

อิทธิพลของหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยแขวน



นายวิวัฒน์ เรืองกิตติคุณ

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INFLUENCE OF IMPULSE WAVE FRONT ON FLASHOVER VOLTAGE OF SUSPENSION
INSULATOR STRINGS



Mr.Witthawat Ruangittikhun

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลของหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาทไฟตามผิวของพวง
ลูกถ้วยแขวน

โดย

นายวิทวัส เรืองกิตติคุณ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

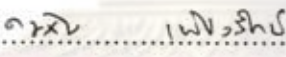
ผศ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ประดิษฐ์ เพ็องฟู)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยัท เรื่องกิตติคุณ: อิทธิพลของหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟตามผิวของพวงลูก
ด้วยแขน (INFLUENCE OF IMPULSE WAVE FRONT ON FLASHOVER VOLTAGE
OF SUSPENSION INSULATOR STRINGS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
ผศ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์, 65 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานการศึกษาอิทธิพลของหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟตาม
ผิวของพวงลูกด้วยแขน โดยเปลี่ยนแปลงความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ระหว่าง 1.4-146 μ s ทั้ง
ขั้วบวกและลบ ตัวอย่างการทดสอบประกอบไปด้วยพวงลูกด้วยแขน ANSI Class 52-4 จำนวน
4-7 ลูก และอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม (Rod-Rod) และแบบทรงกลม-ทรง
กลม (Sphere-Sphere) ผลการศึกษาแสดงถึงผลกระทบของหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อค่าแรงดันวาบ
ไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ (Critical Flashover Voltage: CFO) ของพวงลูกด้วยแขน และอุปกรณ์
อาร์คชิ่งฮอว์นที่ติดตั้งกับพวงลูกด้วยแขน อย่างไรก็ตามผลกระทบของหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อพวง
ลูกด้วยแขนส่งผลให้ค่า CFO ลดลงเล็กน้อยประมาณ 5% และความแตกต่างของค่า CFO
ระหว่างอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นกับพวงลูกด้วยแขนต่ำสุดที่ระยะลูกด้วย 7 ลูก ประมาณ 3%

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5070616521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : CFO / Wavefront Time / Insulator Sting / Arcing Horn

WITTHAWAT RUANGKITTIKHUN : INFLUENCE OF IMPULSE WAVE FRONT
ON FLASHOVER VOLTAGE OF SUSPENSION INSULATOR STRINGS.
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KOMSON PETCHARAKS, Ph.D. 65 pp.

This thesis investigates the influence of impulse voltage wavefront time T_f on the flashover voltage of suspension insulator strings. The wavefront time of impulse voltage are varied between 1.4 - 146 μs for both positive and negative polarities. The specimen under investigation composes of 4-7 discs of 52-4 porcelain insulator, assembled as an insulator string and an arcing horn (rod-rod and sphere-sphere types). The results of investigation show that the wavefront time affects the Critical flashover (CFO) of the insulator strings. However, the effect is only slightly as the reduction of CFO is only about 5% and the difference of CFO value between the arcing Horn and the Insulator strings is 3% which is the lowest CFO value at air gap of 7 discs insulator string.



ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Electrical Engineering.....

Student's Signature *W. Ruangkittikhun*.....

Field of Study : Electrical Engineering.....

Advisor's Signature *K. Petcharak*.....

Academic Year : 2009.....

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัย วิธีการแก้ไขปัญหา ขอบกพร่องจนวิทยานิพนธ์สำเร็จสมบูรณ์ได้ ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ และดร.ประดิษฐ์ เฟื่องฟู ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เป็นที่เรียบร้อย ขอขอบคุณ คุณถาวร เอื้อดี และคุณเกรียงไกร ไชยธัญ และพี่ ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ รวมทั้งความช่วยเหลือในด้านคำแนะนำ เทคนิคการทดสอบ และเอกสารการทดสอบ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณกิตติ เพ็ชรสันทัต หัวหน้ากองเทคโนโลยีสายส่งและการบิน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และพี่ ๆ ในกองเทคโนโลยีสายส่งและการบินทุกท่าน ที่ให้โอกาสสนับสนุนผู้วิจัยได้มาศึกษาต่อระดับปริญญาโท ขอขอบคุณเพื่อนรัฐติพงษ์ฯ, เพื่อนสุทัศน์ฯ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ให้ความช่วยเหลือกับผู้วิจัย ขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ทางผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและส่งเสริมในการเรียนต่อระดับปริญญาโท และคอยให้กำลังใจเสมอมาตลอดชีวิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
2. ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 เบรกดาวนในก๊าซ.....	5
2.2 กลไกการเบรกดาวน.....	6
2.2.1 กลไกเบรกดาวนของทาวน์เซนต์.....	6
2.2.2 กลไกเบรกดาวนของสตรีมเมอร์.....	8
2.3 การเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์.....	9
2.4 ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา.....	10
2.5 ลูกถ้วยฉนวน.....	13
2.5.1 ลักษณะคุณสมบัติทางมิติของลูกถ้วยฉนวน.....	14
2.5.2 ผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นต่อลูกถ้วยฉนวน.....	15
2.5.3 ลักษณะลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ.....	16
2.6 อุปกรณ์ป้องกัน.....	17
2.6.1 อุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์น.....	17

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.6.2 กั๊บดั๊กฟ้าผ่า.....	18
2.7 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวนั.....	18
2.7.1 ผลกระทบของแรงดันเบรกดาวนัต่อรูปร่างแรงดันอิมพัลส์ที่เปลี่ยนแปลง.....	19
2.7.2 ผลกระทบของความถี่ขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์.....	24
3. การทดสอบ.....	25
3.1 การสร้างแรงดันหน้าคลื่นอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	25
3.2 วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้งานการทดสอบ.....	31
3.3 การเก็บข้อมูลทดสอบแรงดันเบรกดาวนั $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์ทดสอบ.....	32
3.4 การแก้ไขค่าแรงดันทดสอบตามสภาวะมาตรฐาน IEC60060-1.....	33
3.4.1 ตัวประกอบแก้ไขตัวความหนาแน่นอากาศ k_1	34
3.4.2 ตัวประกอบแก้ไขความถี่ k_2	35
3.5 อุปกรณ์ทดสอบ.....	38
3.5.1 ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4.....	38
3.5.2 อุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์น.....	40
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์.....	44
4.1 การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวง ลูกถ้วยแขวน 52-4.....	44
4.2 การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์ อาร์คชิ่งฮอร์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม.....	48
4.3 การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์ อาร์คชิ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม.....	52
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	57
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	61
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	63

สารบัญญัตินำ

ตารางที่		หน้า
1.1	แสดงพารามิเตอร์ฟ้าผ่าจาก IEC 62305-1.....	2
2.1	ลักษณะลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ.....	16
3.1	ผลความหนาเคลือบอินทรีย์ต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายนอก.....	27
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k และ ค่า h/δ ตามมาตรฐาน IEC60060-1.....	36
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า g ค่า m และค่า w ตามมาตรฐาน IEC60060-1.....	38
3.4	ลักษณะทางมิติของลูกถ้วยที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.5	ระยะอาร์คของอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นสำหรับการทดสอบ.....	41
4.1	ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4	45
4.2	ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นแบบ แท่งกลม-แท่งกลม, ั้วบวค.....	49
4.3	ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นแบบ แท่งกลม-แท่งกลม, ั้วลบ.....	49
4.4	ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นแบบ ทรงกลม-ทรงกลม, ั้วบวค.....	53
4.5	ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นแบบ ทรงกลม-ทรงกลม, ั้วลบ.....	53
ก.1	ลักษณะการวาทไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยแขวน และแกบอากาศ.....	62

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	อะวานลานซ์ของอิเล็กทรอนิกส์.....	6
2.2	การสร้างอิเล็กทรอนิกส์โดยกระบวนการ γ	7
2.3	กลไกการเกิดเบรกดาว์นแบบสตรึมเมอร์.....	8
2.4	เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาว์นของแรงดันอิมพัลส์.....	10
2.5	ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์.....	11
2.6	เปรียบเทียบเส้นเขตอิมพัลส์ของแกปทรงกลมและแกปทรงกลมปลายแหลม.....	12
2.7	การเลือกอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงหรือปลอกฉนวนนำสาย.....	12
2.8	เส้นทางการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยแบบ A และ B.....	13
2.9	ลักษณะมิติของลูกถ้วย.....	14
2.10	เส้นแรงดันเวลาวาบไฟตามผิวและเจาะทะลุเนื้อฉนวน.....	15
2.11	ลักษณะของลูกถ้วย ANSI Class 52-4 ที่ใช้สำหรับการทดสอบ.....	16
2.12	อุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอว์นติดตั้งกับพวงลูกถ้วยแขวน.....	17
2.13	อุปกรณ์กับดักฟ้าผ่าบนสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	18
2.14	ตัวอย่าง U-curve จากการเปลี่ยนแปลงความยาวหน้าคลื่นต่อแรงดันวาบไฟ วิกฤต.....	19
2.15	การดีจชาร์จชั่วคราวในอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม-แผ่นระนาบ: ผลของหน้าคลื่น อิมพัลส์.....	21
2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างหน้าคลื่นอิมพัลส์กับแรงดันเบรกดาว์น 50%.....	22
2.17	การทดสอบแรงดันวาบไฟตามผิวบนอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม-ทรงกลม และ ทรงกลม-แผ่นระนาบ โดยมีพวงลูกถ้วยและไม่มีพวงลูกถ้วย.....	23
2.18	แรงดันวาบไฟตามผิว 50% ต่อระยะแกป ตามฟังก์ชันของหน้าคลื่นอิมพัลส์ โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม-ทรงกลม และทรงกลม-แผ่นระนาบ.....	23
2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และเวลาหน้าคลื่นวิกฤต.....	24
3.1	วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อ แรงดันวาบไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยแขวนและอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอว์น.....	25
3.2	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.....	26

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.3	ตัวอย่างความต้านทาน $R_{d\ ext}$ ภายนอกที่ใช้เปลี่ยนความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์..	27
3.4	ความยาวหน้าคลื่นจากการเปลี่ยน $R_{d\ ext}$ ภายนอกที่ค่าต่าง ๆ.....	30
3.5	วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
3.6	ความน่าจะเป็นในเกิดแรงดันเบรกดาวร์.....	32
3.7	การทดสอบแรงดันเบรกดาวร์ $U_{50\%}$ โดยวิธีปรับขึ้นและลง.....	33
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นสัมบูรณ์.....	35
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k และค่า h/d ตามมาตรฐาน IEC 60060-1.....	36
3.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง g กับค่า m และ w ตามมาตรฐาน IEC 60060-1.....	37
3.11	ลักษณะทางมิติของลูกถ้วยที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.12	ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 จำนวน 4-7 ลูก.....	40
3.13	ลักษณะทางมิติของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม.....	40
3.14	ลักษณะทางมิติของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นแบบทรงกลม-ทรงกลม.....	41
3.15	อาร์คชิ่งฮอว์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม.....	42
3.16	อาร์คชิ่งฮอว์นแบบทรงกลม-ทรงกลม.....	43
4.1	การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4.....	44
4.2	ผลการทดสอบแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 ชั่วบวก.....	45
4.3	ผลการทดสอบแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 ชั่วลบ.....	46
4.4	ผลการเปรียบเทียบแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 ชั่วบวกและลบ.....	46
4.5	การทดสอบหาแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม.....	48
4.6	ผลการทดสอบแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม, ชั่วบวก.....	50
4.7	ผลการทดสอบแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม, ชั่วลบ.....	50

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.8	ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรั่นแบบแท่งกลม-แท่งกลม ระหว่างแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวกและลบ.....	51
4.9	การทดสอบหาแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรั่นแบบทรงกลม-ทรงกลม.....	52
4.10	ผลการทดสอบแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรั่นแบบทรงกลม-ทรงกลม, ชั่วบวก.....	54
4.11	ผลการทดสอบแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรั่นแบบทรงกลม-ทรงกลม, ชั่วลบ.....	54
4.12	ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรั่นแบบทรงกลม-ทรงกลม ระหว่างแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวกและลบ.....	55
4.13	การเปรียบเทียบแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวนกับอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรั่นต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ชั่วบวก.....	56
4.14	การเปรียบเทียบแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวนกับอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรั่นต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ชั่วลบ.....	57



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แรงดันเกินทรานเซียนต์ (Transient Voltage) หรือแรงดันเสิร์จ (Surge Voltage) เป็นแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งมีเวลาไม่เกิน 5 ms สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ แรงดันเกินภายนอก (External Overvoltage) ได้แก่ แรงดันเกินฟ้าผ่า ซึ่งเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และแรงดันเกินภายในระบบ (Internal Overvoltage) ได้แก่แรงดันเกินสวิตช์ (Switching Overvoltage) และแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) ซึ่งเกิดจากการสับสวิตซ์ตัดต่อวงจรจากอุปกรณ์ใบมีดหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ แรงดันเกินดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดข้อขัดข้องขึ้นในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากผลของแรงดันเกินทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง อาจมีค่าสูงเกินกว่าความคงทนของฉนวนและนำไปสู่การเกิดข้อขัดข้องในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ ดังนั้น การศึกษาเกี่ยวกับสาเหตุและพฤติกรรมของแรงดันเกินจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในการป้องกันและประสานสัมพันธ์ฉนวนอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดข้อขัดข้องที่จะเกิดขึ้นในระบบ

โดยทั่วไประบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยแบ่งระดับแรงดันออกเป็น 69 kV 115 kV 230 kV และ 500 kV สายส่งจะเป็นแบบชิงบนอากาศ ตัวนำจะยึดหรือรองรับด้วยลูกถ้วยฉนวน เพื่อรองรับน้ำหนักและแรงกลที่เกิดขึ้น ข้อดีของการใช้ลูกถ้วยคือสามารถเพิ่มจำนวนลูกถ้วยเกี่ยวกันเป็นพวงได้ในกรณีที่แรงดันเพิ่มขึ้น เพื่อให้ระยะฉนวนที่เป็นอากาศเพิ่มขึ้นด้วย เช่นในระบบสายส่ง 69 kV ใช้ลูกถ้วยแขวนจำนวน 4-5 ลูก ในระบบสายส่ง 115 kV ใช้ลูกถ้วยแขวนจำนวน 7-8 ลูก ในระบบสายส่ง 230 kV ใช้จำนวนลูกถ้วยแขวนจำนวน 14-15 ลูก และในระบบสายส่ง 500 kV ใช้จำนวนลูกถ้วยแขวนจำนวน 27-28 ลูก โดยให้สายตัวนำยึดอยู่ที่ส่วนล่างของลูกถ้วย ส่วนบนของพวงลูกถ้วยยึดแขวนกับเสาส่งไฟฟ้า ทั้งนี้จำนวนของลูกถ้วยต่อระดับแรงดัน จึงต้องมีความเหมาะสมทั้งในแง่ของเศรษฐศาสตร์และความน่าเชื่อถือของระบบ

ฟ้าผ่าเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้การเกิดวาทไฟตามผิวของพวงลูกถ้วย และทำให้เกิดข้อขัดข้องขึ้นบนสายส่ง โดยเฉพาะสายส่งที่มีขนาดแรงดันต่ำกว่า 230 kV ซึ่งมีจำนวนลูกถ้วยฉนวนน้อย เนื่องจากจำนวนของลูกถ้วยฉนวนขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดัน ทำให้เมื่อเกิดฟ้าผ่าบนสายส่งทั้งในทางตรงและทางอ้อม ก็อาจส่งผลให้เกิดการวาทไฟตามผิวบนพวงลูกถ้วยได้ พารามิเตอร์ของฟ้าผ่าจากการสถิติของ IEC 62305-1 [1] แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ฟ้าผ่าจาก IEC 62305-1 [1]

Parameter	Values			Type of Stroke
	95%	50%	5%	
I(kA)	4(98%)	20(80%)	90	*First Negative Short
	4.9	11.8	28.6	*Subsequent Negative Short
	4.6	35	250	First Positive Short (single)
Q_{flash} (C)	1.3	7.5	40	Negative Flash
	20	80	350	Positive Flash
Q_{short} (C)	1.1	4.5	20	First Negative Short
	0.22	0.95	4	Subsequent Negative Short
	2	16	150	First Positive Short (single)
W/R (kJ/ Ω)	6	55	550	First Negative Short
	0.55	6	52	Subsequent Negative Short
	25	650	15000	First Positive Short
di/dt_{max} (kA/ μ s)	9.1	24.3	65	*First Negative Short
	9.9	39.9	161.5	*Subsequent Negative Short
	0.2	2.4	32	First Positive Short
Front Duration (μ s)	1.8	5.5	18	First Negative Short
	0.22	1.1	4.5	Subsequent Negative Short
	3.5	22	200	First Positive Short (single)
Stroke Duration (μ s)	30	75	200	First Negative Short
	6.5	32	140	Subsequent Negative Short
	25	230	2000	First Positive Short (single)
Total Flash Duration (ms)	0.15	13	1100	Negative Flash
	31	180	900	Negative Flash (without single)
	14	85	500	Positive Flash

จากสถิติฟ้าผ่าใน IEC 62305-1 ดังตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าหน้าคลื่นของฟ้าผ่ามีความยาวหน้าคลื่นตั้งแต่ 0.22 ถึง 200 μs แต่โดยทั่วไปการหาค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต (Critical Flashover Voltage :CFO) ของลูกถ้วยจะถูกทดสอบด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากสถิติหน้าคลื่นของฟ้าผ่ามีความยาวแตกต่างจากรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟบนวงลูกถ้วยแขวน และอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม (Rod-Rod) และแบบทรงกลม-ทรงกลม (Sphere-Sphere) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ป้องกันฉนวนลูกถ้วยเสียหายเมื่อเกิดแรงดันเกินขึ้นในระบบ

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา [2-7] ได้มีการทดสอบหาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ที่ส่งผลกระทบต่อแรงดันวาบไฟในแกปอากาศยาว (Long Air Gap) ด้วยการทดสอบภายใต้อิเล็กโตรดหลาย ๆ แบบ เช่น อิเล็กโตรดแท่งกลม-แท่งกลม (Rod-Rod) หรืออิเล็กโตรดแท่งกลม-แผ่นระนาบ (Rod-Plane) ทั้งแบบมีวงลูกถ้วย (ทดสอบลูกถ้วย 24 ลูก) และไม่มีวงลูกถ้วย หรืออิเล็กโตรดสายตัวนำ-แผ่นระนาบ (Conductor-Plane) ซึ่งเมื่อนำผลของแรงดันวาบไฟในแต่ละหน้าคลื่นอิมพัลส์มาแสดงในกราฟจะมีลักษณะคล้ายตัวยู หรือที่เรียกว่า "U-Curve" และหน้าคลื่นอิมพัลส์ที่ทำให้เกิดแรงดันวาบไฟมีค่าต่ำที่สุดในแกปอากาศนั้น ๆ เรียกว่าเวลาหน้าคลื่นวิกฤต (Critical Time to Crest) ถึงแม้ว่าจะมีหลาย ๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของหน้าคลื่นอิมพัลส์ในแกปอากาศยาว แต่ยังไม่พบการศึกษาวิจัยถึงอิทธิพลของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ในแกปอากาศปานกลาง (ระยะแกปอากาศ $0.5 < d < 1.0$ เมตร) ซึ่งเป็นระยะความยาวของแกปอากาศของลูกถ้วยฉนวนระดับแรงดัน 69 kV และ 115 kV ที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาพฤติกรรมของแกปอากาศปานกลาง โดยการทดสอบเปลี่ยนแปลงความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงดันวาบไฟตามผิวที่เกิดขึ้นต่อวงลูกถ้วยแขวนและอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นว่ามีผลกระทบอย่างไร

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

ท่าการศึกษาทดลองเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนต่อลักษณะความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่าง ๆ บนลูกถ้วยแขวน Class 52-4 จำนวน 4-7 ลูก และอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์น ซึ่งเป็นแกปอากาศในช่วงระดับแรงดัน 69-115 kV ทั้งชั่วคราวและถาวร เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อความแข็งแรงของฉนวนอากาศ

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ทดสอบแรงดันอิมพัลส์ 5 หน้าคลื่น ได้แก่ 1.4, 8.4, 56, 96 และ 146 μ s เพื่อหา ลักษณะแรงดันวาบไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยแขวน Class 52-4 จำนวน 4-7 ลูก และอุปกรณ์ อาร์คซึ่งฮอร์น ทั้ง 2 แบบ ได้แก่ แท่งกลม-แท่งกลม และทรงกลม-ทรงกลม ที่ติดตั้งขนานกับลูกถ้วย 4-7 ลูก เพื่อความวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากความยาวหน้าคลื่นต่อแกปอากาศของลูกถ้วยแขวน และอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นที่เกิดขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผลการวิจัยนี้เป็นองค์ความรู้เพื่อให้ทราบถึงค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวน Class 52-4 จำนวน 4-7 ลูก และอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์
2. ผลการวิจัยจะได้ค่าแรงดันเบรกดาวนวิกฤต (CFO) ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ทั้ง 5 หน้าคลื่น ของลูกถ้วยแขวนจำนวน 4-7 ลูก และอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์น เพื่อประโยชน์ในการประสานสัมพันธ์ของฉนวนอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป
3. การวิจัยนี้ได้ทำให้เกิดแนวทางในการพัฒนาออกแบบ เพื่อแก้ปัญหาการวาบไฟของลูกถ้วยจากผลกระทบของรูปร่างของเสิร์จที่เกิดขึ้นในระบบ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของกระบวนการเกิดเบรกดาวนของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตชิงในแกปอากาศ โดยค้นคว้าจากเอกสาร หนังสือ และบทความวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย
2. ออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง
3. ทำการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวนอิมพัลส์ทั้งชั่วบวกละดับ ที่ความยาวหน้าคลื่นต่างๆ ของแกปอากาศ
4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ
5. เรียบเรียง ตรวจสอบ และจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์เสนอต่อกรรมการ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

บทนี้อธิบายถึงกลไกการเบรกดาวนในฉนวนก๊าซหรืออากาศ ผลของแรงดันอิมพัลส์ต่อการเบรกดาวนในฉนวนอากาศ พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการคงทนของฉนวนอากาศ การเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของหน้าคลื่นอิมพัลส์ที่ส่งผลต่อการเกิดเบรกดาวนในฉนวนอากาศ

2.1 เบรกดาวนในก๊าซ

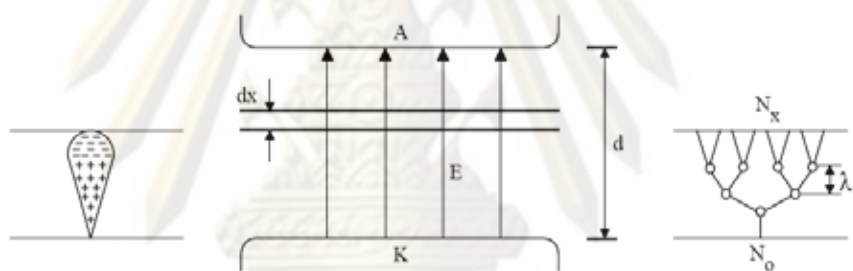
ก๊าซเป็นฉนวนชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเทคนิคการฉนวน สภาพความเป็นฉนวนของก๊าซจะเสียไปเมื่อเกิดการดีสชาร์จในก๊าซ (Gaseous Discharge) การดีสชาร์จในก๊าซเป็นการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ (อิเล็กตรอน ไอออน) ที่เกิดจากการไอออไนเซชันวิธีการใดวิธีการหนึ่ง ไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีสนามไฟฟ้าเป็นต้นเหตุให้อนุภาคประจุมีพลังและเคลื่อนไปสู่อิเล็กโทรดได้ และนั่นคือกระแสไหลในก๊าซ ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าและเกิดการเบรกดาวน การดีสชาร์จเบรกดาวนในแก๊ส อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การเบรกดาวนแบบสมบูรณ์ และการเบรกดาวนบางส่วน [8,9]

1. เบรกดาวนประเภทสมบูรณ์ (Complete Breakdown) หมายถึงเกิดการเบรกดาวนตลอดแก๊สเสียสภาพฉนวนหมดสิ้น แรงดันที่ตกคร่อมอิเล็กโทรดจะมีค่าน้อย และมีกระแสสูงมากตามแนวที่เกิดเบรกดาวน กระแสเบรกดาวนจะขึ้นอยู่กับวงจรภายในของตัวจ่ายแรงดัน ช่วงเวลาที่เบรกดาวนเกิดขึ้นจะเป็นเวลาเดียวกับอาร์คเริ่มเกิด เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนสมบูรณ์ว่าแรงดันเบรกดาวน U_0 (Breakdown Voltage)

2. เบรกดาวนเพียงบางส่วน (Partial Breakdown) หรือเบรกดาวนไม่สมบูรณ์คือการเบรกดาวนที่ไม่เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด เป็นการเกิดไอออไนเซชันแก๊สเพียงบางส่วน หรือเรียกว่าดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) เช่น ดีสชาร์จแบบโคโรนา ดีสชาร์จตามผิว เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง อาจนำไปสู่การเบรกดาวนสมบูรณ์ได้ เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนบางส่วนว่าแรงดันเริ่มเกิด U_i (Inception Voltage)

2.2 กลไกการเกิดเบรกดาวน (Breakdown Mechanisms)

การเกิดเบรกดาวนในก๊าซ หมายถึง การเปลี่ยนสภาพการชนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า จะเกิดได้เมื่อแก๊ปมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนมากพอจนทำให้แก๊ปมีสภาพนำไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นช่วงที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ (Nonself-Sustained) ไปสู่สถานะภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ (Self-Sustained) กระแสที่เพิ่มขึ้น หมายถึง จำนวนอนุภาคประจุ คืออิเล็กตรอน และไอออนมีจำนวนมากขึ้นจนถึงค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดเบรกดาวน ซึ่งปัจจุบันมีการอธิบายทฤษฎีกระบวนการเพิ่มอนุภาคประจุไปสู่ค่าวิกฤต หรือกลไกการเกิดเบรกดาวนในก๊าซมี 2 ทฤษฎี คือ กลไกเบรกดาวนของทาวน์เซนต์ (Townsend Theory) และกลไกเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ (Streamer Theory) ทั้งสองทฤษฎีใช้พื้นฐานของการเกิดอะวาลานซ์วิกฤติ (Critical Avalanche) เป็นจุดเปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปสู่การเกิดเบรกดาวนตามกลไกเบรกดาวนของทาวน์เซนต์ และจากอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์ตามกลไกเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์



รูปที่ 2.1 อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน

2.2.1 กลไกเบรกดาวนของทาวน์เซนต์

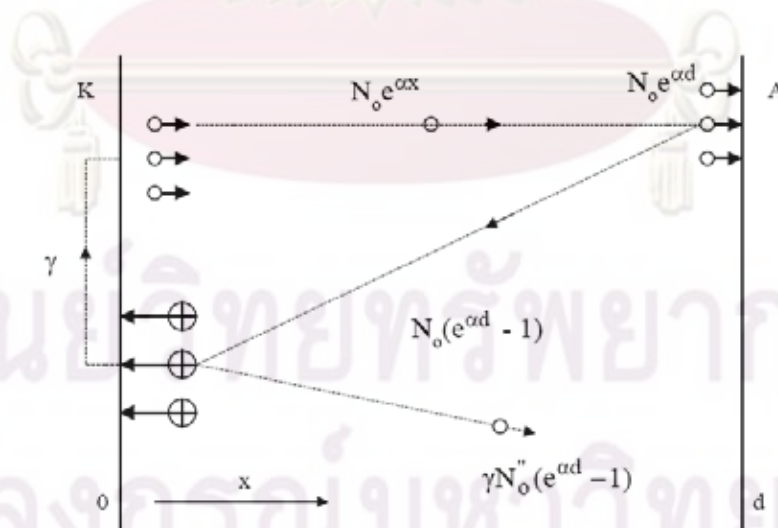
กลไกการเกิดเบรกดาวนของทาวน์เซนต์ สามารถอธิบายได้คือ เบรกดาวนเกิดขึ้นจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณอย่างต่อเนื่องในแก๊ป โดยการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนเกิดจากกระบวนการไอออไนเซชันขั้นต้น (Primary Process หรือ α -Process) คืออิเล็กตรอนอิสระเริ่มต้นเคลื่อนที่จากการรับพลังงานจากสนามไฟฟ้า วิ่งไปชนโมเลกุลทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุลเป็นอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นทวีคูณเป็นอะวาลานซ์ แต่กระบวนการขั้นต้นนี้ไม่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวนได้ ต้องมีกระบวนการไอออไนเซชันขั้นที่สอง (Secondary Process) มาเสริม โดยประกอบไปด้วย การเกิดไอออไนเซชันจากไอออนบวกวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซ (β -Process) และกระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนที่หลุดจากแคโทด (γ -Process) ซึ่งเกิดจากไอออนบวกที่มีพลังงานมากพอวิ่งชนแคโทด ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากแคโทด

ในระหว่างที่อนุภาคประจุเคลื่อนไประหว่างอิเล็กโทรด อาจเกิดการชนกันและเกิดการไอออไนเซชันหลายครั้งก่อนถึงอิเล็กโทรด ทฤษฎีของทาวน์เซนต์อธิบายว่าจำนวนการเกิดไอออไนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาคประจุเคลื่อนไป กำหนดด้วยค่าสัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชันของทาวน์เซนต์ (Townsend Ionization Coefficient) คือ α β และ γ โดย α เป็นค่าเฉลี่ยของการชนไอออไนเซชันของอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ที่เคลื่อนที่ไปในระยะแกป 1 ซม. ส่วน β เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออไนเซชันหนึ่งตัวชนอะตอมของก๊าซต่อหน่วยระยะทางตามแนวสนามไฟฟ้า แต่เนื่องจากไอออไนเซชันมีมวลมากเคลื่อนที่ช้า จึงเกิดกระบวนการ β ได้ยาก ดังนั้นกระบวนการ γ จึงเป็นกระบวนการสำคัญสำหรับการเกิดไอออไนเซชันขั้นที่สอง ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการ γ มาจากสามสาเหตุคือ ไอออไนเซชันที่ชนแคโทด (γ_i) , โฟตอนที่ชนแคโทด (γ_e) ทำให้โฟโตอิเล็กตรอน (Photo Electron) หลุดออกมา และจากโฟตอนไอออไนเซชัน (γ_p) ดังนั้น $\gamma = \gamma_i + \gamma_e + \gamma_p$ กระบวนการขั้นที่สองเหล่านี้อาจเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันได้ อิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการขั้นที่สองนี้จะทำให้เกิดอะวาลานซ์เพิ่มขึ้น เกิดขึ้นซ้ำ ๆ จนเบรกดาวน์

เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ดังสมการที่ (2.1)

$$\Gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \quad (2.1)$$

โดย d คือระยะแกป และ Γ มีค่าเป็น $\frac{\beta}{\alpha} + \gamma$

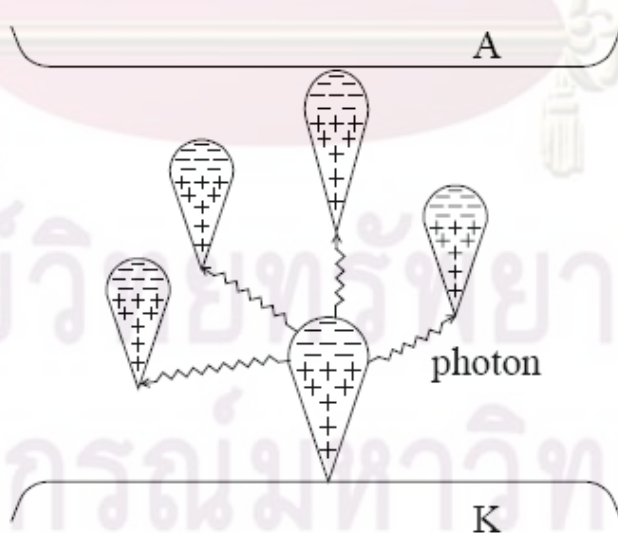


รูปที่ 2.2 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ γ

2.2.2 กลไกการเบรกดาวนซ์ของสตริมเมอร์

เนื่องจากทฤษฎีของทาวน์เซนต์ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์เบรกดาวนซ์ได้ทุกกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับเวลาในการก่อตัวของอะวาลานซ์ (Formative time) ที่ทำให้เกิดการดีสชาร์จประทังตัวเองอยู่ได้ในก๊าซที่มีความดัน เช่น การเกิดเบรกดาวนซ์ในช่วงแก๊ปกว้าง ๆ ในความแรงดันบรรยากาศด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนซ์ในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด (Chopped time T_c) < 0.1 ไมโครวินาที เมื่อคำนวณตามกระบวนการของทาวน์เซนต์ การเกิดอะวาลานซ์ และการเกิดไอออนไนเซชันต้องใช้เวลามากกว่านี้ เพราะเวลาดังกล่าวเป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงแคโทดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนได้

กลไกการเกิดเบรกดาวนซ์แบบสตริมเมอร์อธิบายการเกิดสปาร์กดีสชาร์จจากอะวาลานซ์เดี่ยว ซึ่งมีประจุค้างเกิดขึ้นจากอะวาลานซ์เอง และเปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปเป็นพลาสมาสตริมเมอร์ ทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดเบรกดาวนซ์ขึ้น การไอออนไนเซชันจำนวนมาก มาจากพลังโฟตอน (Photo-ionization) ของก๊าซโมเลกุลส่วนหน้าของสตริมเมอร์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของสตริมเมอร์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมาก และทำให้เกิดการไอออนไนเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมาก เกิดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเป็นลำระหว่างอิเล็กโทรด และปล่อยให้ไอออนบวกอยู่เบื้องหลังของกลุ่มประจุ ความเครียดที่ส่วนหัวและส่วนหางเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดโฟโตไอออนไนเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.3 เกิดอะวาลานซ์ใหม่ซ้อนขึ้นและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กลุ่มประจุที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความนำไฟฟ้าสูงชันมีลักษณะเป็นแนวสตริมเมอร์ และเกิดเบรกดาวนซ์ขึ้นเรียกว่าสตริมเมอร์เบรกดาวนซ์



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดเบรกดาวนซ์แบบสตริมเมอร์

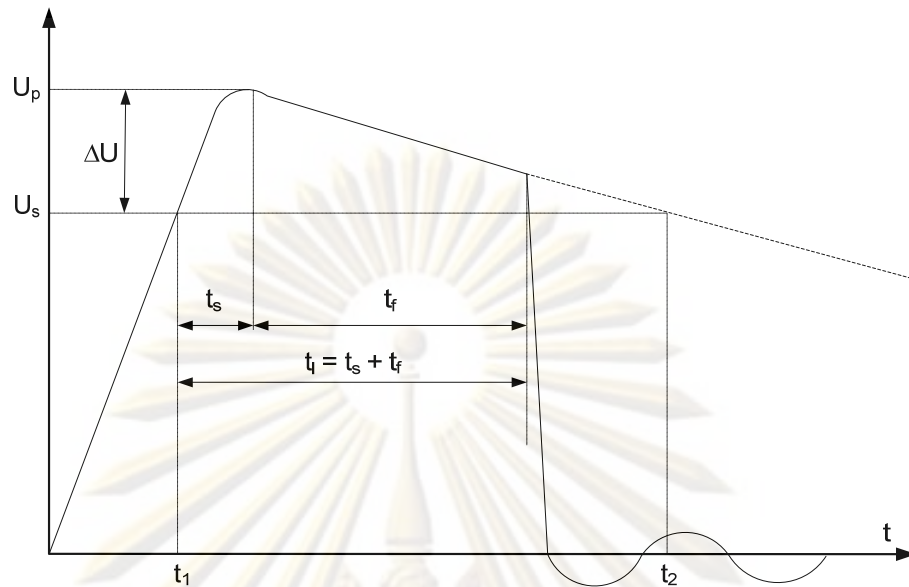
เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวนกำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้าง โดยสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนประจุเท่ากับอะวาลานซ์วิกฤตประมาณ 10^8 ตัว โดยไม่ขึ้นกับชนิดและความดันของก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

การเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์เป็นการกล่าวถึง การเกิดเบรกดาวนในสนามไฟฟ้า โดยใช้ผลของประจุค้างเป็นหลัก และอธิบายการเกิดเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าที่กระจายแบบไม่สม่ำเสมอสูงและในกรณีที่ช่องอิเล็กโตรดห่างกันมาก ผลของประจุค้างทำให้ชนิดชั่วคราวที่ป้อนให้อิเล็กโตรดมีผลอย่างมากต่อระดับแรงดันเบรกดาวน โดยเฉพาะอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สมมาตร

2.3 การเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์

สำหรับแรงดันกระแสสลับ หรือแรงดันกระแสตรง เป็นกรณีของแรงดันสถานะอยู่ตัว (Steady State Voltage) ถือว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าคงตัว แต่ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ขนาดแรงดันจะคงตัวอยู่ในช่วงระยะเวลาอันสั้น และสนามไฟฟ้าจะอยู่ในระยะเวลาอันสั้นด้วย เมื่อแรงดันอิมพัลส์มีขนาดแรงดันเท่ากับแรงดันคงตัว ซึ่งมีระดับแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ แต่ปรากฏว่าไม่เกิดเบรกดาวน จะต้องรออีกระยะเวลาหนึ่งจึงจะเกิดการเบรกดาวนได้ ช่วงระยะเวลานับตั้งแต่แรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันคงตัวที่สามารถเกิดเบรกดาวนได้ จนถึงเวลาเบรกดาวนที่เกิดขึ้นจริงของแรงดันอิมพัลส์ เรียกช่วงเวลานี้ว่า เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน (Time Lag of Breakdown) t_l

เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน t_l ในแรงดันอิมพัลส์ สนามไฟฟ้าคงตัวอยู่ในช่วงเวลาเพียงไม่กี่นาโนวินาที อิเล็กตรอนที่พอเหมาะจากธรรมชาติ อาจจะไม่เพียงพอที่จะเริ่มต้นทำให้เกิดอะวาลานซ์ไปสู่การเบรกดาวนได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊ปที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าที่เพียงพอ อิเล็กตรอนที่อยู่ในปริมาตรแก๊ปกระจายเป็นสถิติ ดังนั้นตั้งแต่แรงดันอิมพัลส์เพิ่มขึ้นจนขนาดแรงดันเท่ากับแรงดันสถานะคงตัว U_s จนกระทั่งพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นเป็นสถิติ เรียกว่า เวลาล่าช้าสถิติ t_s (Statistic time lag) เมื่อพบอิเล็กตรอนแล้วต้องใช้เวลาในการไอออนไนเซชันสร้างอะวาลานซ์ตามกระบวนการเบรกดาวนเพื่อให้ได้อิเล็กตรอนตามเงื่อนไข ช่วงเวลาดังกล่าวเรียกว่า เวลาล่าช้าก่อตัว t_f (Formative time lag) จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า เวลาที่ใช้ในการเกิดเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ แสดงดังสมการที่ 2.2



รูปที่ 2.4 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวนซ์ของแรงดันอิมพัลส์

$$\text{เวลาล่าช้ารวม} \quad t_i = t_s + t_f \quad (2.2)$$

แรงดันเบรกดาวนซ์อิมพัลส์ U_p จะต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาวนซ์สถานะคงตัว U_s โดยอัตราส่วนแรงดัน U_p ต่อแรงดัน U_s คือ U_p/U_s เรียกว่าอัตราส่วนอิมพัลส์ (Impulse Ratio)

U_s = ค่าแรงดันสถิติในการเกิดเบรกดาวนซ์ (Statistic Breakdown Voltage)

U_p = ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ (Transient Voltage)

$U_p - U_s$ เรียกว่า แรงดันเกิน (Over Voltage)

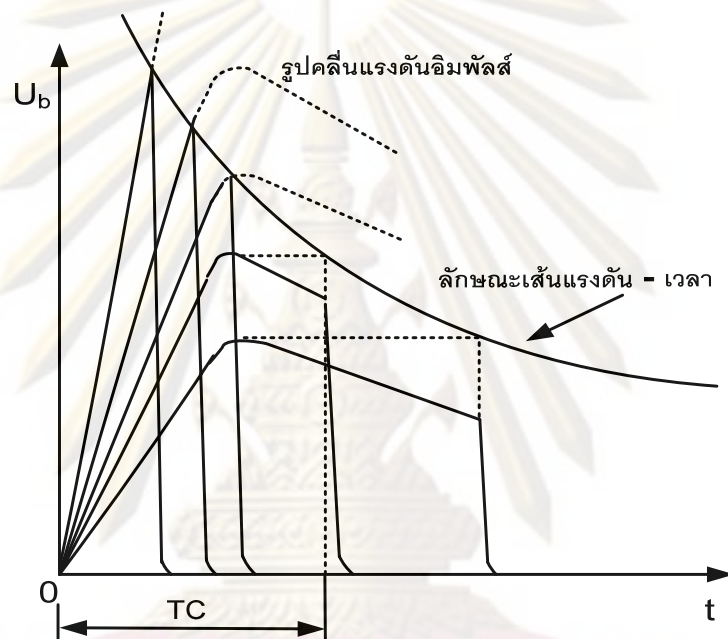
อัตราส่วน U_p/U_s และ $U_p - U_s$ มีประโยชน์ในการออกแบบอุปกรณ์ป้องกัน

แรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันสูง ($\frac{dU}{dt}$ สูง) ช่วงเวลาหน้าคลื่นสั้นหรือเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดแล้วลดลงก็ยิ่งสั้น แสดงว่าสนามไฟฟ้าคงอยู่สั้นมาก โอกาสการเกิดเบรกดาวนซ์ก็น้อยลง จะให้เกิดเบรกดาวนซ์ต้องเพิ่มความเครียดสนามไฟฟ้าก็คือเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นนั่นเอง

2.4 ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา (Voltage-Time Characteristic)

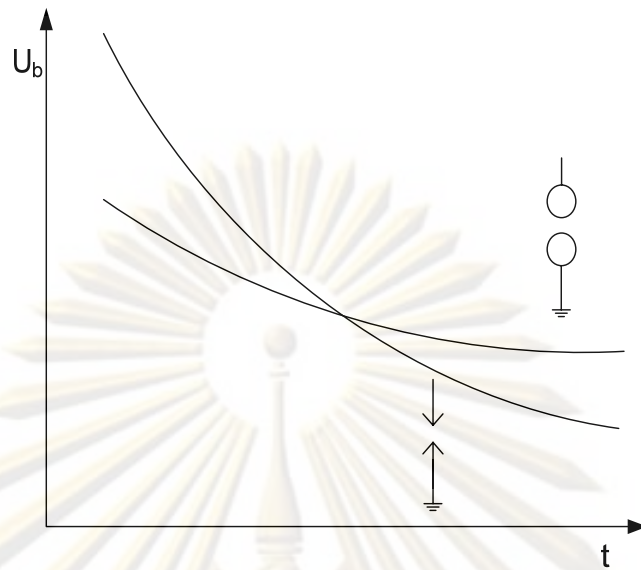
ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกแสดงได้ด้วย ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์ คือความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวนซ์กับเวลาในการเบรกดาวนซ์หรือเวลาคลื่นตัด ดังรูปที่ 2.5 การสร้างอิล็กตรอนอิสระเพื่อก่ออะวาลานซ์ให้ได้

ค่าวิกฤต จะต้องใช้เวลาในการก่อตัวอะวาลานซ์ t_c ถ้าช่วงเวลาแรงดันคงตัวอยู่น้อยจำเป็นต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น เพื่อให้สตริมเมอร์เกิดขึ้นได้ตามเงื่อนไขในเวลาอันรวดเร็ว นั่นคือค่าแรงดันเบรกดาวนจะสูงขึ้นถ้าหากช่วงเวลาคงตัวของแรงดันสั้นลง และเมื่อพิจารณาแรงดันอิมพัลส์ที่ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าเวลาที่ต้องการสำหรับการเบรกดาวนจะลดลงเมื่อขนาดแรงดันอิมพัลส์เพิ่มขึ้น ซึ่งเราจะได้ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเส้นดังกล่าวจะบอกถึงค่าเวลาและระดับแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน



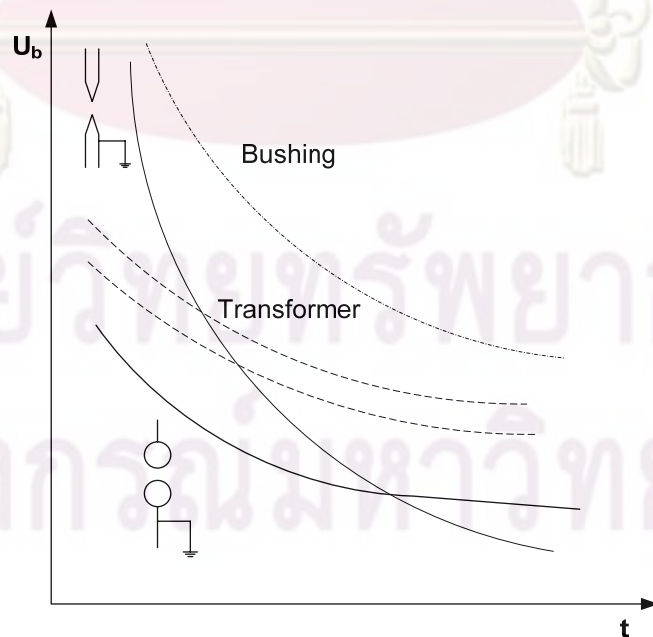
รูปที่ 2.5 ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา

จากรูปที่ 2.6 แสดงความแตกต่างของเส้นแรงดันอิมพัลส์ของแกปปลายแหลมและแกปของทรงกลม ในกรณีของแกปทรงกลมจะมีปริมาตรยังผลมากกว่าแกปปลายแหลม กล่าวคือจำนวนอิเล็กตรอนที่มีโอกาสเริ่มต้นสร้างอะวาลานซ์มากกว่า ดังนั้นในช่วงของเวลาน้อย ๆ แกปทรงกลมจึงมีแรงดันเบรกดาวนต่ำกว่าแกปปลายแหลม เพราะแกปปลายแหลมมีปริมาตรยังผลน้อยกว่า แต่ที่เวลามาก ๆ ผลต่อการสร้างอะวาลานซ์วิกฤต จะมีเฉพาะผลของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ที่แกปปลายแหลมจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าแกปทรงกลม ค่าแรงดันเบรกดาวนของแกปปลายแหลมจึงต่ำกว่าแกปทรงกลม



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบเส้นเขตอิมพัลส์ของแกปทรงกลมและแกปทรงกลมปลายแหลม

ความรู้เกี่ยวกับลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา มีประโยชน์มากต่อการออกแบบเกี่ยวกับการฉนวนระบบไฟฟ้าแรงสูง และการเลือกลักษณะอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเสิร์จให้แก่อุปกรณ์ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง เช่นหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.7 แสดงการป้องกันหม้อแปลงและปลดออกฉนวนนำสาย ในเวลาปกติใช้แกปปลายแหลมป้องกันหม้อแปลงก็เพียงพอ แต่ช่วงเวลาทรานเซียนต์ใช้ไม่ได้ เพราะว่าที่หน้าคลื่นอิมพัลส์สั้น ๆ หม้อแปลงจะเบรกดาวนก่อนที่แกปปลายแหลมจะเบรกดาวน เพราะฉะนั้นควรเลือกใช้แกปทรงกลมเป็นตัวป้องกันหม้อแปลง

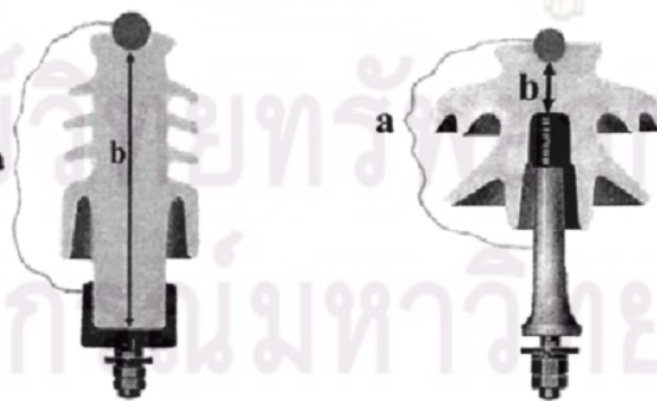


รูปที่ 2.7 การเลือกอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงหรือปลดออกฉนวนนำสาย

2.5 ลูกถ้วยฉนวน (Insulator)

ลูกถ้วยฉนวนเป็นอุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้าใช้สำหรับยึดหรือรองรับสายตัวนำไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งประกอบด้วยฉนวนภายนอก คือส่วนที่เป็นอากาศโดยรอบลูกถ้วยฉนวน และฉนวนภายในคือส่วนที่เป็นเนื้อสารที่ใช้สำหรับทำลูกถ้วยฉนวน ซึ่งอาจเป็นเนื้อพอร์ซเลน (Porcelain) เนื้อแก้วเหนียว (Toughened Glass) หรือเนื้อสารสังเคราะห์ (Composite หรือ Non-Ceramic :NCI) สำหรับลูกถ้วยพอร์ซเลน และลูกถ้วยแก้วเหนียว จะมีคงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดี มีอายุใช้งานมากกว่า 50 ปี เกิดการรวบไฟได้ง่ายเมื่ออยู่ในพื้นที่มลภาวะ ในส่วนของลูกถ้วยเนื้อสังเคราะห์ จะมีน้ำหนักเบา และผิวของลูกถ้วยมีคุณสมบัติไม่เปียกน้ำ (Hydrophobicity) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ทนต่อสภาพที่มีการเปรอะเปื้อนได้ดี แต่ลูกชนิดนี้ใช้งานน้อยมาก เนื่องจากยังไม่มั่นใจในเรื่องคุณภาพ อายุการใช้งาน โดยอยู่ระหว่างขั้นตอนการศึกษา และทดลองใช้งาน

ลูกถ้วยฉนวนอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภท A มีความยาวของแนวเจาะทะลุของเนื้อฉนวนมากกว่าครึ่งหนึ่งของระยะวาบไฟตามผิวที่เป็นอากาศโดยรอบลูกถ้วยฉนวน ได้แก่ ลูกถ้วยแท่ง ลูกถ้วยแท่งก้านตรง ลูกถ้วยคอดัน เป็นต้น และประเภท B คือ มีความยาวของแนวเจาะทะลุของเนื้อฉนวนน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะวาบไฟตามผิวที่เป็นอากาศโดยรอบลูกถ้วยฉนวน ได้แก่ ลูกถ้วยแขวน และลูกถ้วยก้านตรง ดังรูปที่ 2.8 เมื่อลูกถ้วยฉนวนได้รับแรงดันเกินกว่าฉนวนยอมรับได้ก็จะเกิดการเบรกดาวน ถ้าเกิดการเบรกดาวนผ่านอากาศรอบ ๆ ลูกถ้วย เรียกว่า การรวบไฟตามผิว (Flashover) แต่ถ้าเบรกดาวนผ่านเนื้อฉนวนแข็ง เรียกว่า การเจาะทะลุ (Puncture) ซึ่งการรวบไฟตามผิวของลูกถ้วยผ่านอากาศฉนวนของลูกถ้วยจะกลับคืนปกติได้ แต่การเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนแข็งทำให้เสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร



ก) ประเภท A เมื่อ $b > a/2$

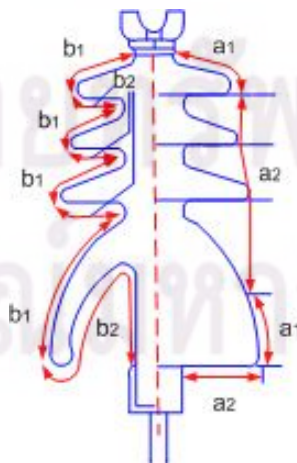
ข) ประเภท B เมื่อ $b < a/2$

รูปที่ 2.8 เส้นทางการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยแบบ A และ B

2.5.1 ลักษณะคุณสมบัติทางมิติของลูกถ้วยฉนวน

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง สายส่งกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นแบบชิ่งอากาศ โดยใช้ลูกถ้วยฉนวนสำหรับการยึดหรือรองรับสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งความคงทนทางไฟฟ้าใช้อากาศเป็นฉนวน อากาศที่อยู่โดยรอบลูกถ้วยนั้น มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดีกว่าผิวของลูกถ้วยแม้ผิวของลูกถ้วยสะอาด ยิ่งเมื่อนำลูกถ้วยมาใช้งานผิวของลูกถ้วยเป็นที่สะสมของฝุ่นละอองและความเปื้อนอื่นต่าง ๆ ยิ่งทำให้ผิวของลูกถ้วยมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าอากาศมากขึ้น ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวได้ง่าย (Flashover) ดังนั้นจึงมีการออกแบบลูกถ้วยให้มีลักษณะรูปร่างและมิติทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ยากขึ้น เช่นการเพิ่มระยะรั้วของผิวลูกถ้วย โดยทำปึกยื่นออกจากแนวแกน แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบลักษณะลูกถ้วยจะต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อเนื่องฉนวนด้วย ลักษณะสมบัติทางมิติของลูกถ้วยได้แก่

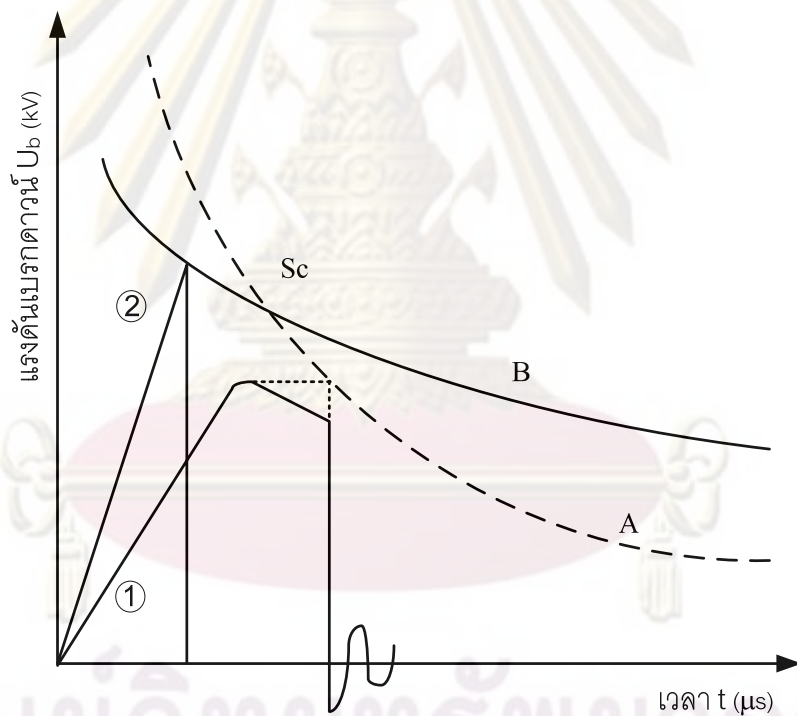
1. ระยะรั้ว (Leakage Distance) คือระยะที่สั้นที่สุดเมื่อวัดตามผิวลูกถ้วยระหว่างอิเล็กโทรด โดยส่วนหนึ่งของระยะรั้วจะป้องกันไว้ไม่ให้ผิวเปียกได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาพฝนตก ซึ่งจะช่วยให้ลูกถ้วยมีความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวได้สูงขึ้น ดังระยะ b คือ (b_1+b_2) ดังรูป 2.9
2. ระยะรั้วป้องกัน (Protective Leakage Distance) คือระยะที่ไม่เปียกฝน ซึ่งหมายถึงระยะใต้ปึกของลูกถ้วย หรือผลรวมของ b_2
3. ระยะอาร์ก (Arcing Distance) คือ ระยะสั้นที่สุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดผ่านอากาศ หรือระยะที่วัดตามแนวอาร์ก แบ่งเป็น
 - ระยะอาร์กแห้ง คือ ระยะอาร์กที่วัดในสภาวะลูกถ้วยแห้ง มีทั้งลักษณะที่วัดตามผิวและส่วนที่เป็นอากาศ คือผลรวมของระยะ a_1+a_2
 - ระยะอาร์กเปียก คือ ระยะอาร์กที่วัดในลักษณะลูกถ้วยเปียก ส่วนใหญ่จะเป็นความเปื้อนระเหยระยะอาร์กเปียกคือ ระยะผลรวมของ a_2



รูปที่ 2.9 ลักษณะมิติของลูกถ้วย

2.5.2 ผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นต่อลูกถ้วยฉนวน

กรณีของแรงดันอิมพัลส์ ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนจะเป็นไปตามลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา ($v - t$ curve) ดังเส้นกราฟ A ในรูปที่ 2.10 และค่าแรงดันเบรกดาวน์หรือเจาะทะลุเนื้อฉนวนจะเป็นไปตามเส้นกราฟ B จากรูปที่ 2.10 จะสังเกตเห็นได้ว่าจุด S_c เป็นจุดตัดเส้นกราฟระหว่างเส้นกราฟ A และเส้นกราฟ B ซึ่งแสดงค่าวิกฤตของการประสานสัมพันธ์ระหว่างฉนวนภายในและภายนอก โดยถ้าเสิร์จหรือแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันสูงกว่าจุดวิกฤต S_c ดังเส้นกราฟที่ 2 จะทำให้เกิดการเจาะทะลุเนื้อฉนวนแข็งก่อนเกิดการวาบไฟตามผิว แต่ถ้าเสิร์จหรือแรงดันอิมพัลส์มีความชันต่ำกว่าจุดวิกฤต S_c ดังเส้นกราฟที่ 1 จะเกิดการวาบไฟตามผิวของฉนวนอากาศรอบลูกถ้วย ซึ่งการเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวนจะหมายถึงการเสียหายอย่างถาวร โดยทั่วไปการออกแบบลูกถ้วยฉนวนจะพยายามให้ลูกถ้วยฉนวนเกิดการวาบไฟตามผิวก่อนเสมอ



เส้น A : ลักษณะ $v-t$ ของอากาศรอบลูกถ้วย

เส้น B : ลักษณะ $v-t$ ของเนื้อฉนวนลูกถ้วย

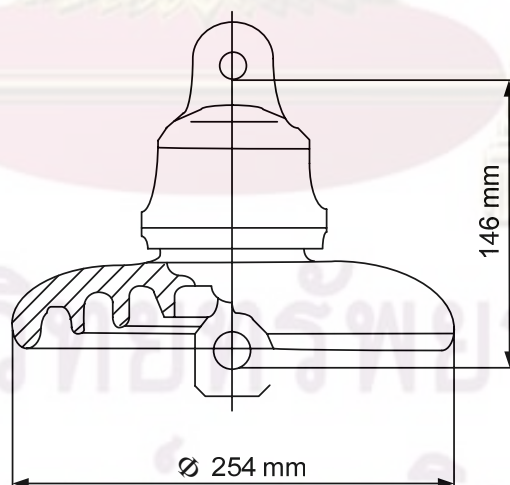
รูปที่ 2.10 เส้นแรงดันเวลาวาบไฟตามผิวและเจาะทะลุเนื้อฉนวน

2.5.3 ลักษณะลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ

ลูกถ้วยฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าในประเทศไทย โดยทั่วไปจะใช้ลูกถ้วยพอร์ซเลน ANSI Class 52-3 และ 52-4 เป็นลูกถ้วยแขวนในการรองรับหรือยึดสายส่งตัวนำ โดยการศึกษาวิจัยในโครงการนี้จะใช้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ANSI Class 52-4 ในการทดสอบ ซึ่งลูกถ้วยฉนวน ANSI Class 52-3 และ 52-4 จะมีลักษณะและรูปร่างมิติที่เหมือนกัน แต่ต่างกันที่จุดยึดของลูกถ้วยฉนวน ฉะนั้นผลการวิจัยลูกถ้วยฉนวน ANSI Class 52-4 จึงสามารถใช้อ้างอิงกับลูกถ้วยฉนวน ANSI Class 52-3 ได้

ตารางที่ 2.1 ลูกถ้วยแขวนที่ใช้ในระบบแรงดันของการไฟฟ้าในประเทศไทย

ระบบแรงดัน (kV)	ชนิดลูกถ้วย	จำนวนลูกถ้วยที่ใช้
22, 24	ANSI Class 52-2	3
33	ANSI Class 52-4	3-4
69	ANSI Class 52-3	4
	ANSI Class 52-8	4
115	ANSI Class 52-3	7
	ANSI Class 52-8	10



รูปที่ 2.11 ลักษณะของลูกถ้วย ANSI Class 52-4 ที่ใช้สำหรับการทดสอบ

2.6 อุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device)

อุปกรณ์ป้องกันจะใช้ชานกับอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน และจะได้ความเครียด (Stress) เท่ากันกับอุปกรณ์ แต่จะออกแบบให้เบรกดาวนก่อนฉนวนที่ป้องกันจึงลดความเครียดที่ฉนวนขณะที่มีเสิร์จเข้ามาได้ ตัวอย่างอุปกรณ์นี้คือ อาร์คชิ่งฮอร์น (Arcing Horn) และกับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) คุณลักษณะของอุปกรณ์ป้องกันดังนี้

1. กราฟแรงดัน-เวลา (volt-time curve) ต้องอยู่ต่ำกว่าค่าความคงทนของอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันทุกช่วงเวลา
2. ต้องสามารถให้พลังงานของเสิร์จไหลผ่านได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหรือเกิดความเสียหาย
3. หลังจากพลังงานของเสิร์จไหลผ่านไปแล้วต้องกลับมาสู่สภาพปกติ (Reseal) หรือไม่เป็นตัวนำ (Non-Conductor) ในขณะเกิดแรงดันเกิน

2.6.1 อุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์น (Arcing Horn)

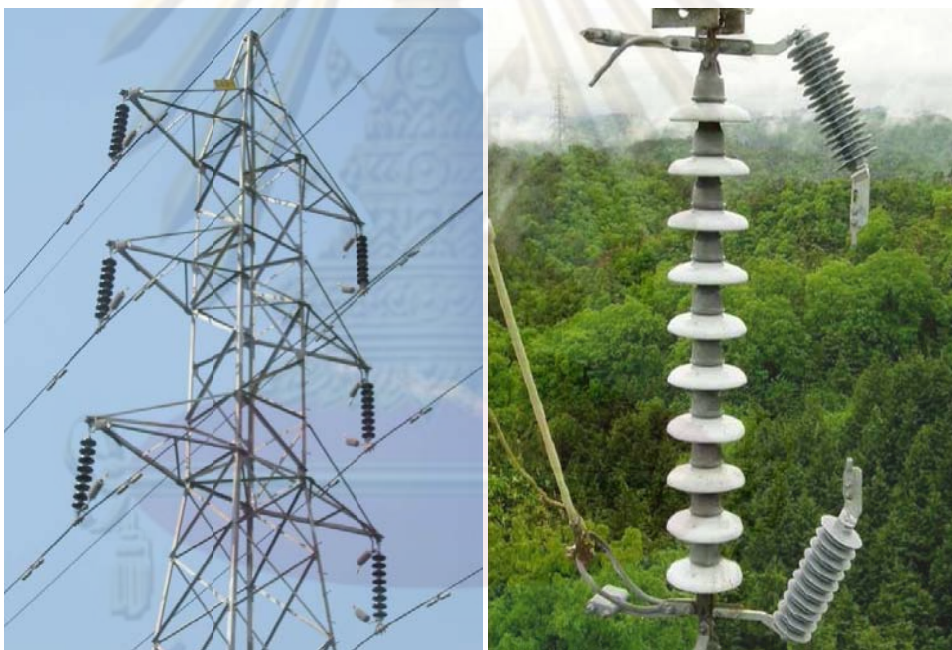
อุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์นเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ยุ่งยาก ราคาถูก โดยใช้ฉนวนสองแท่งต่อเข้าชานเข้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันมากที่สุด ข้อเสียของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์น คือขณะทำงานจะทำให้เกิดคลื่นตัด (Chopped Wave) ขึ้น และเกิดกระแสไหลตาม (Follow Current) จากด้านที่มีกระแสไฟ เนื่องจากสภาพความเป็นฉนวนในขณะนั้นเสียไป การใช้งานอาร์คชิ่งฮอร์นในสายส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อป้องกันไม่ให้พวงลูกถ้วยเกิดความเสียหาย ซึ่งจะติดตั้งในสายส่งวงจรคู่ (Double Circuit) เพียงหนึ่งวงจร เพื่อให้สายส่งเกิดการขัดข้องเพียงวงจรเดียว ในขณะที่อาร์คชิ่งฮอร์นที่ติดตั้งบนบushingซึ่งหม้อแปลงเมื่อเกิดเบรกดาวนจะเกิดคลื่นตัด ซึ่งอาจเป็นอันตรายกับฉนวนหม้อแปลงได้



รูปที่ 2.12 อุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์นติดตั้งกับพวงลูกถ้วยแขวน

2.6.2 กั๊บดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester)

กั๊บดักฟ้าผ่าเป็นอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายชนิดหนึ่ง ซึ่งปัจจุบันมีสองชนิดคือ แบบแก๊ปภายนอก (External Gap Type) และแบบไม่มีแก๊ป (Gapless Type) อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยชุดสปาร์กแก๊ป (Spark Gap) หลายชั้นต่ออนุกรมกับความต้านทานไม่เชิงเส้น (Non-Linear Resistance) บรรจุอยู่ในฉนวน เช่น พอร์ซเลน, พอลิเมอรั เป็นต้น เมื่อมีเล็รจเกิดขึ้นในระบบไหลผ่านอุปกรณ์ที่กั๊บดักฟ้าผ่าป้องกันอยู่ ตัวความต้านทานไม่เชิงเส้นจะลดลงเพื่อให้กระแสไหลผ่านตัวกั๊บดักฟ้าผ่าลงดิน และหลังจากเล็รจไหลลงดินหมดแล้ว ตัวความต้านทานไม่เชิงเส้นก็จะทำหน้าที่จำกัดปริมาณกระแสไหลตามให้มีค่าต่ำจนสามารถดับกระแสไหลตามนั้นได้ อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์กั๊บดักฟ้าผ่าค่อนข้างมีราคาแพง ส่วนใหญ่จะนำมาใช้กับอุปกรณ์ที่สำคัญ เช่น หม้อแปลงกำลังไฟฟ้า และสายส่งที่สำคัญเป็นต้น



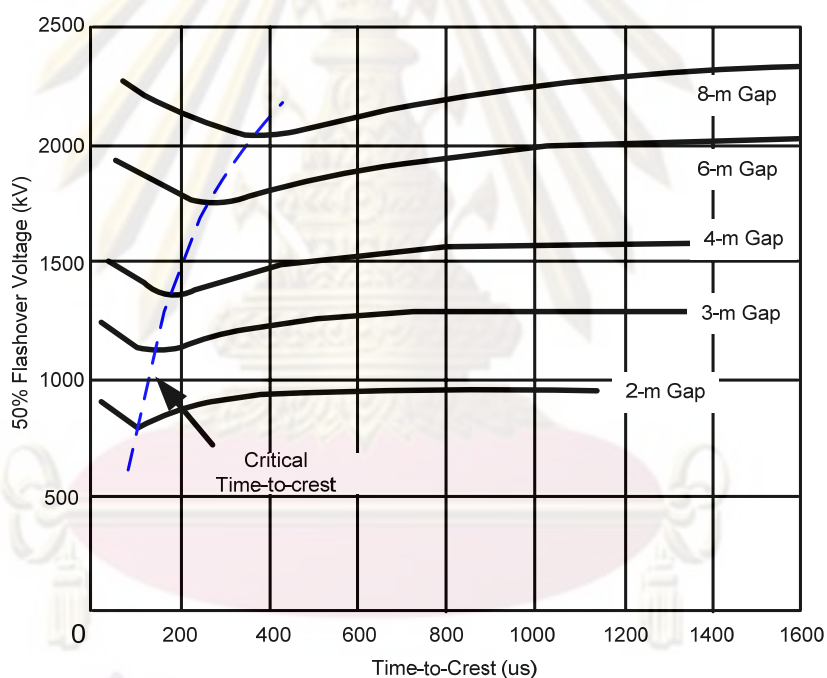
รูปที่ 2.13 อุปกรณ์กั๊บดักฟ้าผ่าบนสายส่งกำลังไฟฟ้า

2.7 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวนั

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเบรกดาวนัในฉนวนอากาศ มีอยู่หลายอย่าง อาทิเช่น สภาพความชื้นอากาศที่เปลี่ยนแปลง ขนาดแรงดัน กระบวนการทดสอบ และรูปร่างของ อิเล็กโทรดที่ทำการทดสอบ โดยโครงการวิจัยนี้สนใจศึกษาผลกระทบของความยาวหน้าคลื่น อิมพัลส์ต่อแรงดันเบรกดาวนัที่เกิดขึ้นบนลูกถ้วยแขวน และอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรันที่ติดตั้งกับ พวงลูกถ้วยแขวน

2.7.1 ผลกระทบของแรงดันเบรกดาวนั้ต่อรูปร่างแรงดันอิมพัลส์ที่เปลี่ยนแปลง (Effect of Waveshape Variations)

ผลของความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันเบรกดาวนั้ ในแต่ละแกปอากาศ แสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งพบว่าเมื่อนำค่าแรงดันเบรกดาวนั้ 50% ของแต่ละหน้าคลื่นอิมพัลส์ ในระยะแกปเดียวกัน มาพล็อตในกราฟแกนแรงดัน-เวลา (V-t Curve) มีลักษณะเป็นตัวยู หรือที่เรียกว่า “U-Curve” โดยจะมีค่าแรงดันเบรกดาวนั้ 50% ที่ต่ำที่สุด ของระยะแกปอากาศเดียวกันจากการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ เรียกว่าแรงดันเบรกดาวนั้วิกฤต (Critical Flashover Voltage: CFO) และค่าเวลาหน้าคลื่นที่ทำให้แรงดันเบรกดาวนั้ 50% มีค่าต่ำที่สุดเรียกว่า ค่าเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์วิกฤต (The Critical Time-to-Crest: T_{cr}) [10]



รูปที่ 2.14 ตัวอย่าง U-curve จากการเปลี่ยนแปลงความยาวหน้าคลื่นต่อแรงดันวาทไฟวิกฤต [10]

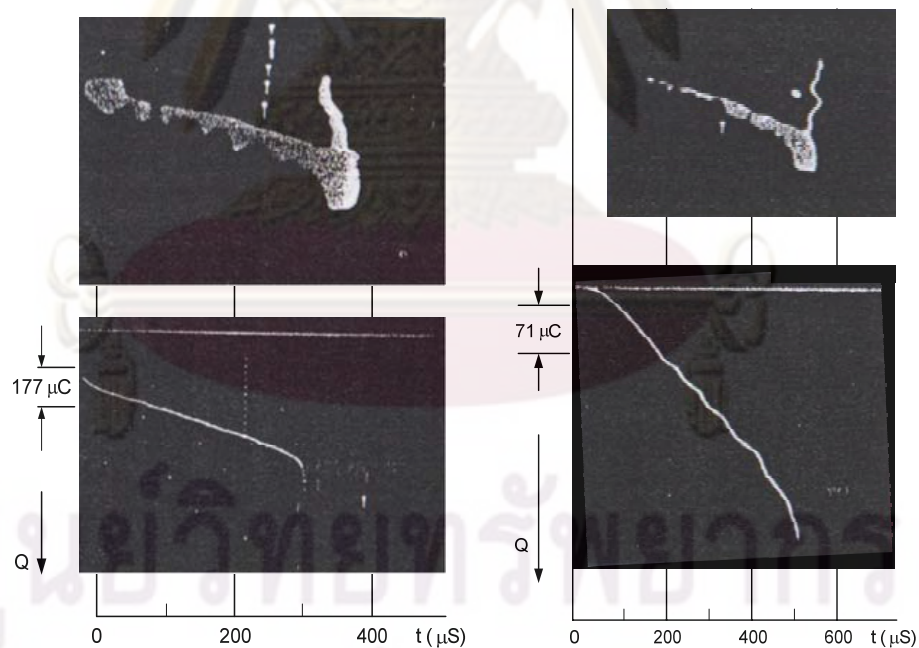
Les Renardieres Group [11] แสดงการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าจากภาพถ่ายความเร็วสูงภายใต้ระยะแกปอากาศ 10 เมตร โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์แกมมา-แผ่นระนาบ ดังรูปที่ 2.15 แสดงการเคลื่อนที่ของประจุที่ความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ 3 หน้าคลื่นจาก U-Curve ดังนี้

- หน้าคลื่นอิมพัลส์ก่อนหน้าคลื่นอิมพัลส์วิกฤต ($T_{cr}=22 \mu\text{s}$, $V_s=2610 \text{ kV}$) ดังรูปที่ 2.15 (ก) จะเห็นได้ว่ากลุ่มโคโรนาขนาดใหญ่เคลื่อนที่ตามลิตเตอร์อย่างต่อเนื่องด้วยอัตราความเร็วประมาณ $2 \text{ cm } \mu\text{s}^{-1}$ และอัตราความเร็วของประจุเคลื่อนที่ประมาณ $1 \mu\text{C cm}^{-1}$ จาก

เวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์ที่เร็วที่สุด ลีดเดอร์จะสั้นกว่าในหน้าคลื่นอิมพัลส์อื่น ๆ เนื่องจากสนามไฟฟ้าคงตัวน้อย ทำให้ไม่เพียงพอที่จะสร้างสตรีมเมอร์ (Streamer) ให้ข้ามแก๊ปได้ต้องเพิ่มแรงดันมากขึ้นจึงจะเบรกดาวน

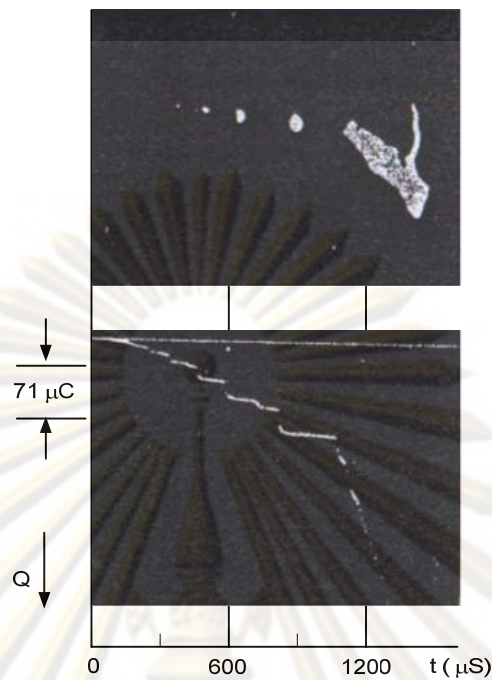
- หน้าคลื่นอิมพัลส์วิกฤต ($T_{cr}=500 \mu s$, $V_s=1810 kV$) ดังรูปที่ 2.15 (ข) จะเห็นได้ว่าลีดเดอร์และสตรีมเมอร์โคโรนา (Streamer Corona) มีความยาวต่อเนื่องกันอย่างพอดีที่ข้ามแก๊ปและเกิดเบรกดาวนได้ ทำให้ใช้แรงดันไม่มากในการเบรกดาวน โดยอัตราความเร็วของลีดเดอร์ที่ยาวต่อเนื่องกันประมาณ $1.5 \text{ cm } \mu s^{-1}$ และอัตราความเร็วของประจุเคลื่อนที่ประมาณ $0.4-0.5 \mu C \text{ cm}^{-1}$

- หน้าคลื่นอิมพัลส์หลังหน้าคลื่นอิมพัลส์วิกฤต ($T_{cr}=2200 \mu s$, $V_s=2015 kV$) ดังรูปที่ 2.15 (ค) เนื่องจากหน้าคลื่นอิมพัลส์ยาวอัตราการเพิ่มของหน้าคลื่นช้า ทำให้การเคลื่อนที่ของลีดเดอร์และสตรีมเมอร์โคโรนาไม่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นในการสร้างสตรีมเมอร์ให้ต่อเนื่องและข้ามแก๊ปจนเกิดเบรกดาวนได้จึงต้องเพิ่มแรงดันเพิ่มมากขึ้น โดยอัตราความเร็วของประจุเคลื่อนที่ที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $0.3-0.4 \mu C \text{ cm}^{-1}$



(ก) $T_{cr} = 22 \mu s$

(ข) $T_{cr} = 500 \mu s$

(ค) $T_{cr} = 2200 \mu s$

รูปที่ 2.15 การดีชาร์จชั่วคราวในอิเล็กทรอนิกส์แห่งกลม-แผ่นระนาบ:
ผลของหน้าคลื่นอิมพัลส์ [11]

- (ก) หน้าคลื่นอิมพัลส์ $22 \mu s$ โดย T_{cr} = เวลาหน้าคลื่น (Time to Crest)
 (ข) หน้าคลื่นอิมพัลส์ $500 \mu s$
 (ค) หน้าคลื่นอิมพัลส์ $2200 \mu s$

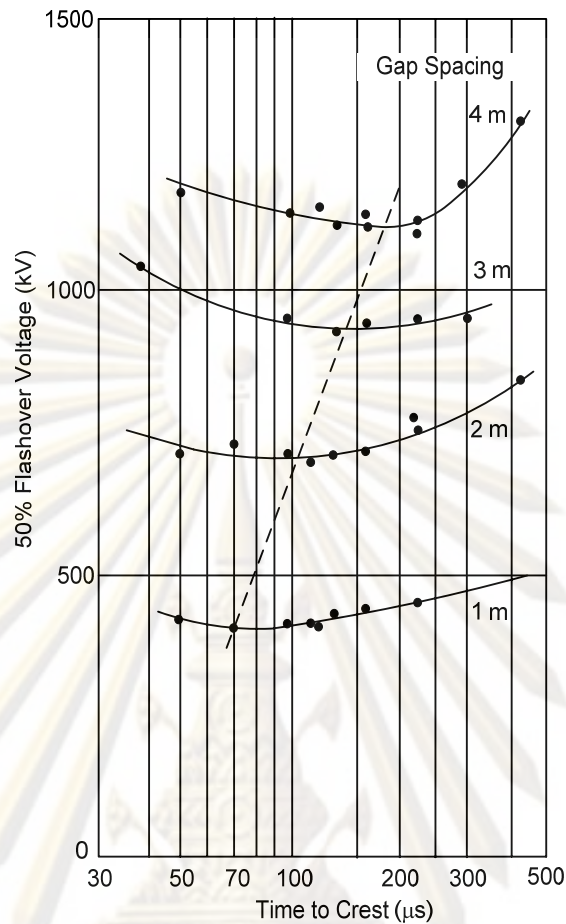
T.Harada [2] ได้ทดลองอิทธิพลของหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันเบรกดาวนีย์ โดยทดสอบบนอิเล็กทรอนิกส์แห่งกลม-แผ่นระนาบ ขั้วบวก ในช่วงแกปอากาศ $1 \leq L \leq 4$ เมตร พบว่าเมื่อระยะแกปมากขึ้น ค่าเวลาหน้าคลื่นวิกฤตจะมากขึ้นด้วย การหาค่าเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์วิกฤตตามระยะแกปแสดงดังสมการที่ 2.6

$$T_{f, crit} = A \cdot L + B \quad (2.6)$$

L คือ ความยาวของระยะแกปอากาศ (m)

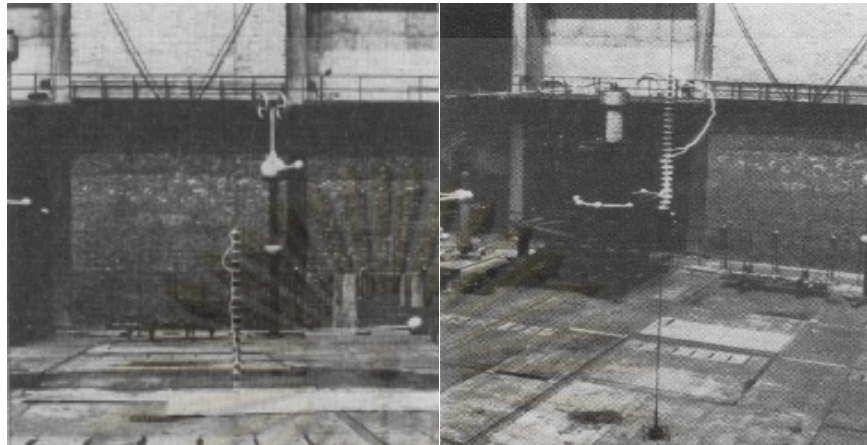
A คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $35 \mu s/m$

B คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $40 \mu s$

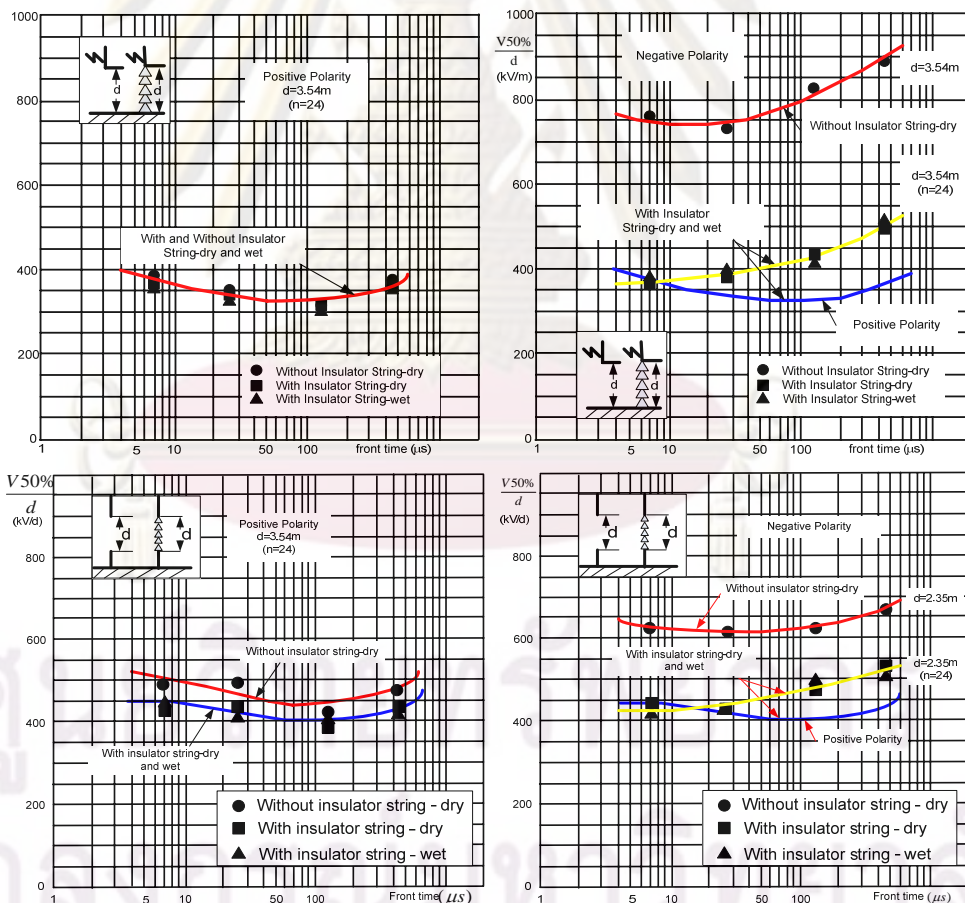


รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน้าคลื่นอิมพัลส์กับแรงดันเบรกดาว์น 50% [2]

Luigi Paris [3] ได้ทำการทดสอบหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาทไฟตามผิว 50% บนอิเล็กโตรดแบบ แท่งกลม-แท่งกลม (Rod-Rod) และแท่งกลม-แผ่นระนาบ (Rod-Plane) โดยมีพวงลูกถ้วยและไม่มีพวงลูกถ้วย (ลูกถ้วยจำนวน 24 ลูก) หน้าคลื่นอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ 7, 27, 120, 420 μs ทั้งชั่วบวกและลบในเงื่อนไขทั้งแบบแห้งและเปียก การทดสอบหาแรงดันวาทไฟตามผิว ดังรูปที่ 2.17 และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.18



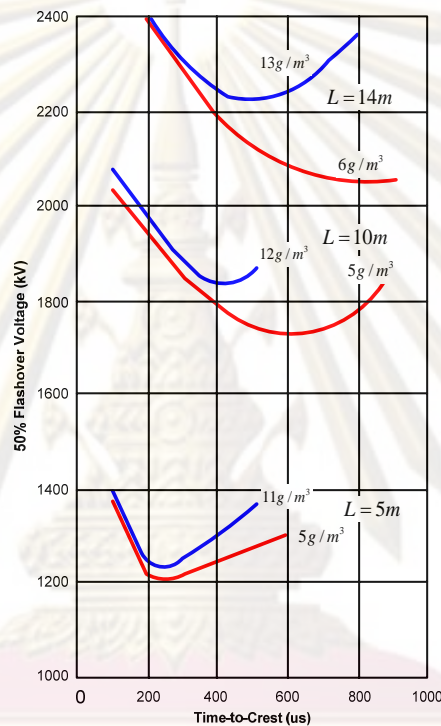
รูปที่ 2.17 การทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิวบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดแท่งกลม-แท่งกลม และแท่งกลม-แผ่นระนาบ โดยมีพวงลูกถ้วยและไม่มีพวงลูกถ้วย [3]



รูปที่ 2.18 แรงดันวาทไฟตามผิว 50% ต่อระยะแกบ ตามฟังก์ชันของหน้าคลื่นอิมพัลส์ โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์โทรดแท่งกลม-แท่งกลม และแท่งกลม-แผ่นระนาบ [3]

2.7.2 ผลกระทบของความชื้นต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวหน้าคลื่นนิมพัลส์ (Effect of Humidity)

W.Busch [4] ได้ทดสอบผลกระทบของความชื้นต่อการเบรกดาวนในแก๊สอากาศ โดยการเปลี่ยนความยาวหน้าคลื่นนิมพัลส์ พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาหน้าคลื่นวิกฤตจะมีเวลาลดลงดังรูปที่ 2.19 เนื่องจากเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วในการไอออนไนเซชันเร็วขึ้น ทำให้เวลาจากโคโรนาเริ่มต้นไปยังเบรกดาวนลดลง



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาหน้าคลื่นวิกฤต [4]

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

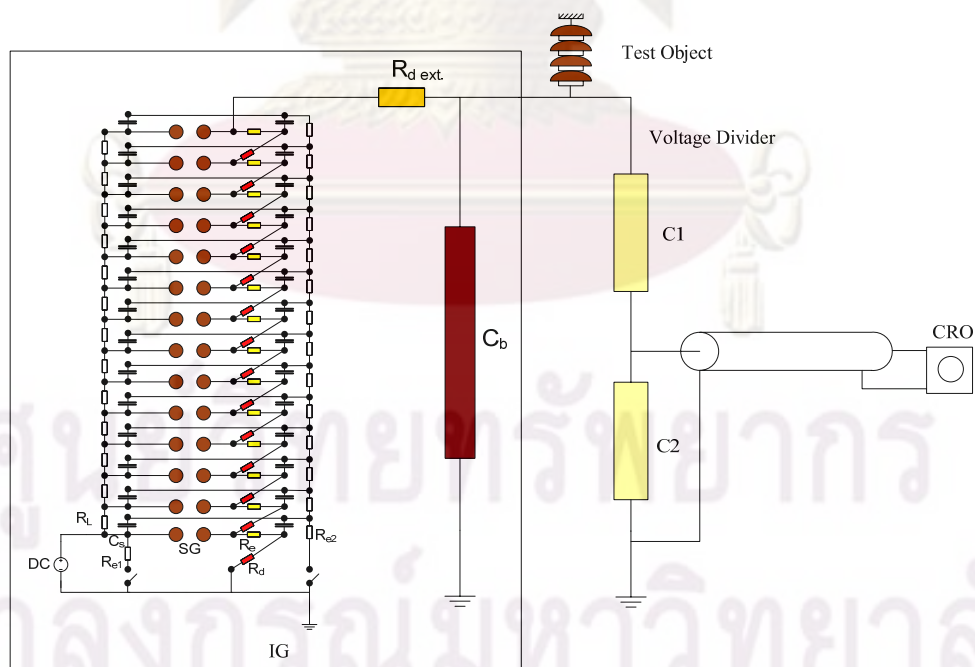
บทที่ 3

การทดสอบ

แรงดันมาตรฐานโดยทั่วไปที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน จะแบ่งเป็นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าซึ่งมีรูปคลื่น 1.2/50 μ s และแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งซึ่งมีรูปคลื่น 250/2500 μ s [12] แต่สำหรับเสิร์จที่เกิดขึ้นจริงในระบบ มีเวลาหน้าคลื่นที่แตกต่างกันจากรูปคลื่นมาตรฐานมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจำลองความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ที่แตกต่างกันบนอุปกรณ์ทดสอบ ได้แก่ พวงลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 จำนวน 4-7 ลูก และอุปกรณ์ Arcing Horn เพื่อศึกษาผลกระทบของการวาบไฟตามผิว 50% ที่เกิดขึ้น

3.1 การสร้างแรงดันหน้าคลื่นอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในการสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องมีแรงดันทดสอบเหมาะสมกับอุปกรณ์ทดสอบ ดังนั้นจำเป็นต้องเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น ดังรูปที่ 3.1 โดยใช้น้องทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สร้างแรงดันอิมพัลส์ด้วยเครื่องกำเนิดขนาด 1400 kV 70kJ



รูปที่ 3.1 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เพื่อทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยแขวนและอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์น

โดยที่	DC	คือ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง
	R_L	คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
	C_s	คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอิมพัลส์
	SG	คือ ช่องว่างอากาศทรงกลมทำหน้าที่เป็นไกสวิตช์
	R_d	คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่น
	R_e	คือ ความต้านทานปรับหางคลื่น
	$R_{d\ ext.}$	คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่นภายนอก
	C_b	คือ ตัวเก็บประจุไหลดทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ

การทดสอบในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จำนวน 14 ชั้น ดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยค่า $R_d = 468 \ \Omega$ $C_b = 1000 \ \text{pF}$ และ $R_e = 57.1 \ \text{k}\Omega$ โดยมีความต้านทาน $R_{d\ ext.}$ ภายนอกที่ใช้สร้างแรงดันหน้าคลื่นอิมพัลส์มีทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ $300 \ \Omega$, $1800 \ \Omega$, $15 \ \text{k}\Omega$, $28 \ \text{k}\Omega$ และ $42 \ \text{k}\Omega$ ตัวอย่างความต้านทาน $R_{d\ ext.}$ ภายนอกดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

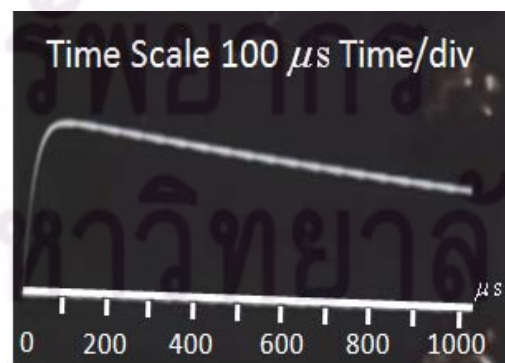
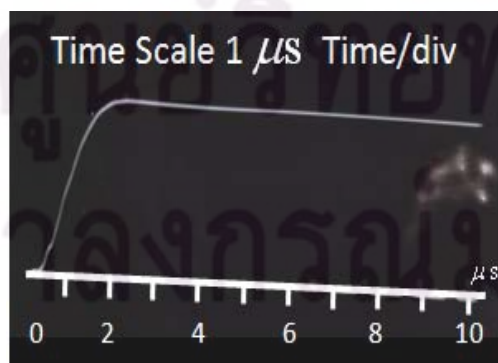


รูปที่ 3.3 ตัวอย่างความต้านทาน $R_{d\text{ext}}$ ภายนอกที่ใช้เปลี่ยนความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์

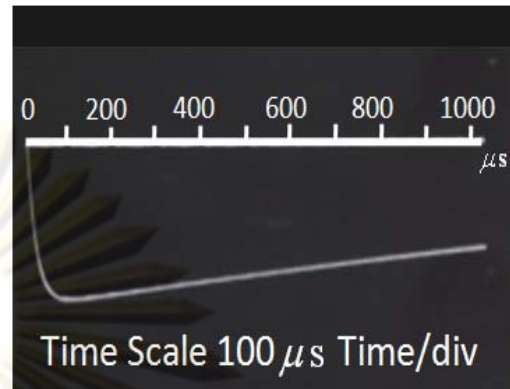
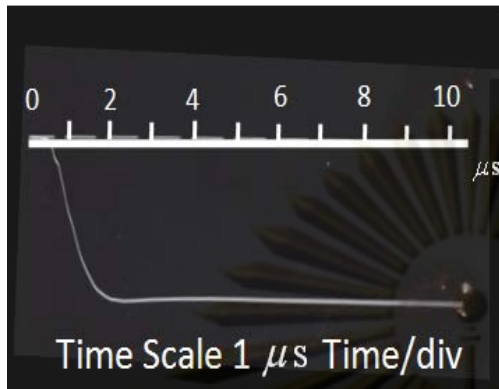
ผลของความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อการเปลี่ยนความต้านทาน $R_{d\text{ext}}$ ภายนอก แสดงดังตารางที่ 3.1 และลักษณะรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ได้จากภาพถ่ายของออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 ผลความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายนอก

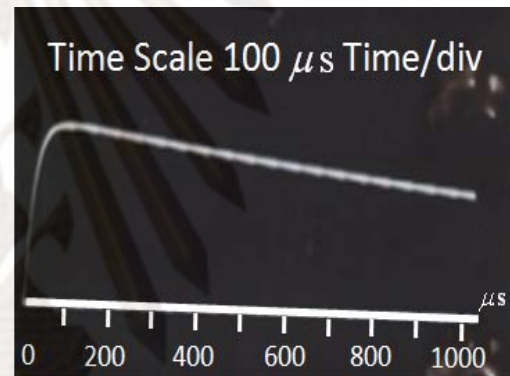
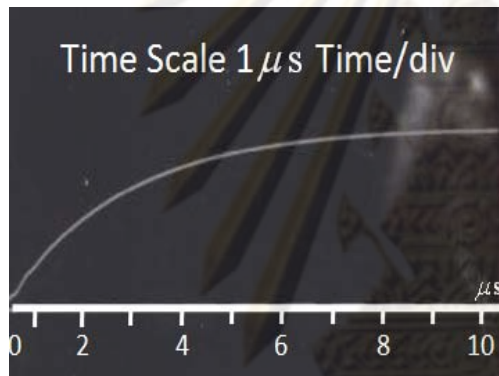
ความต้านทานภายนอก (Ω)	ความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ (μs)
300	1.4
1800	8.4
15 k	56
28 k	96
42 k	146



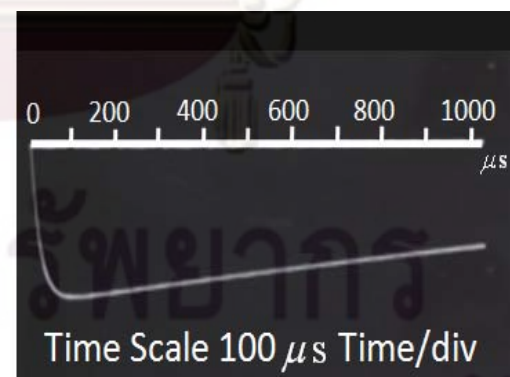
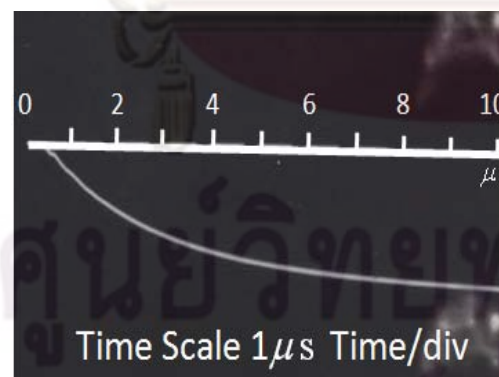
(ก) หน้าคลื่นอิมพัลส์ $1.4 \mu\text{s}$ ขั้วบวก



(ข) หน้าคลื่นอิมพัลส์ 1.4 μs ขั้วลบ

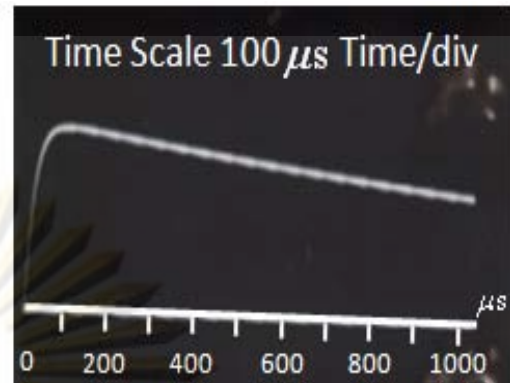
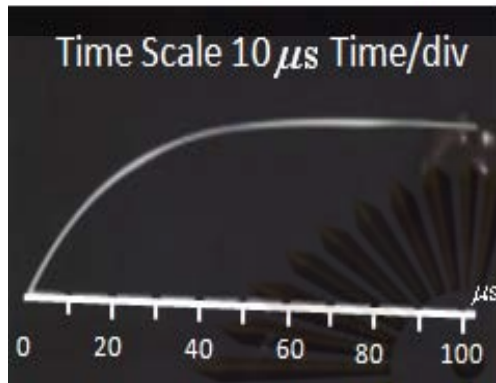


(ค) หน้าคลื่นอิมพัลส์ 8.4 μs ขั้วบวก

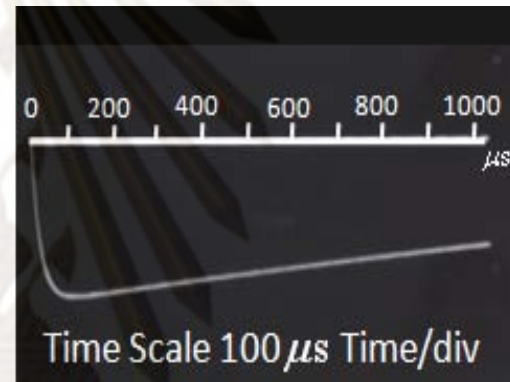
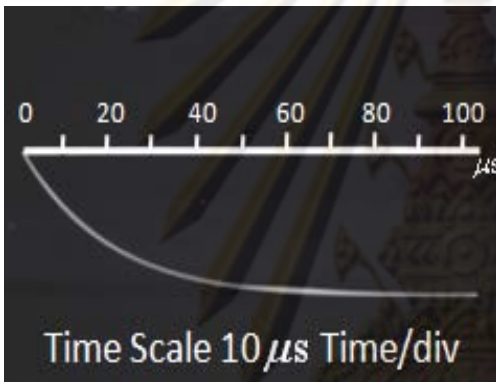


(ง) หน้าคลื่นอิมพัลส์ 8.4 μs ขั้วลบ

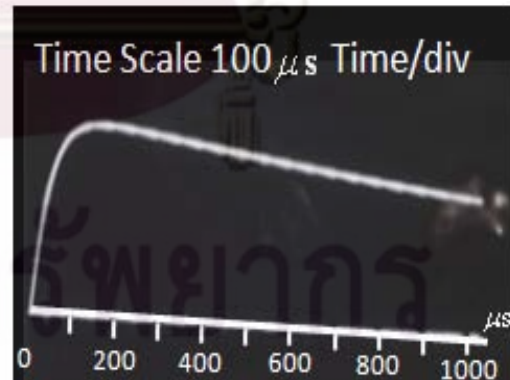
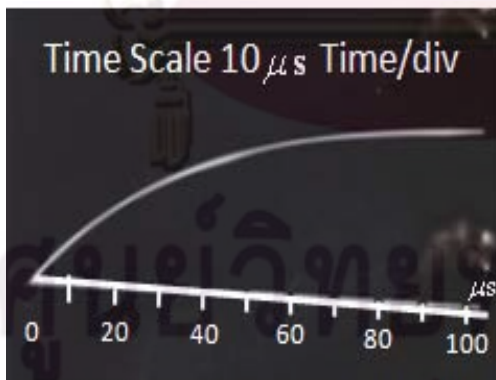
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(จ) หน้าคลื่นนิมพัลส์ 56 μs ขั้วบวก

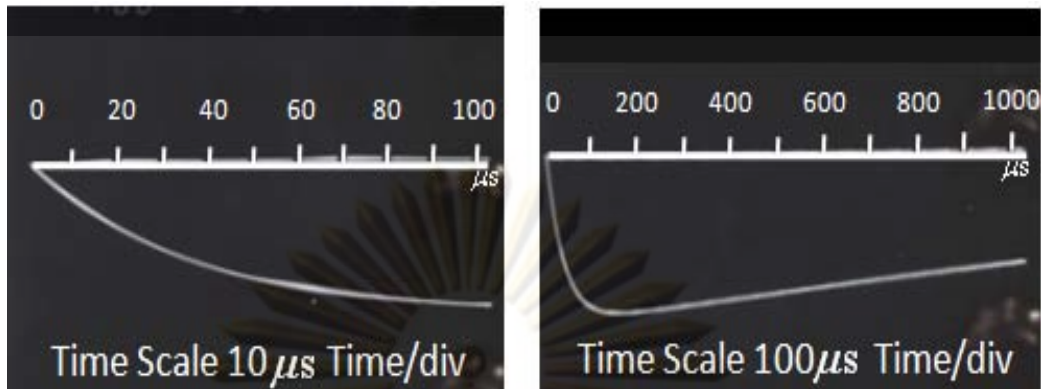
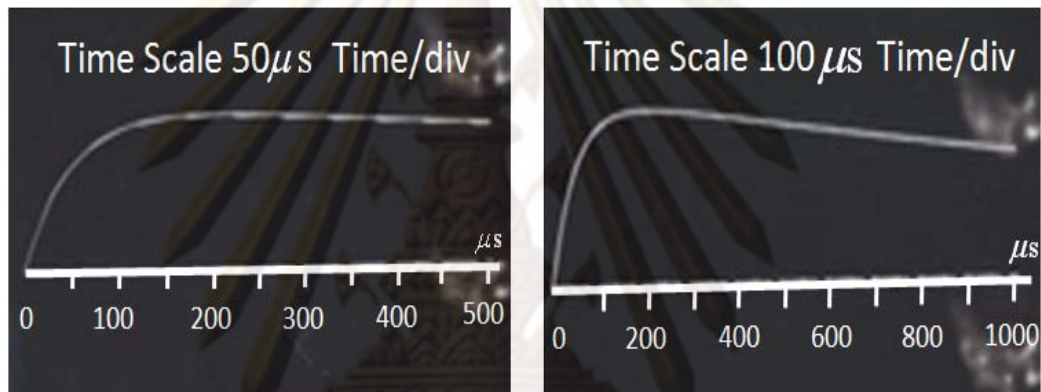
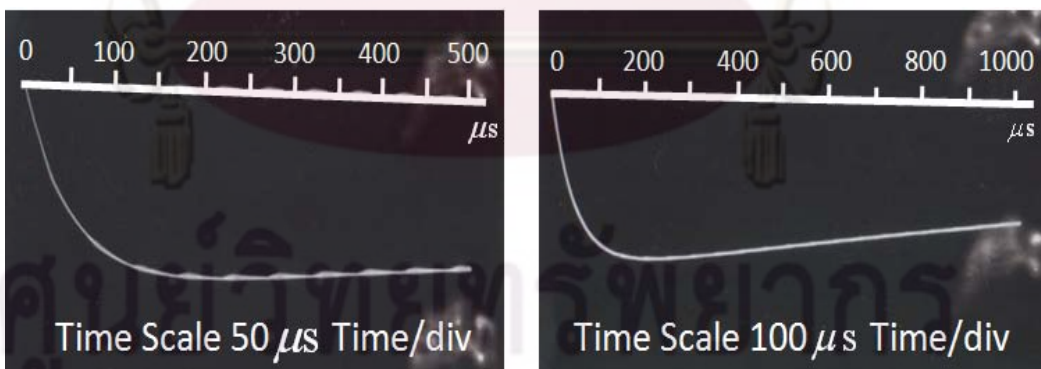


(ฉ) หน้าคลื่นนิมพัลส์ 56 μs ขั้วลบ



(ช) หน้าคลื่นนิมพัลส์ 96 μs ขั้วบวก

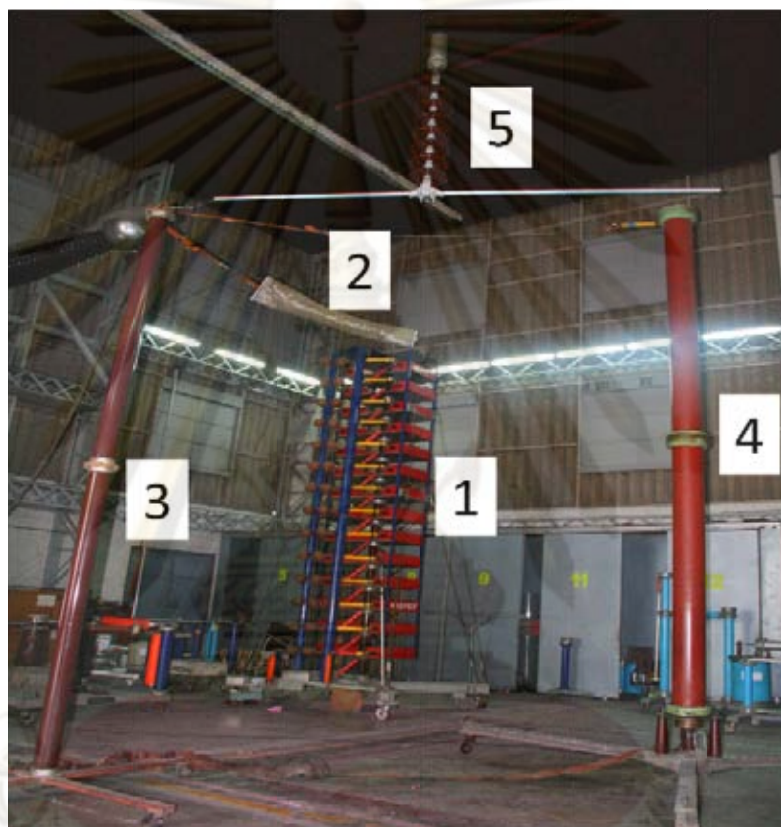
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ญ) หน้าคลื่นนิมพัลส์ 96 μs ชั่วลบ(ฎ) หน้าคลื่นนิมพัลส์ 146 μs ชั่วบวก(จ) หน้าคลื่นนิมพัลส์ 146 μs ชั่วลบ

รูปที่ 3.4 ความยาวหน้าคลื่นจากการเปลี่ยน $R_{d\text{ext}}$ ภายนอกที่ค่าต่าง ๆ

3.2 วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์ทดสอบได้แก่ พวงลูกถ้วยแขวน 52-4 จำนวน 4-7 ลูก และอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรั้นแบบแท่งกลม-แท่งกลม และแบบทรงกลม-ทรงกลม โดยติดตั้งขนานกับพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 จำนวน 4-7 ลูก แสดงวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 3.5

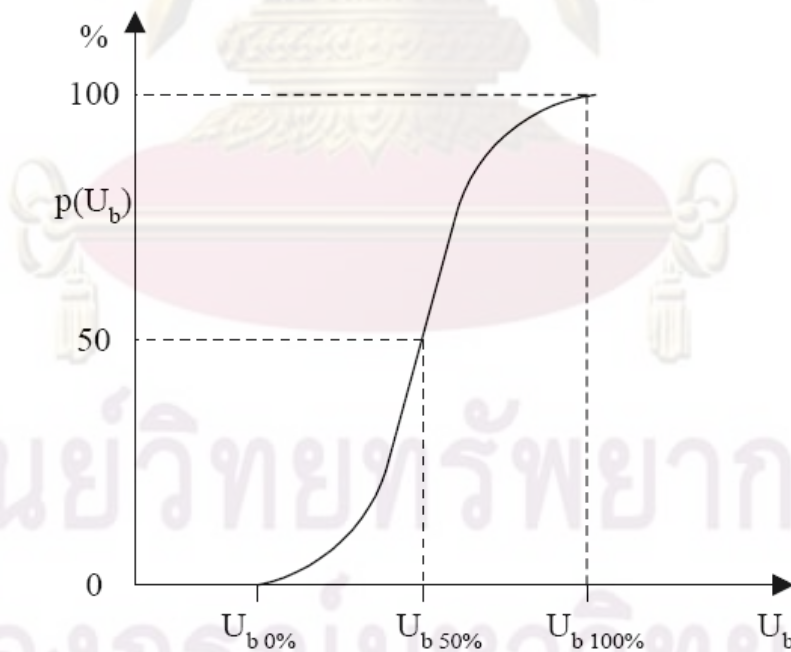


รูปที่ 3.5 วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- โดยที่
- 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1400 kV 70 kJ
 - 2 คือ ความต้านทานภายนอกเพื่อเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่น มีค่า 300 Ω , 1500 Ω , 15 k Ω , 28 k Ω และ 42 k Ω
 - 3 คือ C_0 มีค่า 2000 pF 800 kV สองตัวต่ออนุกรมกัน
 - 4 คือ อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ขนาด 1600 kV
 - 5 คือ อุปกรณ์ทดสอบได้แก่ พวงลูกถ้วยแขวน 52-4 จำนวน 4-7 ลูก และอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรั้นแบบแท่งกลม-แท่งกลม และแบบทรงกลม-ทรงกลม ติดตั้งขนานกับพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 จำนวน 4-7 ลูก

3.3 การเก็บข้อมูลทดสอบแรงดันเบรกดาวน $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์ทดสอบ

การป้อนแรงดันให้กับอุปกรณ์ทดสอบที่แรงดันระดับหนึ่ง โอกาสการเกิดเบรกดาวนในอุปกรณ์ทดสอบจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ โดยระดับแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ที่ไม่ทำให้เบรกดาวนได้เลย ไม่ว่าจะป้อนแรงดันระดับนั้นก็ครั้งก็ตาม เราเรียกระดับแรงดันนั้นว่า ระดับคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Withstand Voltage) หรือ $U_{0\%}$ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กำหนดการทดสอบฉนวนที่ต้องทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ (Basic Impulse Insulation Level, BIL) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ต่อไป ขนาดแรงดันอิมพัลส์ที่ต่ำสุดที่ป้อนให้กับอุปกรณ์แล้วเกิดการเบรกดาวนทุกครั้ง เราเรียกว่าระดับแรงดันป้องกัน (Protective Level) หรือ $U_{100\%}$ ถ้าเพิ่มแรงดันมากกว่าระดับแรงดัน $U_{100\%}$ ก็จะเกิดเบรกดาวนทุกครั้ง ในส่วนของ $U_{50\%}$ คือ ค่ายอดแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งทั้งหมดที่ป้อน แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน (probability of breakdown: $p(U_b)$) หาได้จากการป้อนแรงดันค่าหนึ่งให้กับแกปใด ๆ เป็นจำนวนครั้งมาก ๆ เช่น 20 ครั้ง, 100 ครั้ง เป็นต้น จำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวนในแกปหารด้วยจำนวนครั้งในการป้อนแรงดันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

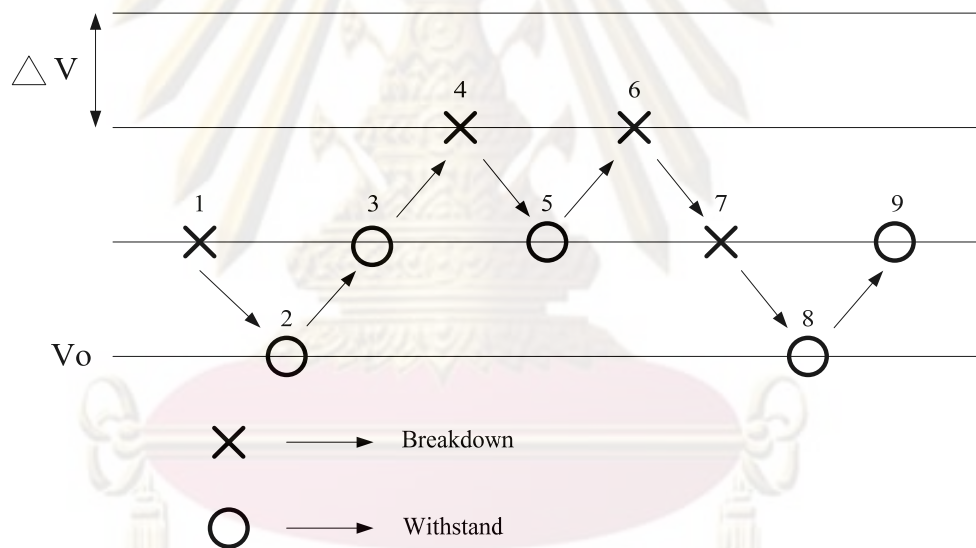


รูปที่ 3.6 ความน่าจะเป็นในเกิดแรงดันเบรกดาวน

โดยทั่วไปฟังก์ชันกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์มีลักษณะการกระจายตัวเป็นฟังก์ชันปกติ (Normal Distribution) ในงานวิจัยนี้การหาแรงดันเบรกดาวน์ $U_{50\%}$ จะใช้วิธีปรับขึ้นและลง (Up and Down method) ดังรูปที่ 3.7 โดยป้อนแรงดันเริ่มต้นค่าหนึ่งให้มีค่าประมาณแรงดันเบรกดาวน์ $U_{50\%}$ ถ้าไม่เกิดการเบรกดาวน์ให้เพิ่มแรงดันเบรกดาวน์ขึ้น ΔV แต่ถ้าเกิดการเบรกดาวน์ให้ลดแรงดันลง ΔV ซึ่งค่า ΔV จะมีค่าประมาณ 3% ของแรงดันเริ่มต้น จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันทดสอบทั้งหมดควรมีอย่างน้อย 20 ครั้ง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U_{50\%}$ หาได้จากสมการที่ 3.1

$$U_{50\%} = \frac{\sum k_i U_i}{k_i} \quad (3.1)$$

โดยที่ k_i คือจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันแรงดันค่ายอด U_i



V_0 = lowest level at which a shot is applied

รูปที่ 3.7 การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ $U_{50\%}$ โดยวิธีปรับขึ้นและลง

3.4 การแก้ไขค่าแรงดันทดสอบตามสภาวะมาตรฐาน IEC60060-1 [12]

มาตรฐาน IEC60060-1 ได้กำหนดวิธีการแก้ไขค่าแรงดันทดสอบที่สภาวะห้องทดสอบใด ๆ เป็นค่าแรงดันทดสอบที่สภาวะมาตรฐานดังนี้

ค่ามาตรฐานบรรยากาศ

อุณหภูมิ	$t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
ความดัน	$b_0 = 101.3\text{ kPa (1013 mbar)}$
ความชื้นสมบูรณ์	$h_0 = 11\text{ g/m}^3$

ค่าที่ต้องบันทึกขณะทำการทดสอบคือ ค่าอุณหภูมิ ค่าความดันบรรยากาศ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ โดยทั่วไปในการทดสอบถ้าหาแน่นอากาศ (Air Density) หรือความชื้น (Humidity) มีค่าเปลี่ยนแปลง จะทำให้ค่าแรงดันทดสอบมีค่าเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นมาตรฐาน IEC 60060-1 ได้กำหนดค่าตัวประกอบสำหรับแก้ไข K_t ดังนี้

$$K_t = k_1 k_2 \quad (3.2)$$

โดยที่ k_1 คือ ค่าตัวประกอบแก้ไขความหนาแน่นอากาศ (Air density correction factor)

k_2 คือ ค่าตัวประกอบแก้ไขความชื้น (Humidity correction factor)

3.4.1 ตัวประกอบแก้ไขตัวความหนาแน่นอากาศ k_1

ค่าตัวประกอบแก้ไขความหนาแน่นอากาศ k_1 ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอากาศสัมพัทธ์ δ สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.3

$$k_1 = \delta^m \quad (3.3)$$

ค่าความหนาแน่นอากาศสัมพัทธ์คำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$\delta = \left[\frac{b}{b_0} \right] \left[\frac{273 + t_0}{273 + t} \right] \quad (3.4)$$

โดยที่ δ คือ ความหนาแน่นอากาศสัมพัทธ์ (Relative Air Density)

b คือ ความดันที่สภาวะห้องทดสอบ

b_0 คือ ความดันมาตรฐาน มีค่า 101.3 kPa หรือ 760 mmHg

t คือ อุณหภูมิขณะทำการทดสอบ

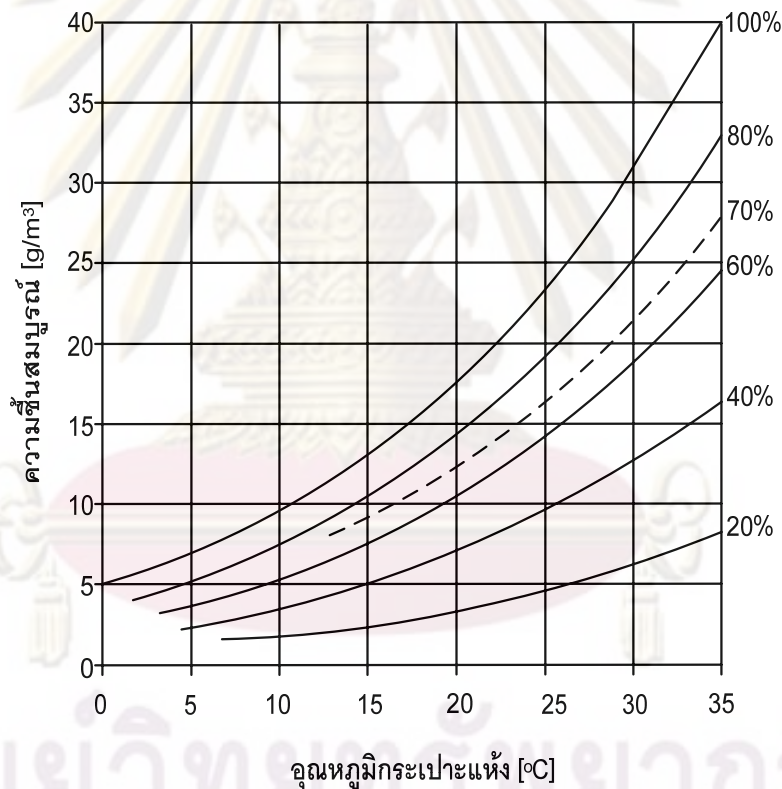
t_0 คือ อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน มีค่า $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.4.2 ตัวประกอบแก้ไขความชื้น k_2

ค่าตัวประกอบแก้ไขความชื้น k_2 หาได้ดังสมการที่ 3.5

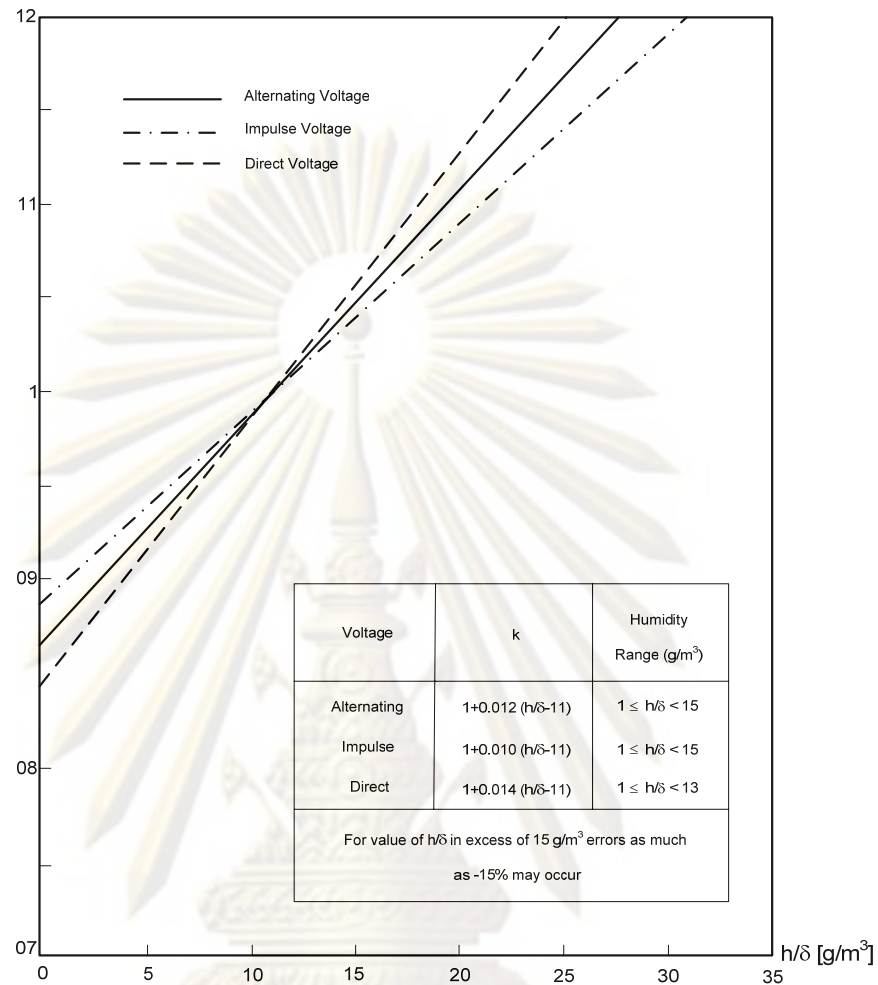
$$k_2 = k^w \quad (3.5)$$

หลังจากหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ δ ได้ตามสมการที่ 3.4 และหาค่าความชื้นสมบูรณ์ (Absolute Humidity: h) ได้จากรูปที่ 3.8 เมื่อได้ค่า h/δ สามารถหาค่า k ได้ดังรูปที่ 3.9 หรือตารางที่ 3.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า k และค่า h/δ ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 โดยค่า k จะขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันทดสอบ โดยค่า h/δ ไม่ควรมีค่าเกินกว่า 15 g/m^3 เพราะจะเกิดความผิดพลาดได้



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นสมบูรณ์

k of IEC 60060-1: 1989



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k และค่า h/δ ตามมาตรฐาน IEC 60060-1

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k และค่า h/δ ตามมาตรฐาน IEC60060-1

แรงดันทดสอบ	k	ช่วงความชื้น g/m ³
อิมพัลส์	$1+0.010(h/\delta-11)$	$1 \leq h/\delta < 15$
กระแสสลับ	$1+0.012(h/\delta-11)$	$1 \leq h/\delta < 15$
กระแสตรง	$1+0.014(h/\delta-11)$	$1 \leq h/\delta < 13$
ในกรณีที่ค่า h/δ มีค่าเกินกว่า 15 g/m^3 ค่าความผิดพลาด -15% อาจเกิดขึ้น		

ในกรณีที่ค่า h/δ มีค่าเกินกว่า 15 g/m^3 การแก้ไขค่าแรงดันจะมีความผิดพลาดสูงถึงร้อยละ 15 ดังนั้นถ้า h/δ เกินกว่า 15 g/m^3 ให้คำนวณค่า k [13] ใหม่ ตามสมการที่ 3.6 ในกรณีทดสอบด้วยแรงดันสูงอิมพัลส์ และตามสมการที่ 3.7 ในกรณีทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ

แรงดันสูงอิมพัลส์ (ช่วงของความถี่ $15 < h/\delta < 25$)

$$1.04 + 0.00464(h/\delta - 15) \quad (3.6)$$

แรงดันสูงกระแสลับ (ช่วงของความถี่ $15 < h/\delta < 25$)

$$1.048 + 0.00137(h/\delta - 15) \quad (3.7)$$

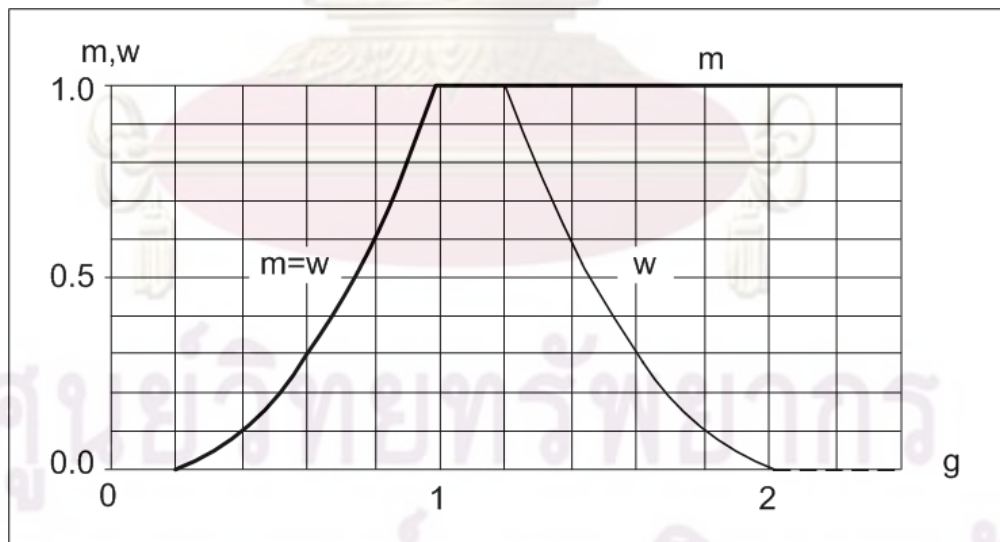
ขั้นตอนต่อไปนำค่า k และค่า δ คำนวณค่า g ดังสมการที่ 3.8

$$g = \frac{U_b}{500L\delta k} \quad (3.8)$$

U_b คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ 50% ที่สภาวะทดสอบ มีหน่วยเป็นกิโลโวลต์ (kV)

L คือ ระยะการดีสชาร์จที่สั้น มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ในมาตรฐาน IEC 60060-1 ได้กำหนดการหาค่า m และ w จากค่า g โดยการเปรียบเทียบค่าด้วยการใช้กราฟในรูปที่ 3.10 หรือจะคำนวณค่าโดยตรงตามตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง g กับค่า m และ w ตามมาตรฐาน IEC 60060-1

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า g ค่า m และค่า w ตามมาตรฐาน IEC 60060-1

g	m	w
$g < 0.2$	0	0
$0.2 < g < 1.0$	$m = w = 1.25g(g-0.2)$	
$0.2 < g < 1.2$	1	1
$1.2 < g < 2.0$	1	$w = 1.25(2.2 - g)(2 - g)$
$g > 2.0$	1	0

เมื่อได้ค่าตัวแปร m และ w แทนค่าในสมการที่ 3.3 และ 3.5 จะได้ค่า k_1 , k_2 และ K_f นำค่ามาใช้เป็นตัวประกอบแก้ไขแรงดันทดสอบที่สภาวะห้องทดสอบเป็นแรงดันทดสอบที่สภาวะมาตรฐาน ดังสมการที่ 3.9

$$U = U_0 K_f \quad (3.9)$$

โดยที่ U_0 คือ แรงดันทดสอบที่สภาวะมาตรฐาน

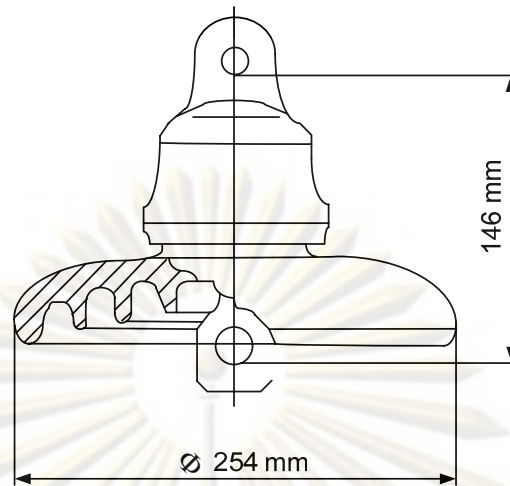
U คือ แรงดันทดสอบที่สภาวะห้องทดสอบ

3.5 อุปกรณ์ทดสอบ (Test Object)

สำหรับอุปกรณ์ทดสอบของงานวิจัยนี้ คือ ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 และ อุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์นแบบแบ่งกลม-แบ่งกลม และแบบทรงกลม-ทรงกลม

3.5.1 ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4

ลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ คือ ลูกถ้วยพอร์ซเลน ANSI Class 52-4 มีลักษณะทางมิติของลูกถ้วยดังรูปที่ 3.11 เป็นลูกถ้วยที่ใช้ในงานไฟฟ้าแรงสูง สามารถห้อยแขวนลูกถ้วยต่อกันเป็นพวงได้ ส่วนบนของลูกถ้วยมีลักษณะเป็นรูหรือช่องที่จะไปห้อยเกี่ยวกับก้านที่เจาะรูไว้ด้านล่างของลูกถ้วย เมื่อใช้งานระดับแรงดันเพิ่มขึ้น จำนวนลูกถ้วยในพวงก็จะมีมากขึ้นด้วย เพื่อให้สามารถทนแรงดันที่สูงขึ้นได้ โดยในการทดสอบนี้จะใช้พวงลูกถ้วยแขวนจำนวน 4, 5, 6 และ 7 ลูก ซึ่งมีระยะทางมิติดังตารางที่ 3.5 และการติดตั้งพวงลูกถ้วยแขวนในการทดสอบจำนวน 4, 5, 6 และ 7 ลูก แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 ลักษณะทางมิติของลูกถ้วยที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.4 ลักษณะทางมิติของลูกถ้วยที่ใช้ในงานวิจัย

ลูกถ้วยแชนน ANSI Class 52-4	ระยะ เส้นผ่าศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ระยะความยาวตาม แนวแกน (มิลลิเมตร)	ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)
ลูกถ้วยแชนน 4 ลูก	254	584	654
ลูกถ้วยแชนน 5 ลูก	254	730	800
ลูกถ้วยแชนน 6 ลูก	254	876	946
ลูกถ้วยแชนน 7 ลูก	254	1022	1092



(ก) ลูกถ้วยแชนนจำนวน 4 ลูก



(ข) ลูกถ้วยแชนนจำนวน 5 ลูก



(ค) ลูกถ้วยแขวนจำนวน 6 ลูก

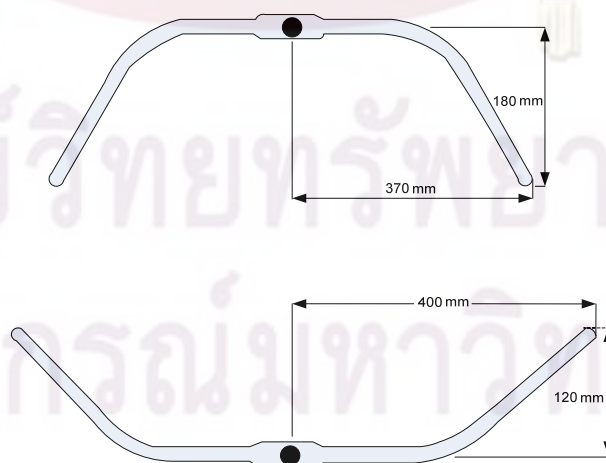


(ง) ลูกถ้วยแขวนจำนวน 7 ลูก

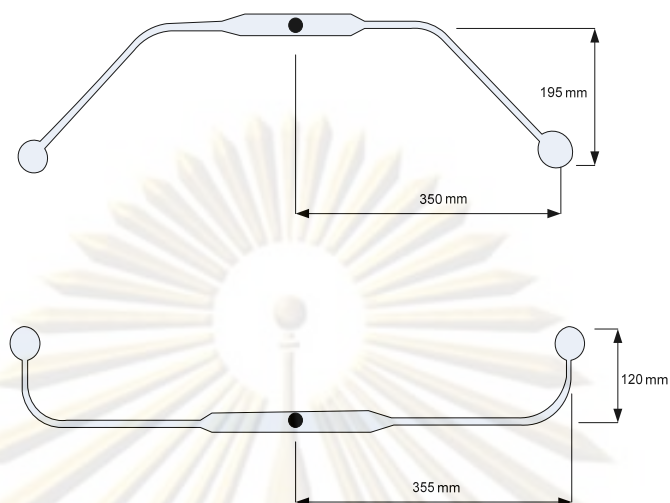
รูปที่ 3.12 ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 จำนวน 4-7 ลูก

3.5.2 อุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์น

อุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นที่นำมาใช้ในการทดสอบมี 2 แบบ คือแบบแท่งกลม-แท่งกลม และแบบทรงกลม-ทรงกลม มีระยะทางมิติดังรูปที่ 3.13 และ 3.14 การทดสอบจะติดตั้งอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นขนานกับพวงลูกถ้วยแขวน โดยมีระยะลูกถ้วย 4, 5, 6, และ 7 ลูก อุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นที่ใช้ในการทดสอบ ได้นำมาจากสายส่งกำลังไฟฟ้าระดับแรงดัน 115 kV ที่ใช้งานจริงบนสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ติดตั้งกับลูกถ้วย 7 และ 8 ลูก) โดยการติดตั้งอาร์คชิงฮอร์นในการทดสอบที่ระยะพวงลูกถ้วย 4-7 ลูก แบบแท่งกลม-แท่งกลม แสดงรูปที่ 3.15 และแบบทรงกลม-ทรงกลม แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.13 ลักษณะทางมิติของอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม



รูปที่ 3.14 ลักษณะทางมิติของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นแบบทรงกลม-ทรงกลม

ตารางที่ 3.5 ระยะอาร์คของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นสำหรับการทดสอบ

อุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์น	ระยะอาร์คของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม (มิลลิเมตร)	ระยะอาร์คของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นแบบทรงกลม-ทรงกลม (มิลลิเมตร)
ติดตั้งกับลูกถ้วย 4 ลูก	419	394
ติดตั้งกับลูกถ้วย 5 ลูก	565	540
ติดตั้งกับลูกถ้วย 6 ลูก	711	686
ติดตั้งกับลูกถ้วย 7 ลูก	857	832

ข้อควรระวังในการทดสอบอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นคือ ระยะจากปลายอาร์คชิ่งฮอว์นทั้งสองข้างต้องเท่ากัน ซึ่งถ้าปลายอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นทั้งสองข้างไม่เท่ากันแล้ว ทำให้ค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ในการทดสอบมีความคาดเคลื่อนผิดพลาดได้ กล่าวคือผลการทดสอบจะได้แรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำกว่าค่าปกติ เนื่องจากข้างที่ระยะแคบสั้นกว่าจะเกิดการวาบไฟได้ง่ายกว่า ดังนั้นเมื่อวัดระยะจากปลายทั้งสองข้างของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นได้เท่ากันแล้ว ควรขันล๊อคอุปกรณ์อาร์คชิ่งให้แน่น เพื่อป้องกันการคลายตัว และจากการทดสอบถ้ามีการวาบไฟของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นข้างใดข้างหนึ่งตลอด อาจสันนิษฐานได้ว่าอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นมีระยะทั้งสองข้างไม่เท่ากัน ควรนำอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอว์นมาทำการวัดระยะทั้งสองข้างอีกครั้ง ก่อนที่จะดำเนินการทดสอบต่อไป



(ก) อาร์คซึ่งฮอรั่นแบบแบ่งกลม-แบ่งกลม
ติดตั้งกับลูกถ้วยแขวนจำนวน 4 ลูก



(ข) อาร์คซึ่งฮอรั่นแบบแบ่งกลม-แบ่งกลม
ติดตั้งกับลูกถ้วยแขวนจำนวน 5 ลูก



(ค) อาร์คซึ่งฮอรั่นแบบแบ่งกลม-แบ่งกลม
ติดตั้งกับลูกถ้วยแขวนจำนวน 6 ลูก



(ง) อาร์คซึ่งฮอรั่นแบบแบ่งกลม-แบ่งกลม
ติดตั้งกับลูกถ้วยแขวนจำนวน 7 ลูก

รูปที่ 3.15 อาร์คซึ่งฮอรั่นแบบแบ่งกลม-แบ่งกลม



(ก) อาร์คซึ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม
ติดตั้งกับลูกถ้วยแขวนจำนวน 4 ลูก



(ข) อาร์คซึ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม
ติดตั้งกับลูกถ้วยแขวนจำนวน 5 ลูก



(ค) อาร์คซึ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม
ติดตั้งกับลูกถ้วยแขวนจำนวน 6 ลูก



(ง) อาร์คซึ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม
ติดตั้งกับลูกถ้วยแขวนจำนวน 7 ลูก

รูปที่ 3.16 อาร์คซึ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

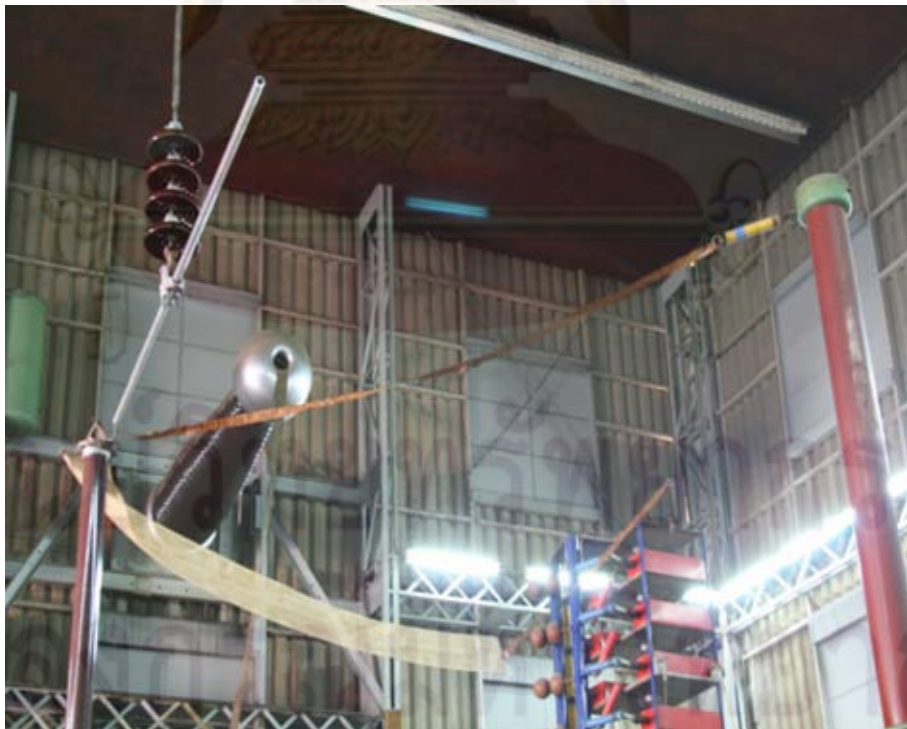
บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์

บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ ตั้งแต่ 1.4-146 μs ต่อแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วย 52-4 จำนวน 4-7 ลูก และอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรั่นแบบแท่งกลม-แท่งกลม และแบบทรงกลม-ทรงกลม ที่ติดตั้งขนานกับ พวงลูกถ้วย 52-4 จำนวน 4-7 ลูก

4.1 การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4

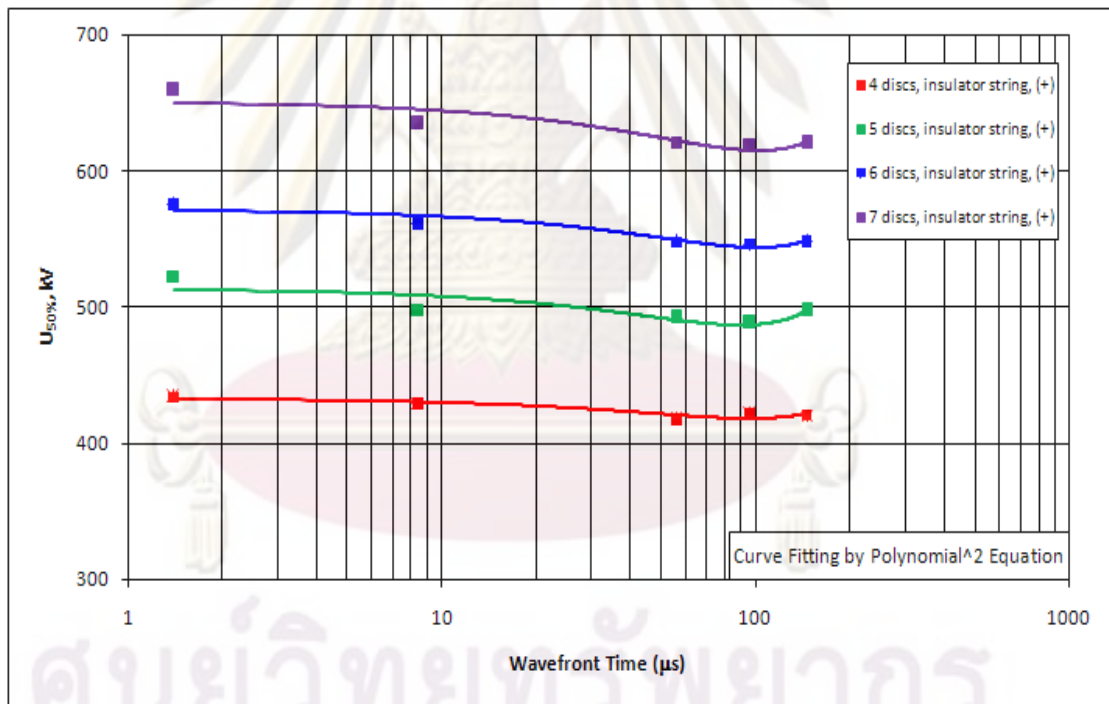
การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของ พวงลูกถ้วยแขวน 52-4 ดังวงจรทดสอบแสดงในรูปที่ 4.1 โดยในการทดสอบใช้หน้าคลื่นอิมพัลส์ ทั้งหมด 5 หน้าคลื่น มีความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ตั้งแต่ 1.4-146 μs ทั้งขั้วบวกและลบ และ ลูกถ้วยแขวน 52-4 ที่ใช้ทดสอบมีจำนวน 4-7 ลูก ผลการทดสอบแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.1 การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4

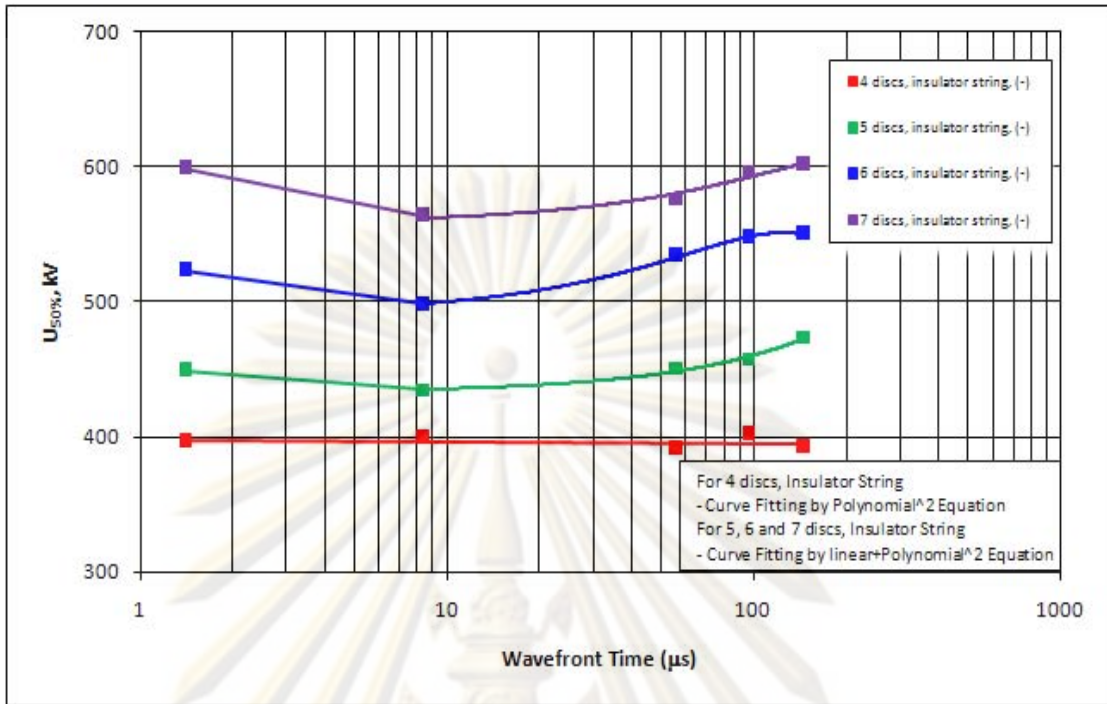
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4

CFO of Insulator String Class 52-4 (kV)								
T_1 (μ s)	4 discs		5 discs		6 discs		7 discs	
	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.
1.4	434	396	523	449	575	523	659	599
8.4	429	399	498	435	561	498	635	564
56	417	391	492	451	548	534	621	577
96	421	402	489	458	546	548	618	597
146	421	392	497	474	548	550	620	602

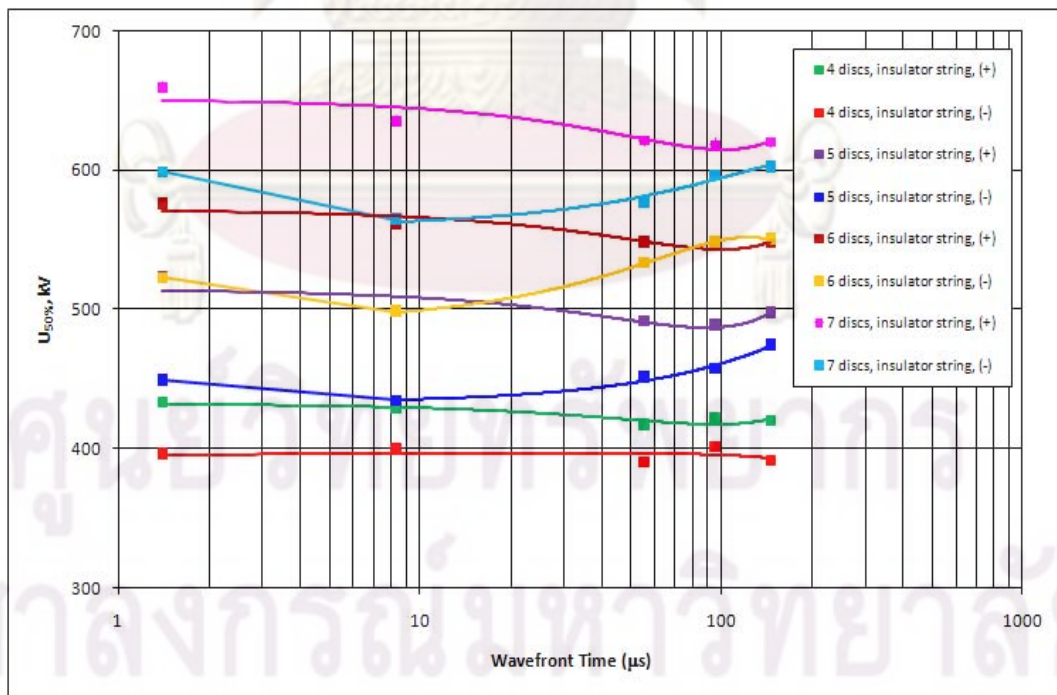


รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 ขั้วบวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 ขั้วลบ



รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 ขั้วบวกและลบ

จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่อนำค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวนในแต่ละหน้าคลื่นอิมพัลส์ที่ทำการทดสอบ มาพล็อตกราฟแรงดัน-เวลา มีลักษณะเป็นตัวยู (U-Curve) ปรากฏการณ์ลักษณะนี้อธิบายได้ด้วยเวลากการก่อตัวของอะวอนลานซ์ที่ทำให้ข้ามแก๊ปก๊าซได้พอดี [9,11]

สำหรับการทดสอบพวงลูกถ้วยจำนวน 4 ลูก พบว่าแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบมีค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ในแต่ละหน้าคลื่นอิมพัลส์ใกล้เคียงกัน กล่าวคือค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ อย่างไรก็ตามค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ จะลดลงเล็กน้อยตามเวลาที่เวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของหน้าคลื่นอิมพัลส์ $1.4 \mu s$ จะมีค่าสูงสุด และค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ จะลดลงจากเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์ที่เพิ่มขึ้น สำหรับพวงลูกถ้วยจำนวน 5, 6 และ 7 ลูก ซึ่งค่าค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำที่สุดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาหน้าคลื่น $60 \mu s - 100 \mu s$ สำหรับการทดสอบพวงลูกถ้วยจำนวน 4, 5, 6 และ 7 ลูก แรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ลดลง 4%, 6.5%, 5% และ 6.2 % ตามลำดับ (เปรียบเทียบกับแรงดันหน้าคลื่นอิมพัลส์ $1.4 \mu s$ ซึ่งอยู่ในช่วงของหน้าคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า $1.2/50 \mu s$)

เมื่อพิจารณาผลแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ จากรูปที่ 4.3 พบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ส่งผลให้เกิดแรงดันเบรกดาวนในในแต่ละหน้าคลื่นมีรูปร่างลักษณะเป็นตัวยู (U-curve) โดยค่าหน้าคลื่นวิกฤตที่ทำให้เกิดค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำสุดอยู่ในช่วงเวลาหน้าคลื่น $10 \mu s$ ในการทดสอบด้วยพวงลูกถ้วยจำนวน 5, 6 และ 7 ลูก ค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ที่ช่วงเวลาหน้าคลื่นหน้าวิกฤตจะลดลงจากค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ที่หน้าคลื่น $1.4 \mu s$ จะลดลง 3%, 5%, 6% จากการทดสอบพวงลูกถ้วย 5, 6, 7 ลูก ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลของแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบกับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบต่อการวาทไฟของพวงลูกถ้วยแขวน จำนวน 4-7 ลูก ดังรูปที่ 4.4 พบว่าแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบทำให้เกิดการวาทไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยได้ง่ายกว่าแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ ในทุกจำนวนลูกถ้วยที่ทำการทดสอบ ซึ่งจะตรงกับผลการทดสอบพวงลูกถ้วยแขวนด้วยรูปคลื่นฟ้าผ่ามาตรฐาน $1.2/50 \mu s$ ของบริษัท NGK INSULATORS, LTD. [14] ผลปรากฏว่าที่จำนวนลูกถ้วย 4-7 ลูก แรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของชั่วพลบต่ำกว่าชั่วพลบเหมือนกัน

4.2 การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอว์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม

การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอว์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม ดังวงจรถดสอบแสดงในรูปที่ 4.5 อุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอว์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม ติดตั้งขนานกับพวงลูกถ้วยแขวนจำนวน 4-7 ลูก โดยใช้หน้าคลื่นอิมพัลส์ในการทดสอบทั้งหมด 5 หน้าคลื่น ตั้งแต่ 1.4-146 μs ทั้งชั่ววอกและละบ ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ แสดงดังตารางที่ 4.2, 4.3 และรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.5 การทดสอบหาแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอว์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม, ขั้วบวก

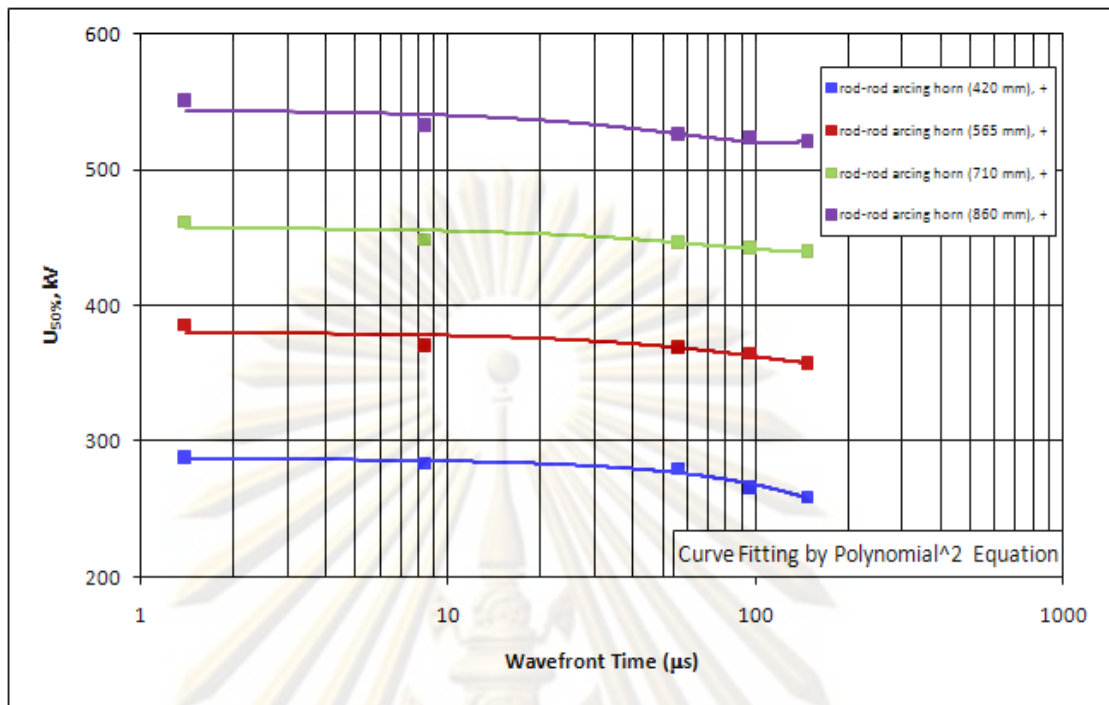
50% flashover voltage of Arcing horn rod-rod (kV), positive					
Arcing Distance (mm)	Wavefront Time, T_1 (μ s)				
	1.4	8.4	56	96	146
ระยะลูกถ้วย 4 ลูก (420 mm), +	287	284	280	265	259
ระยะลูกถ้วย 5 ลูก (565 mm), +	386	370	368	365	357
ระยะลูกถ้วย 6 ลูก (710 mm), +	462	449	446	442	439
ระยะลูกถ้วย 7 ลูก (860 mm), +	550	532	525	523	520

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม, ขั้วลบ

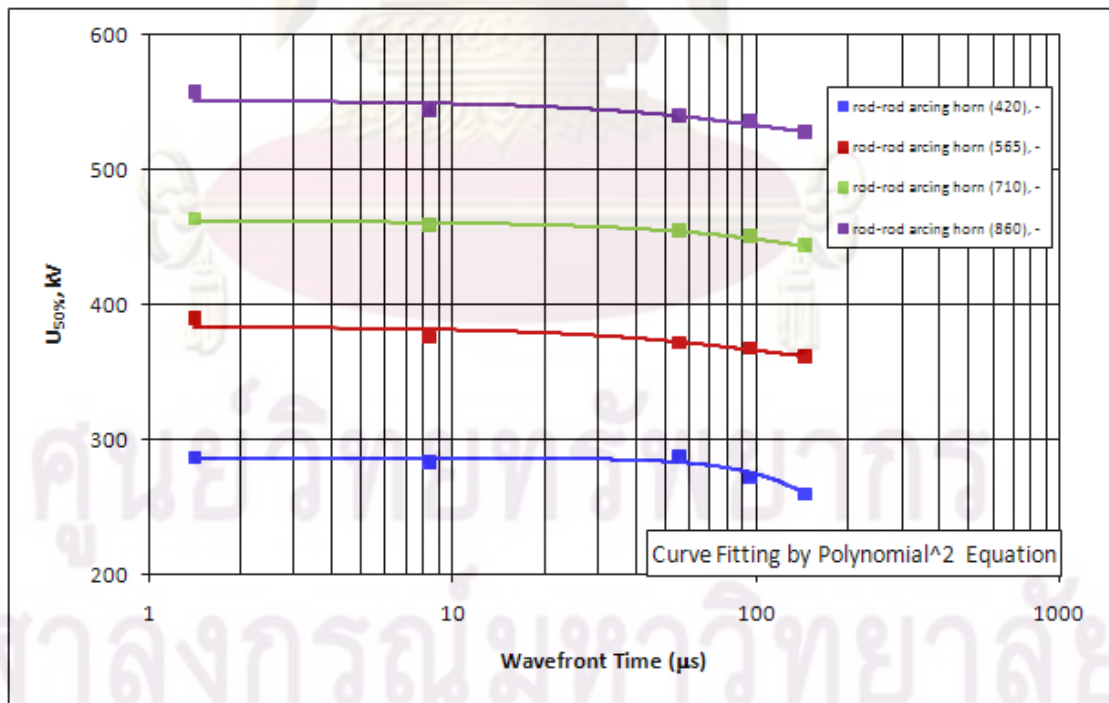
50% flashover voltage of Arcing horn rod-rod (kV), negative					
Arcing Distance (mm)	Wavefront Time, T_1 (μ s)				
	1.4	8.4	56	96	146
ระยะลูกถ้วย 4 ลูก (420 mm), -	287	282	286	272	260
ระยะลูกถ้วย 5 ลูก (565 mm), -	389	376	372	368	361
ระยะลูกถ้วย 6 ลูก (710 mm), -	464	458	454	450	443
ระยะลูกถ้วย 7 ลูก (860 mm), -	557	543	539	535	527

ศูนย์วิทยทรัพยากร

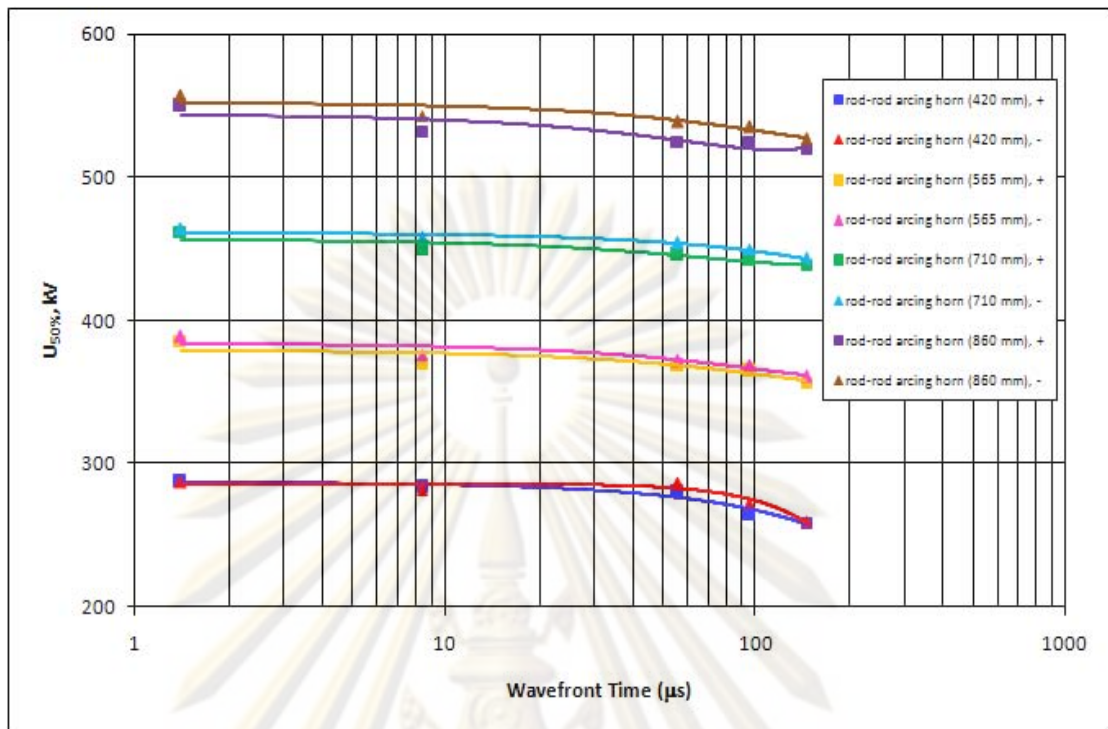
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของ อุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม, ขั้วบวก



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของ อุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม, ขั้วลบ



รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นแบบ
แท่งกลม-แท่งกลม ระหว่างแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกและลบ

จากผลการทดสอบแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คชิงฮอร์นแบบ
แท่งกลม-แท่งกลม ซึ่งติดตั้งขนานกับลูกถ้วยแขวน 52-4 จำนวน 4, 5, 6 และ 7 ลูก (ระยะแกป
420 mm, 565 mm, 710 mm และ 860 mm ตามลำดับ) โดยเปลี่ยนแรงดันหน้าคลื่นอิมพัลส์
พบว่า ลักษณะของกราฟแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์มี
แนวโน้มที่เหมือนกัน กล่าวคือแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ จะมีค่าสูงสุดที่หน้าคลื่น 1.4 μs และ
แรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ จะลดลงเมื่อหน้าคลื่นอิมพัลส์เพิ่มขึ้น ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ

เมื่อเปรียบเทียบผลเกิดการวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกและลบ
ดังรูปที่ 4.8 พบว่า แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกมีแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำกว่าแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ
ทุกระยะแกปที่ทดสอบ เนื่องจากอิทธิพลของประจุค้าง (space charge) ที่เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้า
ไม่สม่ำเสมอสูง มีผลทำให้อิเล็กทรอนิกส์ชั่ววอกเบรกดาวน์ได้ง่าย

เมื่อพิจารณาค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก จากรูปที่
4.6 พบว่าค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำสุดที่หน้าคลื่น 146 μs ลดลงจากค่าแรงดันวาบไฟ
วิกฤต $U_{50\%}$ ที่หน้าคลื่น 1.4 μs เท่ากับ 9.7%, 7.5%, 5%, 5.4% (ระยะแกป 420 mm, 565 mm,
710 mm และ 860 mm ตามลำดับ) และเมื่อพิจารณาค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของแรงดัน
อิมพัลส์ชั่วลบ จากรูปที่ 4.7 พบว่าค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำสุดที่หน้าคลื่น 146 μs ลดลง

จากค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ที่หน้าคลื่น 1.4 μs เท่ากับ 9.4%, 7.1%, 4.5%, 5.3% (ระยะ
แก๊ป 420 mm, 565 mm, 710 mm และ 860 mm ตามลำดับ)

4.3 การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์ค ซึ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม

การทดสอบอิทธิพลหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์
อาร์คซึ่งฮอร์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม ดังวงจรถดสอบแสดงในรูปที่ 4.9 อุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นแบบ
ทรงกลม-ทรงกลม ติดตั้งขนานกับพวงลูกถ้วยแขวนจำนวน 4-7 ลูก โดยใช้หน้าคลื่นอิมพัลส์ในการ
ทดสอบทั้งหมด 5 หน้าคลื่น ตั้งแต่ 1.4-146 μs ทั้งชั่ววอกและลบ โดยติดตั้งกับลูกถ้วยแขวน 52-4
จำนวน 4-7 ลูก ผลการทดสอบแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ แสดงดังตารางที่ 4.4, 4.5 และรูปที่
4.10, 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4.9 การทดสอบหาแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์
ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม

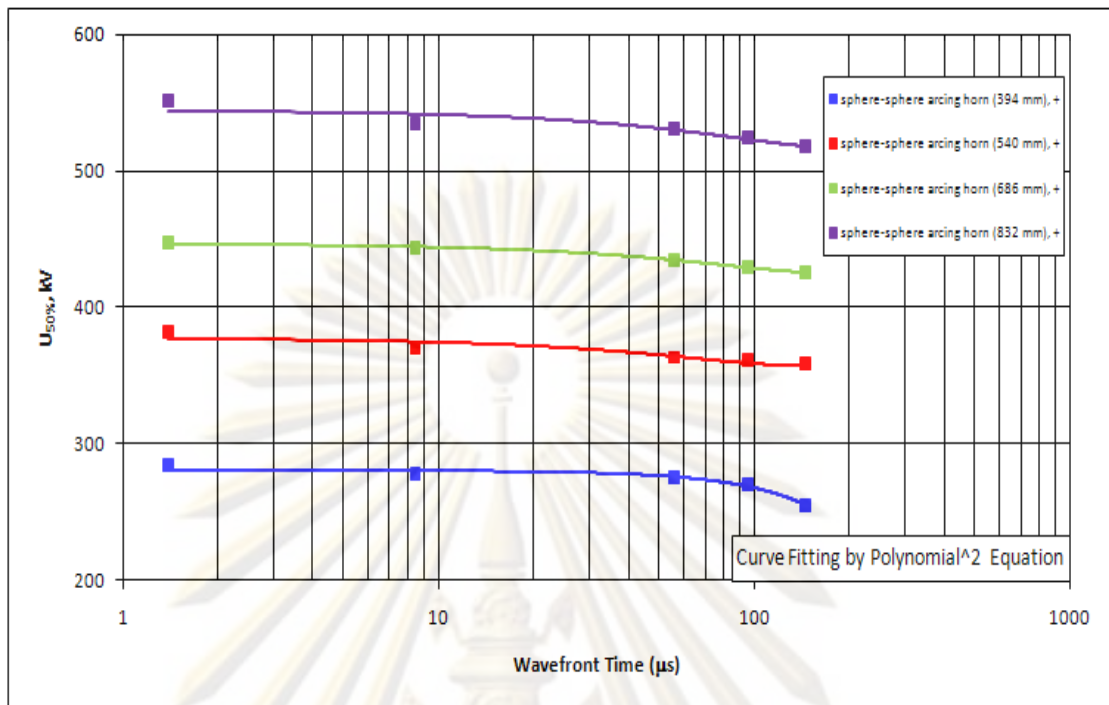
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม, ขั้วบวก

50% flashover voltage of Arcing horn sphere-sphere (kV), positive					
Arcing Distance (mm)	Wavefront Time, T_1 (μ s)				
	1.4	8.4	56	96	146
ระยะลูกถ้วย 4 ลูก (394 mm), +	284	277	275	270	254
ระยะลูกถ้วย 5 ลูก (540 mm), +	381	370	364	361	358
ระยะลูกถ้วย 6 ลูก (686mm), +	447	443	434	429	425
ระยะลูกถ้วย 7 ลูก (832 mm), +	551	534	530	524	517

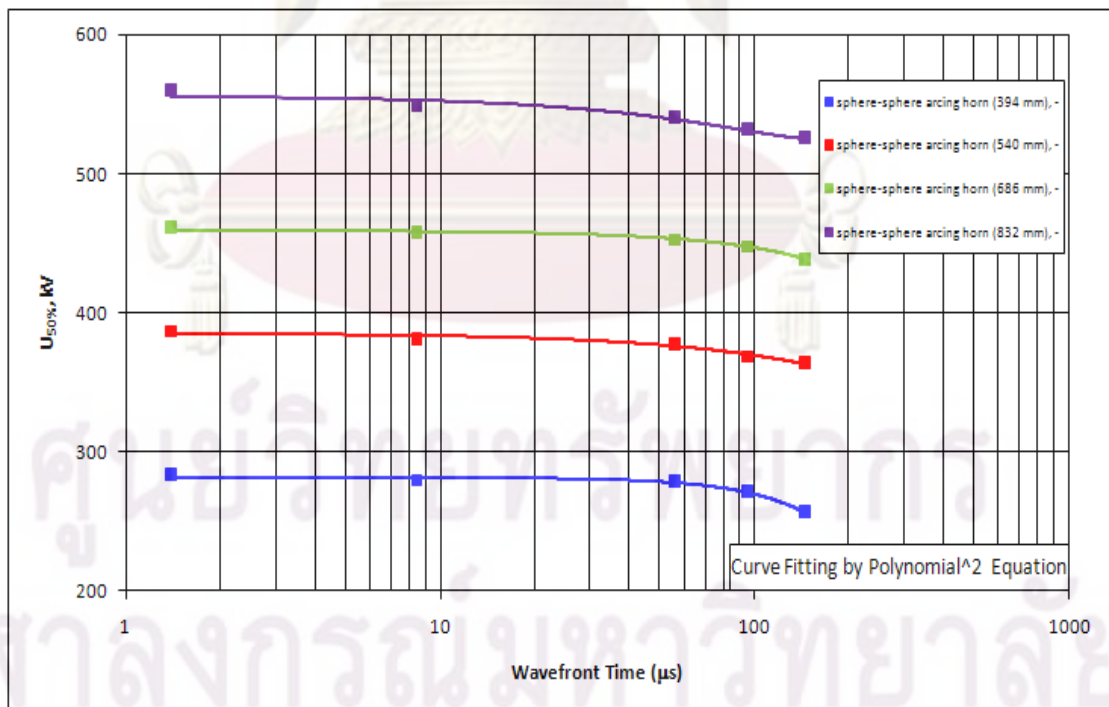
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม, ขั้วลบ

50% flashover voltage of Arcing horn sphere-sphere (kV), negative					
Arcing Distance (mm)	Wavefront Time, T_1 (μ s)				
	1.4	8.4	56	96	146
ระยะลูกถ้วย 4 ลูก (394 mm), -	283	280	278	271	256
ระยะลูกถ้วย 5 ลูก (540 mm), -	387	380	377	369	363
ระยะลูกถ้วย 6 ลูก (686mm), -	461	457	453	448	438
ระยะลูกถ้วย 7 ลูก (832 mm), -	559	549	540	531	525

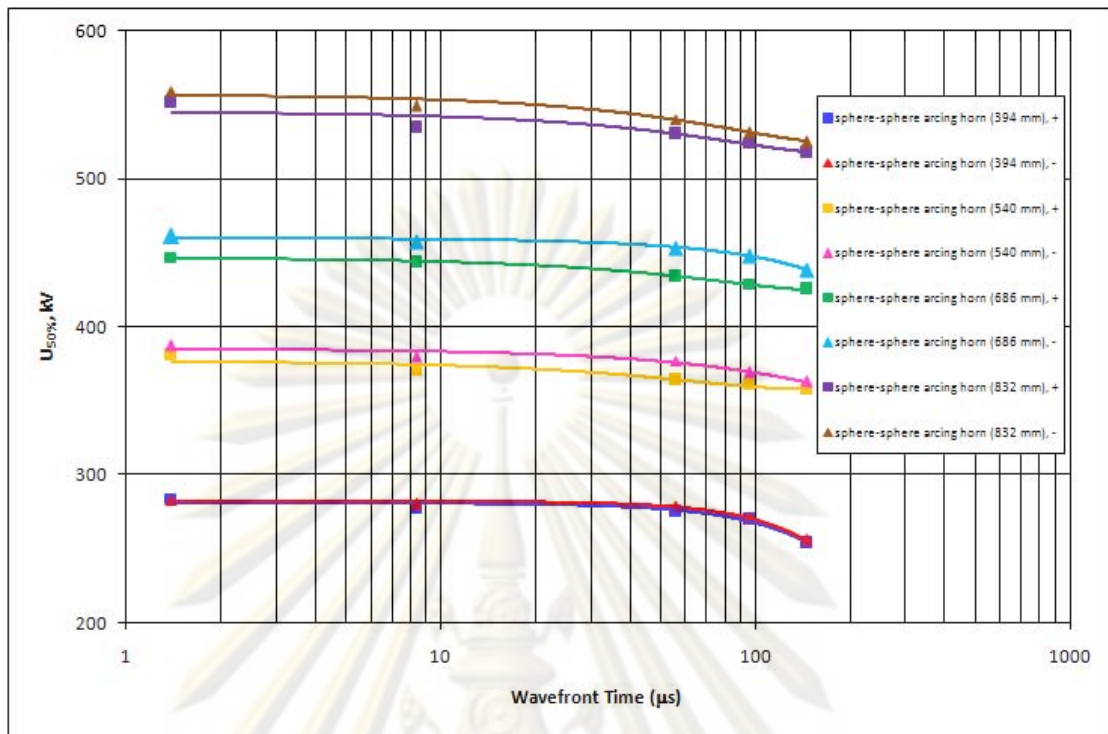
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม, ขั้วบวก



รูปที่ 4.11 การทดสอบแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นแบบทรงกลม-ทรงกลม, ขั้วลบ



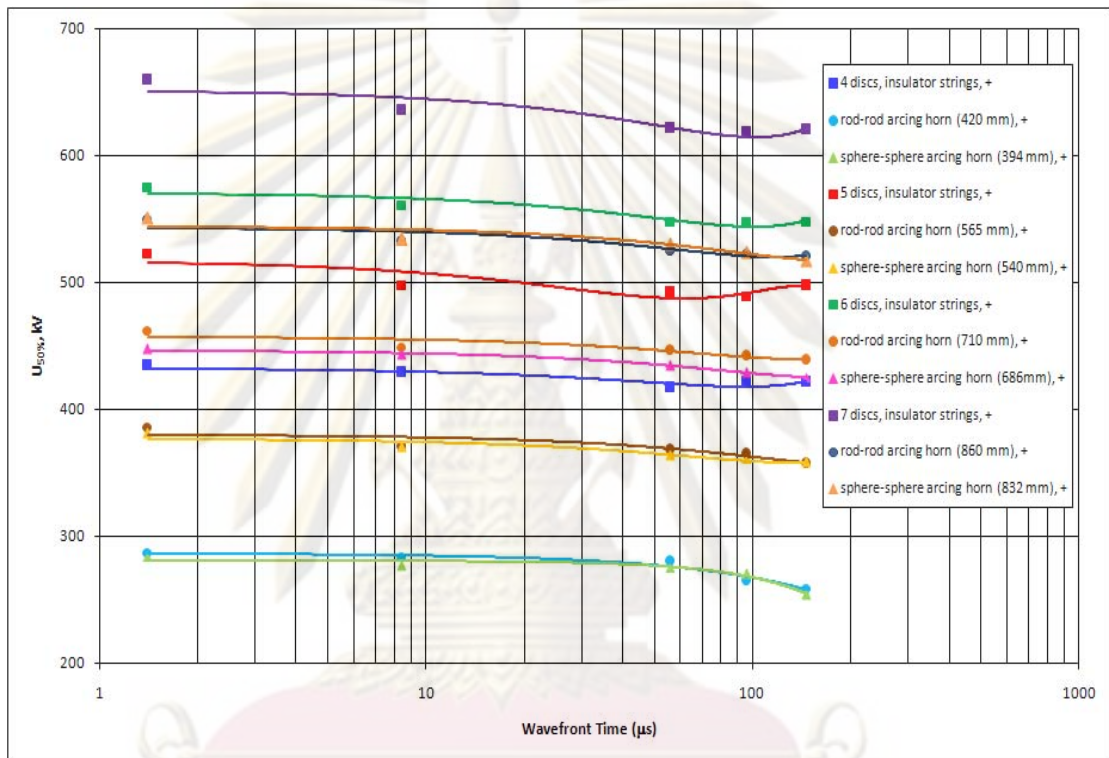
รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นแบบ ทรงกลม-ทรงกลม ระหว่างแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกและลบ

จากผลการทดสอบแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นแบบ ทรงกลม-ทรงกลม ซึ่งติดตั้งขนานกับลูกถ้วยแขวน 52-4 จำนวน 4, 5, 6 และ 7 ลูก (ระยะแกป 394 mm, 540 mm, 686 mm และ 832 mm ตามลำดับ) โดยเปลี่ยนแรงดันหน้าคลื่นอิมพัลส์ พบว่า ลักษณะของกราฟแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์มีลักษณะคล้ายกับการทดสอบด้วยอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม กล่าวคือแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ จะมีค่าสูงสุดที่หน้าคลื่น 1.4 μs และแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ จะลดลงเมื่อหน้าคลื่นอิมพัลส์ เพิ่มขึ้น ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ และเมื่อเปรียบเทียบผลเกิดการวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกและลบ ดังรูปที่ 4.12 พบว่าแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกมีแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำกว่าแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ ทุกระยะแกปที่ทดสอบ

โดยเมื่อพิจารณาค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอิมพัลส์ชั่ววอก จากรูปที่ 4.10 พบว่าค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำสุดที่หน้าคลื่น 146 μs ลดลงจากค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ที่หน้าคลื่น 1.4 μs เท่ากับ 10.5%, 6%, 5%, 6% (ระยะแกป 394 mm, 540 mm, 686 mm และ 832 mm ตามลำดับ) และเมื่อพิจารณาค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ จากรูปที่ 4.11 พบว่าค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำสุดที่หน้าคลื่น 146 μs ลดลง

จากค่าแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ที่หน้าคลื่น $1.4 \mu\text{s}$ เท่ากับ 9.3%, 6.2%, 5%, 6% (ระยะแกบ 420 mm, 565 mm, 710 mm และ 860 mm ตามลำดับ)

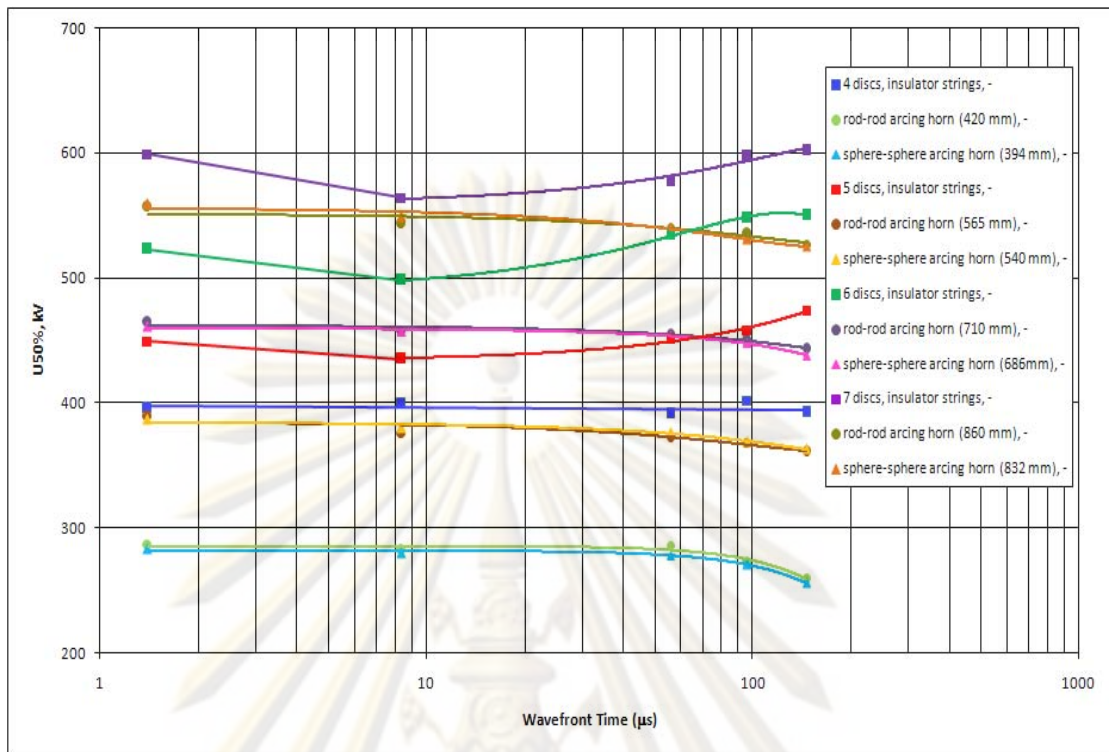
เมื่อเปรียบเทียบแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวนกับอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ชั่วคราวและชั่วคราว แสดงดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวนกับอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ชั่วคราว

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวนกับอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์นต่อการเปลี่ยนแปลงหน้าคลื่นอิมพัลส์ชั่วคราว

เนื่องจากอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์นที่นำมาใช้ในการทดสอบ เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในสายส่งระดับแรงดัน 115 kV (ลูกถ้วยแขวน 7-8 ลูก) ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ดังนั้นเมื่อมาติดตั้งกับพวงลูกถ้วยแขวนจำนวน 4-5 ลูก ก็อาจสังเกตได้ว่าแรงดันวาทไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์นมีค่าต่ำกว่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวนค่อนข้างมาก

จากผลการทดสอบผลของแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว ดังรูปที่ 4.13 เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 กับอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์น ที่หน้าคลื่นอิมพัลส์ที่ทำให้แรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวนต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 34.2%, 26.1%, 21.4%, 15.3% (ระยะลูกถ้วย 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ)

จากผลการทดสอบผลของแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว ดังรูปที่ 4.14 เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของลูกถ้วยแขวน 52-4 กับอุปกรณ์อาร์คชิ่งฮอร์น ที่หน้าคลื่นอิมพัลส์ที่ทำให้แรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวนต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 30%, 13.5%, 8.2%, 3% (ระยะลูกถ้วย 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ)

ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวนและอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรันั้นจะสังเกตได้ว่า อิมพัลส์ชั่วเวลาที่หน้าคลื่นวิกฤตระยะลูกถ้วย 6-7 ลูก มีค่าแตกต่างระหว่างแรงดันวาทไฟผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของลูกถ้วยและอาร์คซึ่งฮอรันั้น มีค่าค่อนข้างน้อย (8.2% และ 3%) ซึ่งในการออกแบบประสานสัมพันธ์ฉนวนระหว่างพวงลูกถ้วยแขวนและอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรันั้น ค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรันั้นควรมีต่ำกว่าพวงลูกถ้วยแขวน ประมาณ 20-25% [15] เพื่อให้อุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอรันั้นเกิดการวาทไฟก่อนลูกถ้วยแขวน โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับพวงลูกถ้วยแขวน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การทำวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบอิมพัลส์ของหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาทไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 จำนวน 4-7 ลูก และอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นแบบแท่งกลม-แท่งกลม และทรงกลม-ทรงกลม โดยใช้หน้าคลื่นอิมพัลส์ 1.4 - 146 μs ในการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของพวงลูกถ้วยแขวนจำนวน 4-7 ลูก ขั้วลบต่ำกว่าขั้วบวก ทุกกรณีที่ทำกรทดสอบ
2. ค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ จากการเปลี่ยนแปลงเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์ของพวงลูกถ้วยแขวนมีลักษณะเป็นตัวยู (U-Curve) ซึ่งจะมีลักษณะตัวยูได้อย่างชัดเจนเมื่อจำนวนลูกถ้วยแขวนเพิ่มขึ้น
3. ค่าหน้าคลื่นวิกฤตที่ทำให้ค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำสุด ของพวงลูกถ้วยแขวน อิมพัลส์ขั้วลบ อยู่ที่ 10 μs และอิมพัลส์ขั้วบวกอยู่ที่ 60-100 μs
4. จากผลการทดสอบพวงลูกถ้วยแขวนจำนวน 4-7 ลูก ความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ส่งผลกระทบต่อแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ เล็กน้อย ซึ่งค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ลดลงประมาณ 5-6% (เปรียบเทียบกับหน้าคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน 1.4 μs)
5. ค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ของอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์นทั้งแบบแท่งกลม-แท่งกลม และทรงกลม-ทรงกลม มีค่าสูงสุดที่หน้าคลื่น 1.4 μs และแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ จะลดลงตามหน้าคลื่นที่เพิ่มขึ้น ทั้งขั้วบวกและลบ
6. ค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ ขั้วลบ ที่เวลาหน้าคลื่นวิกฤตของพวงลูกถ้วยแขวนจำนวน 6-7 ลูก เปรียบเทียบอุปกรณ์อาร์คซึ่งฮอร์น ที่ทำการทดสอบ มีค่าแรงดันวาทไฟตามผิววิกฤต $U_{50\%}$ แตกต่างกันค่อนข้างน้อยอยู่ในช่วง 3-8% โดยที่หน้าคลื่น 1.4 μs (อยู่ในช่วงหน้าคลื่นมาตรฐานฟ้าผ่า) มีค่าแตกต่างกัน 6-12%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลการเปลี่ยนหน้าคลื่นอิมพัลส์ต่อแรงดันวาบไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สำหรับการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ายังมีลูกถ้วยหลายแบบที่มีการใช้งาน ดังนั้นควรมีการศึกษาวิจัยแรงดันวาบไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยแบบอื่น ๆ เพิ่มเติม

2. ควรทดสอบเพิ่มความยาวหน้าคลื่นอิมพัลส์ขึ้น ในกรณีของอุปกรณ์ทดสอบที่ยังไม่แสดงค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำสุด หรือลักษณะ U-Curve ที่ชัดเจน เพื่อศึกษาหาค่าแรงดันวาบไฟวิกฤต $U_{50\%}$ ต่ำสุดต่อหน้าคลื่นอิมพัลส์ที่เปลี่ยนแปลง มาใช้ในการออกแบบประสานสัมพันธ์จนวนได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] IEC 62305-1. Protection Against Lightning – Part 1: General Principles. Geneva, 2006.
- [2] T.Harada, Y.Aihara, Y.Aoshima. Influence of Switching Impulse Wave Shape on Flashover Voltages of Air Gaps. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1973, Pas-92, pp. 1085-1093.
- [3] Luigi Paris. Influence of Air Gap Characteristic on Line-to-Ground Switching Surge Strength. IEEE Transactions on Power Apparatus and System August, 1967.
- [4] W. Busch. Air Humidity : An Important Factor For UHV Design. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Nov/Dec 1978, Vol. Pas-97, no. 6.
- [5] T.Harada, Y.Aihara, Y.Aoshima, Influence of Humidity on Lightning and Switching Flashover Voltage. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, July/Aug 1971, Vol.90, pp.1433-1442.
- [6] G.Carrara, L.Dellera, G.Sartorio. Switching Surge with Very Long Fronts (above 1500 us): Effect Front Shape on Discharge Voltage. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, March 1970, Vol. Pas-89, no 8.
- [7] M.Boutlendj, N.L.Alien. Dielectric Strength of Air Insulation for Coordination of Minimum Clearance of Overhead Lines: a review. IEEE Proc-Sci. Meas. Technol, November 1994, Vol.141, no.6.
- [8] E.Kuffel, W.S.Zaengl, J.Kuffel. High Voltage Engineering Fundamental. 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [9] สำรวัย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [10] EPRI, AC Transmission Line Reference:200 kV and Above. Third Edition, Palo Alto, California, EPRI, December, 2005.
- [11] J.M. Meek and J.D. Craggs. Electrical Breakdown of Gases. A Wiley-Interscience publication, John Wiley & Sons Ltd., 1978.
- [12] IEC 60060-1. High-Voltage Test Techniques. 2nd Edition, Geneva, 1989.

- [13] อุดม คลอดกลาง. การหาตัวประกอบแก้ไขความชื้นของการทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิวรูปคลื่นฟ้าผ่าและการทดสอบแรงดันกระแสสลับของลูกถ้วยไฟฟ้าที่ค่า h/δ เกิน 15 g/m^3 , วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [14] NGK Insulators, LTD. Standard String Flashover Characteristics of Suspension Insulators Based on the Test procedures of ANSI C29.1, Cat.No.14 B.
- [15] NGK Insulators, LTD. Principles of Insulation Design for Overhead Transmission Line, NGK Technical Report, no.17-1969.
- [16] Holland H. Farr. Transmission Line Design Manual. A Water Resources Technical Publication, 1980.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผนวก ก.

ลักษณะการวาวไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยแขวน และแกปอากาศ

ตารางที่ ก. 1 ลักษณะการวาวไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยแขวน และแกปอากาศ [16]

Impulse air gap,		Impulse flashover (positive critical), kV	Number of insulator units ¹	Wet 60-Hz flashover, kV	Wet 60-Hz air gap,	
in	mm				mm.	in.
8	203	150	1	50	254	10
14	356	255	2	90	305	12
21	533	355	3	130	406	16
26	660	440	4	170	508	20
32	813	525	5	215	660	26
38	965	610	6	255	762	30
43	1092	695	7	295	889	35
49	1245	780	8	335	991	39
55	1397	860	9	375	1118	44
60	1524	945	10	415	1245	49
66	1676	1025	11	455	1346	53
71	1803	1105	12	490	1473	58
77	1956	1185	13	525	1575	62
82	2083	1265	14	565	1676	66
88	2235	1345	15	600	1778	70

¹ Insulator unit are 146*254 mm (5-3/4 by 10 in.) or 146*267 mm (5-3/4 by 10-1/2 in.)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิวัฒน์ เรื่องกิตติคุณ เกิดเมื่อวันที่ 7 มกราคม 2525 จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า กำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 โดยศึกษาวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งวิศวกร ระดับ 5 กองเทคโนโลยีสายส่งและการบิน ฝ่ายบำรุงรักษาระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย