

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการเกิดเบรกดาวนในช่องว่างอากาศของอิเล็กโทรดแบบแท่ง-แท่ง
เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับ

EXPERIMENTAL STUDIES OF BREAKDOWN CHARACTERISTICS OF
ROD-ROD ELECTRODE GAPS UNDER LIGHTNING IMPULSES
SUPERIMPOSED ON AC VOLTAGE WAVEFORMS



T123026

สรชัย อานอาชา
SANCHAI ARNACHA

วพ.
(๘3341)
๑565

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

123026

18 ต.ค. 2555

b. 12/11/12
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-EN-M-020-043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL STUDIES OF BREAKDOWN CHARACTERISTICS OF
ROD-ROD ELECTRODE GAPS UNDER LIGHTNING IMPULSES
SUPERIMPOSED ON AC VOLTAGE WAVEFORMS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMITL-2012-EN-M-020-043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการเกิดเบรกดาวน์ในช่องว่างอากาศของอิเล็กโทรดแบบแท่ง-แท่งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับ

Thesis Title Experimental Studies of Breakdown Characteristics of Rod-Rod Electrode Gaps Under Lightning Impulses Superimposed on AC Voltage Waveforms

นักศึกษา นายสรรัชต์ อานอาษา

รหัสประจำตัว 52610430

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-020-043

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | ลายมือชื่อ |
|-----------------------------|--|
| รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล |  |
| รศ.ดร.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ |  |
| ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง |  |
| ดร.พีรุดิ ยูทธโกวิท |  |
| รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 10 เมษายน พ.ศ. 2555 เวลา 12.00-14.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 10 เมษายน พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาการเกิดเบรกดาวนในช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับ |
| นักศึกษา | นายสรรัชต์ อานอาษา |
| รหัสนักศึกษา | 52610430 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| พ.ศ. | 2555 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลการศึกษาคูณสมบัติการเกิดเบรกดาวนในช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆกัน เนื้อหาของวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกจะเป็นการทดสอบหาผลกระทบของแรงดันอิมพัลส์ที่มาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0° - 360° ของช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่ง ส่วนที่สองของวิทยานิพนธ์จะเป็นการทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบการเกิดเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์แบบปกติกับแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ เมื่อนำมาใช้ทดสอบอาร์กชิงฮอร์นที่ใช้ในสำหรับป้องกันแรงดันเกินของหม้อแปลงในระบบจำหน่าย 12 kV ซึ่งอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV ที่นำมาทดสอบมีขนาดรวมไปถึงการตั้งค่าต่างๆ เป็นไปตามมาตรฐาน DIN 42531 ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากแรงดันทับซ้อนที่มีผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวนมากที่สุดถึง 20 % ที่มุม 90° ของแรงดันกระแสสลับช่วงบวกและที่มุม 270° ของแรงดันกระแสสลับช่วงลบซึ่งลักษณะพฤติกรรมของอาร์กชิงฮอร์นอาจส่งผลกระทบต่อฉนวนหม้อแปลง

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis Title | Experimental Studies of Breakdown Characteristics of Rod-Rod Electrode gaps Under Lightning impulses superimposed on AC Voltage Waveforms. |
| Student | Mr. Sanchai Arnacha |
| Student ID. | 52610430 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Electrical Engineering |
| Year | 2012 |
| Thesis Advisor | Assoc. Prof. Dr. Anantawat Kunakorn |

ABSTRACT

This thesis presents studies of breakdown characteristics of rod-rod electrode gaps under a lightning impulse voltage superimposed on an AC power frequency (50 Hz) voltage waveforms at various angles. The thesis is divided into two parts as follows: In the first part, effects of statistical breakdown tests on rod-rod electrode gaps due to a lightning impulses at the angle of 0°-360° have been studied and investigated. The second part is experiments on the 12 kV arcing horn of which configuration corresponds to the DIN 42531 Standard. From the test results, the superimposed voltages influence to the break voltages of the arcing horn. The maximum changes of the breakdown voltage are upto 20% at phase angle of 90° of AC voltage and at phase angle of 270°. The characteristic of the breakdown voltage arcing horn might affect the transformer insulation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความกรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่มีความสำคัญจาก รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และดร. พีรุฒิ ยุทธโกวิท ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความอนุเคราะห์แนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้เพื่อให้สามารถวิจัยงานชิ้นนี้จนสำเร็จลุล่วง ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตาและความมีน้ำใจ

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ปริญญาโท รุ่นน้องปริญญาโท และรุ่นน้องปริญญาตรีในห้องวิจัยวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือให้คำปรึกษาต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายต้องขอกราบเท้า คุณพ่อ บุญชู อานอาชา และคุณแม่ สร้อย อานอาชา ผู้ให้กำเนิดให้ชีวิต ให้การศึกษา อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจในการต่อสู้กับชีวิต รวมถึงทุกคนในครอบครัวสำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจที่มีให้กับผู้จัดทำตลอดมา

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ต่างๆ ให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สรรัชชัย อานอาชา

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VIII |
| สารบัญรูป..... | IX |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 1 |
| 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย..... | 5 |
| 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา..... | 5 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 7 |
| 2.1 ไอออนไนเซชันและการปล่อยอิเล็กตรอน..... | 7 |
| 2.1.1 ไอออนไนเซชันโดยการชน (Collision ionization)..... | 7 |
| 2.1.1.1 สัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชันในแก๊ส..... | 8 |
| 2.1.1.2 การเกิดอะวาลานซ์อิเล็กตรอน (Electron avalanche)..... | 10 |
| 2.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ..... | 11 |
| 2.2.1 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวแคโทดโดยการชนของไอออนบวก..... | 11 |
| 2.2.1.1 ไอออนบวกที่เกิดจากกระบวนการเบี่ยงตัน..... | 11 |
| 2.2.1.2 โมเลกุลที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นในอะวาลานซ์..... | 11 |
| 2.2.1.3 โมเลกุลที่อยู่ในสถานะภาพเมตาเสถียร (Metastable)..... | 11 |
| 2.2.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโนดโดยสนามไฟฟ้า..... | 12 |
| 2.3 กลไกการเกิดเบรกดาวน..... | 12 |
| 2.3.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนของทาว์นเซนต์..... | 14 |
| 2.3.2 เงื่อนไขเบรกดาวนของทาว์นเซนต์..... | 17 |
| 2.3.3 กฎของพาสเชน (Paschen's law)..... | 18 |
| 2.3.3.1 ลักษณะเส้นกราฟของพาสเชน (Paschen's curve)..... | 18 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.3.3.2 ชีตจำกัดการใช้กฎของพาสเซน | 21 |
| 2.3.3 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (E_b)..... | 22 |
| 2.3.4 กลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer mechanism)..... | 23 |
| 2.3.4.1 เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ | 25 |
| 2.3.4.2 ขนาดอะวาลานซ์วิกฤต..... | 26 |
| 2.4 เบรกดาวน์ในแก๊สไฟฟ้าลบ (Breakdown in electronegative gas)..... | 28 |
| 2.4.1 การเกิดไอออนลบ(Negative ion formation)..... | 28 |
| 2.4.2 สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนเป็นไอออนลบ | 29 |
| 2.4.3 เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของแก๊สไฟฟ้าลบ | 30 |
| 2.5 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์ในแก๊ส..... | 31 |
| 2.5.1 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์โดยตรง (U_b)..... | 32 |
| 2.5.2 การคำนวณแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (U_i)..... | 33 |
| 2.5.3 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์ในอากาศ | 34 |
| 2.6 ผลของชั่วแรงแรงดันต่อค่าแรงดันเริ่มต้น (U_i และ U_b) | 35 |
| 2.7 อิทธิพลของประจุค้างที่มีผลต่อชั่วของแรงดันเบรกดาวน์..... | 36 |
| 2.7.1 อิเล็กโทรดปลายแหลมเป็นขั้วบวก..... | 36 |
| 2.7.2 อิเล็กโทรดปลายแหลมเป็นขั้วลบ..... | 37 |
| 2.8 การป้องกันแรงดันเกินด้วยอาร์กชิงฮอร์น..... | 38 |
| 2.8.1 กราฟแรงดัน-เวลา (Voltage time characteristics)..... | 39 |
| 2.8.2 หลักการในการพิจารณาเลือกอุปกรณ์ป้องกัน | 41 |
| บทที่ 3 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ..... | 43 |
| 3.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์..... | 45 |
| 3.2 วงจรกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ..... | 46 |
| 3.3 ชุดกรองความถี่ต่ำผ่านและชุดกรองความถี่สูงผ่าน | 46 |
| 3.4 ชุดควบคุมมอดูเลชัน (Trigatron)..... | 49 |
| 3.4.1 ชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ | 50 |
| 3.4.2 ชุดตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero-crossing)..... | 50 |
| 3.4.3 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล..... | 51 |
| 3.4.4 หลักการในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์..... | 52 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ | 54 |
| 4.1 การศึกษาการเกิดเบรกดาวน์ในช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแห้ง-แห้ง เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ | 54 |
| 4.1.1 การเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันกระแสสลับ..... | 54 |
| 4.1.2 แรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า ($U_{b50\%}$)..... | 55 |
| 4.1.3 การเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ..... | 57 |
| 4.2 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ ... | 60 |
| 4.2.1 ลักษณะรูปคลื่นที่ไม่เกิดการเบรกดาวน์ | 60 |
| 4.2.1 ลักษณะรูปคลื่นที่เกิดการเบรกดาวน์ | 62 |
| 4.3 การศึกษาการเกิดเบรกดาวน์ของอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ | 63 |
| 4.3.1 อาร์กชิงฮอร์นที่ใช้ทดสอบ..... | 63 |
| 4.3.2 การคำนวณหาขนาดของแรงดันกระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบ | 64 |
| 4.3.3 การทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า ($U_{b50\%}$)..... | 65 |
| 4.3.4 การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ของอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ..... | 66 |
| 4.4 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ ... | 76 |
| 4.4.1 ลักษณะรูปคลื่นที่ไม่เกิดการเบรกดาวน์ | 76 |
| 4.4.2 ลักษณะรูปคลื่นที่เกิดการเบรกดาวน์ | 77 |
| บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ | 79 |
| 5.1 สรุป..... | 79 |
| 5.1.1 การศึกษาการเกิดเบรกดาวน์ในช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแห้ง-แห้ง เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ..... | 79 |
| 5.1.2 การศึกษาการเกิดเบรกดาวน์ของอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ..... | 80 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 84 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 85 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| ภาคผนวก | 86 |
| ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนวิฤต ($U_{b50\%}$) ของแรงดันทับซ้อน | 87 |
| ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ | 96 |
| ประวัติผู้เขียน | 107 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 การเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะมาตรฐานของแรงดันอิมพัลส์ เทียบกับแรงดันทับซ้อน | 5 |
| 2.1 ค่าคงตัว A และ B ของแก๊สต่างๆ..... | 9 |
| 2.2 ตารางค่า p_d และ U_{bmin} ของแก๊สชนิดต่าง | 21 |
| 2.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวนของอากาศ | 22 |
| 2.4 พลังงานเกาะของอิเล็กตรอนบนอะตอมต่างๆ..... | 29 |
| 3.1 ข้อมูลต่างๆ ของชุดกรองความถี่ | 49 |
| 3.2 ค่าเวลาที่ใช้ในการตั้งโปรแกรมให้กับชุดควบคุมมุมเฟส | 52 |
| 4.1 ค่าแรงดันเบรกดาวนทางสถิติของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs ที่สภาวะมาตรฐาน | 56 |
| 4.2 ค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบการเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ..... | 57 |
| 4.3 การเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่มุมต่างทางด้านครึ่งลบของแรงดันกระแสสลับ | 58 |
| 4.4 การเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่มุมต่างทางด้านครึ่งบวกของแรงดันกระแสสลับ | 59 |
| 4.5 ค่าแรงดันกระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบ..... | 65 |
| 4.6 ค่าแรงดันเบรกดาวนทางสถิติของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs ที่สภาวะมาตรฐาน..... | 66 |
| 4.7 ค่าแรงดันเบรกดาวนทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนที่มุม 0° | 68 |
| 4.8 ค่าแรงดันเบรกดาวนทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนที่มุม 45° | 69 |
| 4.9 ค่าแรงดันเบรกดาวนทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนที่มุม 90° | 70 |
| 4.10 ค่าแรงดันเบรกดาวนทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนที่มุม 135° | 71 |
| 4.11 ค่าแรงดันเบรกดาวนทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนที่มุม 180° | 72 |
| 4.12 ค่าแรงดันเบรกดาวนทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนที่มุม 225° | 73 |
| 4.13 ค่าแรงดันเบรกดาวนทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนที่มุม 270° | 74 |
| 4.14 ค่าแรงดันเบรกดาวนทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนที่มุม 315° | 75 |
| 5.1 การเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะมาตรฐานของแรงดันอิมพัลส์ เทียบกับแรงดันทับซ้อน..... | 83 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 เบรกดาวน : แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า U_0 ทั้ช้อนบนแรงดันกระแสดตรง U_d | 3 |
| 1.2 แรงดันเบรกดาวน U_d (แรงดันกระแสดตรงทั้ช้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์สวิตซิ่ง 60/525 μ s ซ้บวกทั้สองชนิด) ของตัวนำแห่ง-ระนาบที่ระยะห่างต่างๆ..... | 4 |
| 2.1 ความสัมพันธ์ของ $\alpha/P_0 = f(E/p)$ ของ H_2 และ N_2 | 10 |
| 2.2 อะวาลานซ์ของอิล็กตรอน..... | 11 |
| 2.3 กำแพงศักย์ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก..... | 12 |
| 2.4 การทดสอบของทาวเซนต์..... | 13 |
| 2.5 กระบวนการ α -process..... | 15 |
| 2.6 กระบวนการ γ - process..... | 17 |
| 2.7 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ α ความเครียดสนามไฟฟ้า และความดัน..... | 19 |
| 2.8 ลักษณะเส้นโค้งของพาสเชน (Paschen's curve)..... | 19 |
| 2.9 เส้นโค้งพาสเชน (Paschen's curve) ของแก๊สชนิดต่างๆ..... | 21 |
| 2.10 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอของอากาศ..... | 23 |
| 2.11 ผลของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอะวาลานซ์ต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อน..... | 24 |
| 2.12 กลไกเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์..... | 25 |
| 2.13 ระยะวิกฤตของอะวาลานซ์อิล็กตรอน..... | 27 |
| 2.14 ผลลัพธ์ของ $\alpha - \eta$ ของ SF_6 เทียบกับอากาศ..... | 30 |
| 2.15 ระยะอะวาลานซ์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ..... | 33 |
| 2.16 แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดและแรงดันเบรกดาวนกระแสดตรงของอากาศ..... | 36 |
| 2.17 ผลของประจุค้างซ้บวกที่อิล็กโทรดปลายแหลม..... | 37 |
| 2.18 ผลของประจุค้างซ้บลบที่อิล็กโทรดปลายแหลม..... | 38 |
| 2.19 แรงดันเบรกดาวนชนิดต่างๆ ของอิล็กโทรดแห่งกับระนาบในอากาศที่สภาวะมาตรฐาน..... | 38 |
| 2.20 ลักษณะกราฟแรงดัน-เวลา..... | 39 |
| 2.21 กราฟแรงดัน-เวลาของแกปทรงกลมกับแกปแห่งปลายแหลม..... | 40 |
| 2.22 ขอบเขตการป้องกันในกราฟแรงดัน-เวลา..... | 41 |
| 2.23 ตัวอย่างการหาระยะห่างของอาร์กซิ่งฮอร์นป้องกันหม้อแปลง..... | 42 |
| 3.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทั้ช้อนบนแรงดันกระแสดสลับ..... | 43 |
| 3.2 วงจรทั้ใช้ในการจำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์ทั้ช้อนบนแรงดันกระแสดสลับ..... | 44 |
| 3.3 ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมแรงดันอิมพัลส์เกิดที่มุม 90° ของแรงดันกระแสดสลับ... .. | 44 |
| 3.4 ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมแรงดันอิมพัลส์เกิดที่มุม 180° ของแรงดันกระแสดสลับ..... | 45 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.5 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ | 45 |
| 3.6 ชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ | 46 |
| 3.7 ชุดกรองผ่านความถี่ต่ำและชุดกรองผ่านความถี่สูง..... | 47 |
| 3.8 การจำลองวงจรกรองความถี่สูงผ่านด้วยโปรแกรม Orcad | 47 |
| 3.9 ผลจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน..... | 48 |
| 3.10 การจำลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านด้วยโปรแกรม Orcad | 48 |
| 3.11 ผลจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน | 48 |
| 3.12 ชุดกรองความถี่ที่ใช้ในวงจร..... | 49 |
| 3.13 ชุดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมการกำเนิดแรงดันสูง | 50 |
| 3.14 ชุดตรวจจับผ่านศูนย์..... | 51 |
| 3.15 รูปคลื่นที่ชุดตรวจจับผ่านศูนย์สร้างออกมา | 51 |
| 3.16 โพลีซาร์ทของชุดควบคุม | 53 |
| 4.1 วงจรการทดสอบหาแรงดันเบรกดาว์นกระแสสลับ | 55 |
| 4.2 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาแรงดันเบรกดาว์นกระแสสลับจริง..... | 55 |
| 4.3 วงจรการทดสอบหาแรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า..... | 56 |
| 4.4 วงจรที่ใช้ทดสอบหาแรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของแรงดันอิมพัลส์จริง | 56 |
| 4.5 วงจรการทดสอบการเบรกดาว์นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ..... | 57 |
| 4.6 วงจรที่ใช้ทดสอบจริง | 58 |
| 4.7 เพอร์เซ็นต์การเบรกดาว์นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพล ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz..... | 59 |
| 4.8 เพอร์เซ็นต์การเบรกดาว์นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz..... | 60 |
| 4.9 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 0° b) มุม 45°..... | 60 |
| 4.10 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 90° b) มุม 135° | 61 |
| 4.11 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 180° b) มุม 225° | 61 |
| 4.12 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 270° b) มุม 315° | 61 |
| 4.13 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 45° b) มุม 90°..... | 62 |
| 4.14 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 135° b) มุม 215° | 62 |
| 4.15 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 270° b) มุม 315° | 62 |
| 4.16 มาตรฐาน DIN 42531..... | 63 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.17 รายละเอียดของมาตรฐาน DIN 42531..... | 64 |
| 4.18 อาร์กชิงฮอร์นที่ใช้ทดสอบจริง..... | 65 |
| 4.19 วงจรการทดสอบหาแรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า..... | 65 |
| 4.20 วงจรการทดสอบหาแรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าจริง | 66 |
| 4.21 วงจรการทดสอบการเกิดเบรกดาว์นของอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ | 66 |
| 4.22 วงจรที่ใช้ทดสอบจริง | 67 |
| 4.23 แรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของแรงดันทับซ้อนที่มุม 0°..... | 68 |
| 4.24 แรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของแรงดันทับซ้อนที่มุม 45°..... | 69 |
| 4.25 แรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของแรงดันทับซ้อนที่มุม 90°..... | 70 |
| 4.26 แรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของแรงดันทับซ้อนที่มุม 135°..... | 71 |
| 4.27 แรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของแรงดันทับซ้อนที่มุม 180°..... | 72 |
| 4.28 แรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของแรงดันทับซ้อนที่มุม 225°..... | 73 |
| 4.29 แรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของแรงดันทับซ้อนที่มุม 270°..... | 74 |
| 4.30 แรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของแรงดันทับซ้อนที่มุม 315°..... | 75 |
| 4.31 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 0° b) มุม 45°..... | 76 |
| 4.32 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 90° b) มุม 135°..... | 76 |
| 4.33 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 180° b) มุม 225°..... | 76 |
| 4.34 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 270° b) มุม 315°..... | 77 |
| 4.35 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 0° b) มุม 45°..... | 77 |
| 4.36 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 90° b) มุม 135°..... | 77 |
| 4.37 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 180° b) มุม 225°..... | 78 |
| 4.38 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) มุม 270° b) มุม 315°..... | 78 |
| 5.1 มุมทับซ้อนที่ส่งผลกระทบมากที่สุด..... | 80 |
| 5.2 มุมทับซ้อนที่ส่งผลกระทบน้อยที่สุด | 81 |
| 5.3 เปรียบเทียบมุมทับซ้อนที่ชั่วแรงดันเดียวกัน..... | 82 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย (Distribution transformer) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระดับแรงดันสูงปานกลาง (Medium voltage) ไปเป็นระดับแรงดันต่ำ (Low voltage) โดยทั่วไปหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกติดตั้งอยู่ภายในที่โล่งแจ้ง ซึ่งลักษณะการติดตั้งจะถูกติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงว่าหม้อแปลงที่ติดตั้งใช้งานไปซักระยะหนึ่งแล้ว อาจเกิดความเสียหายหรือความบกพร่องของการฉนวนขดลวดหม้อแปลงอันเนื่องมาจากแรงดันเกินประเภทต่างๆ เช่น แรงดันเกินเนื่องจากการสับสวิตช์ แรงดันเกินฟ้าผ่า ความล้มเหลวของการฉนวนหม้อแปลงนำไปสู่ความเสียหายที่ตามมาของระบบไฟฟ้าอย่างประมาณค่ามิได้ [1] ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้นได้กับหม้อแปลง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้องกันหม้อแปลงเมื่อเกิดแรงดันเกินขึ้นที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพนั้นก็คืออาร์กชิงฮอร์น (ช่องว่างอากาศของอิเล็กโทรดแบบแท่ง-แท่ง) โดยปกติอาร์กชิงฮอร์นจะติดตั้งอยู่ที่ปลอกฉนวนนำสายไฟของหม้อแปลง มีลักษณะเป็นตัวนำแบบแท่ง-แท่งระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน DIN 42531 [2]

โดยปกติอาร์กชิงฮอร์นจะรับแรงดันกระแสสลับอยู่โดยตลอดเวลาการใช้งาน แต่เมื่อมีแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าเข้ามาจะทำให้เกิดลักษณะที่แรงดันฟ้าผ่าไปทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาคูณสมบัติการเกิดเบรกดาว์นระหว่างช่องว่างอากาศของอิเล็กโทรดแบบแท่ง-แท่งด้วยแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ลักษณะการทับซ้อนกำหนดที่มุม 0° - 360° ของแรงดันกระแสสลับ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งหวังเพื่อที่จะทำการศึกษาผลกระทบของการเกิดเบรกดาว์นของแกปที่อาร์กชิงฮอร์น ที่มีการติดตั้งอยู่ที่หม้อแปลงส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดการเบรกดาว์นด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มีลักษณะแรงดันที่เหมือนกันกับแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติในระบบไฟฟ้ากำลังดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาคูณลักษณะการเกิดเบรกดาว์นด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับคุณลักษณะการเกิดเบรกดาว์นด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบปกติ ซึ่งเชื่อว่าในอนาคตอาจมีการนำลักษณะแรงดันทับซ้อนดังกล่าวนี้มาสร้างเป็นมาตรฐานขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งสมมุติฐานของการศึกษาโดยอ้างอิงผลจากปรากฏการณ์แรงดันเกินที่เกิดขึ้นจริงกับช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่งที่ได้รับการจ่ายแรงดันกระแสสลับตลอดเวลา เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุมต่างๆ ว่าอาจมีผลกระทบทำให้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน เช่น กับดักแรงดันเกิน (Surge arrester) หรือ อาร์กชิงฮอร์น (Arcing horn) ทำงานผิดพลาดทำให้แรงดันทับซ้อนผ่านอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวเข้าไปสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ที่ป้องกันอยู่นั้นก็คือหม้อแปลงไฟฟ้า ผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการออกแบบการประสานสัมพันธ์ฉนวนให้มีความเหมาะสมกับลักษณะแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

เนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ภายใต้แรงดันทับซ้อนนั้นยังไม่สามารถที่จะใช้ทฤษฎีมาอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด ซึ่งผลงานทางวิชาการที่ผ่านมาได้มีการอธิบายถึงผลกระทบเมื่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ในช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการป้อนด้วยสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรงและแรงดันกระแสสลับก่อน (Pre-stressed voltage) และผลกระทบของโคโรน่าเนื่องมาจากการป้อนด้วยสนามไฟฟ้าก่อนต่อแรงดันเบรกดาวน์ สามารถสรุปได้ดังนี้

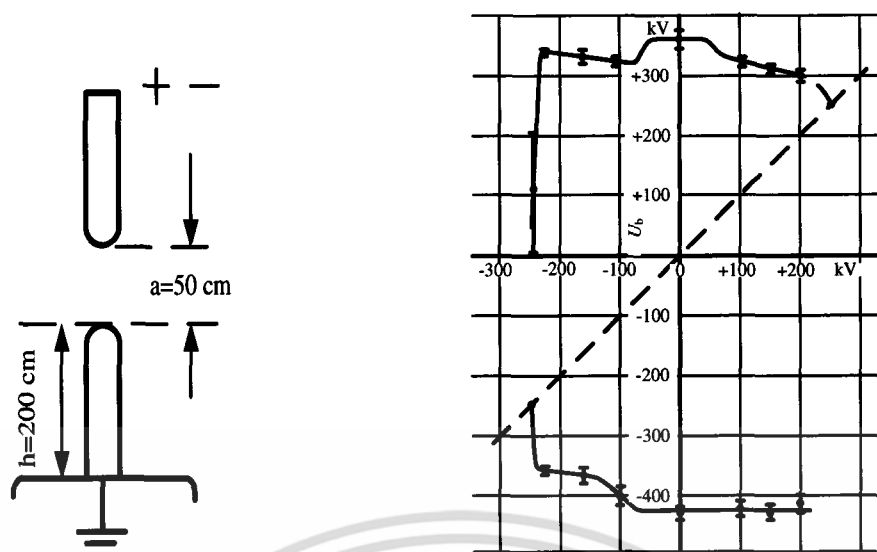
จากผลการทดลองที่จะกล่าวมาต่อไปทั้งหมดจะเห็นได้ว่ามีความขัดแย้งกัน โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองและคาดว่าจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ของช่องว่างอากาศได้แก่

- 1) ระยะห่างของช่องว่างอากาศ ได้แก่ ระยะแคบ และระยะกว้าง
- 2) ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ แท่ง-แท่ง แท่ง-ระนาบ และระนาบ-แท่ง
- 3) ชนิดแรงดันป้อนก่อน ได้แก่ แรงดันกระแสตรง และแรงดันกระแสสลับ
- 4) สภาพการเกิดหรือไม่โคโรน่าที่อิเล็กทรอนิกส์
- 5) รูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ ได้แก่ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

เนื่องจากกรณีของช่องว่างอากาศขนาดกว้างของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่ง (Rod-rod) ที่ไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้าก่อน การขยายตัวของหัวนำร่อง (Leader) มีผลอย่างมากต่อแรงดันเบรกดาวน์ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์

จากบทความของ Feser [3] ได้มีการทดสอบเกี่ยวกับการหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่งที่มีระยะห่าง 0.5 m โดยใช้แรงดันกระแสตรงชั่วคราวหรือชั่วคราวก่อนการป้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งมีผลทำให้แรงดันเบรกดาวน์ภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลดลงเล็กน้อย เมื่อแรงดันป้อนก่อนไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดโคโรน่า ตามรูปที่ 1.1 และค่าแรงดันเบรกดาวน์จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อแรงดันป้อนก่อนทำให้เกิดโคโรน่าที่ปลายแท่งอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

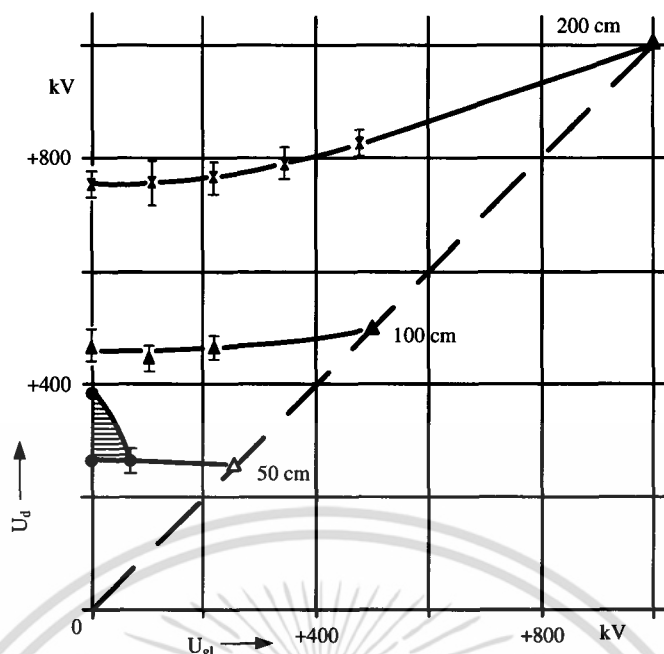


รูปที่ 1.1 แรงดันเบรกดาวน: แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า U_b ที่ซ่อนบนแรงดันกระแสตรง U_0 [3]

ผลที่ได้ข้างต้นจะขัดแย้งกับกลุ่มของ Hepworth et al [3] การทดสอบในช่องว่างอากาศของอิเล็กโทรดแบบแท่ง-ระนาบที่มีระยะห่าง 1.75 m ซึ่งทำให้เกิดโคโรนาด้วยการป้อนแรงดันป้อนก่อนด้วยสนามไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดเดียวเท่านั้น ในที่นี้เป็นการป้อนด้วยสนามไฟฟ้าก่อนด้วยแรงดันกระแสสลับ โดยที่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะได้รับการจุดชนวนที่มุมศูนย์หรือที่ค้ำยอดของช่วงบวกหรือช่วงลบของแรงดันกระแสสลับ ซึ่งจากการทดสอบไม่พบผลกระทบที่สำคัญในสภาวะดังกล่าว แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าแรงดันที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้มีขนาดเพียง 282 kV peak ค่อนข้างที่จะมีขนาดที่เล็กเมื่อเทียบกับช่องว่างอากาศของอิเล็กโทรดแต่ก็เพียงพอที่จะทำให้เกิดโคโรนาที่ปลายแท่งตัวนำซึ่งมีขนาดรัศมี 12.5 mm

ในการทดสอบของ Thessaloniki [4] ที่ใช้ช่องว่างอากาศของอิเล็กโทรดแบบแผ่นระนาบ-แท่ง แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าถูกจ่ายเข้าไปที่อิเล็กโทรดแผ่นระนาบและแรงดันกระแสตรงจ่ายที่อิเล็กโทรดแท่งตัวนำก่อนให้มีแรงดันพอที่จะเกิดโคโรนากระแสตรงขึ้นที่ปลายแท่งตัวนำ ซึ่งได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับ Hepworth et. al ซึ่งขัดแย้งกับการทดสอบของ Rasquin [5] ที่พบว่าแรงดันที่ป้อนก่อนมีผลอย่างมากต่อแรงดันเบรกดาวนในกรณีของช่องว่างอากาศขนาดแคบกว่าที่ทำการทดลองข้างต้น

นอกจากนั้น K. Feser [3] ได้เสนอผลการทดสอบเพิ่มเติมซึ่งส่วนหนึ่งก็เห็นด้วยกับผลการทดสอบข้างต้น แต่จะแสดงให้เห็นถึงความไม่ชัดเจนที่เพิ่มขึ้น โดยทำการทดลองป้อนแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งมีการป้อนแรงดันก่อนเป็นแรงดันกระแสตรงบนช่องว่างอากาศแบบแท่ง-ระนาบ และได้ผลการทดลองตามรูปที่ 1.2 คือ ช่องว่างอากาศมีความคงทนต่อแรงดันสูงขึ้น



รูปที่ 1.2 แรงดันเบรกดาวน U_d (แรงดันกระแสตรงทับซ้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์สวิตซิ่ง 60/525 μ s ขั้วบวกทั้งสองชนิด) ของตัวนำแท่ง-ระนาบที่ระยะห่างต่างๆ [3]

ยิ่งไปกว่านั้น Klewe et. al. [1] ได้ทำการทดลองหาแรงดันเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์สวิตซิ่ง โดยอิเล็กทรอนิกส์เป็นแบบ แท่ง-ระนาบ และ ทรงกลม-ระนาบ ซึ่งมีการป้อนแรงดันก่อนเป็นแรงดันกระแสสลับและไม่เกิดโคโรนาที่อิเล็กทรอนิกส์ ผลการทดลองพบว่าแรงดันป้อนก่อนไม่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลองของ Feser

จากผลการทดสอบข้างต้นซึ่งเป็นลักษณะการทดสอบในช่องว่างอากาศที่มีขนาดกว้างและแคบ ดังนั้นจึงมีการนำเสนอการเบรกดาวนในช่องว่างอากาศขนาดแคบมาก (ไมโครเมตร) ที่ใช้ช่องว่างอากาศทรงกลมในการทดสอบ ผลการทดสอบสรุปได้คือค่าแรงดันเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์เทียบกับแรงดันทับซ้อนทั้งขั้วบวกมุม 0° , 90° และขั้วลบมุม 0° , 270° ที่ระยะแกปต่างๆ ทำให้ทราบว่าแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90° และแรงดันอิมพัลส์ ขั้วลบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270° นั้นมีการเบรกดาวนง่ายกว่าแรงดันอิมพัลส์ปกติ กล่าวคือใช้ระดับแรงดันน้อยกว่าเมื่อขึ้นไปทับซ้อนตามมุมดังกล่าว ก็สามารถทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างขั้วของแรงดันจะพบว่าแรงดันเบรกดาวนขั้วลบมีค่าต่ำกว่าขั้วบวก จากการทดสอบพบว่าในกรณีระยะห่างระหว่างแกปมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับรัศมีของอิเล็กทรอนิกส์ ขั้วของแรงดันมีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวนเล็กน้อย ค่าแรงดันเบรกดาวนจึงต่างกันไม่มาก อย่างไรก็ตามเมื่อมีแรงดันกระแสสลับเข้ามาเกี่ยวข้องย่อมมีผลของแรงดันป้อนก่อนของแรงดันกระแสสลับ [6]

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะมาตรฐานของแรงดันอิมพัลส์เทียบกับแรงดันทับซ้อน [6]

| ระยะ gap (μm) | ขั้วบวก (+) | | | ขั้วลบ (-) | | |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------|---------|------------------------|--------------------------|---------|
| | Impulses | Superimposed Impulses | | Impulses | Superimposed Impulses | |
| | | 0 ° | 90 ° | | 0 ° | 270 ° |
| 10 | 472 V | 613 V | 212 V | 459 V | 581 V | 205 V |
| | % เทียบกับ Impulses | +29.87% | -55.08% | % เทียบกับ Impulses | +26.58% | -55.34% |
| 20 | 644 V | 837 V | 409 V | 637 V | 833 V | 407 V |
| | % เทียบกับ Impulses | +29.97% | -36.49% | % เทียบกับ Impulses | +30.77% | -36.11% |
| 30 | 801 V | 1071 V | 641 V | 800 V | 1064 V | 634 V |
| | % เทียบกับ Impulses | +33.71% | -19.98% | % เทียบกับ Impulses | +33.00% | -20.75% |

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวนของช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz เปรียบเทียบกับคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวนของช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่งที่ได้รับแรงดันอิมพัลส์แบบปกติเพื่อนำมาวิเคราะห์และสรุปผลกระทบที่มีต่อช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่ง เพื่อประโยชน์ในการพิจารณาเรื่องของการฉนวนและการประสานสัมพันธ์ฉนวน รวมไปถึงพัฒนาระบบป้องกันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีการเกิดเบรกดาวนในฉนวนแก๊สของแรงดันอิมพัลส์และแรงดันกระแสสลับ
2. ศึกษาคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวนในช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่งด้วยแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุมต่างๆ
3. ศึกษาคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวนของอาร์กชิงฮอร์น (Arcing horn) ที่ใช้ในระบบ 12 kV ด้วยแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วิเคราะห์ผลการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับเทียบกับแรงดันอิมพัลส์อย่างเดียว
5. สรุปผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แก๊สเป็นฉนวนชนิดหนึ่งที่พบมากที่สุดในการฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูง การเบรกดาวนในแก๊สมีความสำคัญมากในการออกแบบระบบสายส่ง อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง ใช้เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และระบายความร้อน ฉนวนที่มีราคาถูกและถูกใช้มากที่สุดก็คืออากาศ ซึ่งใช้เป็นฉนวนของสายส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง เป็นฉนวนภายในที่อัดความดันได้ในภาชนะปิดหุ้มเพื่อให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ [11]

อย่างไรก็ตามสภาพการเป็นฉนวนของแก๊สก็สามารถเสียสภาพได้เช่นกัน เมื่อมีการดิสชาร์จในแก๊สเกิดขึ้น คำว่าดิสชาร์จในแก๊สเป็นการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านแก๊ส โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า คือ อิเล็กตรอนและไอออน ที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการไอออไนเซชันด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้จะต้องมีสนามไฟฟ้า เป็นปัจจัยหลักที่จะทำให้อนุภาคมีพลังงานและเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กโทรดได้ [8]

2.1 ไอออไนเซชันและการปล่อยอิเล็กตรอน

อะตอมหรือโมเลกุลของแก๊ส เมื่อได้รับพลังงาน จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปหนึ่งตัวทำให้อะตอมหรือโมเลกุลนั้นมีประจุเป็นบวก ลักษณะนี้เรียกว่า ไอออไนเซชัน (Ionization) หรือการแตกตัวของอิเล็กตรอนจากโมเลกุล ส่วนกระบวนการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากของแข็ง เรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอน (Electron emission) ในที่นี้อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอิลเลกโทรด ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญที่ทำให้แก๊สมีสภาพนำไฟฟ้าได้เมื่อมีอนุภาคอิสระจำนวนมากพอ โดยกระบวนการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอน และไอออนในแก๊สนั้นแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ [8] คือ กระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของแก๊สที่เกิดจากการชนของอนุภาคกับโมเลกุล (อิเล็กตรอน, ไอออน และโฟตอนชนกับโมเลกุล) และกระบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวอิเล็กโทรด เมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูง หรือ ได้รับพลังงานความร้อน รั้งสี หรือไอออนวิ่งมากระทบที่ผิวอิเล็กโทรด

2.1.1 ไอออไนเซชันโดยการชน (Collision ionization)

การไอออไนเซชันแบบนี้จะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานของ อิเล็กตรอน หาก อิเล็กตรอน มีความเร็วน้อยเกินไป การชนอาจไม่เกิดไอออไนเซชัน การเกิดไอออไนเซชันโดยการชนของ อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานกลเท่ากันหรือมากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นกลางตั้งสมการ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.1)$$

เมื่อ m คือ มวลของอิเล็กตรอน

v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

W_i คือ Stepped ionization energy

จากสมการที่ 2.1 เมื่อพลังงานกลมีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชันในแต่ละชั้นของวงโคจร (Shell electron) ในชั้นต่างๆ จะถูกขับออกมาทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระดังสมการ



เมื่อ A คือ อะตอมที่เป็นกลาง

e^- คือ อิเล็กตรอน

A^+ คือ อะตอมที่ถูกกระตุ้น

KE คือ พลังงานจลน์ (Kinetic energy)

การชนแบบนี้มีข้อสังเกตคือ

- ถ้าอิเล็กตรอนมีความเร็วพอประมาณ แต่พลังงานของมันมีน้อยกว่าพลังงานที่ทำให้เกิดไอออไนเซชันเมื่อวิ่งไปชนอะตอม ทำให้อะตอมมีพลังงานสะสมสูงขึ้นอาจจะทำให้เกิดไอออไนเซชันได้ ถ้าอะตอมถูกชนด้วยอิเล็กตรอนอื่นอีก
- ขบวนการไอออไนเซชันนี้เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนอะตอมทำให้อิเล็กตรอนตัวใหม่หลุดออกไป และยังวิ่งไปชนอะตอมอื่นอีกจำนวนไอออนที่เกิดจากอิเล็กตรอนหลุดไปจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential)
- ก๊าซแต่ละชนิดจะมีช่วงพลังงานของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดการไอออไนเซชันที่ต่างกัน

2.1.1.1 สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันในแก๊ส

ขณะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไประหว่างอิเล็กโทรด อาจชนกันและทำให้เกิดไอออไนเซชันได้หลายครั้งก่อนที่จะถึงอิเล็กโทรด ทาวน์เซนต์ (Townsend) ได้ชี้ให้เห็นว่าจำนวนการชนที่เกิดไอออไนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไปนั้น กำหนดด้วยแฟกเตอร์ที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชันของทาวน์เซนต์แบ่งได้ดังนี้

α : คือ สัมประสิทธิ์การชนไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาวน์เซนต์ คือ ความน่าจะเป็นของอิเล็กตรอน 1 ตัว ในการชนกับโมเลกุลของแก๊สแล้วเกิดไอออไนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง มีหน่วยเป็น cm^{-1}

β : คือ ความน่าจะเป็นของไอออนบวก 1 ตัว ในการชนกับโมเลกุลของแก๊สแล้วเกิดไอออนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง มีหน่วยเป็น cm^{-1}

แต่ไอออนบวกมีมวลมาก ดังนั้นการได้รับพลังงานจลน์จากสนามไฟฟ้าจึงน้อย และการถ่ายทอดพลังงานเมื่อชนก็น้อยด้วย คือ $\beta \ll \alpha$ ดังนั้นการชนแตกตัวในแก๊สจึงมักเป็นกระบวนการ α ค่าสัมประสิทธิ์การชนไอออนเซชันนั้น ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า และความหนาแน่นของแก๊ส ซึ่งมีความสัมพันธ์ [11]

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (2.3)$$

ความสัมพันธ์สมการ 2.3 สำหรับแก๊สต่างๆ มีลักษณะคล้ายๆกัน อาจเขียนได้ด้วยสมการ

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right) \quad (2.4)$$

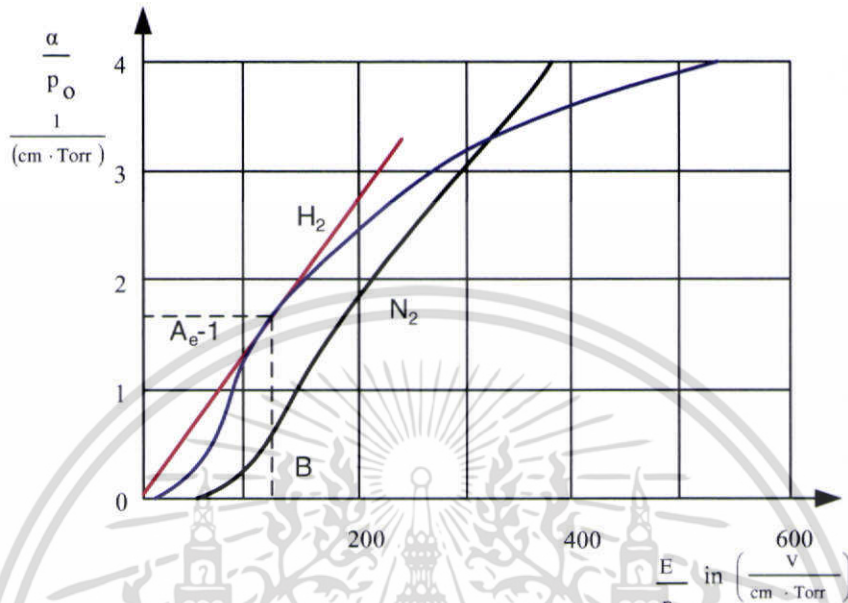
โดยที่ $B = A \cdot U_i$ และ $A = A(T)$

A และ B เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส ฟังก์ชันนี้ใช้ได้ในช่วงจำกัดของ E/p ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคงตัว A และ B ของแก๊สต่างๆ [11]

| แก๊ส | A (cm - Torr) ⁻¹ | B $\left(\frac{V}{\text{cm-torr}}\right)$ | ย่านที่ใช้ได้ $\frac{E}{p} \left(\frac{V}{\text{cm-torr}}\right)$ |
|------------------|-----------------------------|---|---|
| Air | 15 | 365 | 100 - 800 |
| N ₂ | 12 | 342 | 100 - 600 |
| H ₂ | 5.1 | 138.8 | 20 - 600 |
| He | 3 | 34 | 20 - 150 |
| Ne | 4 | 100 | 100 - 400 |
| A | 14 | 180 | 100 - 600 |
| Kr | 17 | 240 | 100 - 1000 |
| Xe | 26 | 350 | 200 - 800 |
| CO ₂ | 20 | 466 | 500 - 1000 |
| H ₂ O | 12.9 | 289 | 150 - 1000 |

ค่าของ $\alpha/p = f(E/p)$ เป็นแฟกเตอร์สำคัญที่กำหนดการเพิ่มแบบเอ็กโปเนนเชียลของอนุภาค ประจุ และนำไปสู่การเบรกดาวนในแก๊สตัวอย่างความสัมพันธ์ของ $\alpha/p = f(E/p)$ ของ N_2 และ H_2 ดังกราฟดังรูปที่ 2.1 [8]



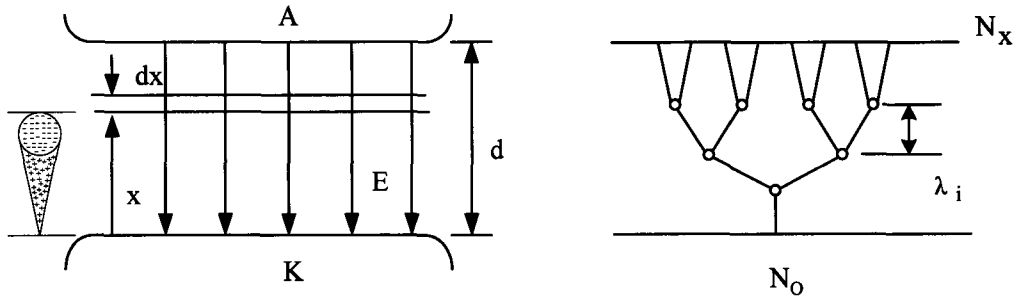
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของ $\alpha/P_0 = f(E/p)$ ของ H_2 และ N_2
 P_0 เป็นความดันที่ $^{\circ}C$, $P_0 = p \cdot T_0/T$ และ $T_0 = 273 K$

ข้อสังเกตจากเส้นกราฟในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b มีค่าต่ำสุด เกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่อิเล็กโทรดวางห่างกันมากๆ ทั้งนี้เนื่องจากมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำๆ และเส้นทางเดินของอิเล็กตรอนมีระยะไกล จึงมีโอกาสที่โมเลกุลของแก๊สจับอิเล็กตรอนไว้ได้กลายเป็นไอออนลบเคลื่อนที่ได้ช้า ไอออนโนเซชันเกิดได้ยาก เป็นการหน่วงการเกิดเบรกดาวน ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเห็นได้ชัดในแก๊สอนุภาคประจุลบ (Electronegative gas)

2.1.1.2 การเกิดอะวาลานซ์อิเล็กตรอน (Electron avalanche)

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ได้จากอิเล็กโทรดแผ่นระนาบวางขนานกันดังรูป 2.2 เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า E จะถูกเร่งให้วิ่งไปหาแอโนด พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ ถ้าสูงมากพอจะทำให้เกิดไอออนโนเซชัน เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลของแก๊ส นั่นคือทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลเป็นกลาง ที่เหลือก็เป็นไอออนบวก อิเล็กตรอนตัวใหม่ก็จะวิ่งไปชนโมเลกุล เกิดอิเล็กตรอนตัวใหม่เพิ่มขึ้นต่อไปจนกระทั่งเป็นอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน [8]

2.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ

กระบวนการเบื้องต้นหรือกระบวนการ α เป็นกระบวนการที่สำคัญในการสร้างจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มแบบเอ็กโปเนนเชียลแต่ตามลำพังกระบวนการเบื้องต้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ ต้องมีกระบวนการอื่นเสริมด้วย การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ ถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ช่วยเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนอิสระนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนได้

2.2.1 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวแคโทดโดยการชนของไอออนบวก

อิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากแคโทดได้จะต้องได้รับพลังงานอย่างน้อย $W_a = eU_a$ (Work function) ของโลหะที่ใช้ทำแคโทด

2.2.1.1 ไอออนบวกที่เกิดจากกระบวนการเบื้องต้น ไอออนบวกวิ่งเข้าหาแคโทด จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดกระจายออกมาจากผิวแคโทดได้ เมื่อ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_a = eU_a$$

2.2.1.2 โมเลกุลที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นในอะวาลานซ์ จะปล่อยพลังงานโฟตอนออกมา ในขณะที่อะตอมคืนเข้าสู่สถานะภาพพื้นฐาน (Ground state) โดยอิเล็กตรอนจะกลับเข้าสู่วงโคจรเติมพลังงานโฟตอนตกลงมาบนแคโทดทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา และอาจทำให้เกิดอะวาลานซ์ได้ ลักษณะนี้เรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอนด้วยพลังโฟตรอน (Photo emission)

2.2.1.3 โมเลกุลที่อยู่ในสถานะภาพเมตาเสถียร (Metastable) วิ่งไปกระทบแคโทดแล้วทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ เมื่อโมเลกุลวิ่งไปกระทบแคโทด

อิเล็กตรอนที่เกิดใหม่ตามวิธีทั้งสามนี้จัดเป็นผลสืบเนื่อง จึงเรียกระบวนการเหล่านี้ว่า กระบวนการขั้นที่สอง (secondary process) กระบวนการทั้งสามแบบนี้กำหนดด้วยสัมประสิทธิ์ γ ซึ่งนิยามได้ว่าเป็นจำนวนอิเล็กตรอนเฉลี่ยที่ได้จากกระบวนการขั้นที่สอง ที่เกิดขึ้นที่แคโทดต่อ

จำนวนอิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่เกิดขึ้นในแก๊ป จากกระบวนการชนเบื้องต้น (Primary collisional process) นั้นคือการไอออไนซ์ในแก๊ปหนึ่งครั้ง

$$\gamma = \gamma_i + \gamma_{ph} + \gamma_m$$

เมื่อ γ คือ สัมประสิทธิ์ไอออไนซ์ที่สองของทาว์นเซนต์
(Townsend ionization coefficient)

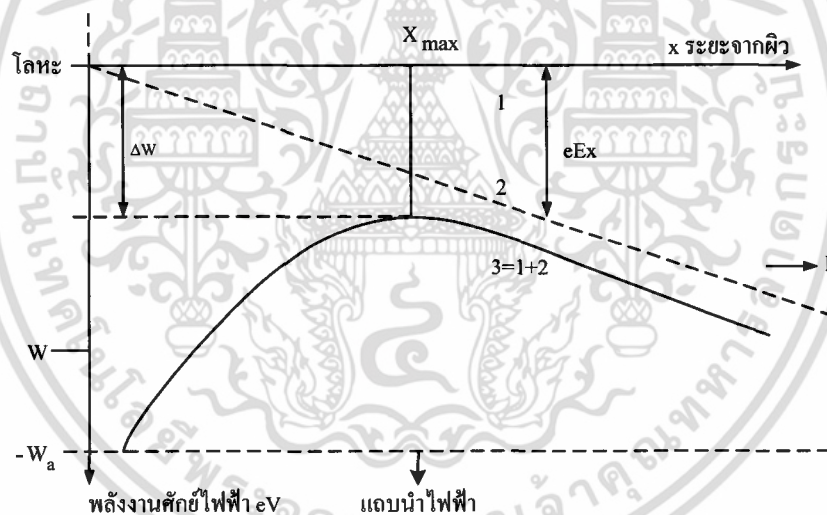
γ_i คือ ผลจากการชนของไอออนบวก

γ_{ph} คือ ผลจากโฟตรอน

γ_m คือ ผลจากเมตาเสถียร

2.2.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโอดโดยสนามไฟฟ้า

อิเล็กตรอนอาจปล่อยออกมาจากผิวโลหะได้ เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าที่มีพลังงานมากพอ นั่นคือสนามไฟฟ้าต้องมากกว่าค่าที่ต้องใช้สำหรับดึงอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาด้วยพลังงานความร้อน



รูปที่ 2.3 กำแพงศักย์ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก [9]

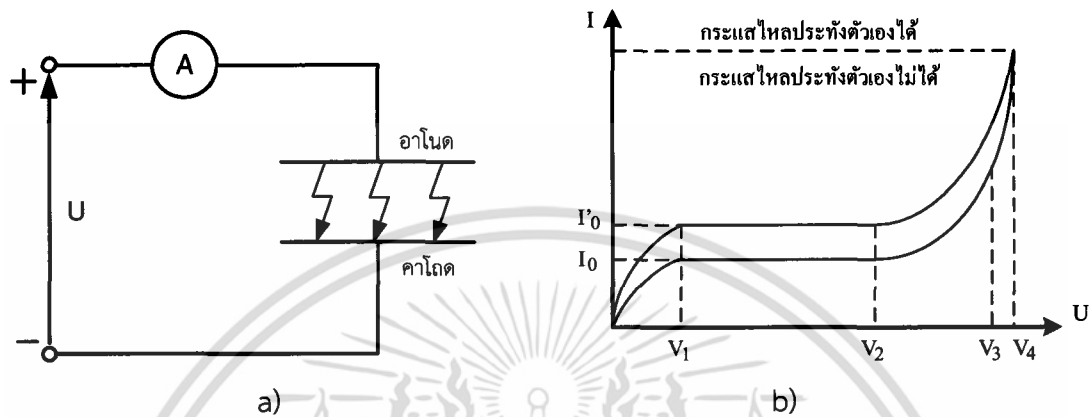
1. พลังงานเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก $W_e = -e^2/16\pi\epsilon_0 x$
2. พลังงานเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ป้อน $= e \cdot E \cdot x$
3. พลังงานทั้งหมด

2.3 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ (Breakdown mechanisms)

การเกิดเบรกดาวน์ในแก๊ส หมายถึง การเปลี่ยนสภาพการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า คือ เป็นช่วงต่อ (Transition) ระหว่างสถานะภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ (Nonself-sustained) ไปสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานภาพที่กระแสไหลประทั้งตัวเองได้ (Self-sustained) ช่วงต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เมื่อแก๊ปมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนในอะวาลานซ์มากพอจนทำให้แก๊ปมีสภาพนำไฟฟ้าสูง และโดยทฤษฎีกระแสจะไหลเป็นค่าอนันต์ คือ กระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรภายนอกเท่านั้น และแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์คงเดิมไม่ว่า N_0 หรือ I_0 จะต่างกันก็ตาม [8]



รูปที่ 2.4 การทดสอบของทาวเซนด์

a) อิเล็กตรอนแผ่นระนาบวางขนานกันในอากาศ b) ลักษณะกราฟกระแส-แรงดัน [9]

จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นทำให้กระแสไหลประทั้งตัวเองอยู่ได้นั้น เกิดจากกระบวนการต่างๆที่กล่าวข้างต้น ซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญได้แก่

1. อิเล็กตรอนขั้นที่สอง (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนปล่อยจากแคโทดโดยการวิ่งชนของไอออนบวก
2. ไอออนไนเซชันในแก๊สเนื่องจากพลังงานโฟตอน
3. ปล่อยอิเล็กตรอนออกจากแคโทดโดยโฟตรอนไฟฟ้า (Photoelectric emission)

ในรูปที่ 2.4 ที่แรงดันต่ำๆ ความเครียดสนามไฟฟ้า E มีค่าต่ำ จะพบว่ามีเพียงบางส่วนที่เกิดอิเล็กตรอนอิสระตามธรรมชาติ อิเล็กตรอนวิ่งเข้าหาอานอด และไอออนบวกวิ่งเข้าหาแคโทด การเคลื่อนที่ของอนุภาคเช่นนี้ จึงมีกระแสไหลตามกฎของโอห์ม $J = \sigma E$ [11] คือกระแสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้าในย่าน V_1

ในย่าน V_2 อนุภาคประจุอิสระที่มีอยู่ที่ผิวแคโทด หรือออกจากแคโทดวิ่งไปชนแอโนดหมด แม้จะเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น แต่กระแสจะไม่เพิ่มตาม เพราะอิเล็กตรอนถูกดึงออกไปหมดแล้ว

ที่ความดันบรรยากาศจะพบว่า ความหนาแน่นของกระแสเริ่มคงตัว มีค่าประมาณ 10^{-9} A/cm^2 ที่ความเครียดสนามไฟฟ้า 10 V/cm ถ้าเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นอีก กระแสจะไม่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งแรงดันเพิ่มขึ้น ให้ความเครียดสนามไฟฟ้าถึง 20 kV/cm กระแสจะเพิ่มขึ้นอีกอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เพราะอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจากการชนแตกตัว หรือไอออนไนเซชัน นั่นคือ อิเล็กตรอนวิ่งจนโมเลกุล

เป็นกลาง เกิดอิเล็กตรอนอิสระ และไอออนบวกเพิ่มขึ้นมากมายเป็นสภาพที่อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นได้เอง (Self-sustained) เกิดเป็นอะวาลานช์ (Avalanche) ในย่าน V_3

ทำการเพิ่มแรงดันขึ้นอีกจนถึง V_4 กระแสก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเกิดเบรกดาวน့် Townsend ได้อธิบายเหตุการณ์นี้ว่า อิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนเซชันของแก๊สที่เกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนจึงเป็นเหตุให้กระแสเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล ซึ่งช่วงนี้จะอยู่ในขบวนการของ α (α - Process) แต่หลังจากที่ทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้ามากกว่า V_3 กระแสจะเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบเอ็กโปเนนเชียลจนเกิดเบรกดาวน့်ที่ V_3 การเพิ่มขึ้นของกระแสในช่วงหลังนี้เกิดจากขบวนการ แกรมมา (γ - Process) ซึ่งขบวนการนี้เกิดขึ้นนอกเหนือจากการชนกันของอิเล็กตรอน

กระแสที่เพิ่มขึ้นหมายถึงจำนวนอนุภาคประจุ คือ อิเล็กตรอนและไอออนมีจำนวนมากขึ้น จนถึงค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดเบรกดาวน့် ซึ่งในปัจจุบันมีทฤษฎีที่ใช้อธิบายกระบวนการเพิ่มจำนวนอนุภาค ประจุถึงค่าวิกฤต หรือกลไกการเกิดเบรกดาวน့်มีอยู่สองทฤษฎี คือ

- ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน့်ของทาวน့်เซนด
- ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน့်แบบสตรีมเมอร์

2.3.1 กลไกการเกิดเบรกดาวน့်ของทาวน့်เซนด

ตามทฤษฎีกลไกเบรกดาวน့်ของทาวน့်เซนด (Townsend breakdown mechanism) เบรกดาวน့်ในแก๊สนั้นเกิดขึ้นจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับต่อเนื่องในแก๊สระหว่างอิเล็กโทรด และเชื่อว่ากระบวนการเพิ่มแบบเอ็กโปเนนเชียลของอิเล็กตรอนเกิดจากไอออไนเซชันกระบวนการขั้นต้นนี้ (Primary or α - process) และไอออไนเซชันกระบวนการขั้นสอง (Secondary process) ประกอบด้วยไอออไนเซชันโดยไอออนบวกชนโมเลกุลของแก๊ส (β - process) แต่กระบวนการนี้ไม่มีผลทำให้เกิดเบรกดาวน့် กระบวนการขั้นสองที่มีความสำคัญต่อกลไกเบรกดาวน့် คือ กระบวนการ γ (γ - process) อันเป็นกระบวนการที่เพิ่มแบบเอ็กโปเนนเชียลของอิเล็กตรอนปล่อยหลุดจากแคโทด

1) กระบวนการขั้นต้น (α - process)

จำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานช์ในแก๊สที่ระยะ x จากแคโทดตามสมการ

$$N_x = N_0 \cdot e^{\alpha x}$$

เมื่อ N_x คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาที

N_0 คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะ x จากแคโทด

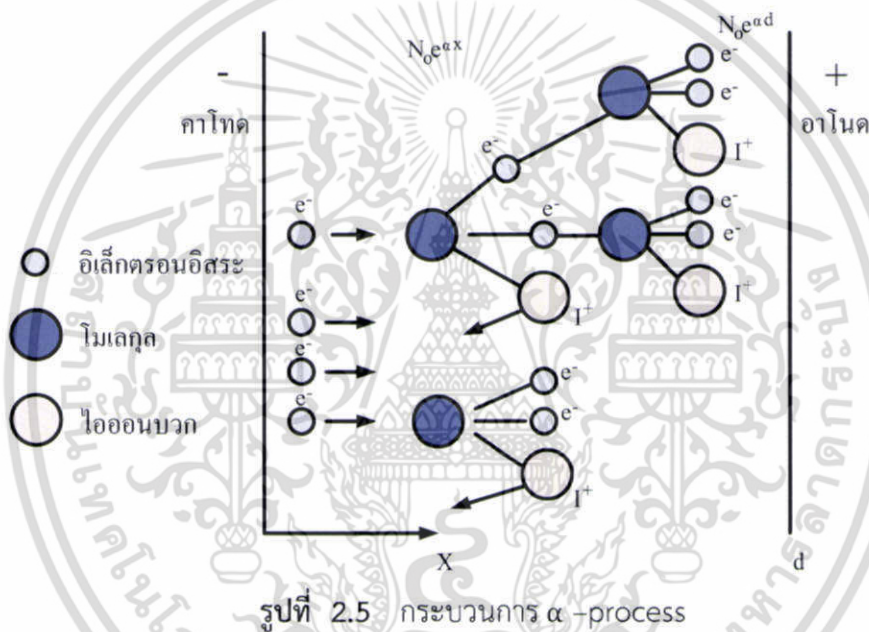
จำนวนอิเล็กตรอนวิ่งไปถึงแอโนด ($x=d$) ต่อวินาที

$$N_d = N_0 \cdot e^{\alpha d}$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่ $e^{\alpha x} - 1$ ซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นและวิ่งมาถึงแคโทด เขียนเป็นสมการจะได้

$$I = I_0 \cdot e^{\alpha d}$$

จะเห็นได้ว่าจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นเอกซ์โปเนนเชียล และจะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นออกจากแคโทดจำนวน N_0 ต่อวินาที ที่ได้จากการส่องรังสีเข้าไปที่แคโทด จึงเรียกว่าการดิสชาร์จที่ประทุตัวเองไม่ได้เพราะถ้าเอาต้นกำเนิดที่สร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้น N_0 ออกจากกระบวนการไอออนเซชันก็จะหยุด ดังนั้นลำพังกระบวนการนี้จึงยังไม่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้แต่ต้องมีกระบวนการชั้นสองมาเสริม [8]



2) กระบวนการชั้นสองแบบ β

กระบวนการ β เป็นกระบวนการชั้นสอง ที่อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นจากไอออนบวก มีพลังงานสูงวิ่งมาชนโมเลกุล ทำให้เกิดไอออนเซชันในแก๊ส แต่โดยเหตุที่กระบวนการ β มีโอกาสเกิดอิเล็กตรอนอิสระมากกระบวนการนี้จึงไม่มีความสำคัญทำให้เกิดเบรกดาวน์ในแก๊สได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแก๊สที่มีความดัน ด้วยเหตุผลดังนี้ [8]

1) ไอออนบวกไม่อาจทำให้เกิดไอออนเซชันในแก๊สได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ เพราะจะเกิดได้ต้องใช้พลังงานตามทฤษฎีถึงสองเท่า แต่โอกาสเช่นนั้นมีน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ถ้ากลไกการไอออนเซชันตามกระบวนการ β เป็นส่วนที่ทำให้เกิดเบรกดาวนั โลหะผิวของคาโอดจะไม่มีผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดเบรกดาวนั แต่ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวิร์กฟังก์ชันของโลหะที่ทำให้แคโทดมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรกดาวนั

3) กลไกการเบรกดาวนัตามกระบวนการ β ต้องใช้เวลาการเคลื่อนที่ของไอออนข้ามแก๊ปมากกว่าเวลาเกิดเบรกดาวนัที่วัดได้ ดังนั้นกระบวนการชั้นสองที่มีความสำคัญต่อการสร้างอิเล็กตรอนเพื่อทำให้เกิดเบรกดาวนัจึงเป็นแบบไอออนบวกวิ่งชนแคโทด (γ) ซึ่งจะเป็นกระบวนการที่สอดคล้องด้วยเหตุผลข้อ 1) และ 2) ข้างต้นที่กล่าวถึงกระบวนการ β แต่จะไม่สอดคล้องกับข้อ 3) ที่กระบวนการทำให้เกิดเบรกดาวนัได้ในเวลาอันสั้น

3) กระบวนการชั้นสองแบบ γ (γ - process)

กระบวนการ γ เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการเพิ่มแบบเอ็กโปเนนเชียลของอิเล็กตรอนอิสระ ที่เกิดจากไอออนบวกชนแคโทด [8]

ถ้าให้ N_0 คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาที

N'_0 คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการชั้นที่สองที่แคโทดคือ $x=0$ ต่อวินาที

N''_0 คือ จำนวนอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดออกจากแคโทดต่อวินาที

ดังนั้น $N''_0 = N_0 + N'_0$

แต่อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะชนไอออนเซชันเท่ากับ $e^{\alpha d} - 1$ ครั้งจำนวนครั้งของการชนไอออนเซชันในแก๊ปทั้งหมดจะเป็น

$$N'_0 = N''_0(e^{\alpha d} - 1)$$

จะมีอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากกระบวนการชั้นสองออกจากแคโทดเป็น

$$N'_0 = \gamma N''_0(e^{\alpha d} - 1)$$

โดยที่ γ เป็นสัมประสิทธิ์ไอออนเซชันที่สองของทาวนัเซนต์ ดังนั้น

$$N''_0 = N_0 + \gamma N''_0(e^{\alpha d} - 1)$$

$$N''_0 = \frac{N_0}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

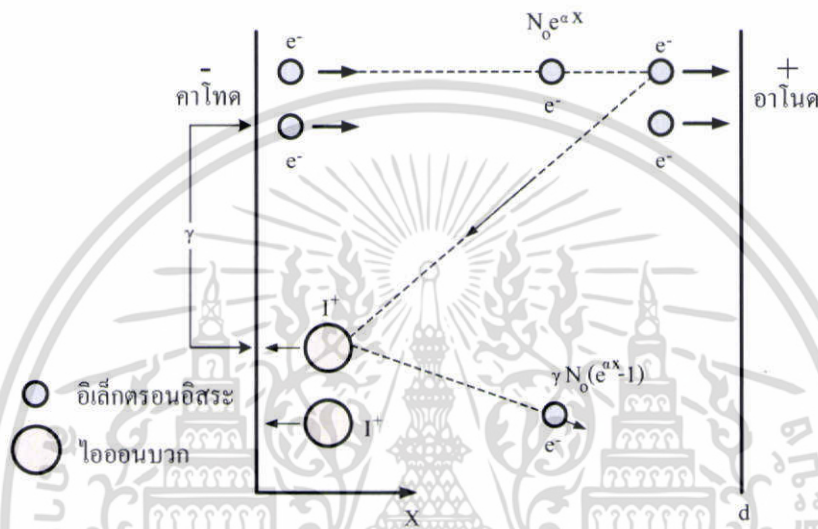
จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงแอโนดจึงเป็น

$$N_d = N''_0 \cdot e^{\alpha d}$$

$$N_d = \frac{N_0}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \tag{2.5}$$

ได้สมการกระแสเป็น

$$\frac{N_d}{N_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.6 กระบวนการ γ - process

2.3.2 เงื่อนไขเบรกดาวนซ์ของทาวน์เซนต์

เงื่อนไขที่จะเกิดเบรกดาวนซ์ในแก๊ส ก็เมื่อกระแสเพิ่มเป็นอนันต์ คือ ตัวส่วนในสมการ (2.6) มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \tag{2.7}$$

กระบวนการขั้นที่สองสร้างอิเล็กตรอนอิสระในแก๊สอาจจะมีกระบวนการอื่นๆ ที่เสริมการเกิดเบรกดาวนซ์ เช่น ไอออนไนเซชันเกิดจากพลังโฟตอนที่ปล่อยออกมาจากโมเลกุลในสภาพที่กระตุ้นกลับสู่สภาพปกติ หรือเกิดอิเล็กตรอนอิสระจากโมเลกุลในสถานะภาพเมตาเสถียรแพร่กระจายไปยังแคโทดและกระบวนการขั้นสองอื่นๆ ซึ่งมีเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนซ์ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นจึงอาจเขียนเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนซ์ในลักษณะทั่วไป เพื่อแทนกระบวนการขั้นสองทั้งหลายด้วยแฟกเตอร์หนึ่งคือ Γ เงื่อนไขทั่วไปจึงเขียนได้ว่า

$$\Gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.8)$$

เมื่อ $\Gamma = \frac{\beta}{\alpha} + \gamma_i + \gamma_{ph} + \gamma_m + \dots \dots$

2.3.3 กฎของพาสเชน(Paschen's Law)

กฎของพาสเชนเป็นผลสืบเนื่องของการเกิดเบรกดาวน์ของแก๊สในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ที่อธิบายโดยทฤษฎีทาวน์เซนต์ กฎของพาสเชนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอกับผลคูณของความดันแก๊ส p กับระยะแกป d ระหว่างอิเล็กโทรด กล่าวคือค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าคงที่ถ้าผลคูณของ p กับ d มีค่าคง บางตำราเรียกกฎนี้เป็นความสัมพันธ์ของพาสเชนทั้งนี้เพราะว่ากฎดังกล่าวไม่เป็นจริงทุกกรณีโดยเฉพาะปรากฏการณ์ที่ใช้กับความดันสูงๆ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้ยังมีผู้นิยมใช้เป็นกฎอยู่อีกมาก

2.3.3.1 ลักษณะเส้นกราฟของพาสเชน (Paschen's curve)

จากเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของแก๊สในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอของทาวน์เซนต์ได้ ตามสมการ (2.8) ว่า $\Gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$

$$\alpha d = \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) = K = \text{ค่าคงตัว} \quad (2.9)$$

การเปลี่ยนแปลงค่า Γ เล็กน้อยจะไม่มีผลของการเปลี่ยนแปลงของ $\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)$ สัมประสิทธิ์ไอออนไนเซชัน α มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า E (สม่ำเสมอ) ตามสมการ

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$$

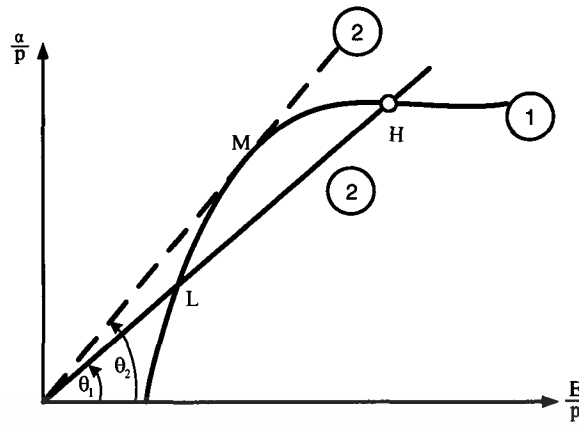
ฉะนั้นเอา $p \cdot d$ คูณตลอดจะได้

$$\alpha d = p \cdot d \cdot f\left(\frac{E}{p}\right)$$

$$\alpha d = p \cdot d \cdot f\left(\frac{U}{p \cdot d}\right) = K \quad (2.10)$$

ถ้า U_b เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ จะพบว่า U_b นี้ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของ $p \cdot d$ เท่านั้น

ถ้า U_i เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ จะพบว่า U_i นี้ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของ $p \cdot d$ เท่านั้น



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ α ความเครียดสนามไฟฟ้า และความดัน[8]

จากรูปจะได้

$$\tan \theta = \frac{\alpha/p}{E/p}$$

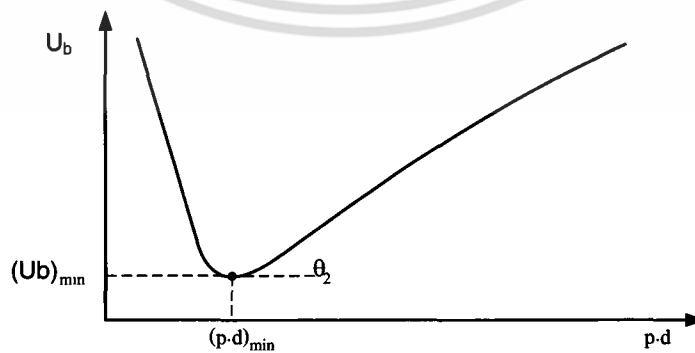
ในสมการไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$$U = E \cdot d$$

ฉะนั้น

$$\tan \theta = \frac{\alpha \cdot d}{U}$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ α/p และ E/p และที่เส้นตรงที่มีความชันเป็น $\tan \theta$ จะชันมากหรือชันน้อยขึ้นอยู่กับค่าของแรงดัน U ที่ค่าแรงดันต่ำๆ จะได้ความชันสูงจนไม่ตัดกับเส้นโค้งเลย ก็หมายความว่าไม่มีการเบรกดาวนจ์เกิดขึ้น และที่แรงดันสูงขึ้น จะได้จุดตัดสองจุด แสดงว่ามีค่าแรงดันเบรกดาวนจ์สองค่าที่จุด M เป็นจุดที่เส้นตรงสัมผัสเส้นโค้ง แสดงถึงค่าแรงดันต่ำสุดที่จะทำให้เกิดเบรกดาวนจ์ได้ ที่จุดตัด L เกิดเบรกดาวนจ์กรณีที่มีระยะช่องแคบกว้างๆ E/p มีค่าต่ำความดันคงที่ และจุด H เกิดเบรกดาวนจ์กรณีช่องแคบแคบๆ แต่ E/p มีค่าสูง เมื่อหาหลายๆ จุดจะได้เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ U_b และ $p \cdot d$ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะเส้นโค้งของพาสเชน (Paschen's curve) [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ในสมการ (2.4) เขียนได้ว่า

$$\alpha/p = A \cdot e^{-B/E/p}$$

$$\alpha = p \cdot A \cdot e^{-B/E/p}$$

จากเงื่อนไขเบรกดาวน์สมการ (2.7) เขียนได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \cdot \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)$$

$$p \cdot A \cdot e^{-B/E/p} = \frac{1}{d} \cdot \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)$$

ดังนั้น

$$e^{\frac{B \cdot p \cdot d}{U}} = \frac{A \cdot p \cdot d}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)}$$

ให้ $U = U_b$ จะได้

$$U_b = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln\left(\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)}\right)} \quad (2.11)$$

โดยที่ A และ B เป็นค่าคงตัวของแต่ละแก๊สตามสมการ (2.4) และค่าตามตารางที่ 2.1 จะคำนวณค่า U_b ได้ต้องทราบค่า Γ ซึ่งมีค่าระหว่าง 10^{-2} กับ 10^{-3} และจะมีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ค่า $p \cdot d$ ต่ำ ที่ค่า $p \cdot d$ สูงๆ การเปลี่ยนแปลงค่า $p \cdot d$ มีผลต่อค่าในส่วนน้อย ค่า U_b จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $p \cdot d$ ที่ $p \cdot d$ ต่ำมากค่าในส่วนจะเข้าใกล้ศูนย์ ค่า U_b จะเพิ่มขึ้นอีก แสดงว่ามีค่าแรงดันต่ำสุด U_{bmin} ค่า U_{bmin} นี้สามารถหาได้โดยดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (2.11) เทียบกับ $p \cdot d$ แล้วให้เท่ากับศูนย์จะได้

$$\frac{dU_b}{d(p \cdot d)} = \frac{B}{\ln\left(\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)}\right)} - \frac{B}{\left[\ln\left(\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)}\right)\right]^2} = 0$$

นั่นคือ

$$n \frac{A \cdot p \cdot d}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)} = 1$$

ฉะนั้น

$$(p \cdot d)_{min} = \frac{e}{A} \cdot \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)$$

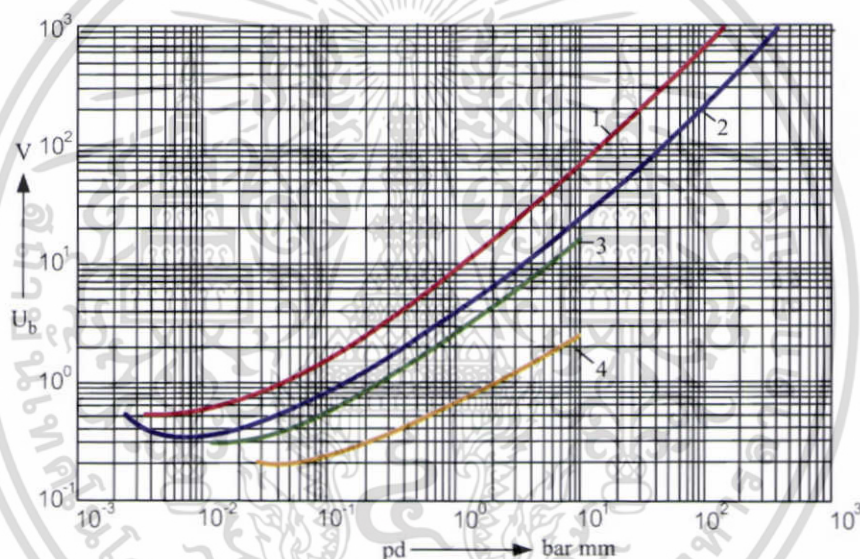
แทนค่า $(p \cdot d)_{min}$ จะได้

$$(U_b)_{min} = 2.718 \cdot \frac{B}{A} \cdot \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \quad (2.12)$$

ตารางที่ 2.2 ตารางค่า (p.d) และ U_{bmin} ของแก๊สชนิดต่าง

| รายการ | Air | N ₂ | H ₂ | O ₂ | SF ₆ | CO ₂ | He | Ne | Na |
|-----------------------------------|------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----|-----|------|
| (p · d) _{min} Torr.cm | 0.55 | 0.65 | 1.05 | 0.7 | 0.26 | 0.51 | 4.0 | 4.0 | 0.05 |
| U_{bmin} Volt | 352 | 240 | 230 | 450 | 507 | 420 | 155 | 245 | 320 |

แสดงว่าที่ค่าแรงดันต่ำกว่า U_{bmin} ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอไม่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวนได้ ไม่ว่าจะทำให้แก๊สหรือความดันต่ำลงเพียงใด ตัวอย่างเส้นโค้งพาสเชนของอากาศไนโตรเจนและ SF₆ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เส้นโค้งพาสเชน (Paschen's curve) ของแก๊สชนิดต่างๆ
เมื่อ 1) SF₆ 2) อากาศ 3) H₂ 4) Ne

2.3.3.2 ขีดจำกัดการใช้กฎของพาสเชน

การใช้กฎของพาสเชนมีขีดจำกัด มีหลายกรณีที่ปรากฏการณ์ไม่เป็นไปตามกฎนี้ เช่น ที่ pd มีค่าสูงมากหรือต่ำมาก ค่าแรงดันเบรกดาวนจะไม่เท่ากันแต่จะแปรไปตาม p เมื่อให้ pd คงตัว ในช่องแก๊สกว้าง การเบรกดาวนจะเป็นแบบสตรีมเมอร์ ที่ความดันต่ำมากๆ เบรกดาวนมักเริ่มต้นจากอิเล็กโทรด เช่น เบรกดาวนในสุญญากาศ เป็นต้น ยิ่งกว่านั้นกฎของพาสเชนใช้กับแก๊สผสมไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ E_b

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์อาจหาได้ง่ายๆจากค่าแรงดันเบรกดาวน์ U_b หารด้วยระยะแกป d คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d}$$

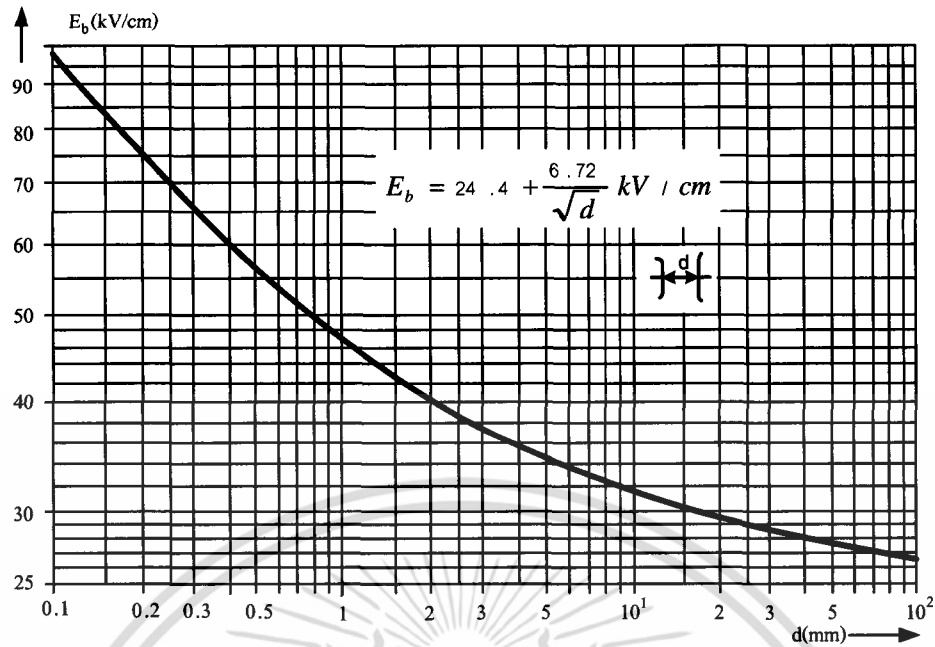
จากสมการ (2.11) จะได้

$$E_b = \frac{B \cdot p}{\ln\left(\frac{A \cdot p \cdot d}{r \cdot (r+1)}\right)}$$

ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะแกป d และจะมีค่าเพิ่มเร็วขึ้นเมื่อระยะแกปแคบลง ผลอันนี้อาจอธิบายได้ด้วยสมการ (2.7) ในตารางที่ 2.3 แสดงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (อิลีกโทรด Rogowski profile) ที่สภาวะมาตรฐาน 760 mmHg 20°C ดั่งเส้นกราฟในรูปที่ 2.10

ตารางที่ 2.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอากาศ [9]

| d (mm) | E_b (kV/cm) | d (mm) | E_b (kV/cm) |
|----------|----------------|----------|----------------|
| 0.1 | 96.0 | 8.0 | 32.1 |
| 0.2 | 73.3 | 9.0 | 31.7 |
| 0.3 | 64.1 | 10.0 | 31.4 |
| 0.4 | 58.8 | 15.0 | 30.0 |
| 0.5 | 55.2 | 20.0 | 29.4 |
| 0.6 | 52.2 | 25.0 | 28.9 |
| 0.7 | 49.9 | 30.0 | 28.6 |
| 0.8 | 48.1 | 35.0 | 28.3 |
| 0.9 | 46.5 | 40.0 | 28.0 |
| 1.0 | 45.4 | 45.0 | 27.8 |
| 2.0 | 39.5 | 50.0 | 27.7 |
| 3.0 | 36.7 | 55.0 | 27.5 |
| 4.0 | 35.0 | 60.0 | 27.3 |
| 5.0 | 34.0 | 65.0 | 27.2 |
| 6.0 | 33.2 | 80.0 | 26.9 |
| 7.0 | 32.6 | 90.0 | 26.7 |



รูปที่ 2.10 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอของอากาศ [8]

2.3.4 กลไกเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ (Streamer mechanism)

เนื่องจากกลไกเบรกดาวนตามทฤษฎีของทาวน์เซนต์ ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวนได้ทุกกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของอะวาลานซ์ (Formative time) ที่ทำให้เกิดดิสชาร์จประทั้งตัวเองอยู่ได้ในแก๊สที่มีความดัน เช่น ในบรรยากาศหรือมากกว่า ($pd > 1000 \text{ Torr.cm}$) การเกิดเบรกดาวนในช่องแคบกว้างๆ ในบรรยากาศของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดเบรกดาวนในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด T_c น้อยกว่า $0.1 \mu\text{s}$ เป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงแคโทดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ เมื่อคำนวณเวลาตามกระบวนการของทาวน์เซนต์ ที่ใช้สร้างอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนโดยการชนแตกตัว (กระบวนการ α) และปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโอด (กระบวนการ γ) จะพบว่าเวลามากกว่าเวลาคลื่นตัดที่วัดได้จากการทดลองหรือแม้แต่คิดเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยตรงจากคาโอดข้ามช่องแคบไปยังแอโนด โดยไม่ชนกับโมเลกุลเลย ก็ใช้เวลานานกว่าเวลาคลื่นตัดที่ทดลองได้ นี่เป็นจุดล้มเหลวที่สำคัญของทฤษฎีเบรกดาวนของทาวน์เซนต์

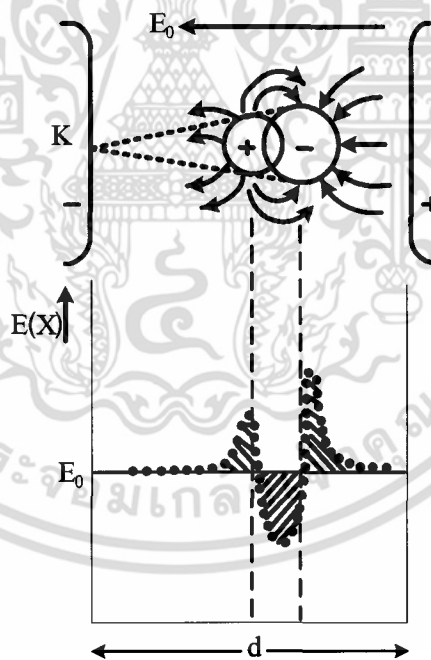
จุดอ่อนอีกประการหนึ่งของกลไกเบรกดาวนของทาวน์เซนต์ ที่ไม่สามารถอธิบายผลของประจุค้าง (Space charge) ที่อยู่เบื้องหลังของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ก่อนๆ มีหลายกรณีที่กลุ่มไอออนเหล่านี้ทำให้สนามไฟฟ้าเดิมบิดเบือนไปในทางที่มีความเครียดสูงขึ้น และอาจทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเกิดไอออนเซชันขึ้นได้

ความล้มเหลวของกลไกเบรกดาวนแบบทาวน์เซนต์ ทำให้นักวิทยาศาสตร์ และวิศวกรคิดค้นหาทฤษฎีใหม่ขึ้นมาอธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ ทฤษฎีที่มีเหตุผลและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน คือ

ทฤษฎีสตรีมเมอร์ Meek และ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวก (Positive streamer) ในปี 1940 และในเวลาเดียวกัน Rather ก็เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ (Negative streamer)

กลไกสตรีมเมอร์อธิบายการเกิดเบรกดาวน์ดิสชาร์จจากอะวาลานซ์เดี่ยว ซึ่งมีประจุค้างเกิดขึ้นจากอะวาลานซ์เอง เปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปเป็นพลาสมาสตรีมเมอร์ทำให้สภาวะนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดเบรกดาวน์ขึ้นในแนวนี้

หลักการของการเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีกลไกสตรีมเมอร์ เป็นผลสืบเนื่องจากการรวมการวิ่งชนไอออนไนเซชัน (กระบวนการ α) ของทาวน์เซนต์เกิดอะวาลานซ์ขึ้น ในอะวาลานซ์เริ่มต้นนี้เองจะมีการไอออนไนเซชันเป็นจำนวนมากจากพลังฟอตอนที่เรียกว่า “โฟโตไอออนไนเซชัน” ของแก๊สโมเลกุลที่ส่วนหน้าของอะวาลานซ์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของอะวาลานซ์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดไอออนไนเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเกือบจะเรียกได้ว่าอยู่กับที่ เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ปล่อยให้ไอออนบวกอยู่เบื้องหลังรวมกันเป็นหมอกประจุค้าง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัว และหลังอะวาลานซ์เพิ่มสูงขึ้น ($E_{ext} + E_r$) แต่ในบริเวณระหว่างอิเล็กตรอนกับหมอกประจุค้างไอออนบวกความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง ($E_{ext} + E_r$) ดังรูปที่ 2.11

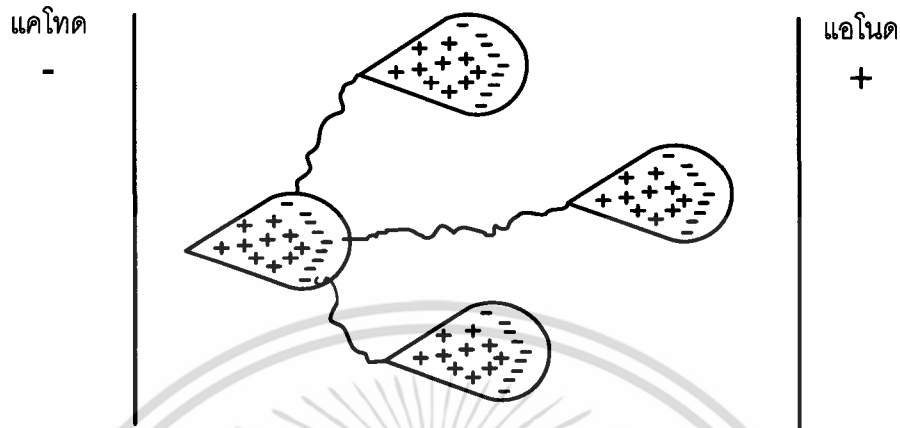


รูปที่ 2.11 ผลของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอะวาลานซ์
ต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อน [10]

การเพิ่มสูงขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ที่ทำให้เกิดโฟโตไอออนไนเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้นการเกิดอะวาลานซ์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.12 กลุ่มประจุค้างเพิ่มขึ้นทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างแอโนดกับแคโทด และเกิดการเบรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดาวนตามแนวนิ่งจึงเรียกกกลไกเบรกดาวนลักษณะนี้ว่า “สตริมเมอร์เบรกดาวน” การขยายเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดโดยอาศัยโพโตไอออนเซชันสร้างอะวาลานซ์เป็นไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง



รูปที่ 2.12 กลไกเบรกดาวนแบบสตริมเมอร์ [9]

2.3.4.1 เงื่อนไขการเกิดสตริมเมอร์เบรกดาวน

เงื่อนไขการเกิดสตริมเมอร์เบรกดาวนกำหนดด้วยช่วงต่อของการเปลี่ยนสถานะภาพจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ไปสู่สตริมเมอร์ ซึ่งแบ่งอธิบายออกเป็นสองทฤษฎีที่เสนอ คือ

- 1) การเปลี่ยนจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์เดี่ยวไปสู่สตริมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุค้างไอออนบวกที่หัวอะวาลานซ์ E_r มีค่าประมาณเท่ากับกับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก E_{ext} เป็นเงื่อนไขของการเกิดสตริมเมอร์เบรกดาวนเสนอโดย Meek and Loeb
- 2) Rather เสนอเงื่อนไขสตริมเมอร์เบรกดาวนกำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้างเช่นกัน โดยไม่เกี่ยวข้องกับ Meek and Loeb และกำหนดอีกว่าสตริมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออนไนเซชัน e^{ax} ประมาณ 10^8 โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส หรือความดันแก๊ส หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เป็นเงื่อนไขของการเปลี่ยนสถานะภาพจากอะวาลานซ์เดี่ยวไปสู่สตริมเมอร์ตามคำอธิบายของ Meek และ Loeb เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัวในแนวรัศมีของอะวาลานซ์ E_r มีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อน E คือ [10]

$$E_r = \frac{4eae^{ax}}{\sqrt[3]{2Dx}} = \frac{4eae^{ax}}{\sqrt[3]{2Dx}} = \frac{4eae^{ax}}{\sqrt[3]{kE}} \quad (2.13)$$

รัศมีของหัวอะวาลานซ์ที่มีความยาว x หาได้จากสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคือ

$$r = \sqrt{2Dt}$$

$$t = \frac{x}{v} = \frac{x}{kE}$$

โดยที่ x คือ ความยาวของอะวาลานซ์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

D คือ สัมประสิทธิ์แพร่กระจาย

e คือ ประจุอิเล็กตรอน

v คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า

k คือ สภาพเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

Meek และ Loeb ได้แทนค่า D/k ของอิเล็กตรอนเพื่อหาค่า E_r ของอะวาลานซ์ที่เกิดในอากาศจะได้ [10]

$$E_r = 5.27 \times 10^{-7} \alpha e^{\alpha x} \sqrt{\frac{p}{x}} \quad \text{v/cm} \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.14) จะสามารถคำนวณค่าแรงดันเบรกตาวนต่ำสุดได้ ถ้าทราบระยะแกป d เป็น cm และความดัน p โดยเลือกค่า E จะได้ค่า α จากกราฟความสัมพันธ์ $\alpha/p = f(E/p)$ จนกระทั่งได้ค่า E ประมาณเท่ากับ E_r ที่ได้จะเป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของแกปที่ทำให้เกิดเบรกตาวน

ทำนองเดียวกันตามเงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรกตาวนที่เสนอโดย Rather ซึ่งสมมติว่าอิเล็กตรอนอยู่ส่วนหัวของอะวาลานซ์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมเช่นกัน และมีจำนวนเท่ากับ $e^{\alpha x}$ เมื่อ x เป็นความยาวของอะวาลานซ์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ E ความเครียดสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุค้างในอะวาลานซ์จะเป็น

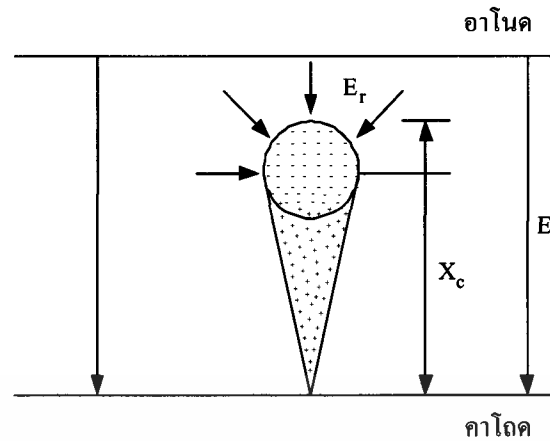
$$E_r = \frac{e^{\alpha x}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2.15)$$

เมื่อ r คือ รัศมีของอะวาลานซ์ซึ่งคำนวณได้แบบเดียวกับที่กล่าวข้างต้น

2.3.4.2 ขนาดอะวาลานซ์วิกฤต

เงื่อนไขการเปลี่ยนสถานะจากอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่หัวอะวาลานซ์มีค่าใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าที่บ่อน จากเงื่อนไขดังกล่าวจึงสามารถหาจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์วิกฤต คือ จะได้ความยาววิกฤตของอะวาลานซ์เป็น $x = x_c$ ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ $\alpha x_c = 17.7 + \ln x_c + \ln \frac{E_r}{E}$

โดยเงื่อนไขของ Rather จะได้ $\alpha x_c = 17.7 + \ln x_c$ (2.16)



รูปที่ 2.13 ระยะวิกฤตของอะวาลานซ์อิเล็กตรอน

Rather ชี้ให้เห็นว่าตามทฤษฎีเบรกดาวน์ของทาว์นเซนต์ อาจเกิดขึ้นที่ $x_c > d$ แต่ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์จะได้ $x_c < d$ ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอการเปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์เมื่ออะวาลานซ์ข้ามแก๊ปพอดี นั่นคือ อะวาลานซ์มีความยาวเท่ากับแก๊ป d แทนค่า $x_c = d$ ในสมการ (2.16)

$$\frac{\alpha}{p} \cdot pd = 17.7 + \ln d \quad (2.17)$$

แทนค่า $\frac{\alpha}{p}$ ด้วย $f\left(\frac{U_b}{pd}\right)$ จะได้ $f\left(\frac{U_b}{pd}\right) \cdot pd = 17.7 + \ln d \quad (2.18)$

ฉะนั้นจากสมการ $\frac{\alpha}{p} = A \exp - \frac{B}{E/p}$

แทนค่า E ด้วย U/d จะได้ $\frac{\alpha}{p} = A \exp - \frac{Bpd}{U}$

แทนค่า α/p ในสมการ (2.18) จะได้แรงดันเบรกดาวน์ $U = U_b$ คือ

$$U_b = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apx_c}{17.7 + \ln x_c}} \quad (2.19)$$

จากค่า α ที่ทราบและ $p = 760$ Torr จะพบว่า X_c อยู่ในช่วง 1.2 เซนติเมตรฉะนั้นในสมการ (2.16) อาจเขียนได้ว่า

$$\alpha x_c = 18$$

ดังนั้น $e^{\alpha x_c} = e^{\int_0^{x_c} \alpha dx} = 10^8 \quad (2.20)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ ขนาดของอะวาลานซ์วิกฤตจะเกิดขึ้น เมื่อจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์มีค่าประมาณ 10^8 ซึ่งเป็นเงื่อนไขหนึ่งที่ Rather กำหนดการเกิดสตรีมเมอร์จากอะวาลานซ์ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น

2.4 เบรกดาวน์ในแก๊สไฟฟ้าลบ (Breakdown in electronegative gas)

แก๊สไฟฟ้าลบ หมายถึง แก๊สชนิดที่โมเลกุลมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนอิสระ และทำให้เป็นไอออนลบ แก๊สประเภทนี้ได้แก่ แก๊สที่มีองค์ประกอบ F, Cl, Br, I, O และ S เช่น อากาศ CO_2 และ SF_6 เป็นต้น

2.4.1 การเกิดไอออนลบ(Negative ion formation)

ตามที่กล่าวแล้วไอออนในเซชัน เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลของแก๊ส และเหลือเป็นไอออนบวก ในโอกาสเดียวกันไอออนลบอาจเกิดขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนไปเกาะบนโมเลกุล (Electron attachment) ทำให้กลายเป็นอนุภาคประจุที่มีมวลเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ ไอออนบวกเป็นผลให้เคลื่อนที่ได้ช้า นั่นคือไอออนลบจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าน้อย คือ น้อยกว่า W_i โอกาสจะเกิดไอออนในเซชันจากการวิ่งชนของไอออนลบจึงมีน้อย จึงเท่ากับเป็นการหน่วงการเกิดไอออนในเซชันการหน่วงนี้จะมีผลอย่างยิ่งถ้าเกิดขึ้นในบริเวณใกล้แคโทด เป็นผลให้อิเล็กตรอนที่เป็นตัวเริ่มต้นสร้างอะวาลานซ์จะลดลง ไอออนลบอาจเกิดขึ้นได้หลายกระบวนการดังต่อไปนี้ [8]

1) ไอออนลบเกิดขึ้นโดยอิเล็กตรอนไปเกาะบนอะตอม อนุภาคใหม่นี้จะอยู่ในสภาพดังกล่าวชั่วระยะเวลาหนึ่งได้ พลังงานของไอออนลบจะต้องมีค่าน้อยกว่าของอนุภาคเป็นกลาง การเปลี่ยนสถานะภาพจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานถูกแบ่งออกไปจากอนุภาค ดังนั้นไอออนลบเสถียรมีพลังงานน้อยกว่าอนุภาคก่อนที่อิเล็กตรอนจะมาเกาะ พลังงานส่วนเกินจะถูกปล่อยออกมาเป็นควอนตัมในขณะที่อิเล็กตรอนไปเกาะอะตอม กลไกการก่อตัวของไอออนลบในลักษณะนี้เรียกว่า การเกาะของอิเล็กตรอนโดยการปล่อยรังสี (Radialive attachment) และกระบวนการนี้กลับสภาพเดิมได้ นั่นคืออิเล็กตรอนที่เกาะอยู่จะหลุดออกได้ เมื่อได้รับพลังงานรังสี ซึ่งเรียกว่า ปลดอิเล็กตรอนด้วยโฟตอน

2) การเกาะของอิเล็กตรอนบนอะตอมเป็นไอออนลบโดยกระบวนการแยก (Dissociative - attachment) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล พลังงานส่วนที่เกินนี้จะไม่ปล่อยออกไป แต่ทำให้เกิดแยกออกเป็น 2 อะตอม คือ เป็นอนุภาคเป็นกลางหนึ่ง และอีกอะตอมหนึ่งเป็นไอออนลบกระบวนการนี้ย้อนกลับได้

3) ไอออนลบอาจเกิดจากผลของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุล โดยที่โมเลกุลแยกออกเป็นอนุภาคบวกและอนุภาคลบ โดยไม่มีอิเล็กตรอนวิ่งไปเกาะบนอะตอม แบบนี้เรียกว่าแบบไอออนคู่(Ion - pair) คือ

4) ไอออนลบเกิดจากการที่อนุภาคหนักๆวิ่งชนกันเอง โดยไม่มีอิเล็กตรอนอิสระจะมีการถ่ายเทประจุเกิดขึ้น แยกออกเป็นไอออนคู่ คืออิเล็กตรอนที่เกาะอยู่จะหลุดออกจากไอออนลบได้เมื่อได้รับควันทัมเท่ากับ $h\nu = W_a$ พลังงานเกาะตัวหรือทำให้อิเล็กตรอนที่เกาะออกมาได้ มีค่าอยู่ในย่านตั้งแต่ 0.75 eV ถึง 3.8 eV ดังในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 พลังงานเกาะของอิเล็กตรอนบนอะตอมต่างๆ [10]

| อะตอม | พลังงานเกาะตัว W_a (eV) |
|-----------------|---------------------------|
| H ⁻ | 0.75 |
| F ⁻ | 2.0 |
| Cl ⁻ | 3.8 |
| O ⁻ | 1.465 |
| S ⁻ | 2.07 |

2.4.2 สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนเป็นไอออนลบ (Attachment coefficient)

การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนอะตอมกลายเป็นไอออนลบมีผลอย่างมากต่อลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ อธิบายได้ด้วยสัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอน η ซึ่งมีนิยามเป็นความสัมพันธ์ของการลดจำนวนอิเล็กตรอน N_e เมื่อเทียบกับจำนวนอิเล็กตรอนต่อหน่วยระยะทางเคลื่อนที่ในปริมาตรของแก๊ส

ถ้ากระบวนการเพิ่มแบบเอ็กโปเนนเชียลของอิเล็กตรอนโดยการชนและอิเล็กตรอนลดลงเนื่องจากการเกาะตัวของอิเล็กตรอน จำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นจากการชนในระยะทาง dx เป็น

$$dN_i = N\alpha dx$$

ที่เวลาเดียวกันอิเล็กตรอนหายไปเนื่องจากการเกาะตัว

$$dN_a = -N\eta dx$$

เมื่อ x คือระยะทางจากคาโอด

ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนอิสระคงอยู่

$$dN = dN_i + dN_a = N(\alpha - \eta)$$

ถ้าอินทิเกรตจาก $x = 0$ ถึง x ด้วยอิเล็กตรอนเริ่มต้น N_0 ที่คาโอดจะได้อิเล็กตรอนในแก๊ปที่ระยะ x เป็น

$$N = N_0 e^{(\alpha-\eta)x}$$

และจะได้กระแสเป็น

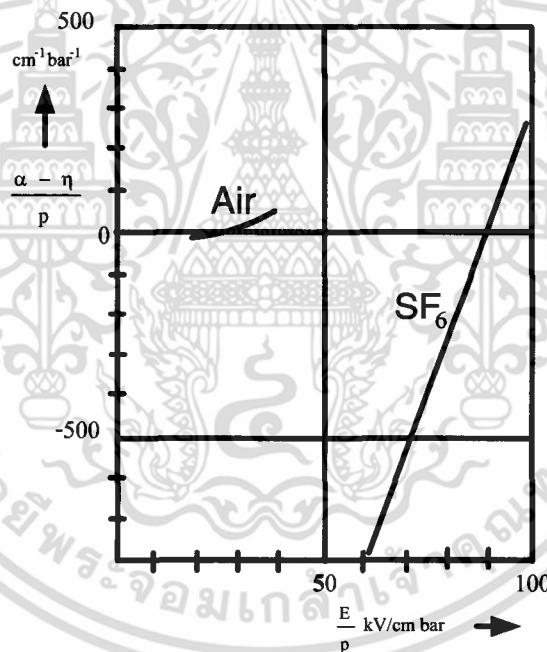
$$I = I_0 \left[\frac{\alpha}{\alpha-\eta} \cdot e^{(\alpha-\eta)d} - \frac{\eta}{\alpha-\eta} \right]$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์ η จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัมประสิทธิ์การเกิดไอออนเซชนในแก๊สลบ จะมีอิเล็กตรอนไปจับบนอะตอม ค่าสัมประสิทธิ์ไอออนเซชนยังผลจะเขียนได้ว่า

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta$$

เมื่อเขียนในรูปสมการทั่วไปจะได้

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = \frac{\alpha - \eta}{p} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.14 ผลลัพธ์ของ $\alpha - \eta$ ของ SF_6 เทียบกับอากาศ [8]

2.4.3 เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนของแก๊สไฟฟ้าลบ

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าในแก๊สอาจเกิดไอออนลบขึ้นได้โดยอิเล็กตรอนที่แยกตัวเป็นอิสระจากโมเลกุลด้วยการไอออนเซชน และมีพลังงานที่พอเหมาะไปเกาะติดอยู่กับโมเลกุลเป็นกลางของแก๊ส กลายเป็นอนุภาคที่มีประจุลบในรูปแบบต่างๆ กัน แก๊สที่มีคุณสมบัติที่โมเลกุลจับอิเล็กตรอนได้ เรียกว่า แก๊สไฟฟ้าลบ ในแก๊สอื่นหากมีแก๊สไฟฟ้าลบเจือปนแม้เพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแก๊สนั้นเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณสมบัติของโมเลกุลของแก๊สประเภทนี้สามารถจับอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากไอออไนเซชันได้จึงเท่ากับเป็นการระงับการเกิดเบรกดาวนไม่ให้เกิดขึ้น หากจะทำให้เกิดเบรกดาวนได้ก็ต้องมีสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติเพื่อที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่เกาะอยู่นั้นให้หลุดออกมาสร้างอะวาลานซ์ไปตามกระบวนการเกิดเบรกดาวน นั่นคือ แก๊สไฟฟ้าลบบจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแก๊สธรรมดาที่โมเลกุลไม่สามารถจับอิเล็กตรอนได้ ในทางเทคนิควิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง จึงใช้ลักษณะสมบัติเด่นนี้ ไปใช้ให้เห็นประโยชน์ในด้านการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า แก๊สไฟฟ้าลบบได้แก่ O_2 , CO_2 , SF_6 , CCl_2F_2 (Arcton-12) และอากาศซึ่งมี O_2 รวมอยู่ด้วย แก๊สไฟฟ้าลบบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ได้แก่ แก๊ส SF_6 เพราะมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนครบถ้วนทุกประการ

การเกิดเบรกดาวนในแก๊สไฟฟ้าลบบเป็นไปตามกลไกการเบรกดาวน ดังนั้นอาศัยทฤษฎีของทาวนเซนต์ อาจเขียนสมการของกระแสในแก๊สที่เกิดจากการไอออไนเซชันและเกิดอิเล็กตรอนเกาะโมเลกุลในเวลาเดียวกัน คือ

$$I = I_0 \frac{\frac{\alpha}{\alpha-\eta} [e^{(\alpha-\eta)d} - \frac{\eta}{\alpha-\eta}]}{1 - \gamma \frac{\alpha}{\alpha-\eta} [e^{(\alpha-\eta)d} - 1]} \quad (2.22)$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาวนเซนต์

γ คือ สัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากแคโทดโดยการชนของไอออนบวก

η คือ สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนโมเลกุล

ค่าของ η/p จะอยู่ในฟังก์ชันของ E/p เช่นกัน เงื่อนไขการเกิดกระแสไหลประทุงตัวอยู่ได้โดยไม่มีขึ้นอยู่กับกระแสอิมิตัว I_0 เมื่อเทอมในส่วนของสมการ (2.22) เป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\gamma \frac{\alpha}{\alpha-\eta} [e^{(\alpha-\eta)d} - 1] = 1 \quad (2.23)$$

เบรกดาวนจะเกิดขึ้นได้เมื่อ $\alpha \geq \eta$ ในทำนองเดียวกัน การเกิดเบรกดาวนในแก๊ส ไฟฟ้าลบบ อาจอธิบายด้วยทฤษฎีสตรีมเมอร์ได้เช่นกัน

2.5 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนในแก๊ส

การเกิดเบรกดาวนในแก๊สมี 2 ชนิดคือเบรกดาวนโดยตรงซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และอีกชนิดคือเบรกดาวนแบบโคโรนาในกรณีนี้จะเกิดโคโรนาก่อนเบรกดาวนลักษณะแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูงจะทำการคำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวนไม่ได้ แต่จะคำนวณได้เฉพาะแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา

ในแก๊สที่มีแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า $\eta^* = E_{av}/E_{max}$ มากกว่า 20 % ขึ้นไปการเกิดเบรกดาวนในอากาศจะคล้ายกับที่เกิดในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ แต่ถ้าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าต่ำกว่านี้ $\eta^* < 20\%$ เรียกว่าสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะเกิดปรากฏการณ์ที่ต่างจากลักษณะของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สม่าเสมอคือ จะมีโคโรน่าเกิดขึ้นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงและจะเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์

ในสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่มี η^* ต่ำความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) จะมีค่าสูงที่ผิวอิเล็กโทรดที่มีลักษณะปลายแหลม และความเครียดจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะห่างออกไปจากจุด E_{max} ดังนั้นไอออนในเซชันจะเกิดขึ้นได้เฉพาะบริเวณผิวของอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสูงเท่านั้นและจะเกิดโคโรน่าขึ้นก่อนที่จะเบรกดาวน์ เมื่อเกิดโคโรน่าขึ้นสนามไฟฟ้าในแกปจะผิดเพี้ยนไปจากปกติ การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์จึงยุ่งยาก

2.5.1 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์โดยตรง (U_b)

การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์ในแก๊ส จะอาศัยเงื่อนไขเบรกดาวน์ตามทฤษฎีทาวน์เซนต์ หรือ ทฤษฎีสตรีมเมอร์ ซึ่งอาจกล่าวรวมได้ว่า การจะเกิดเบรกดาวน์ในแก๊สได้ จะต้องมีความถี่อิเล็กตรอนหรือไอออนบวกในอะवलานซ์ถึงค่าวิกฤต อะवलานซ์อิเล็กตรอนได้จากการอินทิเกรต คือ $\int \alpha dx$

1) แรงดันเบรกดาวน์โดยตรงในสนามไฟฟ้าเสมอ

ถ้าสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่าเสมอ คือ E มีค่าเท่ากันตลอดแกป การอินทิเกรตจะทำได้ง่าย โดยมีขอบเขตของการอินทิเกรตเท่ากับระยะของแกป d นั่นคือ

$$\int_0^d \alpha dx = \alpha d$$

ตามเงื่อนไขเบรกดาวน์ของทาวน์เซนต์ คือ $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ และเงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์ของ Rather คือ จำนวนอิเล็กตรอนในอะवलานซ์วิกฤตเท่ากับ N_c จึงเขียนได้ว่า

$$\int_0^d \alpha dx = \alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = \ln N_c = K \quad (2.24)$$

N_c ตามข้อเสนอของ Rather เท่ากับ 10^8 ดังนั้น K มีค่าเท่ากับ 18 แต่ความเป็นจริงค่า K อยู่ในช่วง 10 ถึง 20 ขึ้นอยู่กับความดันแก๊ส อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของค่า K ในช่วงนี้ไม่มีผลสำคัญต่อแรงดันเบรกดาวน์ ค่า $K = 18$ จึงเป็นที่ยอมรับและใช้ในการคำนวณโดยทั่วไป

2) แรงดันเบรกดาวน์โดยตรงในสนามไฟฟ้าไม่สม่าเสมอ

ในกรณีของสนามไฟฟ้าไม่สม่าเสมอที่เกิดเบรกดาวน์แบบโดยตรง สามารถใช้สมการ (2.24) คำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแก๊สได้ถ้าทราบการกระจายของสนามไฟฟ้า $E(x)$ ในแกป จะทำการอินทิเกรตไปตามแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงสุด และเนื่องจาก α มีค่าขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า E คือ $\alpha = f[E(x)]$ ดังนั้นขอบเขตของการอินทิเกรตจะเท่ากับความยาว

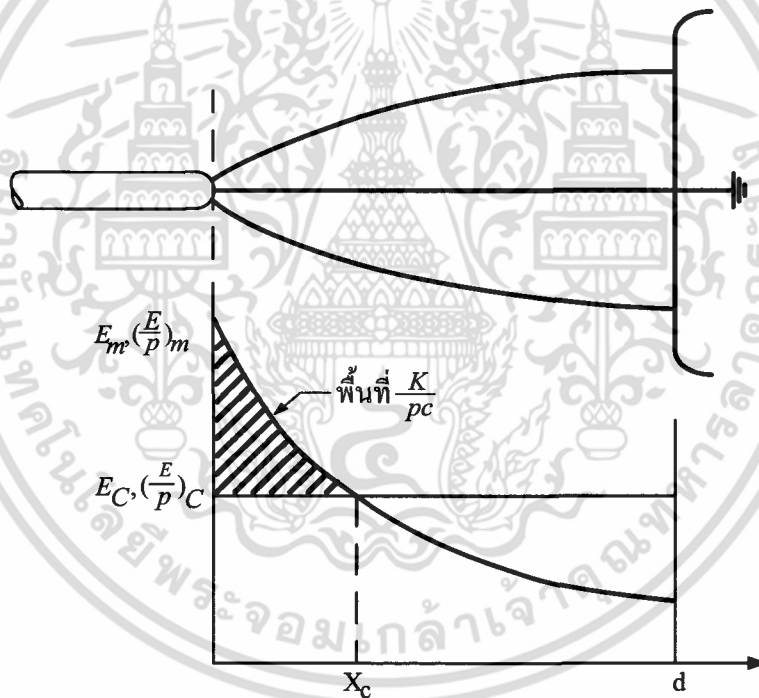
ของเส้นสนามไฟฟ้าที่สั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโทรด หรือเท่ากับระยะของอะวาลานซ์วิกฤต X_c ดังนั้นสมการ (2.24) จึงเป็น

$$\int_0^d \alpha dx = \ln N_c = K \quad (2.25)$$

และแทนค่า α อยู่ในฟังก์ชันของ $E(x)$ และ ความดันแก๊ส p จึงเขียนได้ว่า

$$\int_0^{X_c} \alpha[E(x), p] dx = K \quad (2.26)$$

จุดเริ่มต้นอินทิเกรตจะเริ่มจากจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_m โดยทั่วไปก็คือ ที่ผิวของอิเล็กโทรดนั่นเอง จุดปลายของการอินทิเกรตก็คือที่ $\alpha = 0$ เป็นจุดที่ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต E_c ดังในรูป 2.15



รูปที่ 2.15 ระยะอะวาลานซ์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ [8]

2.5.2 การคำนวณแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (U_i)

ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง โคโรนาเกิดก่อนเบรกดาวน์ การหาค่าตามเงื่อนไขในรูปที่ 2.15 นั้นใช้ได้เฉพาะแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด U_i (Corona inception voltage) เท่านั้น และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_m ก็คือ E_i ส่วนแรงดันโคโรนาเบรกดาวน์นั้นหาตามวิธีนี้ได้ เพราะประจุค้างจากโคโรนาทำให้สนามไฟฟ้าในแก๊สผิดเพี้ยนไปจากค่าปกติตามมิติเชิงเรขาคณิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า α มีความสัมพันธ์กับความดันแก๊ส p และสนามไฟฟ้า E คือ $\alpha/p = f(E/p)$ ซึ่งแก๊สแต่ละชนิดจะมีฟังก์ชันต่างกัน เช่น ฟังก์ชันของอากาศและแก๊ส SF_6 อาจเขียนความสัมพันธ์แบบ α/p ทั่วไปได้ว่า

$$\frac{\alpha}{p} = c \left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^n \quad (2.27)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงตัว

$(E/p)_c$ คือ สนามไฟฟ้าวิกฤตต่อความดัน

n คือ เลขยกกำลังขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส เช่น อากาศ $n = 2$ และ SF_6 $n = 1$

การหาค่าแรงดันเบรกดาวน์โดยตรง U_b หาได้จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ E_b โดยใช้สมการ [10]

$$U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.28)$$

กรณีแรงดันโคโรนาเบรกดาวน์ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด $E_m = E_i$ จะได้แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^*$$

โดยที่ d คือ ระยะแก๊ป

η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

2.5.3 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์ในอากาศ

อากาศถือว่าเป็นแก๊สที่มีความสำคัญในด้านการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง โดยทั่วไปจะเป็นฉนวนภายนอกที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อม

1) แรงดันเบรกดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $\eta^* = 1$ ดังนั้น จากสมการ (2.28) จะได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์

$$U_b = E_b \cdot d$$

ค่า E_b ของอากาศหาได้จากตารางที่ 2.3 หรือเส้นกราฟในรูป 2.9 หรือสมการ (2.27) จากเงื่อนไขเบรกดาวน์สมการ (2.25)

$$\alpha d = K$$

และสมการ (2.27) สำหรับอากาศ $n = 2$ จะได้

$$\frac{\alpha}{p} = c \left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{E}{p}\right) - \left(\frac{E}{p}\right)_c = \sqrt{\frac{K}{C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{pd}}$$

$$\left(\frac{E}{p}\right) pd = \left(\frac{E}{p}\right)_c pd + \sqrt{\frac{K}{C}} \cdot \sqrt{pd}$$

ได้ค่าแรงดันเบรกดาวน $U_b = \left(\frac{E}{p}\right)_c pd + \sqrt{\frac{K}{C}} \cdot \sqrt{pd}$

แทนค่าคงตัว C ของ ชูมันน์ และค่า E_c คือ

$$E_c = 24.4 \text{ kV/cm}$$

$$\frac{K}{C} = 45.1 \text{ kV}^2/\text{cm}$$

$$D = \text{ระยะแกป cm}$$

จะได้

$$U_b = 24.4pd + 6.72\sqrt{pd} \text{ k/V} \quad (2.29)$$

ถ้าความดันบรรยากาศ จะได้

$$U_b = 24.4pd + 6.72\sqrt{d}$$

นั่นคือค่าความคงทนของอากาศ

$$E_b = 24.4 + \frac{6.72}{\sqrt{d}} \text{ kV/cm} \quad (2.30)$$

2) แรงดันเบรกดาวนของอากาศในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเมื่อไม่คิดผลของประจุค้าง

จากสมการ (2.26) คือ $\int_0^{x_c} \alpha[E(x), p] dx = K$ ถ้าทราบการกระจายของสนามไฟฟ้าคือ

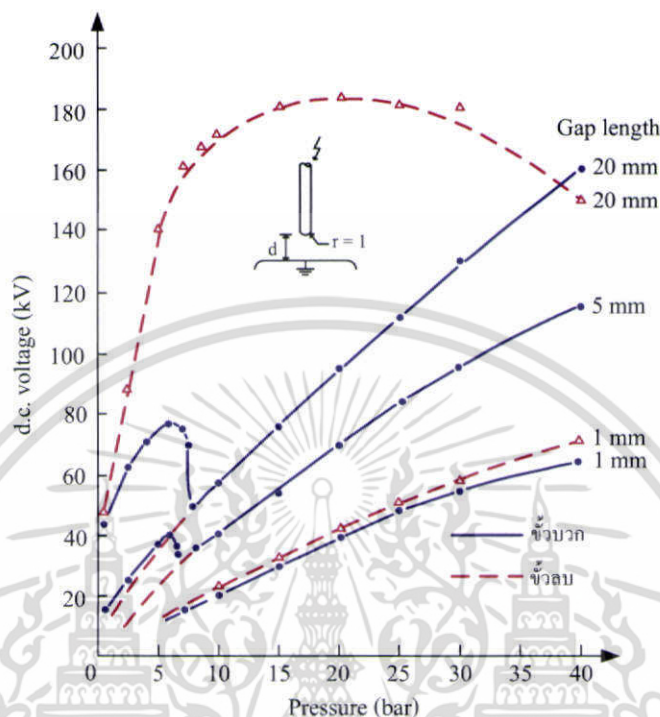
$E(x)$ จะสามารถหาค่าแรงดันเบรกดาวนได้ หรือหาจากความสัมพันธ์ในสมการ (2.28)

$U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ เมื่อทราบรูปลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ก็จะหาค่า η^* ได้

2.6 ผลของชั่วแรงดันต่อค่าแรงดันเริ่มต้น (U_i และ U_b)

แรงดันเริ่มต้นหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในแกปถ้าสนามไฟฟ้าภายในแกปเป็นแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยแรงดันเริ่มต้นก็จะเป็นแรงดันเบรกดาวนโดยตรง ในกรณีที่สนามไฟฟ้านั้นไม่สม่ำเสมอสูงจะเกิดโคโรนาก่อนการเบรกดาวนแรงดันที่โคโรนาเกิดคือแรงดันเริ่มต้น ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแบบไม่สมมาตรแรงดันเริ่มต้นชั่วลบจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันเริ่มต้นชั่วบวก อาจอธิบายได้ว่าการจะเกิดเบรกดาวนแบบสมบูรณ์ได้นั้นจะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นเป็นตัวสร้างอะวาลานซ์ตามกระบวนการต่างๆที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้า เช่นแท่งอิเล็กโทรดกับระนาบถ้ำที่แท่งอิเล็กโทรดเป็นชั่วลบอิเล็กตรอนเริ่มต้นจะเริ่มที่ปลายของแท่งอิเล็กโทรด ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีโอกาสเกิดไอออนเซชันจากการชนได้มากจึงสร้างอะวาลานซ์อิเล็กตรอนได้ง่ายค่าแรงดันเบรกดาวนจึงต่ำ แต่ถ้าที่แท่งอิเล็กโทรดเป็นชั่วบวกอิเล็กตรอนเริ่มต้นจะต้องเริ่มใน

แกปที่มีระยะห่างอย่างน้อยที่สุดเท่ากับระยะวิกฤต x_c ทำให้โอกาสที่จะทำให้เกิดไอออนเซชันเพื่อสร้างอะวาลานซ์เป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มความเครียดสนามไฟฟ้าขึ้นโดยการเพิ่มแรงดันด้วยเหตุนี้แรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของแรงดันขั้วลบจึงต่ำกว่าขั้วบวก ดังรูป [8]



รูปที่ 2.16 แรงดันโคโรน่าเริ่มเกิดและแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงของอากาศ [9]

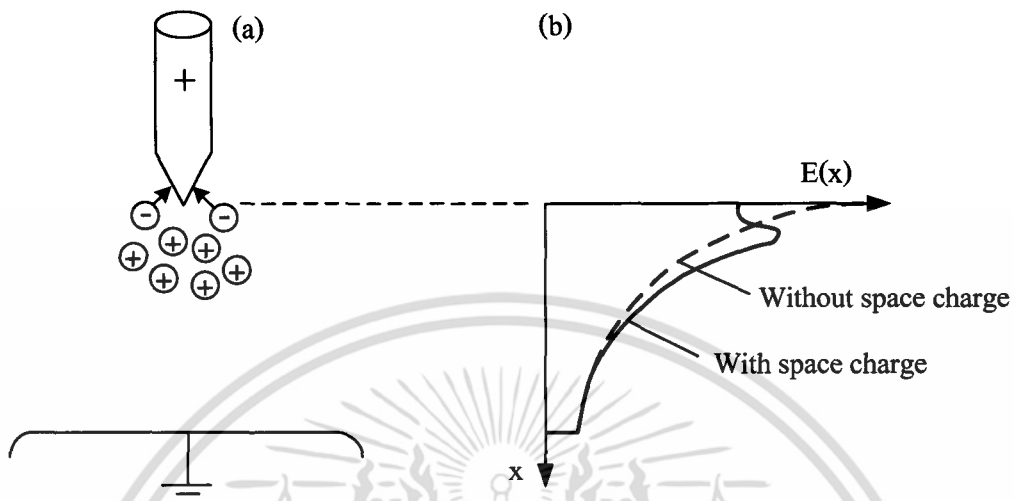
2.7 อิทธิพลของประจุค้างที่มีผลต่อขั้วของแรงดันเบรกดาวนั

ประจุค้างเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอสูงมีผลทำให้แรงดันเบรกดาวนั (U_b) มีค่าสูงกว่าแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด (U_i) ซึ่งประจุค้างยังส่งผลทำให้แรงดันเบรกดาวนัของขั้วบวกและขั้วลบต่างกัน กล่าวคือแรงดันเบรกดาวนัโดยตรงหรือแรงดันเริ่มต้นของขั้วลบจะต่ำกว่าขั้วบวกเสมอ แต่เมื่อมีผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรกดาวนัขั้วลบสูงกว่าขั้วบวกปรากฏการณ์ลักษณะนี้เกิดขึ้นกับแรงดันทุกประเภท (AC DC Impulse) และในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงของอิเล็กโทรดแบบไม่สมมาตร เช่น ปลายแหลมกับแผ่นระนาบ

2.7.1 อิเล็กโทรดปลายแหลมเป็นขั้วบวก

เมื่อป้อนแรงดันที่เป็นขั้วบวกเทียบกับแผ่นระนาบดังรูปที่ 2.17 a) เมื่อแรงดันสูงขึ้นจนโคโรน่าเริ่มเกิดแก๊สบริเวณแก๊สจะเกิดไอออนเซชันบริเวณรอบปลายแหลม อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วจะวิ่งเข้าหาปลายแหลมซึ่งเป็นขั้วอโนด ไอออนบวกซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้าจะค้างอยู่ที่บริเวณปลายแหลมทำให้สนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมมีความเครียดลดลงเสมือนว่าอิเล็กโทรดยาวขึ้น แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณแผ่นระนาบซึ่งเป็นขั้วคาโทดจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.17 b) เมื่อระยะแกปสั้นลงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความเครียดสนามไฟฟ้าในแก๊ปเพิ่มขึ้นมีผลให้เกิดเบรกดาวนได้ง่ายขึ้น กล่าวโดยสรุปคือ ผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรกดาวนซ์ววกมีค่าลดลง

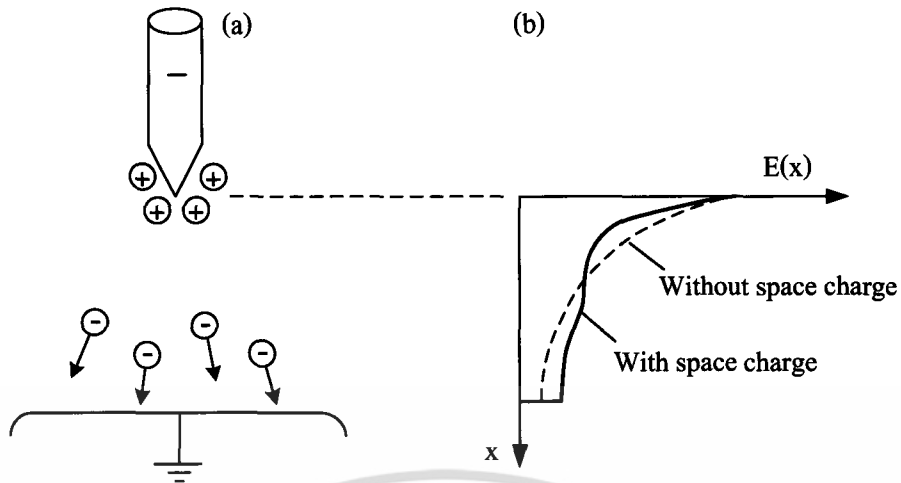


รูปที่ 2.17 ผลของประจุค้างซ์ววกที่อิเล็กโทรดปลายแหลม [9]

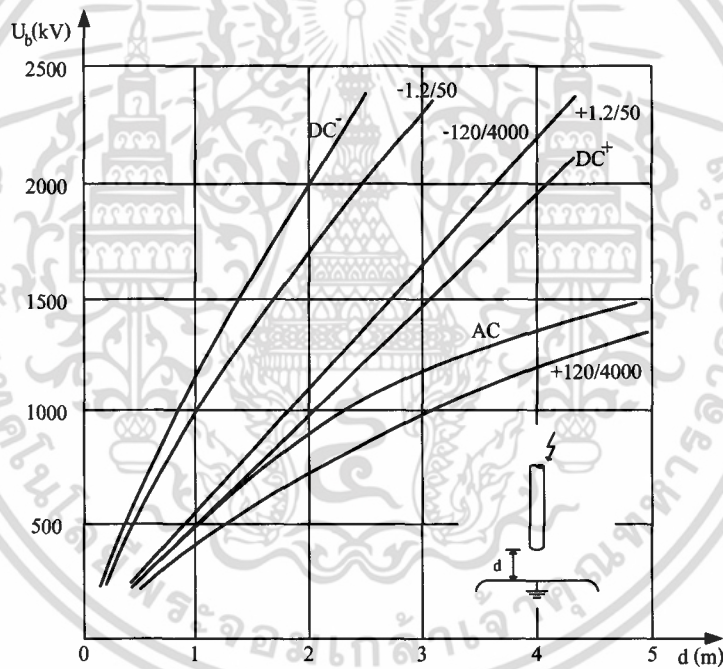
2.7.2 อิเล็กโทรดปลายแหลมเป็นขั้วลบ

เมื่อป้อนแรงดันที่เป็นขั้วลบเทียบกับแผ่นระนาบดังรูปที่ 2.18 a) เมื่อแรงดันสูงขึ้นจนโคโรน่าเริ่มเกิด แก๊สบริเวณแก๊ปจะเกิดไอออนบวกซึ่งบริเวณรอบปลายแหลม อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปหาแผ่นระนาบซึ่งเป็นขั้วบวก ไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาปลายแหลมซึ่งมีขั้วเป็นคาโอดอย่างช้าๆ และจะค้างอยู่บริเวณปลายแหลมทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณปลายแหลมมีความเครียดเพิ่มสูงขึ้น แต่สนามไฟฟ้าบริเวณแผ่นระนาบจะมีลักษณะสม่ำเสมอเนื่องจากประจุค้างจึงทำให้เกิดเบรกดาวนซ์ได้ง่ายขึ้น กล่าวโดยสรุปคือ ผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรกดาวนซ์ววกมีค่าสูงขึ้น

ผลของประจุค้างจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ย้อนแรงดัน ดังนั้นแรงดันเบรกดาวนซ์ววกกระแสตรงและอิมพัลส์ จะมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาวนซ์ววก ส่วนในกรณีของแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ ค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ววกจะสูงกว่าแบบสวิตซ์ขั้วววกเล็กน้อย เนื่องจากแรงดันกระแสสลับมีทั้งขั้วววกและลบสลับไปมาตลอดเวลา ทำให้ผลของประจุค้างมีทั้งขั้วววกและลบจากลักษณะของประจุค้างที่อธิบายข้างต้นทำให้แรงดันเบรกดาวนซ์ววกกระแสสลับมักจะเกิดขึ้นที่ค่ายอดคาบววกก่อนเสมอ



รูปที่ 2.18 ผลของประจุค้างขั้วลบที่อิเล็กโทรดปลายแหลม [9]



รูปที่ 2.19 แรงดันเบรกดาว์ชนิดต่างๆของอิเล็กโทรดแท่งกับระนาบในอากาศที่สภาวะมาตรฐาน [9]

2.8 การป้องกันแรงดันเกินด้วยอาร์กชิงฮอ์น

อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่มีราคาถูกและการติดตั้งที่ง่ายรวมถึงมีความทนทานต่อสภาพอากาศ สิ่งที่ได้กล่าวไปข้างต้นนั้นคือคุณสมบัติของอาร์กชิงฮอ์นหรือสปาร์กแก๊ปที่มีลักษณะเป็นตัวนำหรืออิเล็กโทรดวางห่างกันทำให้เกิดช่องว่างระหว่างกันขึ้น ซึ่งช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดควรที่

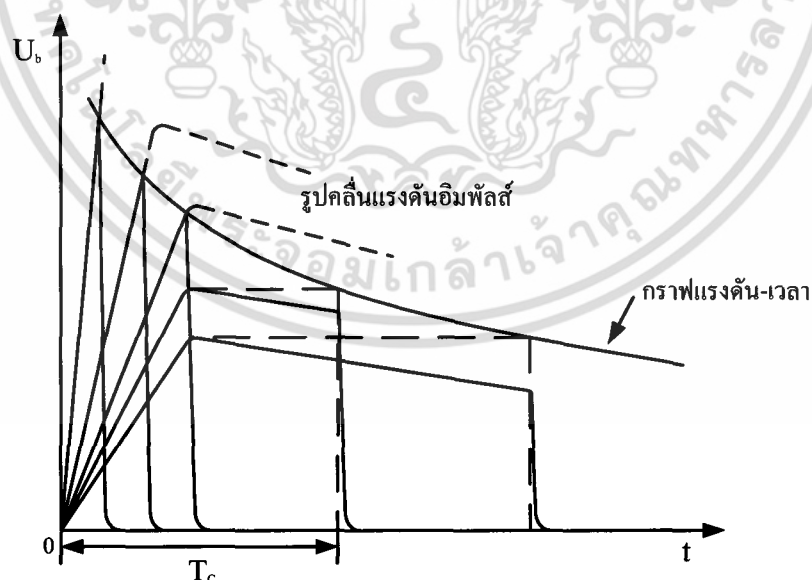
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสามารถที่จะทนแรงดันสูงสุดของระบบปกติได้โดยไม่เกิดเบรกดาวนขึ้นระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ แต่ก็จะต้องเกิดเบรกดาวนขึ้นเมื่อแรงดันเกินเข้ามาเพื่อทำการป้องกันอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งหลักการการทำงานของอาร์กชิงฮอร์นจะอาศัยแก๊สที่มีคุณสมบัติที่เป็นฉนวนและเมื่อถึงสภาวะหนึ่งก็สามารถที่จะแปรสภาพเป็นตัวนำได้โดยทฤษฎีเบรกดาวนในแก๊สที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอาร์กชิงฮอร์นจะใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรองในกรณีที่อุปกรณ์ป้องกันหลักทำงานผิดพลาด

การใช้อาร์กชิงฮอร์นในการป้องกันจะอาศัยหลักการเส้นกราฟแรงดัน-เวลา (V-t curve) ของอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันและกราฟแรงดัน-เวลาของอาร์กชิงฮอร์นดังรูปที่ จะเห็นว่าค่าควรจะต้องเลือกระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ให้เหมาะสมกับชนิดของแรงดันเกินชนิดต่างๆ ที่มีความชันต่างกัน เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้

2.8.1 กราฟแรงดัน-เวลา (Voltage time characteristics)

กราฟแรงดันเวลาแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนกับเวลาเบรกดาวน ซึ่งได้จากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันต่างๆ กัน แล้ววัดค่าแรงดันเบรกดาวน (U_b) ถ้าเกิดเบรกดาวนช่วงหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ค่าแรงดันเบรกดาวนจะมีค่าเท่ากับค่ายอด แต่ถ้าเกิดเบรกดาวนช่วงหน้าคลื่น ค่าแรงดันเบรกดาวนจะเท่ากับแรงดันตรงจุดที่เกิดเบรกดาวน ซึ่งทุกค่าแรงดันที่เบรกดาวนจะได้ค่าเวลาที่เกิดเบรกดาวน (T_c) และเมื่อนำค่า U_b และ T_c มาเขียนกราฟจะทำให้ได้กราฟเส้นแรงดัน-เวลาของอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะกราฟแรงดัน-เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสนามไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอลักษณะกราฟแรงดัน-เวลาที่ช่วงเวลา (t) สั้นๆ ($< 1 \mu\text{s}$) ค่าแรงดันเบรกดาวนจ์จะมีค่าต่ำกว่าในกรณีของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนดังรูป 2.21 ซึ่งเป็นกราฟแรงดัน-เวลาของช่องว่างอากาศของอิเล็กโทรดทรงกลม-ทรงกลมกับอิเล็กโทรดแท่ง-แท่ง

ความแตกต่างของกราฟแรงดัน-เวลาของแก๊ปทั้งสองข้างต้นสามารถอธิบายด้วยผลของเวลาล่าช้าการเกิดเบรกดาวนจ์ (Time lag ; t_l) [เวลาล่าช้าประกอบด้วย เวลาในการหาอิเล็กตรอนเริ่มต้น (Statistical time lag ; t_s) และเวลาในการสร้างอะวาลานซ์อิเล็กตรอน (Formative time ; t_f) ในช่วงเวลาสั้นๆ เวลาล่าช้า ($t_l = t_s + t_f$) มีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวนจ์ ความแตกต่างของกราฟแรงดัน-เวลาจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญดังต่อไปนี้]

- 1) ปริมาตรของแก๊ปยังผล
- 2) ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าในช่องว่างอากาศ



รูปที่ 2.21 กราฟแรงดัน-เวลาของแก๊ปทรงกลมกับแก๊ปแท่งปลายแหลม

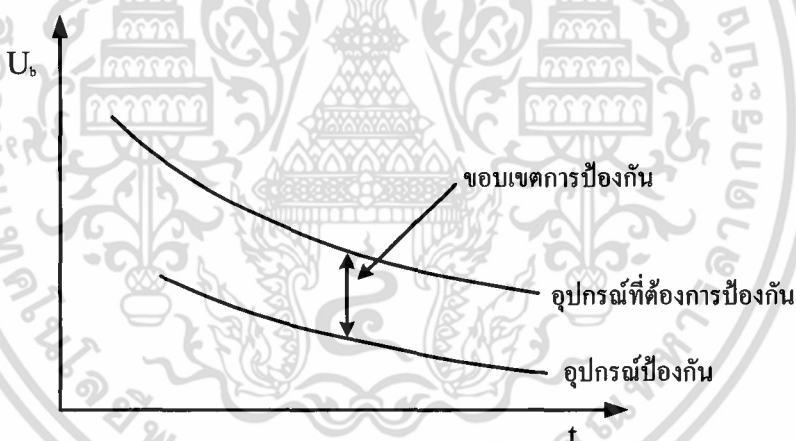
ในกรณีของแก๊ปทรงกลมเทียบกับแก๊ปแท่งปลายแหลมจะสังเกตเห็นได้ว่าปริมาณแก๊ปยังผลของแก๊ปทรงกลมมีมากกว่า ทำให้มีโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นได้ง่ายกว่า และลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าในแก๊ปทรงกลมมีความสม่ำเสมอมากกว่า โอกาสในการสร้างอะวาลานซ์จึงมีมากกว่าและง่ายกว่า ซึ่งลักษณะกราฟแรงดัน-เวลานี้จะนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเช่นหม้อแปลงเป็นต้น โดยการปรับตั้งระยะช่องว่างให้เกิดเบรกดาวนจ์ได้ง่ายกว่าที่บุชชิ่งหรือการป้องกันไม่ให้เกิดวาปไฟตามผิวที่ลู่ด้วยไฟฟ้า

2.8.2 หลักการในการพิจารณาเลือกอุปกรณ์ป้องกัน

อุปกรณ์ป้องกันมีหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินที่เข้ามาในระบบไฟฟ้าเพื่อไม่ให้สร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ภายในระบบดังกล่าว ดังนั้นในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่จะนำมาป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

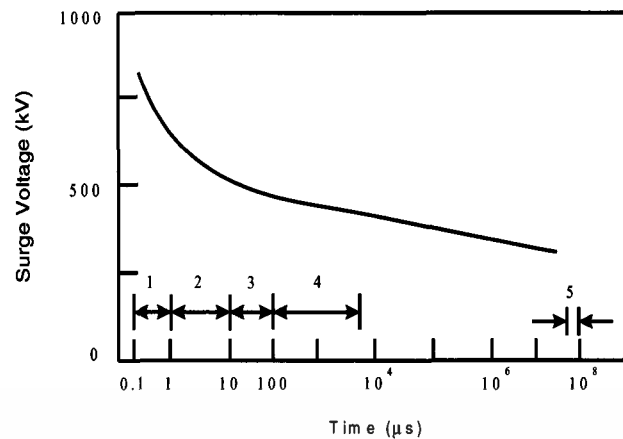
1. จะต้องไม่เกิดการเบรกดาวนขึ้นจากระดับแรงดันใช้งาน
2. คุณสมบัติของกราฟแรงดัน-เวลาของอุปกรณ์ป้องกันจะต้องต่ำกว่าค่าคงทนต่อแรงดัน BIL ของอุปกรณ์
3. ควรจะสามารถที่จะถ่ายเทพลังงานที่สูงของแรงดันเกินได้อย่างรวดเร็ว และจะต้องกลับคืนสภาพการเป็นฉนวนได้อย่างรวดเร็ว
4. และจะต้องไม่เกิดสภาวะกระแสไหลต่อเนื่อง (Follow current) จากแรงดันใช้งาน

ในการกำหนดระยะห่างของอิเล็กโทรดนั้นจะกำหนดได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างกราฟแรงดัน-เวลาของฉนวนอุปกรณ์ที่จะทำการป้องกันกับอุปกรณ์ป้องกันโดยจะทำการกำหนดให้อยู่ในช่วงของขอบเขตการป้องกันดังรูปที่ 2.22

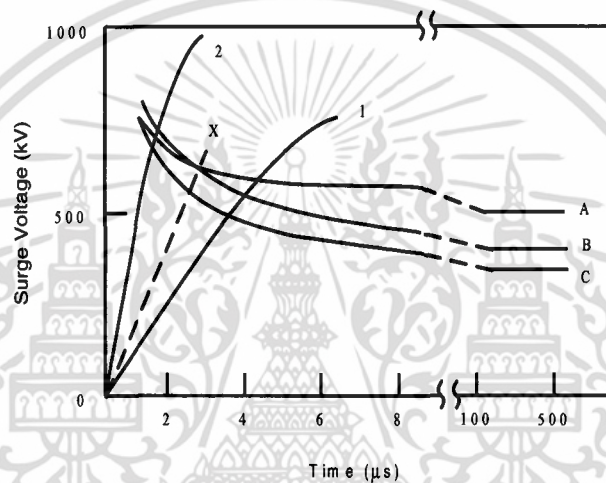


รูปที่ 2.22 ขอบเขตการป้องกันในกราฟแรงดัน-เวลา

ตัวอย่างการหาระยะของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินโดยใช้อาร์กชิงฮอร์นป้องกันหม้อแปลง 115 kV ซึ่งมีค่า BIL เท่ากับ 550 kV เทียบกับค่าแรงดัน-เวลาของอาร์กชิงฮอร์นที่มีระยะห่าง 67 cm และ 79 cm ดังรูปที่ 2.23



a) Surge Voltage



b) v-t curve

- | | |
|--------------------------------|-------------------|
| 1. Slow front lightning surge | A BIL Transformer |
| 2. Steep front lightning surge | B Rod Gap 79 cm |
| X Critical Slope | C Rod Gap 67 cm |

รูปที่ 2.23 ตัวอย่างการหาระยะห่างของอาร์กชิงฮอร์นป้องกันหม้อแปลง

จากรูปจะเห็นได้ว่าควรจะเลือกระยะห่างของอาร์กชิงฮอร์นให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของแรงดันเกินซึ่งในระบบ 115 kV แรงดันเกินฟ้าผ่าจะครอบคลุมแรงดันเกินสวิตซ์ด้วยดังนั้นจึงพิจารณาที่แรงดันเกินฟ้าผ่าเป็นหลัก ซึ่งจากรูปที่ 2.23 สามารถพิจารณาเพื่อเลือกระยะห่างของอาร์กชิงฮอร์นเพื่อมาใช้ในการป้องกันหม้อแปลง 115 kV โดยจะเลือกที่ระยะห่าง 79 cm

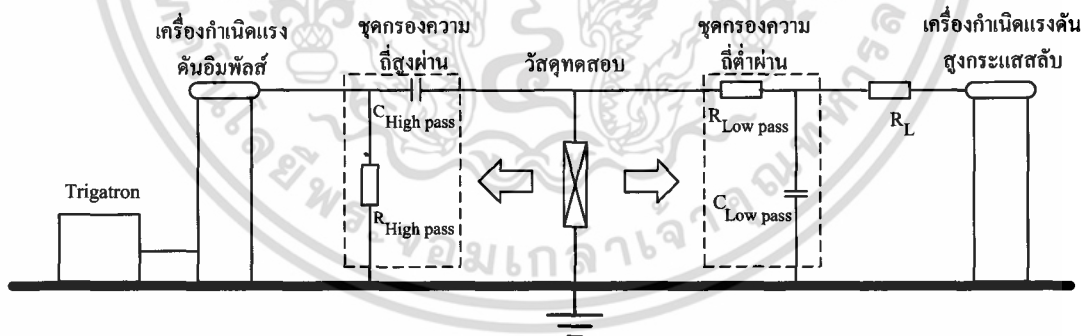
บทที่ 3

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันเพียงชนิดเดียว เช่น แรงดันกระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์เป็นต้น จะไม่สอดคล้องกับสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในระบบขณะที่ใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าแรงสูงในสภาวะปกติจะได้รับแรงดันกระแสสลับที่พิกัดอยู่ตลอดเวลา เมื่อเกิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นจะทับซ้อนอยู่บนแรงดันกระแสสลับทำให้พฤติกรรมความเครียดสนามไฟฟ้าและพฤติกรรมเกิดการเบรกดาวนที่เกิดขึ้นบนฉนวนอาจมีความแตกต่างกันกับการได้รับแรงดันเพียงชนิดเดียว เพื่อให้สามารถทดสอบการฉนวนได้ใกล้เคียงกับสภาวะจริงของการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้า จึงได้มีการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ขึ้นมาเพื่อจะสามารถทำการทดสอบได้เหมือนจริงมากที่สุด

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับจะประกอบไปด้วย

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- 2) เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสสลับ
- 3) เครื่องกรองความถี่
- 4) เครื่องควบคุมมุมทดสอบ

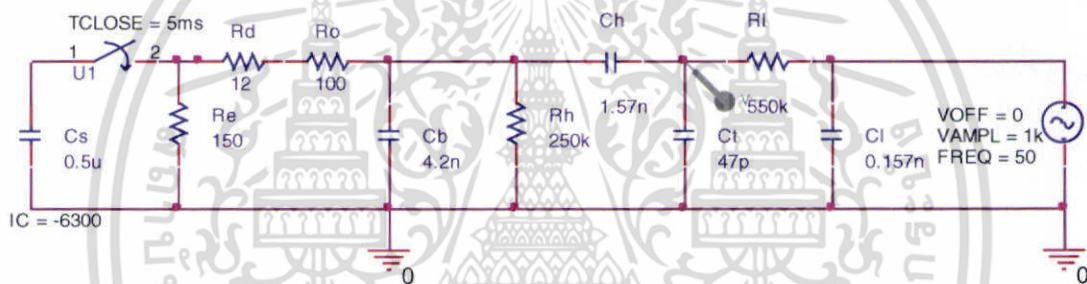


รูปที่ 3.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

เพื่อให้สามารถเข้าใจหลักการการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ จึงได้ทำการจำลองวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยกำหนดให้สวิตช์ปิดวงจรที่เวลา 5 ms สำหรับการเกิดขึ้นของแรงดันอิมพัลส์ที่มุม 90° ของแรงดันกระแสสลับ และให้สวิตช์ปิดวงจรที่เวลา 15 ms สำหรับการเกิดขึ้นของแรงดันอิมพัลส์ที่มุม 180° ของแรงดันกระแสสลับ

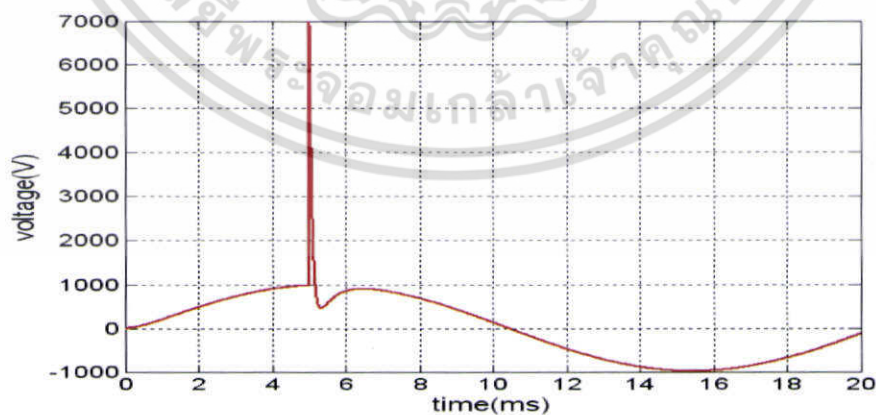
การจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซ้อนบนแรงดันกระแสสลับมีค่าองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

| | | |
|------------------------|-------|---------------|
| - ค่ายอดแรงดันอัดประจุ | 6 | kV |
| - ตัวเก็บประจุ C_s | 0.5 | μF |
| - ตัวเก็บประจุ C_b | 4.2 | nF |
| - ตัวเก็บประจุ C_h | 1.57 | nF |
| - ตัวเก็บประจุ C_L | 0.157 | nF |
| - ตัวเก็บประจุ C_t | 47 | pF |
| - ความต้านทาน R_d | 12 | Ω |
| - ความต้านทาน R_e | 150 | k Ω |
| - ความต้านทาน R_h | 250 | k Ω |
| - ความต้านทาน R_L | 550 | k Ω |
| - ความต้านทาน R_o | 100 | Ω |



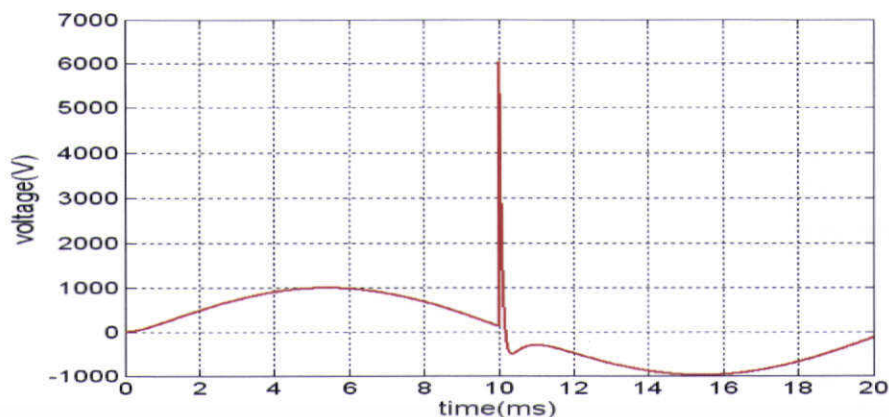
รูปที่ 3.2 วงจรที่ใช้ในการจำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Orcad แสดงได้ดังรูปที่ 3.3, 3.4



รูปที่ 3.3 ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม
แรงดันอิมพัลส์เกิดที่มุม 90° ของแรงดันกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

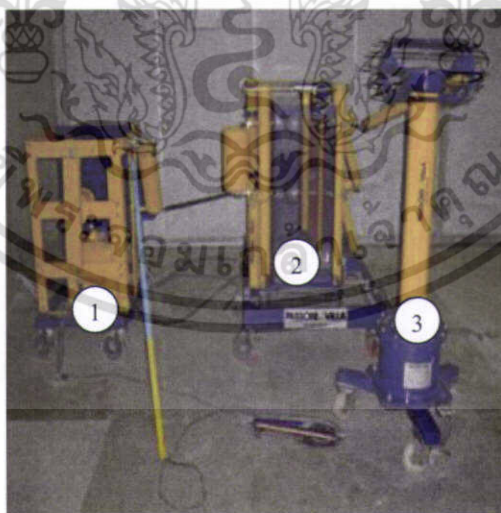


รูปที่ 3.4 ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม
แรงดันอิมพัลส์เกิดที่มุม 180° ของแรงดันกระแสสลับ

ซึ่งรายละเอียดต่างๆของส่วนประกอบในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับจริงที่ได้นำมาทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นประกอบด้วย

3.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ประกอบด้วย วงจรกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ และโวลต์เตจดีไวเดอร์ ซึ่งชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารุใช้ได้จากห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1) เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง
2) เครื่องสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 3) อิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วงจรกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ

เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับใช้สำหรับจ่ายแรงดันกระแสสลับให้กับอุปกรณ์ที่จะทำการทดสอบในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับเนื่องจากอุปกรณ์ที่ทดสอบนั้นในสภาวะปกติจะต้องรับแรงดันกระแสสลับอยู่ตลอดเวลา เครื่องกำเนิดแรงดันสูงมีพิกัด 220 V / 100 kV 50 Hz



รูปที่ 3.6 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ

3.3 ชุดกรองความถี่ต่ำผ่านและชุดกรองความถี่สูงผ่าน [12]

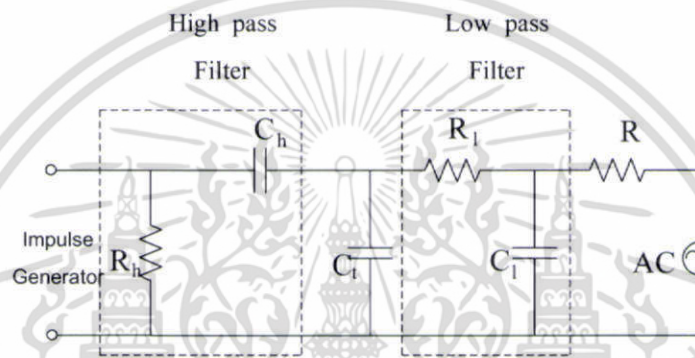
วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำและกรองผ่านความถี่สูงที่ออกแบบวงจรแบบความต้านทานกับตัวเก็บประจุลำดับที่ 1 (First order) โดยกำหนดค่าความถี่ตัดข้ามค่าต่ำๆมีค่าเป็นไปตามสมการ

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (3.1)$$

คุณสมบัติของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำคือจะยอมให้ความถี่ที่มีค่าไม่เกินความถี่ตัด (Cut-off frequency) ผ่านวงจรไปได้ก็ต่อเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นไปจนถึงค่าความถี่ตัด ความถี่นั้นจะไม่สามารถผ่านวงจรไปได้ โดยจะถูกลดทอนลงเรื่อยๆตามอัตราความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งได้ออกแบบโดยใช้ตัวต้านทานมาทำการต่ออนุกรมกันจำนวน 250 ตัว แต่ละตัวมีค่าความต้านทานเท่ากับ 2.2 k Ω ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานรวมทั้งหมดเท่ากับ 550 k Ω และใช้ตัวเก็บประจุมาทำการต่ออนุกรมกันจำนวน 140 ตัว แต่ละตัวมีค่าเก็บประจุเท่ากับ 22 nF ซึ่งจะได้ค่าเก็บประจุรวมเท่ากับ 0.157 nF และเมื่อทำการคำนวณจากสมการที่ 3.1 จะได้ความถี่ตัดมีค่า 1843 Hz

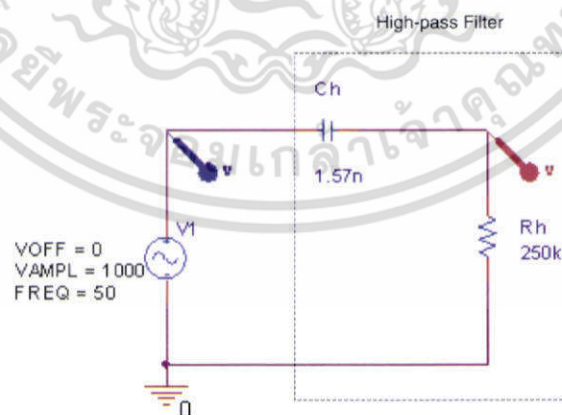
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของวงจรกรองผ่านความถี่สูงคือจะยอมให้ความถี่ที่มีค่าเกินความถี่ตัด (Cut-off frequency) ผ่านวงจรไปได้แต่เมื่อความถี่ค่าลดลงถึงความถี่ตัด ความถี่นั้นจะไม่สามารถผ่านวงจรไปได้โดยจะถูกลดทอนลงเรื่อยๆตามอัตราความถี่ที่ลดลง ซึ่งได้ออกแบบโดยใช้ตัวต้านทานมาทำการต่ออนุกรมกันจำนวน 250 ตัว แต่ละตัวมีค่าความต้านทานเท่ากับ $1\text{ k}\Omega$ ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานรวมทั้งหมดเท่ากับ $250\text{ k}\Omega$ และใช้ตัวเก็บประจุมาทำการต่ออนุกรมกันจำนวน 140 ตัว แต่ละตัวมีค่าเก็บประจุเท่ากับ 220 nF ซึ่งจะได้ค่าเก็บประจรรวมเท่ากับ 1.57 nF และเมื่อทำการคำนวณจากสมการที่ 3.1 จะได้ความถี่ตัดมีค่า 405 Hz แสดงดังวงจรตามรูปที่ 3.7 ซึ่งสามารถป้องกันแรงดันของแหล่งจ่ายทั้งสองด้านที่จะตกคร่อมซึ่งกันและกันได้โดยมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.7 ชุดกรองผ่านความถี่ต่ำและชุดกรองผ่านความถี่สูง [12]

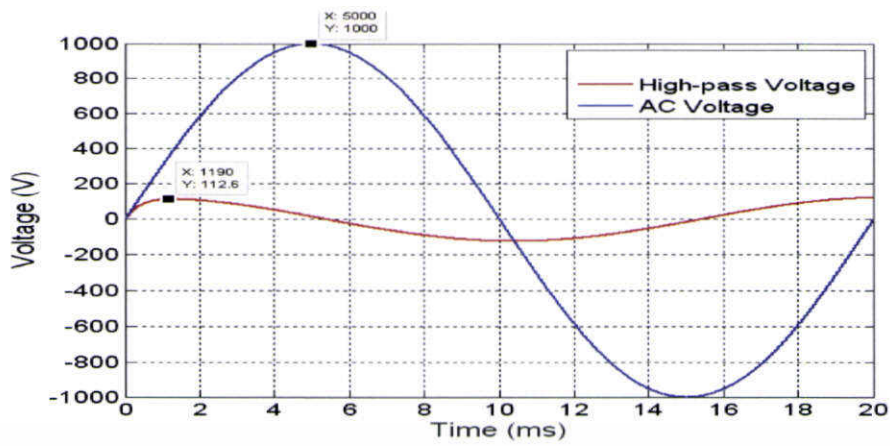
การจำลองวงจรกรองด้วยโปรแกรม Orcad
- วงจรกรองความถี่สูงผ่าน



รูปที่ 3.8 การจำลองวงจรกรองความถี่สูงผ่านด้วยโปรแกรม Orcad

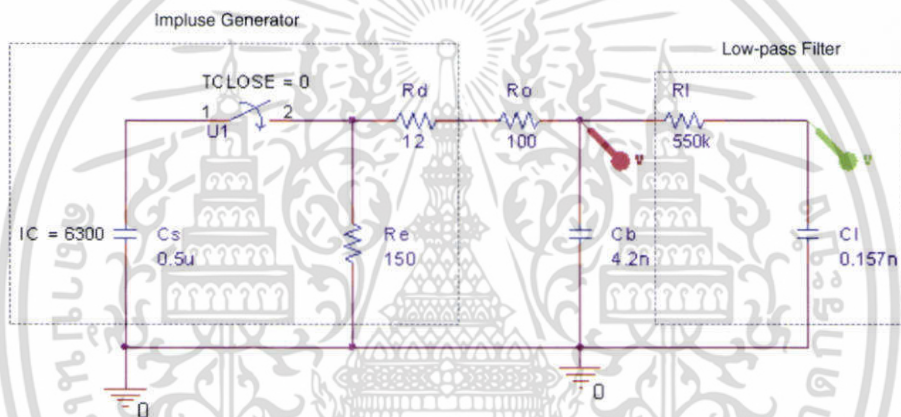
ผลจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่สูงผ่านแสดงดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



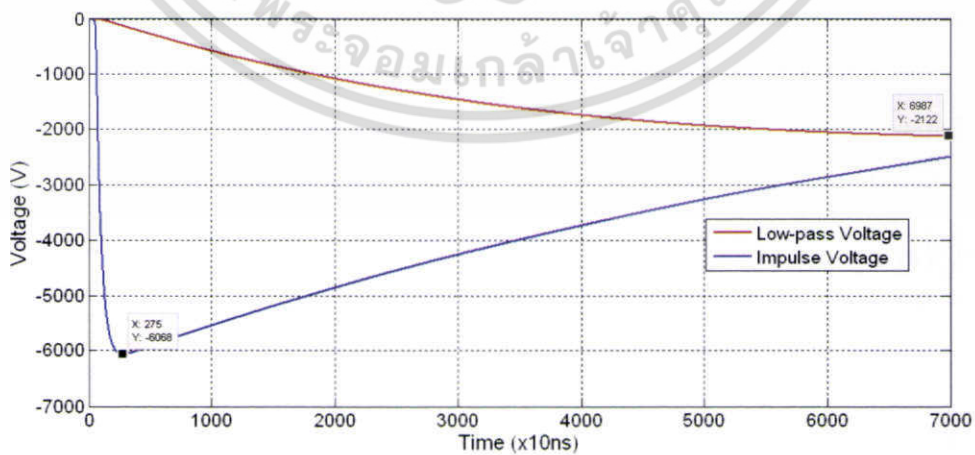
รูปที่ 3.9 ผลจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

- วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



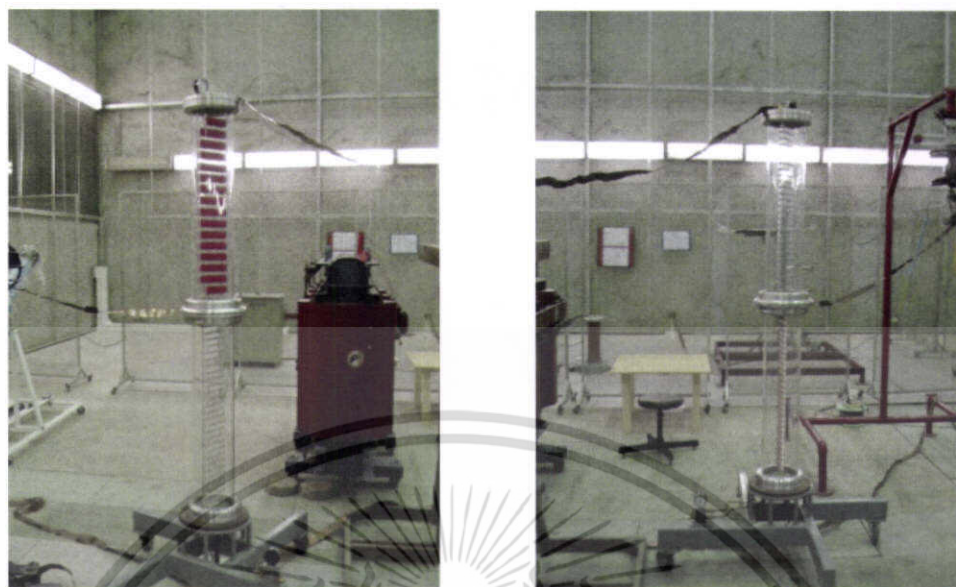
รูปที่ 3.10 การจำลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านด้วยโปรแกรม Orcad

ผลจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ผลจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) b)

รูปที่ 3.12 ชุดกรองความถี่ที่ใช้ในวงจร

a) ชุดกรองความถี่สูงผ่าน b) ชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลต่างๆ ของชุดกรองความถี่

| | R (Ω) | C (nF) | Cut-off frequency (Hz) |
|------------------|----------------|--------|------------------------|
| Low Pass Filter | 550 | 0.157 | 1843 |
| High Pass Filter | 250 | 1.57 | 405 |

3.4 ชุดควบคุมมอดูมทดสอบ [12]

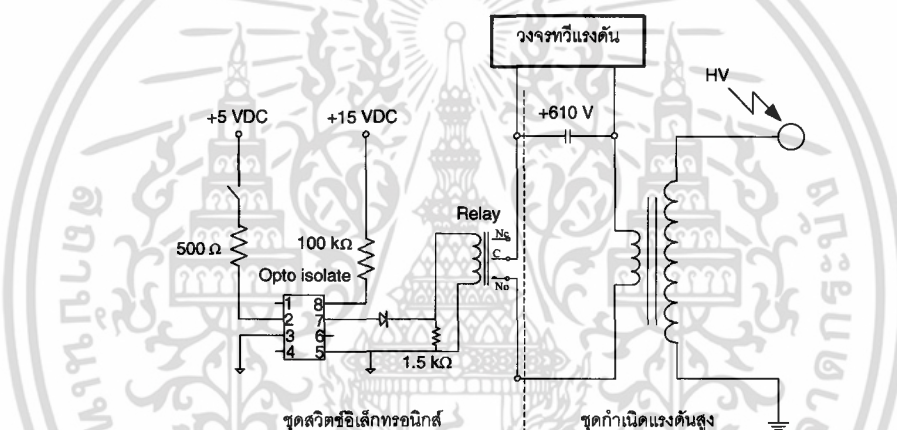
ในการกำหนดให้แรงดันอิมพัลส์ไปทับซ้อนอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการใช้อุปกรณ์เข้ามาประกอบในการกำหนดมอดูมดังกล่าว ซึ่งอุปกรณ์ที่ว่านี้คือ ชุดควบคุมมอดูมทดสอบ ในชุดควบคุมมอดูมทดสอบจะประกอบไปด้วย ชุดสวิตซ์ซีเล็คทริกทรอนิกส์ และชุดไมโครคอนโทรเลอร์ประมวลผล หลักการทำงานคือเมื่อต้องการจะให้แรงดันอิมพัลส์ไปทับซ้อนที่มอดูมไหนก็จะทำการกำหนดมอดูมดังกล่าวลงไปที่ชุดไมโครคอนโทรเลอร์ประมวลผล จากนั้นไมโครคอนโทรเลอร์ก็จะทำการสั่งให้ชุดสวิตซ์ซีเล็คทริกทรอนิกส์ ทำงานโดยส่งสัญญาณไปกระตุ้นสปาร์กแก๊ปให้เกิดการสปาร์กขึ้นทำให้มีการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ออกไปทับซ้อนที่มอดูมที่ได้ทำการกำหนดไว้

3.4.1 ชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิดวงจร โดยจะต้องได้รับคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อนจึงจะทำงาน และเมื่อรีเลย์ทำการปิดวงจรจะทำให้มีการถ่ายเทพลังงานจากตัวเก็บประจุที่อัดประจุไฟฟ้าไปยังตัวเหนี่ยวนำผ่านทางหม้อแปลงความถี่สูง

การควบคุมการเปิด-ปิดวงจรของรีเลย์ จะใช้หลักการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำของรีเลย์ ทำให้เกิดแรงจากสนามแม่เหล็กไปกระทำกับหน้าสัมผัส

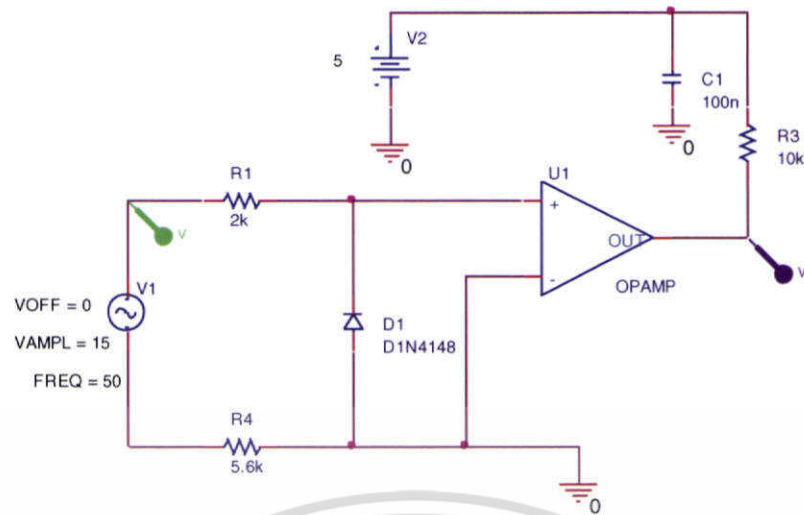
โดยจะใช้วงจรแยกทางแสง (Opto isolate) ในการควบคุมรีเลย์ซึ่งจะใช้ IC เบอร์ TLP250 เป็นตัวสร้างพัลส์ไปที่ขาขดลวดเหนี่ยวนำ จึงเสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้จากรูปที่ 3.13 ความต้านทาน 500 Ω จะจำกัดกระแสไบอัสของหลอด LED ไม่ให้สูงเกินไป ค่าความต้านทาน 100 Ω เป็นค่าความต้านทานขาออกเพื่อช่วยให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูงพอที่จะสร้างสนามแม่เหล็กให้มีแรงพอที่จะทำให้หน้าสัมผัสทำงานได้



รูปที่ 3.13 ชุดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมการกำเนิดแรงดันสูง

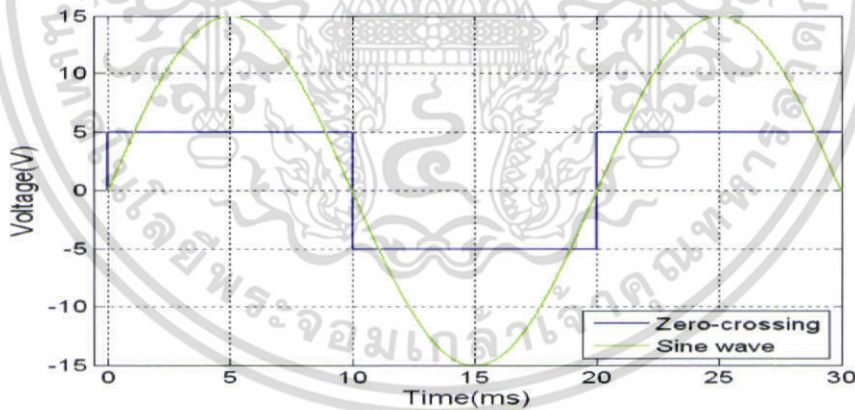
3.4.2 ชุดตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero-crossing)

เนื่องจากการที่จะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถที่จะสั่งให้มีการส่งสัญญาณกระตุ้นการทำงานให้กับชุดกำเนิดสัญญาณเริ่มต้นการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยสามารถที่จะเลือกมุมได้นั้นจำเป็นจะต้องมีการอ้างอิงมุมของแรงดันกระแสสลับ 220 V ซึ่งมุมที่นำมาทำการอ้างอิงนั้นเป็นมุม 0 องศาและ 180 องศา จึงได้มีการนำวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero-crossing) มาทำการตรวจจับเพื่อเป็นตัวอ้างอิงให้กับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์โดยเมื่อภาพคลื่นแรงดันกระแสสลับ 220 V อยู่ที่มุม 0 องศาจะทำให้ตัวตรวจจับสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมาและเมื่ออยู่ที่มุม 180 องศาตัวตรวจจับก็จะสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมาเช่นกันทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์รู้ว่าขณะนี้แรงดันอยู่ที่มุมที่เท่าใด โดยมีวงจรดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ชุดตรวจจับผ่านศูนย์

ชุดตรวจจับผ่านศูนย์จะได้รับสัญญาณอินพุตจากหม้อแปลง 220/15 V ในลักษณะรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) โดยผ่านความต้านทาน 2 k Ω และ 5.6 k Ω และสัญญาณดังกล่าวจะถูกเรกติไฟร์ด้วยไดโอดในลักษณะฮาล์ฟบริดจ์ จากนั้นสัญญาณจะถูกปรับขนาดให้เหมาะสมด้วยออปแอมป์ LM393 เพื่อส่งสัญญาณให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลซึ่งภาพคลื่นที่ชุดตรวจจับผ่านศูนย์สร้างออกมามีลักษณะดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 รูปคลื่นที่ชุดตรวจจับผ่านศูนย์สร้างออกมา

3.4.3 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล

ในส่วนของชุดประมวลผล จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นวงจรควบคุมการทำงาน โดยจะรับค่าจากชุดตรวจจับ ซึ่งเป็นตัวอ้างอิงมุมของแรงดันให้เท่ากันระหว่างมุมของแรงดันกระแสสลับและมุมที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการพร้อมกับรับค่าการกดสวิตช์ควบคุมจากคีย์แพด และแสดงผล

การทำงานที่จอแอลซีดี ในส่วนของซอฟต์แวร์นั้นสามารถอธิบายตามโพล์ชาร์ตในรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 หลักการในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ [12]

ในการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อนำมาควบคุมมุมเฟสเพราะมีความรวดเร็วมากเมื่อเทียบกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ซึ่งมีค่าเท่ากับ 50 Hz และโดยปกติคริสตอลที่ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีค่าประมาณ 4 ถึง 20 MHz ซึ่งมากพอในการประมวลผล

ในการที่จะอ้างอิงความถี่จะใช้ชุดตรวจจับผ่านศูนย์มาเป็นชุดตรวจจับเพื่อส่งสัญญาณไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์รู้ถึงสถานะของเฟสที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน และเมื่อทำการแปลงความถี่ให้อยู่ในเทอมของคาบเวลาจะได้ 20 ms จาก

$$T = \frac{1}{f} \quad (3.2)$$

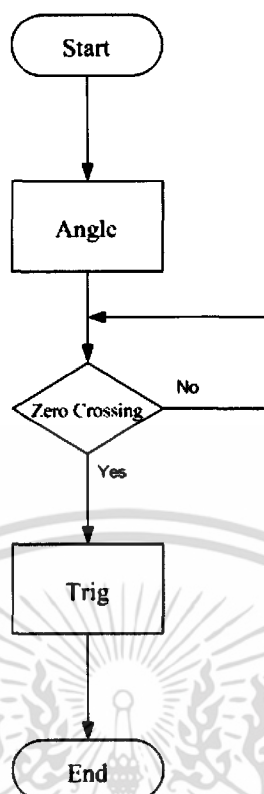
จากนั้นก็จะมาพิจารณาช่วงคาบเวลาของความถี่ 50 Hz ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงบวกและช่วงลบช่วงละ 10 ms และในการสร้างชุดควบคุมนี้จะต้องทำการปรับมุมได้ตั้งแต่ 0 – 360 องศา เมื่อทำการคำนวณหามุมที่ 1° จะต้องใช้เวลาร่วมกับ 55.555 μ s จากนั้นก็จะทำการเขียนโปรแกรมควบคุมให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ทำงานที่ตำแหน่งมุมเฟสที่ต้องการ

ตารางที่ 3.2 ค่าเวลาที่ใช้ในการตั้งโปรแกรมให้กับชุดควบคุมมุมเฟส

| มุม (องศา) | เวลา (ms) |
|------------|-----------|
| 0 | 0 |
| 45 | 2.5 |
| 90 | 5 |
| 135 | 7.5 |
| 180 | 10 |
| 225 | 12.5 |
| 270 | 15 |
| 315 | 17.5 |

หมายเหตุ

มุม 0° มีค่าเท่ากับ มุม 360°



รูปที่ 3.16 โพล์ชาร์ทการทำงานของชุดควบคุมทดสอบ

หมายเหตุ คำที่ใช้สื่อความหมายในโพล์ชาร์ตอธิบายได้ดังนี้

- Start หมายถึง เริ่มการทำงานของชุดควบคุมทดสอบ
- Angle หมายถึง การป้อนมุมที่ต้องการทำการทดสอบเช่น 0° 45° 90°
- Zero crossing หมายถึง สัญญาณ Zero crossing ที่ระบุตำแหน่งของแรงดันกระแสสลับ
- Angle = Key หมายถึง การปรับค่าของมุมเฟสที่ต้องการ (คือ 0,5,10...360) ด้วยการปรับที่คีย์แพด
- Trig หมายถึง การแสดงผลมุมที่ได้ทำการเลือกไว้และส่งสัญญาณกระตุ้นไปที่ชุดทริกเกอร์

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

ในการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแห้ง-แห้งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับนั้นจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ด้วยกันคือ

- 1) การศึกษาการเกิดเบรกดาวน์ในช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแห้ง-แห้งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ
- 2) การศึกษาการเกิดเบรกดาวน์ของอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

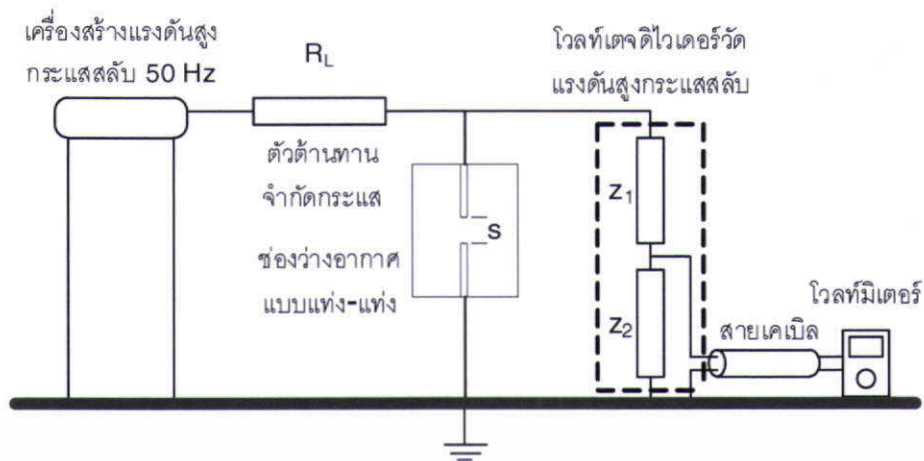
4.1 การศึกษาการเกิดเบรกดาวน์ในช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแห้ง - แห้งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

ในการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแห้ง-แห้งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ เป็นการศึกษาผลกระทบของมุมที่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าไปทับซ้อนว่ามีผลกระทบหรือไม่อย่างไรซึ่งมุมที่ทดสอบจะมีการเชื่อมโยงกับค่าคาบเวลาของแรงดันกระแสสลับ ในการทดสอบจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 หัวข้อการทดสอบดังนี้ :

- 1) การทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ของแรงดันกระแสสลับ
- 2) การทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า ($U_{b50\%}$)
- 3) การเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่มุมต่างๆ

4.1.1 การเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันกระแสสลับ

การทดสอบเพื่อหาแรงดันเบรกดาวน์ของแรงดันกระแสสลับ 50 Hz วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ซึ่งทำการทดสอบโดยการกำหนดระยะห่างของช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแห้ง-แห้งให้มีขนาดคงที่เท่ากับ 3 เซนติเมตร โดยจะทำการทดสอบ 5 ครั้งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย และในการทดสอบทุกครั้งจะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นและความดันบรรยากาศ เพื่อนำไปหาตัวประกอบแก้ไขสถานะบรรยากาศ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าว มีค่าเท่ากับ $30.95 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ซึ่งเป็นค่าที่แก้ไขเป็นสถานะมาตรฐานแล้วตามมาตรฐาน



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ

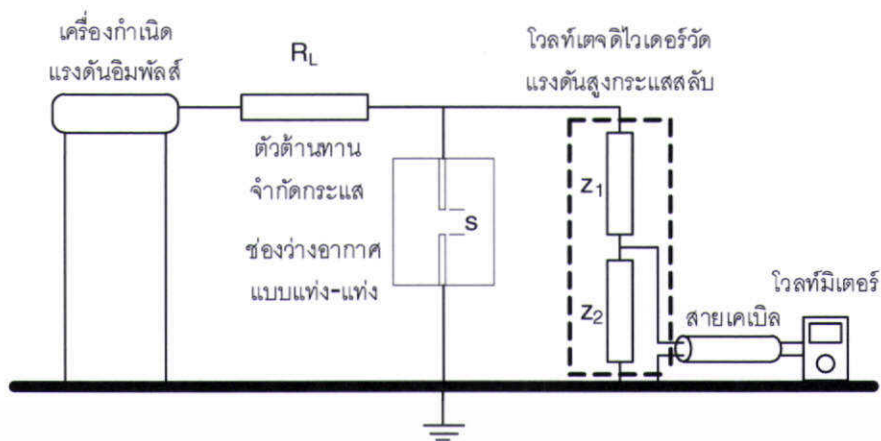


รูปที่ 4.2 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับจริง

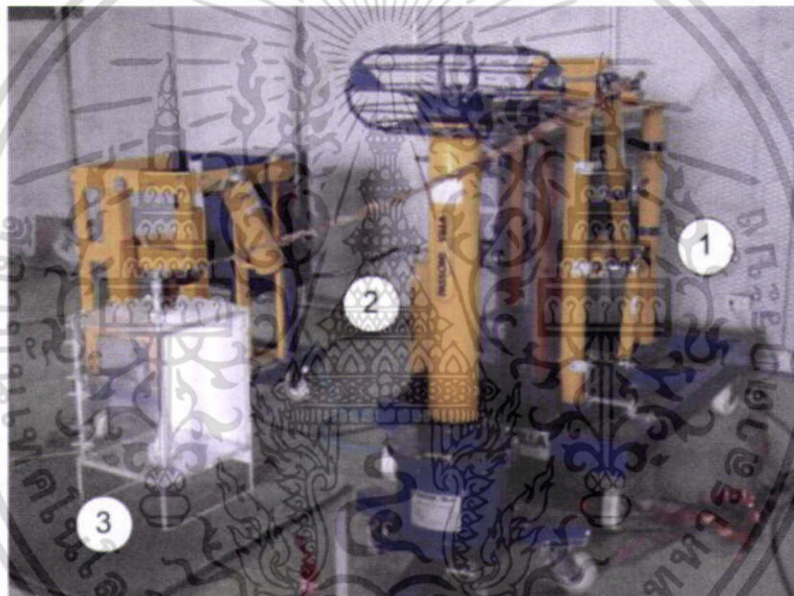
4.1.2 แรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า ($U_{b50\%}$)

การทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ซึ่งในทำการทดสอบจะกำหนดระยะห่างของช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแห้ง-แห้งไว้ที่ 3 เซนติเมตร โดยทำการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน $1.2/50 \mu s$ ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [13] ทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติ โดยใช้วิธีการปรับขึ้นลง (Up and down method) [4] จำนวน 20 ครั้ง และในการทดสอบทุกครั้งจะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นและความดันบรรยากาศ ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นค่าที่แก้ไขเป็นสภาวะมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบหาแรงดันเบรกคาว์นทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า



รูปที่ 4.4 วงจรที่ใช้ทดสอบหาแรงดันเบรกคาว์นทางสถิติของแรงดันอิมพัลส์จริง

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- 2) อิมพัลส์ฟ้าผ่าโวลต์เตจดีไวเดอร์
- 3) ช่องว่างอากาศของอิเล็คโทรดแบบแท่ง-แท่ง

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันเบรกคาว์นทางสถิติของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ ที่สภาวะมาตรฐาน

| ขั้ว | แรงดัน U_b 50% (kVp) |
|------|------------------------|
| - | 43.06 |
| + | 42.87 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

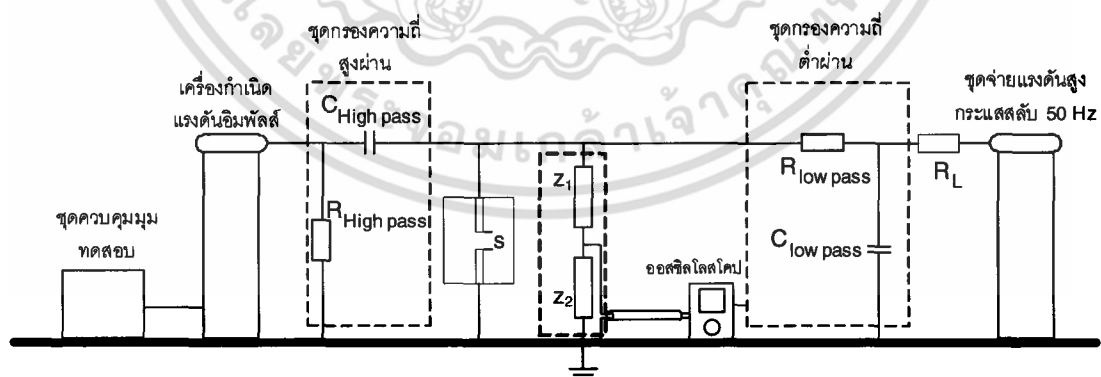
4.1.3 การเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ

การทดสอบการเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่มุมต่างๆ วงจรการทดสอบแสดงรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ซึ่งได้กำหนดระยะห่างของช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแห้ง-แห้งไว้ที่ระยะ 3 เซนติเมตร จะทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 90 %, 80 % และ 70 % ของแรงดันเบรกดาวนกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

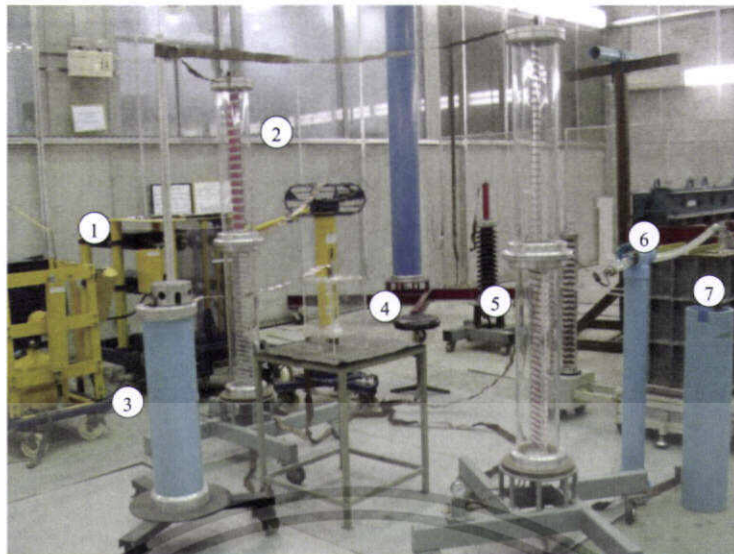
จากข้อมูลการทดสอบทั้งสองกรณีข้างต้นพบว่าค่าแรงดันเบรกดาวนกระแสสลับ 50 Hz เท่ากับ 30.95 kV แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบเท่ากับ 43.06 kV และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวกเท่ากับ 42.87 kV จากนั้นจะทำการหาค่าแรงดันทั้ง 3 ชนิดเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อที่จะใช้ทดสอบการเกิดเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบการเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

| เปอร์เซ็นต์ (%) | แรงดันกระแสสลับ (kV _p) | แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก (kV) | แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ (kV) |
|-----------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 90 | 27.85 | 38.58 | -38.75 |
| 80 | 24.76 | 34.29 | -34.44 |
| 70 | 21.65 | 30 | -30.13 |



รูปที่ 4.5 วงจรการทดสอบการเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ [14]



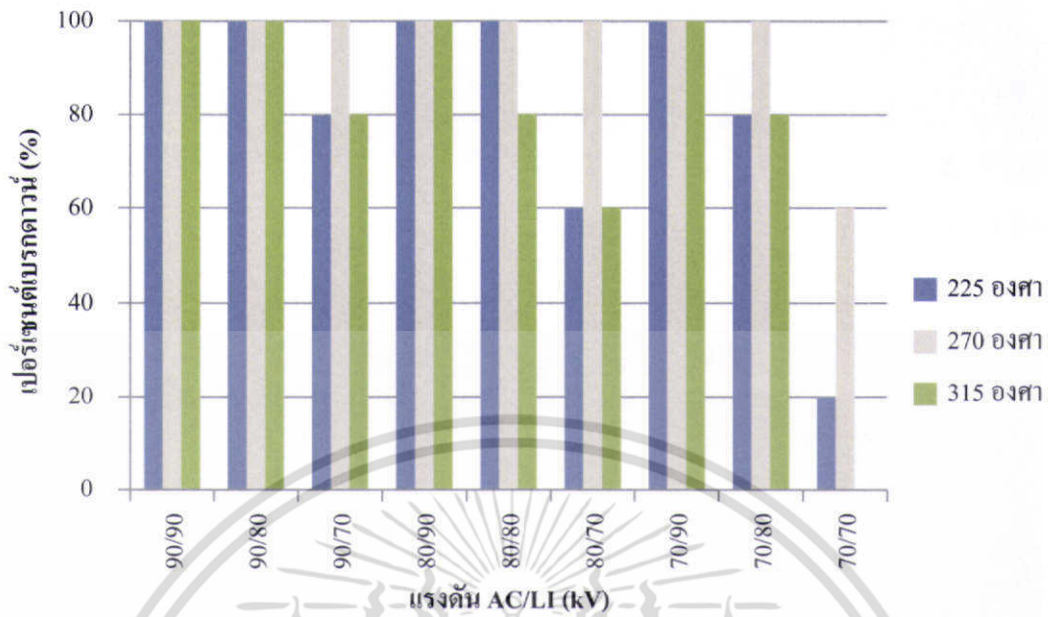
รูปที่ 4.6 วงจรที่ใช้ทดสอบจริง 1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 200 kV
2) ชุดกรองความถี่สูงผ่าน 3) โวลต์เตจดีไวเดอร์ 4) ช่องว่างอากาศ 5) ชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน
6) ความต้านทานจำกัดกระแส 7) ชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV

ในการทดสอบจะกำหนดมุมที่ต้องการทดสอบดังนี้ 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° และ 315° ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบแต่ละมุมจะทำการทดสอบโดยการจ่ายแรงดันให้เกิดเบรกดาว์น 5 ครั้งแล้วหาค่าเปอร์เซ็นต์การเบรกดาว์นที่แต่ละมุมแสดงค่าในตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.3 การเบรกดาว์นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบที่บัสช้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่มุมต่างทางด้านครึ่งลบของแรงดันกระแสสลับ

| เปอร์เซ็นต์ของแรงดัน AC/LI (%) | เบรกดาว์น/ไม่เบรกดาว์น (ครั้ง) | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 90/90 | 0/5 | 5/0 | 5/0 | 5/0 |
| 90/80 | 0/5 | 5/0 | 5/0 | 5/0 |
| 90/70 | 0/5 | 4/1 | 5/0 | 4/1 |
| 80/90 | 0/5 | 5/0 | 5/0 | 5/0 |
| 80/80 | 0/5 | 5/0 | 5/0 | 4/1 |
| 80/70 | 0/5 | 3/2 | 5/0 | 3/2 |
| 70/90 | 0/5 | 5/0 | 5/0 | 5/0 |
| 70/80 | 0/5 | 4/1 | 5/0 | 4/1 |
| 70/70 | 0/5 | 1/4 | 5/0 | 0/5 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

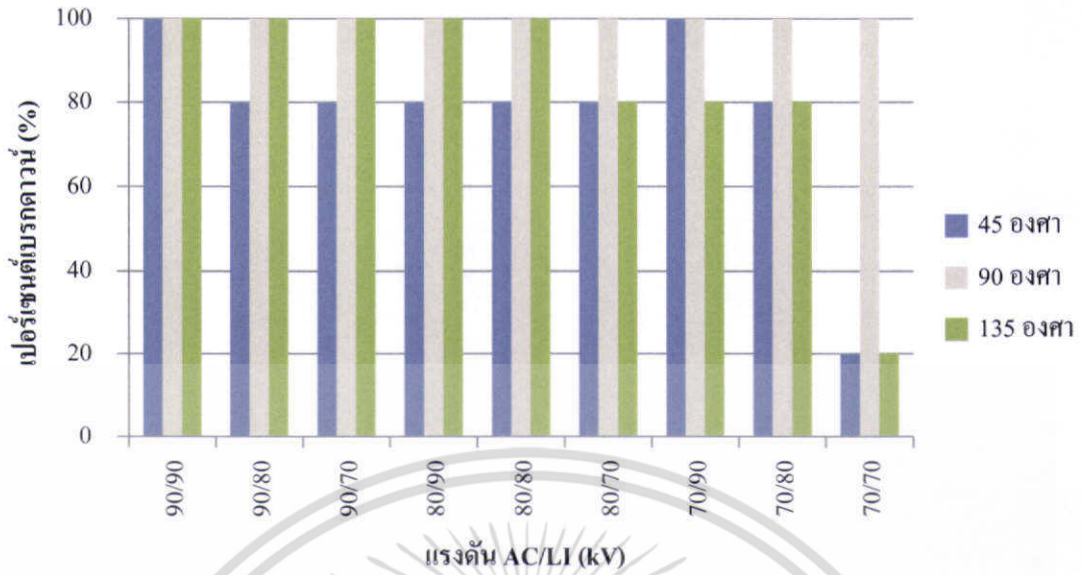


รูปที่ 4.7 เปอร์เซนต์การเบรกความของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ
ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz

ตารางที่ 4.4 การเบรกความของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ ทางด้านครึ่งบวกของแรงดันกระแสสลับ

| เปอร์เซ็นต์ของแรงดัน AC/LI ⁺ (%) | เบรกความ/ไม่เบรกความ (ครึ่ง) | | | |
|--|------------------------------|-----|-----|------|
| | 0° | 45° | 90° | 135° |
| 90/90 | 0/5 | 5/0 | 5/0 | 5/0 |
| 90/80 | 0/5 | 4/1 | 5/0 | 5/0 |
| 90/70 | 0/5 | 4/1 | 5/0 | 5/0 |
| 80/90 | 0/5 | 4/1 | 5/0 | 5/0 |
| 80/80 | 0/5 | 4/1 | 5/0 | 4/1 |
| 80/70 | 0/5 | 4/1 | 5/0 | 4/1 |
| 70/90 | 0/5 | 5/0 | 5/0 | 4/1 |
| 70/80 | 0/5 | 4/1 | 5/0 | 4/1 |
| 70/70 | 0/5 | 1/4 | 5/0 | 1/4 |

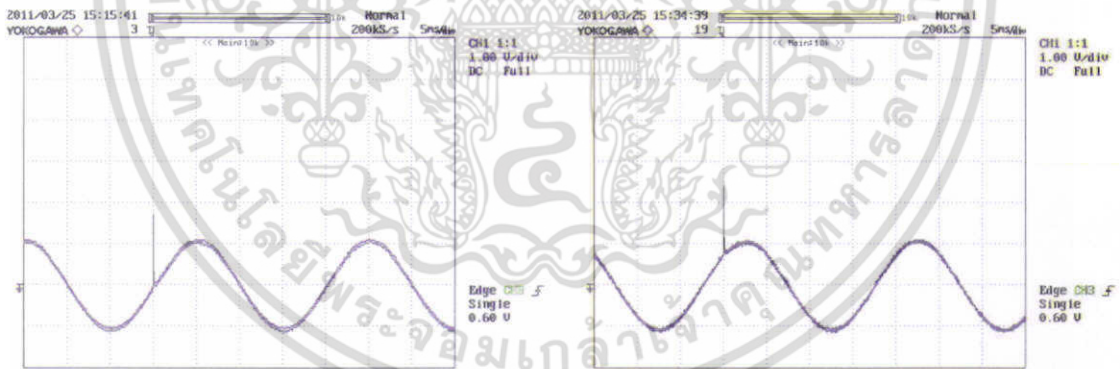
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เปอร์เซนต์การเบรกตาวนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่ข้อขนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz

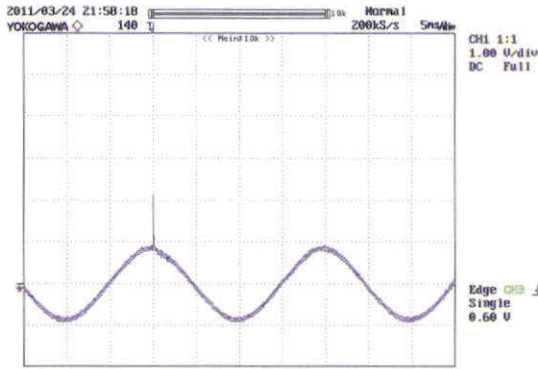
4.2 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ข้อขนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ

4.2.1 ลักษณะรูปคลื่นที่ไม่เกิดการเบรกตาวน

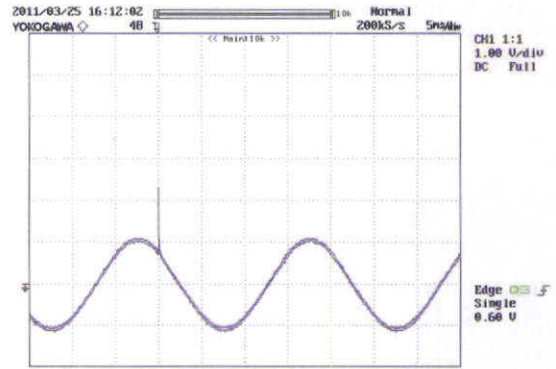


รูปที่ 4.9 ลักษณะรูปคลื่นที่ข้อขน a) 0° b) 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

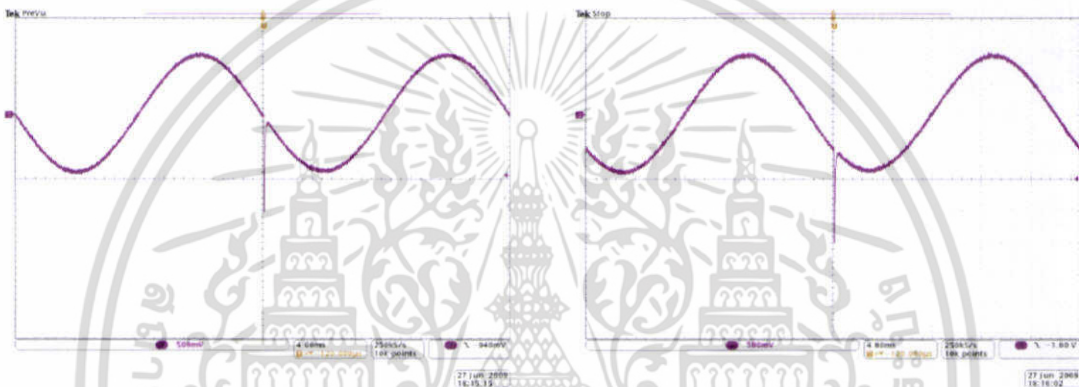


a)



b)

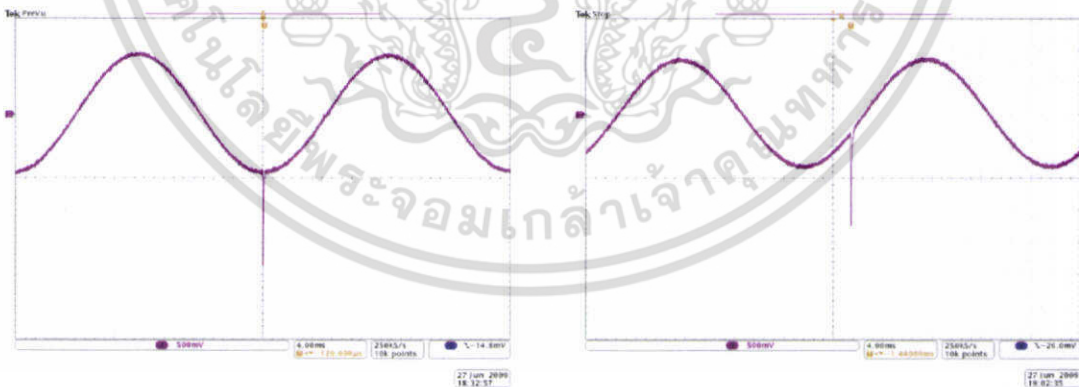
รูปที่ 4.10 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 90° b) 135°



a)

b)

รูปที่ 4.11 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 180° b) 225°



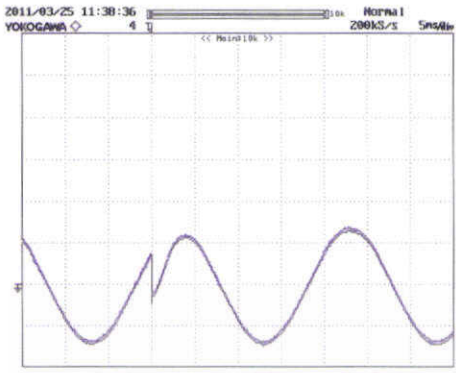
a)

b)

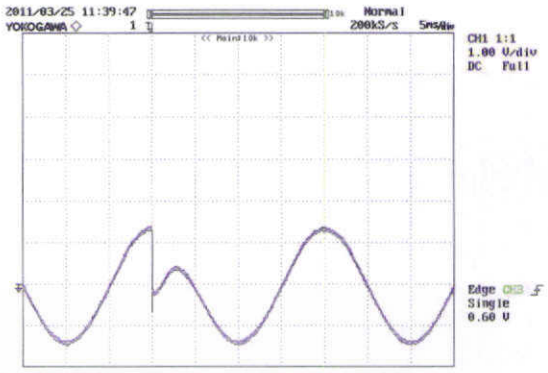
รูปที่ 4.12 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 270° b) 315°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ลักษณะรูปคลื่นที่เกิดการเบรกดาวน์

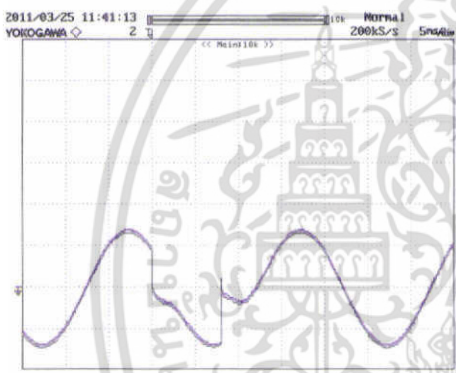


a)

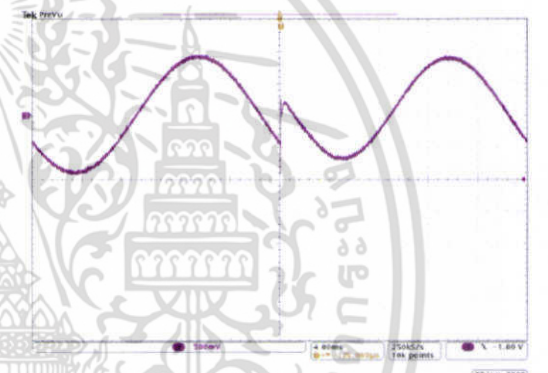


b)

รูปที่ 4.13 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 45° b) 90°

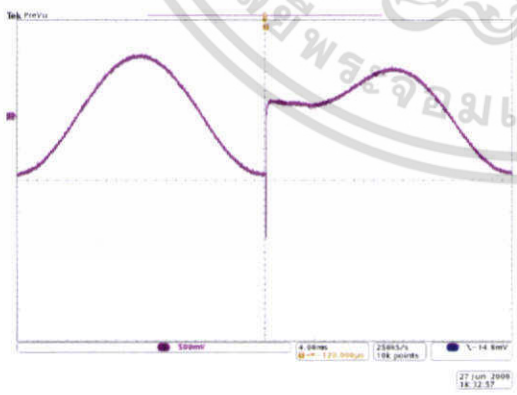


a)

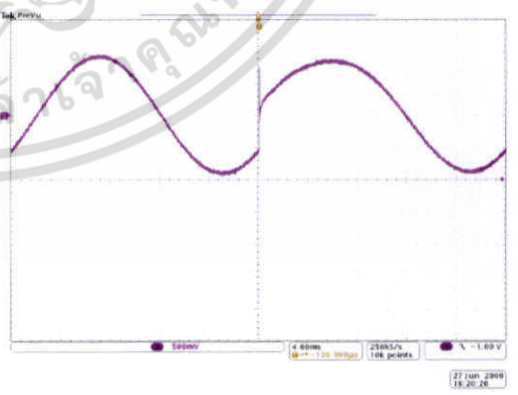


b)

รูปที่ 4.14 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 135° b) 225°



a)



b)

รูปที่ 4.15 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 270° b) 315°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

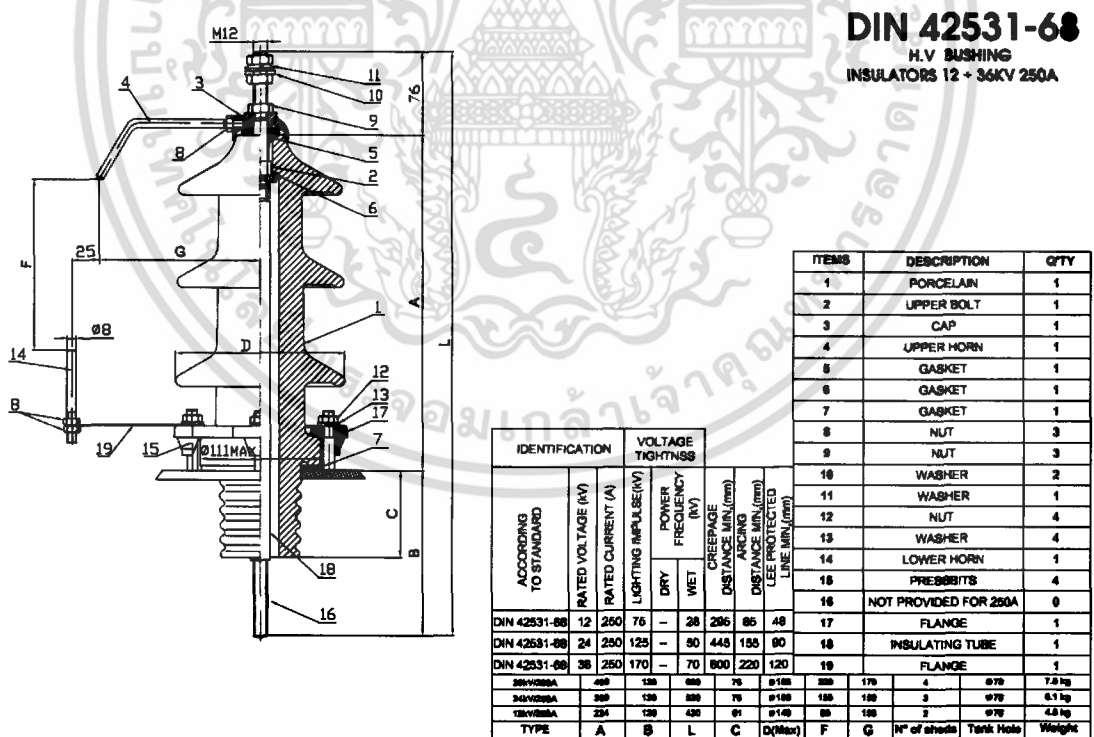
4.3 การศึกษาการเกิดเบรกดาวน์ของอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ข้อบนแรงดันกระแสสลับ

ในการทดสอบเกิดเบรกดาวน์ของอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ข้อบนแรงดันกระแสสลับ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบปกติที่ไม่มีการทับข้อบนแรงดันกระแสสลับเทียบกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีการทับข้อบนแรงดันกระแสสลับ โดยใช้อาร์กชิงฮอร์นเป็นวัสดุที่ใช้ทดสอบ โดยอาร์กชิงฮอร์นที่นำมาทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน DIN 42531

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้ 1) การทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า ($U_{b50\%}$) 2) การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ของอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ข้อบนแรงดันกระแสสลับ

4.3.1 อาร์กชิงฮอร์นที่ใช้ทดสอบ

ในการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ของอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ข้อบนแรงดันกระแสสลับ วัสดุที่นำมาทดสอบเป็นอาร์กชิงฮอร์นที่ทำการติดตั้งอยู่กับขูซึ่งจะเป็นไปตามมาตรฐาน DIN 42531 แสดงดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.15

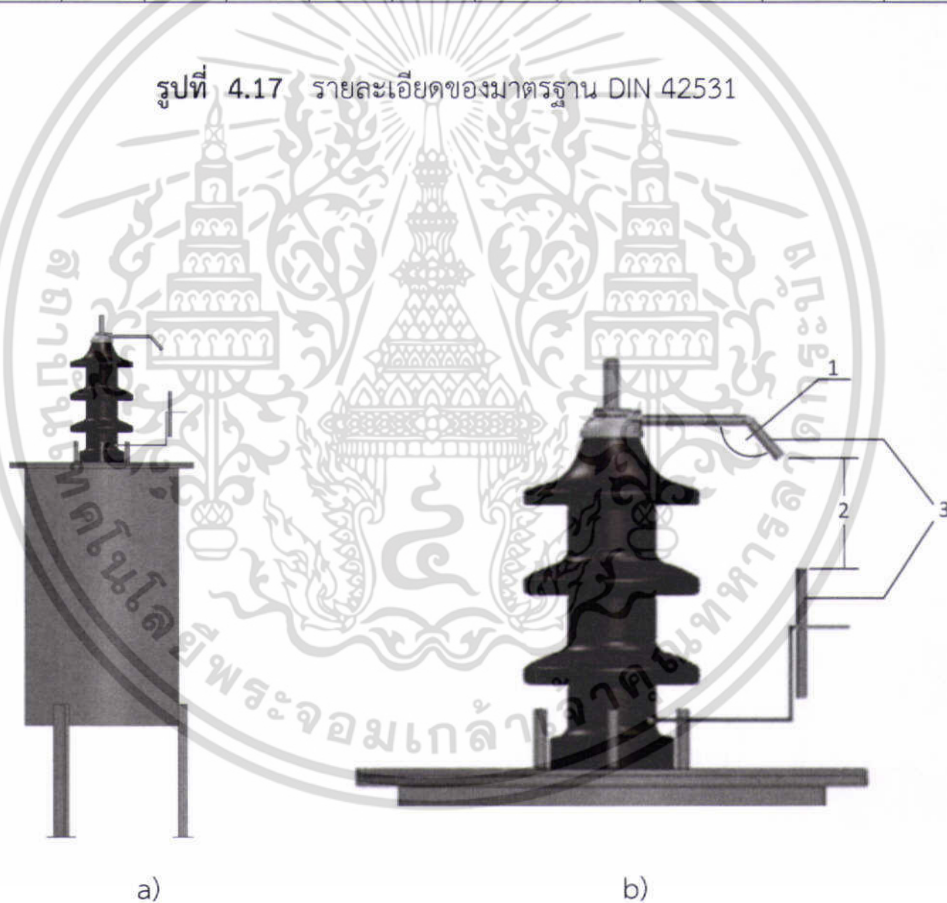


รูปที่ 4.16 มาตรฐาน DIN 42531

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| IDENTIFICATION | | VOLTAGE TIGHTNESS | | | | | | | 8 | NUT | 3 | | | | | |
|-----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|-----|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------|-----------|-----------------|-----|--------|----------------------|-----|----|----|
| ACCORDING TO STANDARD | RATED VOLTAGE (kV) | RATED CURRENT (A) | LIGHTING IMPULSE(kV) | | CREEPAGE DISTANCE MIN,(mm) | ARCING DISTANCE MIN,(mm) | LEE PROTECTED LINE MIN,(mm) | 220 | 170 | 4 | ø78 | 7.5 kg | | | | |
| | | | DRY | WET | | | | | | | | | POWER FREQUENCY (kV) | 295 | 85 | 48 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DIN 42531-68 | 12 | 250 | 75 | - | 28 | 295 | 85 | 48 | 17 | FLANGE | 1 | | | | | |
| DIN 42531-68 | 24 | 250 | 125 | - | 50 | 445 | 155 | 90 | 18 | INSULATING TUBE | 1 | | | | | |
| DIN 42531-68 | 36 | 250 | 170 | - | 70 | 600 | 220 | 120 | 19 | FLANGE | 1 | | | | | |
| 36kV/250A | 409 | 135 | 620 | 76 | ø155 | 220 | 170 | 4 | ø78 | 7.5 kg | | | | | | |
| 24kV/250A | 309 | 135 | 520 | 76 | ø155 | 155 | 150 | 3 | ø78 | 6.1 kg | | | | | | |
| 12kV/250A | 234 | 120 | 430 | 61 | ø140 | 85 | 150 | 2 | ø78 | 4.5 kg | | | | | | |
| TYPE | A | B | L | C | D(Max) | F | G | N° of sheds | Tank Hole | Weight | | | | | | |

รูปที่ 4.17 รายละเอียดของมาตรฐาน DIN 42531

รูปที่ 4.18 อาร์กชิงฮอร์นที่ใช้ทดสอบจริง 1) มุมของแท่งตัวนำบน 130°
2) ระยะห่าง 8.5 เซนติเมตร 3) แท่งตัวนำบน-ล่างทำจากแสตนเลส

4.3.2 การคำนวณหาขนาดของแรงดันกระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบ

เนื่องจากในมาตรฐานระบุขนาดของแรงดันใช้งานของอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV

เป็นค่า rms จึงต้องทำการเปลี่ยนเป็นค่ายอด ซึ่งจะได้ตามสมการด้านล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_p = \frac{12\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 9.79 \text{ kV}_p$$

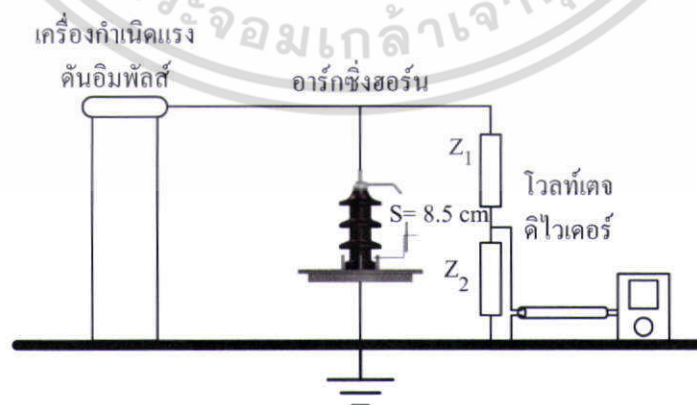
จากนั้นจะนำแรงดันที่คำนวณได้ไปใช้ในการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของแรงดันทับซ้อนโดยจะแบ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ตั้งแต่ 0 – 100 % ตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดันกระแสลับที่ใช้ในการทดสอบ

| เปอร์เซ็นต์ (%) | แรงดันกระแสลับ (kV _p) |
|-----------------|-----------------------------------|
| 0 | 0 |
| 25 | 2.44 |
| 50 | 4.89 |
| 75 | 7.34 |
| 100 | 9.79 |

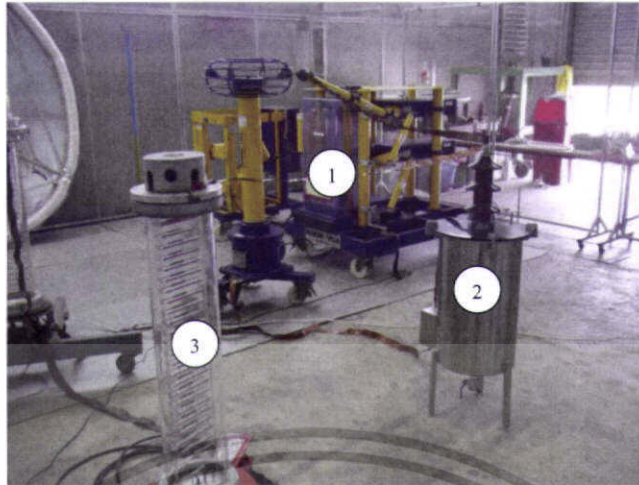
4.3.3 การทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า (U_{b50%})

การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าแสดงดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [13] ทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติ โดยใช้วิธีการปรับขึ้นลง (Up and Down Method) [4] จำนวน 20 ครั้ง และในการทดสอบทุกครั้งจะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นและความดันบรรยากาศ ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 เป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน



รูปที่ 4.19 วงจรการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 วงจรการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าจริง

1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

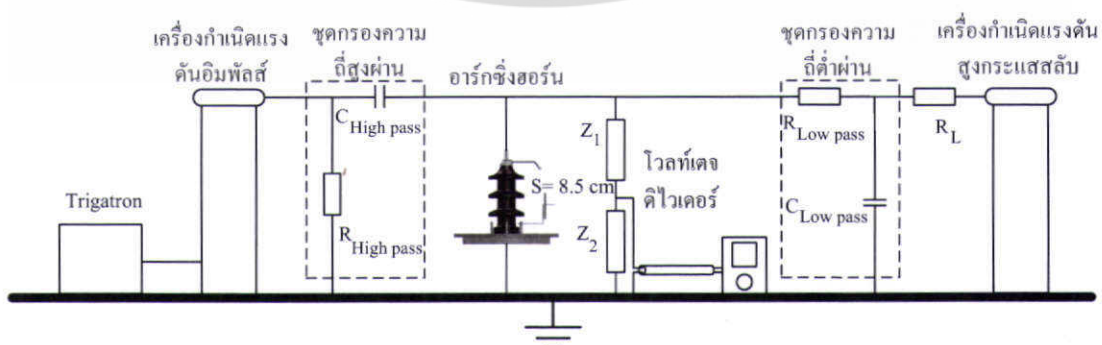
2) อาร์กซิงฮอร์น 3) อิมพัลส์ฟ้าผ่าโวลต์เตจดีไวเดอร์

ตารางที่ 4.6 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s ที่สภาวะมาตรฐาน

| ชื่อของแรงดัน | บวก | ลบ |
|-----------------------------------|-------|-------|
| แรงดันเบรกดาวน์(kV _p) | 83.96 | 84.61 |

4.3.4 การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ของอาร์กซิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ขั้วบนแรงดันกระแสสลับ

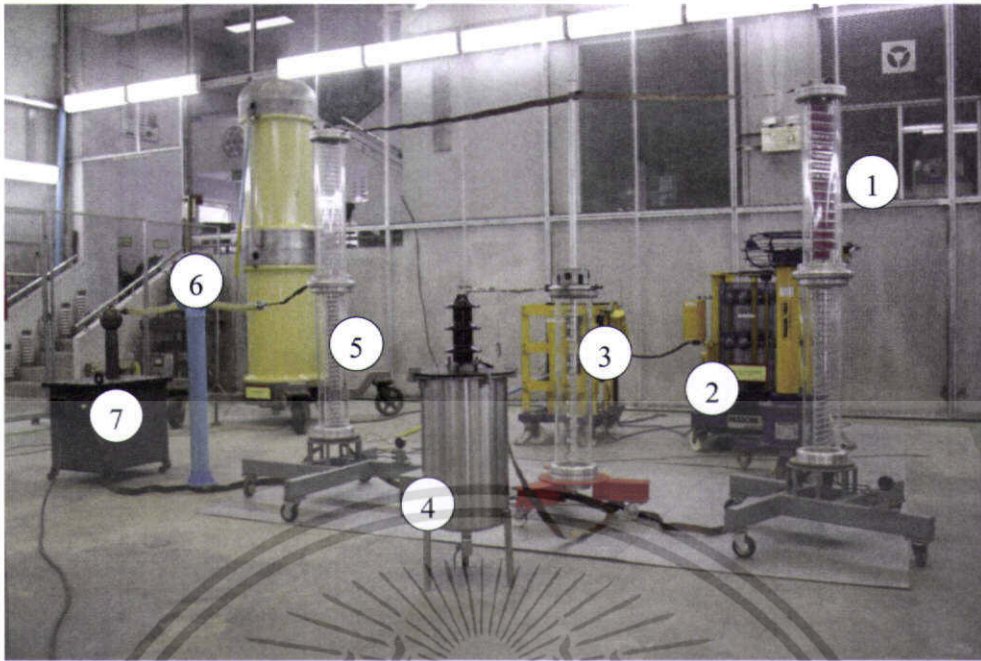
ในการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ของอาร์กซิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ขั้วบนแรงดันกระแสสลับวงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.21 วงจรการทดสอบการหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอาร์กซิงฮอร์นระบบ 12 kV

เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ขั้วบนแรงดันกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

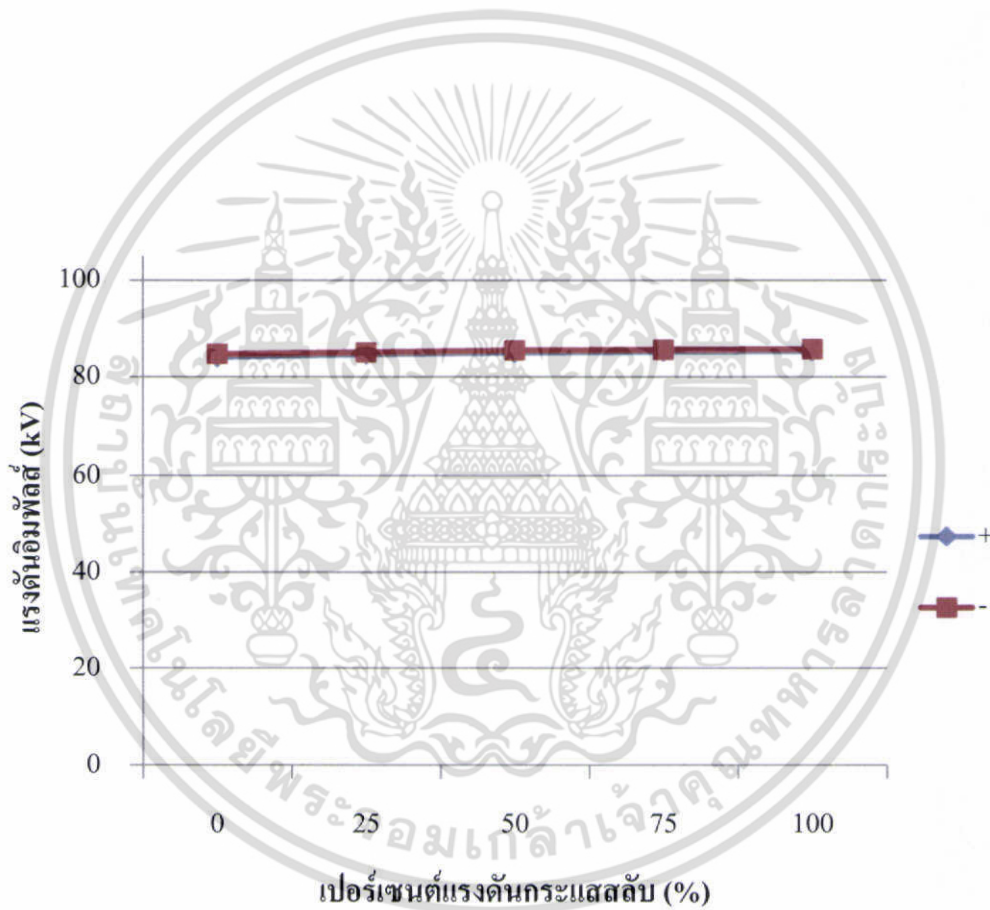


รูปที่ 4.22 วงจรที่ใช้ทดสอบจริง 1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าพิกัด 200 kV
 2) ชุดกรองความถี่สูงผ่าน 3) โวลต์เตจดีไวเดอร์ 4) ช่องว่างอากาศ 5) ชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน
 6) ความต้านทานจำกัดกระแส 7) ชุดกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV

ซึ่งในการทดสอบจะทำการจ่ายแรงดันกระแสสลับตามขนาดที่คำนวณไว้ในตารางที่ 4.5 โดยแต่ละขนาดของแรงดันกระแสสลับจะต้องทำการหาแรงดันเบรกตาวนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [13] ทับซ้อนที่มุม $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$, และ 315° โดยวิธีการปรับขึ้นลง (Up and down method) [4] จำนวน 20 ครั้งและจะทำการทดสอบทั้งชั่ววงและลบของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ข้อมูลการทดสอบอย่างละเอียดในการหาค่าแรงดันเบรกตาวนทางสถิติของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับแสดงในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.7 ค่าแรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่บัสชั่นที่มุม 0°

| % แรงดัน AC | แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก | แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ |
|-------------|-----------------------|----------------------|
| 0 % | 83.96 | 84.61 |
| 25 % | 84.57 | 84.96 |
| 50 % | 84.93 | 85.38 |
| 75 % | 85.14 | 85.51 |
| 100 % | 85.24 | 85.64 |

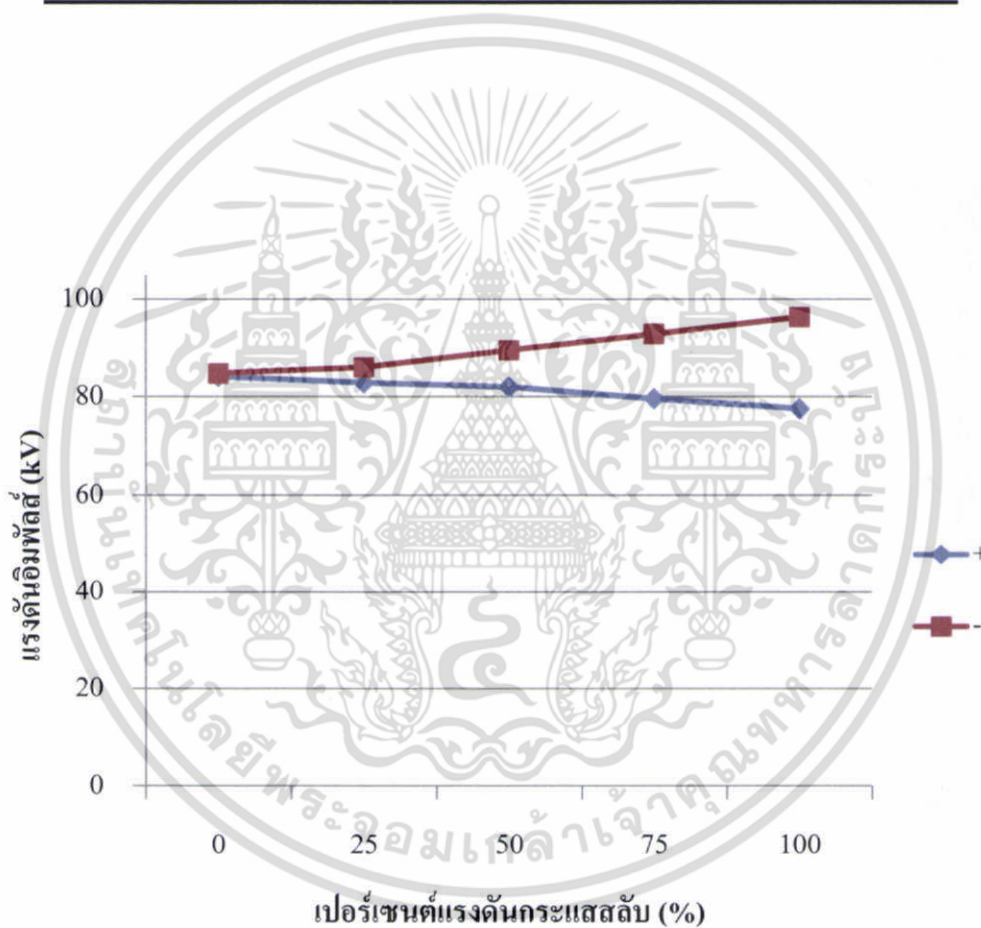


รูปที่ 4.23 แรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของแรงดันที่บัสชั่นที่มุม 0°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่บัสชั้นที่มุม 45°

| % แรงดัน AC | แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก | แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ |
|-------------|-----------------------|----------------------|
| 0 % | 83.96 | 84.61 |
| 25 % | 82.74 | 85.87 |
| 50 % | 81.89 | 89.43 |
| 75 % | 79.53 | 92.79 |
| 100 % | 77.52 | 96.25 |

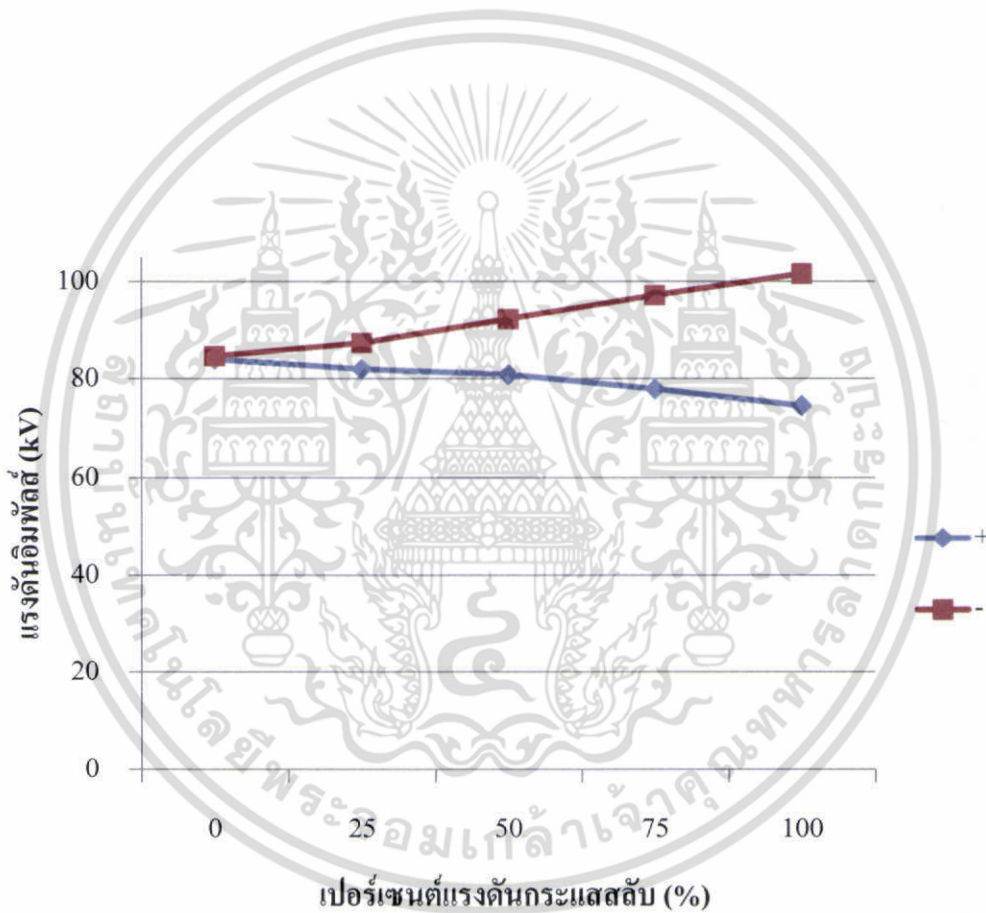


รูปที่ 4.24 แรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของแรงดันที่บัสชั้นที่มุม 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าแรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนที่มุม 90°

| % แรงดัน AC | แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก | แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ |
|-------------|-----------------------|----------------------|
| 0 % | 83.96 | 84.61 |
| 25 % | 81.91 | 87.31 |
| 50 % | 80.77 | 92.21 |
| 75 % | 77.87 | 97.11 |
| 100 % | 74.47 | 101.51 |

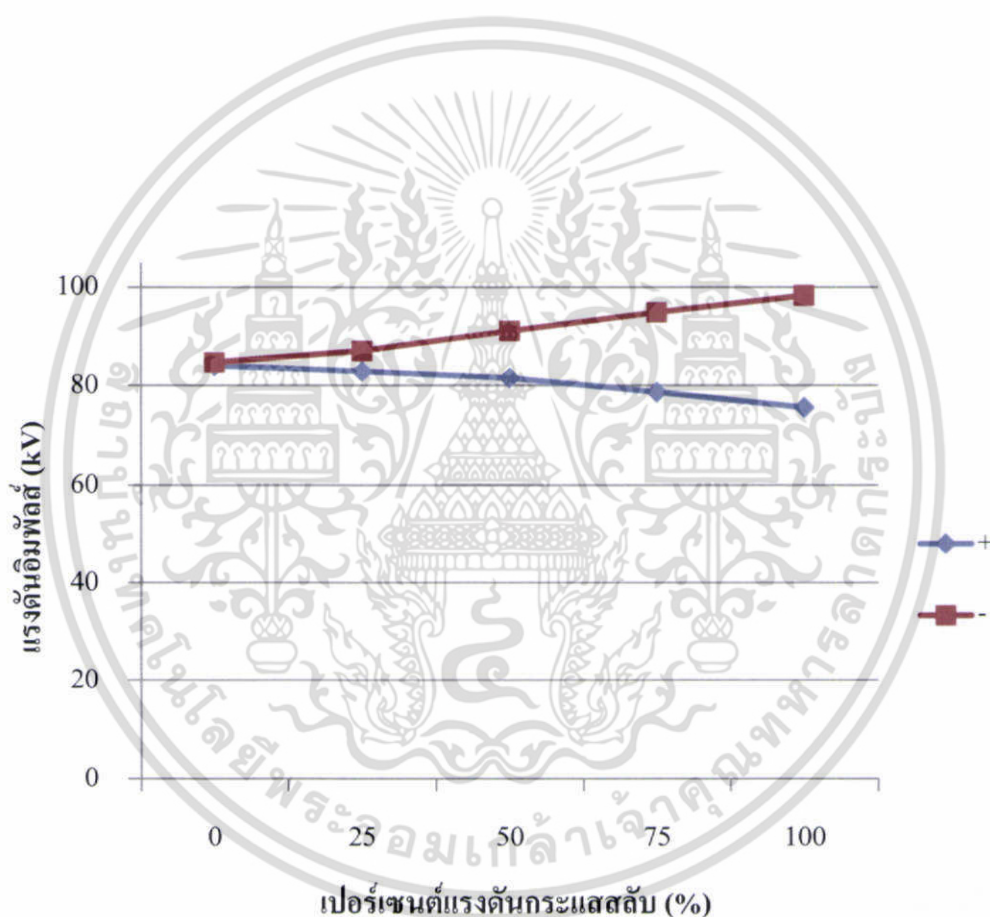


รูปที่ 4.25 แรงดันเบรกดาว์นทางสถิติของแรงดันทับซ้อนที่มุม 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ค่าแรงดันเบรกคาวนทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนที่มุม 135°

| % แรงดัน AC | แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก | แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ |
|-------------|-----------------------|----------------------|
| 0 % | 83.96 | 84.61 |
| 25 % | 82.79 | 86.94 |
| 50 % | 81.46 | 91.02 |
| 75 % | 78.57 | 94.81 |
| 100 % | 75.48 | 98.24 |

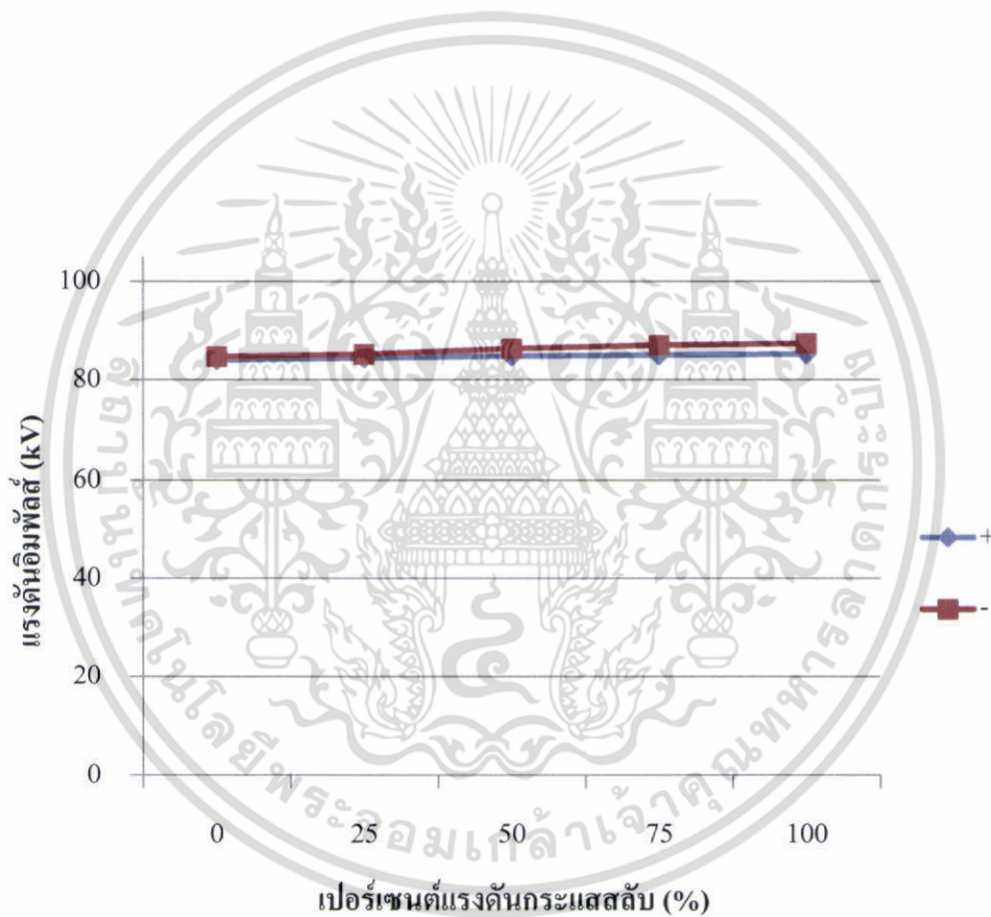


รูปที่ 4.26 แรงดันเบรกคาวนทางสถิติของแรงดันทับซ้อนที่มุม 135°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าแรงดันเบรกคาวนทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่บัสโซนที่มุม 180°

| % แรงดัน AC | แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก | แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ |
|-------------|-----------------------|----------------------|
| 0 % | 83.96 | 84.61 |
| 25 % | 84.37 | 85.06 |
| 50 % | 84.72 | 86.22 |
| 75 % | 84.94 | 86.93 |
| 100 % | 85.12 | 87.28 |

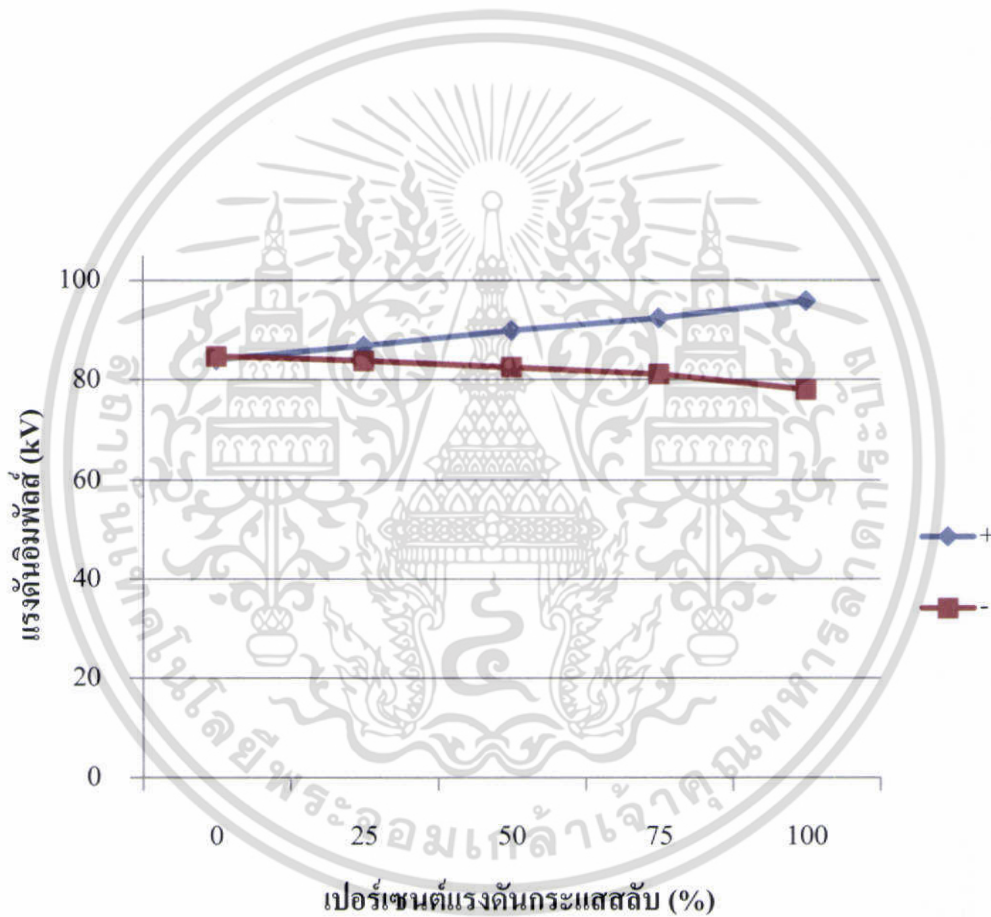


รูปที่ 4.27 แรงดันเบรกคาวนทางสถิติของแรงดันที่บัสโซนที่มุม 180°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่บัสช้อนที่มุม 225°

| % แรงดัน AC | แรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว | แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ |
|-------------|------------------------|----------------------|
| 0 % | 83.96 | 84.61 |
| 25 % | 86.79 | 83.72 |
| 50 % | 89.88 | 82.39 |
| 75 % | 92.34 | 81.04 |
| 100 % | 95.8 | 77.94 |

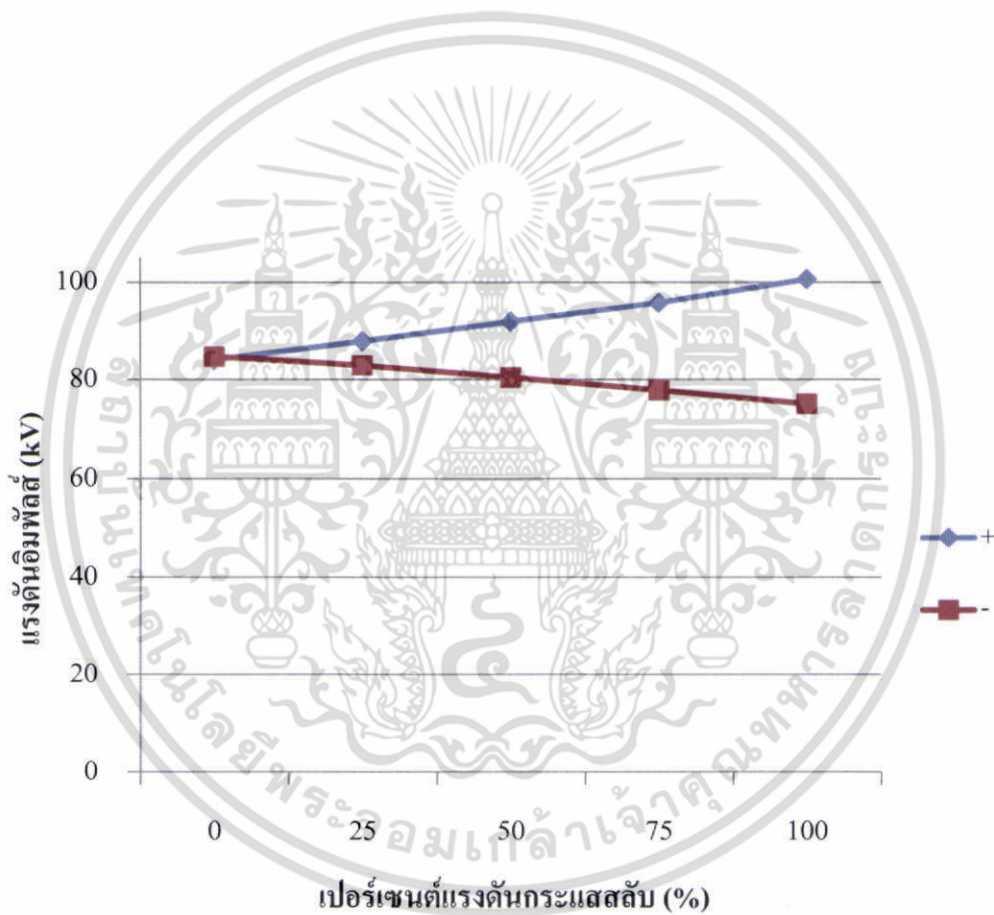


รูปที่ 4.28 แรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของแรงดันที่บัสช้อนที่มุม 225°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ค่าแรงดันเบรกคาวาน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่บัสช้อนที่มุม 270°

| % แรงดัน AC | แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก | แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ |
|-------------|-----------------------|----------------------|
| 0 % | 83.96 | 84.61 |
| 25 % | 87.81 | 82.82 |
| 50 % | 91.76 | 80.31 |
| 75 % | 95.66 | 77.74 |
| 100 % | 100.56 | 74.91 |

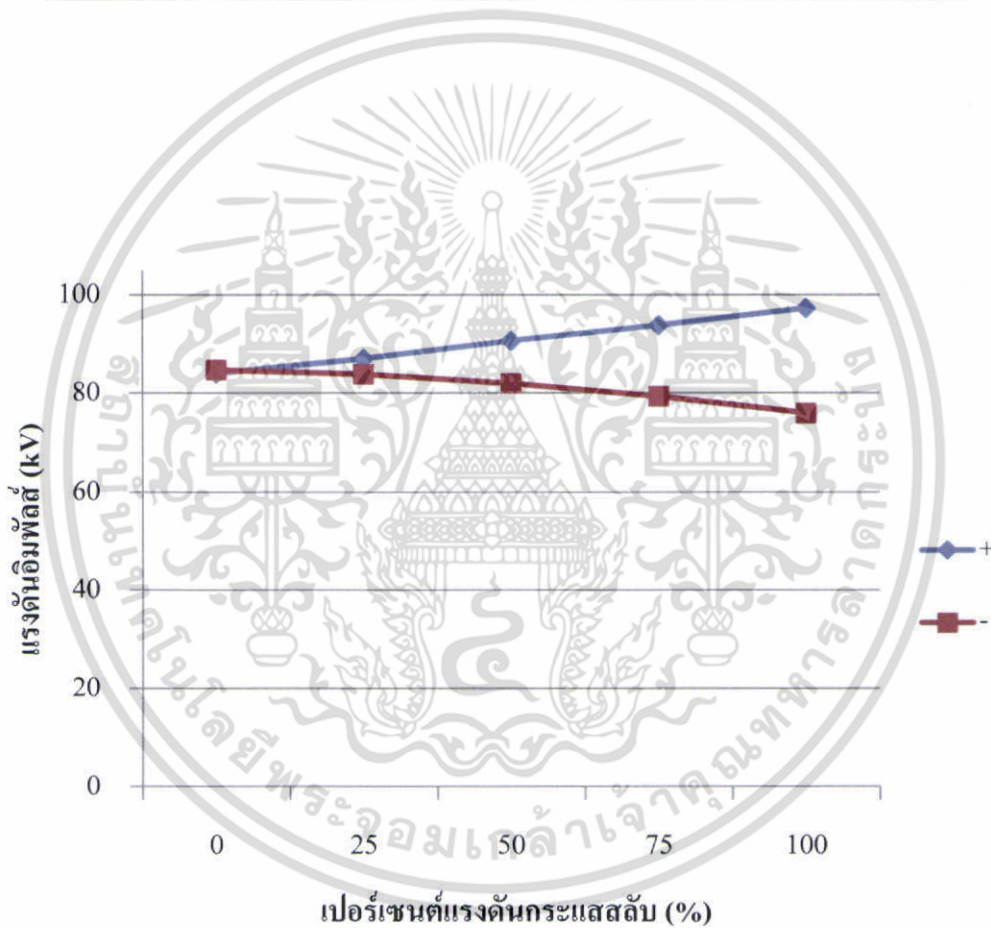


รูปที่ 4.29 แรงดันเบรกคาวาน์ทางสถิติของแรงดันที่บัสช้อนที่มุม 270°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ค่าแรงดันเบรกคาวนทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่บัสช้อนที่มุม 315°

| % แรงดัน AC | แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก | แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ |
|-------------|-----------------------|----------------------|
| 0 % | 83.96 | 84.61 |
| 25 % | 86.92 | 83.76 |
| 50 % | 90.54 | 81.89 |
| 75 % | 93.76 | 79.24 |
| 100 % | 97.24 | 75.81 |

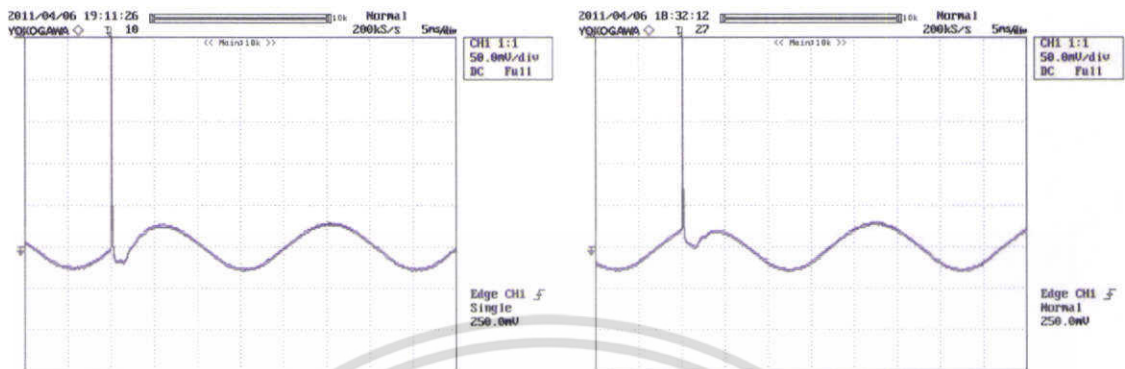


รูปที่ 4.30 แรงดันเบรกคาวนทางสถิติของแรงดันที่บัสช้อนที่มุม 315°

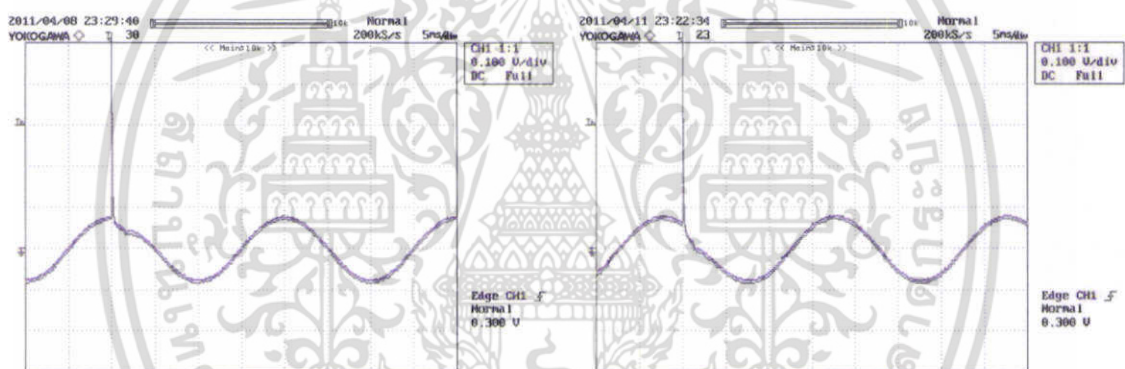
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ

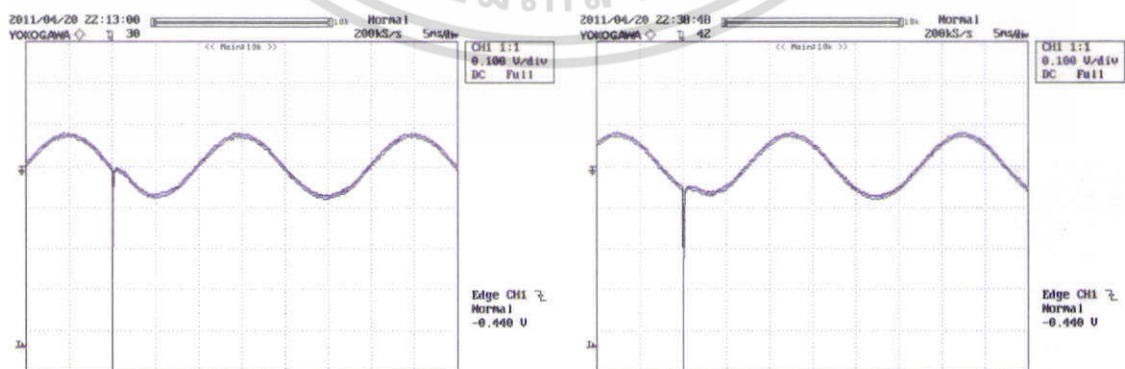
4.4.1 ลักษณะรูปคลื่นที่ไม่เกิดการเบรกดาวน



รูปที่ 4.31 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 0° b) 45°

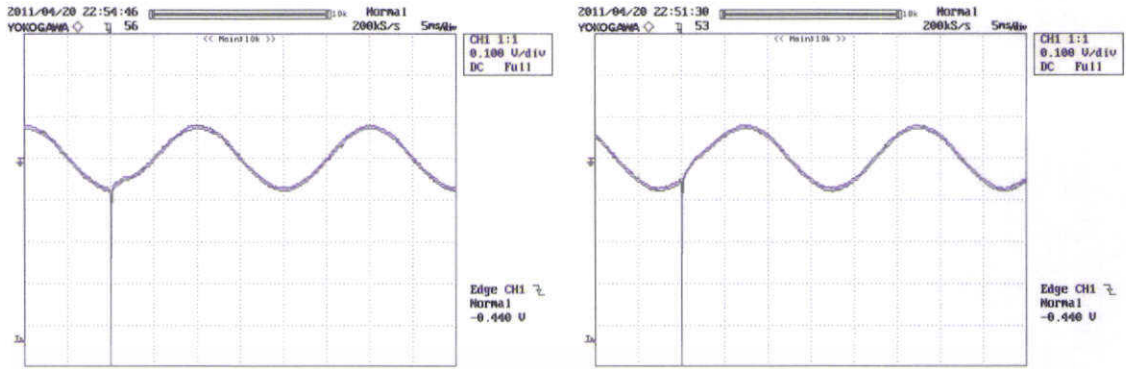


รูปที่ 4.32 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 90° b) 135°



รูปที่ 4.33 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 180° b) 225°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a)

b)

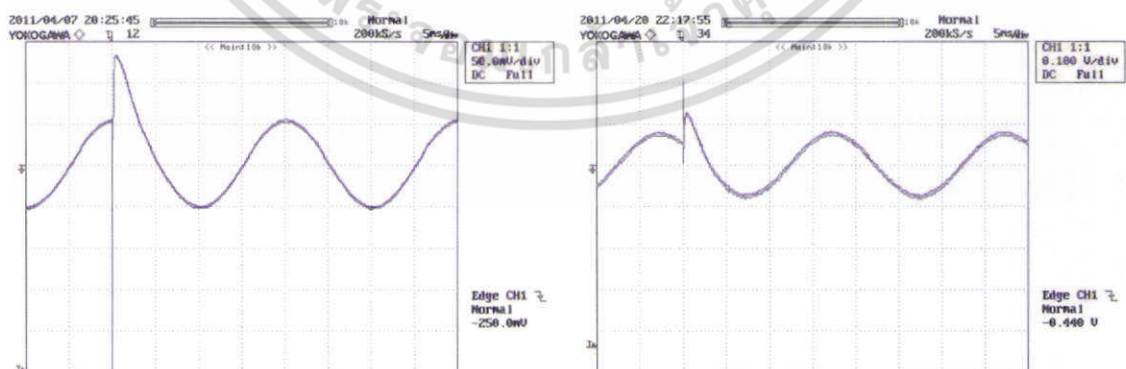
รูปที่ 4.34 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 270° b) 315°

4.2.2 ลักษณะรูปคลื่นที่เกิดการเบรกดาวน์



a)

b)

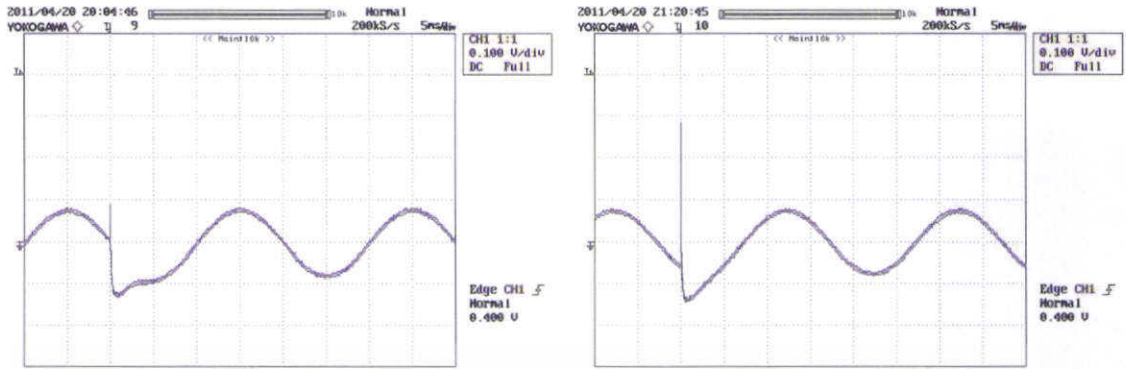
รูปที่ 4.35 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 0° b) 45° 

a)

b)

รูปที่ 4.36 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 90° b) 135°

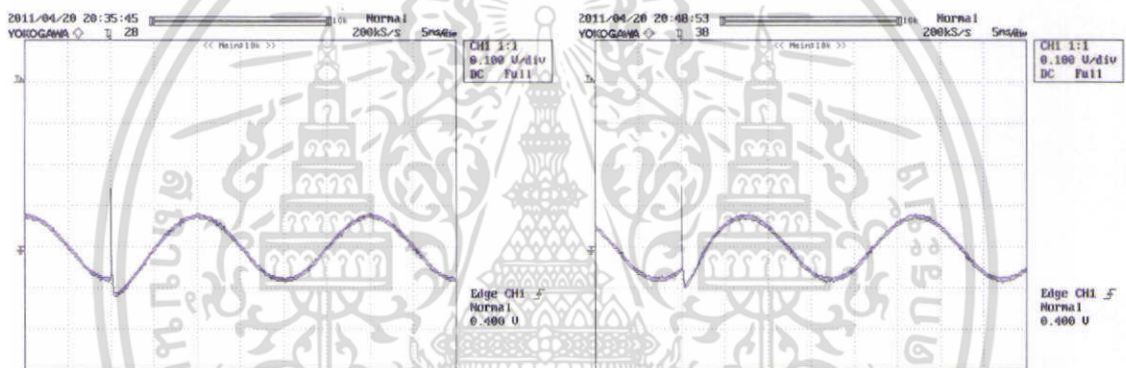
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a)

b)

รูปที่ 4.37 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 180° b) 225°



a)

b)

รูปที่ 4.38 ลักษณะรูปคลื่นทับซ้อน a) 270° b) 315°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันทับซ้อนนั้นเป็นรูปคลื่นที่ซับซ้อนซึ่งประกอบขึ้นจากรูปคลื่นสองชนิดได้แก่ รูปคลื่นแรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ทำให้กลไกการเกิดเบรกดาวนมีความซับซ้อนเข้าใจได้ยากและยังไม่มีทฤษฎีที่ครอบคลุมแรงดันประเภทนี้ จึงพยายามทำการแยกการพิจารณาคุณลักษณะของแต่ละแรงดันเพื่อที่จะสามารถหาข้อสรุปได้แต่จะอ้างอิงทฤษฎีเป็นหลัก รวมถึงผลการทดสอบจากบทความทั้งในประเทศและต่างประเทศที่มีการสรุปผลการทดสอบไว้ จากผลการทดสอบในบทที่ 4 ซึ่งมีหัวข้อในการทดสอบ 2 หัวข้อหลักดังนั้นก็จึงทำการสรุปผลการวิจัยเป็น 2 หัวข้อดังนี้

5.1.1 การศึกษาการเกิดเบรกดาวนในช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

จากการทดสอบหาการเกิดเบรกดาวนของช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่งที่ได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ สามารถสรุปพฤติกรรมต่างๆ ได้ดังนี้

1) ขั้วของแรงดันมีผลต่อการเกิดเบรกดาวน โดยจะเกิดการเบรกดาวนเมื่อแรงดันทั้งสองชนิดนั้นเป็นขั้วเดียวกันคือ เมื่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็นขั้วบวกและแรงดันกระแสสลับเป็นขั้วบวก หรือเมื่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็นลบและแรงดันกระแสสลับเป็นลบ เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าเมื่อแรงดันมีลักษณะที่เป็นขั้วเดียวกันเช่นเมื่อมีแรงดันกระแสสลับเป็นขั้วบวกที่เอาโนดทำให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าหาเอาโนดแต่จำนวนอิเล็กตรอนยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวนได้และเมื่อจ่ายแรงดันอิมพัลส์ที่เป็นขั้วเดียวกันเข้าไปทับซ้อนทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าวิกฤตจนทำให้เบรกดาวนในที่สุด

2) เมื่อแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบริเวณค่ายอดของแรงดันกระแสสลับจะมีเปอร์เซ็นต์การเบรกดาวนมากที่สุด ซึ่งในการทดสอบได้แก่มุม 90° เมื่อจ่ายแรงดันอิมพัลส์เป็นขั้วบวก และมุม 180° เมื่อจ่ายแรงดันอิมพัลส์เป็นขั้วลบ เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าที่บริเวณค่ายอดของแรงดันกระแสสลับนั้นมีปริมาณที่สูงและเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขั้วเดียวกันเข้าไปทับซ้อนทำให้เกิดเบรกดาวนได้ง่ายกว่ามุมอื่นๆ

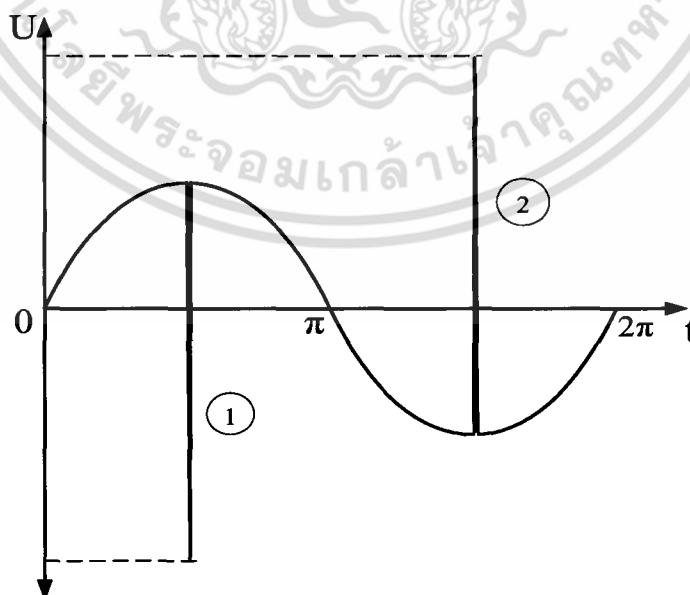
3) เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับไว้ที่ 80% - 90 % จะทำให้เกิดโคโรนาขึ้นจากแรงดันกระแสสลับที่ป้อนและจะส่งผลให้ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนของอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่งลดลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งเป็นผลที่เกิดจากประจุค้างระหว่างช่องว่างอากาศโดยทฤษฎีสตรีมเมอร์เบรกดาวน

จากพฤติกรรมที่สรุปได้จากผลการทดสอบข้างต้นนี้ซึ่งเป็นไปตามคำกล่าวของ Feser คือผลของสนามไฟฟ้าป้อนก่อนจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนเมื่อสนามไฟฟ้าที่ป้อนก่อนนั้นส่งผลให้เกิดโคโรนาขึ้นที่ปลายของแท่งตัวนำเป็นผลให้เกิดการเบรกดาวนได้ง่ายกว่าปกติซึ่งสังเกตได้จากการป้อนแรงดันกระแสสลับที่ 90 % และแรงดันอิมพัลส์ที่ 90 % เป็นผลให้มีจำนวนการเกิดเบรกดาวนทั้งหมด 5 ครั้ง

5.1.2 การศึกษาการเกิดเบรกดาวนของอาร์กชิงฮอร์นระบบ 12 kV เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

จากการทดสอบหาการเกิดเบรกดาวนของช่องว่างอากาศของอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่งที่ได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ เมื่อติดตั้งอยู่กับอาร์กชิงฮอร์นในระบบ 12 kV สามารถสรุปพฤติกรรมต่างๆ ได้ดังนี้

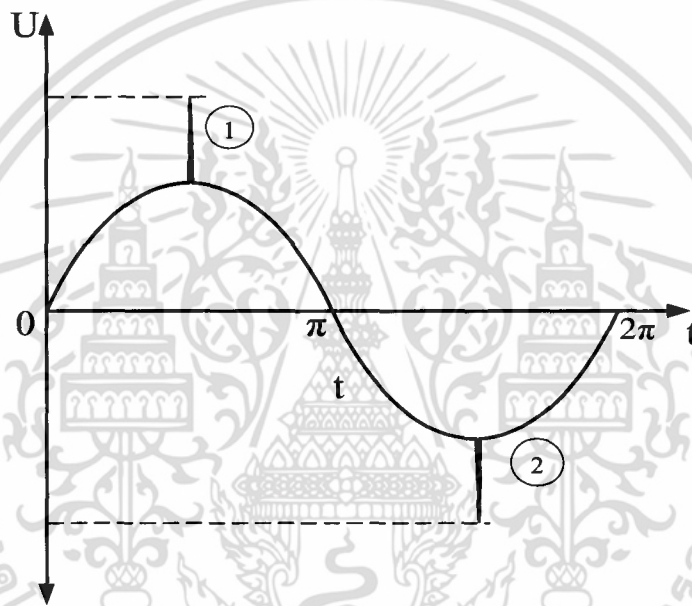
1) ผลความแตกต่างระหว่างแรงดันเบรกดาวนทางสถิติ (U_{b50} %) ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าปกติเทียบกับแรงดันทับซ้อนมีขนาดแรงดันที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้นถึง 20 % ของแรงดันชั่วลบ ((1) ที่มุม 90°) และ 19.8 % ของแรงดันชั่วบวก ((2) ที่มุม 270°) ตามตารางที่ 5.1 เป็นผลสืบเนื่องจากสนามไฟฟ้าของแรงดันทับซ้อนมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากแรงดันอิมพัลส์แบบปกติเมื่อมีผลจากสนามไฟฟ้าของแรงดันกระแสสลับดังรูปที่ 5.1 ซึ่งจะมีผลกระทบกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้เนื่องจากมีแรงดันผ่านเข้าไปในระบบมากกว่าปกติเมื่อระบบป้องกันทำงานแล้ว



รูปที่ 5.1 มุมทับซ้อนที่ส่งผลกระทบมากที่สุด

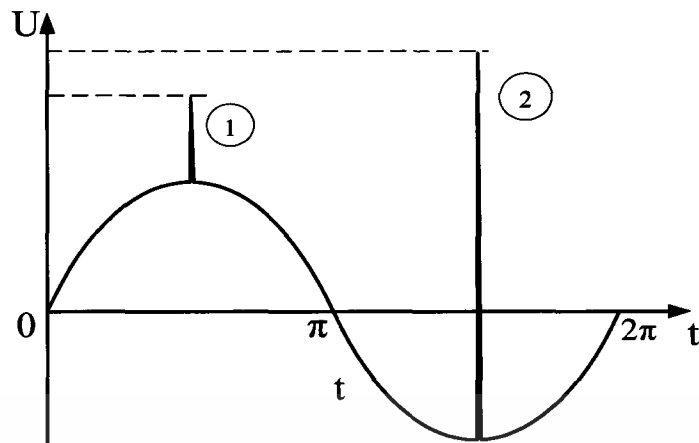
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ลักษณะของแรงดันทับซ้อนที่มีชั่วเดียวกันส่งผลให้แรงดันเบรกดาว์นทางสถิติ (U_{b50} %) ของแรงดันทับซ้อนนั้นลดลงจากปกติ(ที่มุม 0°) มากถึง 12.7 % ของแรงดันชั่วบวก ((1) ที่มุม 90°) และ 12.7 % ของแรงดันชั่วลบ ((2) ที่มุม 270°) ตามตารางที่ 5.1 เป็นผลมาจากลักษณะสนามไฟฟ้าของแรงดันกระแสสลับมีทิศทางจากทิศหนึ่งไปทิศหนึ่งและมีแรงดันอิมพัลส์ที่มีชั่วของแรงดันเป็นชั่วเดียวกันกับแรงดันกระแสสลับทำให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกันเป็นผลให้ขนาดของแรงดันอิมพัลส์ลดลงเนื่องจากมีปริมาณสนามไฟฟ้าของแรงดันกระแสสลับอยู่แล้วทำให้สนามไฟฟ้าของแรงดันอิมพัลส์เพียงค่าหนึ่งก็สามารถทำให้สนามไฟฟ้าถึงค่าวิกฤตและเกิดเบรกดาว์นขึ้นได้แสดงดังรูปที่ 5.2

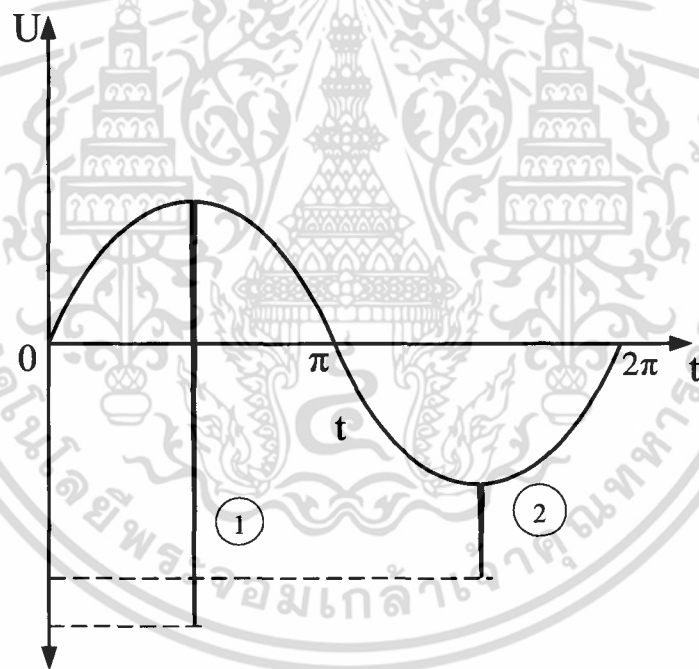


รูปที่ 5.2 มุมทับซ้อนที่ส่งผลกระทบระทบน้อยที่สุด

จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถที่จะสรุปพฤติกรรมของแรงดันทับซ้อนที่ส่งผลกระทบที่สำคัญคือเมื่อแรงดันทับซ้อนที่มีลักษณะชั่วเดียวกันแรงดันอิมพัลส์ที่จะหลุดเข้าไปในหม้อแปลงจะมีค่าน้อยเนื่องจากอาร์กซึ่งฮอว์นทำงานก่อนค่าสูงสุดของแรงดันอิมพัลส์ (1) และเมื่อลักษณะแรงดันที่มีชั่วต่างกันแรงดันอิมพัลส์ที่หลุดเข้าไปที่หม้อแปลงจะมีขนาดที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับแรงดันอิมพัลส์ปกติ (2) ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวนี้อาจส่งผลกระทบต่อฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้แสดงดังรูปที่ 5.3



a) ขั้วบวก



b) ขั้วลบ

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบมุมทับซ้อนที่ขั้วแรงดันเดียวกัน

จากการสรุปผลการทดสอบทั้งหมดนั้นสอดคล้องกับข้อสรุปของ Feser [3] ที่กล่าวไว้ว่า ระยะห่างของช่องว่างอากาศนั้นมีผลต่อลักษณะการเกิดเบรกดาวนคือที่ระยะห่างน้อยผลกระทบจากแรงดันทับซ้อนนั้นจะมีผลกระทบต่อแรงดันกระแสสลับมากซึ่งสนับสนุนข้อสรุปนี้โดยการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน [4] และยิ่งระยะห่างมีมากขึ้นจะทำให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากแรงดันทับซ้อนต่อแรงดันแรงแสสลับลดน้อยลงจนแทบไม่มีผลกระทบเลย และปัจจัยอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดผลกระทบคือสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโคโรนาทั้งกระแสดตรงและกระแแสสลับที่จะส่งผลกระทบให้เห็นได้อย่างชัดเจนในการทดสอบ [3]

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกควานที่สภาวะมาตรฐานของแรงดันอิมพัลส์เทียบกับแรงดันทับซ้อน

| ชื่อของแรงดัน | แรงดันอิมพัลส์ แบบปกติ (kV) | แรงดันทับซ้อน (kV) | ลักษณะความ แตกต่าง | % ความ แตกต่าง (%) |
|---------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| บวก | 83.96 | 100.56 | เพิ่มขึ้น | 19.8 |
| | 83.96 | 74.47 | ลดลง | 12.7 |
| ลบ | 84.41 | 101.51 | เพิ่มขึ้น | 20 |
| | 84.41 | 74.91 | ลดลง | 12.7 |

จากผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนั้นส่งผลกระทบโดยตรงกับระบบป้องกันแรงดันเกินในที่นี้คืออาร์กชิงฮอร์น ซึ่งควรจะได้รับการแก้ไขโดยการปรับตั้งระยะห่างให้มีขนาดที่เหมาะสม โดยจะต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังต่อไปนี้

1. จะต้องไม่เกิดการเบรกควานขึ้นจากระดับแรงดันใช้งาน
2. คุณสมบัติของกราฟแรงดัน-เวลาของอุปกรณ์ป้องกันจะต้องต่ำกว่าค่าคงทนต่อแรงดัน BIL ของอุปกรณ์
3. ควรจะสามารถที่จะถ่ายเทพลังงานที่สูงของแรงดันเกินได้อย่างรวดเร็ว และจะต้องกลับคืนสภาพการเป็นฉนวนได้อย่างรวดเร็ว
4. และจะต้องไม่เกิดสภาวะกระแสไหลต่อเนื่อง (Follow Current) จากแรงดันใช้งาน

ในการกำหนดระยะห่างของอิเล็กโทรดนั้นจะกำหนดได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างกราฟแรงดัน-เวลาของอุปกรณ์ที่จะทำการป้องกันกับอุปกรณ์ป้องกันโดยจะทำการกำหนดให้อยู่ในช่วงของขอบเขตการป้องกัน และระยะห่างที่ทำการปรับตั้งนั้นจะต้องมีขนาดไม่น้อยเกินไปเนื่องจากระยะที่น้อยเกินไปนั้นอาจจะส่งผลกระทบทำให้เกิดฟลลตีไปรบกวนระบบที่เกิดขึ้นจากอาร์กชิงฮอร์นเอง เนื่องจากแรงดันเกินชั่วคราว

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในช่องว่างอากาศของอิเล็คโทรดแบบแท่ง-แท่ง (อาร์กชิงฮอร์น) เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่มต่างๆ นั้น ผลการทดสอบพบว่า การทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยแรงดันเพียงชนิดเดียวนั้นอาจไม่เพียงพอเนื่องด้วยผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าแรงดันทับซ้อนมีผลต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกอาร์กชิงฮอร์นมาทำการทดสอบในระบบ 12 kV แต่ความเป็นจริงในปัจจุบันส่วนใหญ่ระบบนี้ได้ยกเลิกการใช้งานไปแล้วในระบบส่งจ่ายกำลัง ซึ่งสาเหตุที่เลือกทดสอบในระบบนี้เนื่องจากชุดกรงความถี่ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการนั้นมีอายุการใช้งานที่มากและประสิทธิภาพในการกรงความถี่ที่มีค่าต่ำจึงเป็นข้อจำกัดในด้านการทดสอบ ซึ่งถ้าหากมีการปรับปรุงชุดกรงความถี่ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นก็สามารถที่จะเพิ่มพิสัยการทดสอบขึ้นไปเป็นระดับที่มีการใช้งานอยู่จริงในปัจจุบัน

สำหรับการทดสอบอิมพัลส์ภายในห้องปฏิบัติการในปัจจุบันมีความสำคัญอย่างมากในการทดสอบที่ควรจะคำนึงถึงผลกระทบของการป้อนสนามไฟฟ้าต่อการฉนวนภายใน ตัวอย่างเช่น หม้อแปลงไฟฟ้า พบว่าแรงดันกระแสสลับที่ได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนนั้นมีผลกระทบต่อ การเกิดเบรกดาวน์อย่างมาก ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของแรงดันเบรกดาวน์อยู่ที่ 25% - 30% สำหรับช่องว่างที่ใช้อิเล็คโทรดคั่นด้วยกระดาษจุ่มน้ำมัน การลดลงของความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของช่องว่างในน้ำมันแบบแท่ง-แท่งที่มีระยะห่าง 5 cm ที่จ่ายแรงดันกระแสสลับ 100 kV ทับซ้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s ซึ่งมีค่าลดลง 29% ผลที่ได้นี้มีความแตกต่างกันระหว่างฉนวนภายในที่มีผลกระทบที่มากกว่าฉนวนภายนอก ซึ่งข้อมูลข้างต้นนี้มีความจำเป็นต่อการประสานสัมพันธ์ฉนวนให้เหมาะสมยิ่งขึ้น [3] รวมถึงลูกถ้วยไฟฟ้าที่โดยปกติจะได้รับแรงดันกระแสสลับอยู่ตลอดเวลา หากลูกถ้วยมีการใช้งานในระยะหนึ่งจะมีสิ่งเปรอะเปื้อนมาเกาะและเมื่อได้รับแรงดันเกินทับซ้อนที่ค่ายอดของแรงดันกระแสสลับที่มีลักษณะชั่วเดียวกันอาจจะเป็นผลให้เกิดการรวบไฟตามผิวของลูกถ้วยไฟฟ้าได้ง่ายกว่าปกติซึ่งเป็นการลัดวงจรสู่ดินและอาจจะส่งผลกระทบให้เกิดไฟดับในระบบไฟฟ้าได้

การพัฒนาและศึกษาในเรื่องนี้เป็นเรื่องที่สำคัญมากในอนาคต เพื่อนำไปพัฒนาการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้กันในปัจจุบันให้สามารถทำการทดสอบอุปกรณ์ได้เหมือนกับสภาวะที่จะได้รับในการใช้งานจริง และยังสามารถนำไปพัฒนาให้อุปกรณ์มีคุณภาพดียิ่งขึ้นไปอีกโดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบป้องกัน การฉนวนทั้งภายในและภายนอก รวมถึงการประสานสัมพันธ์การฉนวนให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานจริง

บรรณานุกรม

- [1] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, เอกสารประกอบการสอนวิชา **Advanced high voltage technology**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- [2] DIN 42531 standard HV porcelain bushing insulators.
- [3] J.K. Hepworth, R.C. Klewe, E.H. Lobley, and B.A. Tozer., **The effect of bias fields on the impulse strength of point-plane and sphere-plane gaps.**, IEEE Trans., 1973, **PAS-92**, pp 1898-1903.
- [4] N.L. Allen, D.E. Gourgoulis, P.N. Mikropoulos, C.A. Stassinopoulos and C.G. Yakinthos, IEE Proc, Sci, Meas, Technol, 145, 1998.
- [5] W. Rasquin : Einfluss von vorbeanspruchungen auf die durchschlagstossspannungen von elektroden-anordnungen in luft. ETZ-A 90 (1969).
- [6] โกลินทร์ คล่องเชิงสาร., **คุณลักษณะการเบรกดาวนของไมโครแกปเนื่องจากรูปคลื่นอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ.**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล., 2553.
- [7] M.S. Naidu. and V. Kamaraju., **High voltage engineering**, 2nd McGraw-hill, 1996.
- [8] สำรวัย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พิมพ์ครั้งที่ 3, มีนาคม 2549.
- [9] Kuffel, E. and Zaengl, W.S., **High voltage engineering fundamentals**, Oxford Pergamon Press, NY, 1984.
- [10] Meek, J.M. and Cragg, J.D., **Electrical breakdown of gasses**, Oxford Claredon Press, 1953.
- [11] Yu. P. Raizer., **Gas discharge physics**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1991.
- [12] สรรชัย อานอาชา, และคณะ., **เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับพิภักต์ 6 kV.**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล., 2551.
- [13] IEC 60060-1 High-voltage test techniques. General definitions and test requirements, 2010.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนวิฤต ($U_{b50\%}$) ของแรงดันทับซ้อนตารางที่ 1 แรงดันเบรกดาวนของอาร์กชิงฮอร์นด้วยแรงดันทับซ้อนที่มุม 0°

| LI | ซ้าย | | | | | ขวา | | | | |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | AC | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% | 0% | 25% | 50% | 75% |
| 1 | 92.92 | 92.92 | 91.74 | 94.28 | 94.28 | 90.28 | 93.50 | 92.79 | 92.79 | 93.50 |
| 2 | 90.49 | 90.49 | 89.25 | 91.74 | 91.74 | 87.72 | 90.28 | 89.50 | 89.50 | 90.28 |
| 3 | 88.20 | 88.20 | 91.74 | 89.25 | 89.25 | 85.37 | 87.72 | 87.10 | 87.10 | 87.72 |
| 4 | 85.96 | 90.49 | 89.25 | 85.99 | 91.74 | 83.02 | 85.37 | 89.50 | 89.50 | 85.37 |
| 5 | 88.20 | 88.20 | 91.74 | 89.25 | 89.25 | 85.37 | 87.72 | 92.79 | 87.10 | 87.72 |
| 6 | 90.49 | 85.96 | 89.25 | 91.74 | 91.74 | 87.72 | 90.28 | 89.50 | 84.69 | 90.28 |
| 7 | 88.20 | 88.20 | 85.99 | 89.25 | 89.25 | 90.28 | 87.72 | 87.10 | 87.10 | 87.72 |
| 8 | 85.96 | 90.49 | 89.25 | 91.74 | 91.74 | 87.72 | 85.37 | 84.69 | 89.50 | 85.37 |
| 9 | 88.20 | 88.20 | 91.74 | 89.25 | 89.25 | 85.37 | 87.72 | 87.10 | 87.10 | 87.72 |
| 10 | 90.49 | 90.49 | 89.25 | 85.99 | 91.74 | 87.72 | 90.28 | 89.50 | 89.50 | 90.28 |
| 11 | 88.20 | 88.20 | 91.74 | 89.25 | 94.28 | 90.28 | 87.72 | 87.10 | 92.79 | 87.72 |
| 12 | 85.96 | 90.49 | 89.25 | 91.74 | 91.74 | 87.72 | 85.37 | 89.50 | 89.50 | 90.28 |
| 13 | 88.20 | 88.20 | 91.74 | 89.25 | 89.25 | 85.37 | 87.72 | 87.10 | 87.10 | 87.72 |
| 14 | 90.49 | 90.49 | 89.25 | 91.74 | 91.74 | 87.72 | 90.28 | 84.69 | 84.69 | 90.28 |
| 15 | 88.20 | 88.20 | 91.74 | 94.28 | 89.25 | 90.28 | 87.72 | 87.10 | 87.10 | 87.72 |
| 16 | 85.96 | 85.96 | 89.25 | 91.74 | 91.74 | 87.72 | 90.28 | 89.50 | 89.50 | 90.28 |
| 17 | 88.20 | 88.20 | 91.74 | 89.25 | 89.25 | 85.37 | 87.72 | 87.10 | 87.10 | 87.72 |
| 18 | 90.49 | 90.49 | 89.25 | 91.74 | 91.74 | 87.72 | 85.37 | 89.50 | 89.50 | 85.37 |
| 19 | 88.20 | 88.20 | 85.99 | 89.25 | 89.25 | 90.28 | 87.72 | 87.10 | 92.79 | 87.72 |
| 20 | 85.96 | 90.49 | 89.25 | 91.74 | 91.74 | 87.72 | 90.28 | 84.69 | 89.50 | 90.28 |
| $U_{b50\%}$ | 88.42 | 89.08 | 89.96 | 90.47 | 90.97 | 87.47 | 88.18 | 89.96 | 88.54 | 88.02 |
| $U_{b50\%}$ Std. | 84.61 | 84.96 | 85.38 | 85.51 | 85.64 | 83.96 | 84.57 | 84.93 | 85.14 | 85.24 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แรงดันเบรกคาวาน์ของอาร์กชิงฮอร์นด้วยแรงดันทับซ้อนที่มุม 45°

| LI | ซ้าย | | | | | ขวา | | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | AC | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% | 0% | 25% | 50% | 75% |
| 1 | 92.92 | 94.28 | 92.38 | 96.82 | 98.07 | 90.28 | 90.28 | 86.40 | 86.40 | 82.74 |
| 2 | 90.49 | 91.74 | 89.90 | 94.28 | 95.42 | 87.72 | 87.72 | 84.16 | 84.16 | 80.60 |
| 3 | 88.20 | 89.25 | 87.61 | 91.74 | 46.56 | 85.37 | 85.37 | 81.92 | 81.92 | 78.42 |
| 4 | 85.96 | 85.99 | 89.90 | 89.25 | 95.42 | 83.02 | 83.02 | 84.16 | 79.65 | 80.60 |
| 5 | 88.20 | 89.25 | 92.38 | 91.74 | 98.07 | 85.37 | 85.37 | 86.40 | 81.92 | 82.74 |
| 6 | 90.49 | 91.74 | 89.90 | 94.28 | 95.42 | 87.72 | 87.72 | 88.65 | 84.16 | 84.87 |
| 7 | 88.20 | 89.25 | 92.38 | 96.82 | 98.07 | 90.28 | 85.37 | 86.40 | 86.40 | 82.74 |
| 8 | 85.96 | 85.99 | 89.90 | 94.28 | 103.34 | 87.72 | 83.02 | 84.16 | 84.16 | 80.60 |
| 9 | 88.20 | 89.25 | 87.61 | 91.74 | 98.07 | 85.37 | 85.37 | 81.92 | 81.92 | 82.74 |
| 10 | 90.49 | 91.74 | 89.90 | 94.28 | 95.42 | 87.72 | 87.72 | 84.16 | 84.16 | 84.87 |
| 11 | 88.20 | 89.25 | 92.38 | 96.82 | 98.07 | 90.28 | 85.37 | 86.40 | 86.40 | 82.74 |
| 12 | 85.96 | 85.99 | 89.90 | 94.28 | 103.34 | 87.72 | 87.72 | 88.65 | 84.16 | 80.60 |
| 13 | 88.20 | 89.25 | 87.61 | 91.74 | 98.07 | 85.37 | 90.28 | 86.40 | 81.92 | 78.42 |
| 14 | 90.49 | 91.74 | 89.90 | 89.25 | 95.42 | 87.72 | 87.72 | 84.16 | 79.65 | 80.60 |
| 15 | 88.20 | 89.25 | 92.38 | 91.74 | 98.07 | 90.28 | 85.37 | 86.40 | 81.92 | 82.74 |
| 16 | 85.96 | 91.74 | 89.90 | 94.28 | 103.34 | 87.72 | 87.72 | 84.16 | 84.16 | 80.60 |
| 17 | 88.20 | 94.28 | 87.61 | 96.82 | 98.07 | 85.37 | 90.28 | 81.92 | 81.92 | 78.42 |
| 18 | 90.49 | 91.74 | 89.90 | 94.28 | 95.42 | 87.72 | 87.72 | 84.16 | 79.65 | 80.60 |
| 19 | 88.20 | 89.25 | 92.38 | 96.82 | 98.07 | 90.28 | 85.37 | 86.40 | 81.92 | 82.74 |
| 20 | 85.96 | 91.74 | 89.90 | 94.28 | 103.34 | 87.72 | 87.72 | 88.65 | 84.16 | 84.87 |
| U_{b50%} | 88.42 | 90.21 | 90.14 | 93.76 | 97.54 | 87.47 | 86.78 | 85.28 | 83.04 | 81.67 |
| U_{b50%} Std. | 84.61 | 85.87 | 89.43 | 92.79 | 96.25 | 83.96 | 82.74 | 81.89 | 79.53 | 77.52 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แรงดันเบรกดาว์นของอาร์กซึ่งฮอรั่นด้วยแรงดันทับซ้อนที่มุม 90°

| LI | ซ้าย | | | | | ขวา | | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| AC | | | | | | | | | | |
| 1 | 92.92 | 92.38 | 99.94 | 106.33 | 109.10 | 90.28 | 88.24 | 86.40 | 84.57 | 80.90 |
| 2 | 90.49 | 89.90 | 97.26 | 103.60 | 106.22 | 87.72 | 85.94 | 84.16 | 82.38 | 78.78 |
| 3 | 88.20 | 87.61 | 94.56 | 100.88 | 103.34 | 85.37 | 83.64 | 81.92 | 80.18 | 76.65 |
| 4 | 85.96 | 89.90 | 97.26 | 98.12 | 106.22 | 83.02 | 85.94 | 84.16 | 77.94 | 74.52 |
| 5 | 88.20 | 92.38 | 99.94 | 100.88 | 109.10 | 85.37 | 88.24 | 86.40 | 80.18 | 76.65 |
| 6 | 90.49 | 94.87 | 97.26 | 103.60 | 106.22 | 87.72 | 85.94 | 88.65 | 82.38 | 78.78 |
| 7 | 88.20 | 92.38 | 94.56 | 106.33 | 103.34 | 90.28 | 83.64 | 86.40 | 84.57 | 80.90 |
| 8 | 85.96 | 89.90 | 97.26 | 103.60 | 106.22 | 87.72 | 85.94 | 84.16 | 82.38 | 78.78 |
| 9 | 88.20 | 87.61 | 99.94 | 100.88 | 109.10 | 85.37 | 88.24 | 81.92 | 80.18 | 76.65 |
| 10 | 90.49 | 89.90 | 97.26 | 98.12 | 106.22 | 87.72 | 85.94 | 84.16 | 77.94 | 78.78 |
| 11 | 88.20 | 92.38 | 94.56 | 100.88 | 103.34 | 90.28 | 83.64 | 86.40 | 80.18 | 80.90 |
| 12 | 85.96 | 94.87 | 97.26 | 103.60 | 106.22 | 87.72 | 81.35 | 84.16 | 82.38 | 78.78 |
| 13 | 88.20 | 92.38 | 99.94 | 106.33 | 109.10 | 85.37 | 83.64 | 81.92 | 84.57 | 76.65 |
| 14 | 90.49 | 89.90 | 97.26 | 103.60 | 106.22 | 87.72 | 85.94 | 84.16 | 82.38 | 78.78 |
| 15 | 88.20 | 92.38 | 94.56 | 106.33 | 103.34 | 90.28 | 88.24 | 86.40 | 80.18 | 80.90 |
| 16 | 85.96 | 94.87 | 97.26 | 103.60 | 106.22 | 87.72 | 85.94 | 84.16 | 82.38 | 78.78 |
| 17 | 88.20 | 92.38 | 99.94 | 100.88 | 109.10 | 85.37 | 83.64 | 81.92 | 84.57 | 76.65 |
| 18 | 90.49 | 89.90 | 97.26 | 98.12 | 111.99 | 87.72 | 85.94 | 84.16 | 82.38 | 78.78 |
| 19 | 88.20 | 92.38 | 94.56 | 100.88 | 109.10 | 90.28 | 88.24 | 86.40 | 80.18 | 80.90 |
| 20 | 85.96 | 94.87 | 97.26 | 103.60 | 106.22 | 87.72 | 85.94 | 84.16 | 82.38 | 78.78 |
| U_{b50%} | 88.42 | 91.63 | 97.26 | 101.89 | 106.81 | 87.47 | 85.71 | 84.61 | 81.72 | 78.56 |
| U_{b50%} Std. | 84.61 | 87.31 | 92.21 | 97.11 | 101.51 | 83.96 | 81.91 | 80.77 | 77.87 | 74.47 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 แรงดันเบรกคาวาน์ของอาร์กชิงฮอร์นด้วยแรงดันทับซ้อนที่มุม 135°

| LI | ซ้าย | | | | | ขวา | | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| AC | | | | | | | | | | |
| 1 | 92.92 | 45.58 | 89.08 | 85.19 | 83.68 | 90.28 | 90.92 | 90.92 | 86.76 | 82.99 |
| 2 | 90.49 | 88.69 | 86.94 | 83.10 | 81.69 | 87.72 | 88.24 | 88.24 | 84.57 | 80.90 |
| 3 | 88.20 | 86.50 | 84.80 | 80.93 | 79.34 | 85.37 | 85.94 | 85.94 | 82.38 | 78.78 |
| 4 | 85.96 | 84.31 | 82.66 | 83.10 | 76.93 | 83.02 | 83.64 | 83.64 | 80.18 | 80.90 |
| 5 | 88.20 | 86.50 | 84.80 | 85.19 | 74.52 | 85.37 | 85.94 | 85.94 | 82.38 | 82.99 |
| 6 | 90.49 | 88.69 | 86.94 | 83.10 | 76.93 | 87.72 | 88.24 | 88.24 | 84.57 | 80.90 |
| 7 | 88.20 | 45.58 | 89.08 | 80.93 | 79.34 | 90.28 | 85.94 | 85.94 | 82.38 | 78.78 |
| 8 | 85.96 | 88.69 | 86.94 | 83.10 | 81.69 | 87.72 | 83.64 | 83.64 | 84.57 | 76.65 |
| 9 | 88.20 | 86.50 | 84.80 | 85.19 | 83.68 | 85.37 | 85.94 | 85.94 | 86.76 | 78.78 |
| 10 | 90.49 | 84.31 | 86.94 | 83.10 | 81.69 | 87.72 | 88.24 | 88.24 | 84.57 | 80.90 |
| 11 | 88.20 | 86.50 | 89.08 | 80.93 | 79.34 | 90.28 | 90.92 | 90.92 | 82.38 | 78.78 |
| 12 | 85.96 | 88.69 | 86.94 | 83.10 | 76.93 | 87.72 | 88.24 | 88.24 | 80.18 | 76.65 |
| 13 | 88.20 | 45.58 | 84.80 | 85.19 | 74.52 | 85.37 | 85.94 | 85.94 | 82.38 | 78.78 |
| 14 | 90.49 | 88.69 | 82.66 | 83.10 | 76.93 | 87.72 | 83.64 | 83.64 | 84.57 | 80.90 |
| 15 | 88.20 | 86.50 | 84.80 | 80.93 | 79.34 | 90.28 | 85.94 | 85.94 | 86.76 | 78.78 |
| 16 | 85.96 | 84.31 | 86.94 | 83.10 | 81.69 | 87.72 | 88.24 | 88.24 | 84.57 | 76.65 |
| 17 | 88.20 | 86.50 | 84.80 | 85.19 | 83.68 | 85.37 | 90.92 | 85.94 | 82.38 | 78.78 |
| 18 | 90.49 | 88.69 | 82.66 | 83.10 | 81.69 | 87.72 | 88.24 | 83.64 | 80.18 | 80.90 |
| 19 | 88.20 | 86.50 | 84.80 | 80.93 | 79.34 | 90.28 | 85.94 | 85.94 | 82.38 | 82.99 |
| 20 | 85.96 | 84.31 | 86.94 | 83.10 | 76.93 | 87.72 | 88.24 | 88.24 | 84.57 | 80.90 |
| U_{b50%} | 88.42 | 87.37 | 85.87 | 83.10 | 80.06 | 87.47 | 87.08 | 86.63 | 83.55 | 79.84 |
| U_{b50%} Std. | 84.61 | 86.94 | 91.02 | 94.81 | 98.24 | 83.96 | 82.79 | 81.46 | 78.57 | 75.48 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แรงดันเบรกดาว์นของอาร์กซึ่งฮอร์นด้วยแรงดันทับซ้อนที่มุม 180°

| LI | ชั่วลบ | | | | | ชั่วบวก | | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| AC | | | | | | | | | | |
| 1 | 92.92 | 92.92 | 92.38 | 92.38 | 94.87 | 90.28 | 90.28 | 90.28 | 93.50 | 93.50 |
| 2 | 90.49 | 90.49 | 89.90 | 89.90 | 92.38 | 87.72 | 87.72 | 87.72 | 90.28 | 90.28 |
| 3 | 88.20 | 88.20 | 87.61 | 87.61 | 89.90 | 85.37 | 85.37 | 85.37 | 87.72 | 87.72 |
| 4 | 85.96 | 90.49 | 89.90 | 89.90 | 87.61 | 83.02 | 87.72 | 87.72 | 85.37 | 85.37 |
| 5 | 88.20 | 88.20 | 92.38 | 92.38 | 89.90 | 85.37 | 90.28 | 90.28 | 87.72 | 87.72 |
| 6 | 90.49 | 85.96 | 94.87 | 94.87 | 92.38 | 87.72 | 93.50 | 87.72 | 90.28 | 90.28 |
| 7 | 88.20 | 88.20 | 92.38 | 92.38 | 89.90 | 90.28 | 90.28 | 85.37 | 87.72 | 87.72 |
| 8 | 85.96 | 90.49 | 89.90 | 89.90 | 87.61 | 87.72 | 87.72 | 87.72 | 85.37 | 85.37 |
| 9 | 88.20 | 92.92 | 87.61 | 87.61 | 89.90 | 85.37 | 85.37 | 90.28 | 87.72 | 87.72 |
| 10 | 90.49 | 90.49 | 89.90 | 89.90 | 92.38 | 87.72 | 87.72 | 93.50 | 90.28 | 90.28 |
| 11 | 88.20 | 88.20 | 92.38 | 92.38 | 94.87 | 90.28 | 90.28 | 90.28 | 93.50 | 87.72 |
| 12 | 85.96 | 90.49 | 89.90 | 94.87 | 92.38 | 87.72 | 87.72 | 87.72 | 90.28 | 90.28 |
| 13 | 88.20 | 92.92 | 87.61 | 92.38 | 89.90 | 85.37 | 85.37 | 90.28 | 87.72 | 93.50 |
| 14 | 90.49 | 90.49 | 89.90 | 89.90 | 87.61 | 87.72 | 87.72 | 93.50 | 90.28 | 90.28 |
| 15 | 88.20 | 88.20 | 87.61 | 87.61 | 89.90 | 90.28 | 90.28 | 90.28 | 93.50 | 87.72 |
| 16 | 85.96 | 85.96 | 89.90 | 89.90 | 92.38 | 87.72 | 87.72 | 87.72 | 90.28 | 90.28 |
| 17 | 88.20 | 88.20 | 92.38 | 92.38 | 94.87 | 85.37 | 85.37 | 85.37 | 87.72 | 93.50 |
| 18 | 90.49 | 90.49 | 94.87 | 89.90 | 92.38 | 87.72 | 87.72 | 87.72 | 85.37 | 90.28 |
| 19 | 88.20 | 88.20 | 87.61 | 87.61 | 89.90 | 90.28 | 90.28 | 90.28 | 87.72 | 87.72 |
| 20 | 85.96 | 85.96 | 89.90 | 89.90 | 92.38 | 87.72 | 87.72 | 87.72 | 90.28 | 90.28 |
| U_{b50%} | 88.42 | 89.32 | 90.65 | 90.65 | 91.13 | 87.47 | 88.18 | 88.65 | 88.89 | 89.13 |
| U_{b50%} Std. | 84.61 | 85.06 | 86.22 | 86.93 | 87.28 | 83.96 | 84.37 | 84.72 | 84.94 | 85.12 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 แรงดันเบรกความของอาร์กซึ่งฮอร์นด้วยแรงดันทับซ้อนที่มุม 225°

| LI | ชั่วลบ | | | | | ชั่วบวก | | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| AC | | | | | | | | | | |
| 1 | 92.92 | 90.45 | 88.69 | 89.08 | 85.48 | 90.28 | 92.79 | 97.82 | 104.22 | 104.99 |
| 2 | 90.49 | 88.20 | 86.50 | 86.94 | 83.44 | 87.72 | 89.50 | 94.38 | 102.31 | 103.00 |
| 3 | 88.20 | 85.99 | 84.31 | 84.80 | 81.40 | 85.37 | 87.10 | 90.94 | 99.26 | 100.41 |
| 4 | 85.96 | 83.61 | 86.50 | 82.66 | 78.93 | 83.02 | 89.50 | 94.38 | 95.67 | 103.00 |
| 5 | 88.20 | 85.99 | 88.69 | 84.80 | 81.40 | 85.37 | 92.79 | 97.82 | 99.26 | 104.99 |
| 6 | 90.49 | 88.20 | 86.50 | 86.94 | 83.44 | 87.72 | 96.09 | 94.38 | 102.31 | 103.00 |
| 7 | 88.20 | 90.45 | 84.31 | 84.80 | 81.40 | 90.28 | 92.79 | 90.94 | 99.26 | 100.41 |
| 8 | 85.96 | 88.20 | 86.50 | 82.66 | 78.93 | 87.72 | 89.50 | 94.38 | 95.67 | 103.00 |
| 9 | 88.20 | 85.99 | 88.69 | 84.80 | 81.40 | 85.37 | 87.10 | 97.82 | 99.26 | 104.99 |
| 10 | 90.49 | 83.61 | 45.58 | 86.94 | 83.44 | 87.72 | 89.50 | 101.26 | 102.31 | 106.98 |
| 11 | 88.20 | 85.99 | 88.69 | 84.80 | 85.48 | 90.28 | 92.79 | 97.82 | 99.26 | 104.99 |
| 12 | 85.96 | 88.20 | 86.50 | 82.66 | 83.44 | 87.72 | 96.09 | 94.38 | 95.67 | 103.00 |
| 13 | 88.20 | 90.45 | 84.31 | 84.80 | 81.40 | 85.37 | 92.79 | 90.94 | 99.26 | 100.41 |
| 14 | 90.49 | 88.20 | 86.50 | 86.94 | 78.93 | 87.72 | 89.50 | 94.38 | 102.31 | 103.00 |
| 15 | 88.20 | 85.99 | 88.69 | 89.08 | 81.40 | 90.28 | 87.10 | 97.82 | 99.26 | 104.99 |
| 16 | 85.96 | 88.20 | 86.50 | 86.94 | 83.44 | 87.72 | 89.50 | 101.26 | 95.67 | 103.00 |
| 17 | 88.20 | 90.45 | 84.31 | 84.80 | 85.48 | 85.37 | 92.79 | 97.82 | 92.09 | 100.41 |
| 18 | 90.49 | 88.20 | 86.50 | 82.66 | 83.44 | 87.72 | 96.09 | 94.38 | 95.67 | 103.00 |
| 19 | 88.20 | 85.99 | 88.69 | 84.80 | 81.40 | 90.28 | 92.79 | 90.94 | 99.26 | 104.99 |
| 20 | 85.96 | 88.20 | 86.50 | 86.94 | 78.93 | 87.72 | 89.50 | 94.38 | 102.31 | 103.00 |
| U_{b50%} | 88.42 | 87.52 | 86.84 | 85.31 | 82.42 | 87.47 | 91.13 | 95.40 | 99.26 | 103.39 |
| U_{b50%} Std. | 84.61 | 83.72 | 82.39 | 81.04 | 77.94 | 83.96 | 86.79 | 89.88 | 92.34 | 95.80 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 แรงดันเบรกดาวนของอาร์กซึ่งฮอร์นด้วยแรงดันทับซ้อนที่มุม 270°

| LI | ซ้าย | | | | | ขวา | | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| AC | | | | | | | | | | |
| 1 | 92.92 | 89.08 | 85.19 | 85.19 | 83.44 | 90.28 | 98.67 | 100.33 | 105.60 | 109.73 |
| 2 | 90.49 | 86.84 | 83.10 | 83.10 | 81.40 | 87.72 | 95.31 | 96.82 | 103.65 | 107.67 |
| 3 | 88.20 | 84.80 | 80.93 | 80.93 | 78.93 | 85.37 | 91.94 | 93.31 | 101.70 | 105.60 |
| 4 | 85.96 | 86.84 | 83.10 | 83.10 | 81.40 | 83.02 | 88.82 | 96.82 | 98.04 | 103.53 |
| 5 | 88.20 | 89.08 | 85.19 | 85.19 | 83.44 | 85.37 | 91.94 | 100.33 | 101.70 | 105.60 |
| 6 | 90.49 | 86.84 | 87.28 | 83.10 | 85.48 | 87.72 | 95.31 | 102.84 | 103.65 | 107.67 |
| 7 | 88.20 | 84.80 | 85.19 | 80.93 | 83.44 | 90.28 | 91.94 | 100.33 | 105.60 | 109.73 |
| 8 | 85.96 | 86.84 | 83.10 | 83.10 | 81.40 | 87.72 | 88.82 | 96.82 | 103.65 | 107.67 |
| 9 | 88.20 | 89.08 | 80.93 | 85.19 | 78.93 | 85.37 | 91.94 | 93.31 | 101.70 | 105.60 |
| 10 | 90.49 | 86.84 | 83.10 | 83.10 | 81.40 | 87.72 | 95.31 | 96.82 | 98.04 | 103.53 |
| 11 | 88.20 | 84.80 | 85.19 | 80.93 | 83.44 | 90.28 | 98.67 | 100.33 | 101.70 | 105.60 |
| 12 | 85.96 | 86.84 | 87.28 | 83.10 | 85.48 | 87.72 | 95.31 | 96.82 | 103.65 | 107.67 |
| 13 | 88.20 | 84.80 | 85.19 | 85.19 | 83.44 | 85.37 | 91.94 | 93.31 | 105.60 | 105.60 |
| 14 | 90.49 | 86.84 | 83.10 | 83.10 | 81.40 | 87.72 | 88.82 | 96.82 | 103.65 | 103.53 |
| 15 | 88.20 | 89.08 | 85.19 | 80.93 | 78.93 | 90.28 | 91.94 | 100.33 | 101.70 | 105.60 |
| 16 | 85.96 | 86.84 | 87.28 | 83.10 | 81.40 | 87.72 | 95.31 | 96.82 | 98.04 | 107.67 |
| 17 | 88.20 | 84.80 | 85.19 | 85.19 | 83.44 | 85.37 | 91.94 | 93.31 | 101.70 | 105.60 |
| 18 | 90.49 | 86.84 | 83.10 | 83.10 | 85.48 | 87.72 | 88.82 | 96.82 | 103.65 | 103.53 |
| 19 | 88.20 | 89.08 | 85.19 | 80.93 | 83.44 | 90.28 | 91.94 | 100.33 | 105.60 | 105.60 |
| 20 | 85.96 | 86.84 | 87.28 | 83.10 | 81.40 | 87.72 | 95.31 | 102.84 | 103.65 | 107.67 |
| U_{b50%} | 88.42 | 86.84 | 84.56 | 83.10 | 82.42 | 87.47 | 92.94 | 97.87 | 102.68 | 106.21 |
| U_{b50%} Std. | 84.61 | 82.82 | 80.31 | 77.74 | 74.91 | 83.96 | 87.81 | 91.76 | 95.66 | 100.56 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 แรงดันเบรกดาวาร์ของอาร์กชิงฮอร์นด้วยแรงดันทับซ้อนที่มุม 315°

| LI | ซ้าย | | | | | ขวา | | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| AC | | | | | | | | | | |
| 1 | 92.92 | 90.45 | 86.94 | 87.28 | 81.69 | 90.28 | 96.09 | 97.82 | 102.31 | 106.98 |
| 2 | 90.49 | 88.20 | 84.80 | 85.19 | 79.34 | 87.72 | 92.79 | 94.38 | 99.26 | 104.99 |
| 3 | 88.20 | 85.99 | 82.66 | 83.10 | 76.93 | 85.37 | 89.50 | 90.94 | 95.67 | 103.00 |
| 4 | 85.96 | 83.61 | 84.80 | 80.93 | 79.34 | 83.02 | 87.10 | 94.38 | 99.26 | 100.41 |
| 5 | 88.20 | 85.99 | 86.94 | 83.10 | 81.69 | 85.37 | 89.50 | 97.82 | 102.31 | 103.00 |
| 6 | 90.49 | 88.20 | 89.08 | 85.19 | 83.68 | 87.72 | 92.79 | 101.26 | 104.22 | 104.99 |
| 7 | 88.20 | 90.45 | 86.94 | 83.10 | 81.69 | 90.28 | 96.09 | 97.82 | 102.31 | 106.98 |
| 8 | 85.96 | 88.20 | 84.80 | 80.93 | 79.34 | 87.72 | 92.79 | 94.38 | 99.26 | 104.99 |
| 9 | 88.20 | 85.99 | 82.66 | 83.10 | 76.93 | 85.37 | 89.50 | 90.94 | 95.67 | 103.00 |
| 10 | 90.49 | 88.20 | 84.80 | 85.19 | 79.34 | 87.72 | 92.79 | 94.38 | 99.26 | 100.41 |
| 11 | 88.20 | 90.45 | 86.94 | 83.10 | 81.69 | 90.28 | 96.09 | 97.82 | 102.31 | 103.00 |
| 12 | 85.96 | 88.20 | 89.08 | 80.93 | 83.68 | 87.72 | 92.79 | 101.26 | 104.22 | 104.99 |
| 13 | 88.20 | 85.99 | 86.94 | 83.10 | 81.69 | 85.37 | 89.50 | 97.82 | 102.31 | 106.98 |
| 14 | 90.49 | 83.61 | 84.80 | 85.19 | 79.34 | 87.72 | 87.10 | 94.38 | 99.26 | 104.99 |
| 15 | 88.20 | 85.99 | 82.66 | 87.28 | 76.93 | 90.28 | 89.50 | 97.82 | 95.67 | 103.00 |
| 16 | 85.96 | 88.20 | 84.80 | 85.19 | 79.34 | 87.72 | 92.79 | 101.26 | 99.26 | 100.41 |
| 17 | 88.20 | 90.45 | 86.94 | 83.10 | 81.69 | 85.37 | 96.09 | 97.82 | 102.31 | 103.00 |
| 18 | 90.49 | 88.20 | 89.08 | 80.93 | 83.68 | 87.72 | 92.79 | 94.38 | 104.22 | 104.99 |
| 19 | 88.20 | 85.99 | 86.94 | 83.10 | 81.69 | 90.28 | 89.50 | 97.82 | 102.31 | 103.00 |
| 20 | 85.96 | 83.61 | 84.80 | 85.19 | 79.34 | 87.72 | 87.10 | 101.26 | 99.26 | 100.41 |
| U_{b50%} | 88.42 | 87.28 | 85.87 | 83.617 | 82.42 | 87.47 | 91.48 | 96.77 | 101.04 | 103.79 |
| U_{b50%} Std. | 84.61 | 83.76 | 81.89 | 79.24 | 75.81 | 83.96 | 86.92 | 90.54 | 93.76 | 97.24 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 แรงดันเบรกดาวน์ของอาร์กชิงฮอร์นด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s

| LI | ชั่วลบ | ชั่วบวก |
|--------------------------|--------|---------|
| 1 | 92.92 | 90.28 |
| 2 | 90.49 | 87.72 |
| 3 | 88.2 | 85.37 |
| 4 | 85.96 | 83.02 |
| 5 | 88.2 | 85.37 |
| 6 | 90.49 | 87.72 |
| 7 | 88.2 | 90.28 |
| 8 | 85.96 | 87.72 |
| 9 | 88.2 | 85.37 |
| 10 | 90.49 | 87.72 |
| 11 | 88.2 | 90.28 |
| 12 | 85.96 | 87.72 |
| 13 | 88.2 | 85.37 |
| 14 | 90.49 | 87.72 |
| 15 | 88.2 | 90.28 |
| 16 | 85.96 | 87.72 |
| 17 | 88.2 | 85.37 |
| 18 | 90.49 | 87.72 |
| 19 | 88.2 | 90.28 |
| 20 | 85.96 | 87.72 |
| $U_{b50\%}$ | 88.42 | 87.47 |
| $U_{b50\%} \text{ Std.}$ | 84.61 | 83.96 |

หมายเหตุ

การหาค่าแรงดันดิสชาร์จเบรกดาวน์ 50% โดยการเริ่มต้นเลือกแรงดันค่าหนึ่ง U_k ที่คาดว่าจะจะเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ 50% ถ้าหากไม่เกิดเบรกดาวน์ให้เพิ่มแรงดันขึ้น ΔU ซึ่งมีค่าเป็น 3% ของแรงดันดิสชาร์จ 50% จึงป้อนแรงดันใหม่ด้วยค่า $U_k + \Delta U$ หากเกิดเบรกดาวน์ที่ที่แรงดัน U_k ก็ให้ลดแรงดันเหลือเพียง $U_k - \Delta U$ ปฏิบัติต่อเนื่องกันอย่างน้อย 20 ครั้งจะสามารถหาค่าแรงดันดิสชาร์จเบรกดาวน์ 50% ได้จากสมการ

$$U_{b50\%} = \frac{\sum n_v U_v}{\sum n}$$

โดยที่ n_v คือ จำนวนครั้งที่ที่ป้อนแรงดันที่ระดับแรงดัน U_v

และ $\sum n$ คือ ผลรวมจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. สรรชัย อานอาชา, อานันทวัฒน์ คุณากร, และนรเศรษฐ พัฒนเดช, “การศึกษาการเกิดการเบรกดาวนในช่องว่างอากาศแบบแห้ง-แห้งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32, หน้า 115-118, ปราจันบุรี, ประเทศไทย, ตุลาคม 28-30, 2552.
2. Sanchai Arnacha, Anantawat Kunakorn. , Peerawut Yutthagowith and Piyapon Tuethong., **Experimental studies of breakdown characteristics of a 12 - kV arcing horn under a lightning impulse superimposed on ac voltage.**, 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, November 1-4, 2011, Chengdu, China





EECON XXXII

PROCEEDINGS
VOL. 1

PW - Electrical Power System
PE - Power Electronics
CT - Control System and Instrument Technology
CP - Computer and Information Technology

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๒
๒๘-๓๐ ตุลาคม ๒๕๕๒ โรงแรมทวารวดี รีสอร์ท จ.ปราจีนบุรี

32nd Electrical Engineering Conference
28-30 October 2009 Tawarayadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand

WD Western Digital
NECTEC
a member of NSTDA

TRIDI
Telecommunications Research and Industrial Development Institute

ptt
Group

4Q กฟผ.
ผลิตไฟฟ้าเพื่อความสะอาดปลอดภัย

จัดการประชุมโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
เทคโนโลยีการจัดการระบบสารสนเทศ
และภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเกิดการเบรกดาวน์ในช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ
ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

Experimental Studies of Breakdown Characteristics of Rod-Rod gaps with
Negative Lightning impulses superimposed on AC Supply Voltage

สรราชย์ อานอาษา อานันท์วัฒน์ คุณากร นรเศรษฐ พัฒนเดช

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนจลลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 0-2326-9902 E-mail: a_sanchai@power.kmitl.net

บทคัดย่อ

บทความนี้นั้นเสนอผลการศึกษาคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวน์ในช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่ง เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆกัน การวิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ การทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันกระแสสลับ แรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ และการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0° - 360° ช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่งที่มาจากแท่งทองเหลือง ผลการทดสอบพบว่ามุมที่เกิดการเบรกดาวน์จะเกิดในช่วงลบของแรงดันกระแสสลับตั้งแต่มุม 225° - 315° และจะเกิดการเบรกดาวน์ที่รุนแรงในช่วงค่าของของแรงดันกระแสสลับที่มุม 270°

คำสำคัญ: ช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่ง, แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ, อาร์คชิงฮอร์น

Abstract

This paper presents the studies of breakdown characteristics of rod-rod gaps with a negative lighting impulse superimposed on an AC power frequency (50 Hz) supply voltage waveform at various angles. The research is divided into three parts as follows: breakdown tests to AC voltage, statistical breakdown tests due to negative lighting impulses at the angle of 0° - 360° , and breakdown tests due to superimposed waveforms. The rod-rod gaps are designed and constructed from the brass. It is found that the breakdown voltage takes place at the angle of 225° - 315° of the negative duration of voltage waveform and the most severe case occurs when the impulse position is at the angle of 270° of the supply voltage waveform.

Keywords: rod-rod gaps, AC superimpose with negative lightning, arcing horn

1. บทนำ

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงที่ติดตั้งใช้งานไปสักระยะหนึ่งแล้ว อาจเกิดความเสี่ยงหายหรือความบกพร่องของกรณจนขนาดลวดหม้อแปลงอื่นเนื่องจากแรงดันเกินประเภทต่างๆ เช่น แรงดันเกินเนื่องจากการดับสวิชต์ แรงดันเกินฟ้าผ่า หรือแรงดันเกินชั่วคราว ความล้มเหลวของการจนหม้อแปลงนำไปสู่ความเสียหายที่ตามมาของระบบไฟฟ้าอย่างประมาณค่ามิได้ [1] ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันแรงดันเกินที่อาจจะเกิดขึ้นได้กับหม้อแปลง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้องกันหม้อแปลงเมื่อเกิดแรงดันเกินขึ้นที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพนั้นก็คือ อาร์คชิงฮอร์น โดยปกติจะติดตั้งอยู่ที่ขั้วของหม้อแปลง มีลักษณะเป็นตัวนำแบบแท่ง-แท่งระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานที่เลือกใช้

โดยปกติอาร์คชิงฮอร์นจะรับแรงดันกระแสสลับอยู่โดยตลอดเวลา แต่เมื่อมีแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าเข้ามาจะทำให้มีลักษณะแรงดันฟ้าผ่า ไปทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ดังนั้นจึงได้นำมาศึกษาคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวน์ระหว่างช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่งด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ลักษณะการทับซ้อนกันหม้อมที่มุม 0° - 360° ของแรงดันกระแสสลับ

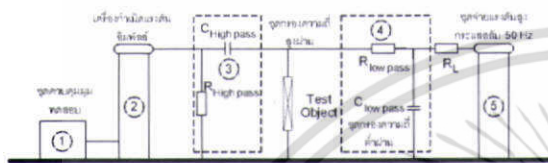


รูปที่ 1 รูปแบบของอาร์คชิงฮอร์น

2. หลักการและทฤษฎี

2.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

การสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz จะประกอบด้วยส่วนหลักๆ 5 ส่วนคือ ชุดควบคุมมุมทับซ้อน (1), เครื่องสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (2), ชุดกรองความถี่สูงผ่าน (3), ชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน (4), ชุดจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับ (5)



รูปที่ 2 ชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ [2]

โดยการทำงานของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ จะเริ่มจากการจ่ายแรงดันกระแสสลับตามพิกัดที่ต้องการทดสอบผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ป้อนเข้ามาจากชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ หลังจากได้แรงดันกระแสสลับที่ต้องการจึงทำการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ได้เลือกมุมและขนาดตามพิกัดที่ต้องการผ่านชุดกรองความถี่สูงผ่าน เพื่อไปทับซ้อนกับแรงดันกระแสสลับที่ตกคร่อมกับอุปกรณ์อยู่ ซึ่งชุดกรองความถี่สูงผ่านจะเป็นชุดป้องกันไม่ให้แรงดันสูงกระแสสลับมาตกคร่อมชุดสร้างแรงดันอิมพัลส์ [3]

2.2 ช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่ง

ช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่งปลายตัดนำมาจากทองเหลืองยาวแท่งละ 4 เซนติเมตรมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร คัดตรงติดตั้งอยู่ในตู้ซึ่งทำจากอะคริลิกที่มีขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร สามารถปรับระยะห่างระหว่างแท่งได้ตั้งแต่ 0 – 3 เซนติเมตร



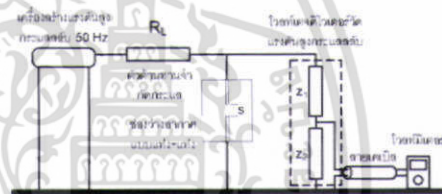
รูปที่ 3 (ก) ลักษณะของแท่งตัวนำตัดเทียบกันหรือดูขนาด (ข) ช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่งที่ประกอบภายในตู้

3. การทดสอบและผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ของแรงดันกระแสสลับ 50 Hz การทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อน และการทดสอบการเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มีมุมต่างๆกัน

3.1 แรงดันเบรกดาวน์ของแรงดันกระแสสลับ

การทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ของแรงดันกระแสสลับ 50 Hz วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนระยะห่างของช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่งดังนี้ 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 เซนติเมตรตามลำดับ โดยในแต่ละระยะห่างจะทำการทดสอบ 5 ครั้งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย และในการทดสอบทุกครั้งจะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นและความดันบรรยากาศ ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1 เป็นค่าที่แก้ไขแล้วด้วยตัวประกอบแก้ไขสภาพบรรยากาศ



รูปที่ 4 วงจรการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ

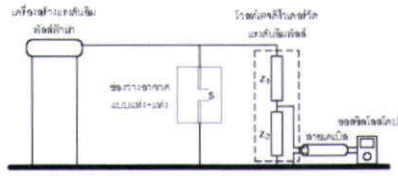
ตารางที่ 1 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแรงดันกระแสสลับ ที่สภาวะมาตรฐาน

| ระยะห่าง(ซม.) | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| แรงดัน | | | | | | |
| เบรกดาวน์(kV) | 10.55 | 12.41 | 15.38 | 17.55 | 22.00 | 30.13 |

3.2 แรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อน ($U_{b50\%}$)

การทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อน วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งทำการทดสอบโดยเปลี่ยนระยะห่างของช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่งดังนี้ 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 เซนติเมตรตามลำดับ โดยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s ตามมาตรฐาน IEC 60-1[4] ทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ทางสถิติ โดยใช้วิธีการปรับขึ้นลง(Up and Down Method) [5] จำนวน 20 ครั้ง และในการทดสอบทุกครั้งจะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นและความดันบรรยากาศ ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 เป็นค่าที่แก้ไขด้วยตัวประกอบแก้ไขสภาพบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON-32) 28-30 ตุลาคม 2552 มหาวิทยาลัยมหิดล



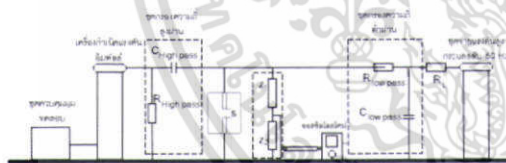
รูปที่ 5 วงจรการทดสอบหาแรงดันเบรคความถี่ทางสถิติของอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลอง

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันเบรคความถี่ทางสถิติของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s ที่สภาวะมาตรฐาน

| ระยะห่าง(ซม.) | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| แรงดันเบรคความถี่ (kV _p) | 15.87 | 21.94 | 25.60 | 30.92 | 37.48 | 44.99 |

3.3 การเบรคความถี่ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่มุมต่างๆ

การทดสอบการเบรคความถี่ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่มุมต่างๆ วงจรการทดสอบแสดงรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ซึ่งได้กำหนดระยะห่างของช่องว่างอากาศแบบแห้งไว้ที่ระยะ 3 เซนติเมตร จะทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 90%, 80% และ 70% ของแรงดันเบรคความถี่กระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า จากข้อมูลการทดสอบทั้งสองกรณีพบว่าค่าแรงดันเบรคความถี่กระแสสลับ 50 Hz เท่ากับ 30.13 kV และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าวิกฤติจำลองเท่ากับ 43.14 kV เมื่อทำการหาค่าแรงดันเป็นเปอร์เซ็นต์ที่จะใช้ทดสอบแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 6 วงจรการทดสอบการเบรคความถี่ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ



1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
2. อิมพัลส์โวลท์เดจดีไวเซอร์
3. ช่องว่างอากาศแบบแห้ง-แห้ง

รูปที่ 7 วงจรที่ใช้ทดสอบจริง

ตารางที่ 3 สรุปค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบการเบรคความถี่ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

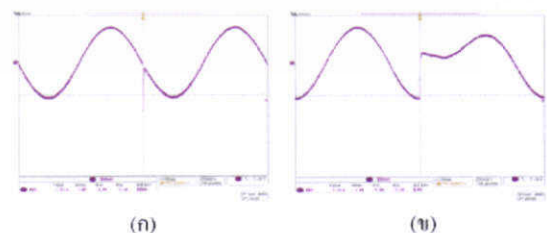
| ค่าเปอร์เซ็นต์ (%) | ค่าแรงดันกระแสสลับ (kV _p) | ค่าแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลอง (kV) |
|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 90 | 27.1 | 40.49 |
| 80 | 24.1 | 35.59 |
| 70 | 21.1 | 32.92 |

ในการทดสอบจะกำหนดมุมที่ต้องทดสอบดังนี้ 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° และ 315° ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบแต่ละมุมจะทำการทดสอบการเกิดเบรคความถี่ 5 ครั้งแล้วหาค่าเปอร์เซ็นต์การเบรคความถี่แต่ละมุม เนื่องจากผลที่ได้จากการทดสอบนั้นมุมที่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนอยู่นั้นทางด้านช่วงบวกของแรงดันกระแสสลับ ไม่เกิดการเบรคความถี่ดังนั้นจึงขอเสนอข้อมูลเฉพาะทางด้านลบช่วงลบของแรงดันกระแสสลับดังแสดงค่าในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเบรคความถี่ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่มุมต่างๆทางด้านลบของแรงดันกระแสสลับ

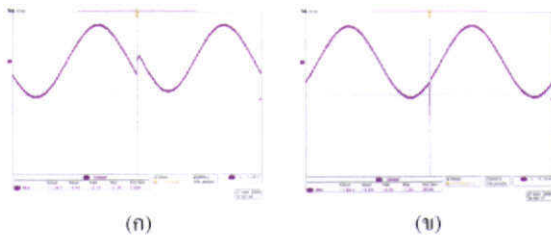
| เปอร์เซ็นต์ของแรงดัน AC/II (%) | เบรคความถี่/ไม่เบรคความถี่ (ครั้ง) | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|------|------|------|
| | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 90/90 | 0/5 | 5/0 | 5/0 | 5/0 |
| 90/80 | 0/5 | 4/1 | 5/0 | 5/0 |
| 90/70 | 0/5 | 4/1 | 5/0 | 5/0 |
| 80/90 | 0/5 | 4/1 | 5/0 | 4/1 |
| 80/80 | 0/5 | 3/2 | 5/0 | 4/1 |
| 80/70 | 0/5 | 1/4 | 5/0 | 1/4 |
| 70/90 | 0/5 | 3/2 | 5/0 | 3/2 |
| 70/80 | 0/5 | 2/3 | 5/0 | 2/3 |
| 70/70 | 0/5 | 0/5 | 3/2 | 0/5 |

ลักษณะตัวอย่างของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆแสดงดังรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10

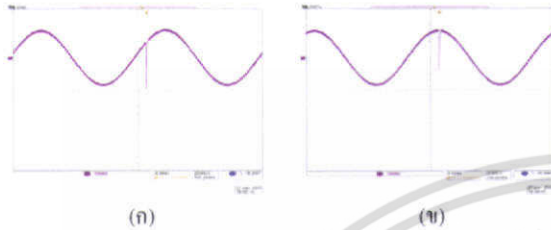


รูปที่ 8 ตัวอย่างรูปคลื่นทับซ้อน (ก) มุม 180° (ไม่เบรคความถี่) (ข) มุม 270° (เบรคความถี่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ดิฉันทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON-32) 28-30 ตุลาคม 2552 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



รูปที่ 9 ตัวอย่างรูปคลื่นทับซ้อน
(ก) มุม 225° (เบรคความ) (ข) มุม 315° (ไม่เบรคความ)



รูปที่ 10 ตัวอย่างรูปคลื่นทับซ้อน
(ก) มุม 45° (ไม่เบรคความ) (ข) มุม 90° (ไม่เบรคความ)

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการรังที่ 4 มาทำกราฟทำเปอร์เซ็นต์การเบรคความที่มุมและขนาดแรงดันต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 เป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเกิดเบรคความของช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่งที่รับแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่าเข้าทับซ้อนบนแรงดันกระแสลับ



รูปที่ 12 เปอร์เซนต์การเบรคความของแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่าเข้าทับซ้อนบนแรงดันกระแสลับ 50 Hz

4. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบการเกิดเบรคความของช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่งที่รับแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่าเข้าทับซ้อนบนแรงดันกระแสลับ ที่มุมต่างๆนั้น พบว่าช่องว่างอากาศจะเกิดการเบรคความด้วยแรงดันทับซ้อนที่อยู่ในช่วงมุมของแรงดันสูงกระแสลับ เนื่องจากมีการทับซ้อนกันในลักษณะเสริมกัน

ช่วงมุมที่ทำให้แรงดันมีโอกาสเกิดการเบรคความได้มากที่สุด โดยเฉพาะในช่วงมุม 225°-315° จะเกิดการเบรคความเกิน 50 % ในแต่

ละช่วงระดับแรงดันการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าที่มุม 270° จะเกิดการเบรคความ 100 % แทบจะทุกระดับแรงดันที่ทดสอบ และในช่วงระดับแรงดันที่ 90°-90% นั้นพบว่าที่มุมช่วง 225°-315° อกสาจะเกิดการเบรคความที่รุนแรงก็เอือเกิดการเบรคความนี้เนื่องจากการกินตัวของอากาศระหว่างแท่งตัวนำทั้งสองกินตัวเป็นฉนวน ไม่นั่นทำให้เกิดผลดังกล่าว

5. สรุป

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการทดสอบหาการเกิดเบรคความของช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่งที่รับแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่าเข้าทับซ้อนบนแรงดันกระแสลับ ที่มุมต่างๆ จากการทดสอบพบว่าช่องว่างอากาศแบบแท่ง-แท่งที่รับแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่าเข้าทับซ้อนบนแรงดันกระแสลับ นั้นจะเกิดการเบรคความในช่วงลบของแรงดันกระแสลับตั้งแต่มุม 225°-315° และจะเกิดการเบรคความนี้ที่รุนแรงในช่วงค่ายอดของแรงดันกระแสลับที่มุม 270°

เอกสารอ้างอิง

- [1] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, "เอกสารประกอบการสอนวิชา ADVANCED HIGH VOLTAGE TECHNOLOGY", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- [2] สรรชัย อานอานา, และคณะ "เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสลับที่คิด 6 kV" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล., 2551.
- [3] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, "เอกสารประกอบการสอนวิชา HIGH VOLTAGE ENGINEERING", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- [4] IEC 60-1 High-voltage test techniques. General definitions and test requirements 1989.
- [5] คำรวย สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พิมพ์ครั้งที่ 3, มีนาคม 2549.

ประวัติผู้เขียน



สรชัย อานอานา กำลังศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



ASIA-PACIFIC LIGHTNING

International Conference and Technical Exhibition of Lightning Protection Technologies and Devices

Welcome

What's New

Conference Committee

Technical Program
Committee

Domestic Committee of
Science and Technology

Steering Committee

Technical Topics

Special Sessions

Important Dates

Paper Submission

APL Prizes

Registration & Fees

What's New

Of The 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning

Crowne Plaza Chengdu, Nov. 1-4, 2011, Chengdu, China

The Conference Final Program is available for your information!

[Click here to download the final program](#)

If you have any question about the final program, please contact us via email apl2011@tsinghua.edu.cn.

The special hotel deal is announced now!

[Click here to get the hotel room reservation information.](#)

[Download the Second call for paper](#)

Experimental Studies of Breakdown Characteristics of a 12-kV Arcing Horn under a Lightning Impulse Superimposed on AC Voltage

Sunchai Arnacha^{#1}, Anantawat Kunakorn^{#2}, Peerawut Yutthagowith^{#3}, Piyapon Tuethong^{#4}

[#]Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

¹a_sanchai@power.kmitl.net

²kkananta@kmitl.ac.th

³kypeeraw@kmitl.ac.th

⁴T_Piyapon@hotmail.com

Abstract— This paper presents the studies of breakdown characteristics of a 12-kV arcing horn under a lightning impulse superimposed on an AC power frequency voltage at various angles. The lightning impulse is superimposed on the AC power frequency voltage at a phase angle varied from 0° to 360°. The 12-kV arcing horn under test has dimension and configuration according to DIN 42531 standard. The critical breakdown voltages ($U_{b50\%}$) with and without superposition of an impulse voltage on the AC voltage are investigated and made comparison. It is found that the statistical breakdown voltages are depended on the phase angle of the AC voltage superposed by the lightning impulse voltage. From the test results, the AC voltage affects the insulation level and it should be taken into account in an insulation design and insulation coordination.

I. INTRODUCTION

Distribution transformers are used to transfer energy from a medium voltage to the low voltage. Normally, the distribution transformer is installed in the open air area which is located on a pole of the distribution system. Therefore, the transformer has some possibilities to encounter the over voltages from switching operation and lightning phenomena. For lightning protection of the distribution transformer in Thailand, arcing horns are usually used. From the Thai national standard, the arcing horn in Thailand has to conform with DIN 42531 standard [1] and normally is installed across a bushing of a transformer. In order to ensure the operating safety of a distribution transformer in a power system, it is necessary that we should study the characteristics of a breakdown voltage of the arcing horn. Especially when the arcing horn is operating under power-frequency voltage, and at the same time encounters the lightning or other impulse voltages.

II. EXPERIMENTAL APPARATUS AND METHOD

A. Arcing Horn under Test

An arcing horn used in a 12 kV system is selected as a specimen under test. The dimension and configuration of the

arcing horn according to the DIN 42531 standard are given and shown in Fig. 1. The arcing horn is made of stainless steel electrodes with a diameter of 0.8 cm. The angle of the upper electrode has an angle of 130° with the horizontal direction. The vertical gap distance is 8.5 cm and horizontal distance between the upper and the lower electrode is set to be 2.5 cm.

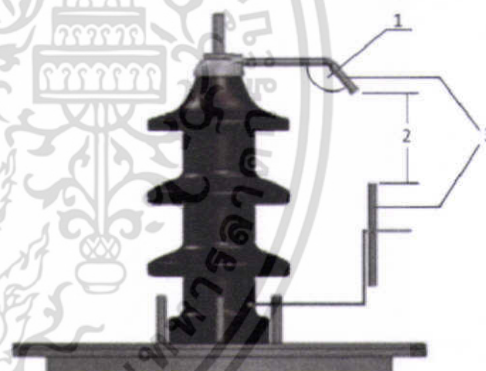


Fig.1. Arcing horn under test according to the DIN 42531.

B. Test Circuit of a Lightning Impulse Voltage Superimposed on AC Power Frequency Voltage

The test circuit shown in Fig. 2 [2] is composed of a phase control circuit device, an impulse voltage generator, a high pass filter, a low pass filter, and an AC voltage transformer. The phase control device allow for the superposition of an impulse at any selected phase angle of the power-frequency voltage waveform. The high pass filter is used for blocking AC voltage to the impulse generator and the low pass filter is used for blocking an impulse voltage to the transformer. Example waveforms of a lightning impulse voltage superposed on AC voltage are shown in Fig. 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

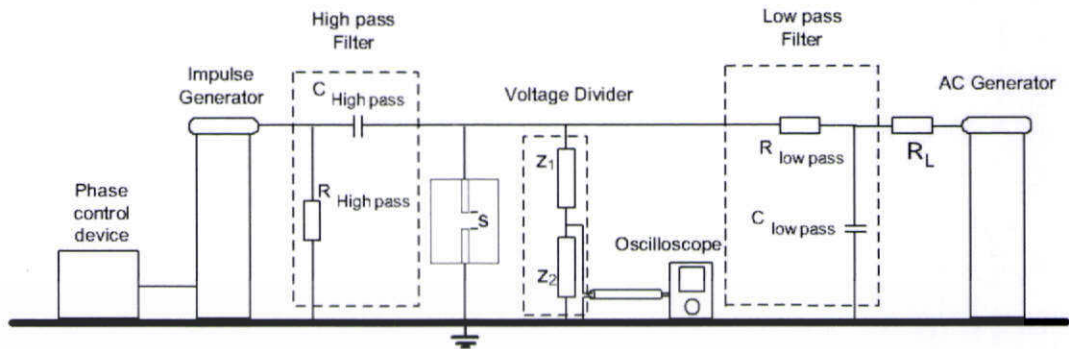


Fig. 2. Test Circuit of a Lightning Impulse Voltage Superposed on AC Power Frequency Voltage.

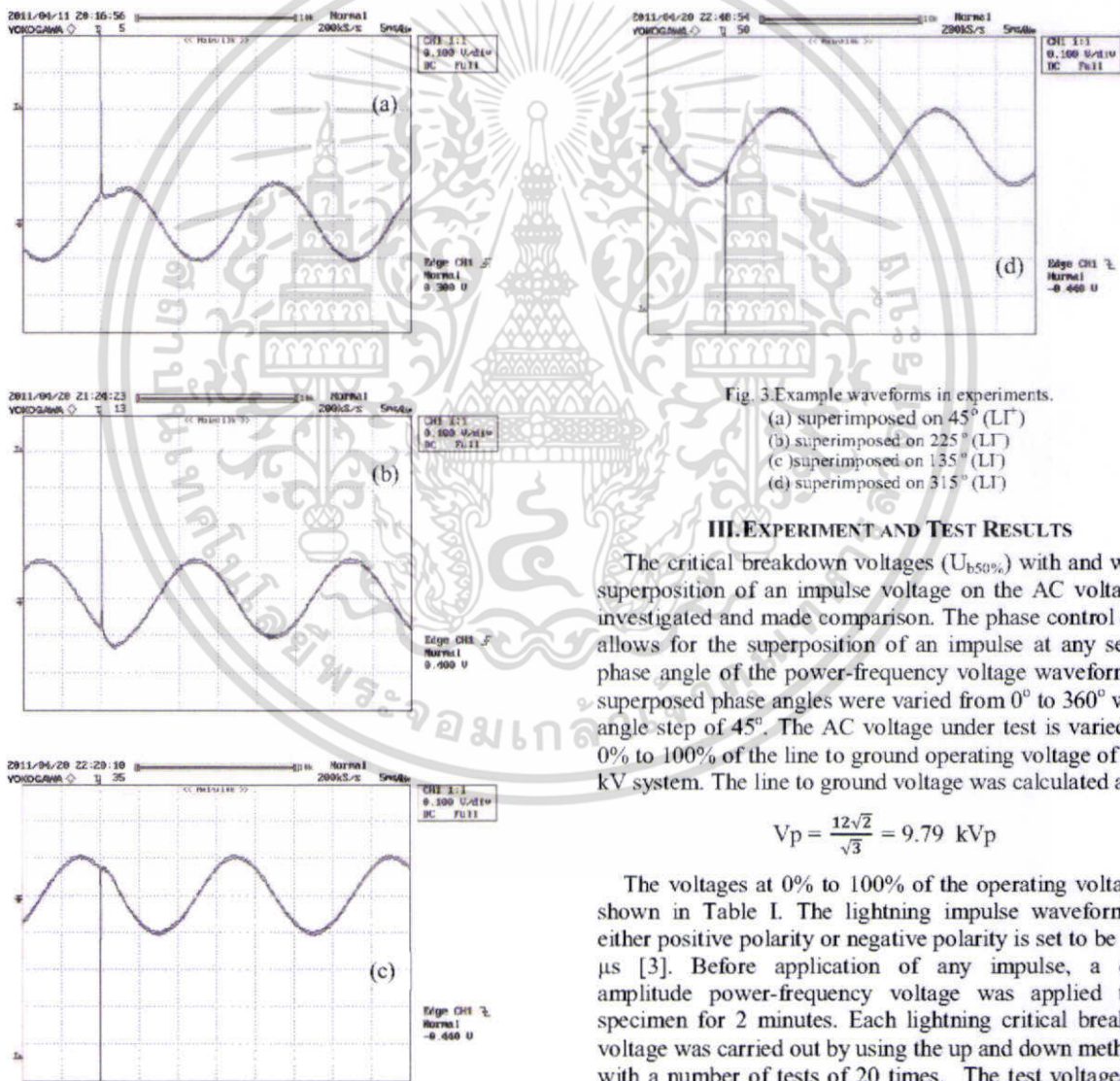


Fig. 3. Example waveforms in experiments.

- (a) superimposed on 45° (LI)
- (b) superimposed on 225° (LI)
- (c) superimposed on 135° (LI)
- (d) superimposed on 315° (LI)

III. EXPERIMENT AND TEST RESULTS

The critical breakdown voltages ($U_{b50\%}$) with and without superposition of an impulse voltage on the AC voltage are investigated and made comparison. The phase control device allows for the superposition of an impulse at any selected phase angle of the power-frequency voltage waveform. The superposed phase angles were varied from 0° to 360° with an angle step of 45°. The AC voltage under test is varied from 0% to 100% of the line to ground operating voltage of the 12 kV system. The line to ground voltage was calculated as (1).

$$V_p = \frac{12\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 9.79 \text{ kVp} \quad (1)$$

The voltages at 0% to 100% of the operating voltage are shown in Table I. The lightning impulse waveform with either positive polarity or negative polarity is set to be 1.2/50 μ s [3]. Before application of any impulse, a certain amplitude power-frequency voltage was applied to the specimen for 2 minutes. Each lightning critical breakdown voltage was carried out by using the up and down method [2] with a number of tests of 20 times. The test voltages were measured by the measuring system composed of the damped capacitive voltage divider and a digital oscilloscope as

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2011

shown in Fig. 2. The temperature and humidity under test are recorded. The results were corrected by the correction factor calculated from the temperature and humidity.

Table I.Percentage of AC Voltage under test.

| Percentage (%) | ACvoltage(kVp) |
|----------------|----------------|
| 0 | 0 |
| 25 | 2.44 |
| 50 | 4.89 |
| 75 | 7.34 |
| 100 | 9.79 |

A. Lightning Critical Breakdown Voltage of a 12-kV Arcing Horn

The preliminary test of the critical breakdown voltage without superposition of an impulse voltage on AC voltage was carried out and the test results are shown in Table II. The test results of the critical breakdown voltage is higher than the withstand voltage, 75 kV which is recommended by the DIN standard [1].

Table II.Critical breakdown voltage.

| Polarity | Positive | Negative |
|---|----------|----------|
| Critical breakdown voltage (kV _p) | 83.96 | 84.61 |

B. Critical Breakdown Voltage with Superposition of an impulse voltage on AC Voltage

The test results with superposition of an impulse voltage on AC voltage at various phase angles are shown in Figs. 4 to 11.

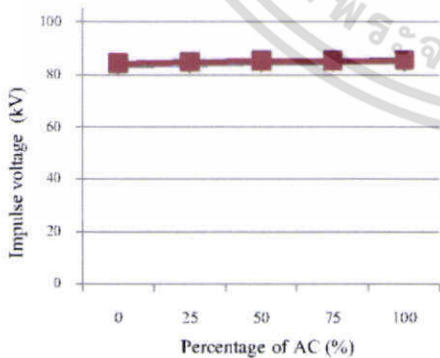


Fig. 4. Critical breakdown voltage (impulse voltage superimposed at phase angle of 0°).

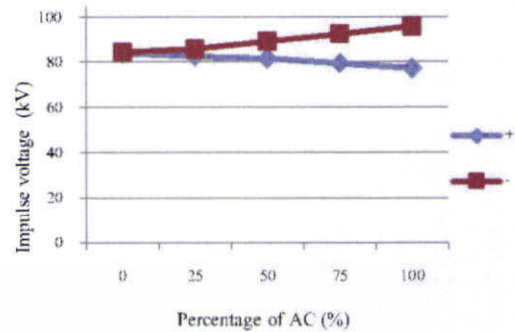


Fig. 5. Critical breakdown voltage (impulse voltage superimposed at phase angle of 45°).

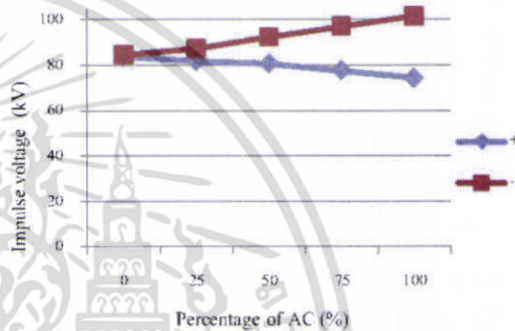


Fig. 6. Critical breakdown voltage (impulse voltage superimposed at phase angle of 90°).

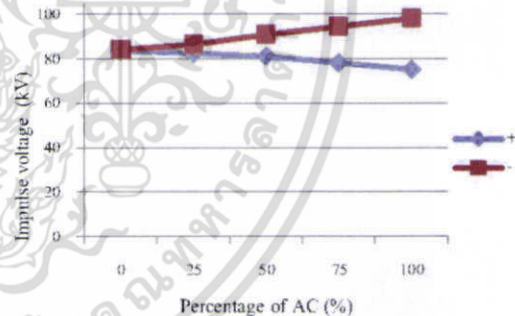


Fig. 7. Critical breakdown voltage (impulse voltage superimposed at phase angle of 135°).

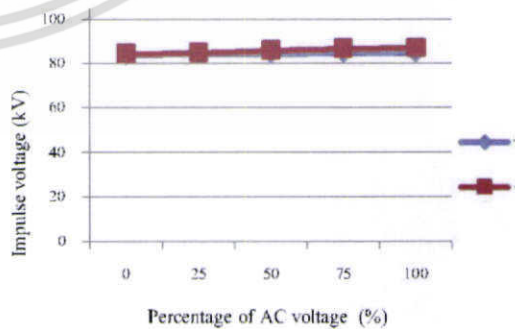


Fig. 8. Critical breakdown voltage (impulse voltage superimposed at phase angle of 180°).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2011

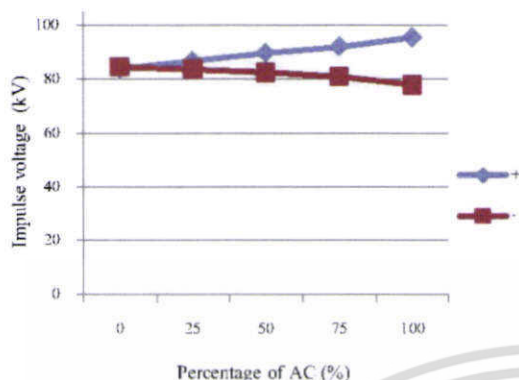


Fig. 9. Critical breakdown voltage (impulse voltage superimposed at phase angle of 225°).

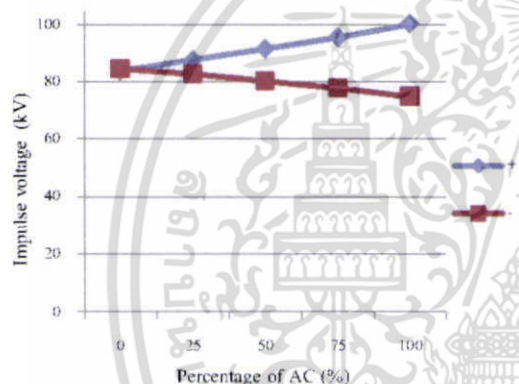


Fig. 10. Critical breakdown voltage (impulse voltage superimposed at phase angle of 270°).

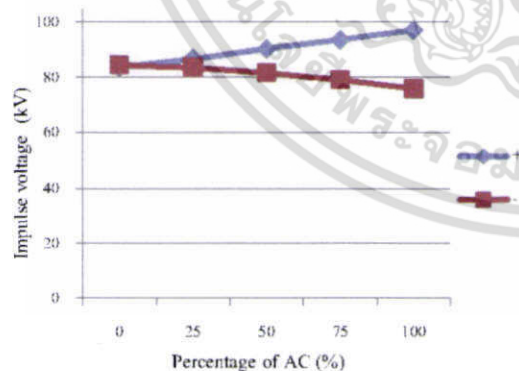


Fig. 11. Critical breakdown voltage (impulse voltage superimposed at phase angle of 315°).

It can be noticed from the result in Figs. 4 to 11. The critical breakdown voltage with superposition of an impulse voltage is decreased from that without superposition of an impulse voltage when the impulse voltage and the AC

voltage are of the same polarity. The critical breakdown voltage with superposition of an impulse voltage is increased from that without superposition of an impulse voltage when the impulse voltage and the AC voltage are of the opposite polarity. When the peak of AC voltage is fixed, the maximum critical breakdown voltage is occurred at the superposed phase angle of voltage peak and the impulse voltage and the AC voltage are of the opposite polarity. The minimum critical breakdown voltage is occurred at the superposed phase angle of voltage peak and the impulse voltage and the AC voltage are of the same polarity.

IV. CONCLUSIONS

The relative polarity of the impulse voltage and the power-frequency voltage peak and the phase angle of their superpositions affect the critical breakdown voltage of an arcing horn. In the severest case, the critical breakdown voltage in a case of superimposed a lightning impulse on AC voltage at the phase of a peak voltage is different from that in a case of without superimposing of impulse about 20%. The effect of AC voltage should be taken into account in an insulation design and coordination.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank electrical engineering department, faculty of engineering, King Mongkut's institute of Technology Ladkrabang for providing equipments used in the experiments and financial support.

REFERENCES

- [1] DIN 42531 standard HV porcelain bushing insulators.
- [2] Riechert U., Eberhardt M., Kindersberger J., Speck, J., "Breakdown characteristics of polyethylene insulations under DC voltage and with superimposed impulse voltage", in proceeding of ISH97, Vol. 2, pp.109-112, August, 1997.
- [3] IEC 60060-1 High-voltage test techniques, General definitions and test requirements 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสรชัย อานอาษา เกิดเมื่อวันที่ 12 มีนาคม 2529 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2551

เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในปี 2552 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าระหว่างศึกษาปริญญาโท 2 บทความคือ

1. วารสารประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 จำนวน 1 เรื่อง
2. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning 1 เรื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้