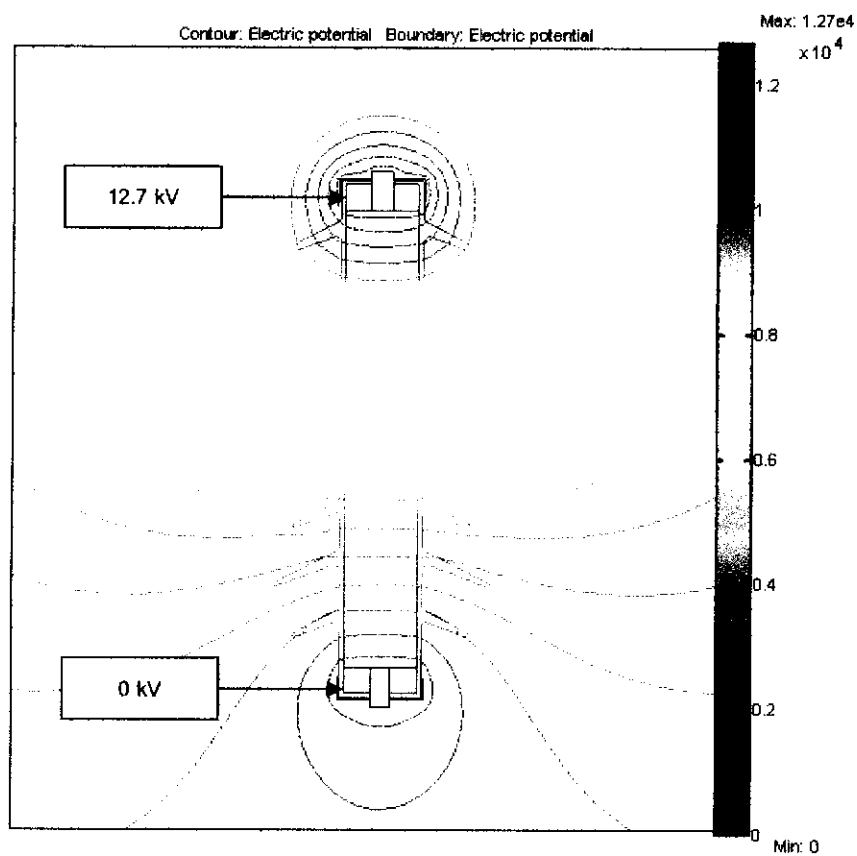
รูปที่ 4.10 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน
กับดักฟ้าผ่าแบบที่ 2 ครีบลับ พิจารณาครีบบที่ 1 ถึงครีบบที่ 3

จากการออกแบบและวิเคราะห์ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 2 พบว่า
ครีบนวนมีระยะครีบท่อกับ 654 มม. และจากรูปที่ 4.10 พบว่า ที่ผิวครีบนวนจะมีค่า
ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 1.65 kV/cm ที่บริเวณปลายครีบบแรก

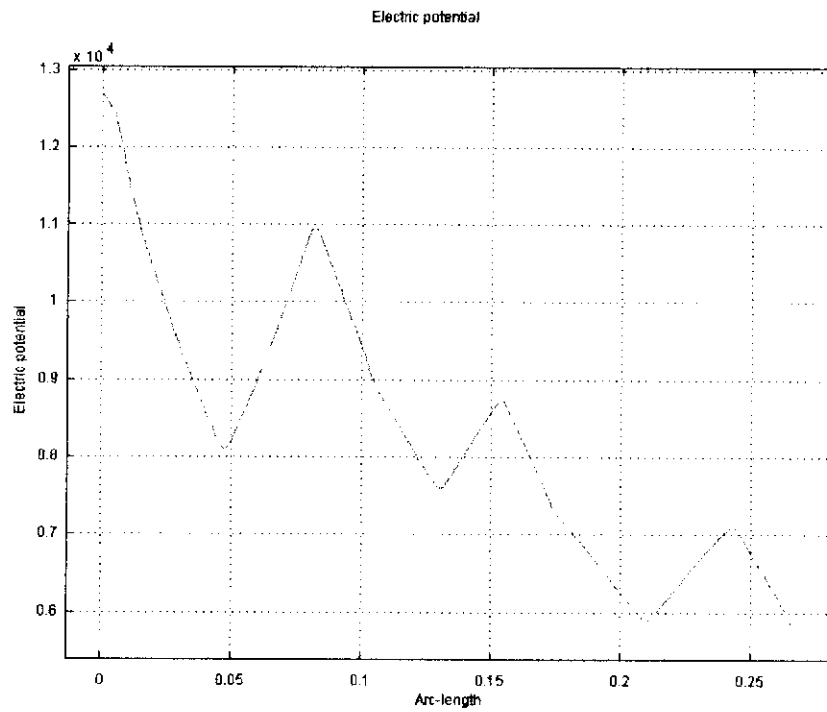
ตัวอย่างที่ 3 ครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่าย



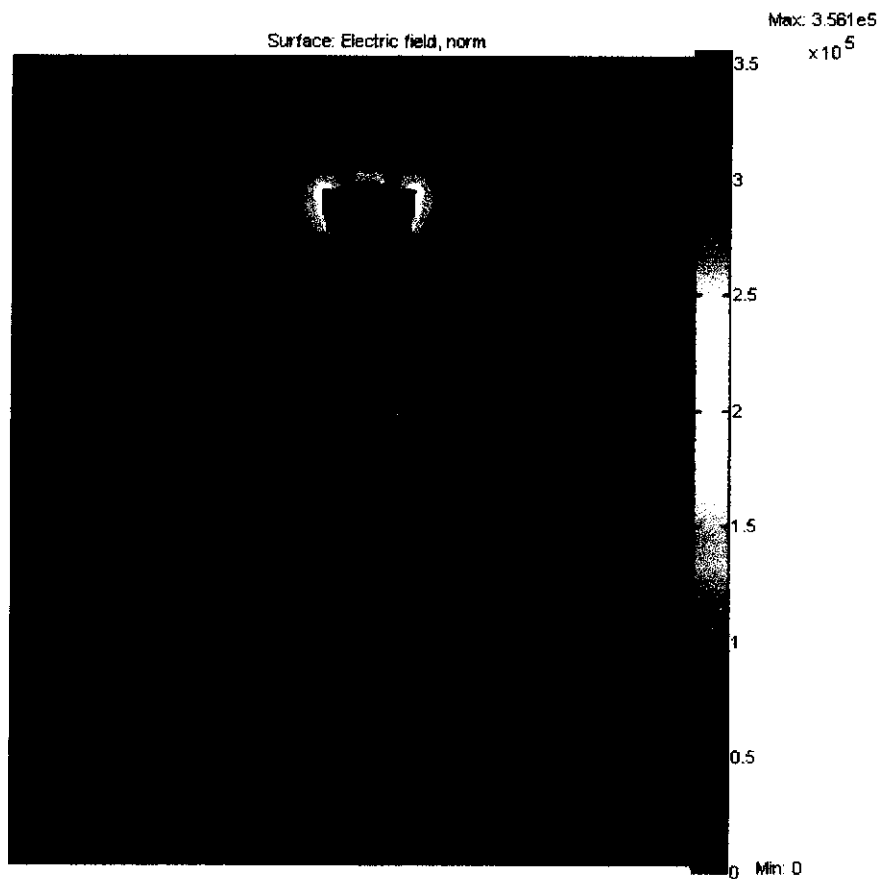
รูปที่ 4.11 ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่าย



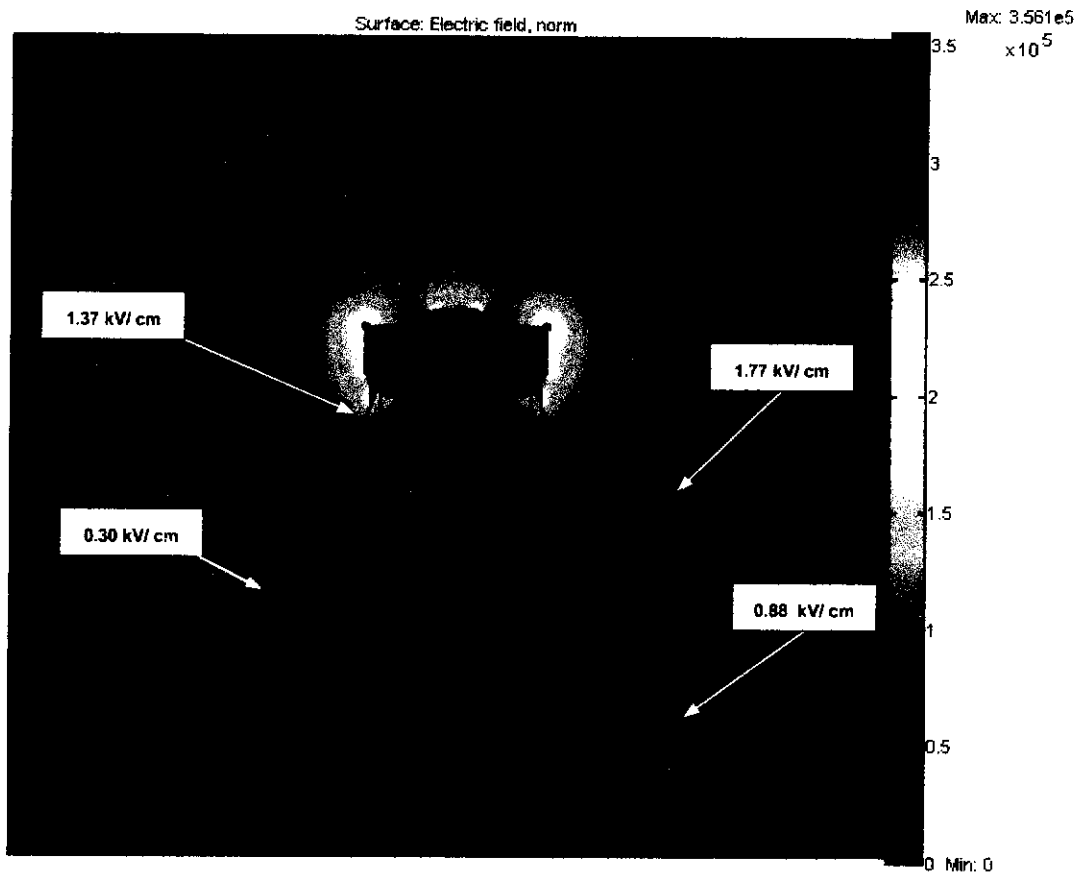
รูปที่ 4.12 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมตักย์ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่าย



รูปที่ 4.13 การจำลองวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครีบนวนที่ใช้ในระบบจำหน่าย



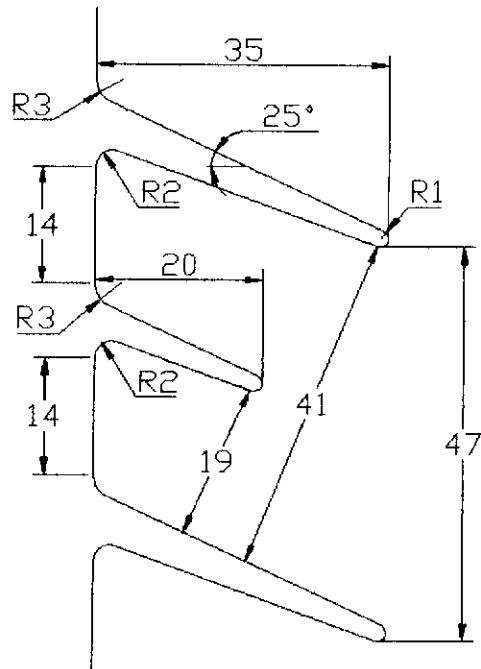
รูปที่ 4.14 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่าย



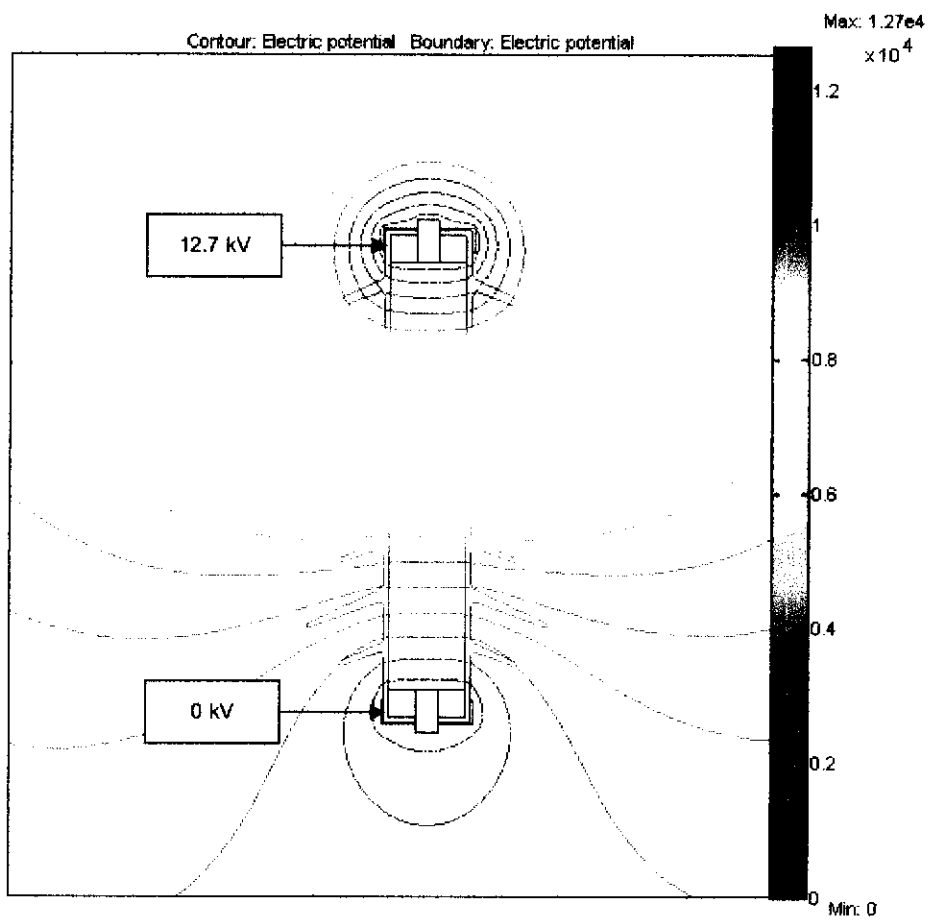
รูปที่ 4.15 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่าย พิจารณาครีบที่ 1 ถึงครีบที่ 3

จากการออกแบบและวิเคราะห์ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่าย พบว่าครีบนวนมีระยะครีบท่อกับ 668 มม. และจากรูปที่ 4.15 พบว่า ที่ผิวครีบนวนมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 1.77 kV/cm ที่บริเวณปลายครีบแรก

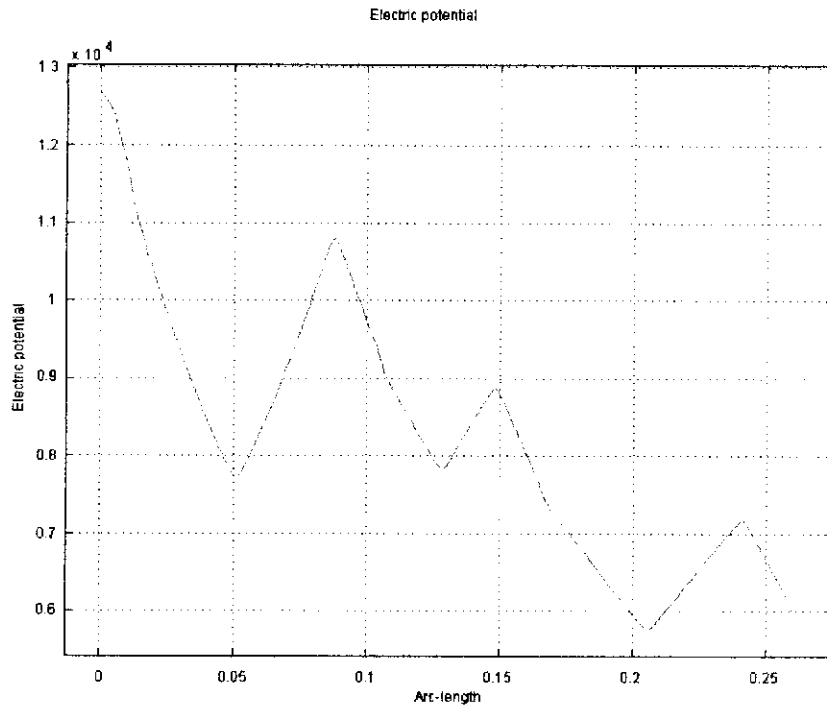
ตัวอย่างที่ 4 ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีบลับ



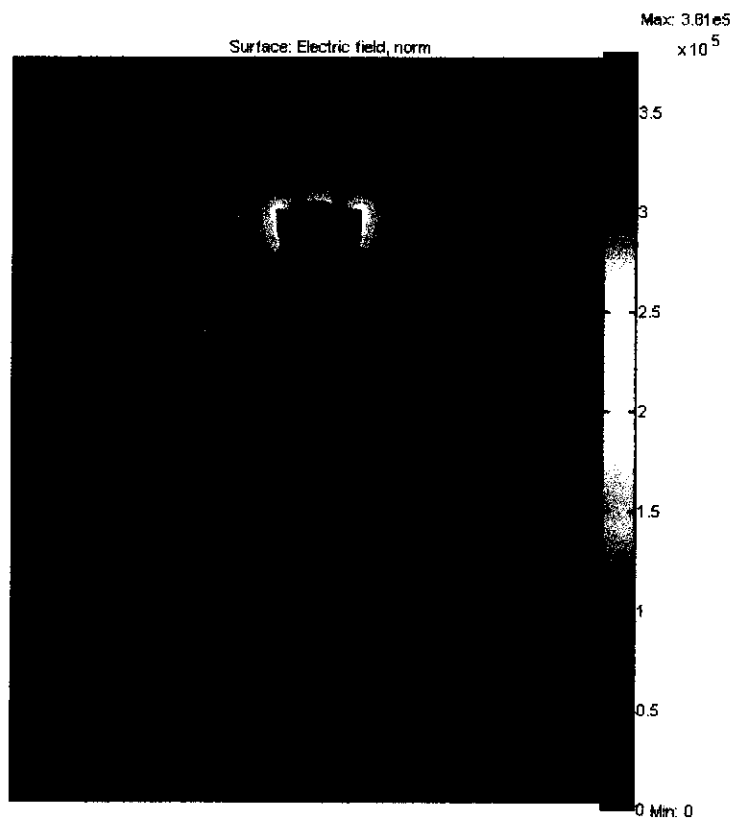
รูปที่ 4.16 การออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีบลับ



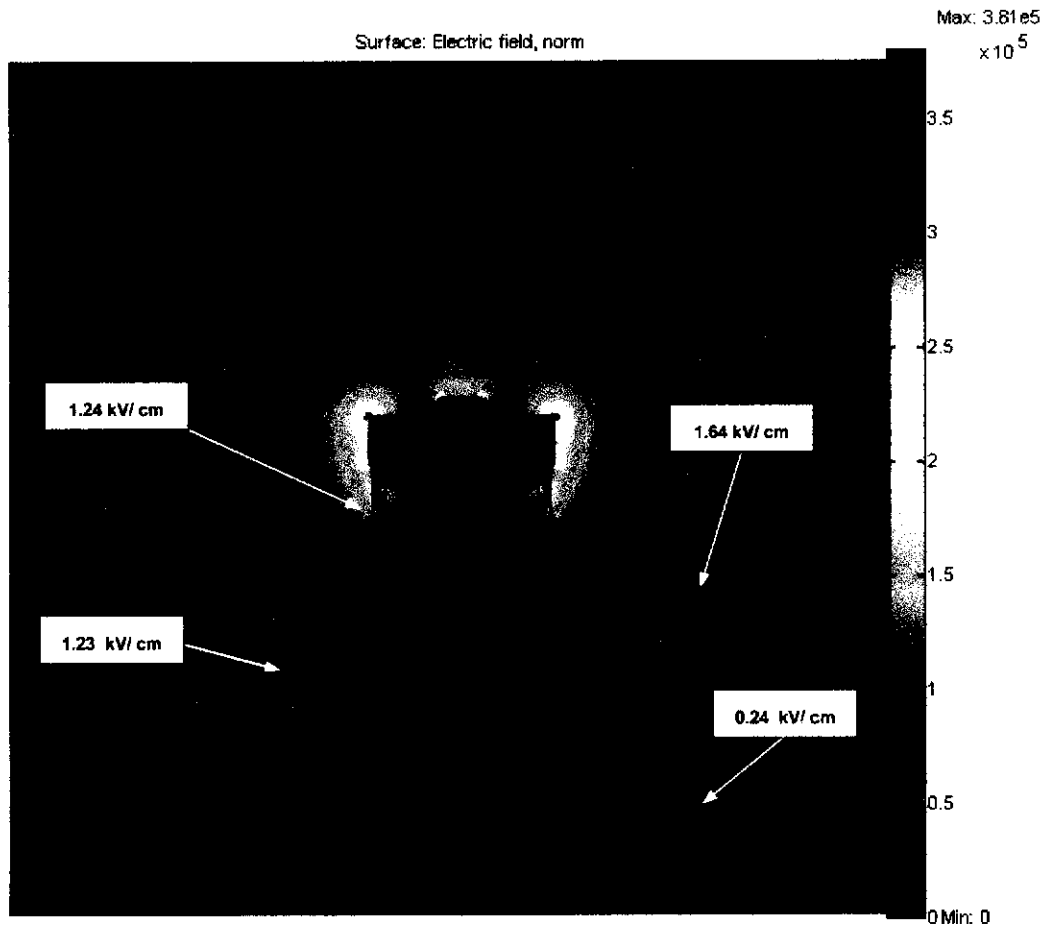
รูปที่ 4.17 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมตักย์ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีบลับ



รูปที่ 4.18 การจำลองวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีบนวน



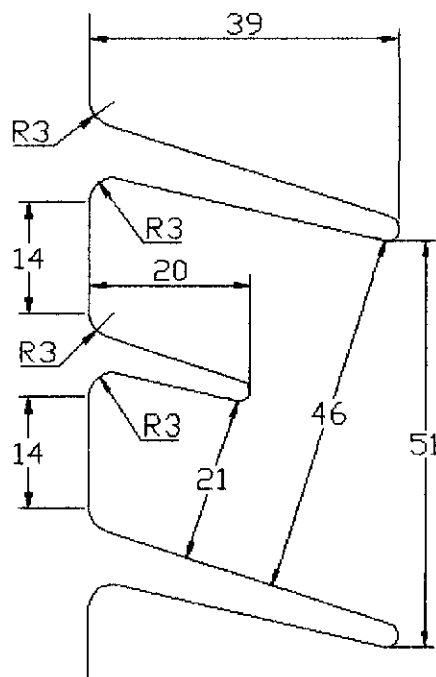
รูปที่ 4.19 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีบนวน



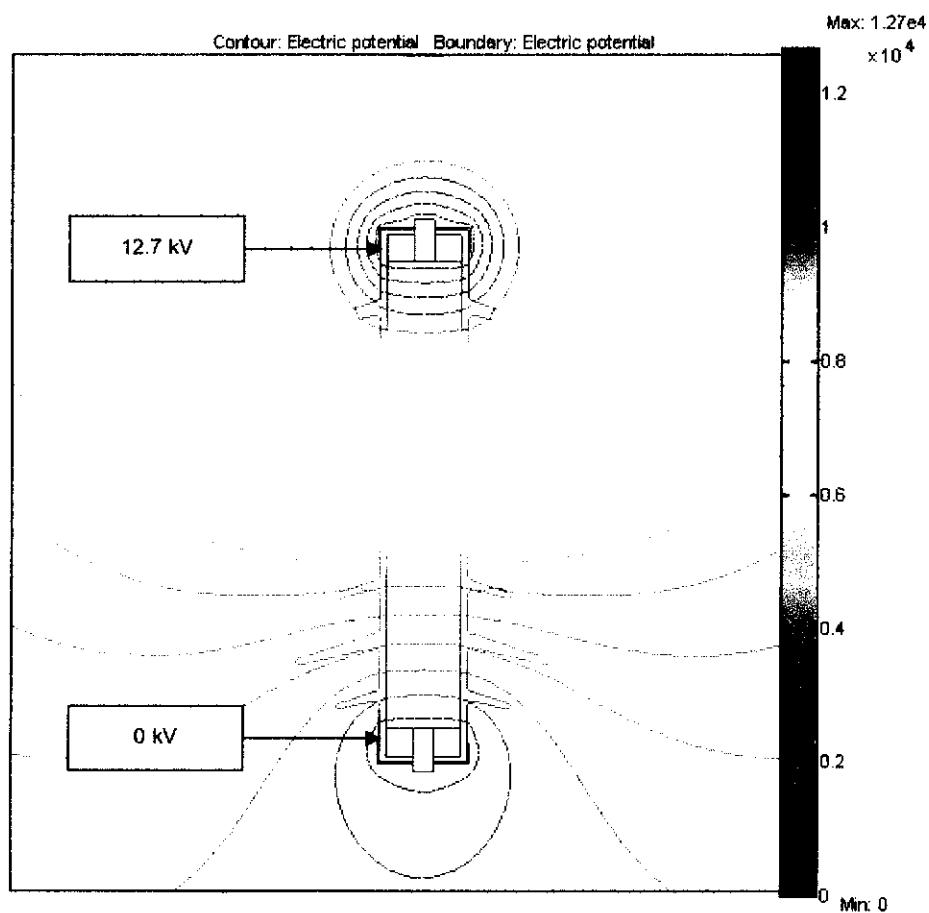
รูปที่ 4.20 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวนกับดักไฟฟ้าแบบที่ 3 ครีบลับ พิจารณาครีบบที่ 1 ถึงครีบบที่ 3

จากการออกแบบและวิเคราะห์ครีบนวนกับดักไฟฟ้าตัวอย่างที่ 4 พบว่า ครีบนวนมีระยะครีบท่อกับ 620 มม. และจากรูปที่ 4.20 พบว่า ที่ผิวครีบนวนจะพบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 1.64 kV/cm ที่บริเวณปลายครีบบแรก

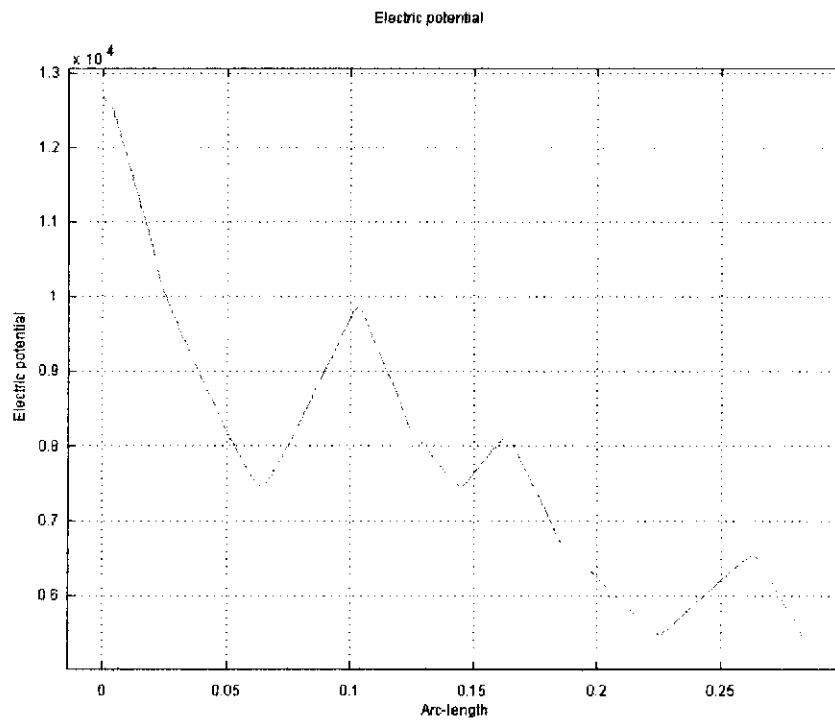
ตัวอย่างที่ 5 ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีปสลับ



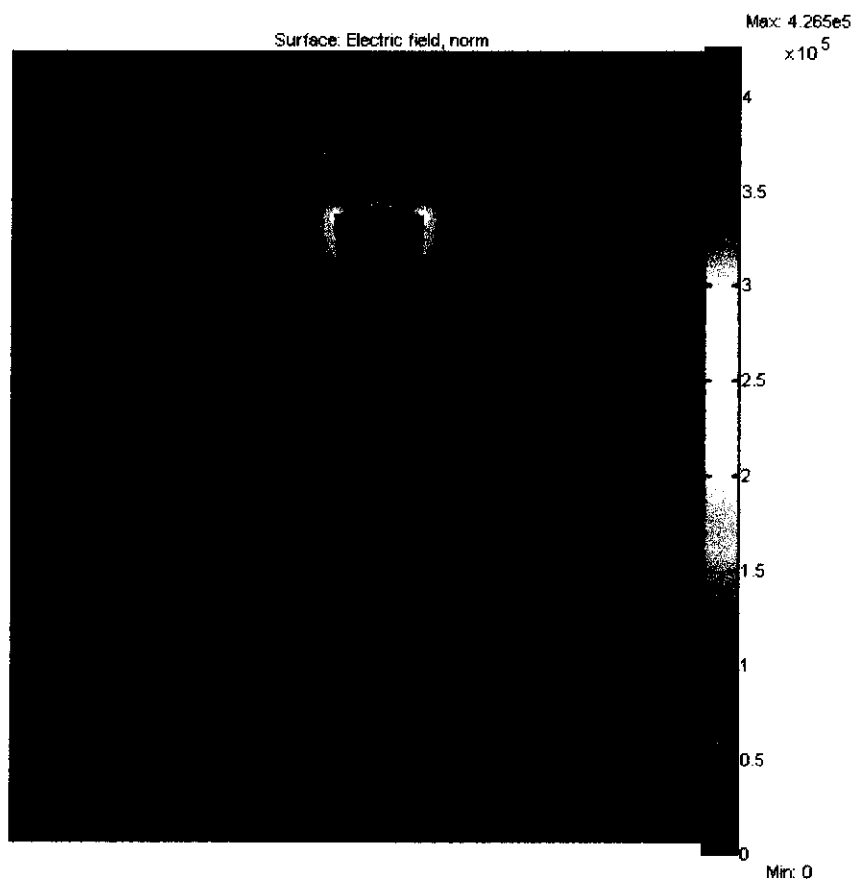
รูปที่ 4.21 การออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีปสลับ



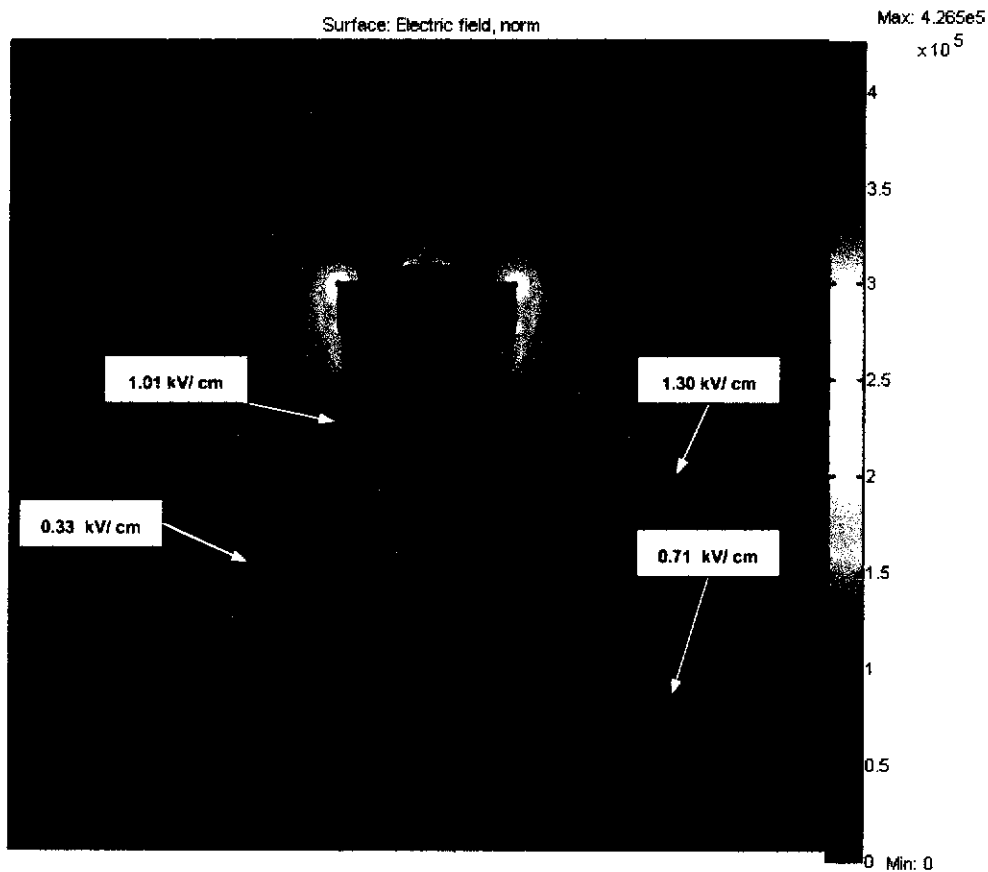
รูปที่ 4.22 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมตักย์ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีปสลับ



รูปที่ 4.23 การจำลองวิเคราะห์หาค่าแรงดันตามผิวครีบนวนแบบที่ 4 ครีบลับ



รูปที่ 4.24 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีบลับ

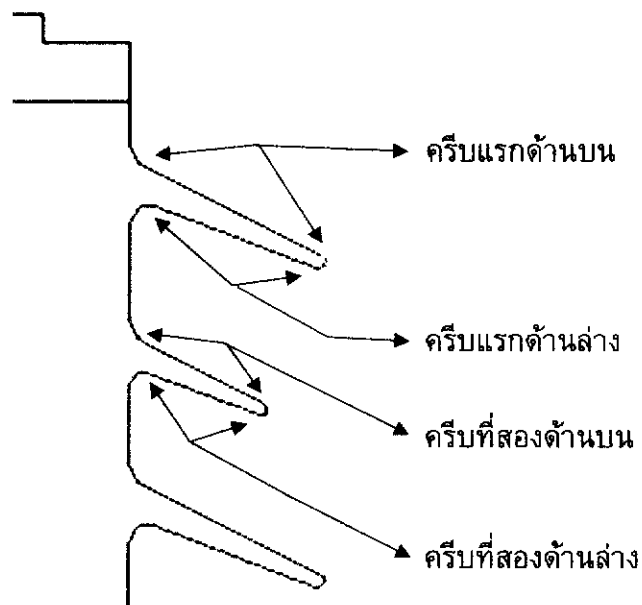


รูปที่ 4.25 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีบนวน พิจารณษครีบบที่ 1 ถึงครีบบที่ 3

จากการออกแบบและวิเคราะห์ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 5 พบว่าครีบนวนมีระยะครีบบเท่ากับ 620 มม. และจากรูปที่ 4.25 พบว่า ที่ผิวครีบนวนมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 1.30 kV/cm ที่บริเวณปลายครีบบแรก

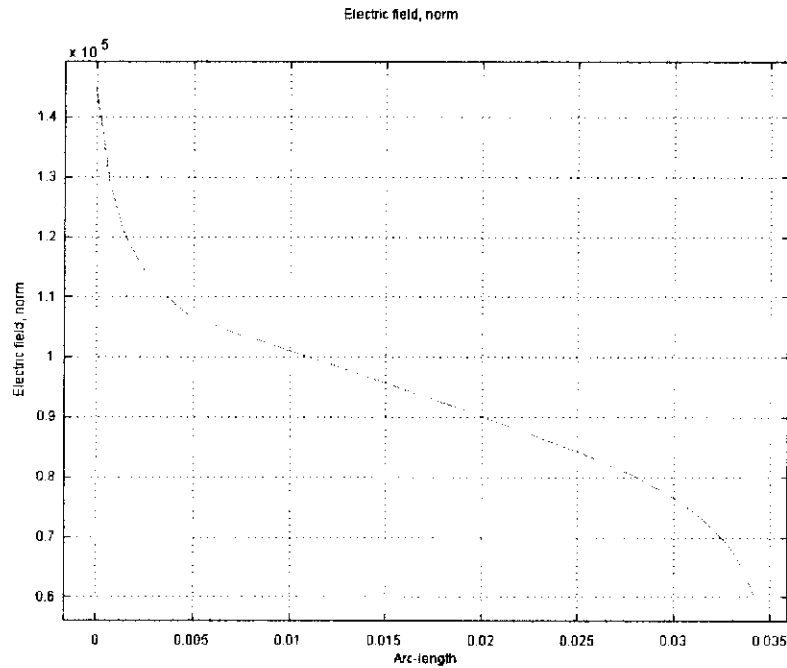
4.2 การเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าระหว่างครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่ายกับครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบ แบบที่ 3 และแบบที่ 4

ครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 และแบบที่ 4 เป็นครีบนวนที่ออกแบบหลังจากได้รับข้อมูลครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่าย ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าว่าแตกต่างกันอย่างไร

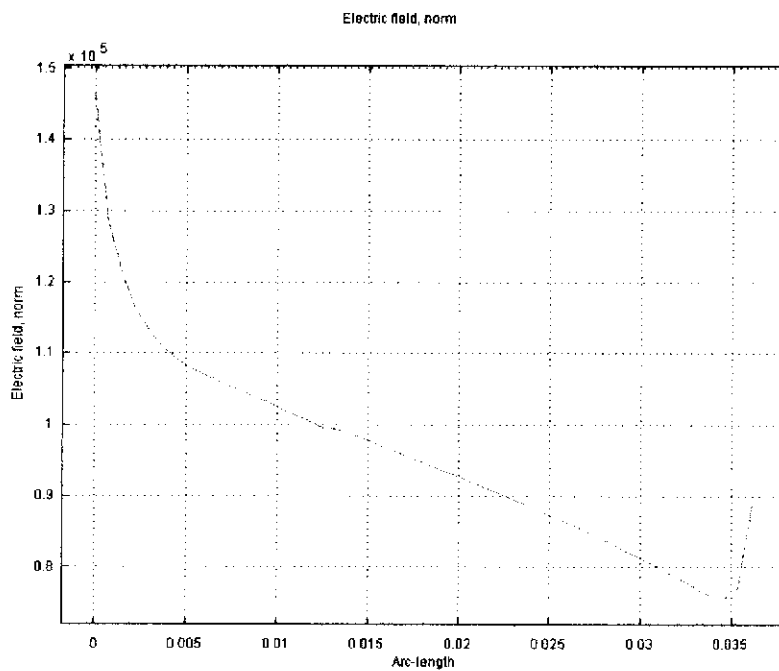


รูปที่ 4.26 ตำแหน่งของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ทำการเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้า

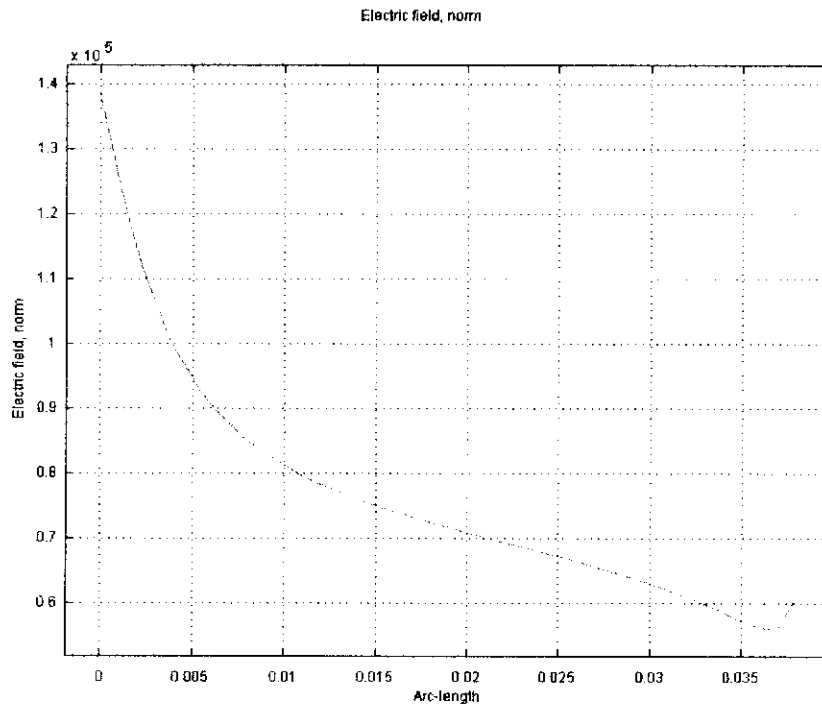
4.2.1 การเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบนวนแรกด้านบน



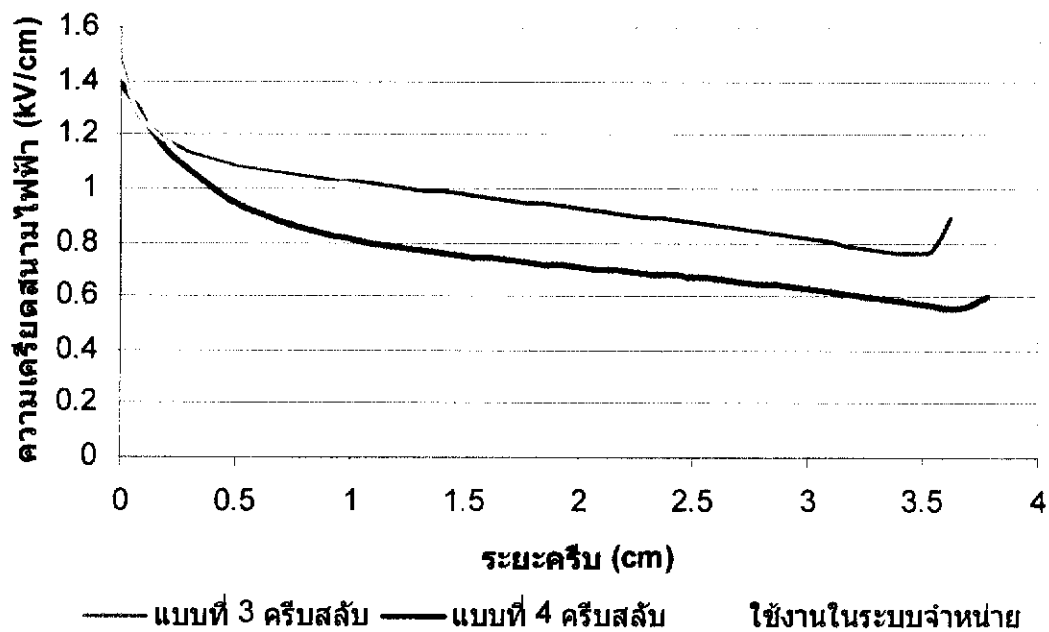
รูปที่ 4.27 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบนวนแรกด้านบน ของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่าย โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีบนวนมีหน่วยเป็น m



รูปที่ 4.28 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบนวนแรกด้านบน ของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีบนวน โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีบนวนมีหน่วยเป็น m

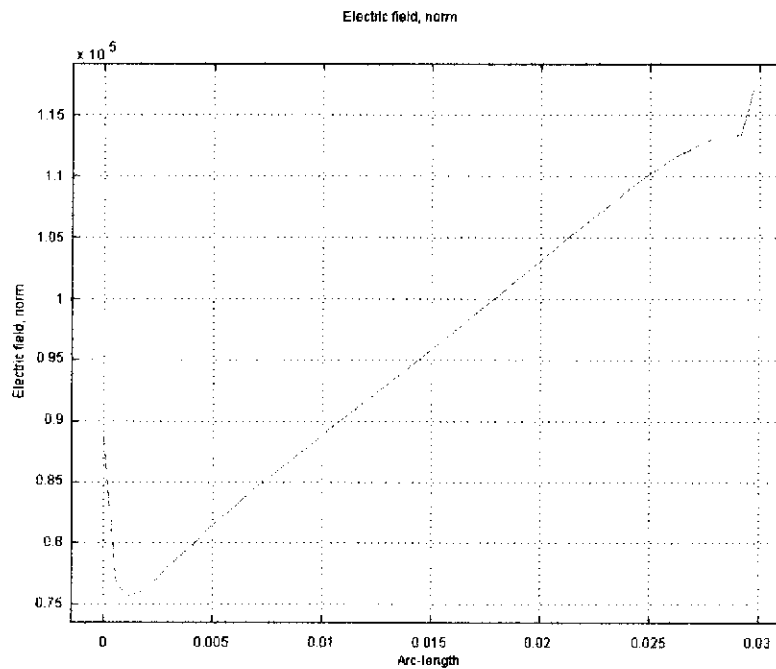


รูปที่ 4.29 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบนแรกด้านบนของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีบนสลับ โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีบนมีหน่วยเป็น m

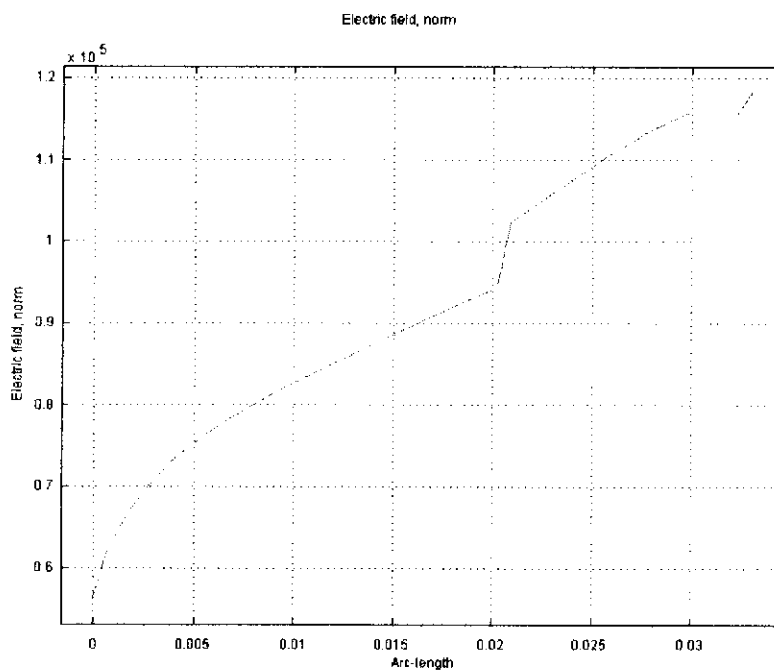


รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบนแรกด้านบนของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่ายกับครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบแบบที่ 3 และแบบที่ 4

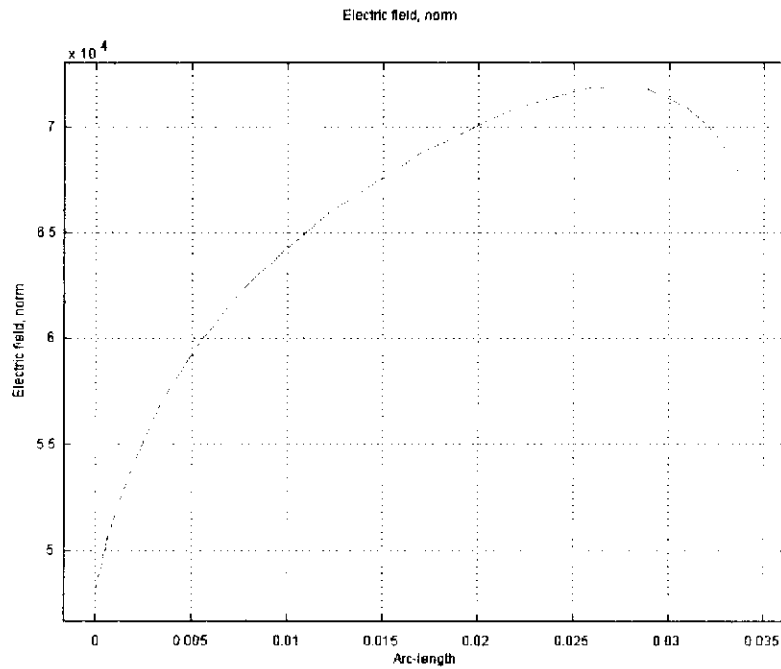
4.2.2 การเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบนวนด้านล่าง



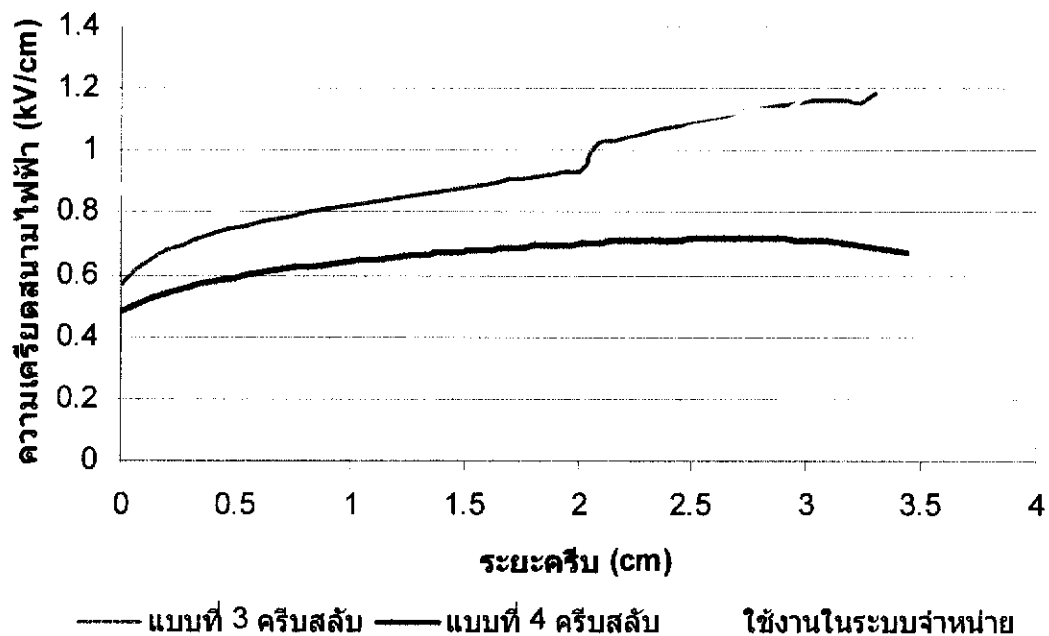
รูปที่ 4.31 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบนวนด้านล่างของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่าย โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีบนวนมีหน่วยเป็น m



รูปที่ 4.32 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบนวนด้านล่างของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีบนวน โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีบนวนมีหน่วยเป็น m

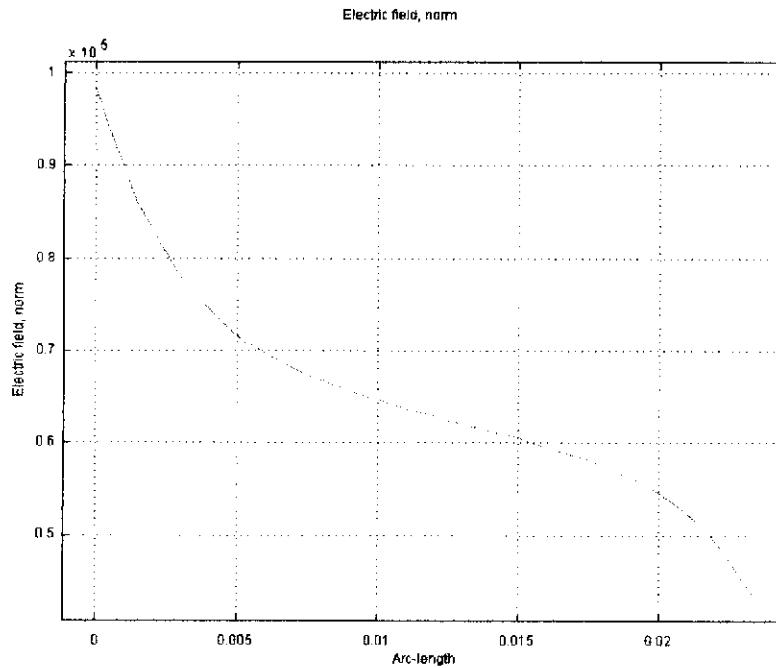


รูปที่ 4.33 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบนวนแรกด้านล่างของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีบนวน โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีบนวนมีหน่วยเป็น m

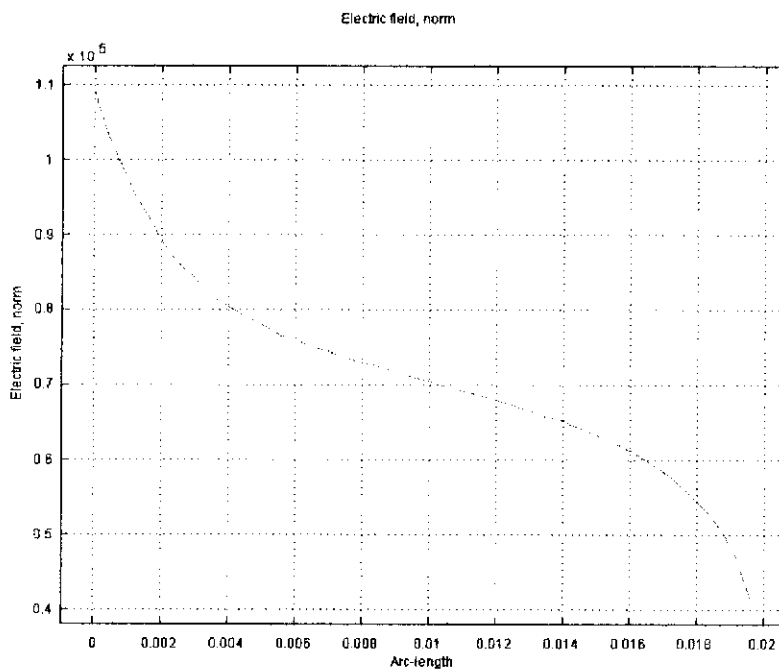


รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบนวนแรกด้านล่างของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่ายกับครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบแบบที่ 3 และแบบที่ 4

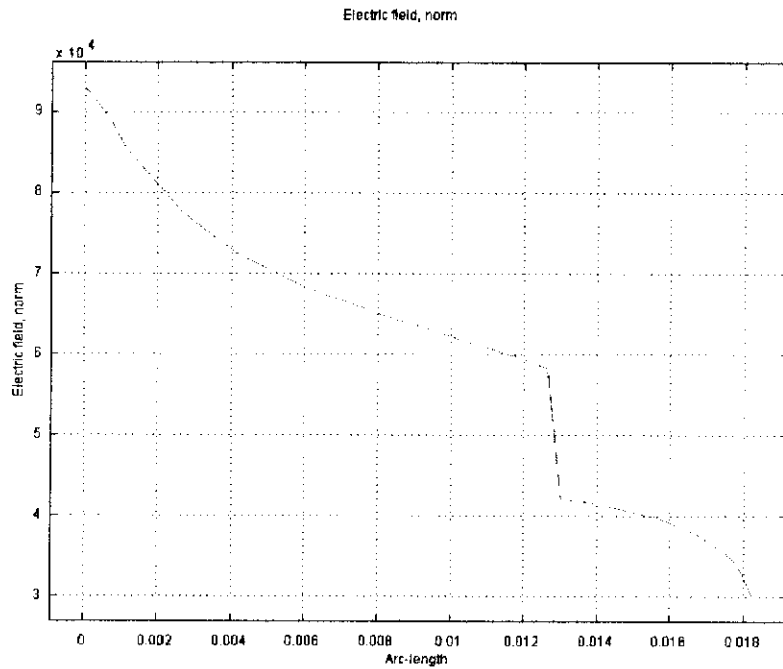
4.2.3 การเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบน ครีบบนสองด้านบน



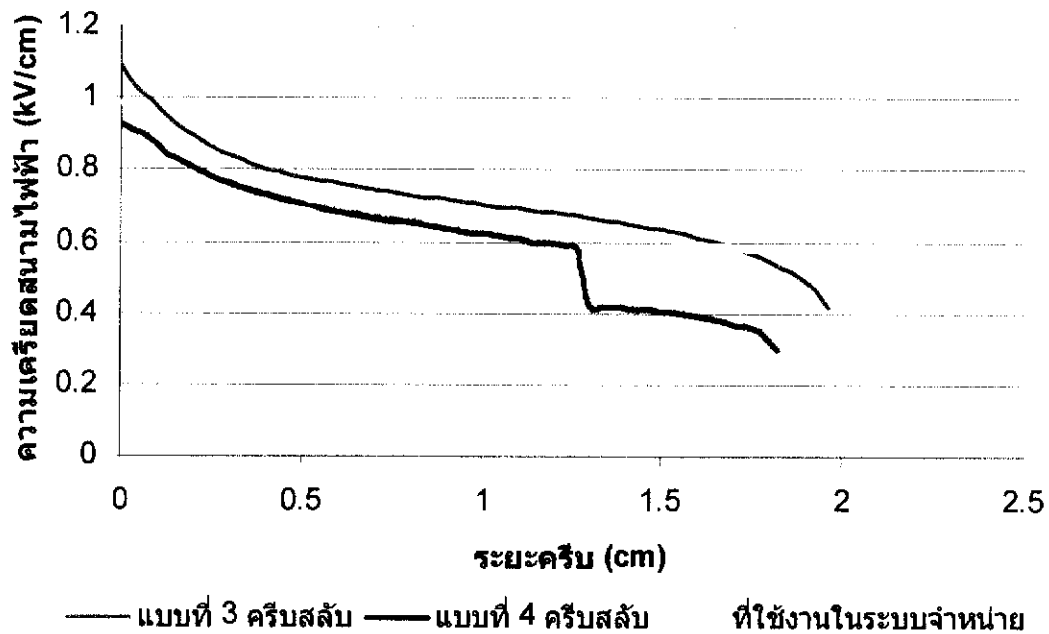
รูปที่ 4.35 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบนสองด้านบนของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในงานในระบบจำหน่าย โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีบบนมีหน่วยเป็น m



รูปที่ 4.36 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบนสองด้านบนของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีบบน โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีบบนมีหน่วยเป็น m

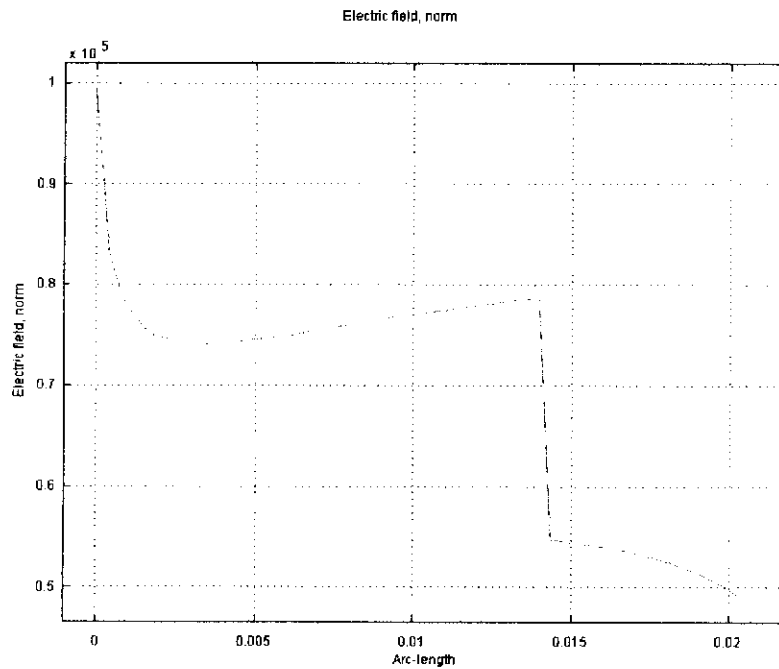


รูปที่ 4.37 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบนสองด้านบนของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีบลับ โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีบบนมีหน่วยเป็น m

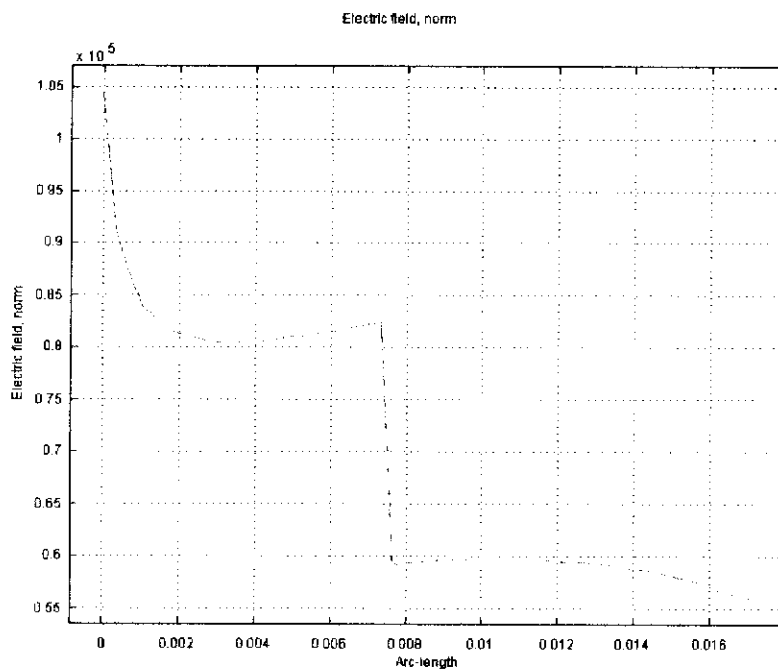


รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบนสองด้านบนของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่ายกับครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบแบบที่ 3 และแบบที่ 4

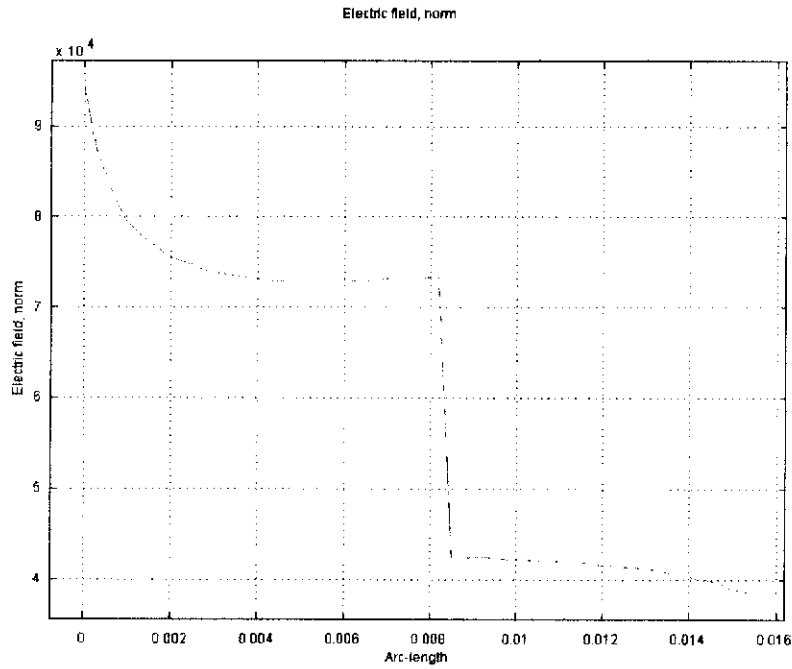
4.2.4 การเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีที่สองด้านล่าง



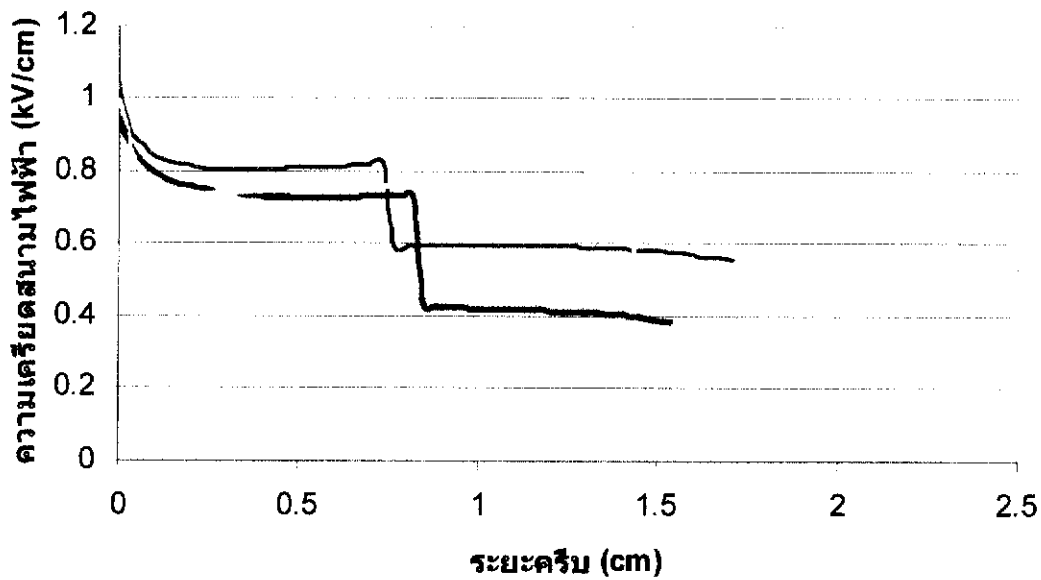
รูปที่ 4.39 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีที่สองด้านล่างของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่าย โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีมีหน่วยเป็น m



รูปที่ 4.40 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีที่สองด้านล่างของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 3 ครีสลับ โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีมีหน่วยเป็น m



รูปที่ 4.41 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบัสองด้านล่างของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 4 ครีบลับ โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และระยะครีบบัมีหน่วยเป็น m



— แบบที่ 3 ครีบลับ - - - แบบที่ 4 ครีบลับ ที่ใช้งานในระบบจำหน่าย

รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวครีบนวนกับดักฟ้าผ่าครีบบัสองด้านล่างของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่ายกับครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบแบบที่ 3 และแบบที่ 4

4.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการออกแบบและจำลองวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของครีบนวน

จากการออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าและการจำลองวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าของครีบนวนทั้ง 4 แบบ โดยแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เป็นการออกแบบโดยอาศัยข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และมาตรฐาน IEC 815 การออกแบบครีบนวนในสภาวะเปราะเปื้อน โดยแบบที่ 1 ครีบนวนเป็นแบบครีบท่า ซึ่งในปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมใช้งาน เนื่องจากมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติต่ำ และโอกาสที่หยดน้ำจะเชื่อมต่อระหว่างปีกสูง แบบที่ 2 เป็นแบบครีบลับที่มีลักษณะมิติตามมาตรฐาน IEC 815

แบบที่ 3 และแบบที่ 4 เป็นการพัฒนาจากแบบที่ 2 และแบบกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบไฟฟ้า โดยความลาดเอียงของครีบนวนจะมีค่ามาก (มากกว่า แบบที่ 1 และแบบที่ 2)

จากการจำลองวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แบบที่ 3 และแบบที่ 4 เทียบกับการจำลองวิเคราะห์ผลของแบบกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบไฟฟ้า การกระจายของสนามไฟฟ้าและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนของกับดักฟ้าผ่าเฉลี่ยของแบบที่ 3 และแบบกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานจริงในระบบไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนแบบที่ 4 จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนมีค่าน้อยกว่า และมีการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ดีกว่าแบบกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานจริงในระบบไฟฟ้า ส่วนของการออกแบบครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าทั้ง 4 แบบ ได้ทำการออกแบบมิติต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 815 ส่วนแบบกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานจริงในระบบไฟฟ้านั้นมีค่าผลต่างระหว่างความกว้างของปีกยาวกับปีกสั้นของครีบนวน น้อยกว่า 15 มิลลิเมตร (มาตรฐาน IEC 815 ได้กำหนดให้ผลต่างระหว่างความกว้างของปีกยาวกับปีกสั้นของครีบนวนจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 15 มิลลิเมตร)

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

1. การทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า

1.1 ครอบเอาต์ไฟวส์

การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ ของตัวอย่างครอบเอาต์ไฟวส์ พิกัด 22 kV ซึ่งได้ทำการทดสอบเพียงกรณีของเทอร์มินอล – เทอร์มินอล ขั้วลบ เพียงกรณีเดียวเนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ต่ำ ไม่สามารถที่จะขึ้นแรงดันสูงๆ ได้ โดยผลการทดสอบพบว่าครอบเอาต์ไฟวส์ไม่เกิดวาทไฟตามผิว ถือว่าผ่านมาตรฐานการทดสอบ ในกรณีเทอร์มินอล – เทอร์มินอล นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบครอบเอาต์ไฟวส์ในกรณี เทอร์มินอล – เทอร์มินอล ขั้วบวก แต่ไม่สามารถปรับแรงดันเพิ่มขึ้นได้ตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 คือ 125 kV (ที่สภาวะมาตรฐาน) สามารถปรับแรงดันเพิ่มขึ้นได้ประมาณ 100 kV เท่านั้น ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงในภาคผนวก ค

การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง สามารถทำการทดสอบทั้งกรณีเทอร์มินอล – เทอร์มินอล และกรณีเทอร์มินอล – กราวด์ โดยผลการทดสอบพบว่า ครอบเอาต์ไฟวส์ไม่เกิดวาทไฟตามผิว ถือว่าผ่านมาตรฐานการทดสอบ

1.2 กั๊บดักฟ้าผ่า

การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ได้ทำการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA จำนวน 6 ตัวอย่าง และพิกัด 21 kV 10 kA จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยผลการทดสอบ พบว่ามี กั๊บดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA 1 ตัวอย่างไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ เนื่องจากมีค่า การดีสชาร์จบางส่วนเกินกำหนด (เกิน 10 pC) ส่วนกับดักฟ้าผ่าที่เหลือมีค่าดีสชาร์จบางส่วนไม่ เกินกำหนดมาตรฐาน ถือว่าผ่านมาตรฐานการทดสอบ สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่ไม่ผ่านการทดสอบ จากการพิจารณาพบว่า เกิดการดีสชาร์จภายในเนื้องนวนของกับดักฟ้าผ่าดังกล่าวการวิเคราะห์ผล การทดสอบในบทที่ 3

การทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มทำงาน สามารถทำการทดสอบได้ทั้งกับดัก ฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA และกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60099-4 กำหนดหาค่าแรงดันเริ่มทำงานที่ระดับกระแสรั่วไหล (กำหนดจากผู้ผลิต) จะต้อง มีค่าไม่มากกว่าข้อมูลจากผู้ผลิต จากผลการทดสอบในบทที่ 3 พบว่ากับดักฟ้าผ่าทุกตัวอย่าง ทดสอบผ่านการทดสอบ

การทดสอบหาค่ากระแสรั่วไหล จากผลการทดสอบในบทที่ 3 พบว่ากระแส รั่วไหลในระดับแรงดันใช้งานปกติและระดับแรงดันใช้งานต่อเนื่องสูงสุดมีค่าต่ำกว่าข้อมูลจาก ผู้ผลิต

2. ครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบ เมื่อนำไปจำลองวิเคราะห์หาการกระจายสนามไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนแบบที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกันกับการกระจายสนามไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานจริงในระบบไฟฟ้า ส่วนแบบที่ 4 ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนมีค่าน้อยกว่ากับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานจริงในระบบไฟฟ้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการปรับปรุงห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. ให้มีความพร้อมและประสิทธิภาพที่ดีกว่านี้ จากการศึกษาถึงประสิทธิภาพของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. พบว่าอุปกรณ์ทดสอบภายในห้องสามารถใช้งานได้ มีเพียง 3-4 ชุด เท่านั้นและในจำนวนนี้มีประสิทธิภาพการใช้งานไม่เต็มที่ ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบได้ครบถ้วนตามข้อกำหนด

2. ควรมีการนำครอบเอาต์ไฟวส์และกับดักฟ้าผ่า ที่ติดตั้งอยู่ในภาวะเปราะเปื้อน มาทดสอบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ดังกล่าวในภาวะเปราะเปื้อน เพื่อเปรียบเทียบผลกับอุปกรณ์ในภาวะปกติ

3. การออกแบบครีบนวนของกับดักฟ้าผ่าจำเป็นต้องมีการศึกษาควบคู่ไปกับครีบนวนที่มีใช้จริงในระบบจำหน่ายหลาย ๆ แบบ เพื่อศึกษาถึงความแตกต่างในการออกแบบ ตลอดจนลักษณะของสภาพสนามไฟฟ้าว่ามีการแตกต่างกันอย่างไร หากเป็นไปได้ควรมีการนำครีบนวนที่ได้ออกแบบไปสร้าง แล้วนำไปติดตั้งในภาวะเปราะเปื้อนเพื่อนำกลับมาทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อศึกษาถึงลักษณะทางไฟฟ้าเมื่อครีบนวนได้รับความเปราะเปื้อน

4. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าซึ่งอาจใช้ชุดโปรแกรมมากขึ้น เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

5. ในการจำลองวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าของครีบนวนกับดักฟ้าผ่า จำเป็นต้องศึกษาถึงสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น สภาพความนำไฟฟ้า (G) ค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (ϵ_r) เป็นต้น เพราะสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันก็จะให้ผลการจำลองวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน หากกำหนดสมบัติทางไฟฟ้าไม่ถูกต้องก็จะทำให้การจำลองวิเคราะห์ไม่ถูกต้องเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

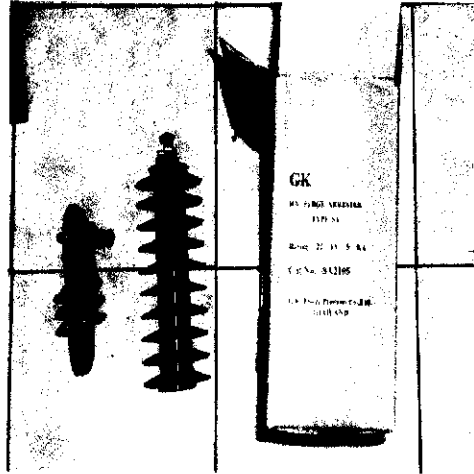
- [1] ดร.สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, สนพ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [2] กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, โครงการวิจัยเพื่อป้องกันแรงดันเกินสำหรับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า, รายงานการวิจัย , 2546
- [3] กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, อุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายของ กฟภ., เอกสารประกอบการบรรยาย, 2545
- [4] IEC 60060-1, **High-voltage test technique; part 1 General definitions and test requirement**, 1989
- [5] ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล., **Electrical Power Engineering Laboratory II**, เอกสารประกอบการเรียนวิชาภาคปฏิบัติ Electrical Power Engineering Laboratory II
- [6] ไชยพร หล่อทองคำ, การศึกษาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นต่อระบบป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแก๊ป, วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [7] IEC 60815, **Guide for the selection of insulator of Polluted conditions, First Edition**, 1996
- [8] นรเศรษฐ พัฒนเดช, ลักษณะสมบัติทางวิศวกรรมของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับในระบบ 33 กิโลโวลต์, วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [9] ปราโมทย์ เดชะอำไพ , **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม** , พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ, สนพ.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2542
- [10] ANSI C37.42, **Specification for high voltage expulsion fuse cutouts, fuse disconnecting switches and fuse link**, 1996
- [11] IEEE Std C37.41, **IEEE Standard design tests for high voltage fuses distribution enclosed single-pole air switches , fuse disconnecting switches , and accessories**, 2000
- [12] IEC 60099-4, **Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. system**, 2004-05

ภาคผนวก

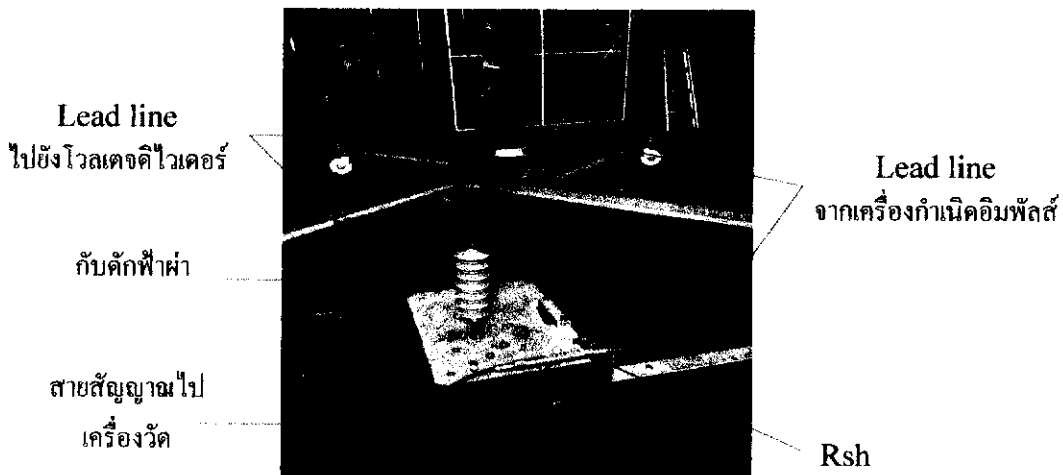
ภาคผนวก ก.

การทดสอบแรงดันคงเหลือเนื่องจากอิมพัลส์ฟ้าผ่า
ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (บางพลี)

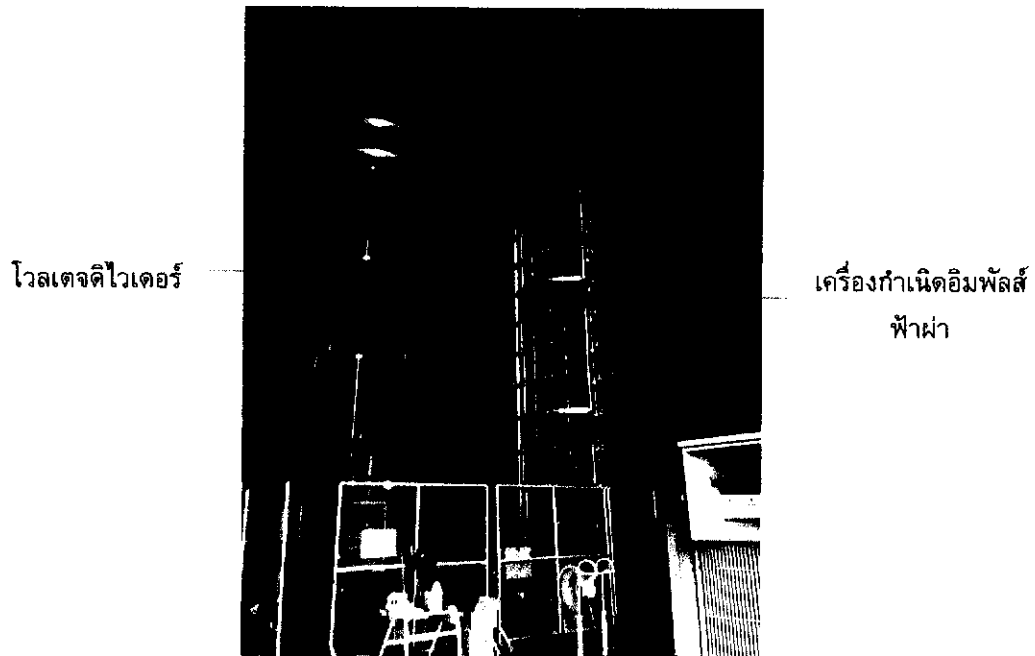
1. การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและวัสดุทดสอบ
กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 21 kV 5 kA



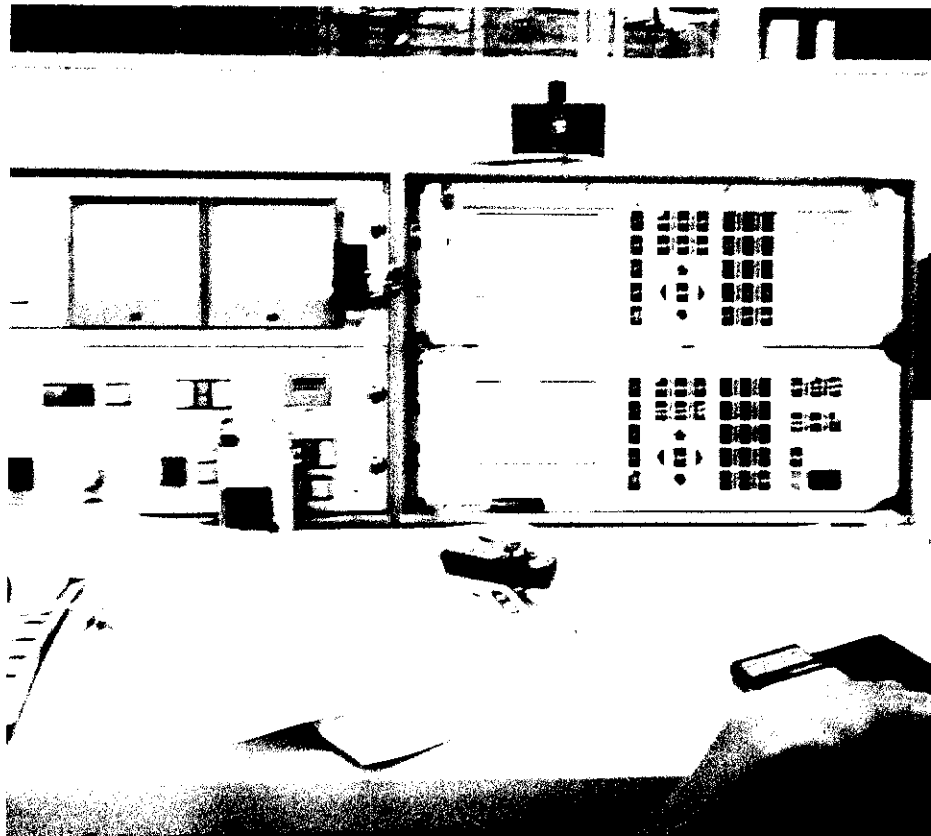
รูปที่ ก.1 กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ทดสอบหาค่าแรงดันคงเหลือเนื่องจากอิมพัลส์ฟ้าผ่า



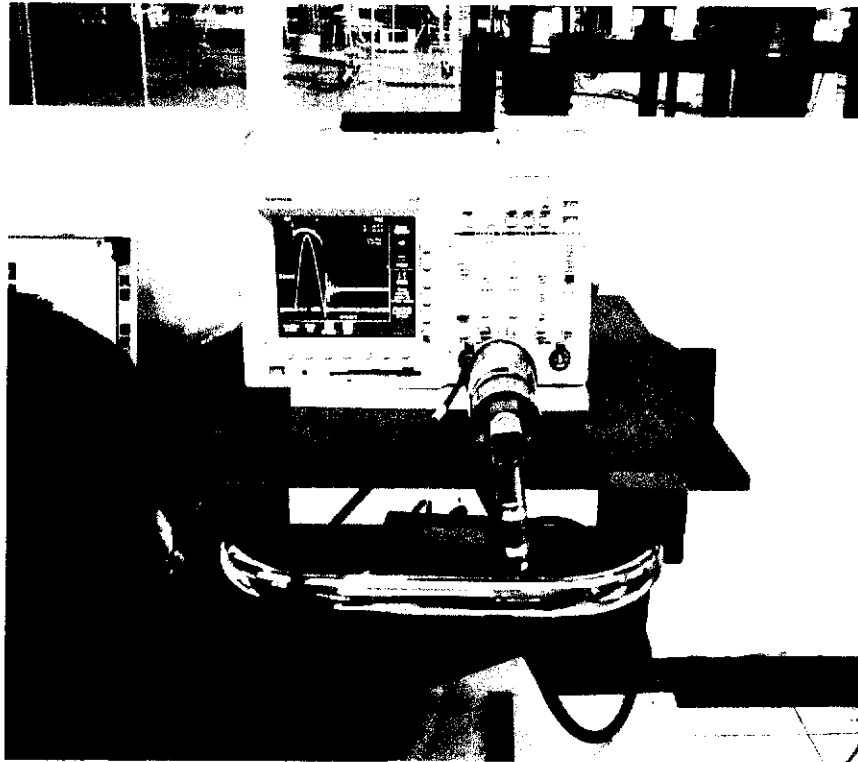
รูปที่ ก.2 การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในวงจรทดสอบ



รูปที่ ก.3 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าและโวลเตจดีไวเดอร์



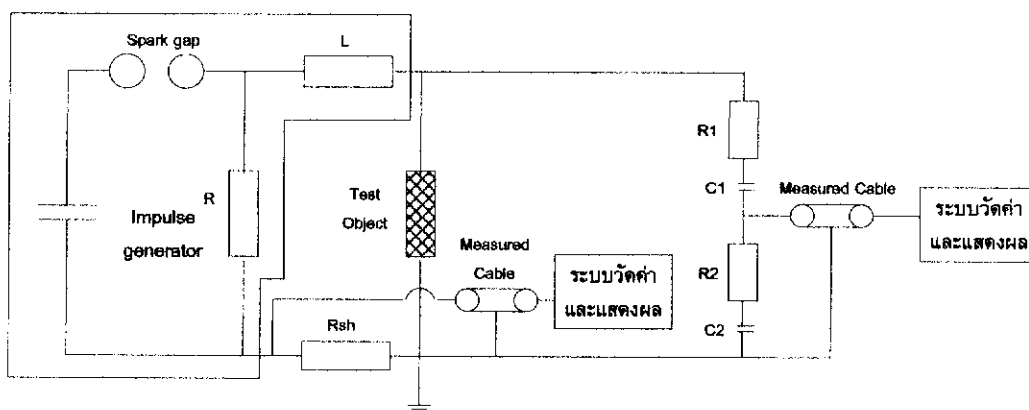
รูปที่ ก.4 อุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ไฟฟ้า



รูปที่ ก.5 อุปกรณ์แสดงผลรูปคลื่นของอิมพัลส์ที่จ่ายและแรงดันคงเหลือที่วัดได้

2. วงจรสมมูลและขั้นตอนการทดสอบ

วงจรสมมูลสำหรับการทดสอบหาค่าแรงดันคงเหลือเนื่องจากอิมพัลส์ฟ้าผ่า ดังแสดงในรูปที่ ก.6




รูปที่ ก.6 วงจรสมมูลของการทดสอบหาค่าแรงดันคงเหลือเนื่องจากอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ขั้นตอนการทดสอบจะปฏิบัติตามมาตรฐาน IEC 60099-4 และคู่มือการใช้งานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยการทดสอบจะทำต่อกับดักฟ้าผ่าจำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งจะบันทึกค่าแรงดันที่เกิดขึ้นพร้อมรูปคลื่น และเปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่ทดสอบ

ภาคผนวก ข.
หัวข้อการทดสอบเบื้องต้นสำหรับกับดักฟ้าผ่า
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การทดสอบเบื้องต้นของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะประกอบด้วย การทดสอบหลัก 2 ส่วนคือ การทดสอบทางกายภาพและการทดสอบทางไฟฟ้า การทดสอบทางกายภาพจะประกอบด้วย การวัดลักษณะทางมิติ ระยะครีป ตรวจสอบวัสดุที่ใช้ผลิตครีปจนวน ตรวจสอบวัสดุประกอบตลอดจนขนาด การทดสอบทางไฟฟ้าจะกระทำเพียงหัวข้อเดียวคือ การทดสอบหากระแสรั่วไหล (Leakage current test) ดังตารางที่ ข.1

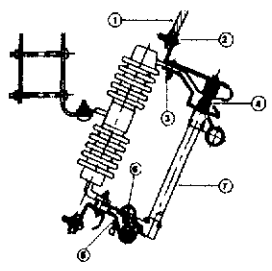
ตารางที่ ข.1 ตารางบันทึกค่าการตรวจสอบกับดักฟ้าผ่าเบื้องต้น

Test description			Requirement	Test result Sample No.		
				1	2	3
	Dimension, mm	A	$251 \pm 10\%$			
		D	$104 \pm 10\%$			
		T1	$7 \pm 10\%$			
		T2	$6 \pm 10\%$			
		Creepage distance	min 600			
	Material terminal connector	Line	Stainless steel			
		Earth	Stainless steel			
		Terminal lug	Aluminium			
		Earth lead	Flexible Cu insulated			
		Earth lead, Area / Length, mm ² / mm	Cu 16 / 430			
Terminal lug for Al 50 mm	-					
Bird guard cap	-					
Mounting bracket	Avg. of Zn. Coating thickness, microns	Carriage bolt	min 37			
		Bracket part 1	min 78			
		Bracket part 2	min 47			
	Assembled for crossarm		100 X 100 mm 120 X 120 mm			
Terminal connector connecting	Line	For Al 35-50 mm ²				
	Earth	For Cu 16 mm ²				
Earth connector connecting		For Cu 16 / Steel stranded wire 50 mm ²				
Leakage current at power frequency voltage, mA	12.7 kV	-				
	17.0 kV	-				
Mark on sample :-						

ภาคผนวก ค.
หัวข้อการทดสอบสำหรับครอบเอาต์ฟิวส์
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การทดสอบในเบื้องต้นของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะประกอบด้วย การทดสอบ 2 ส่วนคือ การทดสอบทางกายภาพและการทดสอบทางไฟฟ้า ซึ่งอ้างอิงมาตรฐาน ANSI C37.42 โดยการตรวจสอบทางกายภาพนั้นจะเป็นการตรวจสอบถึงวัสดุที่ใช้ผลิต ตลอดจนอุปกรณ์ประกอบกับครอบเอาต์ฟิวส์ ส่วนการตรวจสอบทางไฟฟ้านั้นมีเพียงหัวข้อเดียวคือความคงทนต่อแรงดันในสภาวะแห้งสะอาด ดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ตารางบันทึกค่าการตรวจสอบครอบเอาต์ฟิวส์เบื้องต้น

Test description		Requirement	Inspection & Test result
Dimension & detail		-	
Creepage distance, mm.		min 320	
Dia. of Pulling eye , mm		min 26	
Dia. of Lifting eye , mm		min 26	
Mounting bracket	Dimension	-	
	Average of Zn. Coating thickness, microns.	Carrage bolt	min. 37
		Bracket part 1	min. 78
		Bracket part 2	min. 47
Assembled with crossarm size		100x100mm 120x120mm	
Terminal connector connecting		For Al/Cu 35-95 mm ²	
AC dry withstand voltage	Terminal to terminal	42 kV, 1 min	
	Terminal to ground	42 kV, 1 min	
Assembled Drop out fuse cutout with fuse holder		-	
Temperature rise at the rated continuous current 100 A, °c (Test acc. To ANSI C 37.42) 	1 Conductor	-	
	2 Upper terminal	-	
	3 Upper fixed contact	max. 40	
	4 Upper movable contact	max. 40	
	5 Toggle		
	6 Lower fixed contact	max. 40	
	7 Fuse tube	-	
	Amb. Temp. ° C		
Mechanical endurance, close-open operating cycles		50 times	
Mark on sample	- At Insulator :-		
	- At Fuse holder (Sticker) :-		
	- At Hinge support :-		

ภาคผนวก ง.

การตรวจสอบทางมิติของครอบเอาต์พิวส์และกับดักฟ้าผ่า

การตรวจสอบรูปร่างและลักษณะมิติเป็นการทดสอบลักษณะทั่วไปของครอบเอาต์พิวส์และกับดักฟ้าผ่าแต่ละแบบ มาตรฐานจะกำหนดลักษณะมิติไว้นั่นเองพร้อมกับค่าที่ยอมให้คลาดเคลื่อนได้ การตรวจสอบลักษณะมิติของครอบเอาต์พิวส์จะทำการตรวจสอบระยะครีบ โดยมีผลการตรวจสอบลักษณะมิติดังตารางที่ ง.1 และ ง.2 สำหรับการตรวจสอบลักษณะมิติของกับดักฟ้าผ่าจะตรวจสอบ ความสูงจากเทอร์มินอลถึงเทอร์มินอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางครีบ ระยะครีบ โดยมีผลการตรวจสอบดังตารางที่ ง.3 และ ง.4

ตารางที่ ง.1 ผลการตรวจสอบลักษณะมิติของครอบเอาต์พิวส์พิกัด 22 kV 100 A บริษัท A

รายการ	ข้อกำหนด (มม.)	ลักษณะมิติครอบเอาต์พิวส์				
		พิกัด 22 kV 100 A บริษัท A (มม.)				
		1	2	3	4	5
ระยะครีบ	min 320	365	365.5	365	365	365.3

ตารางที่ ง.2 ผลการตรวจสอบลักษณะมิติของครอบเอาต์พิวส์พิกัด 22 kV 100 A บริษัท B

รายการ	ข้อกำหนด (มม.)	ลักษณะมิติครอบเอาต์พิวส์		
		พิกัด 22 kV 100 A บริษัท B (มม.)		
		1	2	3
ระยะครีบ	min 320	360	360.2	360

ตารางที่ ง.3 ผลการตรวจสอบลักษณะมิติของกับดักฟ้าผ่าพิกัด 21 kV 5 kA

รายการ	ข้อกำหนด (มม.)	ลักษณะมิติกับดักฟ้าผ่า พิกัด 21 kV 5 kA (มม.)					
		บริษัท A			บริษัท B		
		1	2	3	1	2	3
1. ความสูง	251±10%	248	254	247	252	251	252
2. เส้นผ่านศูนย์กลางครีบใหญ่	148±10%	139.4	141.2	140.6	144	143.2	143.5
3. ระยะครีบ	min 600	625	627	625	770	770	771

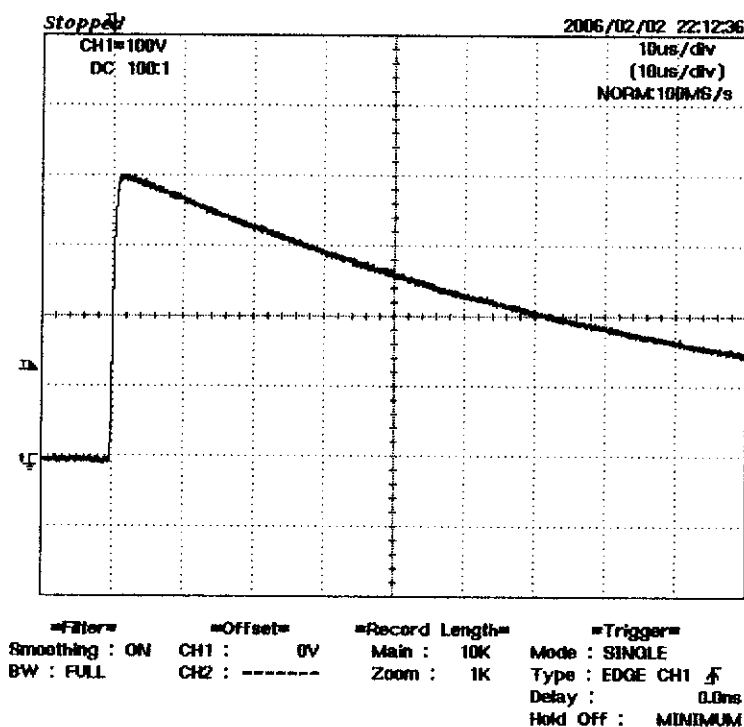
ตารางที่ ง.4 ผลการตรวจสอบลักษณะมิติของกับดักฟ้าผ่าพิกัด 24 kV 10 kA

รายการ	ข้อกำหนด (มม.)	ลักษณะมิติกับดักฟ้าผ่า พิกัด 24 kV 10 kA (มม.)		
		บริษัท B		
		1	2	3
1. ความสูง	251±10%	250	251	250
2. เส้นผ่านศูนย์กลาง ครีบใหญ่	148±10%	143	145	145
3. ระยะครีบ	min 780	793	792	793

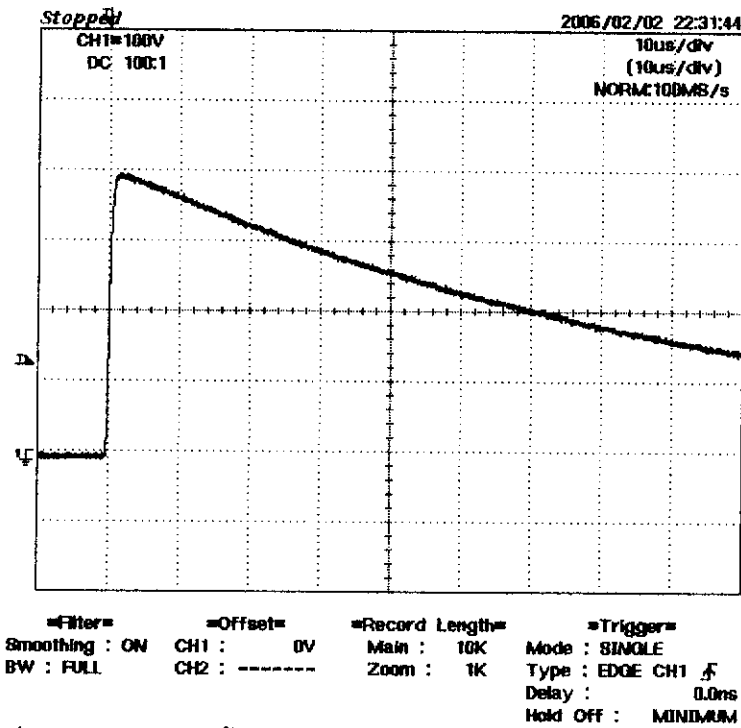
ภาคผนวก จ.

การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว
ของครอบเอาต์ไฟวส์ กรณีเทอร์มินอล – กราวน์

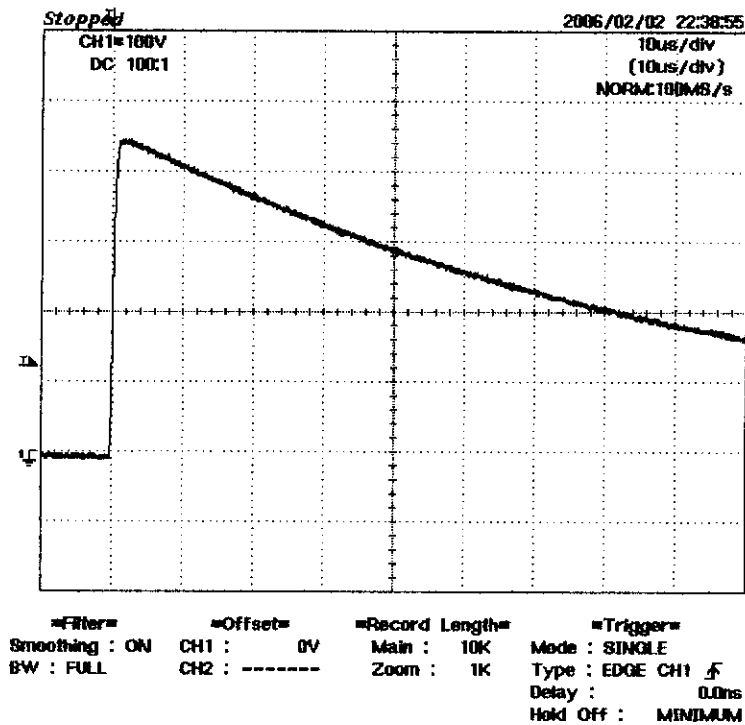
การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของกับดักฟ้าผ่าจะต้องทำทั้งชั่วคราวและชั่วคราวและจะต้องทำการทดสอบทั้งกรณีเทอร์มินอล – เทอร์มินอล และกรณีเทอร์มินอล – กราวน์ หลังจากการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว กรณีเทอร์มินอล – กราวน์ แล้วพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์อยู่ในระดับต่ำ ไม่สามารถทำการป้อนแรงดันพิกัด 125 kV (ที่สภาวะห้องทดสอบ) ได้ หากทำการทดสอบต่อไปอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ จึงได้ลดระดับแรงดันอิมพัลส์ทดสอบลงเหลือประมาณ 100 kV และได้ทดลองป้อนแรงดันดังกล่าวให้กับครอบเอาต์ไฟวส์จำนวน 5 ตัวอย่างทดสอบ สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ ความดันของอากาศมีค่าเท่ากับ 751 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 28.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 63.5 เปอร์เซ็นต์ ผลการคำนวณค่าตัวประกอบแปลงความหนาแน่นอากาศ ; K_a มีค่าเท่ากับ 0.96 และค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้น ; K_h มีค่าเท่ากับ 0.97 ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้



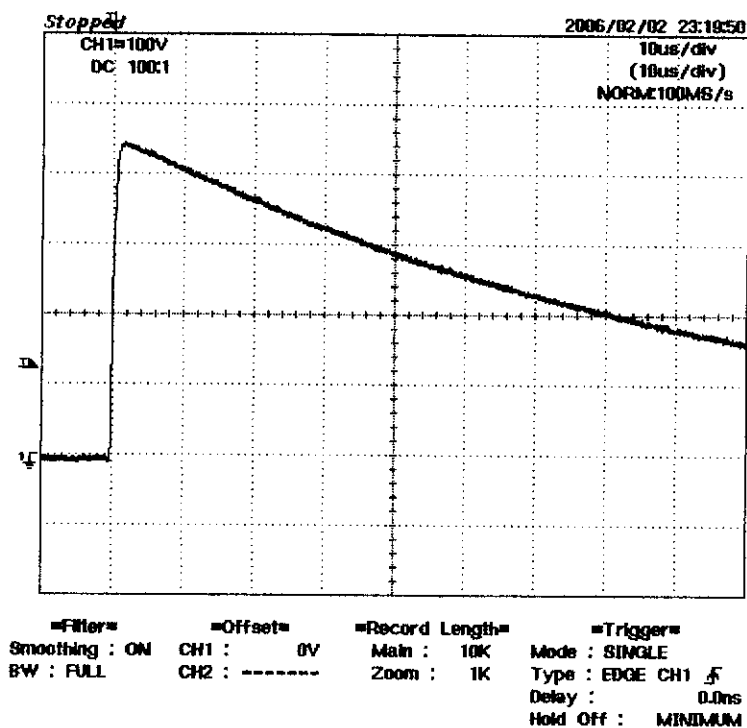
รูปที่ จ.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบครอบเอาต์ไฟวส์ พิกัด 22 kV 100 A
ตัวอย่างที่ 1 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 94 kV โดยที่ $T_1 = 1.20 \mu s$ $T_2 = 58.7 \mu s$



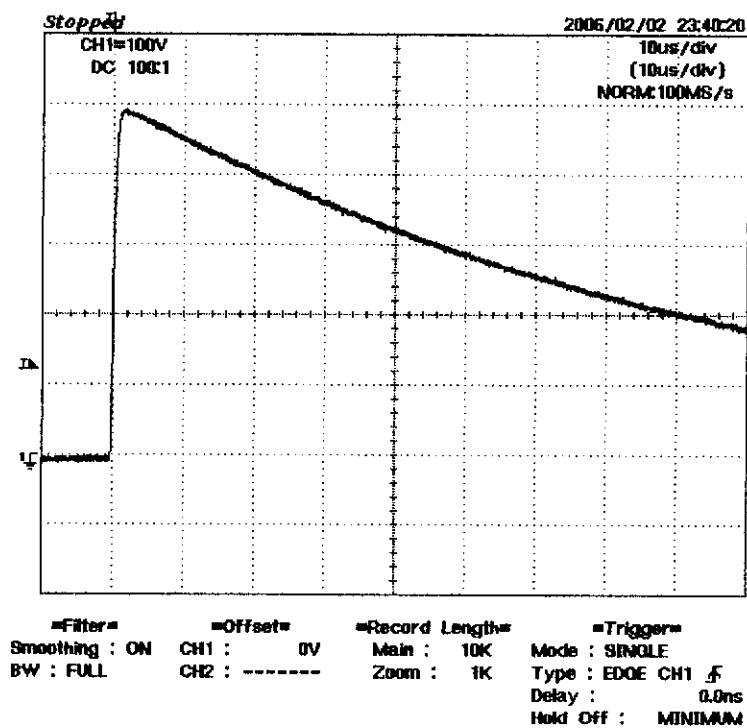
รูปที่ จ.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบรอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A
ตัวอย่างที่ 4 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 94 kV โดยที่ $T_1 = 1.27 \mu s$ $T_2 = 58.5 \mu s$



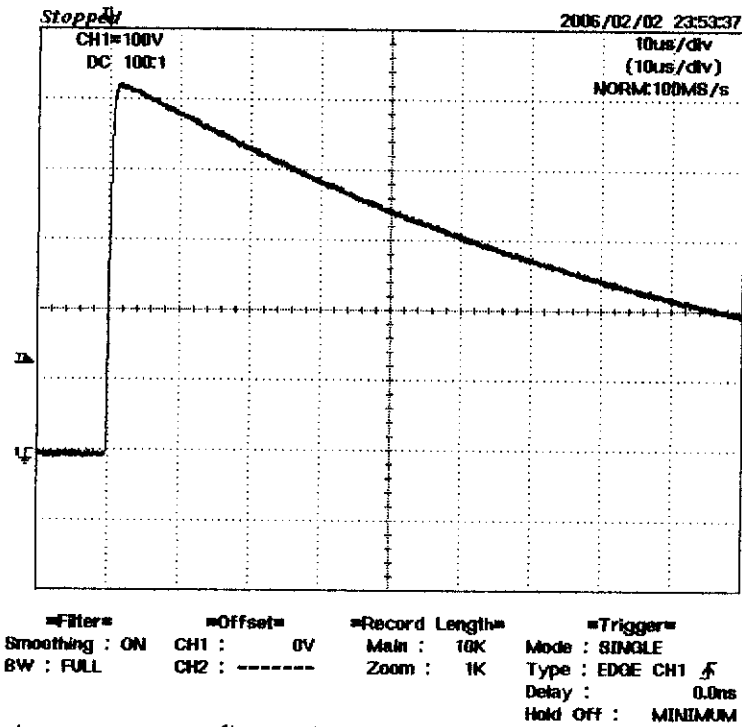
รูปที่ จ.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบรอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A
ตัวอย่างที่ 5 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 105.1 kV โดยที่ $T_1 = 1.23 \mu s$ $T_2 = 61.1 \mu s$



รูปที่ จ.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบรอบเอาท์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A
ตัวอย่างที่ 5 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 105.1 kV โดยที่ $T_1=1.25 \mu\text{s}$ $T_2=59.5 \mu\text{s}$



รูปที่ จ.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบรอบเอาท์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A
ตัวอย่างที่ 5 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 115.7 kV โดยที่ $T_1=1.20 \mu\text{s}$ $T_2=60.6 \mu\text{s}$



รูปที่ จ.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ใช้ทดสอบดรอเอาร์ทพีวีส พิกัด 22 kV 100 A
ตัวอย่างที่ 5 บริษัท A. ที่ระดับแรงดัน 122.1 kV โดยที่ $T_1 = 1.17 \mu s$ $T_2 = 60.4 \mu s$

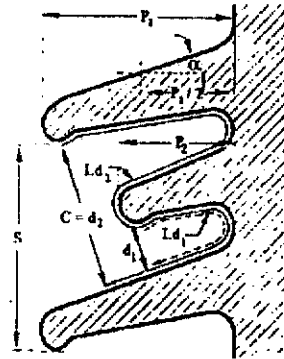
ผลการทดสอบดังกล่าวไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวของดรอเอาร์ทพีวีสได้ เนื่องจากระดับแรงดันอิมพัลส์ที่ทดสอบมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 , IEEE Std C37.41-2000 แต่การทดสอบนี้ทำเพื่อให้ความรู้ความเข้าใจในขั้นตอนและวิธีการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว

ภาคผนวก จ.

การเปรียบเทียบลักษณะมิติของครีบนวนกับดักฟ้าผ่า

ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 815 ได้ระบุลักษณะมิติของครีบนวนไว้ดัง

รูปที่ จ.1



- $C > 30$ มม.
- $S/P \geq 0.8$
- $Ld/d < 5$
- $P_1 - P_2 \geq 15$ มม.
- $\alpha > 5^\circ$
- C.F. ≤ 4 ระดับสูงและสูงมาก
- P.F. > 0.7 ระดับสูงและสูงมาก

รูปที่ จ.1 ลักษณะมิติของครีบนวนกับดักฟ้าผ่า

โดยที่

- C คือ ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน
- S คือ ระยะห่างระหว่างชั้นปีกในแนวตั้งของปีกคู่ใด ๆ
- P คือ ความกว้างของปีกที่ยื่นออกไปจากแกน
- d คือ ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก
- l_d คือ ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดจุดวัดค่า
- α คือ มุมของปีกที่ทำกับแนวราบ
- l_t คือ Creepage distance
- S_t คือ Arcing distance
- C.F. คือ Creepage factor
- P.F. คือ Profile factor

โดยการออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าทั้ง 4 ตัวอย่างและครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในระบบจำหน่ายสามารถเปรียบเทียบลักษณะมิติได้ดังตารางที่ จ.1 สำหรับการออกแบบครีบนวนกับดักฟ้าผ่าจะใช้ข้อมูลเบื้องต้นจากข้อกำหนดการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค คือ

ความสูงของกับดักฟ้าผ่า = 251 ม.ม. \pm 10 %

เส้นผ่านศูนย์กลางครีบนวนใหญ่ = 103 ม.ม. \pm 10 %

ลักษณะมิติของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 1 ครีบเท่า

C (ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน)	=	31	ม.ม.
S (ระยะห่างระหว่างชั้นปีกในแนวตั้งของปีกคู่ใด ๆ)	=	34	ม.ม.
P (ความกว้างของปีกที่ยื่นออกไปจากแกน)	=	37	ม.ม.
d (ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก)	=	31	ม.ม.
l_d (ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดจุดวัดค่า)	=	91.77	ม.ม.
α (มุมของปีกที่ทำกับแนวราบ)	=	15°	
l_c (Creepage distance)	=	740	ม.ม.
S_c (Arcing distance)	=	332	ม.ม.

ลักษณะมิติของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 2 ครีบสลับ

C (ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน)	=	43	ม.ม.
S (ระยะห่างระหว่างชั้นปีกในแนวตั้งของปีกคู่ใด ๆ)	=	46	ม.ม.
P (ความกว้างของปีกที่ยื่นออกไปจากแกน)			
P_1 (ความกว้างของปีกยาว)	=	29	ม.ม.
P_2 (ความกว้างของปีกสั้น)	=	14	ม.ม.
d (ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก)			
d_1 (ระยะห่างปีกสั้น-ปีกยาว)	=	20	ม.ม.
d_2 (ระยะห่างปีกยาว-ปีกยาว)	=	43	ม.ม.
l_d (ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดจุดวัดค่า)			
l_{d1} (ระยะรั้วปีกสั้น-ปีกยาว)	=	40	ม.ม.
l_{d2} (ระยะรั้วปีกยาว-ปีกสั้น)	=	109	ม.ม.
α (มุมของปีกที่ทำกับแนวราบ)	=	15°	
l_c (Creepage distance)	=	654	ม.ม.
S_c (Arcing distance)	=	282	ม.ม.

ลักษณะมิติของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่าย

C (ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน)	=	46	ม.ม.
S (ระยะห่างระหว่างชั้นปีกในแนวตั้งของปีกคู่ใด ๆ)	=	54	ม.ม.
P (ความกว้างของปีกที่ยื่นออกไปจากแกน)			
P ₁ (ความกว้างของปีกยาว)	=	33	ม.ม.
P ₂ (ความกว้างของปีกสั้น)	=	23	ม.ม.
d (ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก)			
d ₁ (ระยะห่างปีกสั้น-ปีกยาว)	=	20	ม.ม.
d ₂ (ระยะห่างปีกยาว-ปีกยาว)	=	46	ม.ม.
l _d (ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดจุดวัดค่า)			
l _{d1} (ระยะรั้วปีกสั้น-ปีกยาว)	=	56	ม.ม.
l _{d2} (ระยะรั้วปีกยาว-ปีกสั้น)	=	136	ม.ม.
α (มุมของปีกที่ทำกับแนวราบ)	=	26°	
l _c (Creepage distance)	=	668	ม.ม.
S _i (Arcing distance)	=	263	ม.ม.

ลักษณะมิติของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 3 ครีบลับ

C (ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน)	=	41	ม.ม.
S (ระยะห่างระหว่างชั้นปีกในแนวตั้งของปีกคู่ใด ๆ)	=	47	ม.ม.
P (ความกว้างของปีกที่ยื่นออกไปจากแกน)			
P ₁ (ความกว้างของปีกยาว)	=	35	ม.ม.
P ₂ (ความกว้างของปีกสั้น)	=	20	ม.ม.
d (ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก)			
d ₁ (ระยะห่างปีกสั้น-ปีกยาว)	=	19	ม.ม.
d ₂ (ระยะห่างปีกยาว-ปีกยาว)	=	41	ม.ม.
l _d (ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดจุดวัดค่า)			
l _{d1} (ระยะรั้วปีกสั้น-ปีกยาว)	=	48	ม.ม.
l _{d2} (ระยะรั้วปีกยาว-ปีกสั้น)	=	133	ม.ม.
α (มุมของปีกที่ทำกับแนวราบ)	=	25°	
l _c (Creepage distance)	=	654	ม.ม.
S _i (Arcing distance)	=	251	ม.ม.

ลักษณะมิติของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าตัวอย่างที่ 4 ครีบลับ

C (ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน)	=	46	ม.ม.
S (ระยะห่างระหว่างชั้นปีกในแนวตั้งของปีกคู่ใด ๆ)	=	51	ม.ม.
P (ความกว้างของปีกที่ยื่นออกไปจากแกน)			
P ₁ (ความกว้างของปีกยาว)	=	39	ม.ม.
P ₂ (ความกว้างของปีกสั้น)	=	20	ม.ม.
d (ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก)			
d ₁ (ระยะห่างปีกสั้น-ปีกยาว)	=	21	ม.ม.
d ₂ (ระยะห่างปีกยาว-ปีกยาว)	=	46	ม.ม.
l _d (ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดจุดวัดค่า)			
l _{d1} (ระยะรั้วปีกสั้น-ปีกยาว)	=	49	ม.ม.
l _{d2} (ระยะรั้วปีกยาว-ปีกสั้น)	=	140	ม.ม.
α (มุมของปีกที่ทำกับแนวราบ)	=	18°	
l _c (Creepage distance)	=	662	ม.ม.
S _a (Arcing distance)	=	262	ม.ม.

ตารางที่ ฉ.1 เปรียบเทียบลักษณะมิติของครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ออกแบบและครีบนวนกับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่าย

ข้อกำหนด			ครีบนวนกับดักฟ้าผ่า				
			ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ใช้งานจริง	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4
C	>	30 ม.ม.	31 ม.ม.	43 ม.ม.	46 ม.ม.	41 ม.ม.	46 ม.ม.
S/P ₁	≥	0.8	0.92	1.59	1.64	1.34	1.28
Ld ₁ /d ₁	<	5	2.96	2.00	2.80	2.54	2.35
Ld ₂ /d ₂	<	5	-	2.54	2.95	3.25	3.05
P ₁ -P ₂	≥	15 ม.ม.	-	15 ม.ม.	10 ม.ม.	15 ม.ม.	19 ม.ม.
α	>	5°	15 องศา	15 องศา	26 องศา	25 องศา	18 องศา
C.F	≤	4	2.50	2.32	2.54	2.60	2.53
P.F.	>	0.7	1.06	1.06	1.02	1.01	1.06

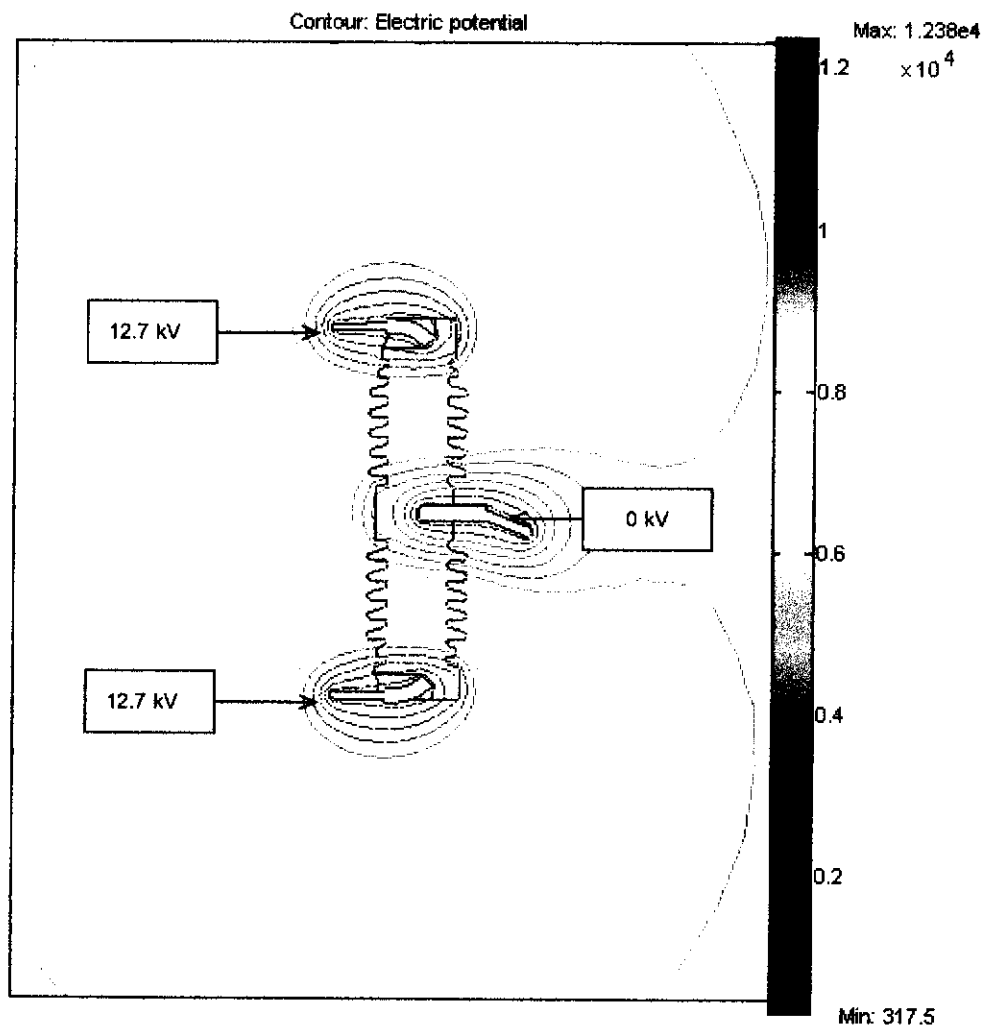
ภาคผนวก ข.

การจำลองวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าของครีบนวนรอบเอาท์พิวส์

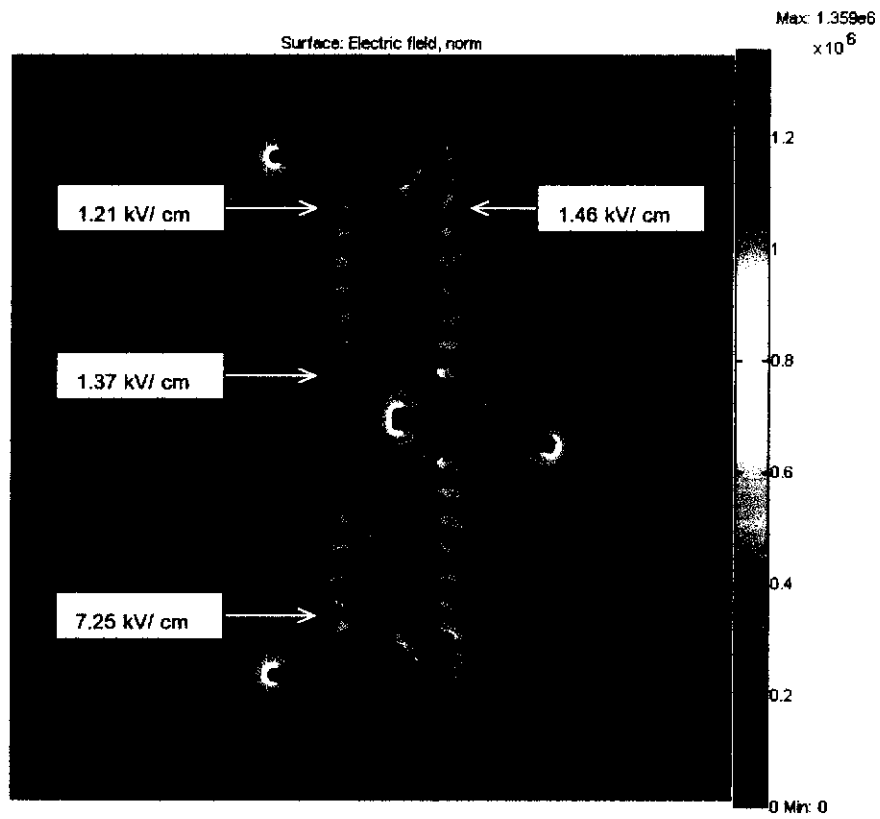
การวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าได้สะดวกขึ้น โดยได้อาศัยการวัดความโค้ง ระยะครีบนวนห่างต่างๆ จากอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง ซึ่งอาจจะมีข้อผิดพลาดหรือมีความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งต่างกับกรณีที่ใช้แบบแปลน (drawing) ของครีบนวนเอาท์พิวส์ที่ใช้งานจริงอยู่ในระบบไฟฟ้า

ข้อกำหนดเบื้องต้นในการจำลองวิเคราะห์สภาพสนามไฟฟ้าของครีบนวนรอบเอาท์พิวส์

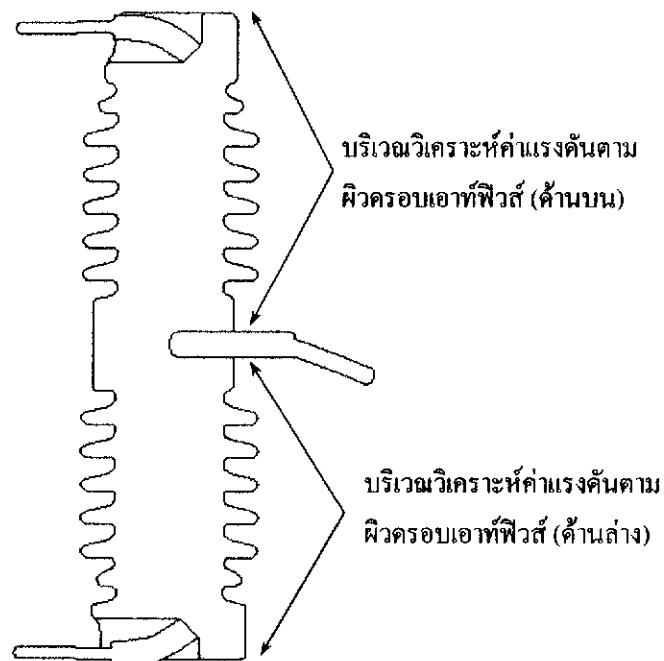
ค่าเปอร์มิตติวิตีของอากาศ	=	1
ค่าเปอร์มิตติวิตีของเหล็ก	=	1
ค่าเปอร์มิตติวิตีของพอร์ตเลน	=	5.7



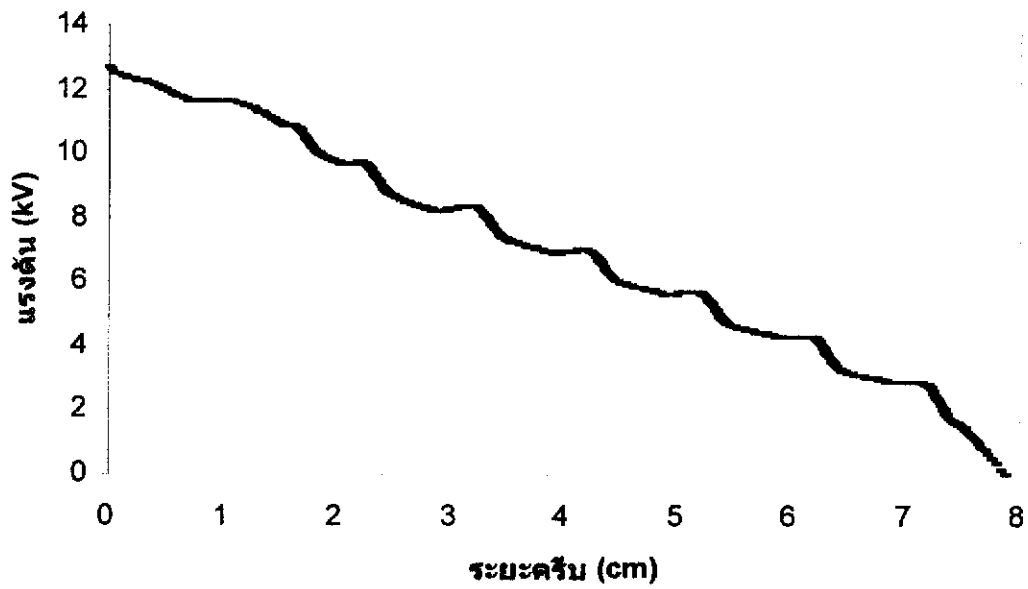
รูปที่ ข.1 การจำลองวิเคราะห์ลักษณะเส้นสมศักย์ของครีบนวนรอบเอาท์พิวส์



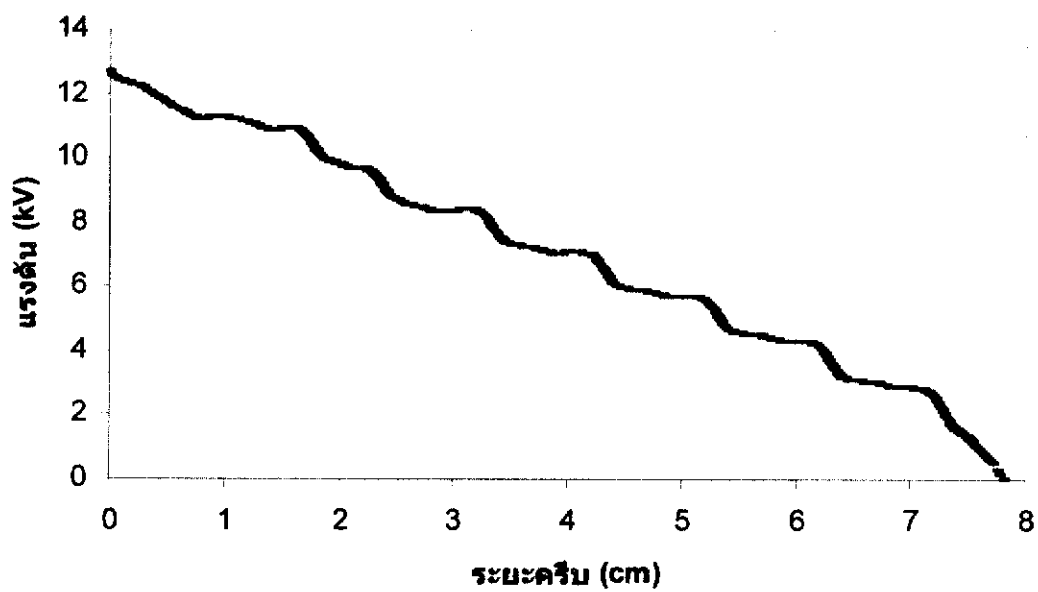
รูปที่ ข.2 การจำลองวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวครีบนวน
ครอบเอาทไฟวส์



รูปที่ ข.3 บริเวณวิเคราะห์ค่าแรงดันตามผิวครอบเอาทไฟวส์



รูปที่ ข.4 การจำลองวิเคราะห์หาค่าแรงดันตามผิวครีบนวนรอบเอาต์พิวส์ (ด้านบน)



รูปที่ ข.5 การจำลองวิเคราะห์หาค่าแรงดันตามผิวครีบนวนรอบเอาต์พิวส์ (ด้านล่าง)