

การศึกษาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น
ต่อระบบป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแกป

A STUDY EFFECTS OF SHORT TAIL LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE
ON OVERVOLTAGE PROTECTION WITH SPARK GAP



ไชยพร หล่อทองคำ
CHAIYAPORN LORTHONGKAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ฉ.พ.
ร/8657
2047

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2547

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 52460
วัน,เดือน,ปี 14 ก.ย. 2547

ISBN 974 -15-1032-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11221812
b.....
.....

**A STUDY EFFECTS OF SHORT TAIL LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE
ON OVERVOLTAGE PROTECTION WITH SPARK GAP**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MATER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2004

ISBN 974 -15-1032-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น ต่อระบบป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแก๊ป
นักศึกษา	นายไชยพร หล่อทองคำ
รหัสนักศึกษา	45061027
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นรายงานผลการศึกษาค่าแรงดันเบรกดาวน์ในช่องแก๊ปอากาศ เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นรูปคลื่น $1.2/4 \mu\text{s}$ ซึ่งเกิดจากวาทไฟตามผิวย้อนกลับของพวงลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบ เปรียบเทียบกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ การสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น $1.2/4 \mu\text{s}$ ใช้การออกแบบตัดแปลงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานขนาด 400 kV ทำการทดสอบด้วยชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่งทองเหลืองแบบสมมาตรที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 3 แบบ คือ แบบแท่งสี่เหลี่ยมหัวตัด, แบบแท่งกลมหัวโค้งมน และแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ ที่ระยะแก๊ป 10, 15 และ 20 cm จากผลการทดลองพบว่าทั้งค่าแรงดันเบรกดาวน์เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) และระดับแรงดันเบรกดาวน์ของเส้นกราฟคุณลักษณะสมบัติแรงดัน-เวลา ($v-t$ curve) ของช่องแก๊ปอากาศ กรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นจะมีค่าที่สูงกว่ากรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน ซึ่งเป็นไปทำนองเดียวกันทุกรูปทรงอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการทดสอบทั้งกรณีชั่วคราวและชั่วคราว แสดงให้เห็นว่าแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นมีผลต่อระดับการฉนวนของอุปกรณ์ในระบบ ข้อมูลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาเทคนิคการประสานสัมพันธ์การฉนวนของอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาแรงดันเกินที่เกิดจากวาทไฟตามผิวย้อนกลับของพวงลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเมื่อเกิดฟ้าผ่าเข้าสู่ระบบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Study Effects of Short Tail Lightning Impulse Voltage on Overvoltage Protection with Spark Gap
Student	Mr. Chaiyaporn Lorthongkam
Student ID.	45061027
Degree	Master
Programme	Electrical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

This thesis deals with experimental studies of breakdown voltages of air – gaps applied by a Short Tail Lightning Impulse (STLI) voltage, i.e. 1.2/4 μ s waveform, which is generated by a flashover on the insulator string, compared with Standard Lightning Impulse (SLI) voltage, i.e. 1.2/50 μ s waveform. The STLI voltage is generated by the modification of a 400 kV standard impulse voltage generator. The geometry of the tested electrodes is studied under symmetry shape conditions. The test electrodes are brass rod electrodes. Three shapes of rod electrodes are used: square-rod, cylindrical rod with rounded extremity and cylindrical rod with smooth extremity, among the gap space of 10, 15 and 20 cm respectively. The results show that both $V_{b50\%}$ and V-t curve of STLI voltages are higher than the SLI voltages. It is also found that the $V_{b50\%}$ and V-t curves are not dependent on the electrode configurations and polarity of test voltages. The advantages of this research are indicated that the STIL voltage can effect the insulation level of power equipment. The advantages of this research are to develop insulation co-ordination techniques of power equipment and to solve the overvoltage problems in the case of lightning strike and back flashover occurring on the insulator string.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณธีรยุทธ พิมเพ็ชร, คุณอนุชา ชุมแสง, คุณสรรพพชญ หมอปาน, คุณพงษ์ศักดิ์ ธรรมรัตน์, คุณประกายเพชร มลาทิพย์, คุณคณาพล ชีพธำรง, คุณสรารุช โชคอำนวย และคุณปริณ บุตรนุช นักศึกษาระดับปริญญาตรี ที่ช่วยจัดเตรียมการทดลองตลอดจนทำการทดลองเก็บผลในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงอย่างทรหดอดทนยิ่ง จนได้ข้อมูลผลการทดลองครบถ้วน

ขอขอบพระคุณท่านคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์, รองศาสตราจารย์ นิทัศน์ กฤษณะจินดา, รองศาสตราจารย์ จงรักษ์ บุญเส็ง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ผู้ทำหน้าที่เป็นคณะกรรมการสอบกำกับมาตรฐานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัย รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบความสมบูรณ์ของเนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณท่าน รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสและความหวังใจอันดีต่อลูกศิษย์เสมอมา ทั้งยังคอยให้คำแนะนำปรึกษา รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยอย่างมาก นอกจากนี้ยังได้กรุณาช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

และสุดท้ายขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาวิจัย และอำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่ทดลองจนเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง เพื่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา ครู-อาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

ไชยพร หล่อทองคำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	5
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	8
1.5 ขอบเขตการวิจัย	12
1.6 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย	13
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	15
2.1 บทนิยามและคำจำกัดความ	15
2.2 แรงดันอิมพัลส์	16
2.3 การวาบไฟย้อนกลับบนลูกถ้วยฉนวน	19
2.4 หลักการสร้างแรงดันอิมพัลส์	20
2.5 การวัดแรงดันอิมพัลส์	25
2.6 การเบรคดาวนเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์	32
2.7 ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา (Voltage-Time Curve)	34
2.8 การป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ (Surge Protection)	35
2.9 การประสานสัมพันธ์การฉนวน (Insulation Co-Ordination)	39
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	41
3.1 การออกแบบสร้างแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI	41
3.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับโปรแกรม PSPICE	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง (ต่อ)	
3.3 การสร้างตัวต้านทานหน่วงเวลาช่วงหางคลื่น (Tail Resistor)	52
3.4 การติดตั้งและทดสอบการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI	60
3.5 การออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์ทดสอบพร้อมฐานติดตั้ง	63
3.6 คุณสมบัติของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้ศึกษาวิจัย	66
บทที่ 4 ระเบียบวิธีการวิจัย	68
4.1 วิธีการหาค่าแรงดันเบรคความถี่เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$)	68
4.2 วิธีการทดสอบหาเส้นกราฟคุณลักษณะแรงดัน-เวลา	72
4.3 การเตรียมการทดลองในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง	74
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	76
5.1 ผลการศึกษาช่องแคบอากาศ (Rod Gap) กรณีรูปคลื่นแรงดัน STLI แบบ 1.2/4 μ s	76
5.2 การศึกษาเพิ่มเติมกรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/8 μ s และ แบบ 1.2/10 μ s	89
5.3 ผลการศึกษาเพิ่มเติมกรณีทดสอบกับอุปกรณ์ กับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester)	95
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	104
6.1 สรุปผลการทดลองของชุดแท่งอิเล็กโตรด	104
6.2 สรุปผลการทดลองเพิ่มเติมในกรณี Surge Arresters	109
6.3 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	110
เอกสารอ้างอิง	113
ภาคผนวก	117
ภาคผนวก ก เครื่องกำเนิดแรงดันสูงอิมพัลส์และอุปกรณ์วัด	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข Specification of Nickel-Chromium (Ni-Cr) 80/20	120
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบ Surge Arrester LAZ-P24	122
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบ Surge Arrester LAZ-P21.....	139
ภาคผนวก จ ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	156
ประวัติผู้เขียน	170



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการศึกษาวิจัย	14
2.1 ค่าคงที่ K_1, K_2 และ $1/\alpha_1, 1/\alpha_2$ ที่เหมาะสมสำหรับรูปคลื่นต่างๆ ตามมาตรฐาน	23
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RAD และ Correction Factors (k_d)	28
3.1 สรุปค่าการออกแบบความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณเบื้องต้น	47
3.2 สรุปค่าความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณและจากโปรแกรม PSPICE	52
3.3 คุณสมบัติจำเพาะของลวดความต้านทานชนิด NiCr	53
3.4 ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่วัดได้จริง	60
4.1 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ (RAD) เปรียบเทียบกับ ค่าแฟกเตอร์ K_d	70
5.1 ผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของช่องแกปอากาศ กรณีรูปทรงอิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมน	78
5.2 ผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของช่องแกปอากาศ กรณีรูปทรงอิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ	79
5.3 ผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของช่องแกปอากาศ กรณีรูปทรงอิเล็กโตรดแบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ	80
5.4 เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของทุกรูปทรงอิเล็กโตรด	81
5.5 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $V_{b50\%}$ จากผลการทดลอง	82
5.6 ผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของ อิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบ	90
5.7 ผลการทดสอบ Surge Arrester รุ่น LAZ-P24 ด้วยการจ่ายแรงดัน ทดสอบแบบต่างๆ	100
5.8 ผลการทดสอบ Surge Arrester รุ่น LAZ-P21 ด้วยการจ่ายแรงดัน ทดสอบแบบต่างๆ	103
6.1 สรุปค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของชุดแท่งอิเล็กโตรดแบบต่างๆ	104
6.2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $V_{b50\%}$ กรณีแรงดัน SLI กับ STLI	104
ข.1 Specification for Nichrome Electrical Resistance Wire (80/20)	121
ค.1 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ค.2	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s	124
ค.3	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s	125
ค.4	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s	126
ค.5	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/4 μ s	127
ค.6	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/4 μ s	128
ค.7	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/4 μ s	129
ค.8	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/4 μ s	130
ค.9	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s	131
ค.10	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s	132
ค.11	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s	133
ค.12	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s	134
ค.13	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s	135
ค.14	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s	136
ค.15	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s	137
ค.16	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s	138
ง.1	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s	140
ง.2	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s	141
ง.3	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s	142
ง.4	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s	143
ง.5	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/4 μ s	144
ง.6	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/4 μ s	145
ง.7	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/4 μ s	146
ง.8	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/4 μ s	147
ง.9	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s	148
ง.10	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s	149
ง.11	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s	150
ง.12	ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s	151

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ง.13	ผลการทดสอบกับคักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s	152
ง.14	ผลการทดสอบกับคักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s	153
ง.15	ผลการทดสอบกับคักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s	154
ง.16	ผลการทดสอบกับคักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s	155



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	ลักษณะการเกิด Back Flashover ในระบบสายส่งแบบใช้เสาปูน	2
1.2	ตัวอย่างลักษณะแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI)	3
1.3	รูปคลื่น STLI เปรียบเทียบกับรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน	3
1.4	ตัวอย่างอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแก๊ปที่ใช้งานจริง	6
1.5	Voltage – Time Characteristics หรือ v-t curve	6
1.6	การป้องกันอุปกรณ์ด้วย Rod Gap แบบสมบูรณ์ กรณีเกิดแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μ s	7
1.7	ผลกระทบที่เกิดกับระบบป้องกันแรงดันเกินด้วย Rod Gap เมื่อได้รับแรงดัน STLI	7
1.8	แนวทางในการออกแบบชุดอิเล็กโตรด	10
1.9	ชุดแท่งอิเล็กโตรดที่ใช้ในงานวิจัย	11
2.1	แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม	17
2.2	แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด	18
2.3	ลักษณะการเกิดควาปไฟตามผิวบนพวงลูกถ้วยฉนวนแขวน	19
2.4	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	20
2.5	วงจรสมมูลการแปลงลาปลาซของวงจรในรูปที่ 2.4 (ก)	22
2.6	เส้นกราฟใช้หาค่าแรงดันดีสชาร์จเบรคดาวน์ 50%	26
2.7	วงจรพื้นฐานการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์	29
2.8	เวลาล่าช้าของการเกิดเบรคดาวน์ภายใต้แรงดันอิมพัลส์	34
2.9	ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์	35
2.10	เปรียบเทียบเส้น v-t curve ของแก๊ปทรงกลมกับแก๊ปปลายแหลม	35
2.11	เสาต่อฟ้าที่มีความต้านทานต่ำจะสร้างสตริมเมอร์ออกไปได้ยาวกว่า	37
2.12	ลักษณะการทำงานของกัปดักเสิร์จ	39
2.13	การประสานสัมพันธ์การฉนวนของอุปกรณ์และระบบ	40
3.1	เครื่องกำเนิดแรงดันสูงอิมพัลส์ยี่ห้อ PASSONI&VILLA พิกัด 400 kV 4-Stages	42
3.2	ไดอะแกรมวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV, 14 kJ, 4-stage	42
3.3	วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ 4 ชั้น ใน โปรแกรม PSPICE	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s ขั้วลบ จากการจำลองด้วย โปรแกรม PSPICE OUTPUT: -95 kV ; $T_1/T_2 = 0.92 / 45.48 \mu$ s, $\eta = 95\%$	49
3.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/4 μ s ขั้วลบ จากการจำลองด้วย โปรแกรม PSPICE OUTPUT: -232 kV ; $T_1/T_2 = 1.1 / 4.2 \mu$ s, $\eta = 85\%$	50
3.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/8 μ s ขั้วลบ จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE OUTPUT: -90.38 kV ; $T_1/T_2 = 0.78 / 8.0 \mu$ s, $\eta = 90.4\%$	50
3.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/10 μ s ขั้วลบ จากการจำลองในโปรแกรม PSPICE OUTPUT: -91.5 kV ; $T_1/T_2 = 0.819 / 10.32 \mu$ s, $\eta = 91.5\%$	51
3.8 ลักษณะการกึ่งต่อพีวีซีแบบเกลียวเพื่อรองรับการพันขดลวด ความต้านทาน 5.4 Ω	56
3.9 ลักษณะการกึ่งต่อพีวีซีแบบเกลียวเพื่อรองรับการพันขดลวด ความต้านทาน 13 Ω	57
3.10 ลักษณะการกึ่งต่อพีวีซีแบบเกลียวเพื่อรองรับการพันขดลวด ความต้านทาน 18 Ω	57
3.11 ลักษณะการกึ่งต่อขั้วอิเล็กทรอนิกส์ของตัวความต้านทาน 5.4 Ω	57
3.12 ลักษณะการกึ่งต่อขั้วอิเล็กทรอนิกส์ของตัวความต้านทาน 13 Ω และ 18 Ω	57
3.13 ตัวความต้านทานหน่วยเวลาที่ประกอบสร้างเสร็จ (5.4 Ω)	59
3.14 ตัวความต้านทานหน่วยเวลาที่ประกอบสร้างเสร็จ (5.4 Ω)	59
3.15 Tail Resistors ที่ประกอบสร้างเสร็จสมบูรณ์ (ชุด 13 Ω และ 18 Ω)	59
3.16 ลักษณะการติดตั้ง Tail Resistor (R_T) เข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จริง	60
3.17 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s (SLI) สำหรับใช้อ้างอิงขนาดแรงดันทดสอบ -300 kV, $T_1/T_2 = 1.05/48.1 \mu$ s	61
3.18 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μ s ที่ใช้ในงานวิจัย ขนาดแรงดันทดสอบ -278 kV, $T_1/T_2 = 1.19/4.2 \mu$ s, $\eta = 85\%$	61
3.19 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/8 μ s ที่ใช้ในงานวิจัย ขนาดแรงดันทดสอบ -122 kV, $T_1/T_2 = 1.16/8.0 \mu$ s, $\eta = 88\%$	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/10 μ s ที่ใช้ในงานวิจัย ขนาดแรงดันทดสอบ -113 kV, $T_1/T_2 = 1.12/10.0 \mu$ s, $\eta = 92\%$	62
3.21 แนวคิดที่ใช้ในการออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรดทดสอบ	63
3.22 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแบบ Rod Gap ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกิน ในหม้อแปลงไฟฟ้า	63
3.23 ลักษณะชุดแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในงานวิจัย	64
3.24 ชุดแท่งอิเล็กโทรดที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาวิจัย	64
3.25 โครงสร้างฐานรองรับชุดอิเล็กโทรดทดสอบ	65
3.26 ฐานรองรับที่ประกอบสร้างเสร็จและลักษณะการติดตั้ง ชุดแท่งอิเล็กโทรดทดสอบ	66
3.27 Surge Arrester LAZ-P21	66
3.28 Surge Arrester LAZ-P24	67
3.29 ลักษณะการติดตั้งกับค้ำฟ้าผ่าเพื่อทำการทดสอบ	67
4.1 การป้อนแรงดันเป็นระดับขึ้นโดยวิธีปรับขึ้น - ลง (Up and down method)	71
4.2 Voltage-Time Curve แบบวิธี Constant Prospective Shape	73
4.3 ไคอะแกรมวงจรการทดสอบ	74
4.4 ลักษณะการเตรียมการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง	75
5.1 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (SLI) 1.2/50 μ s	77
5.2 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI) 1.2/4 μ s	77
5.3 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีรูปคลื่นแบบ SLI, อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมนที่ระยะแกป 15 cm	78
5.4 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีรูปคลื่นแบบ STLI, อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมนที่ระยะแกป 15 cm	78
5.5 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีรูปคลื่นแบบ SLI, อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบที่ระยะแกป 15 cm	79
5.6 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีรูปคลื่นแบบ STLI, อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบที่ระยะแกป 15 cm	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีรูปคลื่นแบบ SLI, อิเล็กโทรดแบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบที่ระยะแกป 15 cm	80
5.8 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีรูปคลื่นแบบ STLI, อิเล็กโทรดแบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบที่ระยะแกป 15 cm	80
5.9 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมน <u>ขั้วบวก</u>	82
5.10 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมน <u>ขั้วลบ</u>	83
5.11 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ <u>ขั้วบวก</u>	83
5.12 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ <u>ขั้วลบ</u>	83
5.13 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กโทรดแบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ <u>ขั้วบวก</u>	84
5.14 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กโทรดแบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ <u>ขั้วลบ</u>	84
5.15 รูปคลื่นผลการทดสอบแบบ SLI, 220 kV, อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวตัด (15 cm)	84
5.16 รูปคลื่นผลการทดสอบแบบ STLI, 220 kV, อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวตัด (15 cm)	85
5.17 การป้องกันแรงดันเกินบนอุปกรณ์ด้วย Rod Gap	86
5.18 การประสานสัมพันธ์การฉนวนและผลของแรงดัน STLI	86
5.19 ผลการเปรียบเทียบกราฟ v-t curve ทดสอบด้วยแรงดัน SLI <u>ขั้วบวก</u> ที่ระยะแกป 10 cm	87
5.20 ผลการเปรียบเทียบกราฟ v-t curve ทดสอบด้วยแรงดัน SLI <u>ขั้วลบ</u> ที่ระยะแกป 10 cm	88
5.21 ผลการเปรียบเทียบกราฟ v-t curve ทดสอบด้วยแรงดัน STLI <u>ขั้วบวก</u> ที่ระยะแกป 10 cm	88
5.22 ผลการเปรียบเทียบกราฟ v-t curve ทดสอบด้วยแรงดัน STLI <u>ขั้วลบ</u> ที่ระยะแกป 10 cm	88
5.23 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดัน STLI แบบ 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s (<u>ขั้วลบ</u>)	89
5.24 ลักษณะการเกิดเบรคดาวน์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทดสอบที่ระยะแกป 15 cm	90
5.25 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคดาวน์ของอิเล็กโทรดแท่งกลมหัวตัดเรียบที่ระยะแกป 20 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/8 μ s <u>ขั้วลบ</u> และ <u>ขั้วบวก</u>	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคความถี่ของอิเล็กโตรดแท่งกลมหัวตัดเรียบ ที่ระยะแกป 15 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/10 μ s <u>ชั่วลบ</u> และ <u>ชั่วบวก</u>	91
5.27 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคความถี่ของอิเล็กโตรดแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ ที่ระยะแกป 15 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/8 μ s <u>ชั่วลบ</u> และ <u>ชั่วบวก</u>	91
5.28 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคความถี่ของอิเล็กโตรดแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ ที่ระยะแกป 15 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/10 μ s <u>ชั่วลบ</u> และ <u>ชั่วบวก</u>	92
5.29 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคความถี่ของอิเล็กโตรดแท่งกลมหัวโค้งมน ที่ระยะแกป 15 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/8 μ s <u>ชั่วลบ</u> และ <u>ชั่วบวก</u>	92
5.30 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคความถี่ของอิเล็กโตรดแท่งกลมหัวโค้งมน ที่ระยะแกป 15 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/10 μ s <u>ชั่วลบ</u> และ <u>ชั่วบวก</u>	92
5.31 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ (<u>ชั่วลบ</u>)	93
5.32 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ (<u>ชั่วบวก</u>)	94
5.33 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดแท่งกลมหัวตัดเรียบ (<u>ชั่วลบ</u>)	94
5.34 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดแท่งกลมหัวตัดเรียบ (<u>ชั่วบวก</u>)	94
5.35 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดแท่งกลมหัวโค้งมน (<u>ชั่วลบ</u>)	95
5.36 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดแท่งกลมหัวโค้งมน (<u>ชั่วบวก</u>)	95
5.37 Non-Linear Metal Oxide Resistor	96
5.38 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบ (<u>ชั่วลบ</u>)	97
5.39 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบ (<u>ชั่วลบ</u>)	97
5.40 ผลการทดสอบด้วยการจ่ายแรงดัน SLI 1.2/50 μ s ขนาด 94 kV <u>ชั่วบวก</u> รุ่น LAZ-P24	98
5.41 ผลการทดสอบด้วยการจ่ายแรงดัน SLI 1.2/50 μ s ขนาด 94 kV <u>ชั่วลบ</u> รุ่น LAZ-P24	98
5.42 ผลการทดสอบรุ่น LAZ-P24 ด้วยการจ่ายแรงดัน SLI 1.2/50 μ s ขนาด 188 kV <u>ชั่วลบ</u>	98
5.43 ผลการทดสอบรุ่น LAZ-P24 ด้วยการจ่ายแรงดัน STLI 1.2/4 μ s ขนาด 188 kV <u>ชั่วลบ</u>	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.44 ผลการทดสอบรูน LAZ-P24 ด้วยการจ่ายแรงดัน STLI 1.2/8 μ s ขนาด 188 kV <u>ชั่วลบ</u>	99
5.45 ผลการทดสอบรูน LAZ-P24 ด้วยการจ่ายแรงดัน STLI 1.2/10 μ s ขนาด 188 kV <u>ชั่วลบ</u>	99
5.46 ผลการทดสอบรูน LAZ-P21 แรงดันทดสอบ SLI 1.2/50 μ s ขนาด 164.6 kV <u>ชั่วลบ</u>	101
5.47 ผลการทดสอบรูน LAZ-P21 แรงดันทดสอบ STLI 1.2/4 μ s ขนาด 164.6 kV <u>ชั่วลบ</u>	102
5.48 ผลการทดสอบรูน LAZ-P21 แรงดันทดสอบ STLI 1.2/8 μ s ขนาด 164.6 kV <u>ชั่วลบ</u>	102
5.49 ผลการทดสอบรูน LAZ-P21 แรงดันทดสอบ STLI 1.2/8 μ s ขนาด 164.6 kV <u>ชั่วลบ</u>	102
6.1 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งกลมหัวโค้งมน (ชั่วบวก)	106
6.2 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งกลมหัวโค้งมน (ชั่วลบ)	106
6.3 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งกลมหัวตัดเรียบ (ชั่วบวก)	106
6.4 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งกลมหัวตัดเรียบ (ชั่วลบ)	107
6.5 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ (ชั่วบวก)	107
6.6 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ (ชั่วลบ)	107
6.7 ลักษณะ <i>แรงดันเหลือค้าง</i> ของ Arrester (LAZ-P21) ที่แรงดันทดสอบ 164.6 kV <u>ชั่วลบ</u>	109
6.8 ลักษณะ <i>กระแสคืน</i> ของ Arrester (LAZ-P21) ที่แรงดันทดสอบ 164.6 kV <u>ชั่วลบ</u>	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.9	ลักษณะการป้องกันแรงดันเกินด้วย Rod gap	111
6.10	ลักษณะการประสานสัมพันธ์การฉนวน	111



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แรงดันเกินทรานเซียนต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากผลของฟ้าผ่าตามธรรมชาตินับเป็นปัญหาที่สำคัญและมีผลกระทบต่ออุปกรณ์การฉนวนในระบบ ดังจะเห็นได้จากรายงานผลการศึกษามากมาย [1-8] แรงดันเกินในระบบที่เป็นผลมาจากฟ้าผ่านี้ เรียกว่า “แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse Voltage)” ซึ่งมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) [9] ได้กำหนดรูปคลื่นมาตรฐานสำหรับใช้ทดสอบการฉนวนไว้เป็นรูปคลื่นอิมพัลส์แบบ 1.2/50 μ s ผลจากฟ้าผ่าตามธรรมชาติอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดแรงดันเกินทรานเซียนต์ขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ 3 ลักษณะ คือ เกิดฟ้าผ่าลงสู่สายตัวนำโดยตรง (Direct Strike Overvoltage), การเกิดควาบไฟย้อนกลับ (Back Flashover) ข้ามผ่านพวงลูกถ้วยฉนวนเข้าสู่สายตัวนำ และจากผลการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอ้อม (Indirect Induced Voltage) จากลัมฟ้าผ่าบริเวณใกล้สายส่ง จากรายงานผลการศึกษามากมายพบว่าแรงดันเกินอิมพัลส์ที่เป็นผลจากการเหนี่ยวนำโดยอ้อม (Indirect Induced Voltage) และกรณีการเกิดควาบไฟย้อนกลับ (Back Flashover Voltage) เข้าสู่สายตัวนำจะมีรูปคลื่นแรงดันที่แตกต่างไปจากอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน [10-17] โดยเฉพาะกรณีเกิดจากควาบไฟย้อนกลับข้ามผ่านพวงลูกถ้วยฉนวนเข้าสู่สายตัวนำในระบบ รูปคลื่นแรงดันเกินแบบนี้จะมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นลง เรียกว่า “แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (Short Tail Lightning Impulse Voltage: STLI)” ซึ่งพบว่าช่วงเวลาหางคลื่นสั้นอยู่ในช่วงประมาณไม่กี่ไมโครวินาที [10-17] ในรายงานผลการศึกษามากมายได้ระบุชี้ชัดถึงช่วงเวลาหางคลื่นสั้นนี้ไว้ที่ช่วงเวลาประมาณ 2 ~ 4 μ s [10-13,16-17] แรงดันนี้จะเกิดเป็นแรงดันเกินคลื่นจร (Travelling Wave) ในระบบ ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ มีโอกาสได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นนี้ อุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในระบบ เช่น อุปกรณ์จำพวก Protective Gap และ Lightning Arrester เป็นต้น ซึ่งโดยปกติอุปกรณ์เหล่านี้จะได้รับการออกแบบและทดสอบอ้างอิงด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (1.2/50 μ s) ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น อาจส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินทำงานผิดพลาด หรือทำให้ระดับแรงดันป้องกัน (Protective Level) ลดเคลื่อนไปจากเดิม ส่งผลต่อการฉนวนของอุปกรณ์อื่นในระบบที่ใช้หลักการประสานสัมพันธ์การฉนวน (Insulation Co-ordination) [18] ร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันนั้น การศึกษาลักษณะสมบัติของ

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นจะช่วยให้การออกแบบและเลือกใช้ระดับการฉนวนมีความเหมาะสมยิ่งขึ้น ช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้

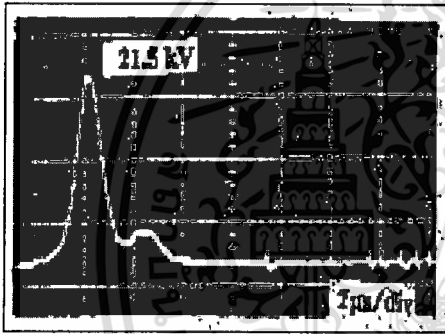
ในงานวิจัยนี้เน้นการศึกษาผลกระทบจากการเกิดควาบไฟย้อนกลับที่เป็นผลมาจากฟ้าผ่าลงที่สายดินเหนือศีรษะ (Overhead Ground Wire) ในระบบ ทำให้เกิดคลื่นแรงดันเกิน ทรานเซียนต์ขึ้น โดยธรรมชาติคลื่นแรงดันเกินนี้จะวิ่งลงสู่ดินผ่านระบบรากสายดินในเสาส่ง ขนาดของคลื่นแรงดันเกินนี้จะขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ค่าขดกระแสฟ้าผ่า, ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) ของระบบ และ ค่าความต้านทานรากสายดินที่เสาส่ง (Footing Resistance) เป็นต้น [4,8,10,13] หากค่าความต้านทานมีค่าสูงเกินจะส่งผลให้ขนาดของแรงดันเกินบนหัวเสาส่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและอาจสูงเกินกว่าแรงดันระบบในสายเฟสหลายเท่า [11,13] โดยเฉพาะในระบบจำหน่าย (Distribution System) และระบบสายส่งรอง (Sub-Transmission System) ถ้าหากค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันเกินนี้กับค่าขดแรงดันเฟสมีค่าสูงเกินกว่าค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤติ (Critical Flashover Voltage : CFO) [19] ของพวงลูกถ้วยฉนวนแขวนจะทำให้เกิดปรากฏการณ์วาบไฟย้อนกลับ (Back Flashover) เข้าสู่ระบบเป็นคลื่นแรงดันเกินทรานเซียนต์ในสายเฟสวิ่งกระจายไปบนสายตัวนำเป็นลักษณะคลื่นจร (Travelling Wave) ไปในสายส่ง ดังรูปที่ 1.1 หากระบบไม่มีการป้องกัน แรงดันเกินนี้จะส่งผลกระทบต่อการใช้งานของอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบ ปัญหานี้มีโอกาสเกิดมากขึ้นในระบบสายส่งที่เป็นเสาปูนและมีระบบรากสายดินไม่ดีพอหรือชำรุด หรืออาจเกิดจากกรณีพวงลูกถ้วยฉนวนเกิดชำรุดเสียหายบางส่วนหรือบางลูกทำให้ค่าความคงทนแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤติลดลง จึงมีโอกาสเกิดควาบไฟย้อนกลับได้ง่ายขึ้น



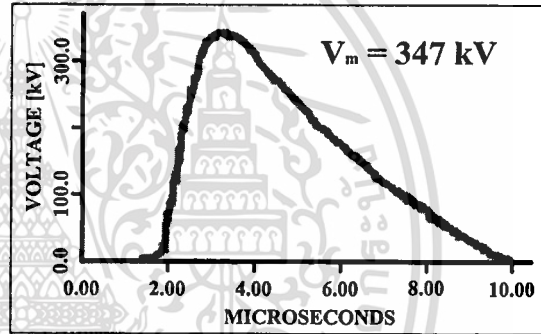
รูปที่ 1.1 ลักษณะการเกิด Back Flashover ในระบบสายส่งแบบใช้เสาปูน

ประเด็นที่น่าสนใจคือปัจจุบันระบบสายส่งรองและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงรวมทั้งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเปลี่ยนมาใช้เสาส่งเป็นแบบเสาคอนกรีตมากขึ้น โอกาสที่จะทำให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาแรงดันเกินบนหัวเสาจากผลของฟ้าผ่าเข้าสู่ระบบจึงมีมากขึ้น แต่ข้อมูลการศึกษาถึงผลกระทบจากแรงดันเกินดังกล่าวต่อการจนวนของอุปกรณ์ในระบบยังมีการศึกษาวิจัยกันน้อยมาจากตัวอย่างรายงานผลการศึกษาของ [11] และ [16] พบว่าแรงดันเกินทรานเซียนต์จากผลของฟ้าผ่าไม่ได้มีรูปคลื่นเป็น 1.2/50 μ s ทุกกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่เกิดจากผลของการเหนี่ยวนำทางอ้อมและกรณีที่เกิดจากวบไฟย้อนกลับเข้าสู่ระบบ ซึ่งในกรณีหลังนี้ยังทำให้รูปคลื่นอิมพัลส์แตกต่างไปจากมาตรฐานกำหนดไว้มาก โดยเฉพาะช่วงเวลาหางคลื่น พบว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นยังคงเป็น 1.2 μ s แต่ช่วงเวลาหางคลื่นจะสั้นลงมาก เรียกว่า “แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI)” ตัวอย่างลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นที่ได้จากรายงานผลการวิจัยของ [11] และ [16] ซึ่งได้จากการทดลองวัดจริงในภาคสนามแสดงดังรูปที่ 1.2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานจะเห็นว่าแรงดันอิมพัลส์ทั้งสองมีช่วงเวลาหลังคลื่นแตกต่างกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 1.3

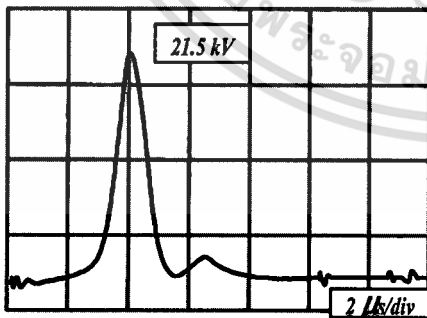


ก) Induce Voltage ในระบบจำหน่าย [11]

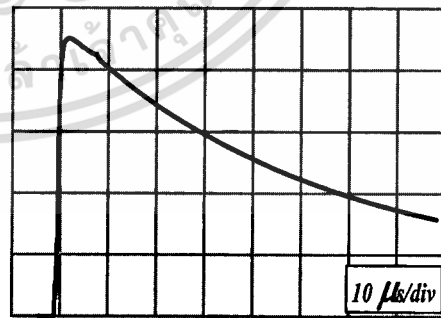


ข) Back Flashover [16]

รูปที่ 1.2 ตัวอย่างลักษณะแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI)



ก) รูปคลื่น STLI



ข) รูป Standard Lightning Impulse

รูปที่ 1.3 รูปคลื่น STLI เปรียบเทียบกับรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน

สำหรับประเทศไทยซึ่งอยู่ในแถบประเทศเขตร้อนชื้นที่มีความถี่ของการเกิดฝนฟ้าคะนองสูง ระบบส่งจ่ายและจำหน่ายกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ยังใช้เป็นแบบสายจึงในอากาศ จึงมีโอกาสเกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นขึ้นในระบบได้ง่าย จากรายงานผลการศึกษาพบว่ากว่า 50% ของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งใช้งานในระบบ มีสาเหตุมาจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติทั้งสิ้น [10-13] ปัญหาแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่เป็นต้นเหตุทำให้เกิดความเสียหายดังกล่าว จึงควรที่จะมีการศึกษาวิจัยผลกระทบที่เกิดขึ้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการออกแบบการป้องกันและการแก้ไขปัญหาเทคนิคการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลกระทบจากปัญหาแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น โดยเน้นผลกระทบที่เกิดกับอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินจำพวกสปาร์กแกป (Protective Gap) ซึ่งนิยมติดตั้งใช้งานกันทั่วไปในงานทางวิศวกรรม รวมถึงผลกระทบต่ออุปกรณ์กับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) ที่ติดตั้งใช้งานในระบบจำหน่าย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากผลการศึกษาพบว่าขนาดค่ายอด (Peak Value) ของแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นอาจมีค่าสูงเกินกว่าค่ายอดแรงดันเฟสของระบบหลายเท่า [11,13,16] ในกรณีของระบบจำหน่ายขนาดแรงดันเกินนี้อาจมีค่าสูงกว่าระดับการฉนวนของอุปกรณ์และสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ในระบบได้ ซึ่งโดยปกติแล้วในทางปฏิบัติจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินไว้เสมอ อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่นิยมใช้งานกันมากคืออุปกรณ์จำพวกสปาร์กแกป (Protective Gap) ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลกระทบที่เกิดกับอุปกรณ์ดังกล่าว เนื่องจากในการติดตั้งใช้งานอุปกรณ์จำพวกสปาร์กแกปจะอาศัยหลักการประสานสัมพันธ์การฉนวน (Insulation Co-ordination) [18] เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งใช้แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามาตรฐาน (1.2/50 μ s) เป็นตัวกำหนด จึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้เมื่อติดตั้งใช้งานจริง ประเด็นหลักที่น่าสนใจคือเมื่ออุปกรณ์เหล่านี้ได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์ที่มีรูปคลื่นแรงดันแตกต่างไปจากมาตรฐานกำหนดจะส่งผลกระทบต่อประสานสัมพันธ์การฉนวนแบบเดิมหรือไม่อย่างไร ยิ่งในปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนิยมเปลี่ยนเสาส่งในระบบจำหน่ายมาใช้เป็นเสาส่งแบบเสาปูนมากขึ้น เพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้างระบบสายส่งลง อาจทำให้โอกาสเกิดปัญหาวบไฟย้อนกลับ (Back Flashover) ผ่านพวงฉนวนลูกถ้วยมีมากขึ้น รูปคลื่นแรงดันเกินอิมพัลส์ที่ผิดไปจากมาตรฐานอาจส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์ในช่องแกปอากาศ ทำให้ระยะแกปป้องกันเดิมที่ติดตั้งไว้บนอุปกรณ์ที่สำคัญ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ไม่สามารถป้องกันได้ ส่งผลกระทบต่อการฉนวนของอุปกรณ์โดยตรง ดังนั้นการศึกษาและทำความเข้าใจในคุณลักษณะสมบัติของแรงดันเกินอิมพัลส์ประเภทนี้จะมีประโยชน์อย่างมาก ทำให้เราสามารถเลือกใช้หรือออกแบบระดับการฉนวนให้มีความเหมาะสม ซึ่ง

จะช่วยลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบ เป็นการลดอัตราเสี่ยงต่อความสูญเสียทางเศรษฐกิจ ได้อีกทางหนึ่งด้วย

วัตถุประสงค์ของการศึกษารุ่นนี้ ผู้วิจัยได้ตั้งประเด็นไว้เพื่อกำหนดทิศทางของการวิจัยออกเป็นสังเขป ดังนี้

- 1) เพื่อศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) ต่อคุณสมบัติการเกิดเบรคดาวน์ในช่องแกป (Gap) อากาศ เปรียบเทียบกับกรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s
- 2) เพื่อหาคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินประเภทสปาร์กแกปและกับดักฟ้าผ่า (Arresters) ในระบบจำหน่าย กรณีได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI)
- 3) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของรูปทรงทางเลขาคณิตของอิเล็กโทรด (Electrodes Configuration) ต่อคุณลักษณะการเบรคดาวน์ในช่องแกป (Gap) อากาศ เปรียบเทียบทั้งกรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น
- 4) เพื่อหาข้อมูลทางเทคนิคสำหรับนำไปใช้ประกอบในการปรับตั้งระยะแกปที่เหมาะสมเพื่อการประสานสัมพันธ์การฉนวน (Insulation Co-ordination) อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

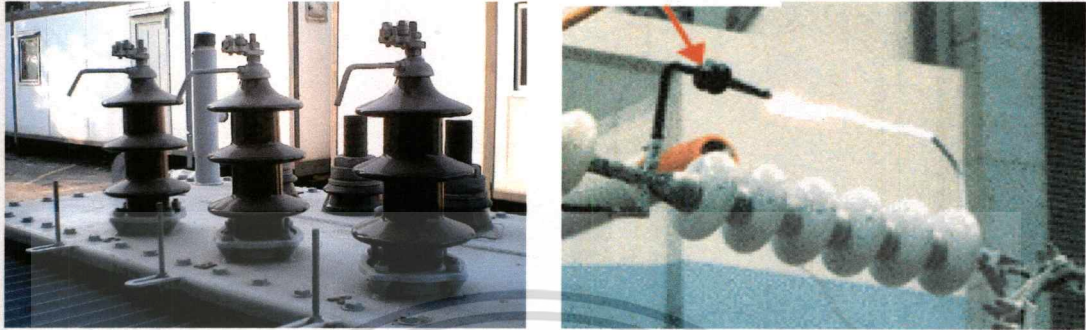
1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ประเด็นของการศึกษาในงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นที่มีต่ออุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแกป หรือที่เรียกกันว่า “ Rod Gap หรือ Arcing Horn ” เป็นต้น รวมทั้งศึกษาลักษณะสมบัติการเกิดเบรคดาวน์ในช่องแกปอากาศที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยคาดว่าข้อมูลผลการศึกษาที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบระดับการฉนวนของอุปกรณ์ในเชิงวิศวกรรมให้มีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาความเสียหายแก่อุปกรณ์ที่อาจเกิดจากผลของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นในระบบลงได้

หลักการป้องกันแรงดันเกินด้วยสปาร์กแกปหรือช่องแกปอากาศ เป็นหลักการที่ง่ายและมีราคาถูก จึงนิยมใช้งานกันมากในระบบส่งจ่ายและจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้หลักการแท่งอิเล็กโทรด (Rod) 2 แท่ง วางห่างกัน ช่องแกปอากาศระหว่างอิเล็กโทรดจะช่วยเป็นฉนวนกั้นแรงดันไฟฟ้าในสภาวะปกติ และเมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้นในระบบจะเกิดประกายข้ามผ่านช่องแกปอากาศ (Sparkover) เป็นการลัดวงจรลงสู่ดินเพียงชั่วคราวในช่วงสั้นๆ เพื่อป้องกันแรงดันเกินที่อาจ

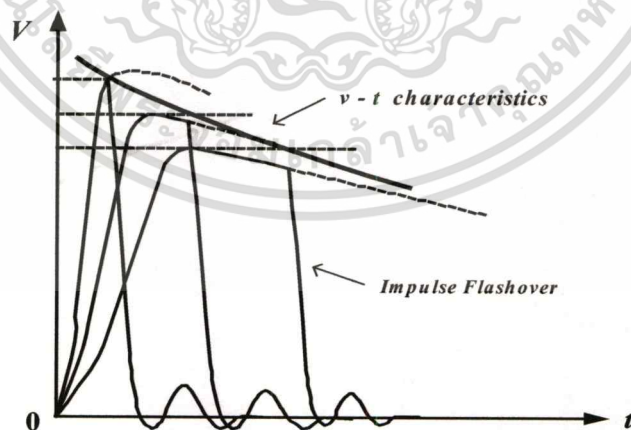
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างความเสียหายแก่ฉนวนของอุปกรณ์ที่มันทำหน้าที่ป้องกัน และหลีกเลี่ยงการเกิดปรากฏการณ์อาร์ค (Arcing) ผ่านฉนวนโดยตรง ในกรณีของบุชชิ่ง (Bushing) และพวงฉนวนลูกถ้วยแขวน (Insulator String) เป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับอุปกรณ์โดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ตัวอย่างอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กเกปที่ใช้งานจริง

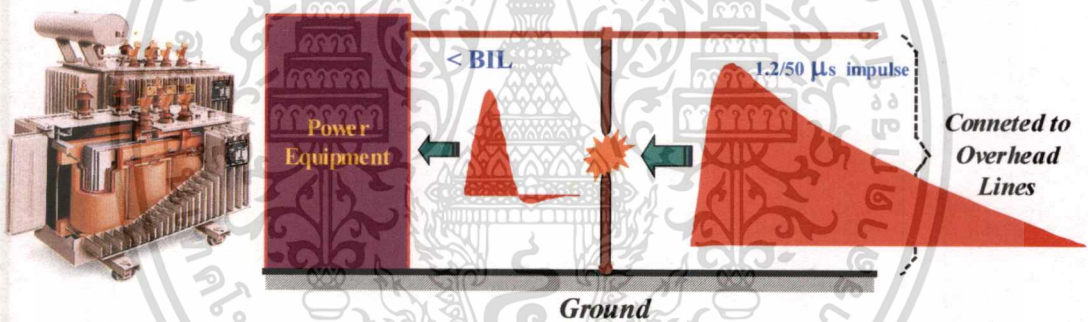
ในทางปฏิบัติพบว่าค่าความคงทนฉนวนของช่องแก้อากาศจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ทดสอบ โดยเฉพาะกรณีของแรงดันอิมพัลส์จะมีปัจจัยผลของเวลาล่าช้าการเกิดเบรคดาวน์เข้ามาเกี่ยวข้อง [21] ซึ่งสามารถอธิบายคุณลักษณะสมบัตินี้ได้ด้วยเส้นกราฟคุณลักษณะสมบัติ แรงดัน - เวลา (Voltage - Time Characteristics หรือ $v - t$ curve) [9, 20] ของระบบการฉนวนนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.5 เส้นกราฟ $v - t$ curve นี้มีความสำคัญมากต่อการกำหนดมิติการฉนวนของอุปกรณ์ที่ใช้ฉนวนประเภทก๊าซ (Gas) หรือฉนวนอากาศ [21] รวมถึงระบบการฉนวนที่ใช้หลักการประสานสัมพันธ์การฉนวนกับระบบอื่น [18] เป็นต้น



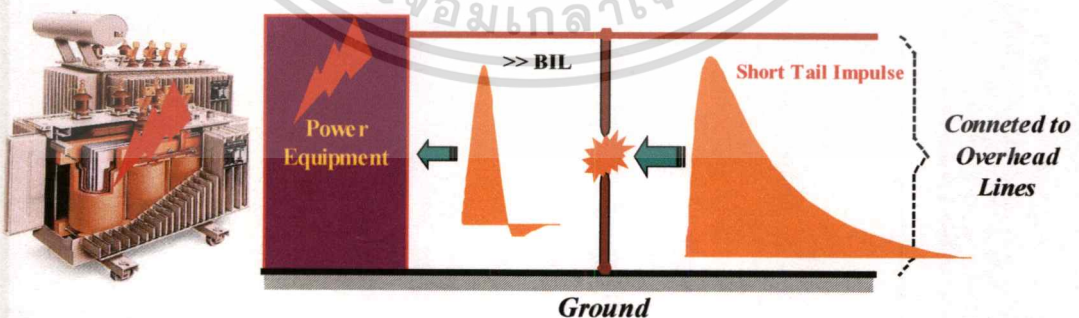
รูปที่ 1.5 Voltage - Time Characteristics หรือ $v-t$ curve [9]

ในการออกแบบเทคนิคการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะต้องคำนึงถึงปัจจัยความคงทนต่อแรงดันเกินอิมพัลส์ (Basic Impulse Insulation Level : **BIL**) [18, 21] โดยอาศัยหลักการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสานสัมพันธ์การคำนวณประกอบกันด้วย ซึ่งค่า BIL นี้จะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันใช้งานของระบบเป็นเกณฑ์อ้างอิง ดังนั้นการปรับตั้งระยะแกปเพื่อใช้ป้องกันแรงดันเกินให้กับอุปกรณ์จะต้องไม่ทำให้แรงดันที่เหลือจากการสปาร์กผ่านช่องแกปมีค่าเกินกว่าค่า BIL มิฉะนั้นแล้วแรงดันเกินที่อุปกรณ์ได้รับอาจสร้างความเสียหายแก่ฉนวนของอุปกรณ์ได้ การปรับตั้งระยะแกปป้องกันที่ถูกต้องจะพิจารณาจากเส้นกราฟ $v - t$ curve ของฉนวนของอุปกรณ์ ซึ่งโดยทั่วไปมักจะอ้างอิงกับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามาตรฐาน $1.2/50 \mu s$ ค่าแรงดันคงเหลือจากการสปาร์กผ่านช่องแกปป้องกันจะมีค่าต่ำกว่าค่า BIL และไม่ส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่ฉนวนของอุปกรณ์แต่อย่างใด ลักษณะการทำงานของประสานกันของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินประเภทสปาร์กแกป อาจแสดงได้ดังไดอะแกรมตามรูปที่ 1.6 แต่ถ้าเกิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI) ขึ้น สมมติฐานในเบื้องต้นคาดว่าแรงดันแบบ STLI น่าจะทำให้การเกิดสปาร์กในช่องแกปเป็นไปได้ยากขึ้น ดังนั้นค่าแรงดันคงเหลือจากการสปาร์กผ่านช่องแกปป้องกันน่าจะมีค่าสูงขึ้นและมีแนวโน้มว่าจะสูงกว่าระดับการคำนวณ (BIL) ของอุปกรณ์ นั่นคืออุปกรณ์ที่ติดตั้งใช้งานในระบบอาจได้รับความเสียหายจากกรณีนี้ ดังแสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.6 การป้องกันอุปกรณ์ด้วย Rod Gap แบบสมบรูณ์ กรณีเกิดแรงดันอิมพัลส์ $1.2/50 \mu s$



รูปที่ 1.7 ผลกระทบที่เกิดกับระบบป้องกันแรงดันเกินด้วย Rod Gap เมื่อได้รับแรงดัน STLI

ถ้าเป็นไปได้ดังสมมติฐานตามที่กล่าวมาข้างต้น นั่นคือระยะแกปป้องกันเดิมที่ปรับตั้งใช้งานในระบบจริงจะไม่สามารถใช้ป้องกันแรงดันเกินแบบ STLI ได้เลย ปัญหานี้อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้การฉนวนของอุปกรณ์ได้รับความเสียหายโดยตรงเป็นปัญหาเริ่มต้นนำไปสู่ความเสียหายอื่นตามมา เช่น เกิดดีสชาร์จบางส่วนขึ้นในเนื้อฉนวน, หรือเกิด Partial Fault ขึ้นระหว่างรอบของลวดในหม้อแปลง เป็นต้น นอกจากนี้ผลกระทบที่เกิดกับอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินประเภทอื่น เช่น กับดีกฟ้าผ่า จะเป็นไปในทำนองเดียวกันตามสมมติฐานนี้หรือไม่ งานวิจัยนี้อาจให้คำตอบที่ชัดเจนขึ้นและสามารถนำข้อมูลไปใช้เพื่อแก้ไขปัญหานี้ในทางปฏิบัติได้จริง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้จะเน้นไปที่กระบวนการออกแบบการทดลองและการทดลองเก็บผลในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเป็นสำคัญ หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปตามประเด็นปัญหาของสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยทำการทดลองศึกษาด้วยชุดอิเล็กโตรดแบบแท่งทองเหลืองสมมาตร (Rod – Rod Electrodes) ที่ระยะช่องแกปอากาศ 3 ระยะ คือ 10, 15 และ 20 cm โดยทำการศึกษาผลของรูปร่างอิเล็กโตรด (Electrodes Configuration) ควบคู่กันไปด้วย นั่นคือใช้อิเล็กโตรดแบบแท่งทองเหลืองสมมาตรที่มีรูปร่างทางเรขาคณิตแตกต่างกัน 3 แบบ ประกอบด้วย แบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ, แบบแท่งกลมหัวโค้งมน และ แบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ การทดลองจะเป็นการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความเข้มเชิงสถิติ ($V_{50\%}$) และการทดสอบหาเส้นกราฟคุณลักษณะสมบัติ แรงดันเบรคความเข้ม-เวลาเกิดเบรคความเข้ม (V-t curve or V-t characteristics) [9,18,20] ภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานรูปคลื่น 1.2/50 μ s เปรียบเทียบกับกรณี แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI) รูปคลื่น 1.2/4 μ s เป็นหลัก และเพื่อให้ได้ข้อมูลผลการศึกษาที่ครบถ้วนสามารถสรุปได้อย่างถูกต้องน่าเชื่อถือ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองศึกษาเพิ่มเติมในกรณีรูปคลื่นแรงดัน STLI แบบ 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s เพื่อใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบกัน นอกจากนี้ยังทดสอบเพิ่มเติมเพื่อศึกษาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นที่มีต่ออุปกรณ์กับดีกฟ้าผ่า (Lightning Arrester) ที่ใช้งานในระบบจำหน่ายระดับแรงดัน 22-24 kV เปรียบเทียบกับกรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s ซึ่งมีกระบวนการในการศึกษาวิจัยแบ่งเป็นลำดับขั้นตอนการศึกษาทั้งหมด 8 ขั้นตอน ดังนี้

1. การศึกษาและประยุกต์ใช้งานเครื่องกำเนิดแรงดันสูงอิมพัลส์ขนาดพิกัด 400 kV, 14 kJ แบบ 4-stage (Marx's Type)
2. การออกแบบตัดแปลงเพื่อประยุกต์ใช้งานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ 1.2/50 μ s ปกติ ให้สามารถจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น กรณีรูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ที่ต้องการศึกษาได้
3. การออกแบบสร้างชุดอิเล็กโตรดสำหรับการทดลองวิจัย อ้างอิงกับ Rod Gap ที่มีการติดตั้งใช้งานจริงในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การออกแบบโครงสร้างฐานรองรับ (Insulator Support) สำหรับใช้จับยึดชุดแท่งอิเล็ก-
โตรดทดสอบ รวมทั้งการติดตั้งอุปกรณ์กับค้ำฟ้าผ่าที่ใช้ในการทดสอบ
5. การออกแบบระเบียบวิธีที่ใช้ในการเก็บผลการทดลอง เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและม
ีความน่าเชื่อถือได้ของข้อมูลผลการทดลอง
6. กระบวนการทดสอบเก็บผล
7. การวิเคราะห์ผล และ การแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้น
8. การสรุปผลงานวิจัยทั้งหมด และเรียบเรียงเป็นวิทยานิพนธ์

จากกระบวนการศึกษาวิจัยทั้ง 8 ขั้นตอนดังกล่าว มี 6 ขั้นตอน (ลำดับที่ 1-6) ที่ต้องอาศัย
องค์ความรู้ใหม่ในหลายๆ ด้าน เพื่อใช้ประกอบในกระบวนการศึกษาวิจัย ตัวอย่างเช่น ต้องมีการ
ออกแบบสร้างชิ้นงานใหม่สำหรับการศึกษาวิจัยโดยเฉพาะ, มีการประยุกต์ดัดแปลงคุณสมบัติของ
เครื่องมืออุปกรณ์แหล่งจ่ายแรงดันสูงอิมพัลส์ที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการให้สามารถใช้งานได้ตาม
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย, การออกแบบระเบียบวิธีและขั้นตอนการทดลองเก็บผลเพื่อให้ได้ข้อมูล
ผลการศึกษาที่ถูกต้องมีความเชื่อถือได้ทางวิชาการด้วยการนำระเบียบวิธีทางสถิติเข้ามาประยุกต์ใช้
และที่สำคัญคือระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัยที่จะต้องมีการทดสอบเก็บผลซ้ำๆ หลายครั้ง
เป็นต้น

ขั้นตอนต่างๆ ที่สำคัญ ซึ่งแสดงถึงกระบวนการเสริมสร้างองค์ความรู้ใหม่ และการ
ประยุกต์ใช้หลักวิชาการตามที่ได้ศึกษามา เพื่อจัดทำเป็นวิทยานิพนธ์ประกอบการศึกษาในครั้งนี้
สามารถสรุปพอสังเขปได้ดังนี้

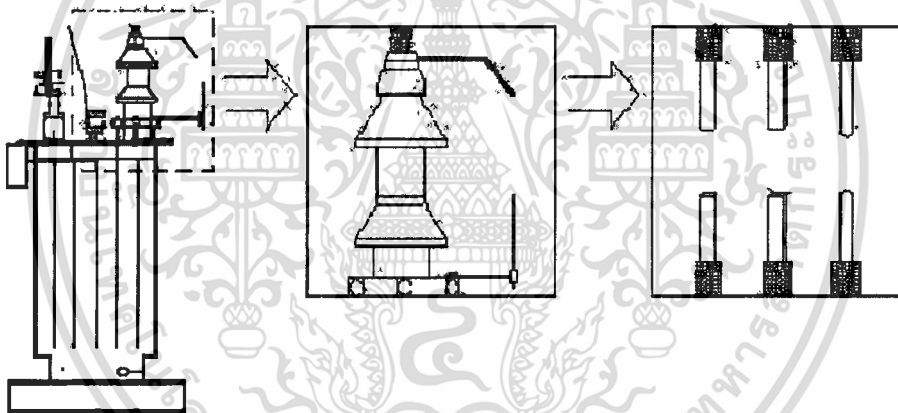
ขั้นตอนที่ 1 : การออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันสูงอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานที่จะใช้ในการ
ทดสอบ ในที่นี้จะใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (1.2/50 μ s) แบบ Marx's Type
[22-23] ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งผู้วิจัยต้องทำการปรับปรุงแก้ไขอุปกรณ์บางอย่าง
ในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ให้สามารถใช้งานได้

ขั้นตอนที่ 2 : เป็นการออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันสูงอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่น
สั้น (STLI) ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการใช้รูปคลื่น STLI ในการทดลอง 3 แบบ ได้แก่ รูปคลื่น 1.2/4 μ s,
1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ตามลำดับ ประเด็นของการศึกษาวิจัยจะเน้นไปที่รูปคลื่น 1.2/4 μ s เป็น
สำคัญ โดยข้อมูลการศึกษาในกรณีรูปคลื่น 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s จะใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อ
เปรียบเทียบในการวิเคราะห์ผล แนวคิดในการออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันสูงอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมี
ช่วงเวลาทางคลื่นสั้นจะใช้เทคนิคการดัดแปลงองค์ประกอบวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
ฟ้าผ่ามาตรฐาน (Marx's Circuit) ที่ใช้หลักการวงจรทรานเซียนต์ RC ด้วยการอัดประจุและดีสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวทางเวลาให้ได้รูปคลื่นตามต้องการ การสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI ในที่นี้ใช้เทคนิคการตัดแปลงองค์ประกอบวงจรบางส่วนของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานที่มีอยู่เดิมให้สามารถจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI ได้ โดยอ้างอิงตามเทคนิควิธีของ A.Carrus [24-26] การตัดแปลงองค์ประกอบวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะเน้นการปรับเปลี่ยนที่องค์ประกอบความต้านทานหน่วงเวลาของรูปคลื่น โดยองค์ประกอบส่วนอื่นของตัวเครื่องยังคงเหมือนเดิม รายละเอียดการคำนวณออกแบบและการประกอบสร้างองค์ประกอบความต้านทานที่ใช้งานจริง ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขั้นตอนที่ 3 : การออกแบบสร้างชุดอิเล็กโตรดทดสอบ เนื่องจากประเด็นการศึกษาในงานวิจัยนี้เน้นไปที่การศึกษาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI ต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินประเภทสปาร์กแก๊ป เช่น Rod Gap หรือ Arcing Horn เป็นต้น ดังนั้นการออกแบบชุดแท่งอิเล็กโตรดสำหรับใช้ทดลองเก็บผลจึงออกแบบให้มีลักษณะคล้ายกับแก๊ปป้องกันแรงดันเกินที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ ดังรูปที่ 1.8



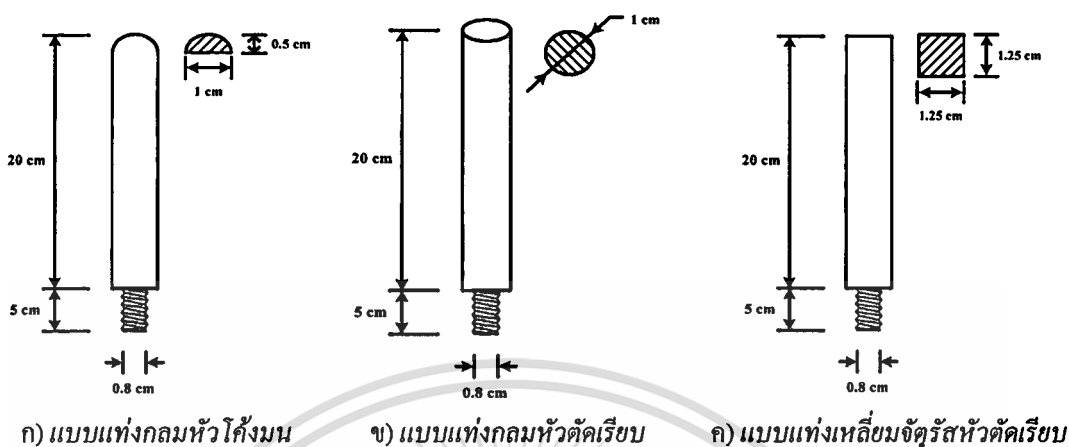
รูปที่ 1.8 แนวทางในการออกแบบชุดอิเล็กโตรด

โดยใช้อิเลคโตรดแบบแท่ง (Rod) ทำด้วยทองเหลืองแบบสมมาตร (Symmetry) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 cm [9,27] มีลักษณะรูปทรงทางเลขาคณิตแตกต่างกัน 3 แบบ คือ

- 1) อิเลคโตรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมน
- 2) อิเลคโตรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ
- 3) อิเลคโตรดแบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ

ทั้งนี้เพื่อทำการทดลองศึกษาผลของรูปทรงอิเล็กโตรด (Electrodes Configuration) ที่มีต่อลักษณะการเกิดเบรคดาวน์ในช่องแก๊ปอากาศ เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI ควบคู่กันไปด้วยกับการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบรูปทรงอิเล็กโตรดเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลคโทรดสำหรับใช้ป้องกันแรงดันเกินที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ลักษณะของรูปทรงอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ประกอบในการศึกษาวิจัย แสดงดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 ชุดแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย

ขั้นตอนที่ 4 : การออกแบบโครงสร้างฐานรองรับสำหรับใช้จับยึดชุดแท่งอิเล็กทรอนิกส์ทดสอบ ซึ่งในการทดสอบจำเป็นจะต้องมีชุดแท่นสำหรับใช้จับยึดอิเล็กทรอนิกส์ทดสอบ โดยแท่นจับยึดอิเล็กทรอนิกส์ทดสอบนี้จะต้องไม่ส่งผลกระทบทำให้ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าของชุดแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการทดสอบเปลี่ยนแปลงไป การออกแบบและสร้างอ้างอิงตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60052 (2002) [28] เป็นเกณฑ์

ขั้นตอนที่ 5 : การออกแบบระเบียบวิธีที่ใช้ในการเก็บผลการทดลอง ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของแรงดันแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นที่มีต่อลักษณะการเกิดเบรคความถี่ในช่องแกปอากาศแบบแท่งอิเล็กทรอนิกส์ โดยทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความถี่ในช่องแกปอากาศที่ระยะ 10, 15 และ 20 cm ตามลำดับ ทำการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน $1.2/50 \mu s$ และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นรูปคลื่น $1.2/4 \mu s$, $1.2/8 \mu s$ และ $1.2/10 \mu s$ ตามลำดับ การทดสอบเก็บผลจะแสดงในรูปค่าแรงดันเบรคความถี่เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) และกราฟคุณลักษณะสมบัติเส้นแรงดัน - เวลา ($v - t$ curve) ของแต่ละรูปทรงอิเล็กทรอนิกส์ที่ทดสอบที่ระยะแกปทั้ง 3 ระดับดังกล่าว การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความถี่เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ในที่นี้ใช้วิธีปรับขึ้น - ลง (Up - Down Method) อ้างอิงตามระเบียบวิธีในมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) [9] ส่วนการทดสอบเพื่อหากราฟคุณลักษณะสมบัติเส้นแรงดัน - เวลา อ้างอิงตามระเบียบวิธีที่แนะนำไว้ใน [9] และ [27] โดยใช้วิธีการปรับระดับแรงดันทดสอบเพิ่มขึ้นแต่ลักษณะรูปคลื่นอิมพัลส์ (Wave Shape) ที่ใช้ทดสอบคงเดิม ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงใช้วิธีทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความถี่และเวลาเกิดเบรคความถี่ที่ละจุด แต่ละจุดจะทำการทดสอบด้วยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิงแรงดันอิมพัลส์จำนวน 5 ครั้ง โดยแรงดันที่ป้อนเพื่อทดสอบจะต้องทำให้เกิดเบรคความถี่ทุกครั้ง ทดสอบไต่ระดับเริ่มต้นตั้งแต่ค่าแรงดันต่ำสุดที่ทำให้เกิดเบรคความถี่ที่ระยะแกปทดสอบนั้นๆ จนถึงระดับแรงดันป้อนสูงสุดที่ทำให้เกิดเบรคความถี่แล้วทำให้ระดับแรงดันเบรคความถี่ (V_b) ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ละชุดข้อมูลจะอาศัยกระบวนการทางสถิติมาประยุกต์ใช้ เพื่อใช้ควบคุมปัจจัยความไม่แน่นอน (Uncertainty Factor) ในการเกิดเบรคความถี่จากผลของสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน โดยค่าเฉลี่ยของแรงดันเบรคความถี่และเวลาเกิดเบรคความถี่ที่ได้ในแต่ละจุด ถูกกำหนดด้วยเกณฑ์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน นั่นคือ กรณีระดับแรงดันเบรคความถี่ (V_b) ใช้เกณฑ์ $SD < 1.0$ และกรณีค่าเวลาเกิดเบรคความถี่ (t_b) ใช้เกณฑ์ $SD < 0.5$ หากชุดข้อมูลใดไม่ได้ตามเกณฑ์นี้จะต้องเริ่มต้นกระบวนการทดสอบเก็บผลใหม่

การพล็อตเส้นกราฟ $v - t$ curve ในงานวิจัยนี้จะใช้ฟังก์ชันการถดถอยเชิงพหุนาม (Polynomial Regression) [20] โดยค่าแรงดันเบรคความถี่ทุกค่าจะถูกปรับเข้าสู่สภาวะมาตรฐานอ้างอิงเดียวกัน [9,27] ซึ่งจะต้องอาศัยกระบวนการวิเคราะห์หาค่าตัวคูณแปรผันความหนาแน่นอากาศ (Air Density Correction Factor : k_a) ทุกครั้งที่ทดสอบเก็บผล และนำค่าที่ได้มาปรับแก้ชดเชยปัจจัยความหนาแน่นอากาศในสภาวะทดสอบที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่อให้ข้อมูลค่าแรงดันเบรคความถี่ที่ได้จากการทดสอบทุกค่าเป็นค่าที่อยู่ในสภาวะอ้างอิงมาตรฐานเดียวกัน จึงจะสามารถนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในขั้นสุดท้ายได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อศึกษาวิจัยถึงผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) ต่อคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแกป รวมถึงผลกระทบที่เกิดกับอุปกรณ์กับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่ายระดับแรงดัน 22 – 24 kV งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบเบื้องต้นที่เกิดจากผลปัจจัยของรูปคลื่นแรงดันเกินอิมพัลส์ที่แตกต่างไปจากรูปคลื่นมาตรฐาน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมต่อไป ขอบเขตของการวิจัยเป็นดังนี้

- 1) ศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) ว่ามีผลกระทบต่อคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแกป โดยเน้นการศึกษารูปคลื่นแรงดัน STLI แบบ 1.2/4 μ s
- 2) ศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) ว่ามีผลกระทบต่อคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์กับดักฟ้าผ่าที่ใช้งานในระบบจำหน่ายระดับแรงดัน 22 – 24 kV โดยเน้นการศึกษารูปคลื่นแรงดัน STLI แบบ 1.2/4 μ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ออกแบบสร้างแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) รูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ตามลำดับ เพื่อใช้ทดสอบเปรียบเทียบผลในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง
- 4) ทำการทดสอบเก็บผลด้วยชุดอิเล็กโทรดแบบแท่ง (Rod - Rod Electrodes) ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 3 แบบ คือ อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ, แบบแท่งกลมหัวโค้งมน และ แบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ โดยทดสอบที่ระยะแก๊ป 3 ระยะ คือ 10, 15 และ 20 cm ตามลำดับ
- 5) ทดสอบหาค่าแรงดันเบรคควาน์เชิงสถิติ ($V_{50\%}$) และเส้นกราฟแรงดัน-เวลา (Voltage-time Curve) ของทุกรูปทรงอิเล็กโทรดทั้ง 3 ระยะแก๊ป ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าแบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ตามลำดับ เปรียบเทียบกับกรณีแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ารูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s
- 6) ทดสอบหาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าแบบ STLI ต่อคุณสมบัติการทำงานของดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) ในระบบจำหน่าย 22-24 kV ด้วยแรงดัน STLI รูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ตามลำดับ เปรียบเทียบกับกรณีทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ารูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s ศึกษาเปรียบเทียบค่าแรงดันเหลือค้าง (Residual Voltage) และขนาดกระแสดีสชาร์จ (Discharge Current) ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่า
- 7) ศึกษาเปรียบเทียบผลของรูปทรงอิเล็กโทรด (Electrodes Configuration) ต่อคุณลักษณะการเบรคควาน์ในช่องแก๊ปอากาศ เปรียบเทียบทั้งกรณีแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน และ แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าแบบ STLI
- 8) วิเคราะห์และสรุปผล
- 9) เรียบเรียงเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ สำหรับใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงทางวิชาการ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้มีการวางแผนจัดลำดับขั้นตอนการศึกษาวิจัยไว้ในกรอบของระยะเวลาการศึกษารวมประมาณ 1 ปีการศึกษา (12 เดือน) เพื่อให้ได้ข้อมูลผลการศึกษาวิจัยในเชิงลึก ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์อ้างอิงในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมได้จริง และเพื่อให้การเรียบเรียงเนื้อหาของวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากที่สุด โดยมีลำดับขั้นตอนของการศึกษาวิจัย แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

ลำดับ ที่	รายละเอียดการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินการ โดยประมาณ
1	กระบวนการศึกษาหาข้อมูล เพื่อใช้ประกอบในการกำหนดหัวข้อวิทยานิพนธ์	3 เดือน
2	ทำการทดลองศึกษาเบื้องต้น เพื่อนำข้อมูลไปใช้ประกอบในการเรียบเรียงเนื้อหา สำหรับการขอสอบเพื่อกำหนดหัวข้อและเค้าโครงร่างวิทยานิพนธ์	1 เดือน
3	ขั้นตอนการขอสอบเพื่อกำหนดหัวข้อและเค้าโครงร่างวิทยานิพนธ์	1 เดือน
4	การออกแบบการทดลองและการจัดความพร้อมสำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ	2 เดือน
5	การทดลองเก็บผลในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง	3 เดือน
6	การแก้ไขปัญหาและการตรวจสอบผลการทดลองขั้นสุดท้าย รวมทั้งการวิเคราะห์และสรุปผล	1 เดือน
8	การเรียบเรียงเนื้อหาและจัดทำวิทยานิพนธ์	1 เดือน
รวมระยะเวลาในการดำเนินงานทั้งสิ้น		12 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีหลักการที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย เพื่อปูพื้นฐานให้ผู้ที่อ่านวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเข้าใจในทฤษฎีหลักการพื้นฐานก่อนนำไปสู่เนื้อหาในส่วนอื่นๆ ต่อไป ทฤษฎีหลักการที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้เพื่อสนับสนุนแนวคิดในการศึกษาวิจัย รวมทั้งกระบวนการวิเคราะห์และสรุปผลในประเด็นต่างๆ ตลอดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.1 บทนำยามและคำจำกัดความ

เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ตรงกัน ในที่นี้จึงขอกำหนดบทนิยามรวมทั้งคำจำกัดความ เฉพาะที่สำคัญๆ ไว้ดังนี้

แรงดันเกินทรานเซียนต์ (Transient Overvoltage) หมายถึง แรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดขึ้นในระบบ เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ในย่านไมโครวินาที (μs) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติ หรือเกิดจากการทำสวิตชิ่งในระบบไฟฟ้า

วาวไฟย้อนกลับ (Back Flashover) หมายถึง การเกิดปรากฏการณ์วาวไฟข้ามผ่านพวงลูกถ้วยฉนวนของแรงดันเกินจากภายนอกระบบ ทำให้เกิดคลื่นแรงดันเกินเข้าสู่สายตัวนำในระบบ

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน (Standard Lightning Impulse : SLI) หมายถึง แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีรูปคลื่นเป็น 1.2/50 μs โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน [9]

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลากลิ้งสั้น (Short - Tail Lightning Impulse : STLI) หมายถึง แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีช่วงเวลาน้ำกลิ้งเป็น 1.2 μs แต่มีช่วงเวลากลิ้งที่สั้นกว่ามาตรฐาน [9, 27] กำหนด

แรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{50\%}$) หมายถึง ค่าแรงดันเบรคดาวน์ห้าสิบเปอร์เซ็นต์ เป็นค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่มีโอกาสทำให้เกิดเบรคดาวน์ด้วยความน่าจะเป็น 50% หรือมีโอกาสเกิดเบรคดาวน์เป็นจำนวนครั้งครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งทั้งหมดที่ปีอน

เส้นกราฟคุณลักษณะสมบัติแรงดัน – เวลา (Voltage – Time Characteristics หรือ v – t curve) หมายถึง เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเบรคดาวน์ (V_b) กับเวลาในการเกิดเบรคดาวน์ (t_b) ของระบบการฉนวนหนึ่งๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าภายใต้ข้อวิเลคโตรดทดสอบ หรือบางครั้งอาจเรียกว่า “ ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์ ”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะรูปทรงอิเล็กโทรด (Electrodes Configuration) หมายถึง ลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของขั้วอิเล็กโทรดทดสอบ บ่งบอกถึงลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าภายใต้ขั้วอิเล็กโทรดนั้นมีความแตกต่างกันไป ตามรูปทรงของอิเล็กโทรดคู่หนึ่งๆ

2.2 แรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันทรานเซียนต์แบบไม่เป็นรายคาบ (Non-periodic Transient Voltage) ซึ่งค่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากศูนย์ไปถึงค่ายอดแล้วค่อยๆ ลดลงไปถึงศูนย์อย่างช้าๆ ในทางปฏิบัติอาจแบ่งแรงดันอิมพัลส์ตามลักษณะรูปคลื่นหรือสาเหตุที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 ชนิด คือ

- 1) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) มีต้นเหตุมาจากแหล่งกำเนิดอื่นภายนอกระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติที่ควบคุมไม่ได้
- 2) แรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง (Switching Impulse) มีต้นเหตุเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดคอนภายในระบบเอง ซึ่งรวมทั้งการทำงานในสภาวะการตัดต่อวงจรตามปกติ และในขณะที่เมื่อเกิดผิดปกติ (Fault) ขึ้นในระบบ

แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ทดสอบระดับการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นการทดสอบหาความคงทนต่อแรงดันเกินอิมพัลส์ของการฉนวนก่อนนำอุปกรณ์ไปติดตั้งใช้งานจริง หรือใช้เพื่อการศึกษาวิจัยเป็นหลัก แรงดันที่สร้างขึ้นในห้องทดลองเป็นแรงดันที่เลียนแบบรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ ซึ่งค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของฉนวนไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันค่ายอดสูงสุดเท่านั้น หากแต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะการแปรไปตามเวลาของขนาดแรงดันอีกด้วย ฉะนั้นเพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบจึงได้มีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน โดยยึดถือเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติเป็นเกณฑ์

2.1.1 ข้อกำหนดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ อาจจะกำหนดด้วยคุณสมบัติต่อไปนี้

- 1) ขนาดของแรงดัน (V_p) โดยปกติจะหมายถึง ค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่แรงดันมีลูกคลื่นระลอกซ้อน ซึ่งอาจเกิดจากการออสซิลเลชันใกล้เคียงๆ ของรูปคลื่น ให้ถือเป็นค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอกซ้อนนั้น
- 2) ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน (Earth)
- 3) พารามิเตอร์ทางเวลา ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะของรูปคลื่นแรงดันทดสอบที่แตกต่างกัน แบ่งออกเป็นค่าเวลา 2 ช่วง คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

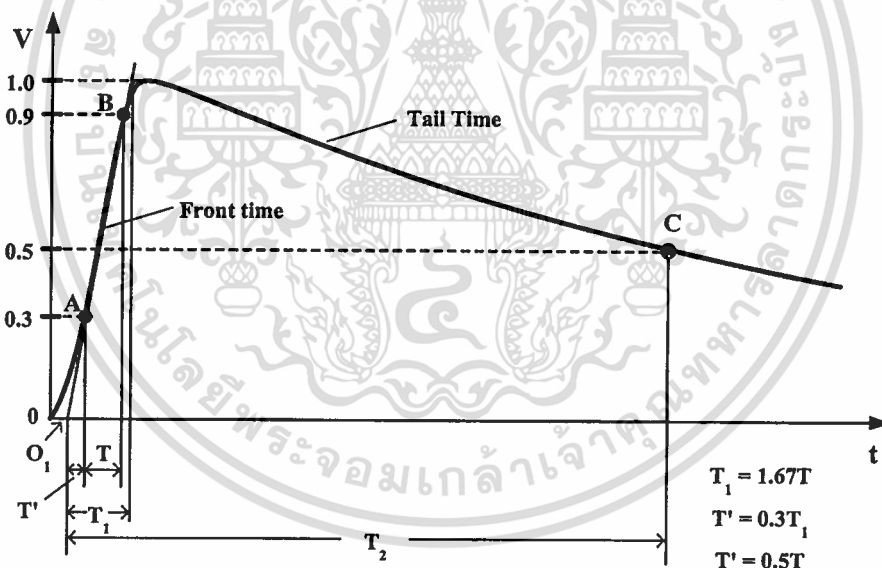
- 3.1) เวลาช่วงหน้าคลื่น (Front Time: T_1) คือ ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มต้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดสูงสุด
- 3.2) เวลาช่วงหางคลื่น (Tail Time: T_2) คือ ช่วงเวลาที่เริ่มนับจากแรงดันเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดสูงสุด จนกระทั่งมีขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

2.1.2 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (Lightning Impulse Voltage)

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) [9] แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (Full Wave Lightning Impulse Voltage)

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มจะมีลักษณะรูปคลื่นตามข้อกำหนด ในรูปที่ 2.1 ซึ่งหมายถึงรูปคลื่นที่มีขนาดแรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดสูงสุดแล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง กระทั่งลดลงเป็นศูนย์



รูปที่ 2.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 (Front Time)

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ 1.67 เท่าของช่วงเวลา T ระหว่างจุดที่อิมพัลส์มีค่า 30 % และ 90% ของค่ายอด คือ จุด A และ B ดังรูปที่ 2.1 ถ้ารูปคลื่นมีการแกว่งซ้อนอยู่ช่วยให้ลากเส้น โค้งรูปคลื่นเฉลี่ยสัญญาณแกว่งซ้อนเสียก่อนแล้วจึงค่อยหาจุด A และ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเริ่มต้นเสมือน O_1 (Virtual Origin)

จุดเริ่มต้นเสมือน O_1 ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ จุดที่คิดเป็นเวลาห่างจากจุด A ในรูปที่ 2.1 ไปข้างหน้า เท่ากับ $0.3 T_1$ หรือ จุดตัดของแกนเวลากับเส้นตรงที่ลากผ่านจุด A และจุด B สำหรับรูปคลื่นแรงดันที่บันทึกโดยแกนเวลาพอดีอย่างเชิงเส้น

เวลาช่วงหางคลื่น T_2 (Time to Half Value)

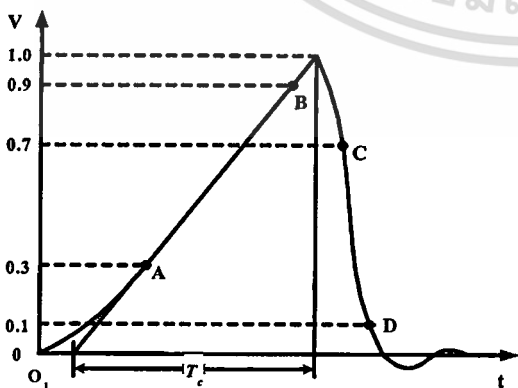
เวลาช่วงหางคลื่น T_2 ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือน (O_1) กับจุดที่แรงดันลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดทางตอนหางคลื่น ดังรูปที่ 2.1

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน (Standard Lightning Impulse) ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) [9] คือ แรงดันอิมพัลส์ที่มีช่วงเวลา T_1 / T_2 เป็น $1.2 / 50 \mu s$ โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ดังนี้

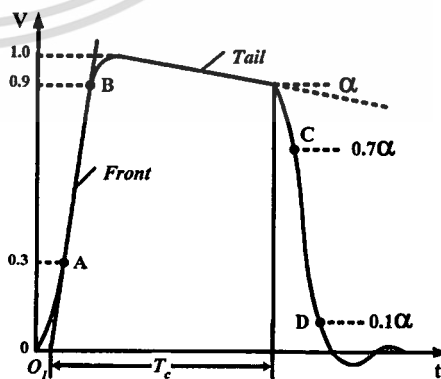
- เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu s \pm 30\%$
- เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 50 \mu s \pm 20\%$
- ค่ายอดแรงดัน $V_p \pm 3\%$

2) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด (Chopped Wave Lightning Impulse Voltage)

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด คือ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่รูปคลื่นเกิดคัสซาร์จแบบทำลาย ทำให้แรงดันตกลงสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว การตัดของรูปคลื่นแรงดันอาจเกิดที่หน้าคลื่นหรือ ส่วนหางคลื่นก็ได้ ดังรูปที่ 2.2 โดยแรงดันขณะที่คลื่นตัด (Voltage at The Instant of Chopped) คือ แรงดันในขณะที่เกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในรูปคลื่นนั้น เวลาช่วงคลื่นตัด T_c (Time to Chopped) คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือนกับช่วงเวลาขณะที่เกิดคลื่นตัด ดังรูปที่ 2.2



ก) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น



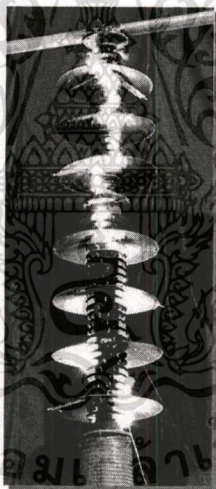
ข) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หางคลื่น

รูปที่ 2.2 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเกิดวาวไฟย้อนกลับบนลูกถ้วยฉนวน

การเกิดวาวไฟย้อนกลับ (Back Flashover) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากผลของฟ้าผ่าลงที่สายดินเหนือศีรษะ (Overhead Ground Wire) ในระบบ ทำให้เกิดคลื่นแรงดันเกิน ทรานเซียนต์ซัน โดยธรรมชาติคลื่นแรงดันเกินนี้จะวิ่งลงสู่ดินผ่านระบบรากสายดินในเสาส่ง ขนาดของคลื่นแรงดันเกินนี้จะขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ค่าขดกระแสฟ้าผ่า, ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) ของระบบ และ ค่าความต้านทานรากสายดินที่เสาส่ง (Footing Resistance) เป็นต้น ในทางปฏิบัติพบว่าถ้าค่าความต้านทานรากสายดินที่เสาส่งมีค่าสูงเกินจะส่งผลให้ขนาดของแรงดันเกินบนหัวเสาส่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและอาจสูงเกินกว่าแรงดันระบบในสายเฟสหลายเท่า โดยเฉพาะในระบบจำหน่าย (Distribution System) และระบบสายส่งรอง (Sub-Transmission System) ถ้าหากค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันเกินนี้กับค่าขดแรงดันเฟสมีค่าสูงเกินกว่าค่าแรงดันวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤติ (Critical Flashover Voltage : CFO) [19] ของพวงลูกถ้วยฉนวนแขวนจะทำให้เกิดวาวไฟย้อนกลับ (Back Flashover) เข้าสู่ระบบ ดังรูปที่ 2.3 เกิดคลื่นแรงดันเกินทรานเซียนต์ในสายเฟสวิ่งกระจายไปบนสายตัวนำเป็นลักษณะคลื่นจร (Travelling Wave) ไปในสายส่ง



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดวาวไฟตามผิวบนพวงลูกถ้วยฉนวนแขวน

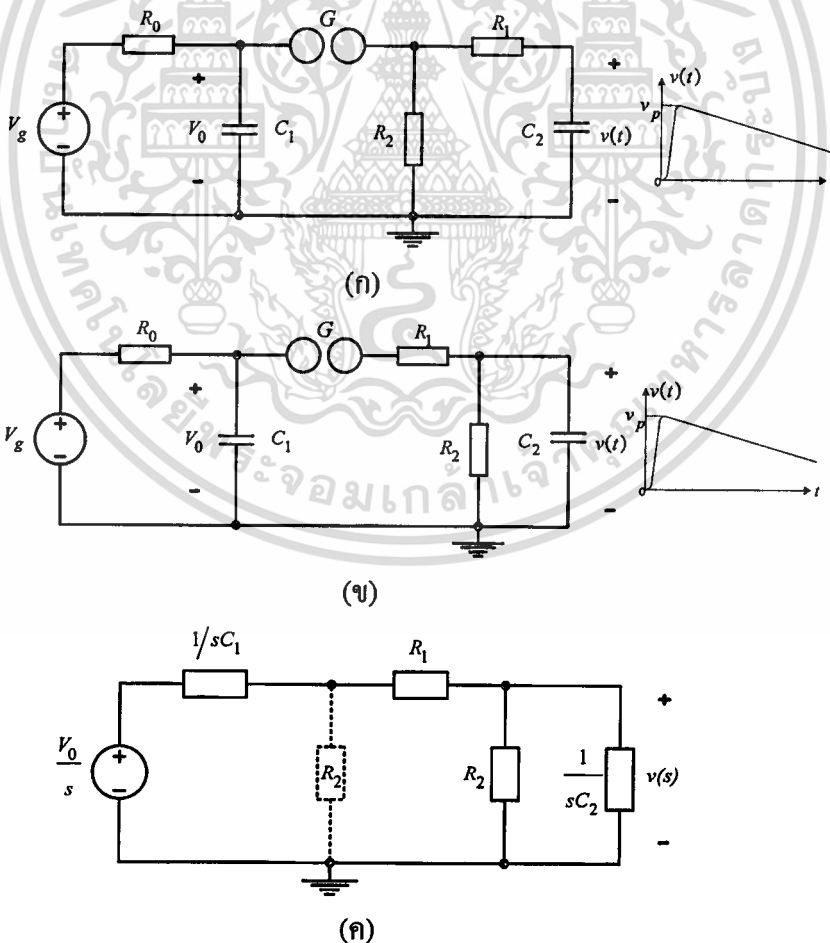
เราพบว่าคลื่นแรงดันเกินทรานเซียนต์ที่เกิดจากวาวไฟย้อนกลับเข้าสู่ระบบ จะมีช่วงเวลาทางคลื่นที่สั้นลงมาก เมื่อเทียบกับรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าปกติ [10-17] โดยคลื่นแรงดันเกินนี้ยังคงอยู่ในระบบ และหากระบบไม่มีการป้องกันใดๆ คลื่นแรงดันเกินนี้ก็อาจส่งผลกระทบต่อการณ์ของอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบได้ ซึ่งจะสร้างความเสียหายให้เกิดขึ้นในระบบสายส่งต่อไป

2.4 หลักการสร้างแรงดันอิมพัลส์

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

2.4.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 วงจร ดังรูปที่ 2.4 (ก) และ (ข) ข้อแตกต่างระหว่างวงจรทั้งสอง คือ ลักษณะการต่อตัวความต้านทาน R_1 และ R_2 ซึ่งทำให้การคำนวณค่าคงตัวเวลา (Time Constant) แตกต่างกัน วงจรทั้งสองชนิดเป็นวงจรแบบขั้นเดียว (Single-Stage Impulse Generator) ซึ่งใช้เป็นวงจรพื้นฐานของวงจรแบบหลายขั้น (Multistage) สำหรับใช้สร้างแรงดันสูงอิมพัลส์ต่อไป ในทางปฏิบัติเราอาจเขียนวงจรสมมูลของวงจรในรูปที่ 2.4 (ก) และ (ข) ได้เป็นดังรูปที่ 2.4 (ค)



รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ต่างๆ ในรูปที่ 2.4 สามารถอธิบายได้ ดังนี้

V_g	คือ แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสตรง เพื่อใช้อัดประจุ
R_0	คือ ความต้านทานหน่วงการอัดประจุ
V_o	คือ ขนาดแรงดันอัดประจุกระแสตรง
C_1	คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
C_2	คือ ตัวเก็บประจุโพลดวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์
R_1	คือ ความต้านทานหน่วงช่วงเวลาหน้าคลื่น
R_2	คือ ความต้านทานปล่อยประจุคอนดิสซาร์จหน่วงช่วงเวลาหลังคลื่น
$v(t)$	คือ แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น
G	คือ สปาร์กแกปทรงกลมทำหน้าที่เป็นสวิตช์แรงสูง

หลักการการทำงานของวงจร คือ คาปาซิเตอร์ C_1 ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุที่ได้รับการอัดประจุอย่างช้าๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง V_o จนกระทั่งเกิดเบรคความขึ้นที่สปาร์กแกป (Spark Gap: G) โดยสปาร์กแกปจะทำหน้าที่คล้ายกับสวิตช์แรงสูง เพื่อควบคุมระดับแรงดันอัดประจุ V_o การเกิดสปาร์กจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้านออกจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบตัวความต้านทาน (R_1 และ R_2) และคาปาซิเตอร์ C_2 ของวงจร โดยความต้านทาน R_1 จะช่วยหน่วงเวลาและใช้ปรับช่วงเวลาหน้าคลื่น T_1 ส่วนความต้านทาน R_2 จะควบคุมเวลาการคายประจุจาก C_2 คือ เป็นตัวกำหนดช่วงเวลาหางคลื่น T_2 นั่นเอง ในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุ C_2 หมายถึง ตัวเก็บโพลดของวงจร ซึ่งแทนในกรณี Full Load เพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นแรงดัน (T_1/T_2) จากผลของวงจรทดสอบรวมทั้งวงจรการวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ต่อขนานเข้ากับวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ในที่นี้เราจะพิจารณาวงจร โดยไม่คำนึงถึงผลของความเหนี่ยวนำ (Inductance) ที่เกิดขึ้นในวงจร ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมากๆ และไม่ส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ ในการวิเคราะห์วงจรเพื่อออกแบบพารามิเตอร์อาจพิจารณาได้จากการใช้ Laplace's Transformation [21] จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.4 (ค) พิจารณาที่เวลา $t \leq 0$ คาปาซิเตอร์ C_1 มีค่าแรงดันเท่ากับ V_o และที่เวลา $t > 0$ จะเกิดการดีสซาร์จผ่านแกปทรงกลมเกิดประกายแลปข้ามคล้ายกับปิดสวิตช์พลังงานสูงสุดที่เกิดจากการถ่ายเทประจุจาก C_1 จึงมีค่าเท่ากับ W นั่นคือ

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

เมื่อ	W	คือ พลังงานอัดประจุหน่วยเป็นจูล (J)
	C_1	คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (F)
	V_o	คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง (V)

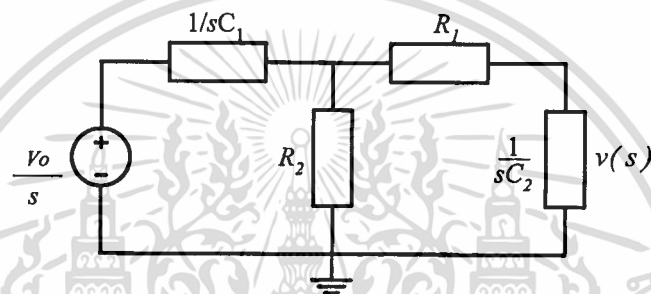
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์

1) การแปรของแรงดันในทอมของเวลา

อาศัยการวิเคราะห์จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์ เช่น วงจรพื้นฐาน (ก) ในรูปที่ 2.4 เมื่ออัปเดตประจุให้ตัวเก็บประจุ C_1 ด้วยแรงดันอัปเดตประจุ V_o จนกระทั่งเกิดสปาร์กขึ้นที่ช่องว่างแกปทรงกลม G ทำให้มีกระแสไหลในส่วนต่างๆ ของวงจร

ในการวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม อาจพิจารณาได้จากการใช้เทคนิคการแปลงลาปลาซ (Laplace Transformation) ดังตัวอย่างเช่น จากวงจรรูปที่ 2.4 (ก) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลการแปลงลาปลาซได้ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลการแปลงลาปลาซของวงจรในรูปที่ 2.4 (ก)

จากรูปที่ 2.5 จะได้ว่า

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

เมื่อ

$$a = \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \right)$$

$$b = \left(\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right)$$

$$k = R_1 C_2$$

จากสมการที่ (2.2) เมื่อทำการแปลงกลับลาปลาซให้อยู่ในรูปของโดเมนเวลา (Time Domain) เราจะได้ความสัมพันธ์ใหม่เป็นดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

จากสมการที่ (2.3) จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเทอมของเอ็กโปเนนเชียลฟังก์ชันลดสองเทอมรวมกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ในการลดเป็น $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ตามลำดับ เราเรียกค่า $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ว่า "ค่าคงตัวของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ $v(t)$ " ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปคลื่น นั่นคือ T_1/T_2 หรือ T_{cr}/T_2 ความสัมพันธ์ต่างๆเหล่านี้สามารถหาได้โดย

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

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

จากคุณสมบัติของค่าคงตัวของ $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ตามที่กล่าวมา ดังนั้นลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ จึงถูกกำหนดในรูปของฟังก์ชันค่าคงตัวของรูปคลื่น แต่เนื่องจากโดยทั่วไปค่า $1/\alpha_1 \gg 1/\alpha_2$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของนิยามในการคำนวณค่า $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ เมื่อพิจารณาเทียบกับแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานค่าคงตัวของรูปคลื่นที่เหมาะสมสำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งพารามิเตอร์ค่าต่างๆ เหล่านี้สามารถหาได้โดยนิยามและอาศัยเทคนิคอิมัลไลซ์ (Normalized) เข้าช่วย [21]

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

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

2) การคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจร

ในการหาค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 ที่เหมาะสม โดยทั่วไปจะต้องทราบค่า C_1 และ C_2 ก่อน สำหรับเครื่องกำเนิดขนาดใหญ่จะต้องมีค่าตัวเก็บประจุคิซาร์จที่เหมาะสม เพื่อจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องสูง โดยจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ $C_1 / (C_1 + C_2)$ ทั้งนี้เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานที่ยังไม่ทราบค่าได้ ซึ่งจะมีค่าเป็นคังสมการที่ (2.7) และ (2.8) สำหรับวงจรในรูปที่ 2.4 (ก) นั่นคือ

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

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

และมีค่าคังสมการที่ (2.9) และ (2.10) สำหรับวงจรในรูปที่ 2.4 (ข) นั่นคือ

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

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

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

สำหรับวงจรในรูปที่ 2.4 (ก)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรในรูปที่ 2.4 (ข)

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

2.5 การวัดแรงดันอิมพัลส์

การวัดแรงดันอิมพัลส์เป็นการวัดค่ายอด (Peak Value) ในกรณีคลื่นเต็มหรือคลื่นตัดส่วนหางคลื่น ($T_c > T_1$) ส่วนในกรณีคลื่นตัดส่วนหน้าคลื่น ($T_c < T_1$) จะวัดค่าสูงสุดของคลื่นตัดที่เหนือวิธีวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้กันอยู่ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป มีอยู่ 2 วิธีคือ

- 1) วัดด้วยช่องว่างทรงกลม (Sphere Gap)
- 2) วัดด้วยโวลเตจดีไวเซอร์

2.5.1 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยช่องว่างทรงกลม (Sphere Gap)

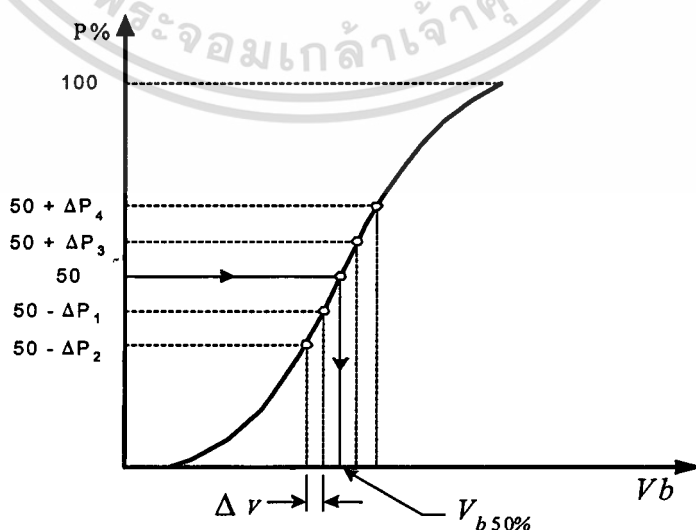
การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม เป็นวิธีที่ง่าย และมีความแน่นอนเชื่อถือได้ อาศัยการเกิดสปาร์กหรือเบรคดาวน์ระหว่างโลหะทรงกลมที่วางอยู่ในอากาศหรือก๊าซ ซึ่งเป็นไปตามกฎการเกิดดีสชาร์จของก๊าซ คือ สปาร์กหรือเบรคดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่งนั่นก็คือจะเกิดการเบรคดาวน์ขึ้นเมื่อแรงดันสูงถึงค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ (Statistic Breakdown Voltage) ที่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนแน่นอน ทำซ้ำเดิมได้ ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์กหรือเบรคดาวน์นั้น ขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ หรือก๊าซ ระยะห่างระหว่างทรงกลมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม กล่าวคือค่าแรงดันเบรคดาวน์ของช่องว่างทรงกลมนั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมและสภาวะอากาศรอบๆ ทรงกลมการเกิดเบรคดาวน์อย่างสมบูรณ์ในช่องว่างที่เป็นอากาศใช้เวลาเพียงไม่กี่ไมโครวินาที เมื่อค่ายอดแรงดันกระแสสลับถึงค่าแรงดันเบรคดาวน์ V_b เบรคดาวน์จะเกิด เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่งและมีเวลาเพียงพอในการหาอิเล็กตรอนตัวเริ่มต้นการแตกตัว (Ionization) และเวลาในการสร้างอะวาลานช์ (Avalanche) เวลาดังกล่าวเป็นเชิงสถิติ คือ ใช้เวลาในการสร้างอะวาลานช์จนเกิดเบรคดาวน์ที่ช้าเร็วต่างกัน เวลาที่ใช้เพื่อหาตัวอิเล็กตรอนที่เหมาะสมทำให้เกิดการแตกตัวอาจลดลงได้โดยการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตเข้าไปในช่องว่างทรงกลม หรือใช้สารกัมมันตภาพรังสีช่วยให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเริ่มต้นมีมากพอ ซึ่งจะเป็นการช่วยให้การกระจาย (Dispersion) ของเวลาที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ลดลง

วิธีการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยช่องว่างทรงกลมมีความแตกต่างที่สำคัญจากการวัดแรงดันกระแสตรงและแรงดันกระแสสลับก็คือ การวัดแรงดันอิมพัลส์นั้นไม่สามารถใช้วิธีค่อยๆเพิ่มแรงดันสูงขึ้นจนกระทั่งเกิดเบรคดาวน์ หากแต่ต้องใช้อุปกรณ์ให้กับคาปาซิเตอร์แรงสูงของเครื่องเอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำเนิดแรงดันอิมพัลส์ให้ได้แรงดันอัดประจุตามต้องการก่อนแล้วจึงปล่อยดีสชาร์จออกไปที่ช่องว่างทรงกลม ซึ่งอาจจะเกิดเบรคความถี่หรือไม่เกิดก็ได้ทั้งที่แรงดันสูงมากพอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็น (Probability) และขนาดแรงดัน ถ้าแรงดันอัดประจุต่ำเกินไปก็จะไม่เกิดเบรคความถี่ที่ช่องว่างทรงกลมวัดแรงดัน แต่ถ้าแรงดันอัดประจุเพิ่มสูงขึ้นมากพอก็จะทำให้มีโอกาสเกิดเบรคความถี่มากขึ้น และถ้าแรงดันอัดประจุสูงมากเกินไป ก็จะเกิดเบรคความถี่ทุกครั้งที่ดีสชาร์จออกไป ด้วยเหตุนี้เองการวัดแรงดันอิมพัลส์จึงกำหนดเป็นค่าแรงดันเบรคความถี่ห้าสิบเปอร์เซ็นต์ คือ $V_{b50\%}$ อันหมายถึงค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ค่าปานกลาง ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ทำให้จำนวนครั้งที่เกิดเบรคความถี่ที่ช่องว่างทรงกลม เป็นจำนวนครึ่งครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จออกไป ฉะนั้นการหาค่า $V_{b50\%}$ จึงหาได้โดยการดีสชาร์จออกไป เป็นจำนวนหลายๆครั้ง จนกระทั่งจำนวนครั้งที่เกิดเบรคความถี่เป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จออกไป เช่น ดีสชาร์จ 10 ครั้งแล้วเกิดเบรคความถี่ที่ช่องว่างทรงกลม 5 ครั้ง ค่าแรงดันนั้นก็คือ $V_{b50\%}$ แต่การที่อัดประจุให้ได้แรงดันอัดประจุพอดีที่จะทำได้ค่าแรงดันเบรคความถี่ห้าสิบเปอร์เซ็นต์พอดีนั้นทำได้ยากและเสียเวลา โดยทั่วไปจึงวัดค่าแรงดัน $V_{b50\%}$ ได้ 2 วิธี คือ วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ (Multiple Level Voltage Method) และวิธีปรับขึ้นปรับลง (Up and Down Method)

1) วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ

วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ เป็นวิธีหาค่า $V_{b50\%}$ ด้วยเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นที่เกิดเบรคความถี่กับค่าแรงดัน โดยป้อนแรงดันอย่างน้อย 20 ครั้ง ที่แรงดันแต่ละค่าหรือแต่ละระดับ $V_{b50\%}$ ประมาณ 3% ของค่าแรงดันดีสชาร์จเบรคความถี่ 50% ที่คาดหมาย ทดลองที่แรงดันหลายระดับที่สูงกว่าและต่ำกว่าที่ทำให้เกิดเบรคความถี่ 50% จากเส้นกราฟนี้จะหาค่าแรงดันดีสชาร์จ 50% ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เส้นกราฟใช้หาค่าแรงดันดีสชาร์จเบรคความถี่ 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.6 จุดวงกลม คือ จุดที่ได้จากการทดลอง และ ΔV คือ ความแตกต่างของแรงดันที่ป้อนในแต่ละระดับ

2) วิธีปรับขึ้นปรับลง

วิธีปรับขึ้นปรับลง (Up and Down Method) เป็นวิธีหาแรงดันคิสซาร์จเบรคดาวน์ 50% โดยการเริ่มต้นเลือกแรงดันค่าหนึ่ง (V_k) ที่คาดว่าจะจะเป็นแรงดันเบรคดาวน์ 50% ป้อนเข้าไปในช่องว่างทรงกลม ถ้าหากไม่เกิดเบรคดาวน์ที่ช่องว่างทรงกลมให้เพิ่มแรงดันขึ้น ΔV ซึ่งมีค่าประมาณ 3% ของแรงดันคิสซาร์จ 50% จึงป้อนแรงดันใหม่ด้วยค่า $V_k + \Delta V$ แต่ถ้าเกิดเบรคดาวน์ที่ช่องว่างทรงกลมที่แรงดัน (V_k) ก็ให้ลดแรงดันเหลือเพียง $V_k - \Delta V$ ฉะนั้นค่าแรงดันที่ป้อนต่อไปจะขึ้นอยู่กับผลที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันครั้งที่ผ่านมา ปฏิบัติต่อเนื่องกันเช่นนี้จนกระทั่งมีจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันมากพอ ค่าแรงดันเบรคดาวน์ 50% สามารถหาได้จากสมการ

$$V_{b50\%} = V' \pm \Delta V \left[\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right] \quad (2.11)$$

เมื่อ V' คือ ค่าแรงดันต่ำสุดที่ไม่เกิดเบรคดาวน์หรือเกิดเบรคดาวน์ โดยกรณีเกิดเบรคดาวน์ให้คิดที่เครื่องหมายลบ และกรณีไม่เกิดเบรคดาวน์ให้คิดที่เครื่องหมายบวก

ΔV คือ ความแตกต่างของแรงดันที่ป้อนในแต่ละระดับ

N คือ จำนวนครั้งของการไม่เกิดเบรคดาวน์หรือเกิดเบรคดาวน์ โดยที่

$$N = \sum_{i=1}^k n_i \quad (2.12)$$

A คือ ผลรวมของจำนวนครั้งคูณกับครั้งที่ไม่เกิดเบรคดาวน์หรือเบรคดาวน์

โดยที่

$$A = \sum_{i=1}^k in_i \quad (2.13)$$

ค่าแรงดันเบรคดาวน์อิมพัลส์ 50% วัดที่สภาวะที่ทำการทดลองที่ไม่ใช่สภาวะมาตรฐาน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเทียบเข้าสู่สภาวะมาตรฐานกำหนด ซึ่งต้องคูณแก้ด้วยตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ (Air Density Corection Factor, k_d) เช่นเดียวกับการวัดแรงดันกระแสสลับหรือกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [9] และ IEC 60052 [28] กำหนดแรงดันเบรคความถี่ของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐาน คือ ความดันบรรยากาศ 760 mmHg., ความชื้นสัมบูรณ์ 11 g/m³ และ อุณหภูมิ 20 °C ฉะนั้นค่าแรงดันเบรคความถี่ที่วัดได้ที่ความดันและอุณหภูมิใดๆ เมื่อจะเทียบกับสภาวะมาตรฐานจะต้องแปลงค่าที่วัดได้ไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน ดังสมการที่ 2.14

$$V_{bn} = V_b / k_d \quad (2.14)$$

เมื่อ V_{bn} คือ ค่าแรงดันเบรคความถี่ที่สภาวะมาตรฐาน

V_b คือ ค่าแรงดันเบรคความถี่ที่วัดได้ที่อุณหภูมิและความดันที่ทำการทดสอบ

แฟกเตอร์ k_d คือ ตัวประกอบแปรผันความหนาแน่นของอากาศ แสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Air Density : *RAD*) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$RAD = \frac{P}{760} \cdot \frac{273+20}{273+t} = 0.386 \times \left(\frac{P}{273+t} \right) \quad (2.15)$$

โดยที่

P เป็น ความดันของอากาศอ่านจากบาโรมิเตอร์หน่วยเป็น mmHg.

t เป็น อุณหภูมิของห้องขณะที่ยัดได้ หน่วยเป็น °C

k_d เป็น ตัวประกอบแปรผันจะเท่ากับ *RAD* เมื่อ *RAD* มีค่าอยู่ระหว่าง 0.95 ถึง 1.05

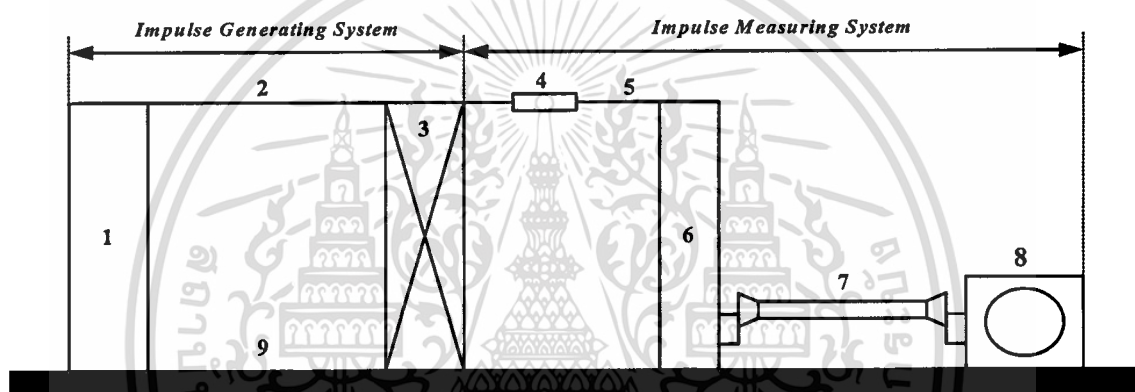
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า *RAD* และ Correction Factors (k_d)

Relative Air Density (<i>RAD</i>)	Correction factor (k_d)
0.70	0.72
0.75	0.77
0.80	0.82
0.85	0.86
0.90	0.91
0.95	0.95
1.00	1.00
1.05	1.05
1.10	1.09
1.15	1.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันอิมพัลส์จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับเวลา ดังนั้นในการวัดแรงดันดังกล่าวด้วยอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์สิ่งที่สำคัญคือ เครื่องมือวัดจะต้องสามารถตอบสนองต่อการวัดที่ดี นั่นคือองค์ประกอบอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ และระบบวัดแรงดันอิมพัลส์จะต้องออกแบบมาเป็นพิเศษ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของการวัดในย่านทรานเซียนต์ดี มีผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ ที่สำคัญระบบการวัดจะต้องไม่เป็นโหลดหรือส่งผลต่อแหล่งกำเนิด ซึ่งต้องมีการป้องกันผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวเพื่อให้ได้ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันสูงทั้งหมดไปตกคร่อมเฉพาะวัสดุทดสอบเท่านั้น วงจรพื้นฐานที่ใช้ในระบบการวัดแรงดันอิมพัลส์แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรพื้นฐานการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์

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

2.5.3 องค์ประกอบของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์

องค์ประกอบของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์โดยทั่วไปจะประกอบ ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์, ออสซิลโลสโคป, สายนำแรงสูง, ความต้านทานหน่วง, ความต้านทานด้านแรงดันสูง, ความต้านทานด้านแรงดันต่ำ, ความต้านทานเมฆซึ่งและระบบกราวด์ของวงจร โดยองค์ประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1) โวลเตจดีไวเดอร์ (Voltage Divider)

โวลเตจดีไวเดอร์ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงให้ต่ำลงในย่านที่เครื่องมือวัดทั่วไปสามารถวัดได้ ซึ่งใช้หลักการแบ่งแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงและอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ และนำแรงดันที่ตกคร่อมภาคแรงต่ำไปยังเครื่องมือวัดโวลเตจดีไวเดอร์ส่วนใหญ่ จะใช้ช่วงเวลาขาขึ้นของผลตอบสนองรูปขึ้นในการพิจารณาความไวของผลตอบสนองทางเวลา โดยเมื่อพิจารณาอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานพบว่าสเตรคาปาซิแตนซ์ (Stray Capacitance) จะมีผลต่อเวลาตอบสนองอย่างมากในช่วงที่มีการอัดประจุและดีส-ชาร์จประจุผ่านโวลเตจดีไวเดอร์ อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานสามารถลดผลของสเตรคาปาซิแตนซ์ได้ โดยการออกแบบให้มีค่าความต้านทานต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ แต่ต้องไม่ส่งผลกระทบต่อเป็นโหลดของแหล่งกำเนิด หรืออาจจะลดผลของของสเตรคาปาซิแตนซ์ด้วยการใส่ซิลิค์ไดโอดที่ส่วนปลายของโวลเตจดีไวเดอร์

2) แท่งตัวนำแรงสูง (High-Voltage Lead)

แท่งตัวนำแรงสูงจะต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดีไวเดอร์ ความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวนำอาจจะมีผลต่อการวัดแรงดันอิมพัลส์ โดยควรมีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางที่แน่นอนและที่สำคัญควรจะปรับเทียบค่าทุกครั้งก่อนที่จะทำการทดสอบ ในทางทฤษฎีนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวนำควรมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรน่า (Corona) แท่งตัวนำขนาดเล็กนั้นจะส่งผลทำให้เกิดโคโรน่าและเกิดสัญญาณรบกวนต่อระบบวัด โดยทั่วไปบริเวณใกล้กับโวลเตจดีไวเดอร์ไม่ควรเกิดดีสชาร์จหรือสไตรเมอร์ และควรต่อแท่งตัวนำกับวัสดุทดสอบไม่ควรต่อกับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงอิมพัลส์โดยตรง อย่างไรก็ตามเมื่อวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มหรือแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากลักษณะการต่อเชื่อมแท่งตัวนำแรงสูงระหว่างโวลเตจดีไวเดอร์กับวัสดุทดสอบนั้นจะไม่นำมาคิด ถ้าเทอม \sqrt{LC} มีค่าน้อยกว่า 0.05 ns โดยที่ L คือค่าความเหนี่ยวนำแฝงในแท่งตัวนำแรงสูง (ประมาณ $1 \mu\text{H/m}$) และ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างแท่งตัวนำแรงสูงลงดิน โดยถือว่าระยะห่างระหว่างโวลเตจดีไวเดอร์กับวัสดุทดสอบหรือก็คือความยาวของแท่งตัวนำแรงสูง มีขนาดเท่ากับความสูงของวัสดุทดสอบนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ความต้านทานหน่วง (Damping Resistance)

ความต้านทานหน่วงทำหน้าที่หน่วงการแกว่ง (Oscillation) ที่สภาวะทรานเซียนต์ เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำในสายนำแรงสูงหรือแท่งตัวนำแรงสูงกับค่าความจุไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเซอร์เอง ความต้านทานหน่วงที่ใช้จะเป็นแบบที่มีค่าความเหนี่ยวนำแฝงและค่าความจุไฟฟ้าแฝงต่ำ ความต้านทานหน่วงนี้อาจจะต่อไว้ที่ต้นสายนำแรงสูง ดังรูปที่ 2.7 หรืออาจจะต่อไว้ที่ปลายสายนำแรงสูงติดกับโวลเตจดีไวเซอร์ก็ได้ ถ้าต่อไว้ที่ต้นสายแรงสูง เรียกขบวนการนี้ว่า “ระบบสามองค์ประกอบ” (Three-Component System) ถ้าต่อไว้ที่ปลายสายนำแรงสูงติดกับโวลเตจดีไวเซอร์ ความต้านทานหน่วงจะถือเป็นส่วนหนึ่งของโวลเตจดีไวเซอร์ และเรียกขบวนการนี้ว่า “ระบบสององค์ประกอบ” (Two-Component System) ถ้าสายนำแรงสูงมีความยาวมาก การต่อความต้านทานหน่วงแบบสามองค์ประกอบ โดยใช้ค่าความต้านทานหน่วงเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแรงสูงจะช่วยลดการแกว่งที่เกิดขึ้นในสภาวะทรานเซียนต์อันเนื่องมาจากอิมพีแดนซ์ที่ไม่แมช (Matching) กันของแท่งตัวนำแรงสูงกับวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และโวลเตจดีไวเซอร์

4) ออสซิลโลสโคป

เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น ดังนั้นออสซิลโลสโคปที่ใช้สำหรับวัดจะต้องมีความไว (Sensitivity) ในการวัดสูง ซึ่งแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้อาจมีทั้งรูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัด เมื่อวิเคราะห์ออกมาเป็นสเปกตรัม (Spectrum) จะพบว่ามีความถี่ต่างๆ เป็นช่วงกว้างมาก ซึ่งออสซิลโลสโคปจะต้องมีแบนวิดท์ที่กว้างมากพอและต้องมีการป้องกันหรือไม่ไวต่อคลื่นรบกวนที่เกิดจากเหตุอื่นภายนอก และควรจะมีอัตราแรงดันป้อนเข้าสูง เพราะจะเป็นผลดีในการขจัดคลื่นรบกวนให้น้อยลง

5) เคเบิลวัด

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถต่อออสซิลโลสโคปเข้าโดยตรงกับภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเซอร์ได้ ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยของผู้วัดและเพื่อลดการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องวางออสซิลโลสโคปให้ห่างจากโวลเตจดีไวเซอร์พอสมควร ดังนั้นการส่งสัญญาณของอุปกรณ์ทั้งสองจึงต้องใช้สายนำสัญญาณแรงต่ำต่อเชื่อมกัน ซึ่งปกติจะนิยมใช้สายนำสัญญาณแบบแกนร่วม (Coaxial Cable) สายเคเบิลที่ใช้ต้องมีชนิดอย่างน้อยสองชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในสายเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนปนไปกับสัญญาณที่ต้องการวัด ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์จะต้องพิจารณาเป็นแบบสัญญาณคลื่นจร (Travelling Wave) เมื่อคลื่นจรเข้ามาที่ต้นสายเคเบิลจะมองเห็นเคเบิลเป็นความต้านทานบริสุทธิ์เท่ากับ Z_c (Surge Impedance) ไม่ขึ้นกับโหลดที่ปลายสายเคเบิลว่ามีลักษณะเปิดวงจรหรือลัดวงจรอยู่ในขณะนั้น นั่นคือโหลดที่ปลายทางจะไม่มีผลต่อสัญญาณรบกวนต้นทางจนกว่าจะถึงเวลา 2 เท่าของคลื่นเดินทาง

τ (Transit Time) และค่าเวลา τ ของสายเคเบิลจะพิจารณาเป็นแบบเดียวกันกับกรณีของสายส่ง ถ้าเวลา τ นั้นมีค่าใกล้เคียงกับเวลาขาขึ้นของคลื่น (Rise Time)

6) ความต้านทานแมชชิง (Matching Resistance)

ในการวัดแรงดันทรานเซียนต์ (Transient) ที่ส่งผ่านจากโวลเตจดีไวเซอร์ไปยังเครื่องมือวัดภาคแรงต่ำอาจทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันได้ ในที่นี้พิจารณาจากการต่อแมชชิงอิมพีแดนซ์เพื่อส่งผ่านแรงดันอิมพัลส์จากโวลเตจดีไวเซอร์ไปยังเครื่องมือวัด โดยพิจารณาเคเบิลวัดเป็นสายส่งแบบไม่มีพลังงานสูญเสียในสาย (Lossless) ดังนั้นค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ $Z_c = \sqrt{L_c/C_c}$ จึงไม่ขึ้นอยู่กับความถี่และเวลาคลื่นเดินทาง $\tau_c = \sqrt{L_c C_c}$ สำหรับโวลเตจดีไวเซอร์แบบความต้านทานการต่อแมชชิงซึ่งสามารถทำได้ง่าย ๆ โดยการต่อความต้านทาน $R_m = Z_c$ ที่ปลายของสายเคเบิลวัด ซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันที่ตกคร่อม R_m และส่งผ่านเคเบิลวัดจะไม่เกิดการผิดเพี้ยน เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของเคเบิลวัด คือ $R_m = Z_c$ ค่าความต้านทานนี้จะต่อขนานเข้ากับ R_m ดังนั้นจึงต้องพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเซอร์ด้วย

ในกรณีโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ เคเบิลวัดไม่สามารถต่อแมชชิงที่ปลายทางได้ เนื่องจากความต้านทานที่มีค่าต่ำ เมื่อต่อขนานเข้ากับ C_c จะไปรวมกับภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเซอร์และแรงดันขาเข้าจะมีขนาดลดลงตามเวลา เพื่อหลีกเลี่ยงการแกว่งของคลื่นเดินทางเคเบิลวัดจึงควรต่อแมชชิงที่ต้นทาง แรงดันที่ตกคร่อม C_c จะถูกแบ่งครึ่งโดย $R_m = Z_c$ ที่ต้นทางของเคเบิลวัด เมื่อแรงดันที่แบ่งครึ่งนี้เดินทางไปถึงปลายเคเบิลวัด ซึ่งมีลักษณะเป็นวงจรเปิดจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเท่าตัว ดังนั้นแรงดันที่ปรากฏเครื่องมือวัดจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อม C_c เมื่อสะท้อนกลับมาถึงต้นทางที่มี $R_m = Z_c$ ต่ออนุกรมอยู่ และ C_c เสมือนกับลวดวงจรจึงไม่ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับอีก

7) สายดิน

สายดินทำหน้าที่เชื่อมโยงจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทดสอบให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำเพื่อลดแรงดันตกในสายดินให้น้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบางขนาดใหญ่ปูบนพื้นห้องทดสอบ เช่น ทองแดงแผ่นบาง เป็นต้น

2.6 การเบรคดาวน์เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ (Breakdown of Impulse Voltage)

การเกิดเบรคดาวน์ของก๊าซในกรณีของแรงดันสถานะอยู่ตัว (Steady State Voltage) เช่น แรงดันกระแสตรงหรือแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน ถือว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าคงตัว ฉะนั้นแรงดันเบรคดาวน์จะเป็นฟังก์ชันของ α, γ, η และระยะแคป d แต่ในกรณีที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์ แรงดันเบรคดาวน์จะคงอยู่ในช่วงเวลาอันสั้น นั้นหมายถึง สนามไฟฟ้าจะคงมีอยู่ในช่วงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาอันสั้นด้วย เมื่อขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัวควรจะเกิดเบรคดาวน์ได้ แต่ปรากฏว่ายังไม่เกิดเบรคดาวน์ จะต้องรอเวลาอีกช่วงระยะหนึ่งเบรคดาวน์จึงจะเกิดขึ้นได้ ช่วงเวลานับตั้งแต่ขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับสถานะอยู่ตัวจนถึงเวลาเกิดเบรคดาวน์ขึ้นจริงของแรงดันอิมพัลส์ เวลาที่ช้ากว่านี้ เรียกว่า “เวลาล่าช้าของการเกิดเบรคดาวน์ (t_l)” ดังรูปที่ 2.8

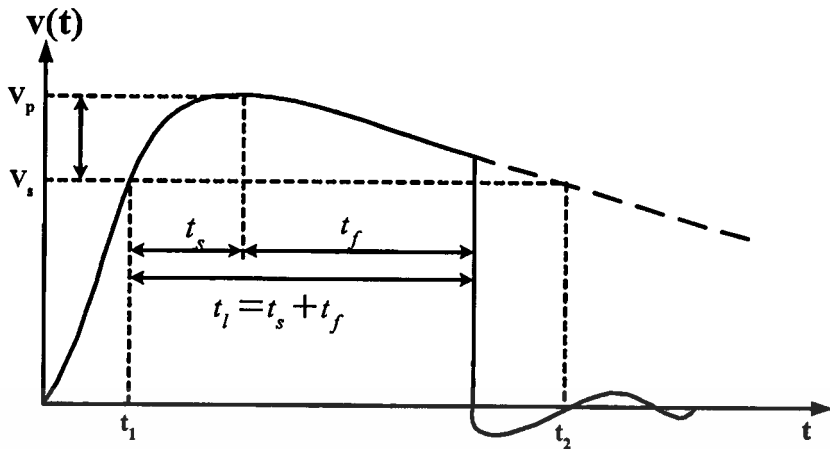
2.6.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรคดาวน์ (Time Lag of Breakdown)

เบรคดาวน์จะเกิดขึ้นได้นั้น ทุกกรณีจะต้องมีอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน ซึ่งต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นอย่างน้อยหนึ่งอิเล็กตรอน และจะต้องเป็นอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะที่พอเหมาะคือ มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดไอออนในเซชันสร้างอะวาลานซ์ต่อไปได้ นั่นคือ เริ่มต้นด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณสนามไฟฟ้าที่สูงพอ มีระยะห่างแอนโอดอย่างน้อยเท่ากับระยะอะวาลานซ์วิกฤต (X_c) ในกรณีของแรงดันที่สถานะคงตัว สนามไฟฟ้าจะคงตัวอยู่เป็นเวลาเหลือเพื่อที่จะหาหรือพบอิเล็กตรอนอิสระเริ่มต้นได้ง่ายและมีมากพอจากธรรมชาติ อย่างไรก็ตามในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะคงอยู่ในช่วงเวลาเพียงไมโครวินาที ฉะนั้นอิเล็กตรอนอิสระที่พอเหมาะจากธรรมชาติอาจจะไม่เพียงพอที่จะเริ่มต้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊ปที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอ เบรคดาวน์อาจจะไม่เกิดขึ้นก็ได้ถ้าหากไม่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ปริมาณแก๊ปกระจายเป็นสถิติ ฉะนั้นเวลานับตั้งแต่แรงดันอิมพัลส์เพิ่มสูงเท่าแรงดันสถานะคงตัว คือ V_s ดังรูปที่ 2.8 จนกระทั่งพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นจึงเป็นสถิติด้วย เรียกว่า “เวลาล่าช้าสถิติ t_s (Statistic Time Lag)” เมื่อพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นแล้วต้องใช้เวลาในการไอออนในเซชันเพื่อสร้างอะวาลานซ์ตามขบวนการกลไกเบรคดาวน์ เพื่อให้ได้จำนวนอิเล็กตรอนตามเงื่อนไข เรียกช่วงเวลานี้ว่า “เวลาล่าช้าก่อตัว t_f (Formative Time Lag)” จึงสรุปได้ว่าเวลาล่าช้าของการเกิดเบรคดาวน์ประกอบด้วย

$$t_l = t_s + t_f \quad (2.16)$$

แรงดันเบรคดาวน์อิมพัลส์ V_p จะต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรคดาวน์สถานะอยู่ตัว V_s อัตราส่วนของแรงดัน V_p ต่อแรงดัน V_s นั่นคือ (V_p / V_s) เรียกว่า “อัตราส่วนอิมพัลส์ (Impulse Ratio)” ค่าอัตราส่วนอิมพัลส์ ขึ้นอยู่กับเวลาล่าช้าของการเกิดเบรคดาวน์ (t_l) และอัตราการเพิ่มของแรงดันที่ป้อน ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ถ้าหากความชัน (Steepness) หรือ $\frac{dV}{dt}$ ยังมีค่าสูงเวลาช่วงหน้าคลื่นหรือเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดแล้วลดลงก็ยังสั้น ข้อมหมายถึงช่วงเวลาที่สนามไฟฟ้าคงอยู่นั้นยิ่งสั้นตามไปด้วย โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นก็ยิ่งน้อยลงไปและเวลาที่ใช้ก่อตัวอะวาลานซ์ก็อาจจะไม่พอ เพื่อให้มีโอกาสเกิดเบรคดาวน์สูงขึ้นจำเป็นต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นคือต้องป้อนแรงดันให้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

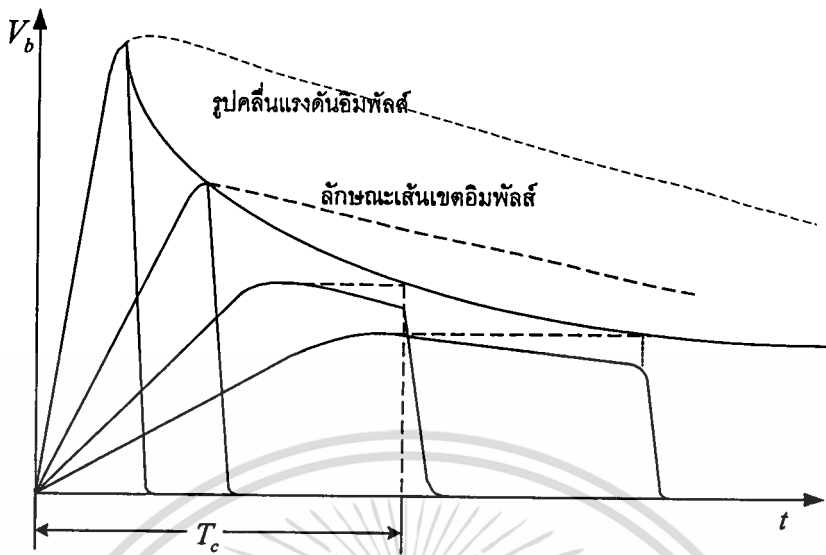


รูปที่ 2.8 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรคควาน์ภายใต้แรงดันอิมพัลส์

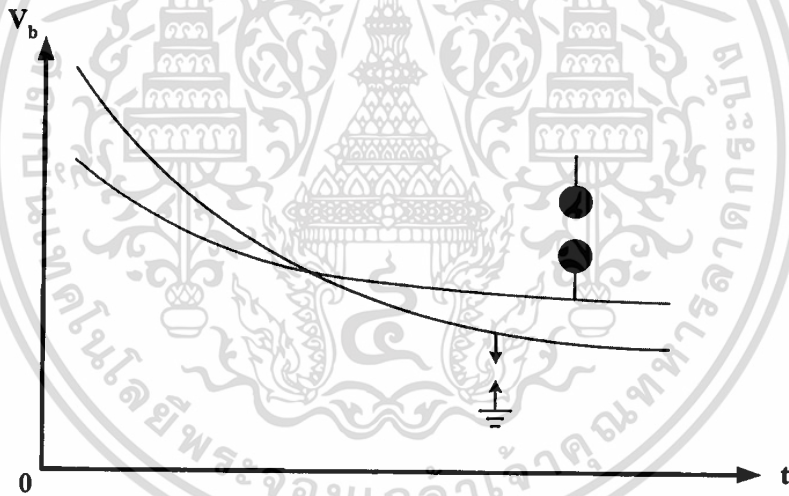
2.7 ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา (Voltage – Time Curve)

ผลของช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันมีผลอย่างมากต่อแรงดันเบรคควาน์ของช่องแคบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ การสร้างอิเล็กตรอนอิสระเพื่ออะวาลานซ์ให้ได้ค่าวิกฤต จะต้องใช้เวลา (เวลาก่อนตัวอะวาลานซ์ t_r) ถ้าช่วงเวลาแรงดันคงตัวอยู่น้อย จำเป็นต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น เพื่อให้สตริมเมอร์เกิดขึ้นได้ตามเงื่อนไขในเวลาอันรวดเร็ว นั่นคือค่าแรงดันเบรคควาน์จะสูงขึ้นถ้าหากช่วงเวลาคงตัวของแรงดันสั้นลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนจะดีขึ้นถ้าแรงดันมีเวลาดั้งลง ในกรณีแรงดันอิมพัลส์ ความคงทนของไดอิเล็กทริกอาจแสดงได้ด้วย ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอิมพัลส์เบรคควาน์กับเวลาเบรคควาน์ หรือเวลากลิ่นตัด (Chopped Time) ได้จากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชัน (Steepness) ต่างๆ กัน แล้ววัดค่าแรงดันเบรคควาน์ (V_b) ถ้ากลืนตัดที่ช่วงห่างกลืน ขนาดแรงดันค่ายอดสูงสุด คือ ค่าแรงดันเบรคควาน์ที่ฉนวนสามารถทนได้ แต่ถ้าเป็นกรณีกลืนตัดช่วงหน้ากลืนค่าแรงดันเบรคควาน์สูงสุด ก็คือ แรงดัน ณ จุดที่เกิดเบรคควาน์ ทุกค่าแรงดันเบรคควาน์จะได้ค่าเวลากลิ่นตัด (T_c) เมื่อนำค่า V_b และ T_c มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ จะได้ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์ดังรูปที่ 2.9

ในกรณีอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์ (v-t curve) จะลดลงในช่วงเวลาที่ t ค่าน้อยๆ (น้อยกว่า $1 \mu s$) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นลักษณะเส้นเกือบจะเป็นเส้นระดับ แต่ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์จะลดลงต่อเนื่อง เมื่อช่วงเวลาแรงดันเพิ่มขึ้น อัตราการลดลงจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปทรงอิเล็กโตรด (Electrodes Configuration) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบเส้น v-t curve ของแกปทรงกลมกับแกปปลายแหลม

2.8 การป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ (Surge Protection)

แรงดันเกินเสิร์จที่เกิดจากฟ้าผ่า (Lightning Surge) และจากการทำงานของสวิตช์ตัดตอน (Switching Surge) เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้จำนวนอุปกรณ์หรือระบบเสียหายได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีมาตรการป้องกัน ฟ้าผ่าถือว่าเป็นต้นกำเนิดเสิร์จที่มาจากภายนอกระบบ การป้องกันฟ้าผ่าขั้นต้นก็คือ กันเสิร์จมิให้เข้ามาในระบบ หรือขจัดให้หายไปก่อน ก่อนที่จะเข้ามาถึงสถานีหรืออุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน และขั้นสองเมื่อเข้ามาแล้วก็ใช้วิธีลดผลกระทบ หรือกำจัดขนาดแรงดันเกินให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่ออุปกรณ์และระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 การป้องกันฟ้าผ่าลงบนสายส่งด้วยสายดิน (Overhead Ground Wire)

การป้องกันฟ้าผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้าแรงสูงโดยตรงนั้น โดยทั่วไปนิยมใช้สายดินซึ่งในอากาศเหนือสายส่ง ตามแนวความยาวของสายส่ง สายดินจะต่อลงดินอย่างดี เช่น ต่อเข้ากับ โครงเสา โลหะหรือมีสายนำลงดิน ซึ่งสายดินนี้จะทำหน้าที่เป็นสายล่อฟ้าของระบบนั่นเอง ด้วยการติดตั้งสายดินให้เป็นแนวเส้นที่จะรับหรือล่อให้ฟ้าผ่าได้ง่ายกว่าที่จะผ่าลงที่สายเฟส เพื่อทำหน้าที่เป็นชิลด์ (Shield) ให้กับสายส่ง นอกจากนี้ยังช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำที่สายเฟสอีกด้วย ในทางปฏิบัติ การป้องกันด้วยสายดินให้ได้ผลจะต้องให้มุมป้องกันมีมุมแคบๆ เช่น ใช้มุม 30 องศาจากแนวตั้ง สำหรับเสาไฟฟ้าสูงไม่เกิน 30 เมตร แต่ในกรณีที่โครงเสาส่งกว้างหรือมีการชิงสายส่งแบบเรียงกันในแนวระดับ อาจต้องใช้สายดินสองเส้นเป็นสายล่อฟ้าแทน

ตามหลักธรรมชาติของการเกิดฟ้าผ่า ถ้าฟ้าผ่าจะผ่าลงบริเวณจุดที่อยู่ใกล้ที่สุดเมื่อหัวนำร่อง (Leader) นั้นลงมาถึงจุดสุดท้าย แม้ว่าสายดินจะอยู่สูงกว่าสายเฟสแต่ฟ้าผ่าก็อาจจะผ่าลงบนสายเฟสได้เช่นกัน ซึ่งถือว่าเป็นความล้มเหลวของการป้องกันด้วยสายดิน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะฟ้าผ่า (Striking Distance) กล่าวคือ ถ้าหัวนำร่องของสายฟ้าผ่าลงมาอยู่ในระยะฟ้าผ่า (S) จากวัตถุที่ต่อลงดินนั้นมากกว่าที่จะผ่าลงที่อื่นซึ่งอยู่ห่างไกลกว่า ระยะฟ้าผ่าจะขึ้นอยู่กับปริมาณของประจุในหัวนำร่องขั้นสุดท้าย ซึ่งคิดอยู่ในเทอมของกระแสและอาจประมาณระยะฟ้าผ่าได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$S = 2\hat{i} + 30(1 - e^{-0.5\hat{i}}) \quad (2.17)$$

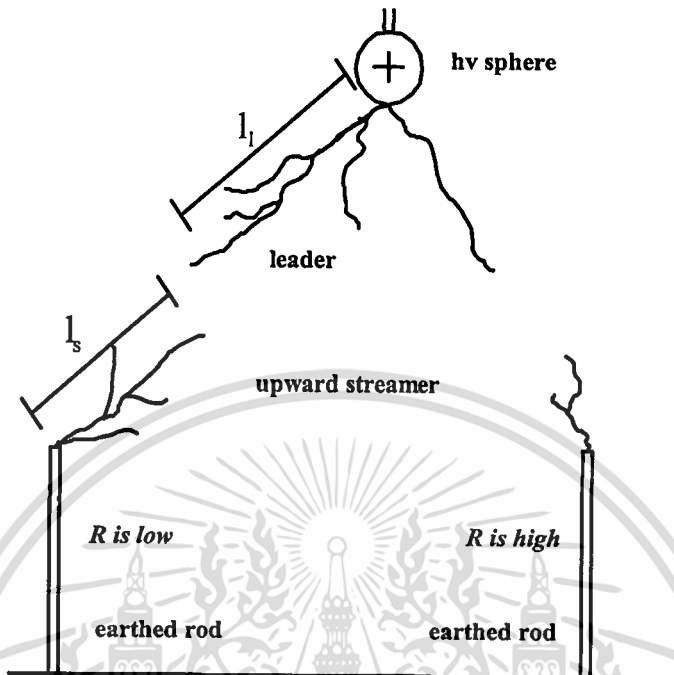
เมื่อ S คือ ระยะฟ้าผ่า (m)
 \hat{i} คือ กระแสฟ้าผ่า (kA)

ศักย์ไฟฟ้าจากผลของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นบนสายดินหรือที่หัวเสาส่ง เนื่องจากถ้ากระแสฟ้าผ่าที่มีขนาดค่ายอด (\hat{i}) และมีความชันหน้าคลื่น (di/dt) ไหลลงสู่ดินที่โคนเสา ซึ่งมีความต้านทานดิน (R_e) ผ่านความเหนี่ยวนำ (L) ของสายนำลงดินหรือโครงเสาส่งเอง โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta U = IR_e + L \frac{di}{dt} \quad (2.18)$$

ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะต้องไม่สูงเกินไป เพราะจะทำให้เกิดปรากฏการณ์วาบไฟตามผิวย้อนกลับบนพวงลูกถ้วยฉนวน (Back Flashover) ซึ่งจะสร้างความเสียหายเช่นเดียวกับฟ้าผ่าลงบนสายเฟสโดยตรง การป้องกันปัญหานี้สามารถทำได้ด้วยการลดความเหนี่ยวนำของสายนำลงดิน และปรับปรุงระบบต่อลงดินที่ฐานของเสาส่งให้มีความต้านทานของรากสายดินต่ำสุดเท่าที่จะสามารถทำได้ การทำให้ความต้านทานรากสายดินมีค่าต่ำจะช่วยให้ระบบสายดินสามารถสร้างค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สตรีมเมอร์ (Streamer) [21] ออกไปได้เป็นระยะทางยาวมากขึ้น เป็นผลให้ความสามารถในการล่อหรือชักนำให้หัวนำร่องประจุไฟฟ้าวิ่งเข้าหาทางสายดินได้ง่ายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เสาล่อฟ้าที่มีความต้านทานต่ำจะสร้างสตรีมเมอร์ออกไปได้ยาวกว่า

อย่างไรก็ตามการป้องกันด้วยสายดินบางครั้งก็อาจล้มเหลวได้ นอกจากนี้แรงดันเกินที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดตอนในระบบยังสามารถทำลายการฉนวนของอุปกรณ์อื่นได้ด้วย ซึ่งสายดินดังกล่าวไม่อาจป้องกันแรงดันเกินจากกรณีนี้ได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินประเภทนี้ขึ้น ได้แก่ ตัวสะกดเสิร์จ (Surge Suppressors), ตัวเบี่ยงเสิร์จ (Surge Diverters) และกับดักเสิร์จ (Surge Arrester) โดยนำอุปกรณ์ป้องกันเหล่านี้ติดตั้งขนานเข้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันในระยะใกล้ที่สุด เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีสาเหตุอื่นใดที่จะทำให้เกิดแรงดันเกินตกคร่อมอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันเกินค่าที่กำหนดไว้ เมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้นอุปกรณ์ป้องกันจะทำหน้าที่สะกดหรือเบี่ยงแรงดันเกินนั้นลงสู่ดินแทน

ลักษณะสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่ดีจะต้องไม่มีกระแสรั่วไหลที่ขนาดแรงดันใช้งานตามปกติ ตัวอุปกรณ์ป้องกันเองจะต้องเริ่มทำงานโดยยอมให้มีกระแสไหลผ่านตัวมันลงสู่ดินเมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้น และทำให้ระดับแรงดันเกินลดต่ำลงมาอยู่ที่ระดับแรงดันที่ปลอดภัย เมื่อแรงดันเกินผ่านไปหมดแล้วตัวอุปกรณ์จะต้องสามารถหยุดนำกระแส เพื่อมิให้เกิดกระแสไหลตาม (Follow Current) ที่มาจากแรงดันปกติของระบบ ไม่เช่นนั้นตัวกับดักเสิร์จเองอาจทนต่อสถานะการเกิดความร้อนสูงไม่ได้และเกิดระเบิดขึ้นในที่สุด

2.8.2 การป้องกันแรงดันเกินด้วยร็อดแกป (Rod Gap)

ร็อดแกปเป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก โดยใช้วิธีตั้งระยะแกปให้เกิดเบรคความถี่ระดับแรงดันต่ำกว่าแรงดันคงทนอยู่ได้ของอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันไม่เกิน 30% แต่มีข้อเสีย คือ ร็อดแกปไม่สามารถดับอาร์กตาม (Follow Arc) ที่ความถี่พลังงาน (Power Frequency) ได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้าตามมา ทำให้เซอร์กิตเบรคเกอร์ดับทางลัดวงจรและเป็นเหตุให้การจ่ายกระแสไฟฟ้าเกิดหยุดชะงักหรือเกิดไฟฟ้าดับนั่นเอง วิธีแก้ปัญหานี้ที่ง่ายและประหยัดก็คือการใช้แกปแบบสามารถดับอาร์กเองได้ เช่น Arcing Horn หรือ Arcing Ring เป็นต้น โดยติดตั้งไว้ที่ส่วนบนและส่วนล่างของพวงลูกถ้วยฉนวนแขวน เมื่อเกิดเบรคความถี่ระหว่างแหวนอาร์ก ถ้าอาร์กที่ร้อนจะลอยตัวขึ้นทำให้ถ้าอาร์กยืดยาวออกและดับได้ในที่สุด

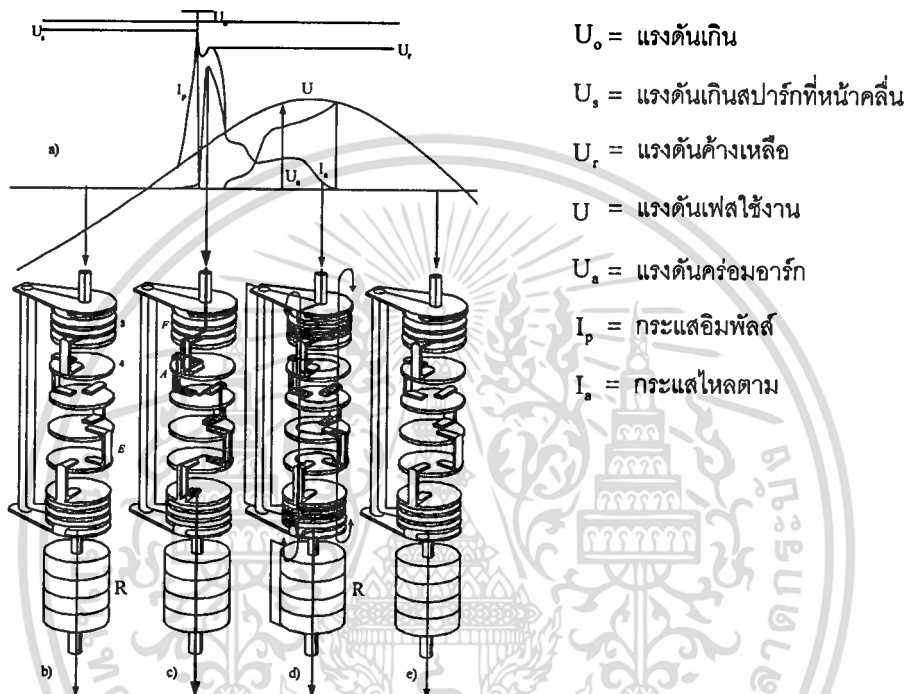
อย่างไรก็ตามยังมีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแบบอื่นที่มีคุณสมบัติในการป้องกันแรงดันเกินได้ดีกว่าร็อดแกป ซึ่งสามารถจำกัดแรงดันเกินได้โดยไม่เกิดอาร์ก และไม่เป็สาเหตุของความผิดปกติอื่นตามมา อุปกรณ์นั้น ก็คือ กัปกักเสิร์จ (Surge Arrester) นั่นเอง

2.8.3 การป้องกันแรงดันเกินด้วยกัปกักเสิร์จ

กัปกักเสิร์จ (Surge Arrester) หรือกัปกักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินได้ทั้งสวิตช์เสิร์จและเสิร์จจากฟ้าผ่า แต่มีราคาแพงกว่าร็อดแกปมาก มักใช้สำหรับการป้องกันอุปกรณ์ที่สำคัญและมีราคาแพง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า, เครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดใหญ่, รีแอกเตอร์ หรือ อุปกรณ์อื่นในสถานีไฟฟ้าย่อย เป็นต้น กัปกักเสิร์จจะต่อคร่อมขนานกับอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันแรงดันเกินโดยต่อระหว่างเฟสกับดิน ตัวกัปกักเสิร์จจะประกอบด้วยความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Resistor) ซึ่งโดยทั่วไปจะทำด้วยโลหะออกไซด์จำพวก SiC และ ZnO มีลักษณะเป็นแผ่นกลมทรงกระบอก ประกอบบรรจุในกระบอกฉนวนพอร์ซเลน ถ้าเป็นชนิด SiC จะมีสปาร์กแกป (Spark Gap) ต่ออนุกรมกับความต้านทานประกอบอยู่ด้วย สปาร์กแกปต่ออนุกรมจะเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันพิคคของตัวกัปกักเสิร์จ และทำหน้าที่เป็นฉนวนกันมิให้มีกระแสรั่วไหลผ่านลงดินขณะติดตั้งใช้งานในระบบที่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามปกติ อันเป็นเงื่อนไขคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จทั่วไป เมื่อได้รับแรงดันเกินเสิร์จขึ้นในระบบสปาร์กแกปจะทนต่อแรงดันเกินไม่ได้และเกิดเบรคความถี่ผ่านช่องแกปในที่สุดแรงดันที่กัปกักเสิร์จเกิดเบรคความถี่นี้ เรียกว่า “แรงดันสปาร์กผ่าน (Sparkover Voltage: U_s)” ดังรูปที่ 2.12 และแรงดันส่วนที่เหลือตกคร่อมความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น เราเรียกว่า “แรงดันเหลือค้าง (Residual Voltage)” ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนอยู่ได้ (BIL) ของฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบนั้นๆ เมื่อเกิดเบรคความถี่ขึ้นที่สปาร์กแกปก็เท่ากับเกิดลัดวงจรผ่านความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น กระแสเสิร์จจะไหลผ่านลงดินหายไปในช่วงระยะเวลาอันสั้น และกระแสความถี่พลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งาน (50 Hz) จะไหลตามต่อไป เรียกว่า “กระแสไหลตาม (Follow Current)” โดยที่กระแสไหลตามนี้จะมีค่าน้อยกว่ากระแสเสิร์จมาก เมื่อแรงดันเกินมีขนาดเท่ากับแรงดันใช้งานปกติ ความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับสปาร์กแก๊ปก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้กระแสไหลตามลดน้อยลงและสปาร์กแก๊ปสามารถตัดกระแสไหลตามเมื่อผ่านศูนย์ได้ เมื่อกระแสเสิร์จถูกจำกัดออกไปกับดักเสิร์จก็จะกลับคืนสู่สภาพปกติและใช้งานได้ตามเดิม แต่ถ้าเกิดแรงดันเกินพื้นตัวพร้อมกับดักเสิร์จเกินค่าพิกัดมาก อาจทำให้เกิดสถานะสปาร์กซ้ำขึ้นได้อีก ซึ่งเป็นอันตรายต่อตัวกับดักเสิร์จเอง



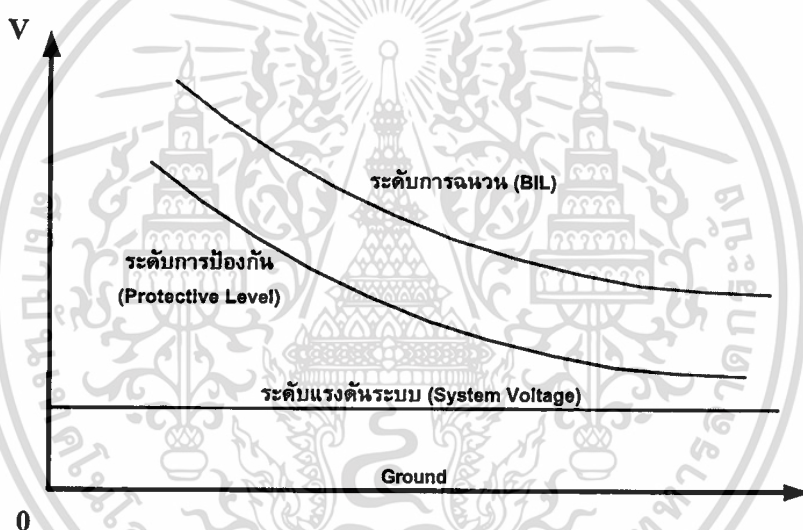
รูปที่ 2.12 ลักษณะการทำงานของกับดักเสิร์จ

2.9 การประสานสัมพันธ์การฉนวน (Insulation Co-ordination)

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การฉนวนมีโอกาสได้รับแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้นจากต้นกำเนิดภายนอกหรือจากสาเหตุภายในระบบเอง ซึ่งแรงดันเกินจากภายนอกที่เกิดจากฟ้าผ่าตามธรรมชาติ นั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของระบบ แต่แรงดันเกินที่เกิดจากเหตุภายในระบบเองหรือแรงดันเกินสวิตช์นั้นจะมีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นตามระดับแรงดันของระบบ ฉะนั้นการออกแบบฉนวนของระบบที่ดีจะต้องอาศัยหลักการประสานสัมพันธ์กันระหว่างแรงดันระบบและระดับแรงดันป้องกัน (Protective Level) ซึ่งเรียกว่า “การประสานการสัมพันธ์การฉนวน” [18] เนื่องจากแรงดันเกินมีขนาดสูงมากเมื่อเทียบกับแรงดันระบบ ฉะนั้นจะไม่เป็นการประหยัดถ้าหากจะออกแบบให้การฉนวนของอุปกรณ์หรือระบบทนแรงดันเกินได้ทุกระดับ แต่ควรจะออกแบบให้การฉนวนสามารถทนแรงดันเกินได้ระดับหนึ่ง ส่วนแรงดันเกินที่สูงกว่านั้นจะอาศัยตัวป้องกันทำหน้าที่ช่วยลดทอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดแรงดันเกินให้ต่ำพอที่จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่การฉนวนของระบบ การประสานสัมพันธ์การฉนวนเป็นวิธีการเลือกระดับการฉนวน (Insulation Level) ของอุปกรณ์หรือระบบให้เหมาะสมสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ทำหน้าที่ลดทอนหรือสกัดกั้นแรงดันเกินให้เหลือต่ำพอที่ปลอดภัยแก่การฉนวน ตัวอย่างเช่น ในระบบไฟฟ้าหรือสถานีจ่ายไฟฟ้า การฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องทนต่อระดับแรงดันได้สูงกว่าแรงดันเกินคงค้างที่เหลือจากการผ่านกับดักเสิร์จ เป็นต้น ในทางปฏิบัติจะออกแบบให้มีช่วงห่างเผื่อไว้ (Margin) ระหว่างระดับแรงดันสูงสุดของระบบที่จะไม่ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกับระดับแรงดันป้องกัน ซึ่งกำหนดโดยอุปกรณ์ป้องกันแรงดันและระดับแรงดันที่ฉนวนสามารถทนได้ต่ำสุด ณ ตำแหน่งที่การฉนวนมีจุดอ่อนที่สุด ส่วนระดับการฉนวนนั้นจะกำหนดโดยค่าแรงดันทดสอบ BIL หรือ SIL ซึ่งจะสัมพันธ์กันกับระดับแรงดันของระบบนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การประสานสัมพันธ์การฉนวนของอุปกรณ์และระบบ

การประสานสัมพันธ์การฉนวนมีวัตถุประสงค์เพื่อให้การฉนวนของอุปกรณ์และระบบมีความสัมพันธ์กับอุปกรณ์ได้อย่างเหมาะสมและประหยัด โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งใช้งานในระบบ และไม่เป็นเหตุทำให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเกิดหยุดชะงัก เมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้น

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้ประกอบในการทดลองวิจัย ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยแบ่งการออกแบบเป็น 3 ส่วน คือ

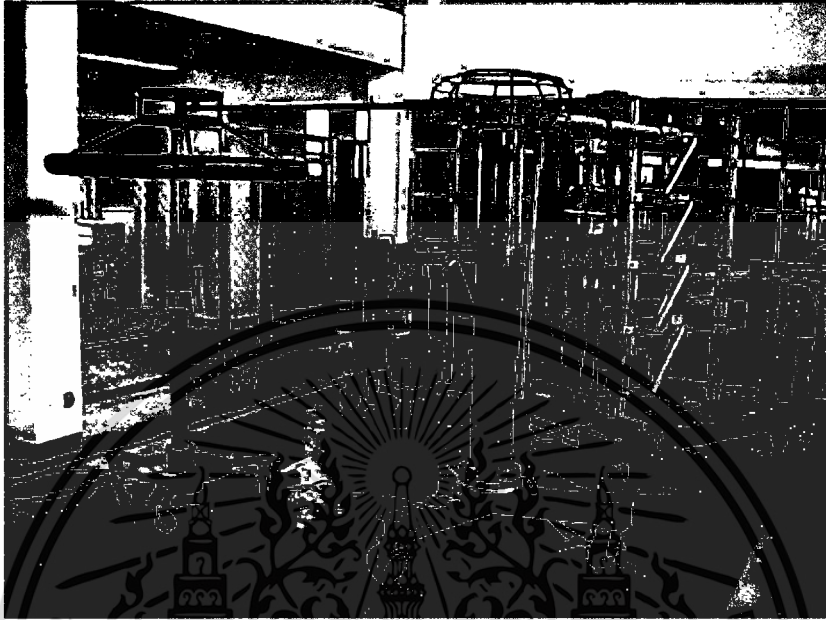
- 1) การออกแบบเพื่อประยุกต์เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ ให้สามารถจ่ายแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI ได้
- 2) การออกแบบชุดแท่งอิเล็กโตรดพร้อมฐานทดสอบ
- 3) การออกแบบชุดอุปกรณ์ทดสอบกับดักเสิร์จ โดยทั้ง 3 ส่วน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบสร้างแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI

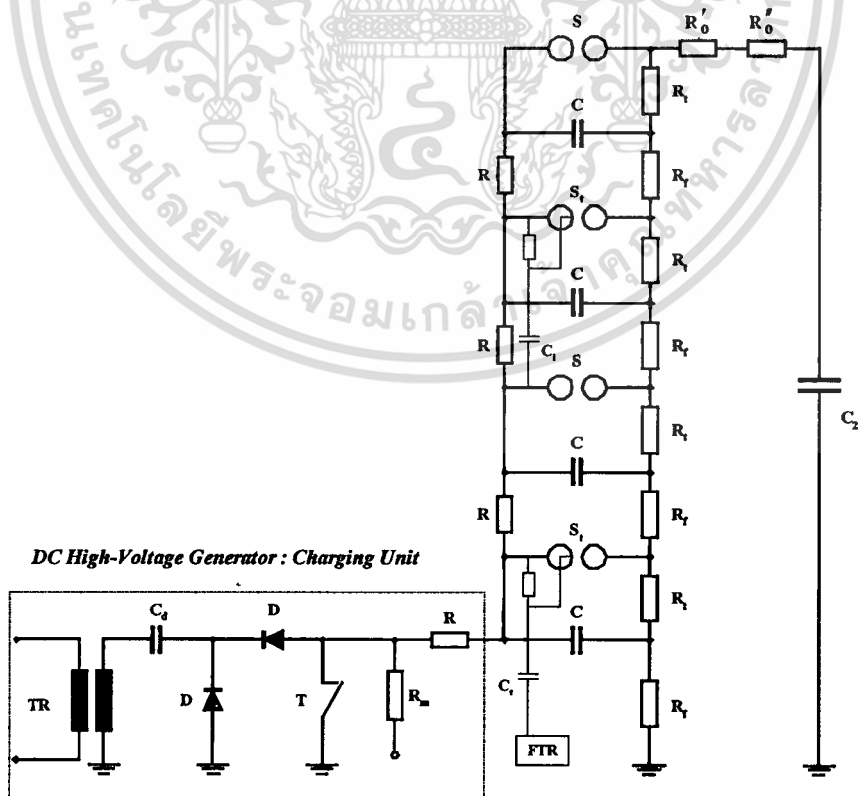
งานวิจัยนี้ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นหรือแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI เพื่อจำลองรูปคลื่นแรงดันเกินทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นจริงในระบบ ซึ่งในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงยังไม่มีแหล่งจ่ายแรงดันดังกล่าว ในที่นี้จึงต้องออกแบบสร้างขึ้นใหม่โดยอาศัยเทคนิคการดัดแปลงองค์ประกอบบางส่วนของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน ($1.2/50 \mu\text{s}$) ขนาดพิกัด 400 kV, 14 kJ / 4 stages แบบ Marx's Type [22-23] ที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงให้สามารถจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI สำหรับใช้ในการทดลองได้ ลักษณะองค์ประกอบและไดอะแกรมวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานที่ประยุกต์ใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ การประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน เพื่อให้สามารถจ่ายแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแบบ STLI มีหลายวิธี [16-17, 24-26] แต่ในที่นี้เลือกใช้เทคนิควิธีการดัดแปลงองค์ประกอบวงจรของเครื่องด้วยการปรับเปลี่ยนเฉพาะองค์ประกอบความต้านทานหน้าเวลาทางคลื่น (Tail Resistance: R_t) ดังรูปที่ 3.2 โดยองค์ประกอบส่วนอื่นของตัวเครื่องยังคงเหมือนเดิม ทั้งนี้เพื่อความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างองค์ประกอบความต้านทาน รวมทั้งความมีเสถียรภาพของระบบโดยรวมด้วย ซึ่งเทคนิควิธีนี้จะแตกต่างไปจากเทคนิควิธีเดิมของ A.Carrus [24-26] การหาค่าความต้านทานหน้าช่วงเวลาทางคลื่นที่เหมาะสม ใช้วิธีการคำนวณแบบประมาณจากฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม (Double Exponential Function) [21,29] เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้แทนคุณลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในทางปฏิบัติได้ ที่เป็นเช่นนี้เพื่อต้องการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในเบื้องต้นก่อนที่จะนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์โดยละเอียดอีกครั้งด้วยโปรแกรม PSPICE เป็นการตรวจสอบความถูกต้องในขั้นสุดท้ายให้แน่ใจว่าได้ค่าองค์ประกอบความต้านทานหน้าเวลาทางคลื่นที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมที่สุด ก่อนนำไปออกแบบและประกอบสร้างเป็นต้นความด้านทานจริง เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นและช่วยลดโอกาสที่จะเกิดความสูญเสียในการสร้างชิ้นงานจริง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อตัวเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการที่มีราคาแพง



รูปที่ 3.1 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงอิมพัลส์ชื่อ PASSONI&VILLA พิกัด 400 kV 4-Stages



รูปที่ 3.2 โค้ดแอมวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV, 14 kJ, 4-stage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 สัญลักษณ์ต่างๆ หมายถึง

DC High-Voltage Generator เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแรงดันสูงทำหน้าที่อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (Main Capacitor: C) ในแต่ละชั้น (Stage)

- R คือ ความต้านทานหน่วงการอัดประจุ (Charging Resistor)
- R_f คือ ความต้านทานปรับเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์ (Front Resistor)
- R_t คือ ความต้านทานปรับเวลาหลังคลื่นอิมพัลส์ (Tail Resistor)
- R_o คือ ความต้านทานด้านออก (Output Resistor) เพื่อหน่วงการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
- S คือ ชุดสปาร์กแกป (Sphere Spark Gap) ทำหน้าที่เป็นไกสวิตช์แรงดันสูง
- S_t คือ ชุดสปาร์กแกปที่มีตัวกระตุ้นสัญญาณ Trigger ติดตั้งอยู่ด้วย
- C_2 คือ ตัวเก็บประจุโพลหรือตัวเก็บประจูกัปปลิง (Coupling Capacitor)
- FTR คือ ตัวสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อกระตุ้นชุดสปาร์กแกปให้เกิดการสปาร์ก
- C_t คือ Trigger Capacitor
- C_i คือ Inter-Stage Trigger Capacitor

ในงานวิจัยนี้ต้องการออกแบบสร้างแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI ที่มีรูปคลื่นเป็นแบบ 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ตามลำดับ การคำนวณหาพารามิเตอร์ทางเวลา (T_1 และ T_2) ใช้วิธีการคำนวณแบบประมาณ (Approximate Solution) โดยประมาณว่า $C \gg C_2$ และมีสมการแรงดันอิมพัลส์แบบ Double Exponential เป็นดังนี้

$$v(t) = \frac{V_0}{R_f C_2} \frac{1}{(\alpha_1 - \alpha_2)} \left[e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t} \right] \quad (3.1)$$

จากวงจรตามรูปที่ 3.2 หากเราขยับลงเหลือเป็นวงจรแบบขั้นเดียว (Single Stage) สามารถเทียบเคียงได้กับวงจรพื้นฐานการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบขั้นเดียวดังรูปที่ 2.4 (ก) ในบทที่ 2 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อคิดรวม เป็นดังนี้

- Effective Front Resistance: R_f

$$\therefore R_f = 4R'_f + R_o = (4 \times 12) + 100 = 148 \ \Omega$$

- Effective Tail Resistance: R_t

$$\therefore R_t = 4R'_t = 4 \times 90 = 360 \ \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Main Capacitor: C_1

$$\therefore C_1 = C'/4 = 0.7 \mu\text{F}/4 = 0.175 \mu\text{F}$$

- Load Capacitor: C_2

$$\therefore C_2 = 2000 \text{ pF}$$

ในกรณีนี้ต้องทำการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบวงจรเดิม เพื่อหาค่าคงตัวของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ (α_1 และ α_2) จากพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เดิม นำไปสู่การวิเคราะห์หาสมการเพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบหาค่าองค์ประกอบความต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่น (R_f) ที่เหมาะสม สำหรับการสร้างแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI ตามที่ต้องการต่อไป ขั้นตอนการวิเคราะห์เป็นดังนี้

$$\therefore \alpha_1 = \frac{1}{R_f C_1} = \frac{1}{360 \times 0.175 \times 10^{-6}} = 0.0158 \times 10^6 \text{ s}$$

$$\therefore \alpha_2 = \frac{1}{R_f C_2} = \frac{1}{148 \times 2 \times 10^{-9}} = 3.378 \times 10^6 \text{ s}$$

ค่าเวลาที่ทำให้ขนาดแรงดันอิมพัลส์มีค่าสูงสุดหรือคายอด (Peak) สามารถหาได้จากความชัน $dv(t) = 0$ โดยแทนค่า $v(t)$ จากสมการที่ 3.1 ซึ่งจะได้ว่า

$$\therefore t_{\max} = \frac{\ln\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (3.2)$$

เมื่อแทนค่า α_1 และ α_2 ลงในสมการที่ 3.2 จะได้ค่าเวลา t_{\max} เป็นดังนี้

$$t_{\max} = \frac{\ln\left(\frac{3.378 \times 10^6}{0.0158 \times 10^6}\right)}{(3.378 - 0.0158) \times 10^6}$$

$$\therefore t_{\max} = \frac{5.365}{3.362 \times 10^6} = 1.596 \times 10^{-6} \text{ s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาขนาดแรงดันอิมพัลส์ค่ายอดสูงสุด (V_{\max}) ด้วยการแทนค่าเวลา (t) ในสมการที่ 3.1 มีค่าเท่ากับ t_{\max} ที่ได้ โดยประมาณว่าเทอม $\frac{1}{(R_f C_2) \times (\alpha_1 - \alpha_2)}$ มีค่าประมาณ 1 และแรงดันอัดประจุต่อขั้นสูงสุดเป็น 100 kV นั่นคือ

$$v(t_{\max}) = 400 \left(e^{-[(0.0158 \times 10^6) \times (1.596 \times 10^{-6})]} - e^{-[(3.378 \times 10^6) \times (1.596 \times 10^{-6})]} \right)$$

$$v(t_{\max}) = 400 \left(e^{-0.0252} - e^{-5.391} \right)$$

$$\therefore V_{\max} = 400 \times (0.9705 - 0.00456) = 386.376 \text{ kV}$$

ดังนั้นสามารถหาค่าช่วงเวลาทางคลื่น (T_2) ได้ เมื่อแรงดันอิมพัลส์ผ่านค่ายอดสูงสุดแล้วมีขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งทางด้านทางคลื่น โดยพิจารณาเทอม $e^{-\alpha_1 t_2}$ ประมาณค่าเป็นศูนย์ และเวลา $t_2 = T_2$ ซึ่งจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{V_{\max}}{2} &= V_0 e^{-\alpha_1 t_2} \\ \text{หรือ} \quad e^{-\alpha_1 T_2} &= \frac{V_{\max}}{2V_0} \\ \text{นั่นคือ} \quad \alpha_1 &= \frac{\ln 0.4829}{-T_2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

การคำนวณนี้เป็นเพียงการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์โดยประมาณ ดังนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ความต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่น (R_f) ที่ต้องการต่อไป

3.1.1 การคำนวณหาความต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่น (R_f) กรณีรูปคลื่น 1.2/4 μs

เราสามารถประมาณค่าความต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่น (R_f) ได้ ด้วยการแทนค่า T_2 เท่ากับ 4 μs และคำนวณหาค่า α_1 ใหม่ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.3) นั่นคือ

$$\therefore \alpha_1 = \frac{\ln 0.4829}{-T_2} = \frac{\ln 0.4829}{-4 \times 10^{-6}} = 0.182 \times 10^6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นแทนค่า α_1 เพื่อหาค่าความต้านทานหน่วยเวลาทางคลื่น (R_t) ได้ดังนี้

$$R_t = \frac{1}{\alpha_1 C_1} = \frac{1}{(0.182 \times 10^6) \times (0.175 \times 10^{-6})}$$

$$\therefore R_t = 31.4 \ \Omega$$

ดังนั้น จะได้ค่าความต้านทานหน่วยเวลาทางคลื่นต่อชั้น (R'_t) มีค่าโดยประมาณเป็น

$$\therefore R'_t = \frac{31.4}{4} = 7.85 \ \Omega$$

3.1.2 การคำนวณหาความต้านทานหน่วยเวลาทางคลื่น (R_t) กรณีสรูปคลื่น 1.2/8 μ s

ทำนองเดียวกันกับกรณีสรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/4 μ s เราสามารถประมาณค่า R_t กรณีสรูปคลื่น 1.2/8 μ s ได้ด้วยการแทนค่า T_2 เท่ากับ 8 μ s และคำนวณหาค่า α_1 ใหม่ ดังนี้

$$\therefore \alpha_1 = \frac{\ln 0.4829}{-T_2} = \frac{\ln 0.4829}{-8 \times 10^{-6}} = 0.0987 \times 10^6$$

แทนค่า α_1 เพื่อหาค่าความต้านทานหน่วยเวลาทางคลื่น (R_t) ได้ดังนี้

$$R_t = \frac{1}{\alpha_1 C_1} = \frac{1}{(0.0987 \times 10^6) \times (0.175 \times 10^{-6})}$$

$$\therefore R_t = 57.89 \ \Omega$$

ดังนั้น จะได้ค่าความต้านทานหน่วยเวลาทางคลื่นต่อชั้น (R'_t) มีค่าโดยประมาณเป็น

$$\therefore R'_t = \frac{57.89}{4} = 14.47 \ \Omega$$

3.1.3 การคำนวณหาความต้านทานหน่วยเวลาทางคลื่น (R_t) กรณีสรูปคลื่น 1.2/10 μ s

เช่นเดียวกัน เราสามารถประมาณค่า R_t กรณีสรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/10 μ s ได้ด้วยการแทนค่า T_2 เท่ากับ 10 μ s และคำนวณหาค่า α_1 ใหม่ ดังนี้

$$\therefore \alpha_1 = \frac{\ln 0.4829}{-T_2} = \frac{\ln 0.4829}{-10 \times 10^{-6}} = 0.0727 \times 10^6$$

แทนค่า α_1 เพื่อหาค่าความต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่น (R_t) ดังนี้

$$R_t = \frac{1}{\alpha_1 C_1} = \frac{1}{(0.0727 \times 10^6) \times (0.175 \times 10^{-6})}$$

$$\therefore R_t = 78.6 \ \Omega$$

ดังนั้น จะได้ค่าความต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่นต่อชั้น (R'_t) มีค่าโดยประมาณเป็น

$$\therefore R'_t = \frac{78.6}{4} = 19.65 \ \Omega$$

ค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบความต้านทานหน่วงเวลาน้ำคลื่น (R_f) และทางคลื่น (R_t) ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ทั้งกรณีการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (1.2/50 μ s) และกรณีที่ต้องการปรับเปลี่ยนรูปคลื่นเป็นแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่นชนิดต่างๆ จากผลการคำนวณ สรุปไว้ในตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สรุปค่าการออกแบบความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณเบื้องต้น

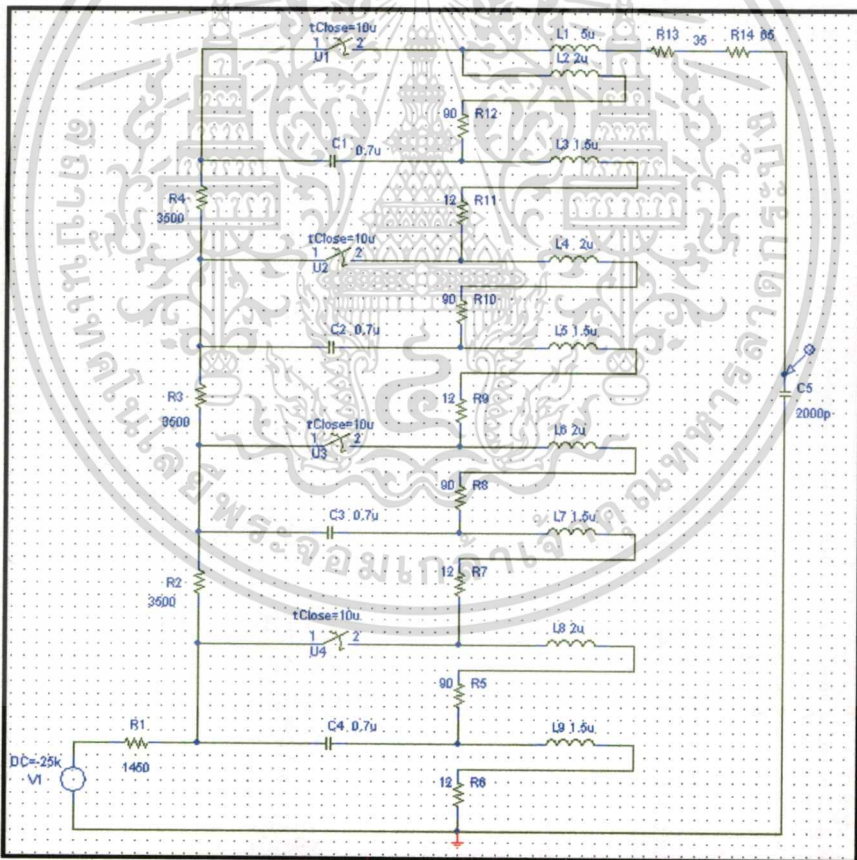
รูปคลื่นอิมพัลส์ T_1/T_2 (μ s)	ค่าองค์ประกอบความต้านทานต่อชั้น		หมายเหตุ
	Front Resistor (Ω)	Tail Resistor (Ω)	
1.2/50	12	90.00	ค่าเดิมของเครื่อง
1.2/4	12	7.85	ค่าจากการคำนวณ
1.2/8	12	14.47	ค่าจากการคำนวณ
1.2/10	12	19.65	ค่าจากการคำนวณ

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้นี้เป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดค่าองค์ประกอบความต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่น (R_t) ซึ่งในทางปฏิบัติจริงอาจคลาดเคลื่อนไปจากนี้ได้ เนื่องจากผลของค่าองค์ประกอบวงจรส่วนอื่นๆ ที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติ เช่น ผลของค่าความต้านทานภายใน (Internal Resistance), ค่าความเหนี่ยวนำแฝง (Stray Inductance) และค่าความเก็บประจุแฝง (Stray Capacitance) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบด้วยโปรแกรม PSPICE

จากที่กล่าวมาแล้ว เพื่อให้แน่ใจได้ว่าค่าพารามิเตอร์องค์ประกอบความต้านทานหน่วยเวลาทางคลื่น (R_f) ที่คำนวณหาได้ เป็นค่าที่ถูกต้องหรือใกล้เคียงความเป็นจริงในทางปฏิบัติ และเนื่องจากองค์ประกอบความต้านทานสำหรับใช้สร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แต่ละแบบ เมื่อออกแบบประกอบสร้างเป็นชิ้นงานจริงจะต้องประกอบสร้างถึง 4 ตัว สำหรับใช้ติดตั้งในวงจรทดแทนองค์ประกอบเดิมทั้ง 4 ชั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำโปรแกรม PSPICE มาประยุกต์ใช้วิเคราะห์ (Simulation) วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ซ้ำอีกครั้ง เพื่อตรวจสอบผลการสร้างรูปคลื่นอิมพัลส์แบบ STLI ก่อนที่จะนำค่าขนาดความต้านทาน R_f ที่ทำได้ ไปออกแบบประกอบสร้างเป็นตัวความต้านทานใช้งานจริง ทั้งนี้เพื่อลดความเสี่ยงต่อความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาจากไดอะแกรมเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ 4 ชั้น ตามรูปที่ 3.2 เราสามารถประยุกต์เป็นวงจรสมมูลในโปรแกรม PSPICE ได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ 4 ชั้น ในโปรแกรม PSPICE

การวิเคราะห์วงจรด้วยโปรแกรม PSPICE จะเป็นการวิเคราะห์แบบละเอียด โดยคำนึงถึงผลของค่าพารามิเตอร์แฝงอื่นๆ ในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์เดิมทั้งหมด เพื่อให้ได้องค์ประกอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่น (R_f) ที่เหมาะสม สำหรับใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่นต่างๆ ตามต้องการ โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ เป็นดังนี้

- Charging capacitor (C') 0.7 μF /Stage
- Charging resistor (R') 3500 Ω /Stage
- Front resistor (R_f) 12 Ω (L=1.5 μH) /Stage
- Tail resistor (R_t) 90 Ω (L=2 μH) /Stage กรณีรูปคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{s}$
- Output resistor (R_o) 100 Ω (L=5 μH) /Stage
- Load capacitor (C_2) 2000 pF

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปวิเคราะห์จำลองในโปรแกรม PSPICE เพื่อตรวจสอบกรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (1.2/50 μs) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.4

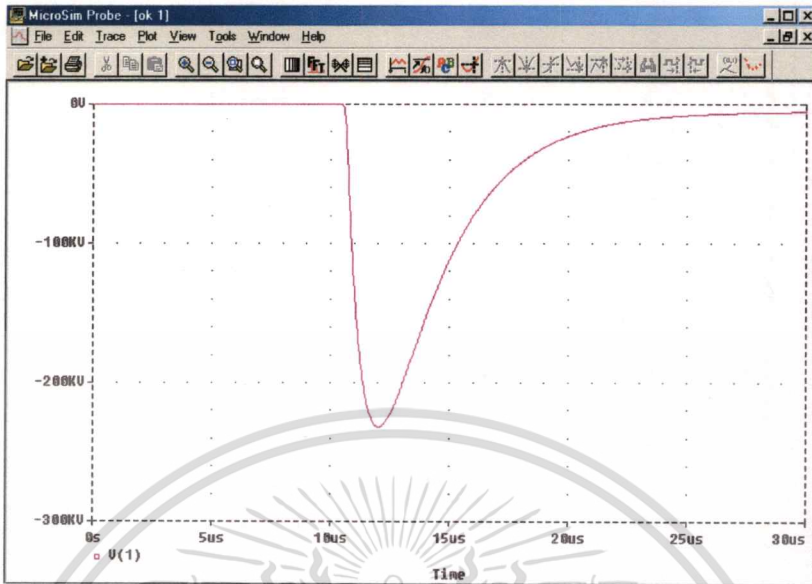


รูปที่ 3.4 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs ขั้วลบ จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE

OUTPUT: -95 kV ; $T_1/T_2 = 0.92 / 45.48 \mu\text{s}$, $\eta = 95\%$

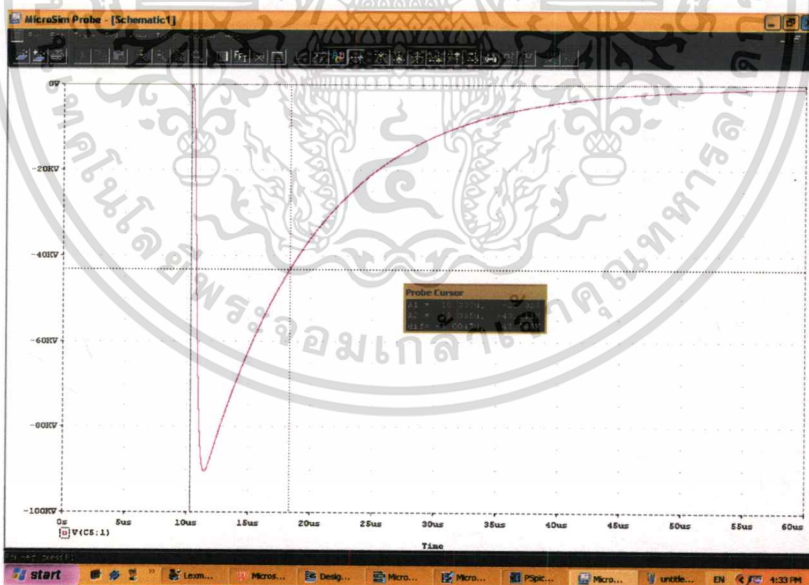
จากรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ทางเวลาของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน [9, 27] กำหนดไว้ ขั้นตอนต่อไปจึงทำการวิเคราะห์จำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแบบ STLI ทั้ง 3 ชนิด คือ รูปคลื่น 1.2/4 μs , 1.2/8 μs และ 1.2/10 μs ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.5 ถึง 3.7 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 รูปคลื่นแรงดันอินพุตส์ STLI แบบ 1.2/4 μ s ขั้วลบ จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE

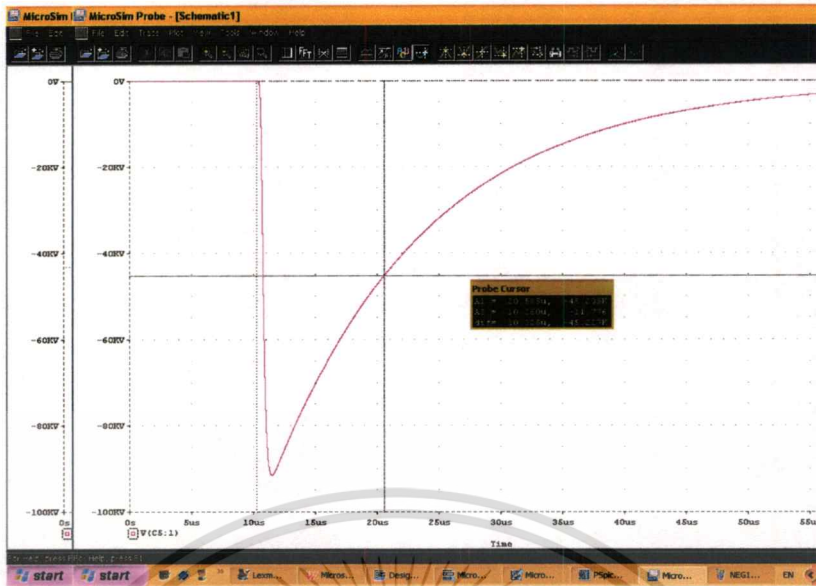
OUTPUT: -232 kV ; $T_1/T_2 = 1.1 / 4.2 \mu$ s, $\eta = 85\%$



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นแรงดันอินพุตส์ STLI แบบ 1.2/8 μ s ขั้วลบ จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE

OUTPUT: -90.38 kV ; $T_1/T_2 = 0.78 / 8.0 \mu$ s, $\eta = 90.4\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/10 μ s ชั่วลบ จากการจำลองใน โปรแกรม PSPICE
 OUTPUT: -91.5 kV ; $T_1/T_2 = 0.819 / 10.32 \mu$ s, $\eta = 91.5\%$

จากข้อมูลผลการตรวจสอบและปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซ้ำอีกครั้ง ในการจำลองวงจร ด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI เป็นไปตามต้องการ ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่น (R_f) ที่ต้องใช้ในการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทั้งแบบ SLI และ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ตามลำดับ เป็นดังนี้

- กรณีรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s ต้องใช้ความต้านทาน R_f เป็น 90 Ω /Stage
- กรณีรูปคลื่น STLI แบบ 1.2/4 μ s ต้องใช้ความต้านทาน R_f เป็น 5.4 Ω /Stage
- กรณีรูปคลื่น STLI แบบ 1.2/8 μ s ต้องใช้ความต้านทาน R_f เป็น 13 Ω /Stage
- กรณีรูปคลื่น STLI แบบ 1.2/10 μ s ต้องใช้ความต้านทาน R_f เป็น 18 Ω /Stage

จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการตรวจสอบซ้ำด้วยการวิเคราะห์แบบจำลองการสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในโปรแกรม PSPICE อย่างละเอียด ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์องค์ประกอบความต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่น (R_f) แตกต่างไปจากการคำนวณแบบประมาณในเบื้องต้นเล็กน้อย เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ทางเวลาของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในที่นี้ใช้เกณฑ์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [9] กำหนด

ตารางที่ 3.2 เป็นผลสรุปการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบความต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่น (R_f) ในวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแบบต่างๆ สำหรับใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง เปรียบเทียบผลจากการคำนวณเบื้องต้น โดยประมาณกับผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองวงจรในโปรแกรม PSPICE **สิ้นสุดท้าย**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สรุปค่าความต้านทานหน่วยที่ได้จากการคำนวณและจากโปรแกรม PSPICE

ชนิดรูปคลื่น อิมพัลส์	จากการคำนวณเบื้องต้น		ผลจากการโปรแกรม PSPICE		ค่าความต้านทาน R_f ที่เลือกใช้จริง
	T_2 (μ s)	R_f (Ω)	T_2 (μ s)	R_f (Ω)	
1.2/50 μ s	46.05	90.00	45.79	90.00	90.00 Ω /Stage
1.2/4 μ s	4.00	7.85	4.20	5.40	5.40 Ω /Stage
1.2/8 μ s	8.00	14.47	8.00	13.00	13.00 Ω /Stage
1.2/10 μ s	10.00	19.65	10.32	18.00	18.00 Ω /Stage

หมายเหตุ:

- Front Resistor ใช้ค่าเดิมของตัวเครื่อง คือ 12 Ω /Stage
- Output Resistor ใช้ค่าเดิมของตัวเครื่อง คือ 100 Ω

3.3 การสร้างตัวต้านทานหน่วยเวลาช่วงหางคลื่น (Tail Resistors)

หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์องค์ประกอบความต้านทานหน่วยเวลาหางคลื่น (R_f) ดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.2 ขั้นตอนต่อไป คือ การออกแบบสร้างตัวความต้านทานที่จะใช้ติดตั้งที่โครงสร้างของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้งานจริง เพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์สำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง ปัจจัยสำคัญที่จะต้องระมัดระวังในการออกแบบสร้างตัวความต้านทานแรงสูง คือ มิติที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้เกิดเบรคควาน์หรือวาบไฟตามผิวเมื่อใช้งานภายใต้สภาวะแรงดันสูง นอกจากนี้ที่จะต้องพิจารณาเพิ่มเติมคือความสามารถในความคงทนต่อพลังงานที่ตัวความต้านทานเองจะได้รับเมื่อใช้งาน การออกแบบสร้างตัวความต้านทานในงานวิจัยนี้เลือกใช้เป็นแบบ Wire-Wound Resistor โดยใช้ลวดความต้านทานพันบนท่อฉนวน PVC [31]

3.3.1 การคำนวณออกแบบสร้าง Tail Resistors

การออกแบบสร้าง Tail Resistors (R_f) เลือกใช้เป็นแบบ Wire-Wound Resistor โดยใช้ลวดความต้านทานพันบนท่อฉนวนพีวีซี (PVC) โดยมีติความยาวของตัวความต้านทานถูกกำหนดด้วยโครงสร้างของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพราะต้องสามารถนำตัวความต้านทานที่สร้างขึ้นใหม่นี้ไปประกอบแทนองค์ประกอบเดิมของตัวเครื่องเพื่อปรับเปลี่ยนรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ ดังที่ได้กล่าวแล้วการออกแบบจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะใช้งาน อันเนื่องมาจากได้รับพลังงานจากแรงดันอิมพัลส์ โดยลวดที่นำมาใช้จะต้องมีคุณสมบัติทนต่อความร้อนได้สูง และสามารถใช้งานได้ต่อเนื่องโดยค่าความต้านทานขณะใช้งานเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนค่าของความต้านทานซึ่งอาจทำให้รูปคลื่นแรงดันเกิดผิดเพี้ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเดิมได้ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิวิธีที่เลือกใช้จะต้องมีค่าความคงทนจนวนและค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤติ (CFO) ที่มากพอที่ไม่ทำให้เกิดเบรคควอน์หรือวาบไฟตามผิว (Flashover) เมื่อต้องทนแรงดันอัดประจุเต็มพิกัดที่ระดับแรงดันใช้งานสูงสุด คือ 100 kV ในที่นี้จึงเลือกใช้เส้นลวดนิโครม (Nickel-Chromium : NiCr) เบอร์ #18, เบอร์ #19 และ เบอร์ #21 ซึ่งมีอัตราส่วนผสมคิดเป็นร้อยละระหว่างธาตุนิเกิล (Ni) ต่อธาตุโครเมียม (Cr) เป็น 80/20 มีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติจำเพาะของลวดความต้านทานชนิด NiCr

คุณสมบัติ	No. #18	No. #19	No. #21
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, d (mm)	1.2	1.017	0.8
ความต้านทาน, R (Ω/m)	0.964	1.344	2.137
ความหนาแน่น, γ (g/cm^3)	8.31	8.31	8.31
ความร้อนจำเพาะ, δ (J/g.K)	0.46	0.46	0.46
ความต้านทานจำเพาะ, ρ ($\Omega/Circ.Mil/Ft$)	650	650	650
ทนอุณหภูมิสูงสุด, M_p (K)	1,473	1,473	1,473

เมื่อต้องการทราบความยาวของลวดความต้านทานที่เลือกใช้ สามารถคำนวณหาได้จากสมการดังนี้

$$l = \frac{R_t}{R} \quad (3.4)$$

โดยที่ l คือ ความยาวของลวดความต้านทาน (m)
 R_t คือ ความต้านทานที่ต้องการ (Ω)
 R คือ ความต้านทานต่อเมตร (Ω/m)

กรณีแรงดันอิมพัลส์ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μs แทนค่า $R_t = 5.4 \Omega$ และใช้ลวดเบอร์ #18 ได้เป็น

$$\therefore l = \frac{5.4 \Omega}{0.964 \Omega/m} = 5.6 \text{ m}$$

กรณีแรงดันอิมพัลส์ STLI รูปคลื่น 1.2/8 μs แทนค่า $R_t = 13 \Omega$ และใช้ลวดเบอร์ #19 ได้เป็น

$$\therefore l = \frac{13 \Omega}{1.344 \Omega/m} = 9.67 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีแรงดันอิมพัลส์ STLI รูปคลื่น 1.2/10 μs แทนค่า $R_f = 18 \Omega$ และใช้ลวดเบอร์ #21 ได้เป็น

$$\therefore l = \frac{18 \Omega}{2.136 \Omega/\text{m}} = 8.42 \text{ m}$$

ในการออกแบบตัวต้านทานจะต้องออกแบบให้สามารถทนต่อความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ได้ โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ΔT) ต้องไม่เกินกว่า 200 K [31-32] ซึ่งเป็นขีดจำกัดของอุณหภูมิที่อุณหภูมิที่วัสดุที่ใช้รองรับการพันขดลวดความต้านทานสามารถทนได้ พลังงานที่ขดลวดความต้านทานจะได้รับ คือ

$$W = \frac{1}{2} V_0^2 C_1 \quad (3.5)$$

เมื่อ W คือ พลังงานที่ได้รับ (J)
 V_0 คือ ขนาดแรงดันอิมพัลส์ (V)
 C_1 คือ ขนาดของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (F)

เมื่อลองคำนวณกรณีอิมพัลส์ที่ระดับแรงดัน 95 kV (1 Stage) สูงสุด จะได้พลังงาน เป็น

$$\begin{aligned} \therefore W &= \frac{1}{2} [(95 \times 10^3)^2 \times (0.7 \times 10^{-6})] \\ &= 3,158.7 \text{ J} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะมีผลทำให้อุณหภูมิของลวดเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก [31]

$$\Delta T = \frac{W}{m\delta} \quad (3.6)$$

เมื่อ ΔT คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (K)
 W คือ พลังงานที่ตัวต้านทานได้รับ (J)
 m คือ มวลของลวดความต้านทาน (g)
 δ คือ ความร้อนจำเพาะของลวด (J/g.K)

โดยที่มวลของขดลวดความต้านทาน (m) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (3.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m = \frac{\pi d^2 l \gamma}{4} \quad (3.7)$$

- เมื่อ m คือ มวลของลวดความต้านทาน (g)
 d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด (mm)
 l คือ ความยาวของลวด (m)
 γ คือ ความหนาแน่นของลวด (g/cm^3)

เมื่อคำนวณหามวลของลวดความต้านทาน กรณีตัวต้านทานขนาด 5.4Ω จะได้ผลเป็นดังนี้

$$\therefore m = \frac{\pi \times (1.2)^2 \times 5.6 \times 8.31}{4} = 52.63 \text{ g}$$

เมื่อคำนวณหามวลของลวดความต้านทาน กรณีตัวต้านทานขนาด 13Ω จะได้ผลเป็นดังนี้

$$\therefore m = \frac{\pi \times (1.017)^2 \times 9.67 \times 8.31}{4} = 65.27 \text{ g}$$

เมื่อคำนวณหามวลของลวดความต้านทาน กรณีตัวต้านทานขนาด 18Ω จะได้ผลเป็นดังนี้

$$\therefore m = \frac{\pi \times (0.8)^2 \times 8.4 \times 8.31}{4} = 35.08 \text{ g}$$

ดังนั้นอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔT) ของลวดความต้านทานขณะใช้งาน สามารถหาได้ด้วยการแทนค่าลงในสมการที่ (3.6) ดังนี้

- กรณีตัวต้านทานขนาด 5.4Ω ใช้ลวดเบอร์ #18

$$\therefore \Delta T = \frac{3158.7}{52.63 \times 0.46} = 130.47 \text{ K}$$

- กรณีตัวต้านทานขนาด 13Ω ใช้ลวดเบอร์ #19

$$\therefore \Delta T = \frac{3158.7}{65.27 \times 0.46} = 105.18 \text{ K}$$

- กรณีตัวต้านทานขนาด 18Ω ใช้ลวดเบอร์ #21

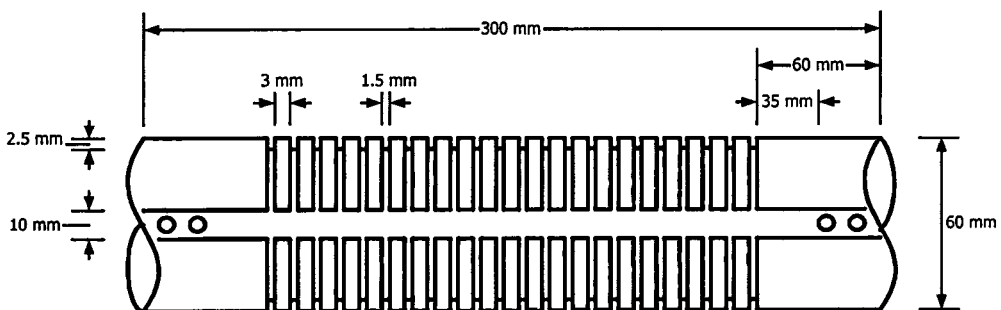
$$\therefore \Delta T = \frac{3158.7}{35.08 \times 0.46} = 195.7 \text{ K}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔT) บนขดลวดความต้านทานทุกตัว ยังมีค่าไม่เกินกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ คือ 200 K [31-32] ยังอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้งานได้

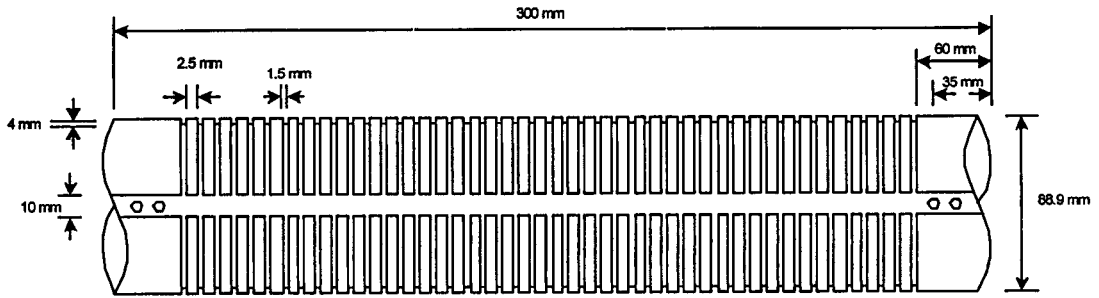
3.3.2 ท่อฉนวน PVC (Polyvinylchloride) สำหรับรองรับการพันลวดความต้านทาน

การออกแบบท่อฉนวนสำหรับใช้รองรับการพันลวดความต้านทานจะต้องออกแบบให้ความยาวเพียงพอที่จะสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าใช้งานสูงสุดที่คกคร่อมขดลวดความต้านทานได้ โดยไม่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ (Breakdown) หรือวาบไฟตามผิว (Flashover) รวมทั้งสามารถทนต่ออุณหภูมิจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นในลวดความต้านทานขณะใช้งานที่แรงดันสูงสุดได้ ซึ่งมีมิติความยาวของท่อฉนวนถูกกำหนดด้วยมิติโครงสร้างของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้งาน ในที่นี้เลือกใช้ท่อฉนวนพีวีซี (PVC) ที่มีค่าความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวเฉลี่ยกรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน ประมาณ 6 kV/cm [31] ดังนั้นถ้านำมาใช้งานกับแรงดันอิมพัลส์ขนาด 100 kV จะต้องใช้ท่อฉนวนความยาวอย่างน้อย 16.7 cm โดยท่อ PVC ที่เลือกใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเป็น 88.9 mm เนื้อฉนวนหนา 6 mm มีความยาวรวมประมาณ 30 cm หรือประมาณ 2 เท่าของระยะวาบไฟตามผิววิกฤติ การพันขดลวดใช้วิธีกลึงเซาะร่องตามผิวของท่อฉนวนพีวีซี เพื่อให้มีเนื้อฉนวนพีวีซีส่วนที่เหลือช่วยเป็นฉนวนกันระหว่างรอบของขดลวดอีกครั้งป้องกันการลัดวงจรระหว่างรอบ การพันลวดความต้านทานจะพันแบบสลับกันไป-มา เพื่อช่วยลดผลของค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่อาจเกิดขึ้นให้มีค่าน้อยที่สุด [31] ลักษณะการกลึงเซาะร่องท่อฉนวนพีวีซีพร้อมขนาดมิติต่างๆ ของท่อฉนวนที่ใช้ทำตัวความต้านทานแรงสูงทั้ง 3 แบบ คือ ตัวความต้านทานขนาด 5.4 Ω , 13 Ω และ 18 Ω แสดงดังรูปที่ 3.8 ถึง 3.10 ตามลำดับ โดยส่วนปลายทั้งสองด้านของตัวความต้านทานที่ออกแบบจะถูกยึดไว้ด้วยขั้วอิเล็กโตรดทำจากโลหะอะลูมิเนียมแท่งกลึงขึ้นรูปสำหรับใช้เป็นที่ยึด เพื่อความสะดวกในการติดตั้งใช้งานในโครงสร้างเดิมของตัวเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ลักษณะขั้วอิเล็กโตรดแสดงดังรูปที่ 3.11 และ 3.12 กรณีใช้กับท่อฉนวนพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm (5.4 Ω) และ 88.9 mm (13 Ω และ 18 Ω) ตามลำดับ

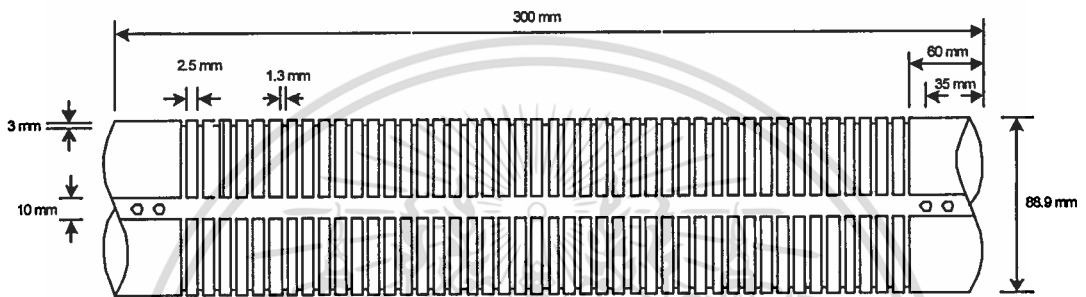


รูปที่ 3.8 ลักษณะการกลึงท่อพีวีซีแบบเกลียวเพื่อรองรับการพันขดลวดความต้านทาน 5.4 Ω

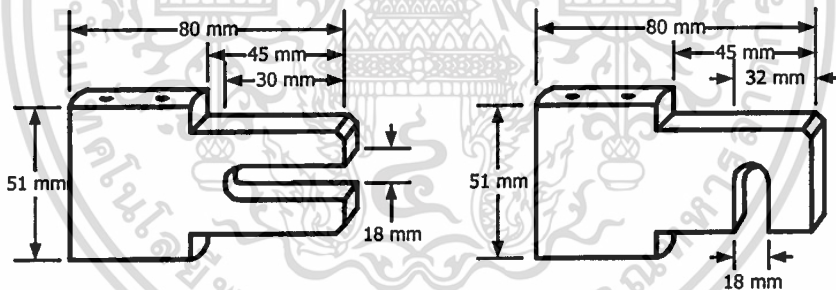
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



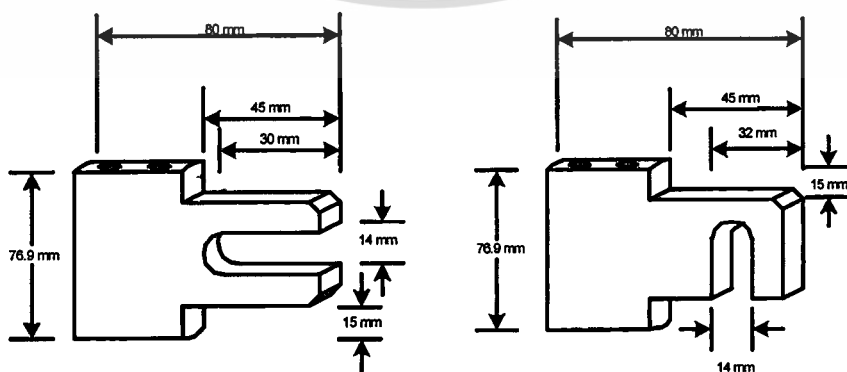
รูปที่ 3.9 ลักษณะการกลึงท่อพีวีซีแบบเกลียวเพื่อรองรับการพันขดลวดความต้านทาน 13 Ω



รูปที่ 3.10 ลักษณะการกลึงท่อพีวีซีแบบเกลียวเพื่อรองรับการพันขดลวดความต้านทาน 18 Ω



รูปที่ 3.11 ลักษณะการกลึงขั้วอิเล็กทรอนิกส์ของตัวความต้านทาน 5.4 Ω



รูปที่ 3.12 ลักษณะการกลึงขั้วอิเล็กทรอนิกส์ของตัวความต้านทาน 13 Ω และ 18 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การหาจำนวนรอบในการพันลวดความต้านทาน

1) กรณีตัวต้านทานขนาด 5.4Ω

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อฉนวน (กลิ้งร่องลึก 2.5 mm) = $60 - (2 \times 2.5) = 5.5 \text{ cm}$

ความยาวของลวดความต้านทานต่อรอบ = $\pi d = \pi \times 5.5 = 17.28 \text{ cm}$

หาจำนวนรอบของเส้นลวดความต้านทานที่ใช้ ดังนี้

$$\text{จำนวนรอบ} = \frac{\text{ความยาวลวดความต้านทาน}}{\text{ความยาวลวดความต้านทานต่อรอบ}}$$

$$\therefore \text{จำนวนรอบ} = \frac{560 \text{ cm}}{17.28 \text{ cm/รอบ}} = 32.4 \text{ รอบ}$$

\therefore พันลวดความต้านทานทั้งหมดประมาณ 33 รอบ

2) กรณีตัวต้านทานขนาด 13Ω

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อฉนวน (กลิ้งร่องลึก 4 mm) = $88.9 - (2 \times 4) = 8.09 \text{ cm}$

ความยาวของลวดความต้านทานต่อรอบ = $\pi d = \pi \times 8.09 = 25.42 \text{ cm}$

หาจำนวนรอบของเส้นลวดความต้านทานที่ใช้ ดังนี้

$$\therefore \text{จำนวนรอบ} = \frac{976 \text{ cm}}{25.42 \text{ cm/รอบ}} = 38.4 \text{ รอบ}$$

\therefore พันลวดความต้านทานทั้งหมดประมาณ 39 รอบ

3) กรณีตัวต้านทานขนาด 18Ω

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อฉนวน (กลิ้งร่องลึก 3 mm) = $88.9 - (2 \times 3) = 8.29 \text{ cm}$

ความยาวของลวดความต้านทานต่อรอบ = $\pi d = \pi \times 8.29 = 26.04 \text{ cm}$

หาจำนวนรอบของเส้นลวดความต้านทานที่ใช้ ดังนี้

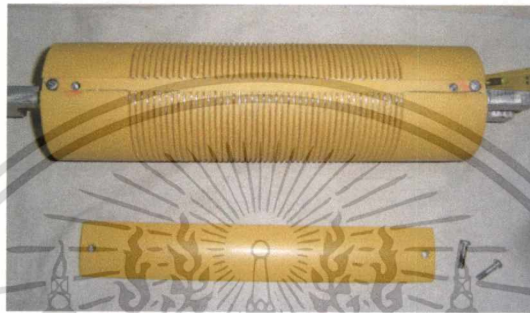
$$\therefore \text{จำนวนรอบ} = \frac{840 \text{ cm}}{26.043 \text{ cm/รอบ}} = 32.25 \text{ รอบ}$$

\therefore พันลวดความต้านทานทั้งหมดประมาณ 33 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ลักษณะการพันลวดความต้านทานบนท่อฉนวน PVC

เพื่อลดผลของค่าความเหนี่ยวนำแผ่ง (Stray Inductance) ในตัวความต้านทานแบบ Wire-Wound Resistance ให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ จึงออกแบบลักษณะการพันลวดความต้านทานให้กระแสในขดลวดวงรอบที่อยู่ใกล้กันไหลสวนทางกัน เพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กเกิดการหักล้างกันเอง เป็นการช่วยลดผลกระทบของสเตรย์อินดักแตนซ์ในตัวความต้านทาน ลักษณะการพันลวดความต้านทานแสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งตัวความต้านทานหน่วยเวลาเมื่อประกอบสร้างเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 3.14 และ 3.15



รูปที่ 3.13 ลักษณะการพันลวดความต้านทานบนท่อฉนวน PVC ที่กลึงเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.14 ตัวความต้านทานหน่วยเวลาที่ประกอบสร้างเสร็จ (5.4 Ω)



รูปที่ 3.15 Tail Resistors ที่ประกอบสร้างเสร็จสมบูรณ์ (ชุด 13 Ω และ 18 Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การทดสอบวัดค่าความต้านทานที่ออกแบบสร้างขึ้น

เมื่อประกอบสร้างตัวความต้านทานช่วงเวลาทางคลื่นแรงดันอิมพัลส์เสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติของชิ้นงาน โดยทำการวัดค่าความต้านทานที่ได้สร้างขึ้นด้วยเครื่อง LCR Precision Analyzer ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.4 ซึ่งจะเห็นว่าตัวความต้านทานที่ออกแบบประกอบสร้างขึ้นมีค่าความต้านทานเป็นไปตามที่ต้องการ โดยมีผลของค่าความเหนี่ยวนำแฝงปนอยู่น้อยมาก (วัดที่ความถี่ 100 kHz) สามารถละลายได้

ตารางที่ 3.4 ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่วัดได้จริง

ค่าความต้านทานที่ออกแบบไว้ (Ω)	ค่าความต้านทานที่วัดได้จริง (Ω)	% Error	ค่าความเหนี่ยวนำแฝง (mH)
5.4	5.41	0.18	0.001
13	13.1	0.77	0.003
18	17.9	0.56	0.002

3.4 การติดตั้งและทดสอบการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI

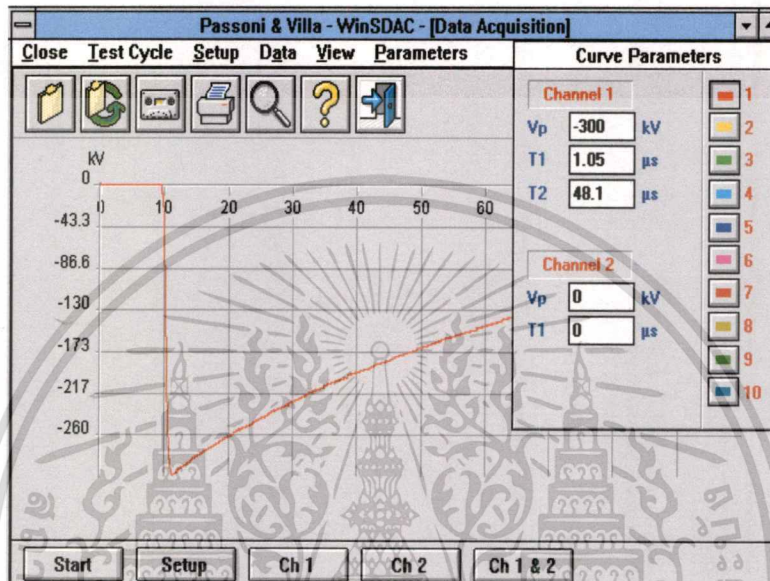
เมื่อได้องค์ประกอบตัวต้านทานช่วงเวลาทางคลื่น (R_t) สำหรับใช้ปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แล้ว จึงนำชุดตัวต้านทานหน่วยทั้งหมด (4 ตัว/ชุด) ไปติดตั้งที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เดิมในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยการปลดตัวต้านทานหน่วยเดิมของเครื่องออกและใส่ตัวต้านทานหน่วยชุดใหม่ที่ออกแบบสร้างขึ้นเข้าไปแทนที่ทั้ง 4 ชั้น (Stage) ดังรูปที่ 3.16



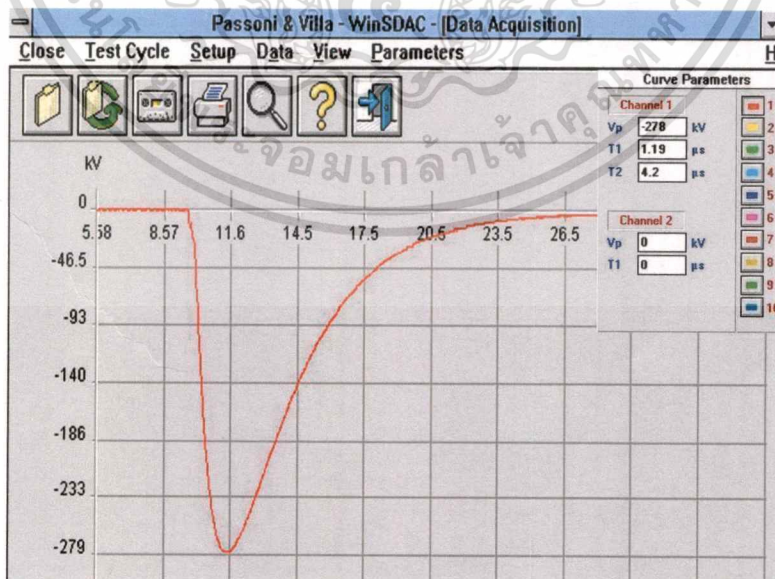
รูปที่ 3.16 ลักษณะการติดตั้ง Tail Resistor (R_t) เข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้มาใช้เป็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.16 เมื่อทำการติดตั้งตัวต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่นเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงลองทดสอบการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ทั้งกรณีรูปคลื่นฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs และกรณีการจ่ายแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μs , 1.2/8 μs และ 1.2/10 μs ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องเมื่อใช้จ่ายแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI ตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.17 ถึง 3.20 ตามลำดับ



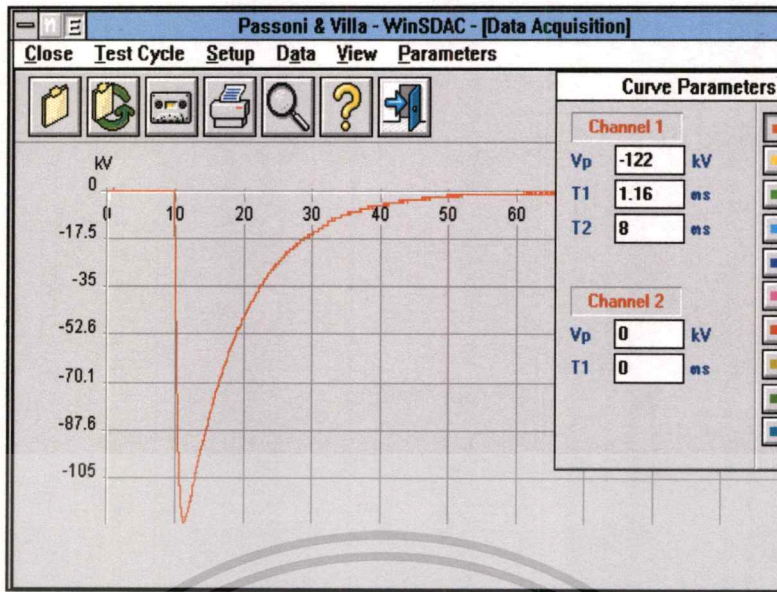
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs (SLI) สำหรับใช้อ้างอิง ขนาดแรงดันทดสอบ -300 kV , $T_1/T_2 = 1.05/48.1 \mu\text{s}$



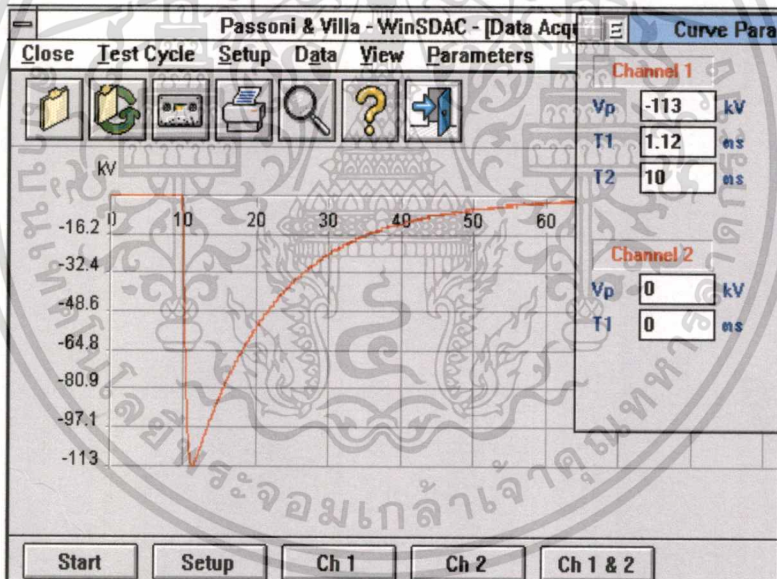
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μs ที่ใช้ในงานวิจัย

ขนาดแรงดันทดสอบ -278 kV , $T_1/T_2 = 1.19/4.2 \mu\text{s}$, $\eta = 85\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/8 μs ที่ใช้ในงานวิจัย ขนาดแรงดันทดสอบ -122 kV , $T_1/T_2 = 1.16/8.0 \mu\text{s}$, $\eta = 88\%$



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/10 μs ที่ใช้ในงานวิจัย ขนาดแรงดันทดสอบ -113 kV , $T_1/T_2 = 1.12/10.0 \mu\text{s}$, $\eta = 92\%$

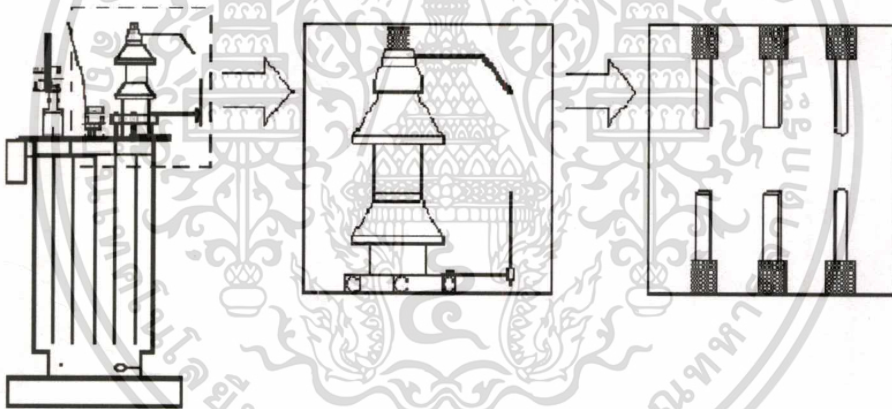
จากการทดสอบพบว่าตัวต้านทานหน่วงเวลาทางคลื่นที่ออกแบบสร้างขึ้นสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี ไม่เกิดดีสชาร์จ (Discharge) และสามารถจ่ายแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μs , 1.2/8 μs และ 1.2/10 μs ได้ตามต้องการ ประสิทธิภาพของเครื่องยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและเพียงพอที่จะสามารถจ่ายแรงดันสูงสำหรับนำไปใช้ทดสอบชุดอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งอุปกรณ์กับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) ที่ต้องการศึกษาวิจัยต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์ทดสอบพร้อมฐานติดตั้ง

3.5.1 การออกแบบสร้างชุดอิเล็กทรอนิกส์ทดสอบ

เนื่องจากการศึกษาในงานวิจัยนี้เน้นไปที่การศึกษาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI ต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินประเภทสปาร์กแก๊ป ดังนั้นการออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้ทดลองเก็บผลจึงออกแบบให้มีลักษณะคล้ายกับแก๊ปป้องกันแรงดันเกินที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ ในที่นี้จึงใช้แนวคิดจากการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินประเภทแก๊ปป้องกัน (Protective Gap) ที่มีใช้งานจริงในทางวิศวกรรม คือ อุปกรณ์จำพวก Rod Gap ดังรูปที่ 3.21 และ 3.22 เป็นแนวทางในการศึกษา และเพื่อความถูกต้องในการวัดค่าแรงดันเบรคความในช่องแก๊ป การออกแบบจริงจึงใช้เกณฑ์ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) [9] และ IEEE Std. 4 (1995) [27] เป็นเกณฑ์อ้างอิงประกอบกันด้วย โดย Rod Gap ที่มีใช้งานในทางปฏิบัตินั้นจะมีลักษณะรูปร่างเป็นแท่งโลหะทรงกลมหัวตัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 cm มีความยาวแตกต่างกันออกไปตามลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 3.21 แนวคิดที่ใช้ในการออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์ทดสอบ

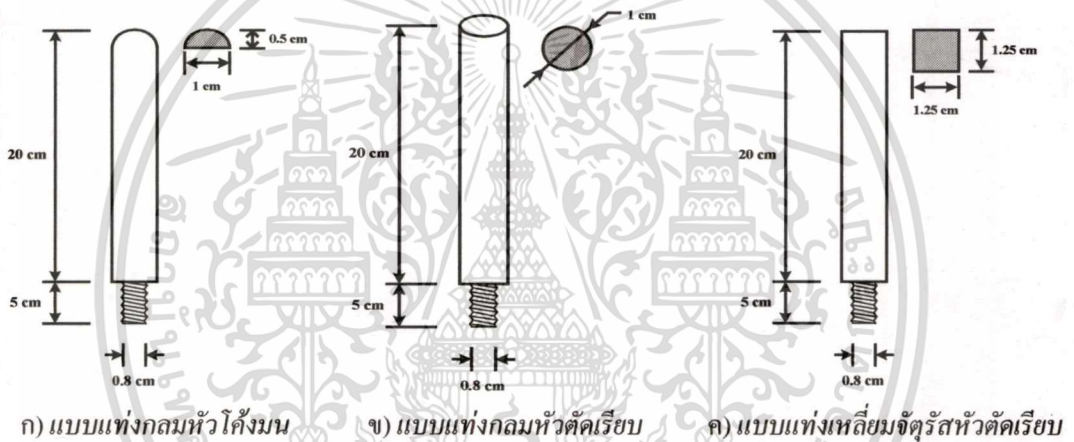


รูปที่ 3.22 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแบบ Rod Gap ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินในหม้อแปลงไฟฟ้า

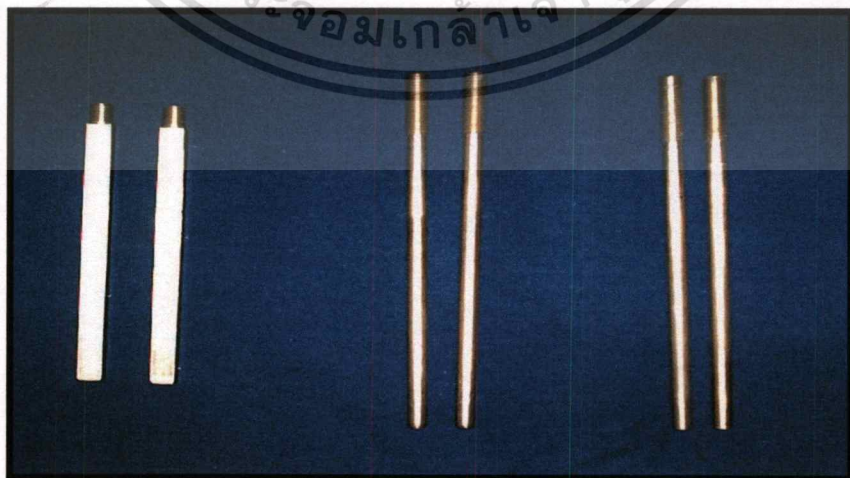
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาในกรณีอิเล็กโตรดแบบแท่ง (Rod) ทำด้วยทองเหลืองแบบสมมาตร (Symmetry) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 cm [9,27] มีลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตแตกต่างกัน 3 แบบ คือ อิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมน, อิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ และ อิเล็กโตรดแบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ

แนวคิดที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับแท่งอิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบ ไปพร้อมกัน เพราะต้องการศึกษาผลของรูปทรงอิเล็กโตรด (Electrodes Configuration) ที่มีต่อลักษณะการเกิดเบรคดาวนั้นในช่องแกปอากาศ เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าแบบ STLI ควบคุมกันไปด้วย ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบรูปทรงอิเล็กโตรดสำหรับใช้ป้องกันแรงดันเกินที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ลักษณะของรูปทรงอิเล็กโตรดที่ใช้ประกอบในการศึกษาวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.23 โดยมีลักษณะชิ้นงานจริงเมื่อจัดทำเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.23 ลักษณะชุดแท่งอิเล็กโตรดที่ใช้ในงานวิจัย

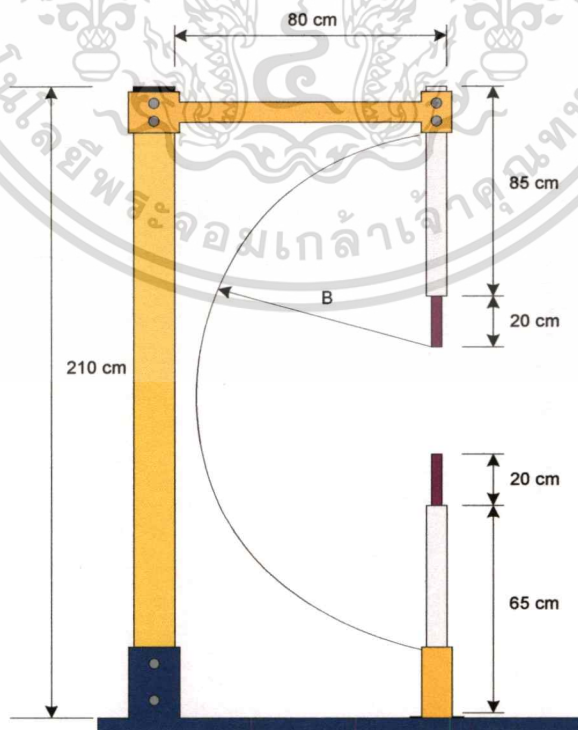


รูปที่ 3.24 ชุดแท่งอิเล็กโตรดที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

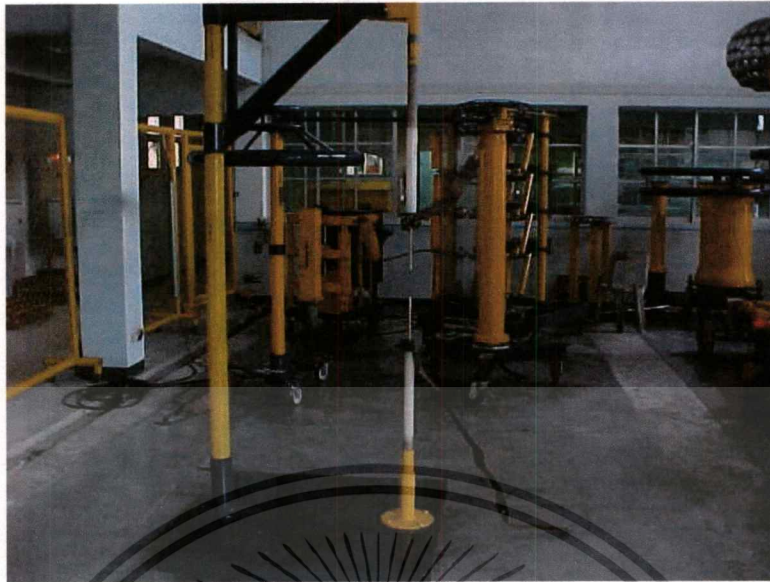
3.5.2 โครงสร้างฐานสำหรับติดตั้งชุดแท่งอิเล็กโทรดทดสอบ

งานวิจัยนี้ต้องการทดสอบเบรคความในช่องแกปอากาศที่ระยะแกปเริ่มตั้งแต่ 10, 15 และ 20 cm โดยระยะแกปสูงสุดที่จะทดลอง คือ 20 cm ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของพิกัดแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นจึงต้องออกแบบโครงสร้างฐานสำหรับติดตั้งชุดแท่งอิเล็กโทรดทดสอบให้สามารถรองรับการทดลองที่ระยะแกปสูงสุดนี้ได้ ลักษณะโครงสร้างของฐานสำหรับติดตั้งชุดแท่งอิเล็กโทรดทดสอบ ออกแบบอ้างอิงตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60052 (2002) [28] ซึ่งบริเวณที่ว่างโดยรอบหัวอิเล็กโทรดทดสอบ วัดจากจุดสปาร์กออกไปในแนวรัศมีจะต้องมีที่ว่างเพียงพอ (Clearance) ปราศจากวัสดุอื่นใด เช่น เพดาน, ผนังห้อง, หม้อแปลง หรือเครื่องกำเนิดแรงดันสูงอื่นๆ ไม่น้อยกว่าระยะ B โดยระยะ B คำนวณที่ขอมรับได้อย่างน้อยต้องเท่ากับ $2D$ เมื่อ D เป็นระยะช่องแกประหว่างชุดแท่งอิเล็กโทรดทดสอบ ในการทดลองต้องการปรับระยะแกปสูงสุดที่ระยะ 20 cm โดยชุดแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้มีความยาวแท่งละ 20 cm เท่ากัน มีก้านฉนวนรองรับด้านบนและล่างยาวด้านละ 85 cm และ 65 cm ตามลำดับ ดังนั้นฐานรองรับสำหรับติดตั้งชุดแท่งอิเล็กโทรดทดสอบจึงต้องมีขนาดความสูงอย่างน้อยเท่ากับ 210 cm และแขนยึดก้านฉนวนพร้อมแท่งอิเล็กโทรดจะต้องมีความยาวด้านละไม่น้อยกว่าระยะ B คือ 40 cm จำนวนที่ใช้ยึดแท่งอิเล็กโทรดทำจากแท่งพลาสติกชนิด Polypropylene ที่มีค่า Critical Flash-Over Voltage (CFO) และค่าความคงทนสนามไฟฟ้าเบรคความถี่แรงดันอิมพัลส์สูงพอ [32] ลักษณะโครงสร้างและมิติต่างๆ ของฐานรองรับ พร้อมวิธีการติดตั้งชุดแท่งอิเล็กโทรดทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.25 และ 3.26



รูปที่ 3.25 โครงสร้างฐานรองรับชุดอิเล็กโทรดทดสอบ

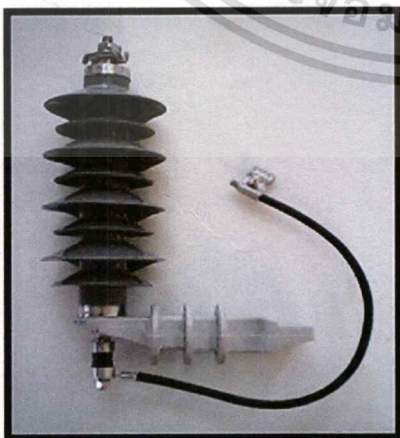
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 ฐานรองรับที่ประกอบสร้างเสร็จและลักษณะการติดตั้งชุดแท่งอิเล็กโตรดทดสอบ

3.6 คุณสมบัติของกัับดักฟ้าผ่าที่ใช้ศึกษาวิจัย

กัับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) ที่นำมาใช้เพื่อศึกษาวิจัยเป็นแบบชนิดโลหะออกไซด์มีความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Metal Oxide Resistor) และไม่มีสปาร์กแกป (Gapless) โครงสร้างฉนวนภายนอกหุ้มด้วยยางซิลิโคน (Silicone Rubber Housing) สำหรับใช้งานในระบบจำหน่าย (Distribution Class) ขนาดพิกัดแรงดันใช้งานแบ่งเป็น 2 รุ่น คือ 21 kV และ 24 kV โดยมีพิกัดกระแสดีสชาร์จเป็น 5.0 kA เท่ากัน ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท PRECISE E.M.F. Co., Ltd. ที่ระดับแรงดันระบบจำหน่าย โดยทั้ง 2 รุ่นมีคุณสมบัติ แสดงดังรูปที่ 3.27 และ 3.28



รูปที่ 3.27 Surge Arrester LAZ-P21

PRECISE SURGE ARRESTER

LAZ-P21, 5 kA Distribution Class

Silicone Rubber Housed MOV Gapless

Rated Voltage: 21 kV

Continuous Operating Voltage: 17 kV

Nominal Discharge Current: 5 kA

High Current Impulse: 65 kA

Energy absorption: 1.4 kJ/kV

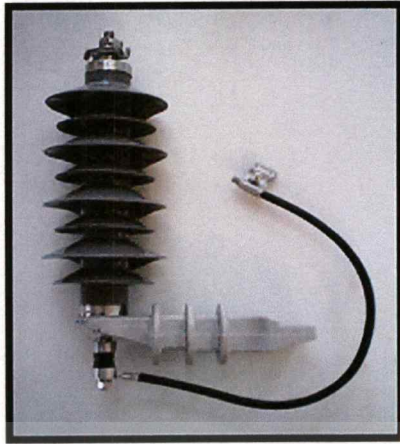
Impulse 1.2/50 μ s: 82.3 kV

Creepage distance: 744 mm

Weight: 2.3 kg

Ref. standard: IEC 60099-4 (1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PRECISE SURGE ARRESTER

LAZ-P24, 5 kA Distribution Class

Silicone Rubber Housed MOV Gapless

Rated Voltage: 24 kV

Continuous Operating Voltage: 19.5 kV

Nominal Discharge Current: 5 kA

High Current Impulse: 65 kA

Energy absorption: 1.4 kJ/kV

Impulse 1.2/50 μ s: 94 kV

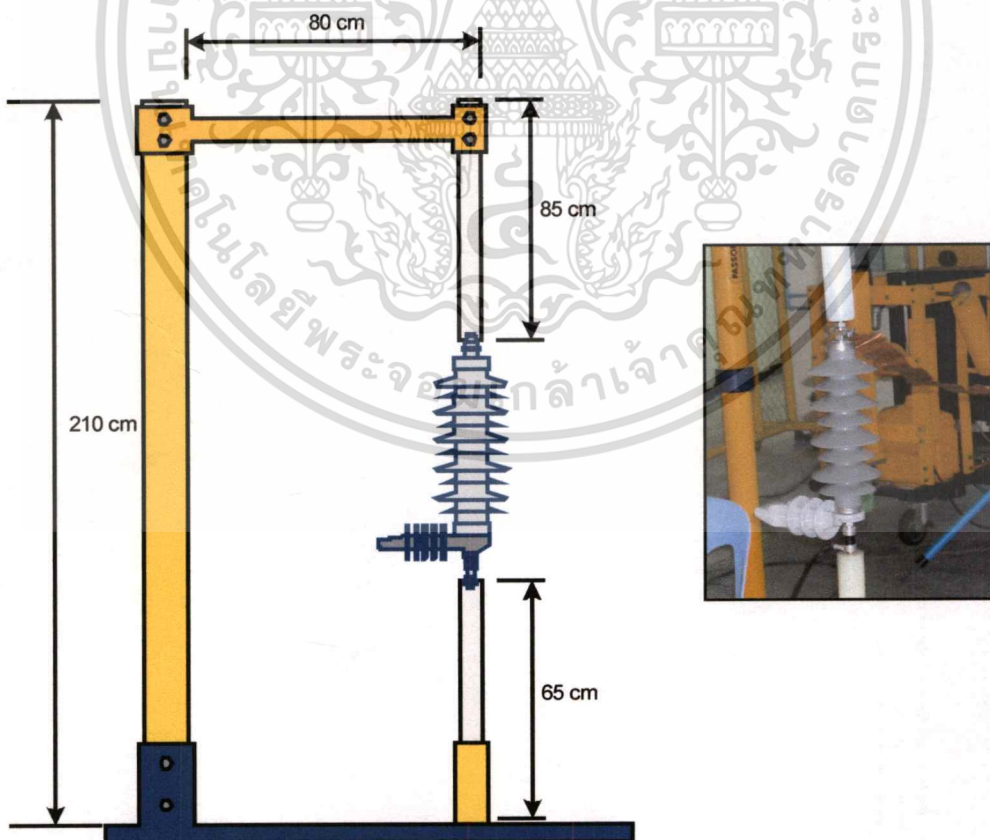
Creepage distance: 744 mm

Weight: 2.3 kg

Ref. standard : IEC 60099-4 (1998)

รูปที่ 3.28 Surge Arrester LAZ-P24

ฐานรองรับสำหรับใช้ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในขณะทดสอบ ออกแบบให้สามารถใช้งานร่วมกันกับฐานติดตั้งชุดแท่งอิเล็กโตรด เพื่อความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างอุปกรณ์ชุดใหม่ โดยตัดแปลงเพียงเล็กน้อยและติดตั้งชุดวัดกระแสดีเอสอาร์จ (R-Shunt) สำหรับใช้วัดกระแสดีเอสอาร์จที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าขณะทำการทดสอบ ลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 ลักษณะการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าเพื่อทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ระเบียบวิธีการวิจัย

เนื่องจากกระบวนการศึกษาวิจัยในงานวิจัยนี้ทั้งหมดเป็นการศึกษาโดยการทดลองเก็บผลในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยมีเป้าหมายเพื่อทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ของช่องแคบอากาศเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (SLI) เปรียบเทียบกับกรณีที่ได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) แบบต่างๆ ซึ่งในที่นี้จะเน้นในกรณีรูปคลื่นแบบ 1.2/4 μ s [16-17] เพื่อศึกษาผลจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI ที่มีต่อลักษณะการเกิดเบรคดาวน์ในช่องแคบอากาศแบบแท่งรีด (Rod) การศึกษาจะเป็นการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ในช่องแคบอากาศที่ระยะ 10, 15 และ 20 cm ตามลำดับ ข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบจะเป็นค่าเชิงสถิติ (Statistics) จึงจำเป็นต้องมีระเบียบวิธีการวิจัยที่ชัดเจน เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลผลการวิจัยที่น่าเชื่อถือ สามารถนำมาใช้วิเคราะห์และสรุปผลเชิงวิชาการได้ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทดลองโดยตรงคือสถานะที่ทำการทดลองเพราะจะมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่หาได้ ดังนั้นค่าแรงดันเบรคดาวน์ทุกค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการจะต้องทำการแปลงกลับเข้าสู่สถานะมาตรฐานอ้างอิง [9] เดียวกัน โดยใช้ตัวคูณแปรผันความหนาแน่นอากาศ (Air Density Correction Factor : k_d) เพื่อให้ได้ข้อมูลค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่สถานะมาตรฐาน จึงจะสามารถนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในขั้นสุดท้ายได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแสดงผลการทดสอบในรูปค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) และกราฟคุณลักษณะสมบัติเส้นแรงดัน - เวลา ($v - t$ curve) ตามมาตรฐาน [9] ระเบียบวิธีที่ใช้มีรายละเอียดดังนี้

4.1 วิธีการหาค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$)

การทดสอบเบรคดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ โดยปกติทั่วไปจะเป็นการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ หรือที่เรียกว่า “แรงดันเบรคดาวน์ห้าสิบเปอร์เซ็นต์ ($V_{b50\%}$)” ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีปรับขึ้น - ลง (Up and down method) อ้างอิงตามระเบียบวิธีในมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) [9] เริ่มต้นด้วยการป้อนแรงดันทดสอบค่าหนึ่งทีคาดหมายว่าน่าจะเป็นเบรคดาวน์ (V_0) แล้วค่อยปรับระดับแรงดันทดสอบเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นระดับขั้นแรงดัน (ΔV) ซึ่งกำหนดให้มีค่าประมาณ $\pm 3\%$ ของแรงดันครั้งก่อนที่ป้อนเข้าไป นั่นคือ ถ้าแรงดันเริ่มต้น V_0 ที่ป้อนยังไม่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ให้ปรับเพิ่มแรงดันทดสอบเป็น $V_0 + \Delta V$ (หรือบวกเพิ่ม 3%) แล้วจึงป้อนแรงดันทดสอบค่าใหม่อีกครั้ง แต่ถ้าแรงดันเริ่มต้น V_0 ที่ป้อนเข้าไปทำให้เกิดเบรคดาวน์ให้ปรับลดแรงดันทดสอบลงเหลือ $V_0 - \Delta V$ (หรือปรับลดลง 3%) แล้วป้อนแรงดันทดสอบค่าใหม่ซ้ำอีกครั้ง ปฏิบัติต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันไปเช่นนี้ จนกระทั่งมีจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันมากพอ (ในที่นี้ใช้ 20 ครั้ง) [21] จึงนำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าแรงดันเบรคความชื้นสถิติ ($V_{b50\%}$) โดยใช้สมการที่ 4.1 ดังนี้

$$V_{b50\%} = V' + \Delta V \left[\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right] \quad (4.1)$$

โดยที่ V' คือ ค่าแรงดันต่ำสุดที่ทำให้เกิดเบรคความ
 ΔV คือ ระดับขั้นแรงดันที่ปรับเพิ่ม-ลด ในการทดลอง

เมื่อ
$$A = \sum_{i=0}^k i n_i \quad (4.2)$$

และ
$$N = \sum_{i=0}^k n_i \quad (4.3)$$

โดยที่ A คือ ผลรวมลำดับที่ของแรงดันคูณกับจำนวนครั้งที่เกิดเบรคความ
 N คือ ผลรวมจำนวนครั้งที่เกิดเบรคความ

ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [9] และ IEEE Std. 4 [27] ได้กำหนดสภาวะมาตรฐานอ้างอิง (Standard Reference Atmosphere) สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันเบรคความชื้นสถิติไว้เหมือนกัน คือ

- ความดันบรรยากาศ (P_0) เป็น 760 mmHg หรือ 101.3 kPa หรือ 1013 mbar
- อุณหภูมิ (t_0) เป็น 20 °C
- ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity: h_0) เป็น 11 g/m³

ฉะนั้นค่าแรงดันเบรคความที่วัดได้ที่สภาวะแวดล้อม (Ambient) อื่นใด จะต้องปรับเทียบกลับเข้าสู่สภาวะมาตรฐานอ้างอิง นั่นคือ

$$V_{bn} = \frac{V_b}{K_d} \quad (4.4)$$

โดยที่ V_{bn} คือ ค่าแรงดันเบรคความที่สภาวะมาตรฐานอ้างอิง
 V_b คือ ค่าแรงดันเบรคความที่วัดได้ที่สภาวะแวดล้อม (Ambient) อื่นใด
 K_d คือ ตัวประกอบแปรผันความหนาแน่นของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Air Density Correction Factor (k_d) จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Air Density: RAD) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้ [9]

$$RAD = \frac{P}{P_0} \frac{273 + t_0}{273 + t} = 0.386 \times \left(\frac{P}{273 + t} \right) \quad (4.5)$$

เมื่อ P คือ ความดันของอากาศที่สภาวะทดสอบใดๆ (mmHg)

t คือ อุณหภูมิของห้องขณะทำการทดสอบ ($^{\circ}\text{C}$)

โดยที่แฟกเตอร์ตัวประกอบแปรผัน K_d จะมีค่าเท่ากับ RAD ที่คำนวณได้ ถ้า RAD มีค่าอยู่ระหว่าง 0.95 ถึง 1.05 [21] ส่วนกรณีค่าอื่นๆ สามารถเทียบหาได้จากตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ (RAD) เปรียบเทียบกับค่าแฟกเตอร์ K_d

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ (RAD)	แฟกเตอร์ K_d
0.70	0.72
0.75	0.77
0.80	0.82
0.85	0.86
0.90	0.91
0.95	0.95
1.00	1.00
1.05	1.05
1.10	1.09
1.15	1.13

เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด โดยไม่มีผลของปัจจัยแฝงอื่นมาเกี่ยวข้อง ในการทดสอบแต่ละครั้งจึงต้องพยายามควบคุมสภาวะการทดลองให้เหมือนกัน เช่น การควบคุมค่าความแตกต่างของระดับแรงดันที่ป้อน (ΔV) , ควบคุมช่วงเวลาพักระหว่างการทดลองแต่ละครั้ง (Δt) และควบคุมจำนวนครั้งที่ทำการทดลองให้เท่ากัน สำหรับงานวิจัยนี้ การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติแต่ละค่าจะทำการทดสอบจำนวนครั้งทั้งหมด 20 ครั้ง ตามข้อเสนอแนะใน [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

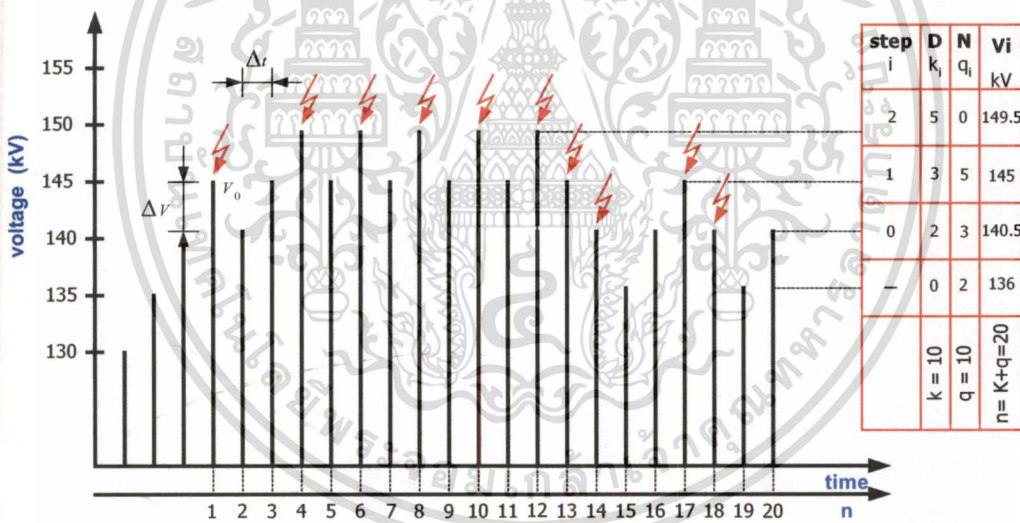
4.1.1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าแรงดันเบรคความเข้มเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$)

การคำนวณหาค่าแรงดันเบรคความเข้มเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) สามารถคำนวณได้ 2 วิธี [9, 21, 27] คือคำนวณแบบพิจารณาที่จำนวนครั้งการเกิดเบรคความเข้ม หรือ แบบพิจารณาที่จำนวนครั้งของการไม่เกิดเบรคความเข้ม ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความเข้มเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) กรณีอิเล็กทรอนิกส์ทดสอบแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าแบบมีช่วงเวลาห่างคลื่นสั้น (STLI) ขั้วลบ ที่ระยะแกป 15 cm ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1

สถานะที่ทำการทดสอบ:

- อุณหภูมิ 27.5 °C
- ความดันบรรยากาศ 769 mmHg
- ความชื้นสัมพัทธ์ 67.5 %
- $K_d = 0.9878$



รูปที่ 4.1 การป้อนแรงดันเป็นระดับขึ้นโดยวิธีปรับขึ้น - ลง (Up and down method)

ตัวอย่างการคำนวณแบบพิจารณาที่จำนวนครั้งของการเกิดเบรคความเข้ม

จากสมการที่ 4.2 จะได้ว่า

$$\therefore A = \sum_{i=0}^k i n_i = (0 \times 2) + (1 \times 3) + (2 \times 5) = 13$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการที่ 4.3 จะได้

$$\therefore N = \sum_{i=0}^k n_i = 10$$

แทนค่า A และ N ลงในสมการที่ 4.1 นั่นคือ

$$V_{b50\%} = V' + \Delta V \left[\frac{A \pm 1}{N} - \frac{1}{2} \right] = 140.5 + 4.5 \left[\frac{13}{10} - \frac{1}{2} \right]$$

$$\therefore V_{b50\%} = 144.1 \text{ kV}$$

ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าที่คำนวณจากสภาวะการทดลองจริง ดังนั้นจึงต้องแปลงค่ากลับไปสู่ที่สภาวะมาตรฐานอ้างอิง โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.4 นั่นคือ

$$\therefore V_{bn50\%} = \frac{V_{b50\%}}{K_d} = \frac{144.1}{0.9878} = 145.87 \text{ kV}$$

4.2 วิธีการทดสอบหาเส้นกราฟคุณลักษณะแรงดัน-เวลา

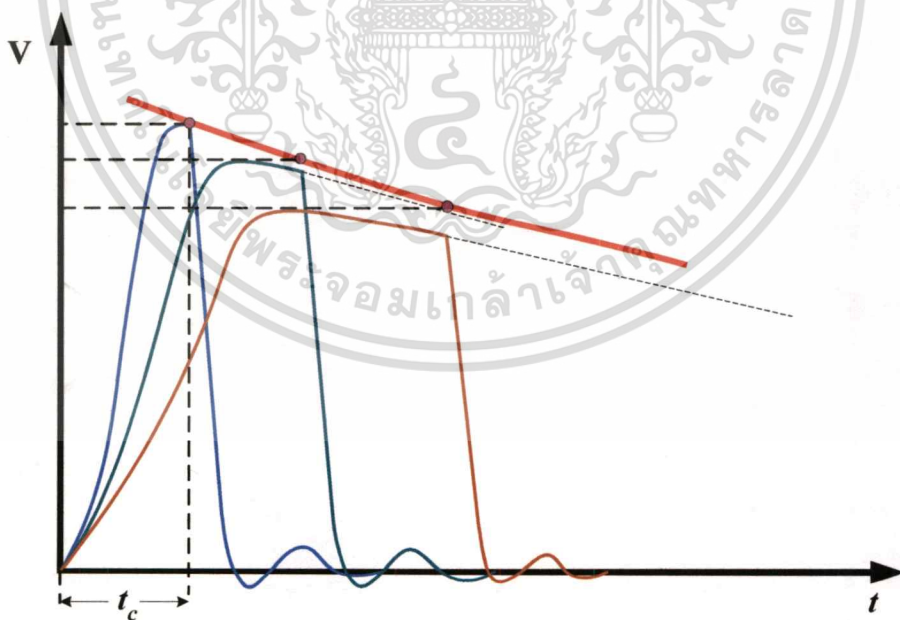
การทดสอบเพื่อหาเส้นกราฟคุณลักษณะแรงดัน-เวลา (Voltage-time Curve หรือ v-t curve) อ้างอิงตามระเบียบวิธีที่แนะนำไว้ในมาตรฐาน [9] และ [27] โดยใช้วิธีการปรับระดับแรงดันทดสอบเพิ่มขึ้นแต่ลักษณะรูปคลื่นอิมพัลส์ (Waveshape) ที่ใช้ป้อนเพื่อทดสอบคงเดิม เรียกวิธีนี้ว่า “Constant Prospective Shape” เส้นกราฟคุณลักษณะแรงดัน-เวลา (v-t curve) จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเบรคดาวน์ (V_b) กับเวลาที่เกิดเบรคดาวน์ (t_b) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในช่วงหน้าคลื่นหรือเกิดขึ้นในช่วงหางคลื่นก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในทางปฏิบัติจะทำการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวน์และเวลาที่เกิดเบรคดาวน์ที่ละจุดบนเส้นกราฟ v-t curve แต่ละจุดจะทำการทดสอบด้วยการยิงแรงดันอิมพัลส์ซ้ำกันจำนวนอย่างน้อย 5 ครั้ง และต้องเกิดเบรคดาวน์ทุกครั้ง ได้ระดับเริ่มตั้งแต่ค่าแรงดันต่ำสุดที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ที่ระยะแยกทดสอบค่านั้นๆ จนถึงระดับแรงดันป้อนสูงสุดที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์แล้วค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่ได้จะไม่เปลี่ยนแปลง จำนวนข้อมูลแต่ละชุดจะอาศัยกระบวนการทางสถิติมาประยุกต์ใช้ เพื่อวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยแรงดันเบรคดาวน์และเวลาที่เกิดเบรคดาวน์ของแต่ละจุดบนเส้นกราฟ v-t curve และเพื่อลดปัจจัยความไม่แน่นอนในการเกิดเบรคดาวน์ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองที่ได้ ในงานวิจัยนี้จึงนำค่าส่วน

เบี่ยงเบนมาตรฐานจากชุดข้อมูลผลการทดลองที่ได้มาพิจารณาประกอบเป็นเกณฑ์ในการยอมรับได้ของข้อมูล นั่นคือ

- กรณีค่าระดับแรงดันเบรคความ (V_b) ใช้เกณฑ์ SD < 1.0 และ
- กรณีค่าเวลาที่เกิดเบรคความ (t_b) ใช้เกณฑ์ SD < 0.5

หากชุดข้อมูลใดไม่เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดนี้ ผู้วิจัยจะต้องเริ่มต้นกระบวนการทดสอบซ้ำใหม่อีกครั้ง วิธีการพล็อตเส้นกราฟ $v - t$ curve ในงานวิจัยนี้จะใช้ฟังก์ชันการถดถอยเชิงพหุนาม (Polynomial Regression) ซึ่งเป็นไปตามข้อเสนอแนะของ Pritindra Chowdhuri [20]

การทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงใช้เครื่องกำเนิดแรงดันสูงอิมพัลส์ขนาดพิกัด 400 kV, 14 kJ เพื่อจ่ายแรงดันอิมพัลส์ทั้งแบบ SLI และ STLI ที่ระดับแรงดันทดสอบต่างกัน เริ่มจากค่าที่คาดว่าจะเกิดการเบรคความ (Critical Sparkover Voltage) โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) แล้วปรับระดับแรงดันเพิ่มขึ้นและลดลง เป็นช่วงระดับแรงดันทดสอบ (ประมาณ 10 – 20 kV แล้วแต่กรณี) ทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_b และ t_b ที่ละจุด ทำการทดสอบด้วยการป้อนแรงดันทดสอบหลายระดับแรงดันจนกว่าจะได้ค่าช่วงเวลาเบรคความอยู่ในช่วงประมาณ 0.8 - 10.00 μ s เพื่อนำไปพล็อตหาเส้นกราฟ $v-t$ curve ต่อไป



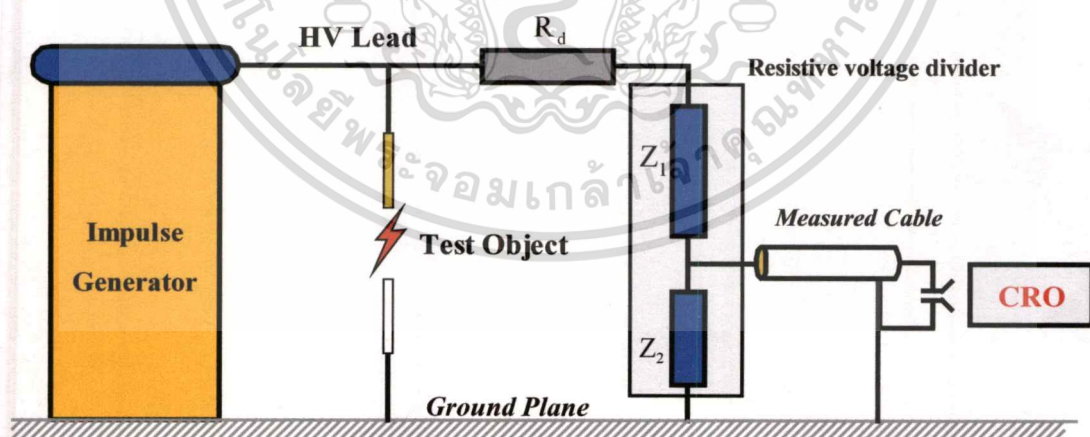
รูปที่ 4.2 Voltage-Time Curve แบบวิธี Constant Prospective Shape

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การเตรียมการทดลองในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบชุดแท่งอิเล็กโทรด (Rod-Rod Electrodes) และการทดสอบกับดักฟ้าผ่า (Lightning Arresters) โดยในส่วนของ การทดสอบชุดแท่งอิเล็กโทรด นั้น ทำการทดสอบโดยจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s และแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4, μ s 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ทดสอบหาค่าของแรงดันเบรคควาน์เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) และทดสอบหาคูณลักษณะเส้นกราฟ v-t curve ของอิเล็กโทรดทุกรูปทรง ที่ระยะแก๊ป 3 ระยะ คือ 10 cm, 15 cm และ 20 cm ตามลำดับ ทดสอบทั้งอิมพัลส์ชั่ววอกและชั่วลบ

ในส่วนของ การทดสอบกับดักฟ้าผ่าจะเป็นการทดสอบทำนองเดียวกันกับกรณีการทดสอบชุดแท่งอิเล็กโทรด แต่จะทำการวัดขนาดกระแสดีสชาร์จ (Discharge Current) ควบคู่กันไปด้วย โดยวัดรูปคลื่นสัญญาณผ่านตัวต้านทานชั้้นท์ (Shunt Resistor) ทดสอบทั้งกรณีจ่ายด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s และกรณีแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4, μ s 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ตามลำดับ นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน ซึ่งได้ประยุกต์ใช้เกณฑ์ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60099-4 [33] มาพิจารณาประกอบในกระบวนการทดสอบร่วมด้วย ลักษณะวงจรการทดลองหลักที่ใช้แสดงดังรูปที่ 4.2 ส่วนลักษณะการเตรียมการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยได้รับความอนุเคราะห์ให้ใช้งานเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลองรวมทั้งพื้นที่สำหรับทดสอบ ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



รูปที่ 4.3 โดอะแกรมวงจรการทดสอบ



รูปที่ 4.4 ลักษณะการเตรียมการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

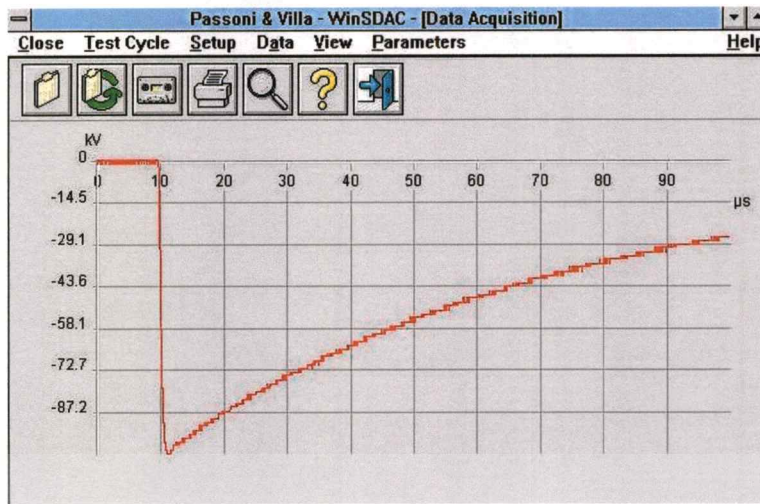
ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองศึกษา โดยแบ่งประเด็นการศึกษาออกเป็นกรณีๆ ดังนี้

- 1) ผลการศึกษาเปรียบเทียบหาค่าแรงดันเบรคความเข้มเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) และคุณลักษณะเส้นกราฟ v-t curve ของช่องแกปอากาศ (Rod Gap) ลักษณะต่างๆ กรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/4 μs กับกรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μs ซึ่งเป็นประเด็นหลักที่สนใจศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้
- 2) ผลการศึกษาเปรียบเทียบหาค่าแรงดันเบรคความเข้มเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) และคุณลักษณะเส้นกราฟ v-t curve ของช่องแกปอากาศ (Rod Gap) ลักษณะต่างๆ กรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/8 μs และ 1.2/10 μs กับกรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs ซึ่งเป็นส่วนที่ทำการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อความสมบูรณ์ของงานวิจัย
- 3) ผลการศึกษาเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินกับดักฟ้าผ่า (Lightning Arresters) กรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/4 μs , 1.2/8 μs และ 1.2/10 μs กับกรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs ซึ่งเป็นส่วนที่ทำการศึกษาเพิ่มเติมอีกเช่นกัน เพื่อความสมบูรณ์ของงานวิจัย

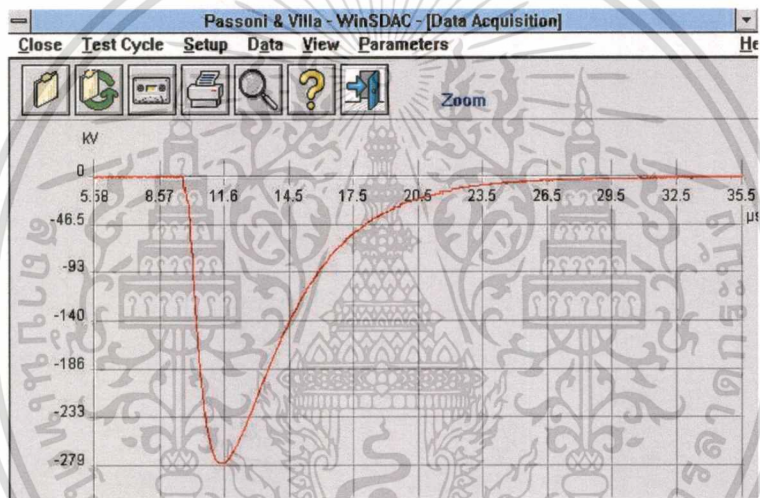
โดยมีข้อมูลผลการศึกษาเป็น ดังนี้

5.1 ผลการศึกษาช่องแกปอากาศ (Rod Gap) กรณีรูปคลื่นแรงดัน STLI แบบ 1.2/4 μs

การศึกษาคูณลักษณะสมบัติการเกิดเบรคความเข้มในช่องแกปอากาศ เมื่อได้รับแรงดัน STLI รูปคลื่น 1.2/4 μs เปรียบเทียบกับกรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs (SLI) โดยทดลองกับชุดแท่งอิเล็กโตรดแบบสมมาตรที่มีรูปทรงของแท่งอิเล็กโตรดแตกต่างกัน 3 แบบ คือ อิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมน, อิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ และอิเล็กโตรดแบบแท่งเหลี่ยม จัตุรัสหัวตัดเรียบ ทดสอบที่ระยะแกป 10 cm, 15 cm และ 20 cm ตามลำดับ วงจรที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 ตามที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 4 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันแบบ SLI และ STLI ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (SLI) 1.2/50 μ s



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI) 1.2/4 μ s

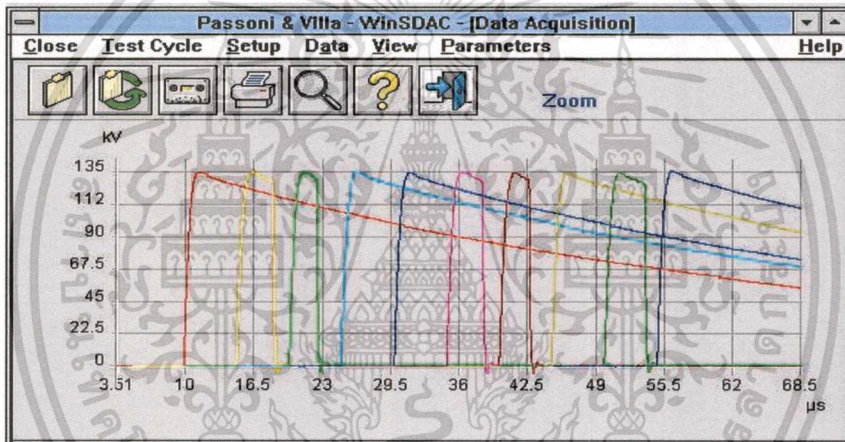
5.1.1 ผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรคความเข้มสถิติ

การทดลองหาค่าแรงดันเบรคความเข้มสถิติ ($V_{b50\%}$) ของช่องแปกอากาศ ใช้วิธีปรับขึ้น - ลง ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยค่า $V_{b50\%}$ ทุกค่าได้ปรับเข้าสู่ภาวะมาตรฐานเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลผลการทดลองที่ระยะแปก 10 cm, 15 cm และ 20 cm กรณีรูปทรงอิลเลคโตรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมน, แบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ และ แบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ แสดงดังตารางที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 5.3 ถึง 5.8 เป็นตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบ SLI และ STLI ที่ได้จากการทดลองในกรณีต่างๆ ที่ระยะแปก 15 cm เท่ากัน ซึ่งข้อมูลทั้งหมดที่นำมาแสดงนี้เป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการทางสถิติเรียบร้อยแล้ว ส่วนข้อมูลดิบที่ได้จากการเก็บผลการทดลองในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงตามระเบียบวิธีที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงที่ [34] และ [35] ตามลำดับ

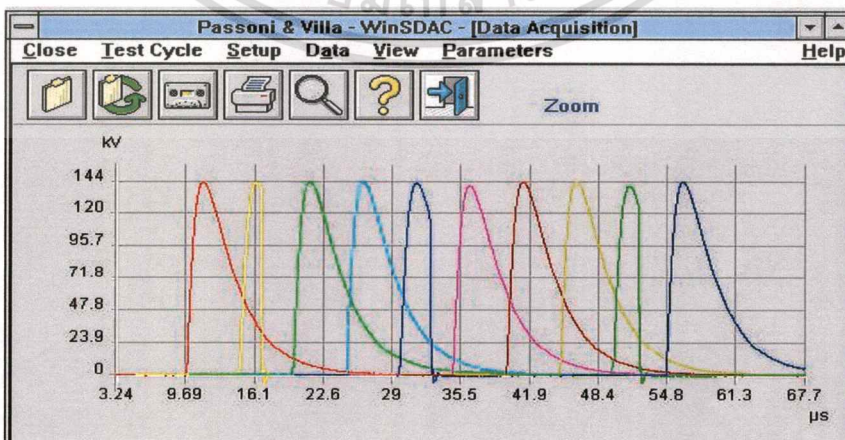
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรคความถี่เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของช่องแกปอากาศ
กรณีรูปทรงอิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมน

ระยะแกป (cm)	ขั้วแรงดัน	ผลการทดสอบค่า $V_{b50\%}$ (kV)	
		SLI (1.2/50 μ s)	STLI (1.2/4 μ s)
10	+	92.72	98.99
	-	93.71	101.27
15	+	133.21	143.43
	-	136.38	146.05
20	+	166.11	182.41
	-	178.51	196.27



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีรูปคลื่นแบบ SLI, อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมนที่ระยะแกป 15 cm

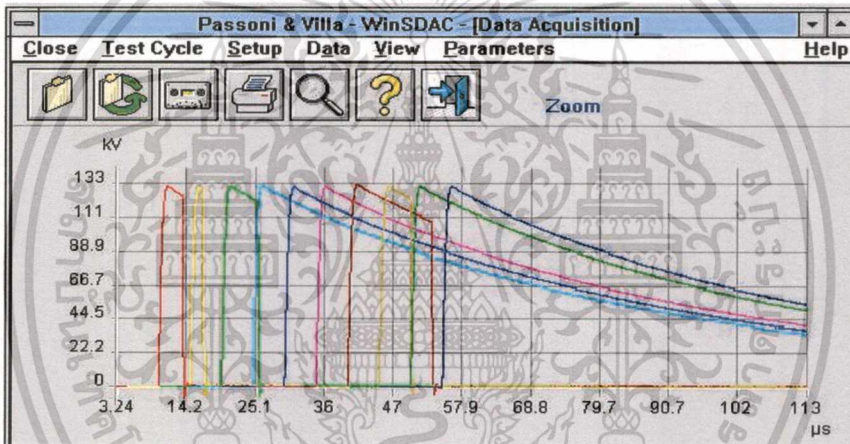


รูปที่ 5.4 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีรูปคลื่นแบบ STLI, อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมนที่ระยะแกป 15 cm

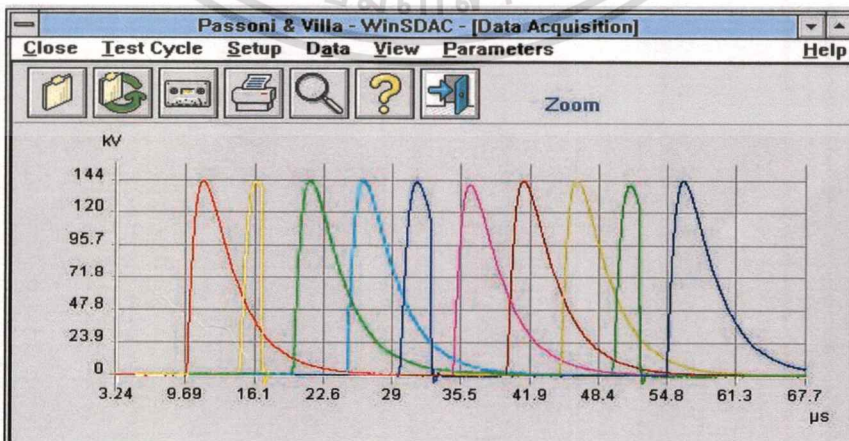
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรคความเข้มเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของช่องแถบอากาศ
กรณีรูปทรงอิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ

ระยะแถบ (cm)	ขั้วแรงดัน	ผลการทดสอบค่า $V_{b50\%}$ (kV)	
		SLI (1.2/50 μ s)	STLI (1.2/4 μ s)
10	+	94.03	97.78
	-	95.46	101.99
15	+	132.57	145.01
	-	136.29	145.87
20	+	175.45	181.09
	-	180.05	190.27



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีรูปคลื่นแบบ SLI,
อิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบที่ระยะแถบ 15 cm



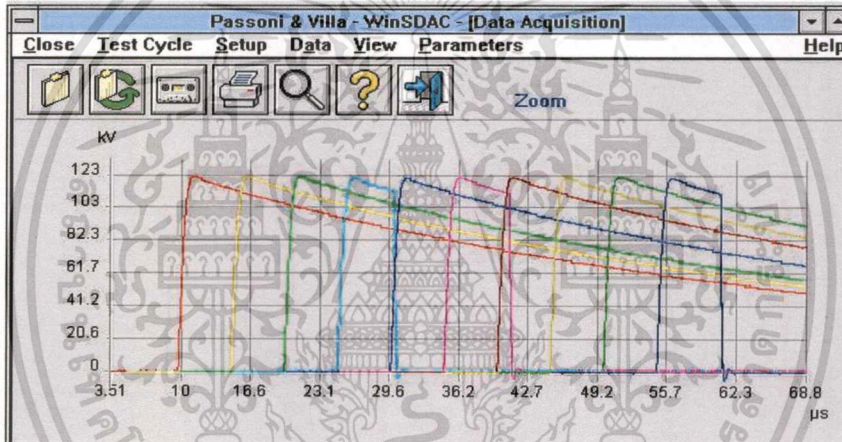
รูปที่ 5.6 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีรูปคลื่นแบบ STLI,

อิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบที่ระยะแถบ 15 cm

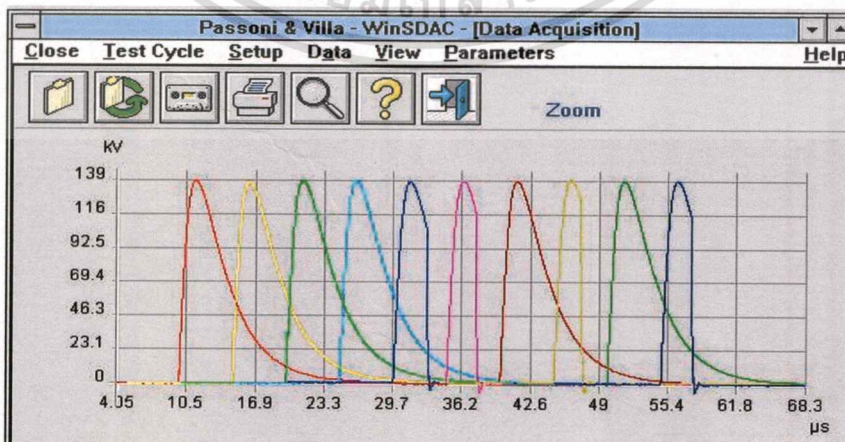
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรคความเข้มสถิติ ($V_{b50\%}$) ของช่องแกปอากาศ
กรณีสรูปทรงอิเล็กโตรดแบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ

ระยะแกป (cm)	ขั้วแรงดัน	ผลการทดสอบค่า $V_{b50\%}$ (kV)	
		SLI (1.2/50 μ s)	STLI (1.2/4 μ s)
10	+	95.60	100.81
	-	100.12	109.50
15	+	122.02	140.30
	-	132.07	146.25
20	+	165.13	179.00
	-	185.15	202.22



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีสรูปคลื่นแบบ SLI,
อิเล็กโตรดแบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบที่ระยะแกป 15 cm



รูปที่ 5.8 ตัวอย่างผลการทดสอบหาค่า $V_{b50\%}$ กรณีสรูปคลื่นแบบ STLI,

อิเล็กโตรดแบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบที่ระยะแกป 15 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรคความถี่เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ในช่องแกปอากาศแบบ ร็อดแกป (Rod Gap) ที่ได้จากการใช้ชุดแท่งอิเล็กโตรครูปทรงแตกต่างกัน ทดสอบที่ระยะแกป 10 cm, 15 cm และ 20 cm ดังตารางที่ 5.1 ถึง 5.3 เราจะสังเกตเห็นว่าค่า $V_{b50\%}$ กรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) รูปคลื่น 1.2/4 μ s จะมีค่าสูงกว่าค่า $V_{b50\%}$ ในกรณียทดสอบ ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (SLI) รูปคลื่น 1.2/50 μ s และค่าแรงดันเบรคความถี่ที่ชั่วพลจะมีค่าสูงกว่าชั่วววกเสมอ ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันทุกระยะแกปและทุกรูปทรงอิเล็กโตรดที่ทำการทดลอง ดังนั้นเพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนขึ้น ในที่นี้จึงนำข้อมูลทั้งหมดมาสรุปเปรียบเทียบค่า $V_{b50\%}$ ของอิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบ ที่แตกต่างกัน ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคความถี่เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของทุกรูปทรงอิเล็กโตรด

แบบ อิเล็กโตรด	ขั้วของ แรงดัน	$V_{b50\%}$ กรณี SLI (kV)			$V_{b50\%}$ กรณี STLI (kV)		
		D = 10 cm	D = 15 cm	D = 20 cm	D = 10 cm	D = 15 cm	D = 20 cm
แท่งกลม	+	92.72	133.21	166.11	98.99	143.43	182.41
หัวโค้งมน	-	93.71	136.38	178.51	101.27	146.05	196.27
แท่งกลม	+	94.03	132.57	175.45	97.78	145.01	181.09
หัวตัดเรียบ	-	95.46	136.29	180.05	101.98	145.87	190.27
แท่งเหลี่ยมจัตุรัส	+	95.60	122.02	165.13	111.80	140.30	179.00
หัวตัดเรียบ	-	100.12	132.07	182.42	109.50	146.25	202.22

ข้อสังเกตเพิ่มเติมจากข้อมูลผลการทดลองในตารางที่ 5.4 จะพบว่าค่าแรงดันเบรคความถี่เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ในช่องแกปอากาศของอิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบ ที่ระยะแกปเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก นั่นอาจหมายความว่ารูปทรงของแท่งอิเล็กโตรดแบบสมมาตร (Symmetry) แทบจะไม่มีผลต่อค่าแรงดันเบรคความถี่ในช่องแกปอากาศแต่อย่างใด ซึ่งสอดคล้องกับผลสรุปในงานวิจัย [32]

เมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $V_{b50\%}$ ($\Delta V_{b50\%}$) กรณียรูปคลื่น 1.2/4 μ s เทียบกับกรณียรูปคลื่น 1.2/50 μ s ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.5 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $V_{b50\%}$ ที่ทุกรูปทรงอิเล็กโตรดจะอยู่ในช่วง 3.21% ถึง 17% โดยกรณียระยะแกป 10 cm อิเล็กโตรดแบบแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบชั่วววกมีค่าความแตกต่างมากที่สุด คือ ประมาณ 17.00% และกรณียระยะแกป 20 cm อิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบชั่วววกจะมีค่าความแตกต่างต่ำสุดที่ประมาณ 3.21%

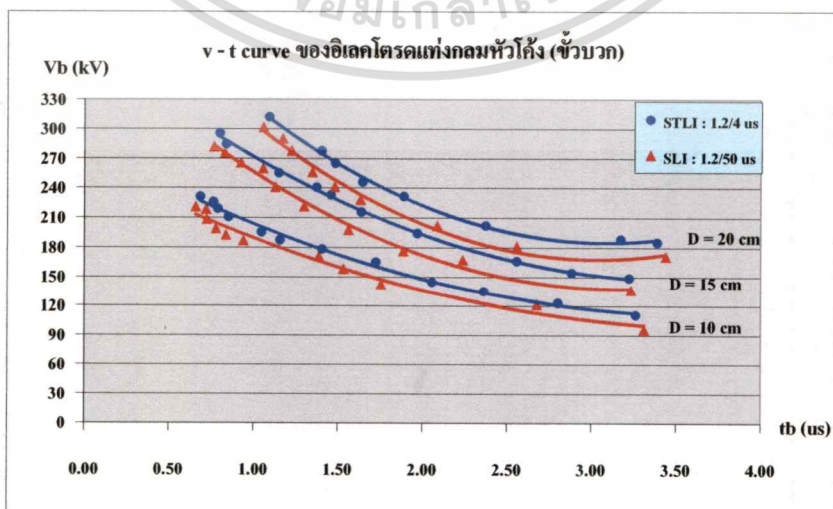
ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $V_{b50\%}$ จากผลการทดลอง

แบบอิเล็กทรอนิกส์	ขั้วของแรงดัน	$\% \Delta V_{b50\%}$		
		D = 10 cm	D = 15 cm	D = 20 cm
แท่งกลมหัวโค้งมน	+	6.76	7.60	9.81
	-	8.06	7.09	9.95
แท่งกลมหัวตัดเรียบ	+	3.99	9.38	3.21
	-	6.83	7.32	5.68
แท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ	+	17.00	14.98	8.39
	-	9.36	10.73	10.85

หมายเหตุ:
$$\% \Delta V_{b50\%} = \left[\frac{V_{b50\%}(STLI) - V_{b50\%}(SLI)}{V_{b50\%}(SLI)} \times 100 \right]$$

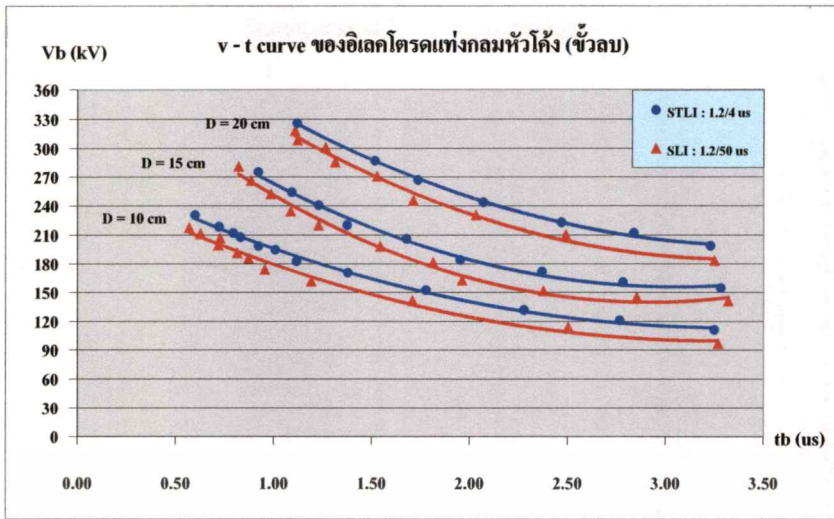
5.1.2 ผลการทดลองหาเส้นกราฟคุณลักษณะ v-t curve

การทดลองหาเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเบรคความ (V_b) กับเวลาที่เกิดเบรคความ (t_b) หรือที่เรียกว่า “เส้นกราฟคุณลักษณะ v-t curve” หรือ “เส้นเขตอิมพัลส์” [21] ของช่องแกปอากาศแบบรีดแกปที่เกิดจากการใช้แท่งอิเล็กทรอนิกส์แบบสมมาตรที่มีลักษณะรูปทรงของแท่งอิเล็กทรอนิกส์แตกต่างกัน ซึ่งระเบียบวิธีการทดลองได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ผลการทดสอบหาเส้นกราฟคุณลักษณะ v - t curve ที่ระยะแกปต่างๆ ของอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 3 แบบ เมื่อทดสอบด้วยแรงดัน STLI รูปคลื่น 1.2/4 μ s เปรียบเทียบกับกรณีแรงดัน SLI รูปคลื่น 1.2/50 μ s ทั้งขั้วบวกและลบ แสดงดังรูปที่ 5.9 ถึง 5.14 [32] ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.15 และ 5.16

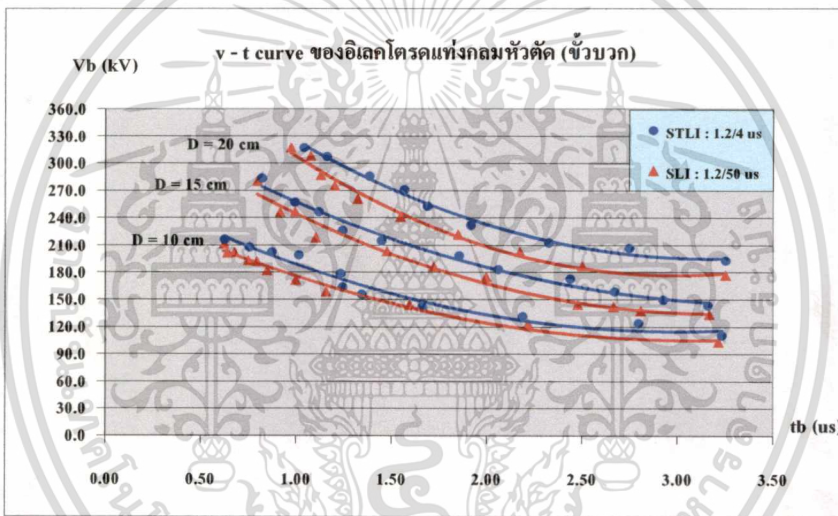


รูปที่ 5.9 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่งกลมหัวโค้งมน ขั้วบวก

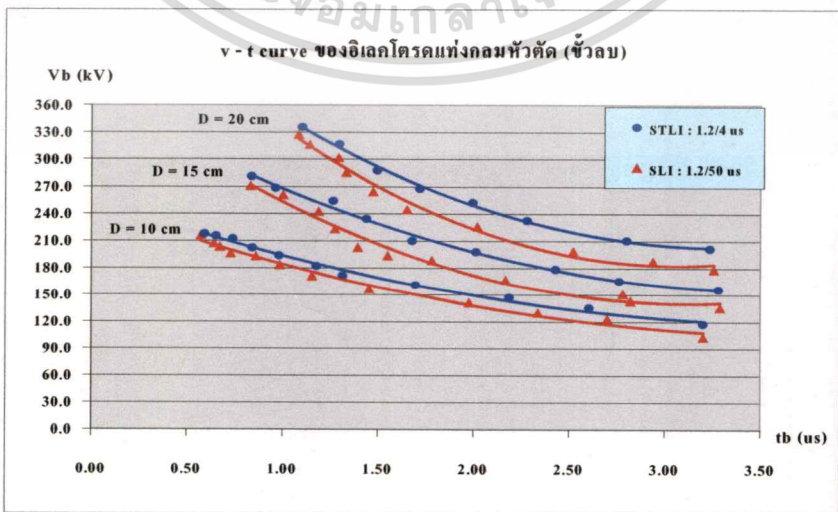
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นใบเซอร์ไอเซนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมน ขั้วลบ

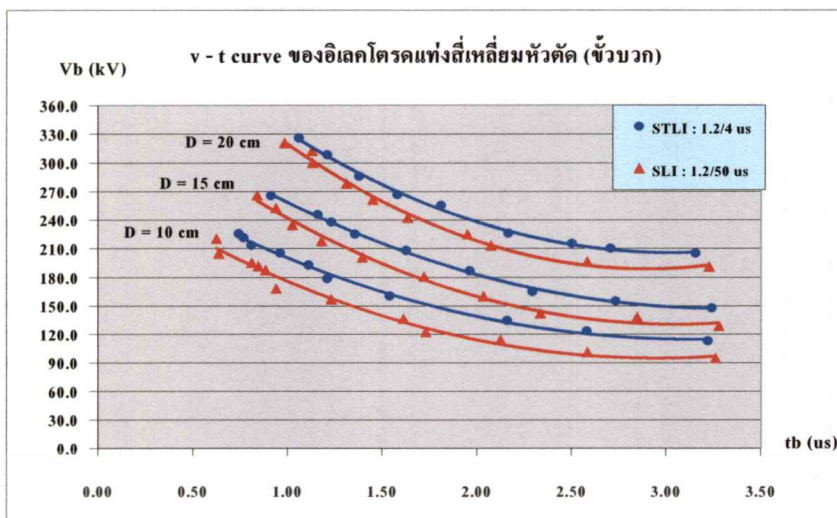


รูปที่ 5.11 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ ขั้วบวก

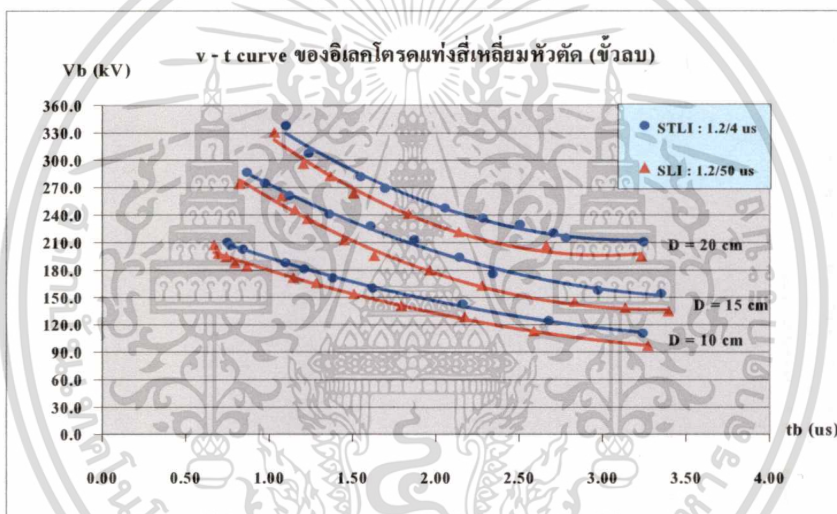


รูปที่ 5.12 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ ขั้วลบ

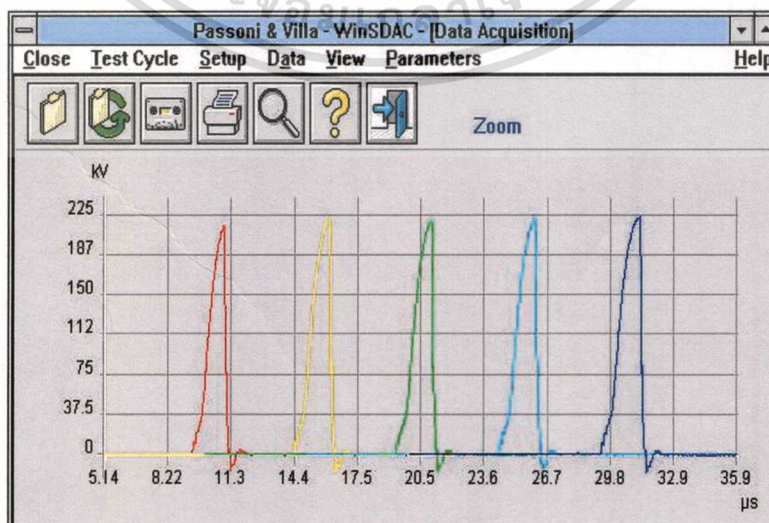
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กโตรดแบบแท่งเหลี่ยมหัวตัดเรียบ หัวบวก

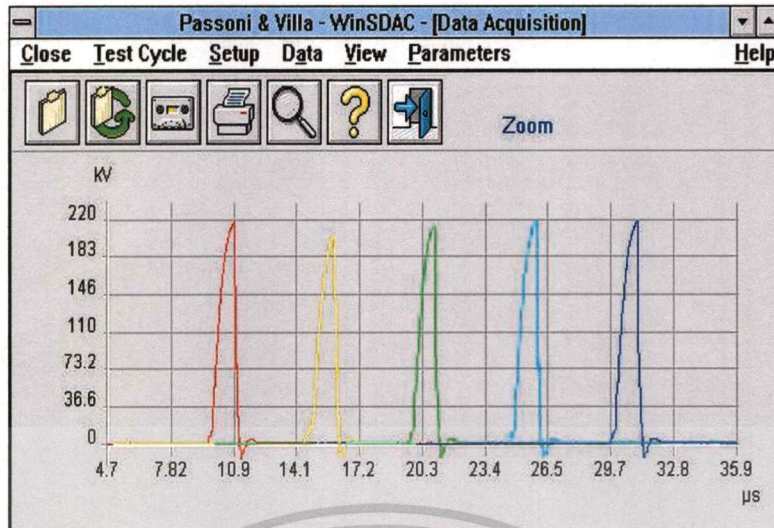


รูปที่ 5.14 เส้นกราฟ v - t curve กรณีอิเล็กโตรดแบบแท่งเหลี่ยมหัวตัดเรียบ หัวลบ



รูปที่ 5.15 รูปคลื่นผลการทดสอบแบบ SLI, 220 kV, อิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวตัด (15 cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้งานด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



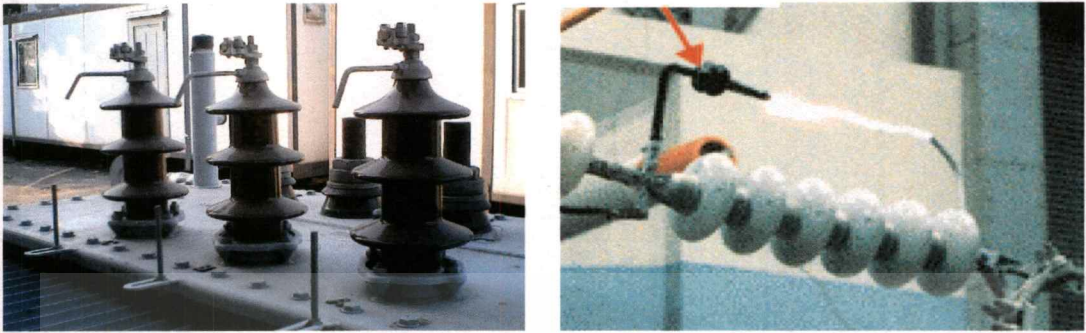
รูปที่ 5.16 รูปคลื่นผลการทดสอบแบบ STLI, 220 kV, อิเล็กโตรดแบบแท่งกลมหัวตัด (15 cm)

จากผลการทดลองหาเส้นกราฟลักษณะ $v-t$ curve ของช่องแก้อากาศภายใต้อิเล็กโตรดสมมาตรรูปทรงแบบต่างๆ ทั้ง 3 ระยะแก๊ป ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.14 พบว่ากรณีการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น $1.2/4 \mu s$ ระดับแรงดันเบรคดาวน์จะมีค่าสูงกว่ากรณีการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (SLI) รูปคลื่น $1.2/50 \mu s$ ทุกรูปแบบอิเล็กโตรดที่ใช้ทดสอบทั้งขั้วบวกและลบ แสดงให้เห็นว่าแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI มีผลกระทบต่อระบบการป้องกันแรงดันเกินที่ใช้การป้องกันด้วยสปาร์กแก๊ปประเภทร็อดแก๊ป (Rod Gap) ซึ่งมีผลทำให้การประสานสัมพันธ์การจนวนของระบบคลาดเคลื่อนไปจากเดิม ส่งผลต่อความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับจนวนของอุปกรณ์ที่ใช้การป้องกันในลักษณะดังกล่าวได้

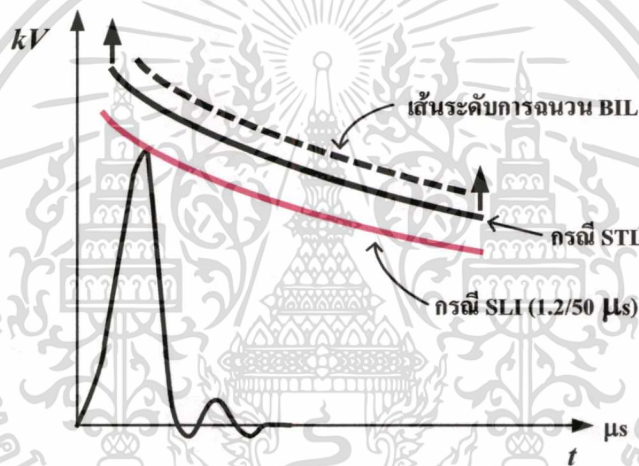
กรณีนี้อาจพิจารณาจากตัวอย่างการป้องกันแรงดันเกินบนอุปกรณ์ด้วยหลักการสปาร์กแก๊ป ดังรูปที่ 5.17 ในทางปฏิบัติการปรับตั้งระยะแก๊ปจะอ้างอิงด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานรูปคลื่น $1.2/50 \mu s$ ลักษณะการจัดประสานสัมพันธ์การจนวนอาจแสดงได้ด้วยเส้นกราฟ $v-t$ curve ดังรูปที่ 5.18 เส้นเขตอิมพัลส์ที่แสดงระดับการจนวนของอุปกรณ์ (BIL) ปกติจะอยู่เหนือระดับเส้นกราฟเบรคดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานของแก๊ปป้องกัน (SLI, $1.2/50 \mu s$) แต่จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ถ้าเกิดแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) เข้ามาในระบบ ระยะแก๊ปป้องกันที่ตั้งไว้เดิมจะไม่สามารถป้องกันแรงดันเกินอิมพัลส์แบบ STLI ที่ระดับแรงดันป้องกันเดิมนี้ได้ กล่าวคือสปาร์กแก๊ปจะไม่ทำงานหรือทำงานที่ระดับแรงดันสูงขึ้นกว่าเดิม นั่นหมายความว่าแรงดันสปาร์กผ่านที่เด็ดลอดเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า จะมีระดับแรงดันที่สูงขึ้นจนเข้าใกล้ระดับการจนวน BIL มากขึ้น และมีโอกาสอย่างมากที่ระดับแรงดันเกินสปาร์กผ่านช่องแก๊ปนี้จะมีค่าสูงกว่าระดับการจนวน BIL ของอุปกรณ์ได้ในที่สุด ถ้าหาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์แบบ STLI ที่เข้ามานั้นมีค่ายอดแรงดันที่สูงมากพอ ซึ่งแรงดันเกิน STLI นี้อาจเป็นสาเหตุหนึ่งของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ติดตั้งใช้งานในระบบปัจจุบัน [17, 32]



รูปที่ 5.17 การป้องกันแรงดันเกินบนอุปกรณ์ด้วย Rod Gap



รูปที่ 5.18 การประสานสัมพันธ์การฉนวนและผลของแรงดัน STLI

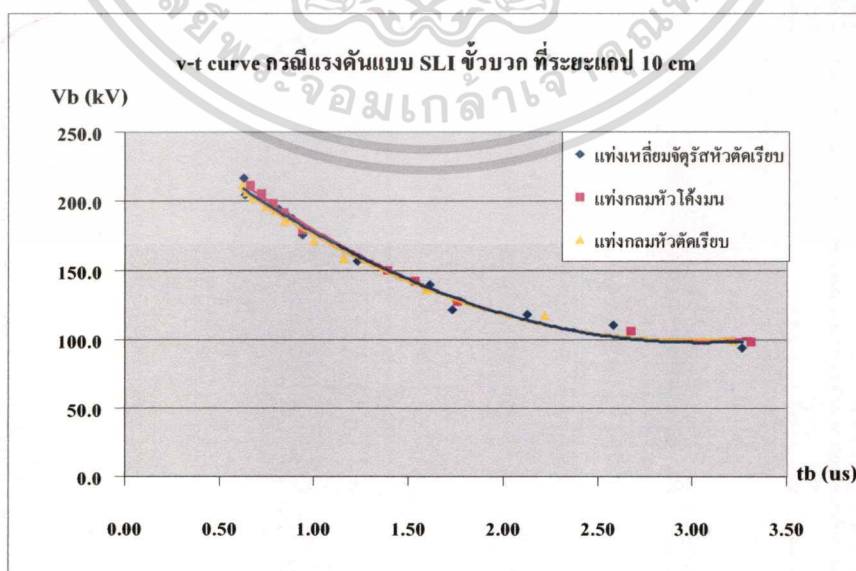
จากข้อมูลผลการศึกษาลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรด (Electrodes Configuration) ต่อลักษณะการเกิดเบรคดาวน์ พบว่าระดับแรงดันเบรคดาวน์ของอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบ มีค่าใกล้เคียงกันมากที่ระยะแกปเดียวกันทั้งกรณีแรงดัน SLI และ STLI แสดงว่ารูปทรงของชุดอิเล็กโทรดแบบแท่งทองเหลืองไม่มีผลต่อการออกแบบใช้งาน ซึ่งข้อมูลผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ A.Carrus [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ศึกษาเปรียบเทียบผลของ v-t curve กรณีรูปทรงอิเล็กโตรดแตกต่างกัน

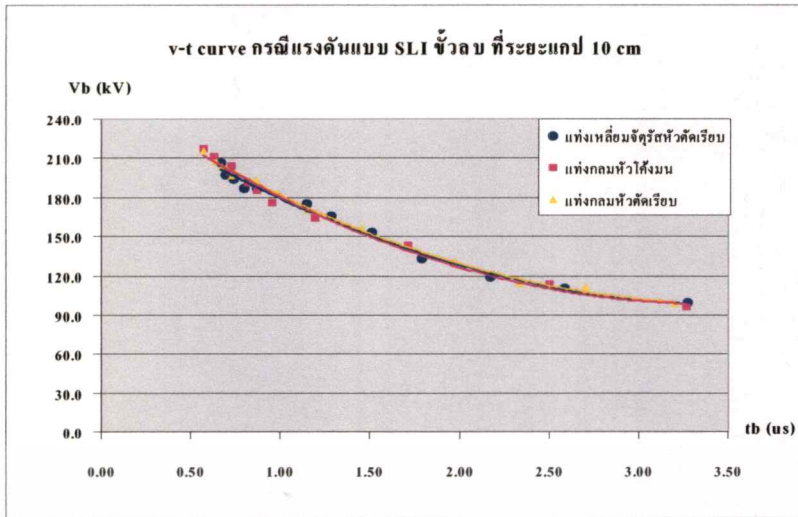
จากผลการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติของช่องแกปอากาศภายใต้ชุดแท่งอิเล็กโตรดสมมาตรที่มีรูปทรงอิเล็กโตรดแตกต่างกัน เราพบว่าค่า $V_{b50\%}$ ของชุดอิเล็กโตรดทั้ง 3 รูปแบบ แทบจะมีค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งกรณีทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบ SLI รูปคลื่น 1.2/50 μs และกรณีทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μs ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.1.1 แสดงว่ารูปทรงอิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบที่ศึกษานี้ไม่มีผลต่อคุณลักษณะการเกิดเบรคดาวน์ในช่องแกปอากาศแบบรีดแกป

แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้แน่ใจได้ว่าลักษณะของรูปทรงอิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบที่ศึกษาไม่มีผลต่อคุณลักษณะการเกิดเบรคดาวน์ในช่องแกปอากาศจริง ในที่นี้จึงลองพิจารณาจากผลการทดสอบหาเส้นกราฟ v-t curve ของช่องแกปอากาศภายใต้อิเล็กโตรดสมมาตรทั้ง 3 แบบอีกครั้ง กรณีที่ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบ SLI รูปคลื่น 1.2/50 μs และกรณีทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μs ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ผลที่ได้แสดงดังเส้นกราฟ v-t curve ในรูปที่ 5.19 ถึง 5.22 [34-35] ซึ่งในที่นี้จะแสดงตัวอย่างผลการเปรียบเทียบเฉพาะกรณีระยะแกป 10 cm เท่านั้น ส่วนกรณีระยะแกปค่าอื่นๆ ก็จะทำให้ผลเป็นไปในทำนองเดียวกัน [32] โดยในรูปที่ 5.19 และ 5.20 เป็นผลการเปรียบเทียบเส้นกราฟ v-t curve ของช่องแกปอากาศภายใต้อิเล็กโตรดสมมาตรทั้ง 3 แบบ ที่ระยะแกปทดสอบ 10 cm ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบ SLI รูปคลื่น 1.2/50 μs ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ส่วนในรูปที่ 5.21 และ 5.22 เป็นผลการเปรียบเทียบเส้นกราฟ v-t curve ของช่องแกปอากาศภายใต้อิเล็กโตรดสมมาตรทั้ง 3 แบบ ที่ระยะแกปทดสอบ 10 cm เหมือนกัน แต่ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μs ทั้งขั้วบวกและขั้วลบเช่นกัน

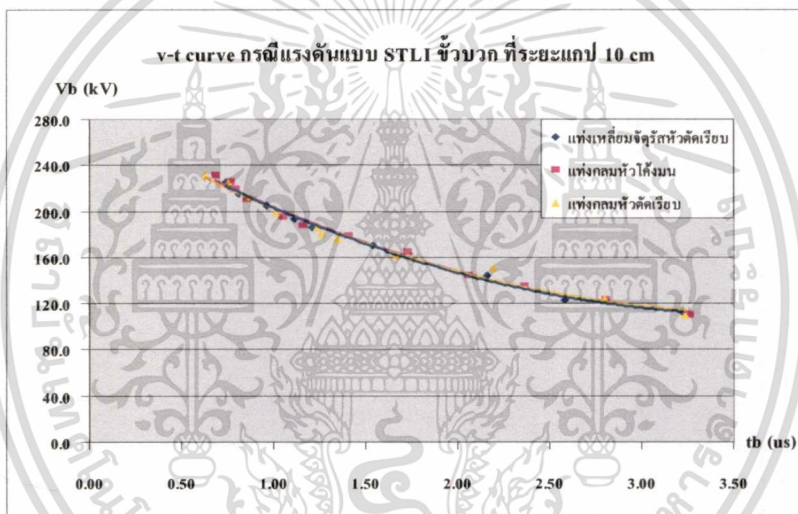


รูปที่ 5.19 ผลการเปรียบเทียบกราฟ v-t curve ทดสอบด้วยแรงดัน SLI ขั้วบวก ที่ระยะแกป 10 cm

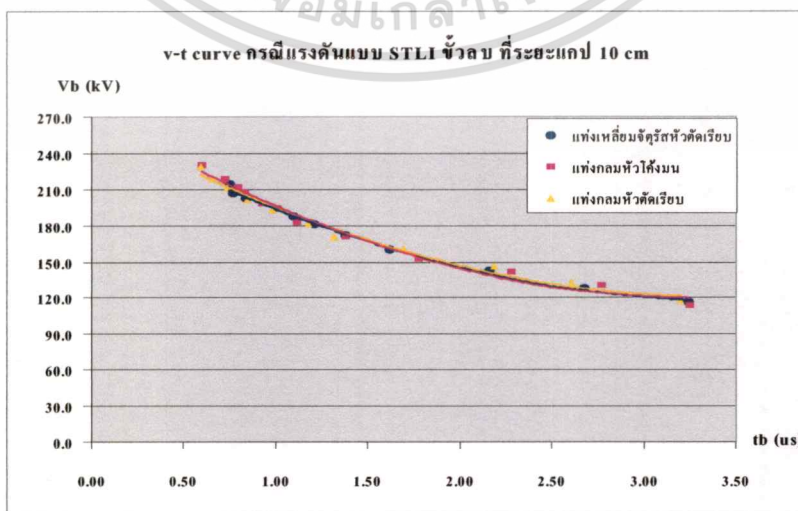
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 ผลการเปรียบเทียบกราฟ v-t curve ทดสอบด้วยแรงดัน SLI ขั้วลบ ที่ระยะแกป 10 cm



รูปที่ 5.21 ผลการเปรียบเทียบกราฟ v-t curve ทดสอบด้วยแรงดัน STLI ขั้วบวก ที่ระยะแกป 10 cm



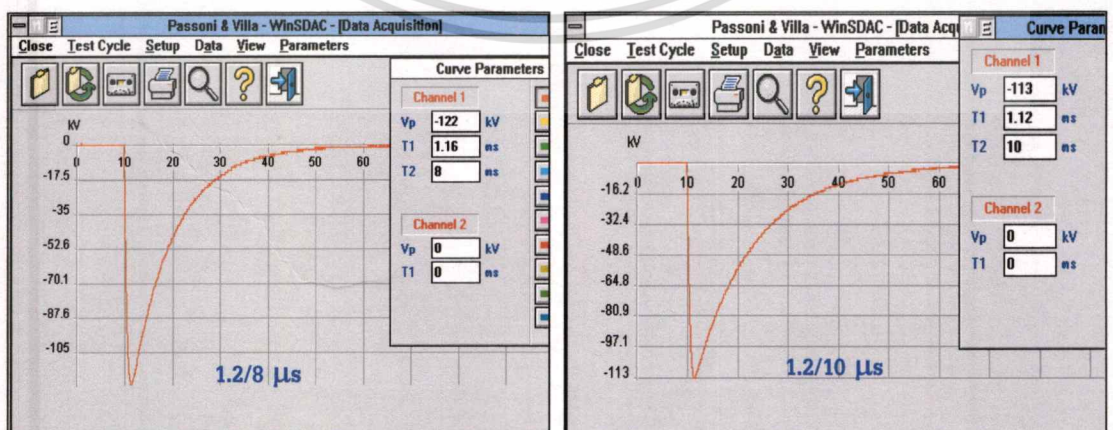
รูปที่ 5.22 ผลการเปรียบเทียบกราฟ v-t curve ทดสอบด้วยแรงดัน STLI ขั้วลบ ที่ระยะแกป 10 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.19 และ 5.22 ผลการทดสอบเปรียบเทียบเส้นกราฟ v-t curve ของช่องแกปอากาศภายใต้ไอเลคโตรดสมมาตรทั้ง 3 แบบ แสดงให้เห็นว่ารูปทรงอิเลคโตรดทั้ง 3 แบบ ที่ศึกษาไม่มีผลต่อคุณลักษณะการเกิดเบรคดาวนในช่องแกปอากาศ เป็นการยืนยันผลที่ได้ในหัวข้อ 5.1.1

5.2 การศึกษาเพิ่มเติมกรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s

จากการศึกษาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μ s ที่ผ่านมาทำให้พบว่าแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI มีผลกระทบต่ออุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่ใช้หลักการคิสซาร์จแรงดันเกินผ่านสปาร์กแกป (Protective Gap) ที่เป็นแบบ Rod Gap ซึ่งมีใช้งานทั่วไปในทางปฏิบัติ ประเด็นการศึกษาเน้นไปที่แรงดันอิมพัลส์แบบ STLI กรณีสรูปคลื่น 1.2/4 μ s โดยอ้างอิงข้อมูลตามรายงานผลการศึกษาวิจัยของ [10-13] และ [16-17] เป็นเกณฑ์ แต่จากผลการศึกษาของ [24] พบว่าบางครั้งการเกิดควาบไฟย้อนกลับ (Back Flashover) จากการคิสซาร์จผ่าน Arcing Horn บนพวงฉนวนลูกถ้วยแขวนที่มีระยะแกปกว้างๆ เช่น พวงฉนวนลูกถ้วยแขวนในระบบสายส่ง 500 kV อาจทำให้ช่วงเวลาทางคลื่นยาวขึ้นมากกว่า 4 μ s และเป็นไปได้ที่จะใช้เวลายาวนานถึง 10 μ s หากมีปัจจัยเอื้ออำนวย [16] ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่สมบูรณ์ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงได้ทดลองศึกษาเพิ่มเติมในกรณีแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI จำนวน 2 รูปคลื่น ได้แก่ รูปคลื่น 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดการออกแบบสร้างแหล่งจ่ายแรงดัน STLI ทั้ง 2 รูปคลื่นนี้แล้วในบทที่ 3 ที่ผ่านมา ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดัน STLI แบบ 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ที่ออกแบบสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง แสดงดังรูปที่ 5.23 ซึ่งจะทำการทดลองซ้ำกับชุดแท่งอิเลคโตรดแบบสมมาตรทั้ง 3 รูปทรง ที่ระยะแกป 10 cm, 15 cm และ 20 cm เช่นเดิม โดยทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวนเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) และหาเส้นกราฟคุณลักษณะ v-t curve ของทุกระยะแกป ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ รายละเอียดสามารถดูได้จากเอกสารอ้างอิงที่ [35]



รูปที่ 5.23 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดัน STLI แบบ 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s (ขั้วลบ)

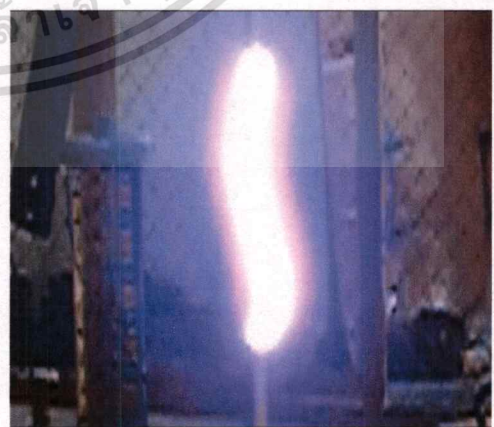
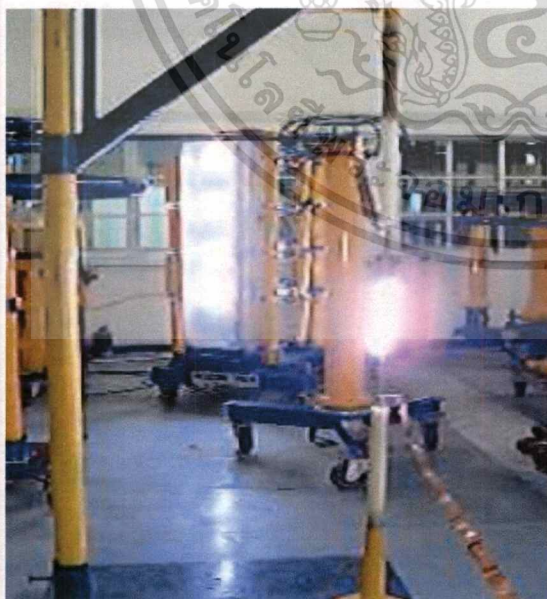
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความถี่เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$)

การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความถี่เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) กรณีสรูปคลื่นแรงดันแบบ 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ใช้ระเบียบวิธีเดียวกันกับในกรณีสรูปคลื่นแบบ 1.2/4 μ s ที่ผ่านมา ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 5.6 [35] ส่วนรูปที่ 5.24 แสดงลักษณะการเกิดเบรคความถี่ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดทดสอบ เมื่อทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งจะสังเกตเห็นลำอาร์คอย่างชัดเจน ตัวอย่างรูปคลื่นผลการทดลองในกรณีต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.25 ถึง 3.30

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรคความถี่เชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของอิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบ

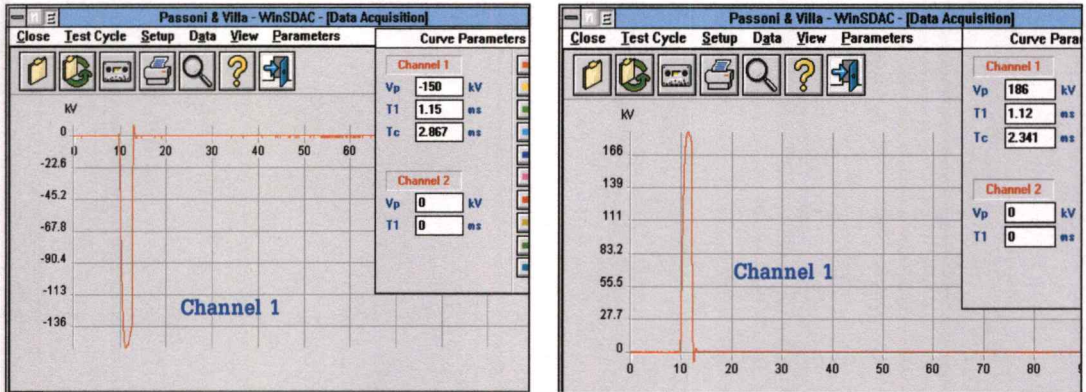
แบบอิเล็กโตรด	ขั้ว	แรงดันเบรคความถี่เชิงสถิติ (kV)					
		STLI 1.2/8 μ s			STLI 1.2/10 μ s		
		d=10 cm	d=15 cm	d=20 cm	d=10 cm	d=15 cm	d=20 cm
แท่งกลม	+	94.83	144.80	187.15	97.91	147.36	184.70
	-	103.09	148.42	187.86	100.02	147.06	185.26
หัวตัดเรียบ	+	95.85	143.11	169.25	99.46	139.82	163.72
	-	104.99	147.69	185.22	110.58	141.71	181.71
แท่งเหลี่ยมจัตุรัส	+	90.86	141.71	167.56	89.54	142.08	169.79
	-	102.42	145.02	184.76	115.24	144.57	178.34



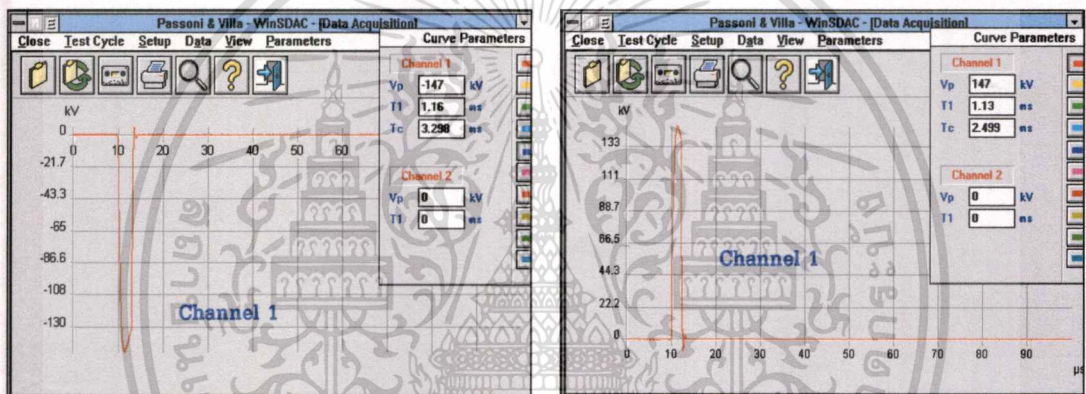
รูปที่ 5.24 ลักษณะการเกิดเบรคความถี่ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดทดสอบที่ระยะแกป 15 cm

หมายเหตุ: ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลแบบบันทึกภาพต่อเนื่องได้ ด้วยความละเอียด 5 M pixels ขณะเกิดเบรคความถี่อย่างสมบูรณ์ ทำให้สามารถมองเห็นลำอาร์คควาไฟอย่างต่อเนื่อง

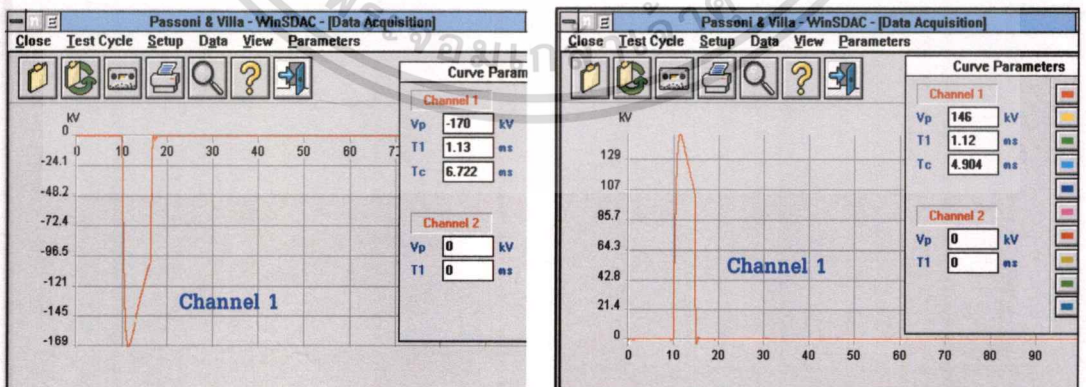
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคความถี่ของอิเล็กโตรดแท่งกลมหัวตัดเรียบ ที่ระยะแกป 20 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/8 μ s ขั้วลบและขั้วบวก



รูปที่ 5.26 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคความถี่ของอิเล็กโตรดแท่งกลมหัวตัดเรียบ ที่ระยะแกป 15 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/10 μ s ขั้วลบและขั้วบวก



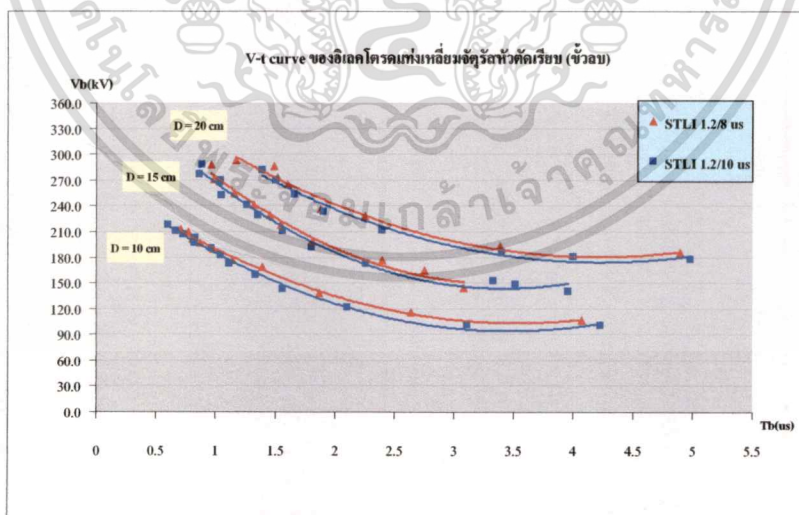
รูปที่ 5.27 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคความถี่ของอิเล็กโตรดแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ ที่ระยะแกป 15 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/8 μ s ขั้วลบและขั้วบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองหาค่า $V_{b50\%}$ ของช่องแกปอากาศภายใต้ชุดแท่งอิเล็กโตรดสมมาตรทั้ง 3 ลักษณะทุกระยะแกปที่ทดลอง พบว่าแนวโน้มของค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยกรณีของแรงดัน STLI แบบ 1.2/8 μs จะให้ค่า $V_{b50\%}$ สูงกว่ากรณีแรงดัน STLI แบบ 1.2/10 μs ทุกรูปทรงอิเล็กโตรดและทุกระยะแกปที่ทดสอบ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าที่ระยะแกปเดียวกันค่าแรงดัน $V_{b50\%}$ ของอิเล็กโตรดทุกรูปทรงจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่ารูปทรงอิเล็กโตรดที่ศึกษาทั้ง 3 ลักษณะ ไม่มีผลต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์ในช่องแกปอากาศ ผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดนี้ สอดคล้องกันกับกรณีการทดสอบด้วยแรงดัน STLI แบบ 1.2/4 μs ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

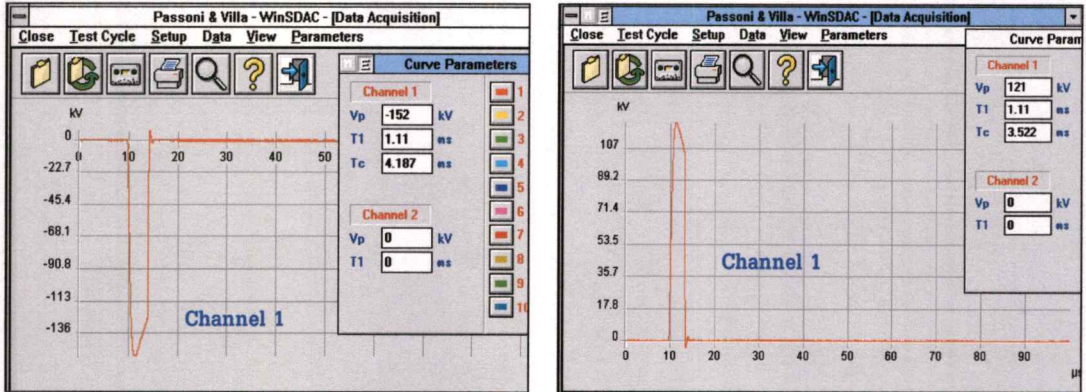
5.2.2 ผลการทดลองหาเส้นกราฟคุณลักษณะ v-t curve

วิธีการทดสอบหาเส้นกราฟคุณลักษณะ v-t curve อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [9] โดยใช้กระบวนการทดลองแบบเดียวกันกับในกรณีทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/4 μs ที่ผ่านมา ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.31 ถึง 5.36 ตามลำดับ [35] พบว่าผลการทดลองที่ได้เป็นไปในทำนองเดียวกันกับกรณีการทดสอบด้วยแรงดัน STLI รูปคลื่น 1.2/4 μs โดยระดับแรงดันเบรคดาวน์กรณีรูปคลื่น 1.2/8 μs จะมีแนวโน้มสูงกว่ากรณีรูปคลื่น 1.2/10 μs ซึ่งจะได้นำผลการทดลองนี้ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลองในกรณีรูปคลื่น 1.2/4 μs และรูปคลื่นฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs อีกครั้งในบทสรุป

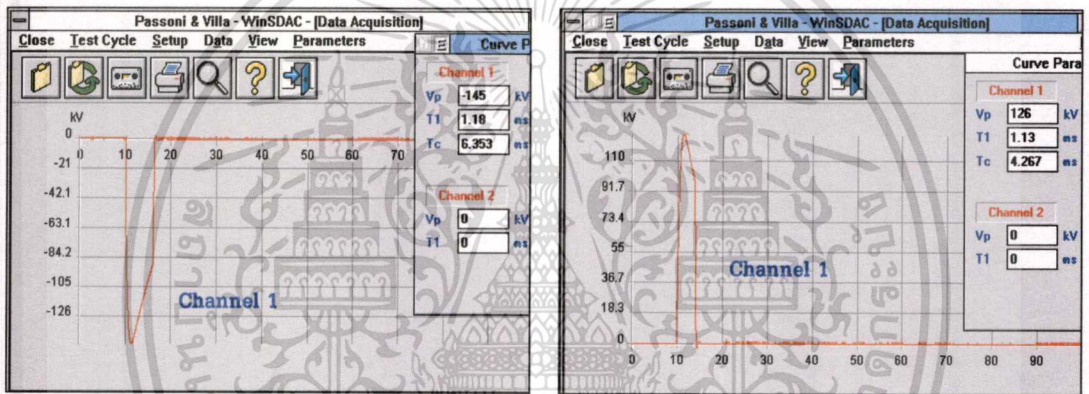


รูปที่ 5.31 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดแท่งเหลี่ยมจตุรัสหัวตัดเรียบ (ขั้วลบ)

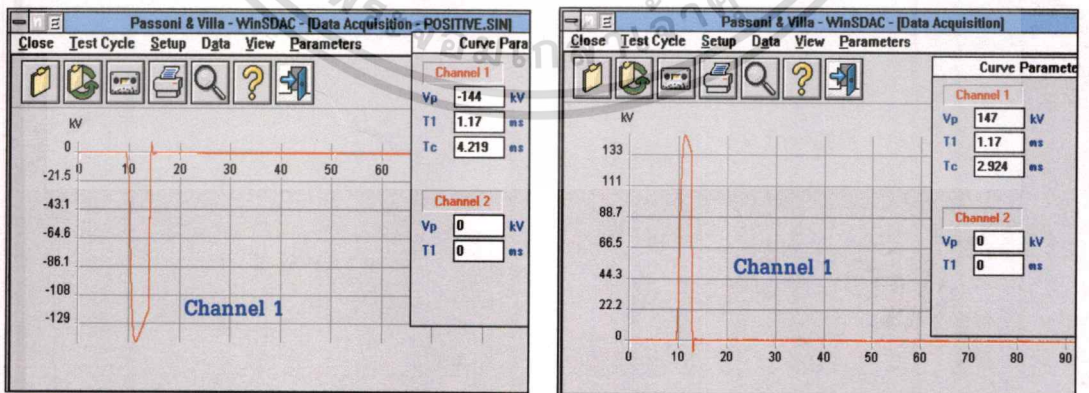
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคความถี่ของอิลেকโตรดแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ ที่ระยะแกป 15 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/10 μ s ขั้วลบและขั้วบวก

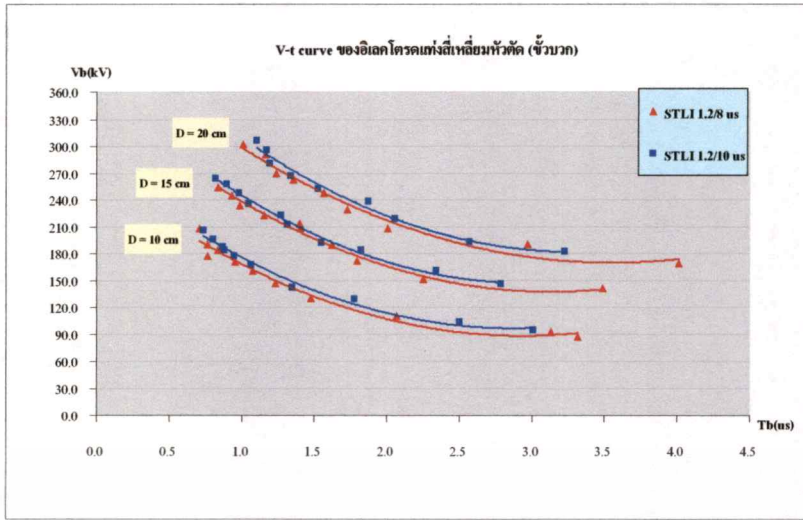


รูปที่ 5.29 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคความถี่ของอิลেকโตรดแท่งกลมหัวโค้งมน ที่ระยะแกป 15 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/8 μ s ขั้วลบและขั้วบวก

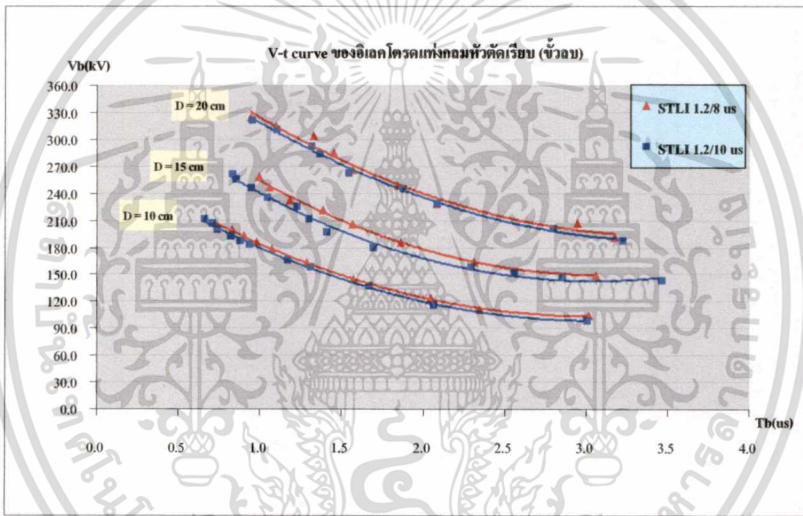


รูปที่ 5.30 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันเบรคความถี่ของอิลেকโตรดแท่งกลมหัวโค้งมน ที่ระยะแกป 15 cm เมื่อจ่ายแรงดัน STLI 1.2/10 μ s ขั้วลบและขั้วบวก

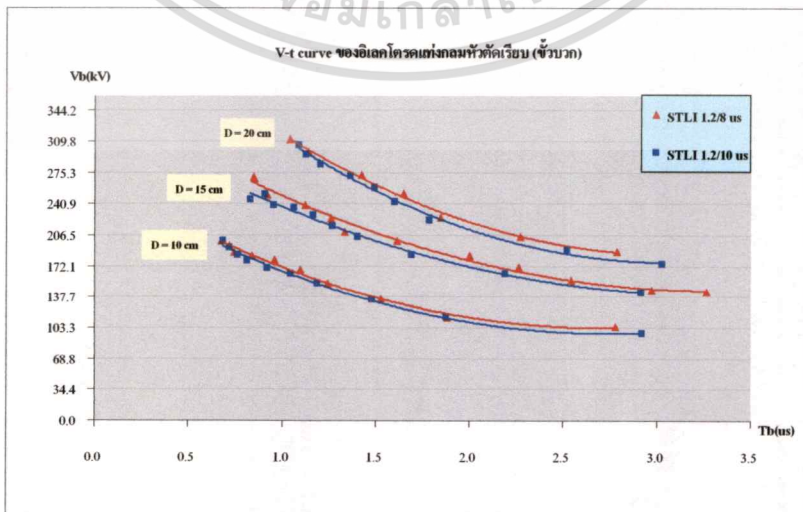
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.32 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดแท่งเหลี่ยมหัวตัดเรียบ (ข้าวบวก)

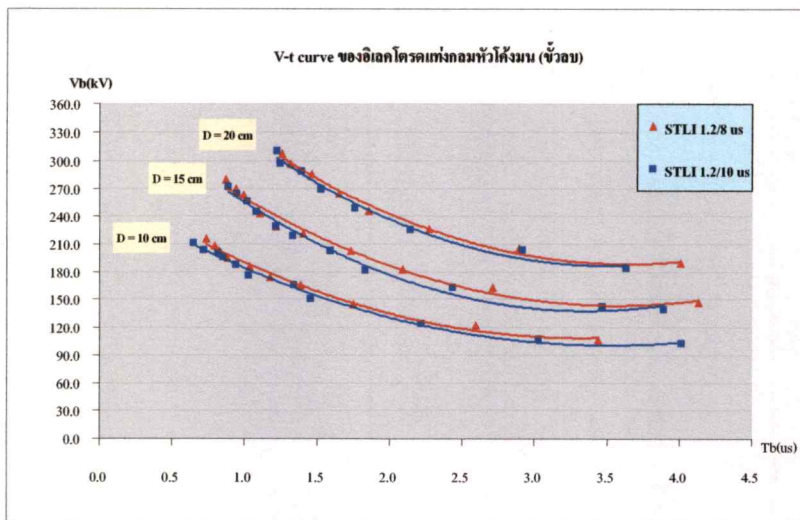


รูปที่ 5.33 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดแท่งกลมหัวตัดเรียบ (ข้าวลบ)

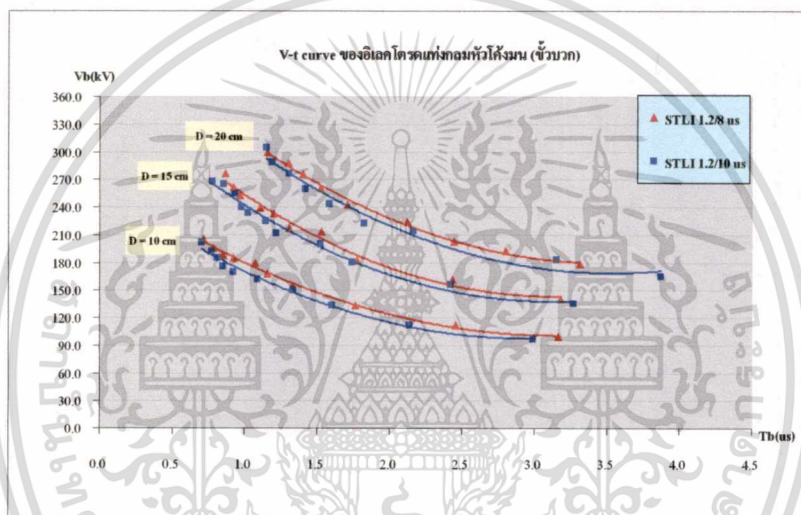


รูปที่ 5.34 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดแท่งกลมหัวตัดเรียบ (ข้าวบวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.35 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดทรงกลมหัวโค้งมน (หัวกลบ)



รูปที่ 5.36 เส้นกราฟ v-t curve กรณีอิเล็กโตรดทรงกลมหัวโค้งมน (หัวบวม)

5.3 ผลการศึกษาเพิ่มเติมกรณีทดสอบกับอุปกรณ์กับดักฟ้าผ่า (Lightning Arresters)

การทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาเพิ่มเติมนอกเหนือจากขอบเขตการวิจัยที่กำหนดไว้เดิม ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ STLI แบบ 1.2/4 μs , 1.2/8 μs และ 1.2/10 μs เปรียบเทียบกับกรณีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs วิธีการทดสอบอ้างอิงตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60099-4 [33] โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์จ่ายแรงดันทดสอบให้กับตัวอุปกรณ์กับดักฟ้าผ่าหรือตัวกับดักเสิร์จ (Surge Arresters) ซึ่งในที่นี้เป็นการศึกษาขั้นต้นกับอุปกรณ์ตัวอย่างเพียง 2 รุ่น เพื่อนำข้อมูลผลการทดสอบที่ได้มาใช้ประกอบการพิจารณาในการศึกษาวิจัย อุปกรณ์ตัวอย่างทั้ง 2 รุ่น ดังกล่าว ประกอบด้วย Surge Arresters รุ่น LAZ-P24 มีพิกัดแรงดันใช้งานที่ 24 kV และ รุ่น LAZ-P21 มีพิกัดแรงดันใช้งานที่ 21 kV การทดลองในที่นี้จะพิจารณา

เฉพาะการทดสอบในส่วนของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น หรือที่เรียกว่า “Non-Linear Resistor Test” ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 [33] แนะนำไว้

5.3.1 วิธีการทดสอบแบบ Non-Linear Metal Oxide Arrester Test

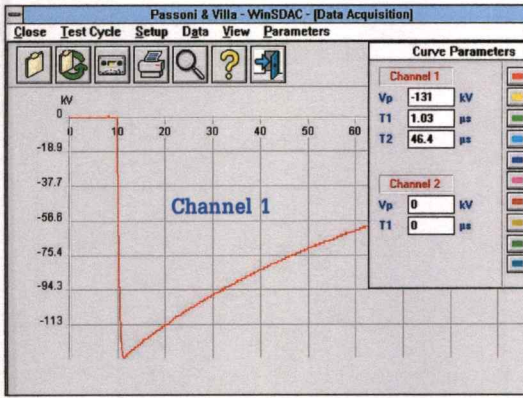
การทดสอบแบบนี้กระทำโดยการแกะโครงสร้างฉนวนหุ้มภายนอก (Unit Housing) ของอุปกรณ์กับดักเสิร์จออก ดังรูปที่ 5.37 และให้ทำการทดสอบเฉพาะตัวต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้นภายในเท่านั้น (ทดสอบเฉพาะตัว Metal Oxide Box) ในสภาวะอากาศเปิด (Open air) ด้วยการจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งหมด 20 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่างทดสอบทั้งชั่วคราวและชั่วคราว โดยขนาดของแรงดันที่ใช้ป้อน เพื่อทดสอบแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ ป้อนด้วยแรงดันขนาด 1 เท้า และ 2 เท้า ของค่าระดับการฉนวน BIL ของตัวอุปกรณ์กับดักเสิร์จ แรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนเพื่อทดสอบทั้ง 20 ครั้ง (Shot) ให้แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม (Group) โดยแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยการป้อนแรงดันอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง 5 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะต้องทิ้งช่วงเวลาให้ห่างกัน (Time Interval) ประมาณ 50 – 60 วินาที และให้ทิ้งช่วงเวลากการป้อนแรงดันอิมพัลส์แต่ละกลุ่มห่างกันประมาณ 25 – 30 นาที

เกณฑ์การพิจารณาผลการทดสอบให้พิจารณาจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเหลือค้าง (Residual Voltage) และกระแสดีสชาร์จ (Discharge Current) เมื่อได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s เปรียบเทียบกับกรณีได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI ทั้งแบบรูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ตามลำดับ ตัวอย่างลักษณะแรงดันอิมพัลส์ที่จะใช้ป้อนเพื่อทดสอบ แสดงดังรูปที่ 5.38 และ 5.39

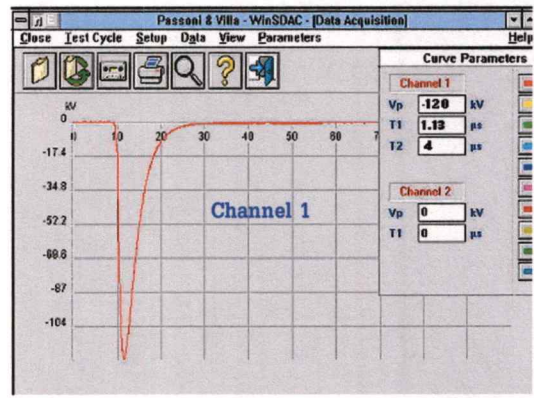


รูปที่ 5.37 Non-Linear Metal Oxide Resistor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

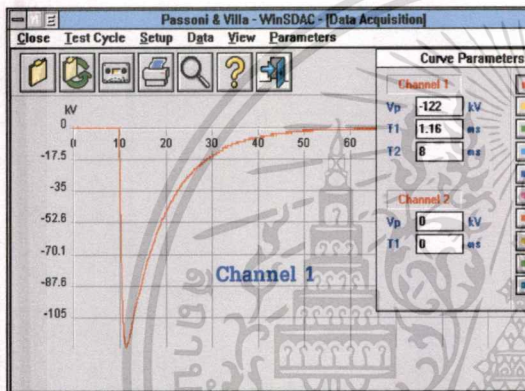


ก) รูปคลื่น SLI 1.2/50 μ s

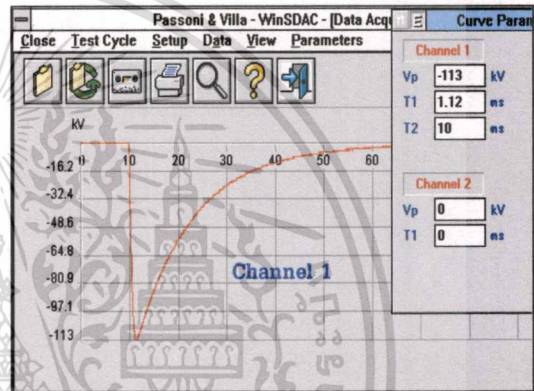


ข) รูปคลื่น STLI แบบ 1.2/4 μ s

รูปที่ 5.38 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบ (ขั้วลบ)



ก) รูปคลื่น STLI แบบ 1.2/8 μ s

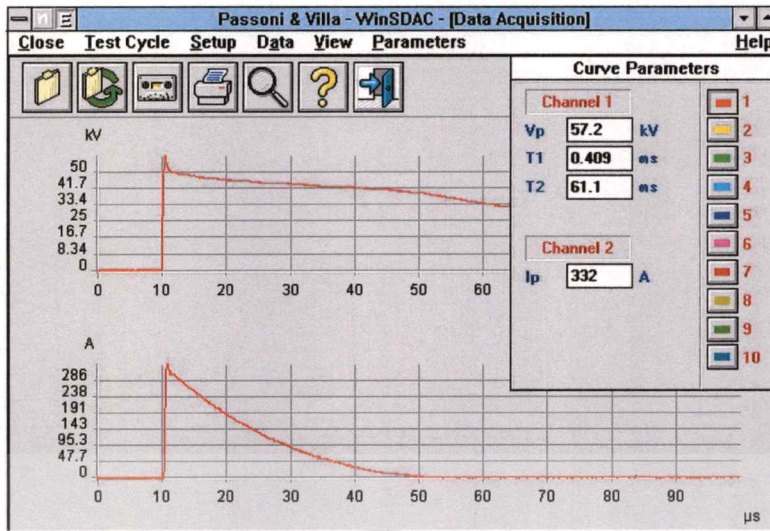


ข) รูปคลื่น STLI แบบ 1.2/10 μ s

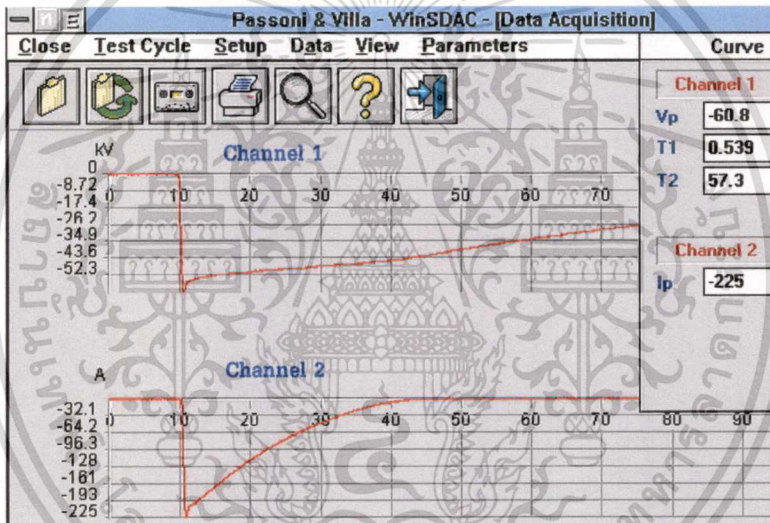
รูปที่ 5.39 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบ (ขั้วลบ)

5.3.2 ผลการทดสอบ Surge Arrester รุ่น LAZ-P24 (24 kV)

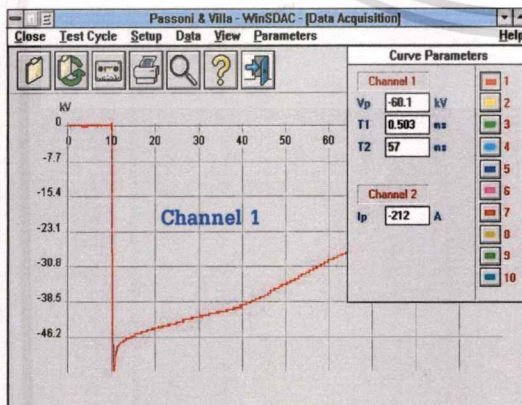
ลักษณะวงจรการทดสอบอุปกรณ์กับดักเล็กรังแสดงในรูปที่ 4.3 ในบทที่ 4 และวิธีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 3.29 ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นด้วยการป้อนแรงดัน SLI รูปคลื่น 1.2/50 μ s ที่ขนาดแรงดันทดสอบ 94 kV (1 เท่าของ BIL) และเพิ่มขนาดแรงดันทดสอบเป็น 188 kV (2 เท่า) ทดสอบทั้งขั้วบวกและขั้วลบ จากนั้นจึงตามด้วยการป้อนแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI รูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s ที่ขนาดแรงดันทดสอบค่าเดียวกัน ตามลำดับ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเหลือค้างและกระแสดีสชาร์จเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีทดสอบด้วยแรงดัน STLI และการทดสอบด้วยแรงดัน SLI ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.7 ส่วนตัวอย่างสัญญาณ Residual Voltage และ Discharge Current แสดงดังรูปที่ 5.40 ถึง 5.45 ในแต่ละกรณีที่ทำการทดสอบ [35]



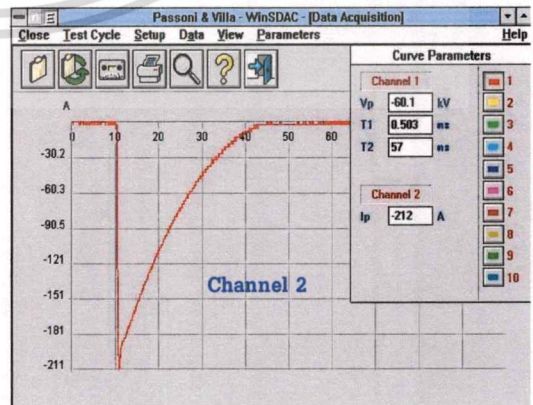
รูปที่ 5.40 ผลการทดสอบด้วยการจ่ายแรงดัน SLI 1.2/50 μ s ขนาด 94 kV ขั้วบวก รุ่น LAZ-P24



รูปที่ 5.41 ผลการทดสอบด้วยการจ่ายแรงดัน SLI 1.2/50 μ s ขนาด 94 kV ขั้วลบ รุ่น LAZ-P24

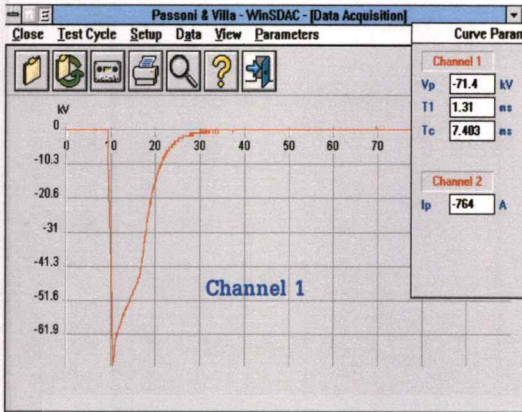


ก) Residual Voltage, Channel 1

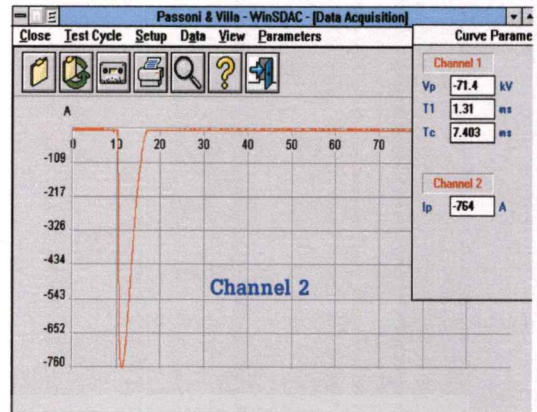


ข) Discharge Current, Channel 2

รูปที่ 5.42 ผลการทดสอบรุ่น LAZ-P24 ด้วยการจ่ายแรงดัน SLI 1.2/50 μ s ขนาด 188 kV ขั้วลบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

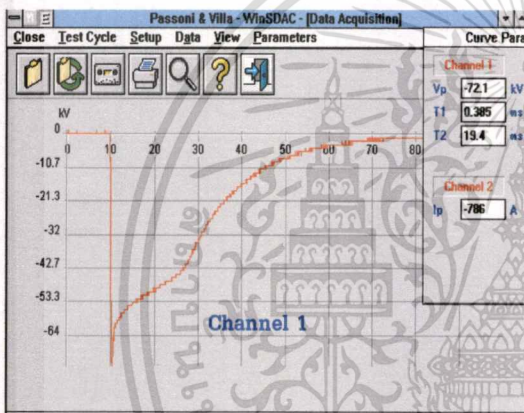


ก) Residual Voltage, Channel 1

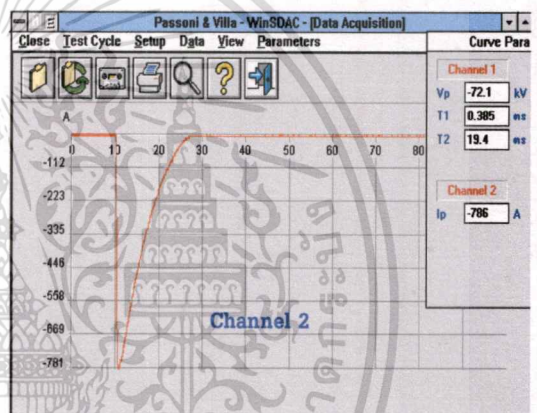


ข) Discharge Current, Channel 2

รูปที่ 5.43 ผลการทดสอบรูน LAZ-P24 ด้วยการจ่ายแรงดัน STLI 1.2/4 μ s ขนาด 188 kV ขั้วลบ

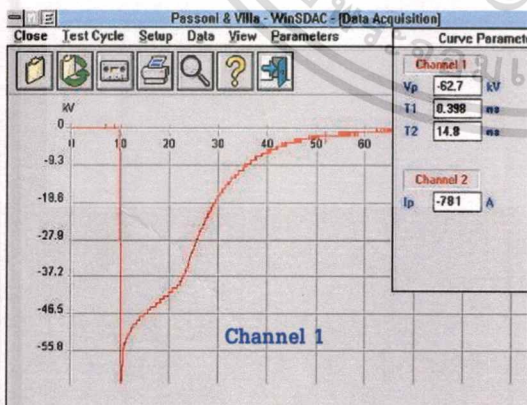


ก) Residual Voltage, Channel 1

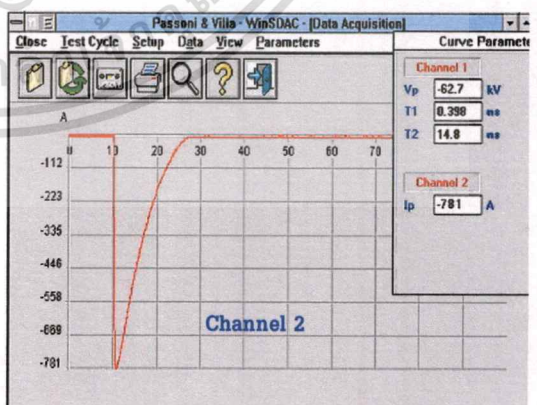


ข) Discharge Current, Channel 2

รูปที่ 5.44 ผลการทดสอบรูน LAZ-P24 ด้วยการจ่ายแรงดัน STLI 1.2/8 μ s ขนาด 188 kV ขั้วลบ



ก) Residual Voltage, Channel 1



ข) Discharge Current, Channel 2

รูปที่ 5.45 ผลการทดสอบรูน LAZ-P24 ด้วยการจ่ายแรงดัน STLI 1.2/10 μ s ขนาด 188 kV ขั้วลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบ Surge Arrester รุ่น LAZ-P24 ด้วยการจ่ายแรงดันทดสอบแบบต่างๆ

Surge Arrester Lightning Impulse Test Results									
Manufacturer & Model : Precise LAZ-P24					Date/time : 9/03/2004				
Rated Voltage : 24 kV					Nominal Discharge Current : 5 kA				
Temperature (°C) : 31					Pressure (mmHg) : 769				
% Humidity : 59					Ref. Standard : IEC 60099-4 (2001)				
Standard 1.2/50 μ s									
Test Voltage (kV)	Residual Voltage (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Discharge Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	
94	+	60.68	0.394	58.07	0.236	269.3	0.408	10.258	0.244
	-	61.65	0.404	57.87	0.242	273.4	0.403	10.468	0.241
188	+	73.76	0.326	59.24	0.195	792.6	0.443	10.542	0.265
	-	74.84	0.336	59.46	0.201	801.2	0.448	10.634	0.268
Non Standard 1.2/4 μ s									
94	+	61.63	0.410	10.84	0.245	278.4	0.398	2.884	0.238
	-	62.84	0.425	10.96	0.254	280.5	0.412	2.952	0.247
188	+	72.83	0.392	13.28	0.234	846.3	0.465	4.351	0.278
	-	73.54	0.410	14.34	0.245	862.4	0.472	4.526	0.282
Non Standard 1.2/8 μ s									
94	+	60.54	0.451	11.22	0.270	270.4	0.404	3.247	0.242
	-	61.66	0.511	11.30	0.305	276.8	0.415	3.483	0.248
188	+	71.72	0.345	14.82	0.210	821.2	0.474	4.953	0.284
	-	72.84	0.375	14.96	0.224	823.4	0.492	4.994	0.295
Non Standard 1.2/10 μ s									
94	+	59.16	0.574	14.40	0.343	222.0	0.415	3.639	0.248
	-	60.25	0.574	14.27	0.343	232.1	0.448	3.817	0.256
188	+	69.86	0.334	15.64	0.200	816.4	0.466	4.852	0.279
	-	70.54	0.376	15.76	0.225	818.6	0.476	4.876	0.285

หมายเหตุ : ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยตามภาคผนวก ค

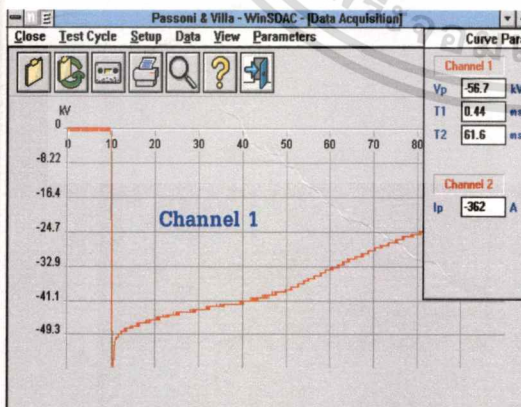
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบด้วยการจ่ายแรงดัน STLI และ SLI ที่ระดับแรงดันทดสอบค่าเดียวกัน พบว่า Surge Arrester จะตัดแรงดันเกินที่ระดับแรงดัน Residual Voltage ใกล้เคียงกัน และขนาดกระแสดีสชาร์จ (Discharge Current) ยังมีค่าใกล้เคียงกันอีกด้วย เมื่อเพิ่มระดับแรงดันทดสอบเป็น 2 เท่า ผลที่ได้ก็ยังคงเป็นเช่นเดิม หากพิจารณาช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันและกระแสจะพบว่าในกรณีของแรงดัน STLI ช่วงเวลาคงอยู่ของกระแสและแรงดัน ใช้มีช่วงเวลาที่สั้นลง เมื่อเทียบกับกรณีแรงดัน SLI รูปคลื่น 1.2/50 μ s โดยมีแนวโน้มว่ายิ่งเวลาทางคลื่นสั้นลงเท่าใดก็ยิ่งใช้เวลาสั้นลงตามด้วย

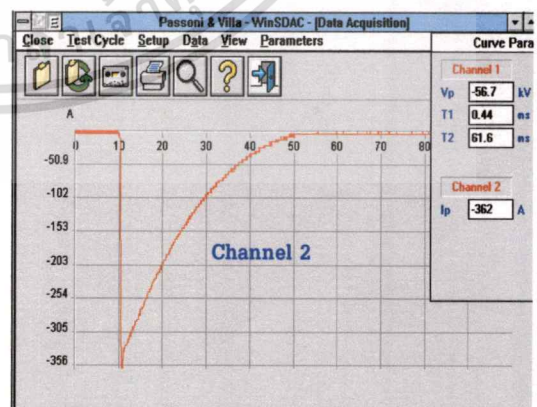
5.3.3 ผลการทดสอบ Surge Arrester รุ่น LAZ-P21 (21 kV)

ขั้นตอนการทดสอบเหมือนกันกับกรณีการทดสอบรุ่น LAZ-P24 ต่างกันตรงขนาดแรงดันทดสอบที่ป้อน ในกรณีนี้จะใช้ขนาดแรงดันเป็น 82.3 kV (BIL) และเพิ่มขึ้นเป็น 164.6 kV (2 เท่า) ทั้งชั่ววอกและลบ ตามลำดับ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเหลือค้างและกระแสดีสชาร์จเปรียบเทียบกับระหว่างกรณีทดสอบด้วยแรงดัน STLI และการทดสอบด้วยแรงดัน SLI ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.8 โดยมีตัวอย่างสัญญาณ Residual Voltage และ Discharge Current แสดงดังรูปที่ 5.45 ถึง 5.49 ในแต่ละกรณีที่ทำการทดสอบ [35]

จากการทดสอบจ่ายแรงดัน STLI และ SLI ที่ระดับแรงดันทดสอบเดียวกัน ดังตารางที่ 5.8 พบว่า Surge Arrester จะตัดแรงดันเกินที่ระดับแรงดันมีค่า Residual Voltage ใกล้เคียงกันและขนาดกระแสดีสชาร์จ (Discharge Current) ยังมีค่าใกล้เคียงกันอีกด้วย เมื่อเพิ่มระดับแรงดันทดสอบเป็น 2 เท่า ผลที่ได้ก็ยังคงเป็นเช่นเดิม หากพิจารณาช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันและกระแสจะพบว่าในกรณีของแรงดัน STLI ช่วงเวลาคงอยู่ของกระแสและแรงดัน ใช้มีช่วงเวลาที่สั้นลง เมื่อเทียบกับกรณีแรงดัน SLI รูปคลื่น 1.2/50 μ s โดยมีแนวโน้มว่ายิ่งเวลาทางคลื่นสั้นลงเท่าใดก็ยิ่งใช้เวลาสั้นลงตามด้วย

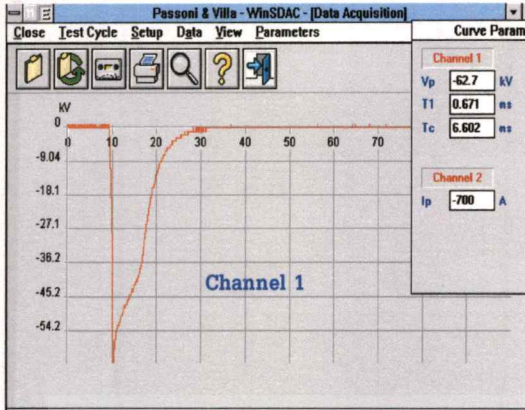


ก) Residual Voltage, Channel 1

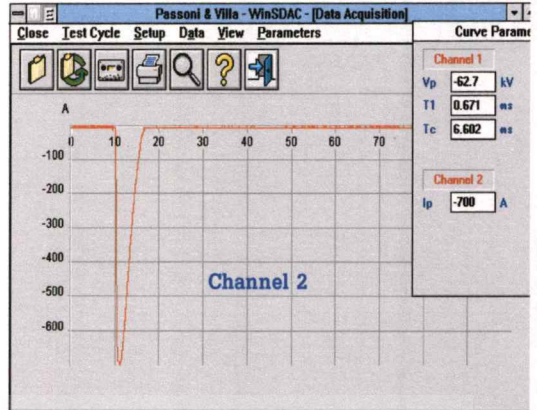


ข) Discharge Current, Channel 2

รูปที่ 5.46 ผลการทดสอบรุ่น LAZ-P21 แรงดันทดสอบ SLI 1.2/50 μ s ขนาด 164.6 kV ชั่วลบ

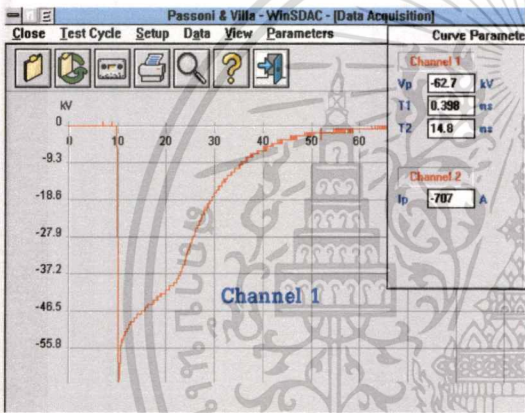


ก) Residual Voltage, Channel 1

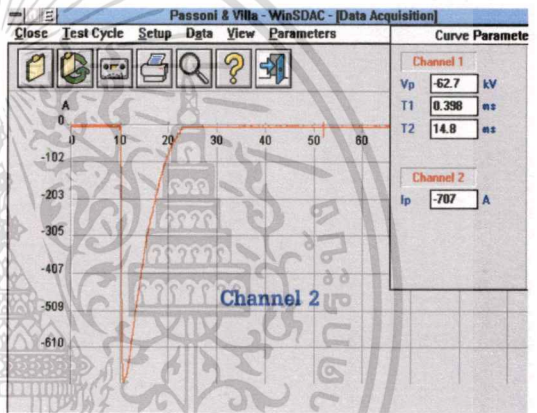


ข) Discharge Current, Channel 2

รูปที่ 5.47 ผลการทดสอบรูนัน LAZ-P21 แรงดันทดสอบ STLI 1.2/4 μ s ขนาด 164.6 kV ขั้วลบ

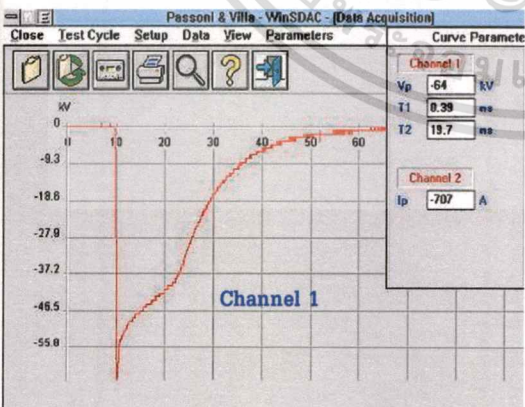


ก) Residual Voltage, Channel 1

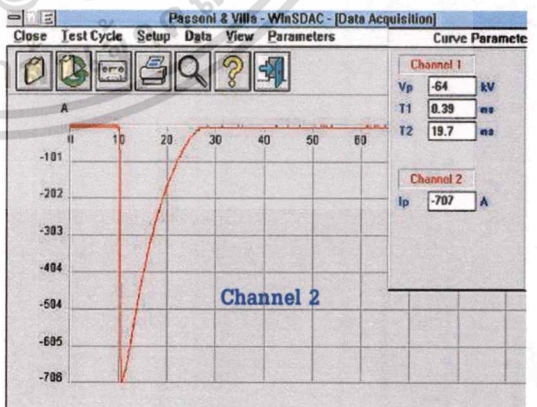


ข) Discharge Current, Channel 2

รูปที่ 5.48 ผลการทดสอบรูนัน LAZ-P21 แรงดันทดสอบ STLI 1.2/8 μ s ขนาด 164.6 kV ขั้วลบ



ก) Residual Voltage, Channel 1



ข) Discharge Current, Channel 2

รูปที่ 5.49 ผลการทดสอบรูนัน LAZ-P21 แรงดันทดสอบ STLI 1.2/8 μ s ขนาด 164.6 kV ขั้วลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบ Surge Arrester รุ่น LAZ-P21 ด้วยการจ่ายแรงดันทดสอบแบบต่างๆ

Surge Arresters Lightning Impulse Test Results									
Manufacturer & Model : Precise LAZ-P21					Date/time : 12/03/2004				
Rated Voltage : 21 kV					Nominal Discharge Current : 5 kA				
Temperature (°C) : 30					Pressure (mmHg) : 768				
%Humidity : 58					Ref. Standard : IEC 60099-4 (2001)				
Standard 1.2/50 μ s									
Test Voltage (kV)	Residual Voltage (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Discharge Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	
82.3	+	53.2	0.451	58.61	0.254	249	0.376	10.234	0.237
	-	53.3	0.503	58.21	0.301	227	0.420	10.450	0.252
164.6	+	63.6	0.334	65.70	0.199	735	0.407	13.140	0.244
	-	64.6	0.347	65.60	0.207	735	0.403	13.190	0.242
Non Standard 1.2/4 μ s									
82.3	+	52.3	0.548	4.26	0.332	235	0.525	2.556	0.299
	-	53.8	0.580	4.26	0.347	236	0.503	2.530	0.301
164.6	+	60.0	0.323	9.80	0.193	692	0.459	4.603	0.276
	-	61.8	0.333	10.20	0.199	693	0.475	4.603	0.285
Non Standard 1.2/8 μ s									
82.3	+	52.4	0.546	11.40	0.326	230	0.437	3.319	0.262
	-	53.5	0.548	11.41	0.328	233	0.436	3.616	0.261
164.6	+	62.4	0.356	14.50	0.213	706	0.452	4.526	0.274
	-	62.9	0.372	14.60	0.222	705	0.454	4.735	0.272
Non Standard 1.2/10 μ s									
82.3	+	51.4	0.520	15.20	0.311	235	0.407	4.074	0.243
	-	52.6	0.517	15.20	0.309	239	0.423	4.098	0.254
164.6	+	62.3	0.365	19.5	0.218	697	0.444	5.658	0.267
	-	63.8	0.367	19.4	0.219	706	0.453	4.574	0.244

หมายเหตุ : ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยตามภาคผนวก ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

จากข้อมูลการศึกษาตามที่ได้กล่าวถึงรายละเอียดมาเป็นลำดับแล้วนั้น ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการศึกษาวิจัย โดยอาศัยข้อมูลจากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลเป็นส่วนสนับสนุนการสรุปผลการวิจัย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการทดลองของชุดแท่งอิเล็กโตรด

จากผลการทดสอบชุดแท่งอิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบ ที่ระยะแยกแตกต่างกัน เปรียบเทียบระหว่างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานและแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI สามารถสรุปค่าแรงดันเบรคความเข้มเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สรุปค่าแรงดันเบรคความเข้มเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของชุดแท่งอิเล็กโตรดแบบต่างๆ

แบบอิเล็กโตรด		SLI 1.2/50			STLI 1.2/4			STLI 1.2/8			STLI 1.2/10		
		10 cm	15 cm	20 cm	10 cm	15 cm	20 cm	10 cm	15 cm	20 cm	10 cm	15 cm	20 cm
แท่งกลม หัวโค้งมน	+	92.72	133.21	166.11	98.99	143.43	182.41	95.85	143.11	169.25	99.46	139.82	163.70
	-	93.71	136.38	178.51	101.27	146.05	196.27	104.99	147.69	185.22	110.58	141.71	181.71
แท่งกลม หัวตัดเรียบ	+	94.03	132.57	175.45	97.78	145.01	181.09	94.33	144.80	187.15	97.91	147.36	184.70
	-	95.46	136.29	180.05	101.98	145.87	190.27	103.09	148.42	187.86	100.02	147.06	185.26
แท่งเหลี่ยมจัตุรัส หัวตัดเรียบ	+	95.60	122.02	165.13	111.8	140.03	179.00	90.86	141.71	167.56	89.54	142.08	169.79
	-	100.12	132.07	182.42	109.5	146.25	202.22	102.42	145.02	184.76	102.76	144.57	178.34

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $V_{b50\%}$ กรณีแรงดัน SLI กับ STLI

แบบอิเล็กโตรด		STLI 1.2/4			STLI 1.2/8			STLI 1.2/10		
		10 cm	15 cm	20 cm	10 cm	15 cm	20 cm	10 cm	15 cm	20 cm
แท่งกลม หัวโค้งมน	+	6.76	7.67	9.81	3.37	7.43	1.89	7.27	4.96	1.45
	-	8.07	7.09	9.95	12.04	8.29	3.75	18.00	3.91	1.79
แท่งกลม หัวตัดเรียบ	+	3.99	9.38	3.21	0.32	9.23	6.67	4.13	11.16	5.27
	-	6.67	7.03	5.68	7.83	8.90	4.34	4.62	7.90	2.89
แท่งเหลี่ยมจัตุรัส หัวตัดเรียบ	+	16.95	14.76	8.40	4.96	16.14	1.47	6.34	16.44	2.82
	-	9.37	10.74	10.85	2.30	9.81	1.28	2.64	9.46	2.24

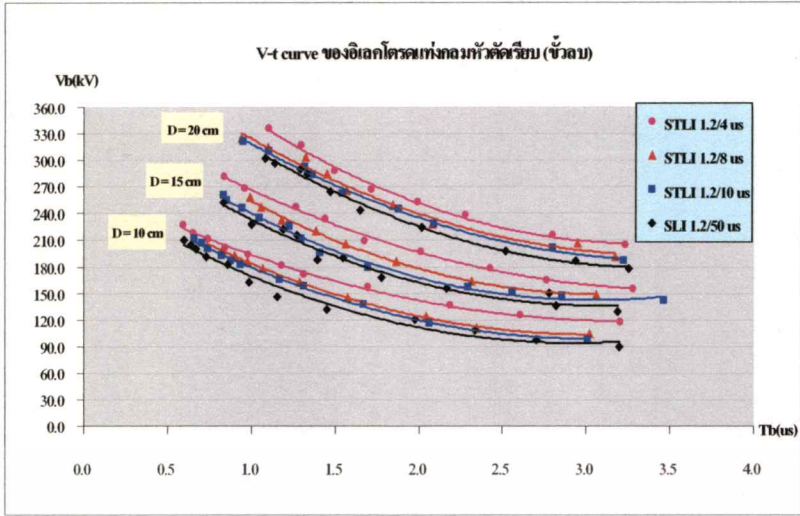
จากข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ 6.1 และ 6.2 สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ค่าระดับแรงดันเบรคความเข้มเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ของอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI จะมีค่าแรงดันที่สูงกว่ากรณีอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs ทั้งนี้อาจเป็นผลจากเวลาล่าช้าของ

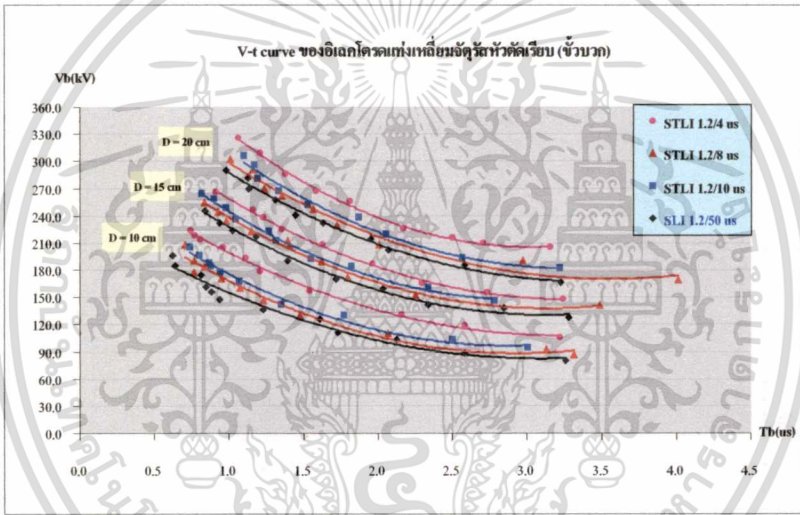
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเบรคดาวน์เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เข้ามาเกี่ยวข้อง นั่นคือ ในกรณีของแรงดัน STLI พบว่ามีช่วงเวลาคงอยู่ของสนามไฟฟ้าที่สั้นกว่ากรณีแรงดัน SLI ดังนั้นโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนอิสระเพื่อเริ่มต้นในกระบวนการเกิดไอออนไนเซชัน (Ionization) ก็ยิ่งน้อยลง โอกาสที่จะเกิดปรากฏการณ์อิเล็กตรอนอะวาแลนซ์ (Electron Avalanche) ก็น้อยตามไปด้วย การเกิดเบรคดาวน์จึงเป็นไปได้ยากขึ้นตามเวลาที่สั้นลงของแรงดันอิมพัลส์ นั่นคือ แกปอากาศจะมีค่าความคงทนจนวน (Dielectric Strength) ต่อแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI ได้สูงขึ้น หากต้องการกระตุ้นให้เกิดเบรคดาวน์เร็วขึ้นในกรณีแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI จำเป็นจะต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงมากขึ้น นั่นคือ จะต้องป้อนขนาดแรงดันให้สูงขึ้นจนมากพอสำหรับการเกิดเบรคดาวน์นั่นเอง ดังนั้นในส่วนของผลการทดสอบแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{50\%}$) ทั้งหมด จะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าแรงดันเบรคดาวน์ของแรงดัน STLI จะมีค่ามากกว่าแบบ SLI, 1.2/50 μ s ในทุกรูปทรงอิเล็กโทรดและทุกระยะแกป โดยมีแนวโน้มว่าช่วงเวลาทางคลื่นที่ยิ่งสั้นก็จะต้องใช้ระดับแรงดันที่สูงขึ้นตามไปด้วย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ในช่วง 0.32-18%

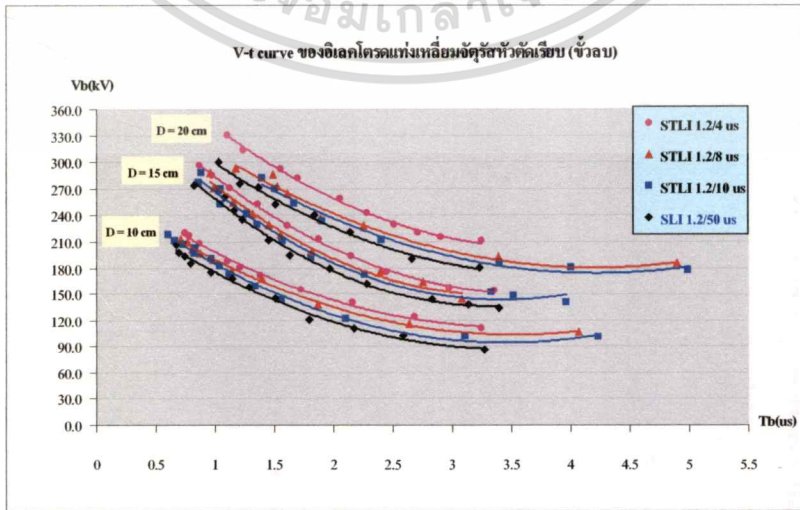
- 2) แรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{50\%}$) ของแรงดันขั้วลบ จะสูงกว่าแบบแรงดันขั้วบวก ทุกรูปคลื่นแรงดัน ซึ่งมาจากผลของแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ต่างขั้วที่มีผลของประจุค้าง (Space Charge) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย [16, 32]
- 3) เมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้นจำเป็นต้องใช้แรงดันเบรคดาวน์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการก่อตัวของกระบวนการไอออนไนเซชันต้องใช้เวลามากขึ้น ดังนั้นเวลาก่อตัวอะวาแลนซ์จึงต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ประกอบกับความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สูงพอที่จะสามารถทำให้เกิดเบรคดาวน์ได้ ถ้าต้องการให้มีโอกาสเกิดเบรคดาวน์ในช่องแกปสูงขึ้นจึงจำเป็นต้องมีสนามไฟฟ้าที่สูงพอ นั่นคือต้องป้อนขนาดแรงดันให้สูงขึ้นตามจึงจะสามารถทำให้เกิดเบรคดาวน์ขึ้นได้
- 4) รูปทรงอิเล็กโทรดไม่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{50\%}$) ดังจะเห็นได้จากค่าแรงดันเบรคดาวน์ของอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบ ที่ระยะแกปค่าเดียวกัน ขั้วแรงดันทดสอบแบบเดียวกัน รูปคลื่นที่ทดสอบแบบเดียวกัน ผลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลองทั้ง 3 แบบนั้น มีลักษณะสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non-Uniform Field) แบบสมมาตรเหมือนกัน และยังมีขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ใกล้เคียงกันอีกด้วย จึงไม่มีความแตกต่างของปัจจัยรูปทรงอิเล็กโทรดเข้ามาเกี่ยวข้องต่อลักษณะการเกิดเบรคดาวน์



รูปที่ 6.4 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งกลมหัวตัดเรียบ (ขั้วลบ)

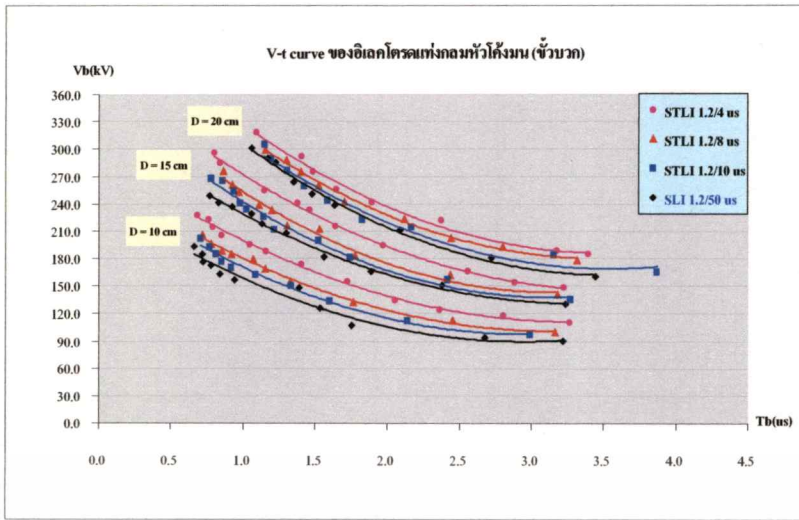


รูปที่ 6.5 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ (ขั้วบวก)

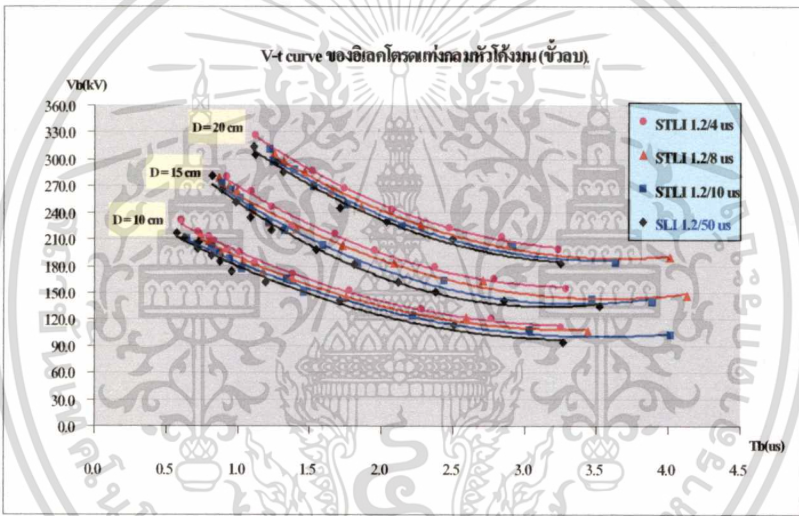


รูปที่ 6.6 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งเหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ (ขั้วลบ)

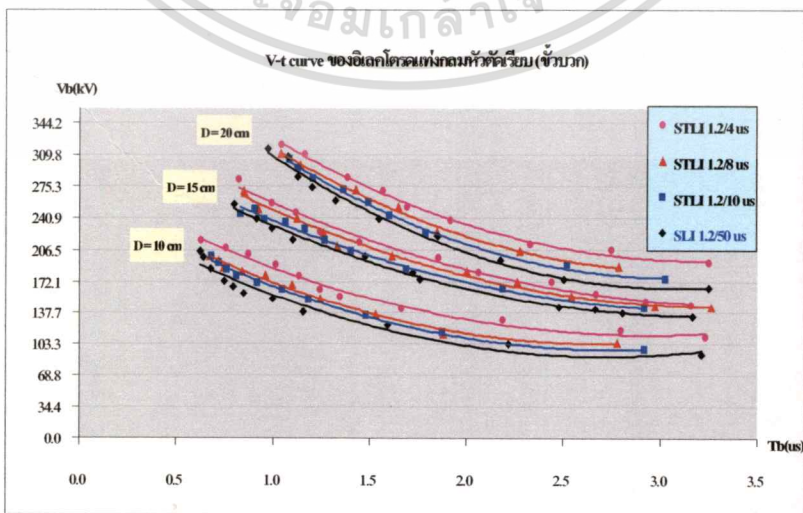
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งกลมหัวโค้งมน (หัวบวก)



รูปที่ 6.2 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งกลมหัวโค้งมน (หัวลบ)



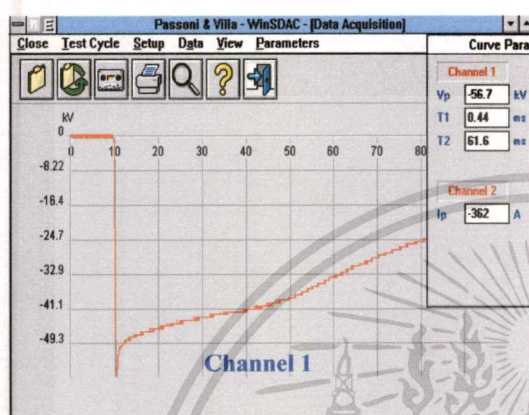
รูปที่ 6.3 สรุปผลเปรียบเทียบ v-t curve ทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแท่งกลมหัวตัดเรียบ (หัวบวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาไปไซ้ประโยชน์ดานการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

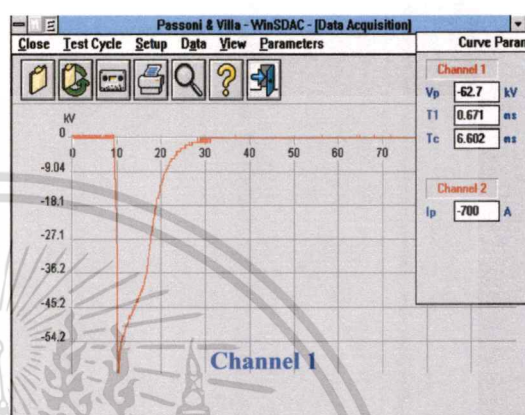
- 5) จากรูปที่ 6.1 ถึง 6.6 ซึ่งเป็นผลสรุปเปรียบเทียบเส้นกราฟ v-t curve ของแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าแบบ STLI ทั้ง 3 รูปคลื่น (1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s) กับกรณียุคคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน 1.2/50 μ s จะสังเกตเห็นว่าระดับเส้นแรงดันเบรคควาน์กรณียุคแรงดันแบบ STLI มีค่าสูงกว่ากรณียุคแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน 1.2/50 μ s ผลที่ได้จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันทุกรูปทรงอิเลคโตรดที่สนใจศึกษา โดยไม่ขึ้นอยู่กับระยะแกปและขั้วของแรงดันอิมพัลส์ที่ทดสอบ นอกจากนี้ยังพบว่ายิ่งช่วงเวลาทางคลื่นแรงดันอิมพัลส์สั้นลงเท่าใด แนวโน้มระดับเส้น v-t curve จะยิ่งสูงขึ้น นั่นคือ ระดับเส้น v-t curve กรณียุคแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/4 μ s จะอยู่เหนือสุด ตามด้วยกรณียุคแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/8 μ s, 1.2/10 μ s และ 1.2/50 μ s ตามลำดับ
- 6) จากผลการทดลองทั้งกรณียุคค่า $V_{b50\%}$ และ v-t curve ภายใต้อิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน 1.2/50 μ s (SLI) เปรียบเทียบกับกรณียุคแรงดันอิมพัลส์ STLI พบว่าระดับแรงดันเบรคควาน์ของแรงดัน STLI จะมีค่าสูงกว่ากรณียุคแรงดัน SLI ปกติ โดยไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงอิเลคโตรด, ขั้วแรงดันอิมพัลส์ และระยะแกป พบว่าค่าสูงสุดที่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 17% แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการประสานสัมพันธ์การฉนวนในระบบปกติที่ใช้แรงดัน SLI รูปคลื่น 1.2/50 μ s เป็นเกณฑ์กำหนด ซึ่งระยะแกปเดิมที่ตั้งไว้ใช้งานในระบบปัจจุบันจะไม่สามารถใช้ป้องกันแรงดันอิมพัลส์ STLI ได้ หากเกิดแรงดันเกินประเภทนี้ขึ้นในระบบจริงอาจสร้างความเสียหายแก่การฉนวนของอุปกรณ์ในระบบได้ ดังนั้นการปรับตั้งระยะแกปเพื่อการป้องกันแรงดันเกินในทางปฏิบัติจะต้องคำนึงถึงผลของแรงดันเกินแบบ STLI นี้ด้วย ซึ่งควรมีการเผื่อระยะแกปไว้ด้วยการลดระยะช่องแกปลง เพื่อให้สามารถใช้ป้องกันแรงดันเกินได้ครอบคลุมทั้งแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI และ SLI ซึ่งจะทำได้ผลการป้องกันเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์
- 7) แม้ว่าแรงดันเกิน STLI ที่เกิดขึ้นนี้จะมีเวลาช่วงคลื่น (Duration Time) ที่สั้น แต่ก็มีขนาดแรงดันที่สูงมากพอ อาจส่งผลให้ฉนวนของอุปกรณ์เสียหายแบบฉับพลัน หรืออาจเป็นสาเหตุของความเสียหายอื่นตามมา เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงดันเกินในลักษณะนี้แบบซ้ำๆ หลายๆ ครั้ง การศึกษานี้เป็นเพียงการชี้ให้เห็นถึงประเด็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในระบบ โดยหวังว่าจะสามารถช่วยกระตุ้นให้มีการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงสำหรับระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยเพิ่มมากขึ้นต่อไป เพื่อประโยชน์ในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมและลดการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้น

6.2 สรุปผลการทดลองเพิ่มเติมในกรณี Surge Arresters

จากผลการทดสอบกับดักเสิร์จเปรียบเทียบกับระหว่างกรณีเมื่อได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s กับกรณีที่ได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบ STLI ที่ระดับแรงดันทดสอบเป็น 2 เท่าของค่า BIL โดยพิจารณาจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเหลือค้าง (Residual Voltage) และกระแสดีสชาร์จ (Discharge Current) สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

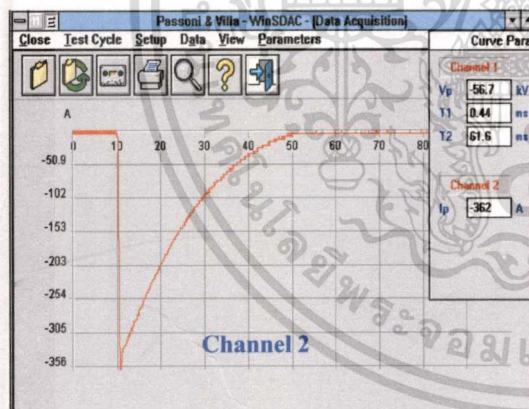


ก) กรณี 1.2/50 μ s

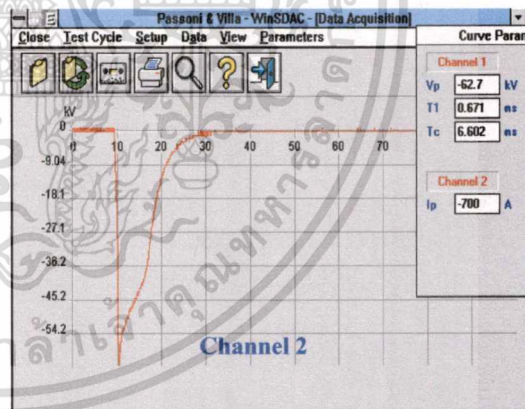


ข) กรณี 1.2/4 μ s

รูปที่ 6.7 ลักษณะ แรงดันเหลือค้าง ของ Arrester (LAZ-P21) ที่แรงดันทดสอบ 164.6 kV ขั้วลบ



ก) กรณี 1.2/50 μ s



ข) กรณี 1.2/4 μ s

รูปที่ 6.8 ลักษณะ กระแสดีสชาร์จ ของ Arrester (LAZ-P21) ที่แรงดันทดสอบ 164.6 kV ขั้วลบ

จากผลการทดสอบด้วยการจ่ายแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน SLI (1.2/50 μ s) เปรียบเทียบผลกับกรณีทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI ทั้ง 3 รูปคลื่น พบว่ากับดักฟ้าผ่าจะทำงานหรือตัดแรงดันเกินออกที่ระดับแรงดันค่าเดียวกันตลอดไม่ว่าช่วงเวลาทางคลื่นของแรงดันอิมพัลส์นั้นจะสั้นลงอย่างไรก็ตาม แต่สังเกตพบว่าระดับแรงดันเหลือค้างและกระแสดีสชาร์จในกรณีของแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI นั้นจะมีช่วงเวลาของการคงอยู่ที่สั้นกว่ากรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน SLI

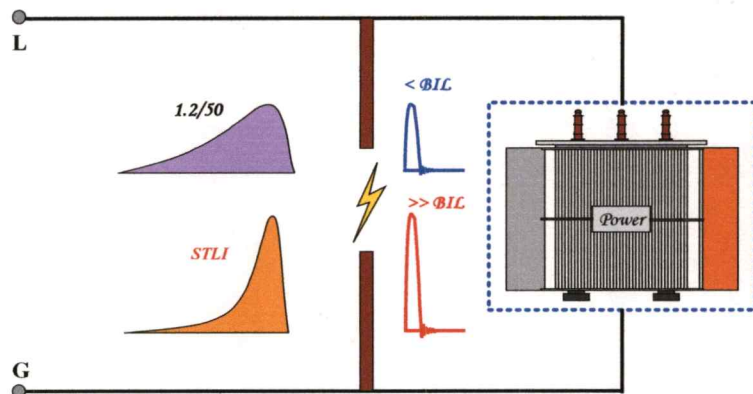
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังตัวอย่างรูปคลื่นผลการทดลองในรูปที่ 6.7 และ 6.8 ตามลำดับ แสดงว่าแรงดัน STLI ไม่มีผลกระทบต่ออุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินประเภท Lightning Arresters แบบโลหะออกไซด์ อุปกรณ์ดังกล่าวยังคงทำงานได้เป็นอย่างดีตามที่ออกแบบไว้ แต่อาจมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์เนื่องจากเวลาคงอยู่ที่แตกต่างกันซึ่งหมายถึงระดับพลังงานจากแรงดันเกินที่ถูกคิซซาร์จผ่านอุปกรณ์แตกต่างกันด้วย พลังงานที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดความร้อนสะสมแตกต่างกันด้วย ทำให้เวลาฟื้นคืนตัวของอุปกรณ์มีช่วงเวลายาวนานไม่เท่ากัน ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานก็จะแตกต่างกัน

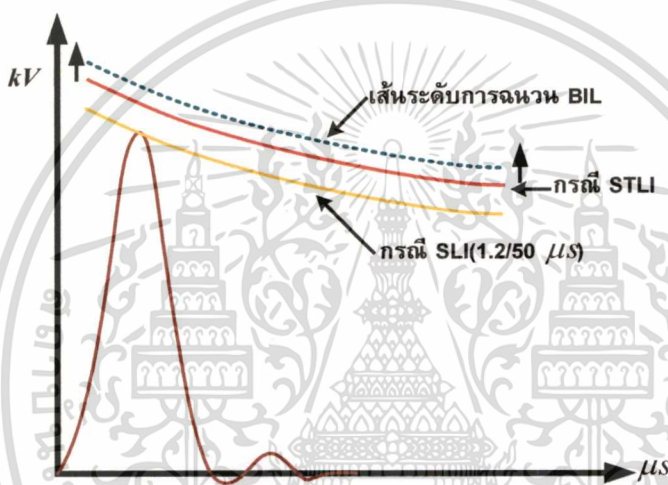
6.3 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.3.1 บทสรุป

จากการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความชื้นสถิต ($V_{50\%}$) และเส้นกราฟแรงดัน-เวลา (Voltage – Time Curve) ภายใต้อิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) รูปคลื่น 1.2/4 μ s, 1.2/8 μ s และ 1.2/10 μ s เปรียบเทียบกับกรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s พบว่าระดับแรงดันเบรคความชื้นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นจะมีค่าที่สูงกว่าของกรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s โดยมีแนวโน้มว่าจะมีช่วงเวลาทางคลื่นที่สั้นลงเท่าใด จะยังมีค่าระดับแรงดันเบรคความชื้นที่สูงมากขึ้นตามไปด้วย นั่นแสดงให้เห็นถึงผลกระทบโดยตรงที่มีต่อระดับการฉนวนของอุปกรณ์ที่ใช้หลักการประสานสัมพันธ์การฉนวน (Insulation Coordination) ระหว่างกัน กรณีนี้อาจพิจารณาจากตัวอย่างการป้องกันแรงดันเกินบนอุปกรณ์ด้วยหลักการสปาร์กแก๊ป ดังรูปที่ 6.9 ในทางปฏิบัติการปรับตั้งระยะแก๊ปจะอ้างอิงด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานรูปคลื่น 1.2/50 μ s ลักษณะการจัดประสานสัมพันธ์การฉนวนอาจแสดงได้ด้วยเส้นกราฟ v-t curve ดังรูปที่ 6.10 เส้นเขตอิมพัลส์ที่แสดงระดับการฉนวนของอุปกรณ์ (BIL) ปกติจะอยู่เหนือระดับเส้นกราฟเบรคความชื้นด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานของแก๊ปป้องกัน (SLI, 1.2/50 μ s) แต่จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ถ้าเกิดมีแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) เข้ามาในระบบ ระยะแก๊ปป้องกันที่ตั้งไว้เดิมจะไม่สามารถป้องกันแรงดันเกินอิมพัลส์แบบ STLI ที่ระดับแรงดันป้องกันเดิมนี้ได้ กล่าวคือสปาร์กแก๊ปจะไม่ทำงานหรือทำงานที่ระดับแรงดันสูงขึ้นไปกว่าเดิม นั่นหมายความว่าแรงดันสปาร์กผ่านที่เล็ดลอดเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า จะมีระดับแรงดันเกินสปาร์กผ่านที่สูงขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนอาจเข้าใกล้ระดับการฉนวน BIL มากขึ้น พบว่ามีโอกาสอย่างมากที่ระดับแรงดันเกินสปาร์กผ่านช่องแก๊ปนี้จะมีค่าสูงกว่าระดับการฉนวน BIL ของอุปกรณ์ในที่สุด ถ้าหากแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI ที่เข้ามานั้นมีค่ายอดแรงดันที่สูงมากพอ ซึ่งแรงดันเกิน STLI นี้ อาจเป็นสาเหตุหนึ่งของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ติดตั้งใช้งานในระบบปัจจุบัน



รูปที่ 6.9 ลักษณะการป้องกันแรงดันเกินด้วย Rod gap



รูปที่ 6.10 ลักษณะการประสานสัมพันธ์การฉนวน

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ถ้าเกิดมีแรงดันเกินอิมพัลส์แบบ STLI เข้ามาในระบบ ระยะแกปป้องกันที่ปรับตั้งไว้เดิมโดยอ้างอิงกับอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 μs จะไม่สามารถใช้ป้องกันแรงดันเกินแบบ STLI ที่ระดับแรงดันป้องกันเดิม (BIL) ได้ นั่นคือ สปาร์กแกปป้องกันจะไม่ทำงานที่ระดับแรงดันค่าเดิมแต่กลับทำงานที่ระดับแรงดันสูงขึ้น ถ้าแรงดันสปาร์กผ่านนี้มีค่าสูงมากย่อมส่งผลกระทบต่อการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการป้องกัน สาเหตุนี้อาจเป็นปัจจัยหนึ่งของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่สำคัญๆ เช่น หม้อแปลง ในปัจจุบันถึงแม้ว่าแรงดันเกินแบบ STLI นี้จะมีช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันสั้นกว่าปกติ แต่หากแรงดันเกินนี้มีค่าสูงมากพอจนเกินระดับการฉนวนของอุปกรณ์ อาจส่งผลให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายแบบฉับพลันหรือเกิดสภาวะการฉะสม และนำไปสู่ความเสียหายอย่างรุนแรงได้ในที่สุด ดังนั้นการปรับตั้งระยะแกปเพื่อการป้องกันแรงดันเกินในทางปฏิบัติจะต้องคำนึงถึงผลของแรงดันเกินแบบ STLI เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้ด้วย ซึ่งควรมีการเพื่อระยะแกปไว้ด้วยการลดระยะช่องแกปลง (ประมาณ 17% จากค่าที่ปรับตั้งไว้เดิมในปัจจุบัน) เพื่อให้สามารถใช้ป้องกันแรงดันเกินได้ครอบคลุมทั้งแรงดันอิมพัลส์แบบ STLI และ SLI ซึ่งจะทำได้ผลการป้องกันเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ ข้อมูลจากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและปรับตั้งระยะแกปป้องกันแรงดันเกิน เพื่อการประสานสัมพันธ์การฉนวนให้มีความเหมาะสมต่อไป

6.3.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้เป็นเพียงการนำเสนอปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยอ้างอิงข้อมูลผลการศึกษามาจากต่างประเทศ [10-13, 16-17, 25-26] งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบป้องกันแรงดันเกินแบบใช้สปาร์กแกปชนิดรีดแกปด้วยข้อมูลผลการทดลองในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สำหรับประเทศไทยนั้นควรที่จะมีการศึกษาเพิ่มเติมด้วยการวัดและบันทึกข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงในระบบ โดยเฉพาะระบบสายส่งที่มีปัญหาความต้านทานรากสายดินของเสาส่ง การศึกษานี้เป็นการศึกษาในกรณีของ Short Gap ซึ่งน่าจะมีการศึกษาต่อเนื่องกรณี Long Gap เพื่อหาข้อมูลเพิ่มเติม ในส่วนของปัจจัยรูปทรงทางเรขาคณิตของหัวอิเล็กโตรดนั้นน่าจะมีการศึกษาเพิ่มเติมในกรณีของรูปทรงอิเล็กโตรดที่มีลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย เช่น อิเล็กโตรดแบบทรงกลม (Sphere Gap) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปสู่ผลการออกแบบสปาร์กแกปป้องกันที่เหมาะสม ซึ่งประเด็นนี้ผู้ที่สนใจอาจนำไปศึกษาต่อเนื่องได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation. **Electrical Transmission and Distribution Reference Book.** East Pittsburgh, Pennsylvania. : Westinghouse Electric Corporation. 1950
- [2] Master, M.J. and Uman, M.A. "Lightning Induced Voltages on Power Lines : Theory." **IEEE Transactions on PAS.** vol. PAS-103, 1984. pp. 2502-2518.
- [3] Yokoyama, S. Miyake, K. Mitani, H. and Yamazaki, N. "Advanced Observations of Lightning Induced Voltage on Power Distribution Lines." **IEEE Transactions on PWRD.** vol. PWRD-1, 1986. pp. 129-139.
- [4] A.J. Eriksson, "The Incidence Strikes to Power Lines." **IEEE Transactions on Power Delivery.** vol. PWRD-2, No. 3, July 1987.
- [5] P.Chowdhuri, "Analysis of Lightning-induced Voltage on Overhead Lines." **IEEE/PES 1988 W. M. No. 88 WM 070-5,** New York, 1988.
- [6] P.Chowdhuri, "Lightning-induced Voltage on Multi-conductor Overhead Lines." **IEEE Transactions on Power Delivery.** vol. 5, No. 2, April 1990.
- [7] E.Cinieri and F.Muzi, "Lightning Induced Overvoltages. Improvement in Quality of Service in MV Distribution Lines by Addition of Shield Wires." **IEEE Transactions on Power Delivery.** vol. 11, No. 1, January 1996.
- [8] M.I. Fernandez, V.A. Rakov and M.A. Uman, "Transient Currents and Voltages in A Power Distribution System due to Natural Lightning." **IEEE Proceeding.** 1999.
- [9] IEC Publication 60060-1, "**High-Voltage Test Techniques, Part 1: General definitions and test requirements**", Geneva, 1989.
- [10] P.Chowdhuri and E.T.B. Gross, "Voltage Surges Induced on Overhead Overhead Lines." **IEE Proceeding.** vol. 114, December 1967, pp. 1899-1907.
- [11] S.Yokoyama, K.Miyake, and S. Fukui, "Advanced Observations of Lightning Induced Voltage on Power Distribution Lines (II)." **IEEE Transactions on Power Delivery.** vol. 4, No. 4, 1989, pp. 2196-2203.

- [12] A.J. Eriksson, M.F. Stringfellow and D.V. Meal, "Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines." **IEEE PES Summer Meeting**. Portland, 26-31 July 1981.
- [13] R.H. Golde, "Lightning Surge on Overhead Distribution Lines Caused by Indirect and Direct Lightning Strokes." **AIEE Transactions**. vol. 73, June 1954, pp. 437-447.
- [14] S.Grzybowski, M.M.Abou-Rahal, "Experimental Studies of Flashover Voltage under Lightning and Steep-Front Pulse on Distribution Line Construction." **IEEE Proceeding**. Suotheascon, 1990, pp. 664-669.
- [15] David B. Miller, Andre E. Lux and Paul R. Barnes, "The Effect of Steep-front, Short-Duration Impulses on Power Distribution Components." **IEEE Transactions on Power Delivery**. vol. 5, No. 2, April 1990.
- [16] H.Motoyama, "Experimental Study and Analysis of Breakdown Characteristic of Long Air Gaps with Short Tail Lightning Impulse." **IEEE Transactions on Power Delivery**. vol. 11, No. 2, pp. 972-979, April 1996.
- [17] A.Carrus, E.Cinieri, A.Fumi, and C.Mazzetti, "Short Tail Lightning Impulse Behaviour of Medium Voltage Line Insulation." **IEEE Transactions on Power Delivery**. vol. 14, No. 1, pp. 218-226, January 1999.
- [18] A.Dissendorf, "Insulation Co - ordination in High Voltage Electric Power System." Butterworths, 1974.
- [19] IEEE Standard 1243, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines." New York, USA, 1997.
- [20] P.Chowdhuri, and B.W.McConnell, "Volt-Time Characteristics of Short Air Gaps under Nonstandard Lightning Voltage Waves." **IEEE Transactions on Power Delivery**. vol. 12, No. 1, January 1997.
- [21] E.Kuffel and W.S.Zaengl, "High Voltage Engineering Fundamental." Pergamon Press, Oxford, 1984.
- [22] PASSONI&VILLA EXPERTS IN HIGH VOLTAGE, "Impulse Generator type GTU 400 kV - 14 kJ." May 1996.

- [23] Pulse Electronic Engineering Co., Ltd., **Instruction Manual of Impulse High-Voltage Generator 1500 kV, 28.1 kJ.** Tokyo, Japan.
- [24] A.Carrus, "Comparison of Methods Suggested for Conveniently Reproducing Lightning Overvoltages." **IEEE Summer Meeting Proceeding.** 1988, pp. 750-753.
- [25] A.Carrus and L.E. Funes, "Very Short Tail Lightning Double Exponential Wave Generation Techniques Based on Marx Circuit Standard Configurations." **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.** vol. PAS-103, No. 4, April 1984.
- [26] A.Carrus, "An Inductance on The Marx Generator Tail Branch: New Technique for High Efficiency Laboratory Reproduction of Short Time to Half Value Lightning Impulses." **IEEE Transactions on Power Delivery.** vol. 4, No. 1, January 1989.
- [27] IEEE Std. 4, "Standard Techniques for High-Voltage Testing." IEEE Power Engineering Society, New York, USA, March 1995.
- [28] IEC 60052, "High-Voltage Measurement by means of sphere gaps." Geneva, 2002.
- [29] Dieter Kind, "An Introduction to High-Voltage Experimental Technique: Textbook for Electrical Engineers." 1st ed., Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1978.
- [30] คมสัน เพ็ชรรักษ์ และคณะ. 2540. "แรงดันวาทไฟตามผิวท่อ PVC." หน้า 416-420. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [31] ไชยพร หล่อทองคำ และ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล. 2545. "เทคนิคการชดเชยค่าเวลาตอบสนองของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเซอร์แบบความต้านทาน สำหรับใช้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน." หน้า 416-420. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25. เล่มที่ 1 จังหวัดสงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [32] ไชยพร หล่อทองคำ และ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล. 2546. "ผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นต่อระบบป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแกป." หน้า 459-464. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26. เล่มที่ 1 กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [33] IEC 60099-4. "Surge Arresters Part 4 : Metal-Oxide Surge Arresters without Gaps for a.c. System." Geneva, 2001.
- [34] สรรพ์ผจญ หมอปาน. อนุชา ชุมแสง. ชีรยุทธ พิมเพ็ชร และ พงษ์ศักดิ์ ทรัพย์รัตน์. 2545. "การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติการเกิดเบรกดาวนในช่องว่างอากาศขนาดใหญ่ เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น." ปรินญา นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- [35] วีระชาติ ณ นคร. ศักดิ์สิทธิ์ พลเสนา. ประกายเพชร มลาทิพย์. และ ปวงชน นามเส. 2546. "การศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นต่อคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวนในช่องว่างอากาศและอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินในระบบจำหน่าย." ปรินญา นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

เครื่องกำเนิดแรงดันสูงอิมพัลส์และอุปกรณ์วัด

**Impulse Generator**

- Manufacturer : PASSONI&VILLA
- Type : GTU 4-3, 5 (1996)
- Rating : 400 kV / 14 kJ

**Impulse Resistive Voltage Divider**

- Manufacturer : PASSONI&VILLA
- Type : IRD 400 (1996)
- Rating : 400 kV (LI)
- Rated ratio : K=372
- Response Time : < 15 nsec
- Accuracy : +/- 2.0 %

**Digital Oscilloscope**

- Manufacturer : Le Croy
- Series No. : 9310 A (2 Channels)
- Sampling rate : 100 MS/s
- Band width : DC to 30 MHz
- Accuracy : 2% f.s.
- Amplitude resolution : 8 bits

**Attenuator rack**

- Manufacturer : PASSONI&VILLA
- Attenuation : K=100
- Band width : 400 MHz
- Rise Time : < 0.8 nsec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
Specification of Nickel-Chromium (Ni-Cr) 80/20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

Specification of Nickel-Chromium (Ni-Cr) 80/20

ตารางที่ ข.1 Specification for Nichrome Electrical Resistance Wire (80/20)

Size (SWG)	Diameter (mm)	Cross Section Area (mm ²)	Ohm/m
5	5.39	22.817	0.0473
6	4.75	17.721	0.0609
7	4.25	14.186	0.0761
8	4.0	12.566	0.0859
9	3.5	9.621	0.1123
10	3.0	7.068	0.1528
11	2.9	6.605	0.1635
12	2.5	4.908	0.2200
13	2.2	3.801	0.2841
14	2.0	3.142	0.3438
15	1.8	2.545	0.4244
16	1.6	2.010	0.5371
17	1.4	1.539	0.7016
18	1.2	1.131	0.9550
19	1.017	0.812	1.344
20	0.9	0.636	1.698
21	0.8	0.503	2.136
22	0.7	0.385	2.806
23	0.61	0.292	3.696

- Density = 8.31 g/cm³
- Specific Heat = 0.46 J/g.K
- Electrical Resistivity = 650 Ω.Circ.Mil/Ft
- Maximum Operating Temperature = 1,473 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 8/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/50 μ s			
Temperature : 26					Test Voltage : 94 kV			
%Humidity : 57					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 772			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	60.8	0.377	59.0	0.2257	277	0.4175	10.270	0.250
2	60.8	0.371	58.3	0.2222	277	0.4175	10.270	0.250
3	61.0	0.372	58.5	0.2228	272	0.4058	10.360	0.243
4	60.6	0.468	57.6	0.2802	268	0.4075	10.480	0.244
5	60.8	0.468	58.5	0.2802	272	0.3449	10.360	0.206
Cool to Ambient								
6	60.6	0.313	57.6	0.1874	263	0.4041	10.510	0.242
7	61.0	0.321	58.1	0.1922	268	0.4175	10.210	0.250
8	60.7	0.356	57.7	0.2132	263	0.4309	10.310	0.258
9	61.2	0.364	57.9	0.2196	272	0.4175	10.020	0.250
10	60.7	0.494	58.0	0.2958	263	0.3883	10.220	0.232
Cool to Ambient								
11	60.7	0.495	57.7	0.2964	254	0.4175	10.170	0.250
12	60.6	0.424	57.9	0.2539	268	0.4309	10.210	0.258
13	60.5	0.356	57.9	0.2132	277	0.4075	10.300	0.244
14	60.3	0.371	57.0	0.2222	272	0.4175	10.310	0.250
15	60.3	0.377	58.3	0.2257	277	0.4175	10.000	0.250
Cool to Ambient								
16	60.6	0.377	57.6	0.2257	272	0.4309	10.020	0.258
17	60.6	0.372	59.0	0.2228	268	0.4041	10.220	0.242
18	60.8	0.468	57.6	0.2802	263	0.3390	10.170	0.203
19	60.7	0.356	58.5	0.2132	269	0.4175	10.310	0.250
20	60.3	0.399	57.7	0.2389	272	0.4309	10.370	0.258
Test Result								
Mean	60.7	0.395	58.1	0.2366	269	0.4081	10.260	0.244

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.2 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 8/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/50 μ s			
Temperature : 26					Test Voltage : 94 kV			
%Humidity : 56					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 772			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-61.5	0.467	58.2	0.2796	-272	0.3983	10.360	0.238
2	-61.9	0.224	58.0	0.1341	-272	0.3991	10.250	0.239
3	-61.7	0.318	57.3	0.1904	-272	0.4075	10.290	0.244
4	-61.7	0.479	57.6	0.2868	-272	0.4058	10.250	0.243
5	-61.6	0.449	57.4	0.2689	-272	0.4058	10.250	0.243
Cool to Ambient								
6	-61.6	0.479	57.6	0.2868	-268	0.3925	10.350	0.235
7	-61.7	0.373	57.7	0.2234	-281	0.4175	10.470	0.250
8	-61.6	0.509	57.7	0.3048	-277	0.3991	10.680	0.239
9	-61.5	0.518	58.6	0.3102	-272	0.4259	10.650	0.255
10	-61.8	0.387	57.5	0.2317	-277	0.4008	10.590	0.240
Cool to Ambient								
11	-61.5	0.362	58.4	0.2168	-272	0.4006	10.650	0.243
12	-61.6	0.318	58.7	0.1904	-272	0.4075	10.290	0.244
13	-61.6	0.459	57.6	0.2749	-272	0.3991	10.680	0.239
14	-61.7	0.373	58.6	0.2234	-268	0.3991	10.650	0.239
15	-61.6	0.479	58.4	0.2868	-277	0.3929	10.470	0.235
Cool to Ambient								
16	-61.5	0.449	58.6	0.2689	-272	0.4008	10.250	0.240
17	-61.7	0.385	57.6	0.2305	-272	0.4075	10.680	0.244
18	-61.5	0.318	57.4	0.1904	-272	0.3991	10.590	0.239
19	-61.9	0.373	57.6	0.2234	-280	0.4175	10.250	0.250
20	-61.8	0.373	57.4	0.2234	-277	0.3991	10.680	0.239
Test Result								
Mean	-61.6	0.404	57.9	0.2423	-273	0.4038	10.470	0.242

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s

Manufacturer & Model : Precise LAZ-P24					Date/Time : 8/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/50 μ s			
Temperature : 29					Test Voltage : 188 kV			
%Humidity : 56					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 76			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	73.6	0.3256	59.1	0.1949	790	0.4435	10.500	0.265
2	73.8	0.3252	59.2	0.1947	793	0.4433	10.600	0.265
3	73.5	0.4008	60.1	0.2400	793	0.4223	10.500	0.252
4	73.6	0.3342	59.8	0.2001	792	0.4502	10.400	0.269
5	73.6	0.2006	59.2	0.1201	792	0.4502	10.400	0.269
Cool to Ambient								
6	73.8	0.3256	59.1	0.1949	793	0.4223	10.400	0.252
7	73.9	0.3252	59.1	0.1947	794	0.4175	10.500	0.250
8	73.7	0.3252	59.3	0.1947	793	0.4502	10.600	0.269
9	73.7	0.3195	59.2	0.1913	791	0.4223	10.600	0.252
10	73.7	0.3250	59.2	0.1946	791	0.4502	10.500	0.269
Cool to Ambient								
11	73.6	0.2595	59.2	0.1554	792	0.4502	10.400	0.269
12	73.7	0.3025	59.1	0.1811	792	0.4502	10.500	0.269
13	73.7	0.3225	59.0	0.1931	793	0.4435	10.600	0.265
14	73.9	0.3025	60.1	0.1811	792	0.4435	10.600	0.265
15	73.6	0.3625	59.4	0.2170	791	0.4175	10.300	0.250
Cool to Am0.1949bien								
16	73.4	0.3255	59.3	0.1949	793	0.4223	10.600	0.252
17	73.6	0.3025	59.2	0.1811	793	0.4433	10.500	0.265
18	73.6	0.3365	59.2	0.2015	792	0.4223	10.500	0.263
19	73.7	0.3252	59.2	0.1947	792	0.4223	10.600	0.252
20	73.7	0.3255	60.0	0.1949	793	0.4435	10.500	0.265
Test Result								
Mean	73.7	0.3185	59.4	0.1907	792	0.4154	10.500	0.262

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.๔ ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 8/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/50 μ s			
Temperature : 30					Test Voltage : 188kV			
%Humidity : 58					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 771			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-75.8	0.326	58.5	0.1952	-802	0.4593	10.650	0.275
2	-74.5	0.327	59.3	0.1958	-802	0.4885	10.720	0.292
3	-74.8	0.327	59.1	0.1958	-800	0.4434	10.720	0.265
4	-74.8	0.331	59.2	0.1982	-802	0.4885	10.650	0.292
5	-75.5	0.320	59.6	0.1916	-801	0.4885	10.240	0.292
Cool to Ambient								
6	-75.6	0.320	59.6	0.1916	-801	0.3883	10.720	0.232
7	-74.9	0.327	59.6	0.1958	-800	0.4759	10.720	0.285
8	-74.9	0.326	59.2	0.1952	-801	0.3784	10.810	0.226
9	-74.8	0.327	59.1	0.1958	-801	0.4436	10.240	0.265
10	-74.8	0.326	59.6	0.1952	-805	0.4440	10.820	0.265
Cool to Ambient								
11	-74.5	0.327	59.2	0.1958	-801	0.4440	10.600	0.265
12	-74.2	0.326	58.9	0.1952	-800	0.4527	10.600	0.271
13	-75.0	0.326	59.9	0.1952	-799	0.4284	10.550	0.256
14	-74.6	0.324	58.9	0.1940	-802	0.4509	10.240	0.270
15	-74.8	0.328	59.2	0.1964	-801	0.4501	10.820	0.269
Cool to Ambient								
16	-74.8	0.326	59.5	0.1952	-803	0.4384	10.990	0.262
17	-74.7	0.328	59.2	0.1964	-802	0.4743	10.440	0.284
18	-74.6	0.326	59.1	0.1952	-802	0.4942	10.650	0.295
19	-74.7	0.326	59.1	0.1952	-801	0.4436	10.810	0.265
20	-74.8	0.327	59.3	0.1958	-798	0.4436	10.720	0.265
Test Result								
Mean	-74.8	0.326	59.3	0.1955	-801	0.4509	10.600	0.270

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.5 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/4 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 8/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/4 μ s			
Temperature : 30					Test Voltage : 94 kV			
%Humidity : 57					Polarity : positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 773			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	61.7	0.432	10.9	0.2587	279	0.4436	2.925	0.265
2	61.6	0.425	10.8	0.2545	279	0.4217	2.259	0.252
3	61.7	0.412	10.9	0.2467	278	0.3843	2.925	0.230
4	61.7	0.425	10.8	0.2545	278	0.4168	2.925	0.249
5	61.8	0.432	10.8	0.2587	279	0.3497	2.879	0.209
Cool to Ambient								
6	61.1	0.454	10.8	0.2718	276	0.3599	2.992	0.215
7	61.1	0.500	10.2	0.2994	278	0.3786	2.929	0.226
8	61.2	0.425	10.5	0.2545	277	0.3786	2.965	0.226
9	62.0	0.411	10.8	0.2461	278	0.4217	2.925	0.252
10	61.5	0.412	10.2	0.2467	279	0.3749	2.982	0.224
Cool to Ambient 0.3749								
11	61.3	0.425	10.8	0.2545	279	0.3786	2.885	0.226
12	61.5	0.392	10.9	0.2347	278	0.3983	2.787	0.238
13	61.3	0.425	10.9	0.2545	279	0.3916	2.876	0.234
14	61.8	0.381	10.7	0.2281	279	0.3843	2.525	0.230
15	61.8	0.410	10.9	0.2455	278	0.4436	2.925	0.265
Cool to Ambient 278								
16	61.8	0.410	10.7	0.2455	278	0.4168	2.929	0.249
17	61.4	0.402	10.9	0.2407	276	0.4168	2.982	0.249
18	61.7	0.325	10.8	0.1946	278	0.3786	2.787	0.226
19	61.6	0.402	10.8	0.2407	279	0.4165	2.879	0.249
20	61.6	0.412	10.9	0.2467	278	0.4011	2.982	0.240
Test Result								
Mean	61.6	0.416	10.8	0.2489	278	0.3978	2.863	0.238

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/4 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 11/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/4 μ s			
Temperature : 29					Test Voltage : 94 kV			
%Humidity : 57					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 767			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-62.9	0.425	10.9	0.2545	-282	0.4275	2.995	0.256
2	-62.8	0.462	10.8	0.2766	-281	0.4375	2.989	0.262
3	-62.8	0.462	10.9	0.2766	-281	0.5026	2.899	0.301
4	-62.9	0.401	10.9	0.2401	-277	0.4025	2.989	0.241
5	-62.9	0.395	10.9	0.2365	-280	0.4375	3.225	0.262
Cool to Ambient								
6	-62.9	0.467	10.8	0.2796	-280	0.4041	3.005	0.242
7	-63.1	0.425	11.3	0.2545	-279	0.4041	2.959	0.242
8	-62.5	0.444	11.0	0.2659	-279	0.3357	2.923	0.201
9	-62.6	0.425	10.9	0.2545	-282	0.4375	2.989	0.262
10	-62.6	0.436	10.8	0.2611	-280	0.4041	3.052	0.242
Cool to Ambient								
11	-62.9	0.425	10.8	0.2545	-282	0.4375	3.005	0.262
12	-62.9	0.444	10.9	0.2659	-281	0.4375	2.995	0.262
13	-62.8	0.425	10.9	0.2545	-281	0.7025	2.656	0.241
14	-62.9	0.462	10.9	0.2766	-282	0.3758	2.989	0.225
15	-62.9	0.452	11.2	0.2707	-280	0.4025	3.000	0.241
Cool to Ambient								
16	-62.9	0.425	10.9	0.2545	-279	0.4041	3.127	0.242
17	-62.9	0.425	10.8	0.2545	-282	0.4375	3.000	0.262
18	-62.8	04.36	10.9	0.2611	-282	0.4075	2.995	0.244
19	-62.8	0.433	11.5	0.2593	-280	0.4041	2.989	0.262
20	-62.9	0.399	10.9	0.2389	-281	0.4025	3.127	0.241
Test Result								
Mean	-62.8	0.433	10.9	0.2595	-280	0.4152	2.995	0.249

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/4 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 11/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/4 μ s			
Temperature : 30					Test Voltage : 188 kV			
%Humidity : 59					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 770			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	72.1	0.327	13.7	0.1958	832	0.4426	4.271	0.265
2	72.6	0.364	14.0	0.2179	867	0.3758	4.326	0.225
3	71.7	0.417	13.9	0.2497	865	0.3674	4.325	0.220
4	72.0	0.368	13.2	0.2204	865	0.3732	4.325	0.223
5	71.6	0.340	13.2	0.2036	865	0.3691	4.325	0.221
Cool to Ambient								
6	71.7	0.424	13.1	0.2539	822	0.4909	4.402	0.294
7	72.1	0.407	13.2	0.2437	823	0.4927	4.391	0.295
8	72.3	0.398	12.8	0.2383	874	0.4785	4.216	0.286
9	71.9	0.378	13.1	0.2263	863	0.4559	4.315	0.273
10	72.0	0.422	12.6	0.2526	832	0.4593	4.271	0.275
Cool to Ambient								
11	72.5	0.421	12.4	0.2521	822	0.4596	4.390	0.275
12	72.3	0.380	13.0	0.2275	874	0.4909	3.985	0.294
13	72.4	0.381	13.1	0.2281	863	0.5043	4.315	0.302
14	72.4	0.395	13.2	0.2365	865	0.4876	4.325	0.292
15	72.3	0.406	12.8	0.2431	863	0.5261	4.320	0.315
Cool to Ambient								
16	72.8	0.366	12.6	0.2192	822	0.4593	4.275	0.275
17	72.5	0.364	12.6	0.2179	824	0.4676	4.322	0.280
18	72.9	0.372	13.1	0.2228	824	0.4709	4.322	0.282
19	72.9	0.417	13.0	0.2497	822	0.5027	4.385	0.301
20	72.9	0.394	12.8	0.2359	832	0.4968	4.271	0.297
Test Result								
Mean	72.3	0.387	13.1	0.2318	845	0.4586	4.304	0.275

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๘.๘ ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/4 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 11/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/4 μ s			
Temperature : 30					Test Voltage : 188 kV			
%Humidity : 57					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 770			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-72.4	0.392	13.9	0.2347	-822	0.5461	4.252	0.327
2	-73.6	0.381	14.2	0.2281	-851	0.5043	4.357	0.302
3	-72.9	0.382	14.0	0.2287	-832	0.4759	4.625	0.285
4	-72.9	0.420	13.8	0.2515	-874	0.4783	4.413	0.286
5	-73.2	0.402	13.8	0.2515	-851	0.4426	4.356	0.265
Cool to Ambient								
6	-73.2	0.395	14.1	0.2365	-874	0.5361	4.390	0.321
7	-73.7	0.391	14.4	0.2341	-832	0.5060	4.625	0.303
8	-73.1	0.384	14.4	0.2299	-881	0.4743	4.524	0.284
9	-73.5	0.365	13.9	0.2186	-846	0.4763	4.412	0.285
10	-73.7	0.375	14.2	0.2246	-874	0.4927	4.510	0.295
Cool to Ambient 846								
11	-73.5	0.330	14.0	0.1976	-832	0.4375	4.630	0.262
12	-73.6	0.394	13.5	0.2359	-822	0.5194	4.225	0.311
13	-72.9	0.411	13.8	0.2461	-846	0.4242	4.432	0.254
14	-73.0	0.382	14.3	0.2287	-851	0.4242	4.360	0.254
15	-73.5	0.380	14.3	0.2311	-850	0.4327	4.742	0.262
Cool to Ambient								
16	-73.6	0.412	14.4	0.2467	-832	0.4108	4.732	0.246
17	-73.1	0.389	13.8	0.2329	-820	0.5077	4.523	0.304
18	-73.1	0.407	14.2	0.2437	-842	0.4092	4.523	0.245
19	-73.8	0.392	14.2	0.2347	-841	0.5394	4.635	0.323
20	-73.4	0.386	13.7	0.2311	-841	0.42425	4.702	0.254
Test Result								
Mean	-73.3	0.389	14.0	0.2333	-846	0.4733	4.498	0.283

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/8 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 9/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/8 μ s			
Temperature : 31					Test Voltage : 94 kV			
%Humidity : 59					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 769			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	60.6	0.412	11.2	0.2467	270	0.4092	3.254	0.245
2	60.2	0.437	11.1	0.2617	271	0.4242	3.354	0.254
3	61.0	0.392	11.3	0.2347	270	0.3975	3.126	0.238
4	60.7	0.402	11.4	0.2407	270	0.4158	3.224	0.249
5	60.7	0.380	11.5	0.2275	270	0.3941	3.196	0.236
Cool to Ambient								
6	59.8	0.401	11.4	0.2401	271	0.3808	3.254	0.228
7	60.1	0.396	11.3	0.2371	269	0.3874	3.342	0.232
8	60.1	0.426	11.2	0.2551	268	0.4108	3.126	0.246
9	61.2	0.435	11.6	0.2605	270	0.4225	3.248	0.253
10	60.5	0.386	11.5	0.2311	270	0.4025	3.254	0.241
Cool to Ambient								
11	60.1	0.402	11.4	0.2407	269	0.3941	3.126	0.236
12	59.7	0.401	11.3	0.2401	269	0.3958	3.026	0.237
13	60.3	0.396	11.1	0.2371	270	0.3908	3.084	0.234
14	60.1	0.398	11.2	0.2383	271	0.3925	3.123	0.235
15	61.2	0.403	11.3	0.413	270	0.4041	3.096	0.242
Cool to Ambient								
16	60.0	0.405	11.2	0.2425	269	0.4025	3.126	0.241
17	60.1	0.401	11.1	0.2401	268	0.4275	3.284	0.256
18	60.0	0.396	11.2	0.2371	269	0.4309	3.324	0.258
19	60.5	0.384	11.3	0.2299	270	0.4041	3.102	0.242
20	61.1	0.372	11.4	0.2227	270	0.4058	3.098	0.243
Test Result								
Mean	60.4	0.401	11.3	0.2403	270	0.4041	3.188	0.242

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/8 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 9/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/8 μ s			
Temperature : 31					Test Voltage : 94 kV			
%Humidity : 59					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 768			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-62.3	0.521	11.4	0.3119	-275	0.4108	3.521	0.246
2	-62.1	0.482	11.5	0.2866	-273	0.3981	3.681	0.238
3	-61.9	0.485	11.3	0.2904	-272	0.4192	3.496	0.251
4	-61.8	0.492	11.6	0.2906	-271	0.4009	3.425	0.240
5	-62.1	0.456	11.7	0.2731	-273	0.3941	3.396	0.236
Cool to Ambient								
6	-62.8	0.512	11.3	0.3066	-274	0.3975	3.420	0.238
7	-62.1	0.524	11.5	0.3138	-271	0.4008	3.401	0.240
8	-62.1	0.532	11.6	0.3186	-273	0.4192	3.526	0.251
9	-62.4	0.496	11.4	0.2970	-273	0.4108	3.456	0.246
10	-61.8	0.484	11.6	0.2898	-275	0.3991	3.526	0.239
Cool to Ambient								
11	-61.9	0.495	11.5	0.2964	-276	0.4025	3.621	0.241
12	-62.1	0.493	11.4	0.2952	-273	0.4275	3.484	0.256
13	-61.6	0.501	11.6	0.3000	-274	0.4142	3.426	0.248
14	-61.8	0.486	11.7	0.2910	-272	0.4275	3.548	0.256
15	-61.4	0.457	11.8	0.2737	-275	0.3991	3.526	0.239
Cool to Ambient								
16	-61.4	0.512	11.5	0.3066	-271	0.4041	3.482	0.242
17	-61.9	0.495	11.4	0.2964	-271	0.4142	3.536	0.248
18	-61.8	0.491	11.6	0.2940	-272	0.4052	3.621	0.249
19	-62.1	0.492	11.7	0.2946	-273	0.3941	3.604	0.236
20	-62.3	0.512	11.6	0.3066	-276	0.4025	3.612	0.241
Test Result								
Mean	-61.9	0.496	11.5	0.2969	-273	0.4023	3.515	0.244

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/8 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 10/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/8 μ s			
Temperature : 29					Test Voltage : 188 kV			
%Humidity : 59					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 769			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	71.6	0.346	14.8	0.2072	820	0.4726	4.920	0.283
2	71.3	0.342	14.8	0.2048	821	0.4876	4.890	0.292
3	71.4	0.339	14.7	0.2029	819	0.4843	4.892	0.290
4	71.4	0.348	14.6	0.2084	818	0.4859	4.921	0.291
5	71.6	0.345	14.5	0.2066	818	0.4693	4.936	0.281
Cool to Ambient								
6	70.9	0.354	14.6	0.2119	820	0.4709	4.882	0.282
7	71.4	0.342	14.8	0.2048	821	0.4859	4.726	0.291
8	71.2	0.338	14.6	0.2024	821	0.4843	4.926	0.290
9	71.4	0.326	14.7	0.1952	820	0.4776	4.854	0.286
10	71.3	0.334	14.5	0.2000	819	0.4659	4.826	0.279
Cool to Ambient								
11	70.6	0.326	14.6	0.1956	818	0.4743	4.912	0.284
12	70.8	0.336	14.5	0.20132	817	0.4726	4.856	0.283
13	71.2	0.342	14.3	0.2048	816	0.4576	4.726	0.274
14	71.8	0.358	14.1	0.2144	819	0.4576	4.854	0.273
15	71.4	0.346	14.4	0.2072	820	0.4409	4.956	0.264
Cool to Ambient								
16	70.8	0.354	14.3	0.2119	821	0.4426	4.972	0.265
17	71.2	0.332	14.6	0.1988	824	0.4242	4.921	0.254
18	71.6	0.348	14.7	0.2084	820	0.4409	4.954	0.264
19	71.5	0.326	14.5	0.1952	821	0.4242	4.826	0.254
20	71.4	0.354	14.3	0.2119	820	0.4609	4.754	0.276
Test Result								
Mean	71.3	0.342	14.5	0.2053	820	0.4615	4.875	0.278

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 10/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/8 μ s			
Temperature : 30					Test Voltage : 188 kV			
%Humidity : 57					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 770			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-73.1	0.382	14.9	0.2287	-823	0.4937	5.006	0.295
2	-73.4	0.362	14.8	0.2168	-821	0.4909	5.042	0.294
3	-73.3	0.358	14.9	0.2144	-822	0.4893	4.984	0.293
4	-72.9	0.364	14.9	0.2179	-825	0.4859	4.954	0.291
5	-73.6	0.372	14.8	0.2228	-823	0.5043	4.992	0.302
Cool to Ambient								
6	-72.8	0.343	14.8	0.2054	-821	0.5210	5.001	0.312
7	-73.4	0.371	14.9	0.2222	-822	0.4943	5.004	0.296
8	-73.5	0.356	14.9	0.2132	-823	0.4743	4.982	0.284
9	-73.2	0.379	14.8	0.2269	-821	0.4876	4.979	0.292
10	-73.1	0.346	14.9	0.2072	-822	0.4926	4.956	0.295
Cool to Ambient								
11	-73.3	0.351	14.8	0.2102	-823	0.4809	4.944	0.288
12	-72.8	0.361	14.7	0.2162	-822	0.4609	5.001	0.276
13	-72.6	0.348	14.8	0.2084	-820	0.4993	5.012	0.299
14	-73.4	0.336	14.9	0.2012	-825	0.5027	4.956	0.301
15	-73.6	0.342	14.8	0.2048	-823	0.5193	4.826	0.311
Cool to Ambient								
16	-73.4	0.364	14.7	0.2179	-824	0.4977	4.954	0.298
17	-73.2	0.351	14.5	0.2102	-823	0.4943	5.018	0.296
18	-72.8	0.372	14.3	0.2228	-823	0.4909	4.994	0.294
19	-72.9	0.342	14.8	0.2048	-823	0.4927	4.981	0.295
20	-73.4	0.356	14.3	0.2132	-822	0.4943	5.001	0.296
Test Result								
Mean	-73.2	0.358	14.8	0.2143	-823	0.4933	4.982	0.295

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 12/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/10 μ s			
Temperature : 31					Test Voltage : 94 kV			
%Humidity : 58					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 769			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	59.0	0.568	14.3	0.3401	222	0.4192	3.625	0.251
2	58.0	0.601	14.2	0.3599	223	0.4142	3.624	0.248
3	58.0	0.584	14.3	0.3497	224	0.3908	3.594	0.234
4	57.0	0.572	14.4	0.3425	223	0.4041	3.584	0.242
5	58.0	0.584	14.5	0.3497	225	0.3925	3.258	0.235
Cool to Ambient								
6	59.0	0.583	14.6	0.3491	223	0.3908	3.526	0.234
7	58.0	0.546	14.3	0.3269	222	0.4275	3.674	0.256
8	57.0	0.582	14.4	0.3485	224	0.4142	3.652	0.248
9	58.0	0.593	14.3	0.3551	226	0.3908	3.484	0.234
10	59.0	0.576	14.1	0.3449	225	0.3841	3.521	0.230
Cool to Ambient								
11	56.0	0.542	14.1	0.3246	223	0.4142	3.436	0.248
12	57.0	0.561	14.2	0.3359	224	0.3858	3.548	0.231
13	58.0	0.592	14.3	0.3545	225	0.3908	3.456	0.234
14	56.0	0.612	14.2	0.3665	226	0.4108	3.621	0.246
15	58.0	0.587	14.1	0.3515	224	0.3908	3.602	0.234
Cool to Ambient								
16	59.0	0.576	14.4	0.3449	225	0.4275	3.598	0.256
17	56.0	0.584	14.3	0.3497	223	0.4142	3.624	0.248
18	57.0	0.592	14.2	0.3545	224	0.4242	3.584	0.254
19	58.0	0.599	14.3	0.3587	225	0.4025	3.496	0.241
20	56.0	0.601	14.2	0.3599	223	0.4242	3.548	0.254
Test Result								
Mean	57.6	0.582	14.3	0.3484	224	0.4057	3.553	0.243

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 12/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/10 μ s			
Temperature : 29					Test Voltage : 94 kV			
%Humidity : 55					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 768			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-60.3	0.584	14.5	0.3497	-229	0.4142	3.830	0.254
2	-60.1	0.564	14.6	0.3377	-230	0.4309	3.821	0.258
3	-60.1	0.556	14.7	0.3329	-228	0.4108	3.856	0.246
4	-59.8	0.563	14.8	0.3321	-229	0.3908	3.842	0.234
5	-60.2	0.564	14.4	0.3377	-229	0.4158	3.759	0.249
Cool to Ambient								
6	-60.3	0.526	14.3	0.3149	-230	0.4192	3.854	0.251
7	-60.4	0.542	14.5	0.3246	-229	0.4142	3.726	0.248
8	-60.5	0.556	14.6	0.3329	-230	0.4108	3.784	0.246
9	-60.1	0.548	14.7	0.3281	-230	0.4242	3.801	0.254
10	-60.3	0.534	14.8	0.3198	-229	0.4158	3.812	0.249
Cool to Ambient								
11	-60.2	0.542	14.6	0.3246	-229	0.4192	3.794	0.251
12	-60.1	0.536	14.5	0.3209	-229	0.4041	3.821	0.242
13	-60.4	0.596	14.4	0.3569	-229	0.4142	3.784	0.248
14	-60.3	0.548	14.3	0.3281	-229	0.4108	3.852	0.246
15	-59.9	0.536	14.6	0.3209	-229	0.4092	3.801	0.245
Cool to Ambient								
16	-58.4	0.542	14.7	0.3246	-230	0.4225	3.702	0.253
17	-60.1	0.536	14.3	0.3209	-229	0.4175	3.824	0.250
18	-60.2	0.576	14.4	0.3449	-229	0.4108	3.754	0.246
19	-60.3	0.542	14.5	0.3246	-229	0.4192	3.786	0.251
20	-60.4	0.594	14.6	0.3533	-230	0.4108	3.842	0.246
Test Result								
Mean	-60.1	0.554	14.5	0.3315	-229	0.4148	3.802	0.249

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 12/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/10 μ s			
Temperature : 29					Test Voltage : 188 kV			
%Humidity : 55					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 769			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	69.9	0.342	15.5	0.2048	816	0.4677	4.842	0.280
2	70.1	0.356	15.6	0.2132	816	0.4524	4.854	0.270
3	69.6	0.330	15.4	0.1976	816	0.4643	4.836	0.278
4	69.8	0.339	15.3	0.2029	815	0.4696	4.742	0.281
5	70.2	0.341	15.2	0.2047	815	0.4529	4.652	0.271
Cool to Ambient								
6	70.1	0.352	15.6	0.2108	816	0.4676	4.826	0.280
7	70.2	0.364	16.1	0.2179	816	0.4886	4.754	0.292
8	70.3	0.356	15.2	0.2132	816	0.4743	4.802	0.284
9	69.8	0.342	15.8	0.2048	816	0.4693	4.795	0.281
10	69.9	0.348	15.6	0.2084	816	0.4643	4.884	0.278
Cool to Ambient								
11	70.3	0.326	15.9	0.1952	816	0.4676	4.926	0.280
12	69.4	0.304	15.7	0.1820	815	0.4609	4.851	0.276
13	69.7	0.326	15.6	0.1952	816	0.4526	4.726	0.271
14	69.9	0.314	15.4	0.1880	816	0.4676	4.835	0.280
15	68.4	0.348	15.3	0.2084	816	0.4859	4.796	0.291
Cool to Ambient								
16	70.1	0.360	15.2	0.2156	815	0.4542	4.801	0.272
17	70.2	0.351	15.4	0.2102	815	0.4809	4.824	0.288
18	70.3	0.348	15.6	0.2084	816	0.4943	4.854	0.296
19	69.7	0.326	15.3	0.1952	816	0.4576	4.812	0.274
20	69.8	0.384	15.8	0.2299	815	0.4275	4.804	0.256
Test Result								
Mean	69.9	0.343	15.5	0.2053	816	0.4660	4.811	0.279

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P24 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P24					Date/Time : 12/03/2004			
Rated Voltage : 24 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 94 kV					Impulse test waveshape : 1.2/10 μ s			
Temperature : 30					Test Voltage : 188 kV			
%Humidity : 56					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 768			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-70.6	0.385	15.8	0.2305	-819	0.4696	4.896	0.281
2	-70.5	0.390	15.9	0.2335	-820	0.4659	4.836	0.279
3	-70.3	0.396	15.8	0.2371	-819	0.4743	4.941	0.284
4	-70.7	0.401	15.7	0.2401	-819	0.4943	4.842	0.296
5	-70.6	0.412	15.8	0.2467	-819	0.4576	4.921	0.274
Cool to Ambient								
6	-70.1	0.392	15.9	0.2347	-820	0.4693	4.936	0.281
7	-70.2	0.397	15.8	0.2377	-820	0.4659	4.842	0.279
8	-70.3	0.402	15.9	0.2402	-819	0.4526	4.754	0.271
9	-70.4	0.431	15.7	0.2581	-819	0.4743	4.824	0.284
10	-70.6	0.390	15.8	0.2335	-819	0.4776	4.986	0.286
Cool to Ambient								
11	-70.1	0.380	15.7	0.2275	-819	0.4943	4.724	0.296
12	-70.3	0.397	15.7	0.2377	-819	0.4576	4.856	0.274
13	-70.5	0.403	15.8	0.2413	-820	0.4242	4.832	0.254
14	-69.8	0.426	15.7	0.2551	-820	0.4058	4.848	0.293
15	-69.7	0.398	15.4	0.2383	-820	0.4743	4.812	0.284
Cool to Ambient								
16	-70.1	0.376	15.5	0.2251	-819	0.4576	4.854	0.274
17	-70.2	0.399	15.9	0.2389	-819	0.4776	4.842	0.286
18	-70.3	0.400	15.8	0.2395	-819	0.4859	4.816	0.291
19	-70.1	0.401	15.8	0.2401	-819	0.4726	4.796	0.283
20	-69.3	0.412	15.7	0.2467	-819	0.4659	4.856	0.279
Test Result								
Mean	-70.3	0.399	15.6	0.2391	-819	0.4659	4.851	0.282

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 4/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/50 μ s			
Temperature : 29					Test Voltage : 82.3 kV			
%Humidity : 68					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 767			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	53.8	0.496	58.9	0.297	259	0.3820	10.302	0.229
2	52.8	0.491	58.6	0.294	254	0.4008	10.260	0.240
3	53.5	0.339	58.4	0.2029	259	0.3924	10.602	0.235
4	53.2	0.491	59.1	0.294	259	0.4091	10.080	0.245
5	53.4	0.315	58.9	0.1886	259	0.4024	10.130	0.241
Cool to Ambient								
6	52.6	0.373	57.9	0.2233	232	0.3882	10.390	0.232
7	53.2	0.277	58.7	0.1658	250	0.3874	10.340	0.232
8	52.8	0.507	58.2	0.3035	237	0.3974	10.210	0.238
9	53.1	0.507	58.5	0.3035	241	0.4049	10.160	0.242
10	52.7	0.507	58.1	0.3035	232	0.3841	10.080	0.230
Cool to Ambient								
11	53.8	0.492	58.1	0.2946	232	0.3882	10.181	0.232
12	52.7	0.492	58.2	0.2946	250	0.3874	10.342	0.232
13	53.1	0.363	58.2	0.2174	237	0.4008	10.094	0.240
14	53.3	0.491	59.0	0.2940	241	0.4041	10.080	0.242
15	53.2	0.507	58.9	0.3036	232	0.3924	10.152	0.235
Cool to Ambient								
16	53.4	0.492	58.2	0.2946	241	0.4092	10.610	0.245
17	53.5	0.483	58.9	0.2892	250	0.3774	10.080	0.226
18	53.8	0.399	58.2	0.2389	254	0.4008	10.340	0.240
19	53.1	0.492	59.3	0.2946	254	0.4051	10.160	0.242
20	52.9	0.510	58.8	0.3054	254	0.4162	10.094	0.249
Test Result								
Mean	53.2	0.451	58.6	0.2549	249	0.3760	10.234	0.237

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 4/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/50 μ s			
Temperature : 28					Test Voltage : 82.3 kV			
%Humidity : 70					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 767			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-53.4	0.453	57.8	0.2712	-228	0.4192	10.530	0.251
2	-53.5	0.522	58.4	0.3125	-232	0.4216	10.140	0.252
3	-53.6	0.533	58.0	0.3191	-228	0.4375	10.560	0.262
4	-53.2	0.533	57.9	0.3191	-223	0.4383	10.540	0.262
5	-53.4	0.537	57.8	0.3215	-219	0.4133	10.430	0.247
Cool to Ambient								
6	-53.2	0.516	59.1	0.3089	-241	0.4258	10.420	0.255
7	-53.1	0.523	58.4	0.3132	-228	0.4175	10.620	0.250
8	-52.9	0.545	58.2	0.3263	-219	0.4091	10.560	0.245
9	-52.8	0.539	58.1	0.3227	-219	0.4216	10.540	0.252
10	-53.6	0.519	58.3	0.3107	-232	0.4008	10.040	0.240
Cool to Ambient								
11	-53.4	0.325	57.5	0.1946	-219	0.4216	10.540	0.252
12	-53.6	0.423	58.3	0.2532	-228	0.4342	10.610	0.260
13	-52.7	0.537	58.3	0.3215	-228	0.4208	10.420	0.252
14	-53.2	0.514	58.5	0.3077	-232	0.4125	10.160	0.247
15	-53.2	0.525	58.2	0.3144	-227	0.4266	10.430	0.255
Cool to Ambient								
16	-52.9	0.423	57.2	0.2533	-238	0.4049	10.420	0.242
17	-53.4	0.537	58.3	0.3215	-232	0.4175	10.400	0.250
18	-53.6	0.519	58.4	0.3107	-219	0.4041	10.620	0.242
19	-53.3	0.523	59.1	0.3131	-227	0.4258	10.530	0.255
20	-53.5	0.522	58.0	0.3125	-228	0.4375	10.540	0.262
Test Result								
Mean	-53.3	0.503	58.2	0.3014	-227	0.4205	10.450	0.252

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 4/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/50 μ s			
Temperature : 28					Test Voltage : 164.6 kV			
%Humidity : 71					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 766			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	63.4	0.346	65.9	0.2072	739	0.4175	13.270	0.250
2	63.6	0.355	65.9	0.2126	731	0.4175	12.980	0.250
3	63.8	0.349	65.8	0.2089	739	0.4008	13.060	0.240
4	63.7	0.342	65.7	0.1926	738	0.3941	13.040	0.236
5	63.4	0.321	65.6	0.1922	732	0.4041	13.120	0.242
Cool to Ambient								
6	63.5	0.346	65.5	0.2072	733	0.4175	13.280	0.250
7	63.6	0.312	65.6	0.1868	736	0.4008	12.980	0.240
8	63.8	0.302	65.4	0.1808	738	0.4041	13.020	0.242
9	63.7	0.326	65.3	0.1952	739	0.4142	13.34	0.248
10	63.4	0.339	65.1	0.2029	732	0.3691	13.040	0.221
Cool to Ambient								
11	63.1	0.354	65.8	0.2119	733	0.4108	13.120	0.246
12	63.4	0.342	65.9	0.2048	734	0.3901	13.540	0.239
13	63.9	0.314	65.7	0.1880	736	0.4208	13.280	0.252
14	63.2	0.356	65.7	0.2132	734	0.4375	12.560	0.262
15	63.5	0.321	65.8	0.1922	735	0.4242	12.840	0.254
Cool to Ambient								
16	63.4	0.352	65.7	0.2108	737	0.4175	13.210	0.250
17	63.6	0.312	65.7	0.1868	739	0.4008	13.260	0.240
18	63.8	0.323	65.9	0.1934	734	0.3841	13.010	0.230
19	63.7	0.326	65.8	0.1952	736	0.4092	13.140	0.245
20	63.4	0.341	65.6	0.2042	738	0.4092	13.280	0.245
Test Result								
Mean	63.6	0.334	65.7	0.1993	735	0.4072	13.140	0.244

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/50 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 4/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/50 μ s			
Temperature : 28					Test Voltage : 164.6 kV			
%Humidity : 72					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 768			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-64.7	0.349	66.1	0.2089	-739	0.4125	13.230	0.250
2	-64.6	0.351	65.2	0.2102	-731	0.4008	13.250	0.240
3	-64.5	0.348	65.6	0.2084	-739	0.4008	13.060	0.240
4	-64.6	0.352	65.7	0.2108	-739	0.3925	13.160	0.235
5	-64.7	0.336	65.6	0.2012	-732	0.4041	13.240	0.242
Cool to Ambient								
6	-64.8	0.352	65.4	0.2108	-738	0.4025	13.080	0.241
7	-64.7	0.346	65.7	0.2072	-734	0.4008	13.140	0.240
8	-64.6	0.354	65.4	0.2119	-732	0.3941	13.230	0.236
9	-64.5	0.362	66.2	0.2168	-736	0.3925	13.120	0.235
10	-64.6	0.342	66.9	0.2048	-732	0.4041	13.140	0.242
Cool to Ambient								
11	-64.7	0.354	65.4	0.2119	-739	0.4008	13.240	0.240
12	-64.6	0.362	65.6	0.2168	-731	0.4175	13.210	0.250
13	-64.5	0.342	65.9	0.2048	-735	0.4041	13.420	0.242
14	-64.6	0.361	65.8	0.2162	-736	0.4025	13.210	0.240
15	-64.5	0.42	64.9	0.2048	-737	0.4025	13.160	0.241
Cool to Ambient								
16	-64.7	0.342	65.1	0.2048	-734	0.4041	13.180	0.242
17	-64.6	0.356	65.2	0.2132	-734	0.3925	13.200	0.250
18	-64.9	0.321	65.4	0.1922	-732	0.4041	13.210	0.242
19	-64.6	0.342	65.8	0.2048	-733	0.4275	13.180	0.256
20	-64.6	0.331	65.3	0.1982	-734	0.4041	13.190	0.242
Test Result								
Mean	-64.6	0.347	65.6	0.2079	-735	0.4035	13.190	0.242

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.5 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/4 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 5/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/4 μ s			
Temperature : 29					Test Voltage : 82.3 kV			
%Humidity : 65					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 768			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	50.2	0.818	4.300	0.4898	207	0.9185	2.830	0.550
2	52.7	0.554	4.167	0.3317	239	0.4993	2.540	0.299
3	52.7	0.488	4.207	0.2922	232	0.4968	2.517	0.287
4	52.7	0.359	4.062	0.2149	239	0.4993	2.540	0.299
5	52.4	0.544	4.297	0.3257	239	0.4993	2.540	0.299
Cool to Ambient								
6	52.7	0.546	4.349	0.3269	239	0.4993	2.540	0.299
7	52.1	0.546	4.258	0.3269	232	0.4968	2.517	0.297
8	52.7	0.546	4.419	0.3269	243	0.5010	2.535	0.300
9	52.1	0.542	4.254	0.3245	236	0.5302	2.512	0.318
10	52.1	0.600	4.277	0.3593	232	0.4968	2.517	0.297
Cool to Ambient								
11	52.3	0.547	4.258	0.3275	231	0.4459	2.517	0.297
12	52.7	0.542	4.441	0.3245	243	0.4942	2.540	0.295
13	52.7	0.559	4.441	0.3347	240	0.5882	2.823	0.352
14	52.5	0.397	4.258	0.2377	239	0.4993	2.540	0.299
15	52.1	0.542	4.265	0.3245	239	0.4993	2.515	0.299
Cool to Ambient								
16	52.1	0.554	4.062	0.3317	232	0.5177	2.512	0.310
17	52.4	0.612	4.167	0.3665	232	0.5017	2.492	0.300
18	52.4	0.554	4.254	0.3317	239	0.4942	2.517	0.295
19	52.4	0.545	4.167	0.3263	235	0.4801	2.533	0.287
20	52.7	0.570	4.297	0.3413	238	0.4942	2.533	0.295
Test Result								
Mean	52.3	0.548	4.260	0.3328	235	0.5251	2.556	0.299

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/4 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 5/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/4 μ s			
Temperature : 29					Test Voltage : 82.3 kV			
%Humidity : 64					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 768			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-51.6	0.597	4.543	0.3574	-243	0.5010	2.535	0.300
2	-53.6	0.559	4.182	0.3347	-236	0.5302	2.512	0.317
3	-54.2	0.452	3.947	0.2706	-239	0.4993	2.540	0.299
4	-54.2	0.552	4.337	0.3305	-243	0.5010	2.535	0.300
5	-53.7	0.661	4.334	0.3958	-232	0.4968	2.517	0.297
Cool to Ambient								
6	-53.4	0.485	4.401	0.2904	-229	0.4759	2.515	0.285
7	-54.2	0.592	4.483	0.3545	-239	0.4993	2.540	0.299
8	-53.6	0.685	4.390	0.4101	-232	0.4968	2.517	0.297
9	-53.6	0.568	4.020	0.3401	-239	0.4993	2.540	0.299
10	-54.7	0.650	4.366	0.3892	-236	0.5302	2.512	0.317
Cool to Ambient								
11	-53.6	0.561	4.342	0.3359	-232	0.5028	2.517	0.301
12	-53.2	0.592	4.385	0.3545	-239	0.4991	2.522	0.298
13	-54.2	0.592	4.009	0.3545	-239	0.4993	2.573	0.299
14	-54.1	0.545	4.325	0.3263	-225	0.4968	2.517	0.297
15	-53.9	0.622	4.483	0.3725	-235	0.4993	2.573	0.299
Cool to Ambient								
16	-53.4	0.627	3.994	0.3754	-239	0.5160	2.535	0.309
17	-54.6	0.559	4.335	0.3347	-232	0.4968	2.459	0.297
18	-54.6	0.545	4.395	0.3263	-232	0.5217	2.502	0.312
19	-54.3	0.568	4.015	0.3401	-240	0.5003	2.572	0.299
20	-54.2	0.592	4.353	0.3545	-237	0.4993	0.573	0.299
Test Result								
Mean	-53.8	0.580	4.267	0.3474	-236	0.5036	2.530	0.301

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗.7 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/4 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 5/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/4 μ s			
Temperature : 29					Test Voltage : 164.6 kV			
%Humidity : 65					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 769			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	60.1	0.324	9.2	0.1940	696	0.4532	4.434	0.271
2	59.8	0.339	9.9	0.2029	692	0.4627	4.592	0.277
3	59.9	0.300	9.9	0.1796	692	0.4726	4.554	0.283
4	60.1	0.324	9.7	0.1940	692	0.4542	4.722	0.272
5	60.1	0.324	9.6	0.1940	690	0.4621	4.632	0.277
Cool to Ambient								
6	60.2	0.319	9.6	0.1910	692	0.4828	4.554	0.293
7	59.9	0.339	9.9	0.2029	692	0.4321	4.592	0.259
8	59.8	0.305	10.2	0.1826	689	0.4286	4.545	0.257
9	60.0	0.300	9.9	0.1796	692	0.4924	4.622	0.295
10	60.1	0.324	10.4	0.1940	689	0.4386	4.725	0.263
Cool to Ambient								
11	59.7	0.300	9.8	0.1796	694	0.5124	4.902	0.307
12	60.0	0.324	9.7	0.1940	692	0.4892	4.622	0.293
13	60.1	0.345	9.8	0.2066	692	0.4624	4.635	0.277
14	60.1	0.312	9.9	0.1868	691	0.4356	4.443	0.261
15	60.0	0.319	9.8	0.1910	690	0.4428	4.625	0.265
Cool to Ambient								
16	60.0	0.324	9.9	0.1940	691	0.4351	4.722	0.261
17	60.1	0.324	9.9	0.1940	692	0.4428	4.443	0.265
18	59.9	0.339	9.6	0.2029	691	0.4323	4.705	0.259
19	59.8	0.319	9.7	0.1910	692	0.4682	4.555	0.280
20	59.9	0.345	9.4	0.2066	693	0.4926	4.433	0.295
Test Result								
Mean	60.0	0.323	9.8	0.1931	692	0.4599	4.603	0.276

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๖.8 ผลการทดสอบกับฉักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/4 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 5/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/4 μ s			
Temperature : 30					Test Voltage : 164.6 kV			
%Humidity : 65					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 770			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-62.8	0.364	9.2	0.2179	-698	0.4926	4.870	0.295
2	-61.4	0.274	10.4	0.1641	-702	0.4852	5.132	0.291
3	-61.5	0.320	10.2	0.1916	-692	0.4913	4.853	0.294
4	-61.5	0.352	10.2	0.2108	-698	0.4726	4.740	0.283
5	-62.4	0.341	9.07	0.2042	-685	0.4654	4.872	0.279
Cool to Ambient								
6	-61.5	0.330	10.3	0.1976	-692	0.4892	4.735	0.293
7	-62.0	0.332	10.4	0.1988	-676	0.4936	4.622	0.296
8	-61.8	0.320	9.8	0.1916	-701	0.4641	4.871	0.278
9	-61.6	0.281	10.1	0.1683	-701	0.4897	4.871	0.291
10	-61.5	0.342	10.4	0.2048	-698	0.4631	4.742	0.277
Cool to Ambient								
11	-62.1	0.362	10.3	0.2168	-685	0.4784	5.421	0.286
12	-61.2	0.328	10.2	0.1964	-693	0.4961	4.732	0.297
13	-61.5	0.320	9.8	0.1916	-693	0.4394	4.714	0.263
14	-61.9	0.343	10.0	0.2054	-712	0.4872	4.625	0.292
15	-61.5	0.296	10.1	0.1772	-692	0.4542	4.853	0.272
Cool to Ambient								
16	-61.7	0.271	10.1	0.1623	-692	0.4678	4.852	0.280
17	-61.7	0.355	10.2	0.2126	-691	0.4921	5.532	0.295
18	-62.0	0.352	11.1	0.2108	-685	0.4836	5.210	0.289
19	-62.0	0.384	10.8	0.2299	-690	0.4741	4.880	0.284
20	-61.7	0.382	10.8	0.2287	-685	0.4312	4.761	0.258
Test Result								
Mean	-61.8	0.333	10.2	0.1991	-693	0.4756	4.603	0.285

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.9 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 6/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/8 μ s			
Temperature : 31					Test Voltage : 82.3 kV			
%Humidity : 58					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 769			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	52.2	0.559	11.2	0.3347	229	0.4593	3.285	0.275
2	52.6	0.569	11.2	0.3407	229	0.4426	3.325	0.265
3	52.4	0.542	11.3	0.3246	230	0.4346	3.294	0.260
4	52.3	0.556	11.4	0.3329	232	0.4509	3.261	0.270
5	52.1	0.546	11.5	0.3269	228	0.4759	3.258	0.285
Cool to Ambient								
6	52.2	0.526	11.4	0.3149	229	0.4609	3.426	0.276
7	52.3	0.536	11.7	0.3209	230	0.4593	3.584	0.275
8	52.2	0.542	11.5	0.3246	231	0.4359	3.346	0.261
9	52.4	0.539	11.3	0.3228	230	0.4041	3.256	0.242
10	52.5	0.542	11.2	0.3246	234	0.4092	3.242	0.245
Cool to Ambient								
11	52.4	0.539	11.2	0.3228	228	0.4242	3.296	0.254
12	52.6	0.556	11.3	0.3329	229	0.4375	3.342	0.262
13	52.3	0.561	11.4	0.3359	229	0.4609	3.458	0.276
14	52.6	0.545	11.5	0.3263	230	0.4593	3.421	0.275
15	52.7	0.545	11.6	0.3263	231	0.4142	3.324	0.248
Cool to Ambient								
16	52.8	0.562	11.6	0.3365	232	0.4275	3.261	0.256
17	52.9	0.548	11.4	0.3281	231	0.4259	3.248	0.255
18	52.5	0.521	11.3	0.3119	232	0.4142	3.252	0.248
19	52.3	0.523	11.2	0.3137	231	0.4375	3.261	0.262
20	52.9	0.554	11.3	0.3317	234	0.4142	3.345	0.248
Test Result								
Mean	52.4	0.546	11.4	0.3267	230	0.4374	3.319	0.262

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.10 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 6/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/8 μ s			
Temperature : 31					Test Voltage : 82.3 kV			
%Humidity : 59					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 769			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-53.5	0.514	11.3	0.3077	-233	0.4342	3.820	0.260
2	-53.6	0.563	11.1	0.3371	-232	0.5177	3.490	0.310
3	-53.7	0.562	11.4	0.3365	-234	0.4559	3.531	0.273
4	-53.4	0.564	11.5	0.3377	-233	0.4743	3.620	0.284
5	-53.6	0.565	11.4	0.3383	-232	0.4426	3.720	0.265
Cool to Ambient								
6	-53.4	0.562	11.3	0.3365	-230	0.4359	3.421	0.261
7	-53.3	0.552	11.2	0.3305	-234	0.4025	3.560	0.241
8	-53.6	0.546	11.1	0.3269	-235	0.4208	3.542	0.252
9	-53.8	0.534	11.6	0.3198	-236	0.4108	3.533	0.246
10	-53.4	0.543	11.3	0.3251	-231	0.4309	3.541	0.258
Cool to Ambient								
11	-53.2	0.525	11.4	0.3144	-235	0.4359	3.542	0.261
12	-53.4	0.532	11.5	0.3186	-234	0.4142	3.561	0.248
13	-53.6	0.565	11.6	0.3383	-232	0.4292	3.534	0.257
14	-53.6	0.560	11.7	0.3353	-231	0.4108	3.568	0.246
15	-53.5	0.563	11.2	0.3371	-236	0.4175	3.849	0.250
Cool to Ambient								
16	-53.6	0.564	11.3	0.3377	-234	0.4342	3.826	0.260
17	-53.7	0.556	11.4	0.3329	-231	0.4509	3.754	0.270
18	-53.6	0.545	11.5	0.3263	-233	0.4743	3.751	0.284
19	-53.7	0.521	11.6	0.3119	-236	0.4275	3.621	0.256
20	-53.4	0.531	11.8	0.3179	-237	0.4092	3.542	0.245
Test Result								
Mean	-53.5	0.548	11.4	0.3283	-233	0.4365	3.616	0.261

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.11 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/8 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 6/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/8 μ s			
Temperature : 30					Test Voltage : 164.6 kV			
%Humidity : 58					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 768			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	62.4	0.380	14.8	0.2275	707	0.4676	4.485	0.280
2	62.1	0.375	14.8	0.2246	707	0.4593	4.770	0.275
3	62.3	0.362	14.6	0.2168	706	0.4509	4.621	0.270
4	62.4	0.374	14.7	0.2239	708	0.4709	4.656	0.285
5	62.5	0.354	14.8	0.2119	706	0.4593	4.752	0.275
Cool to Ambient								
6	62.3	0.360	14.5	0.2156	705	0.4759	4.623	0.285
7	62.1	0.370	14.6	0.2216	708	0.4927	4.752	0.295
8	62.4	0.360	14.3	0.2156	706	0.4509	4.542	0.270
9	62.6	0.365	14.3	0.2186	709	0.4676	4.352	0.280
10	62.4	0.356	14.4	0.2132	710	0.4843	4.342	0.290
Cool to Ambient								
11	62.3	0.346	14.5	0.2072	708	0.4526	4.455	0.271
12	62.1	0.352	14.6	0.2108	707	0.4593	4.462	0.275
13	62.5	0.341	14.4	0.2042	705	0.4559	4.536	0.273
14	62.6	0.356	14.6	0.2132	704	0.4242	4.842	0.254
15	62.4	0.346	14.3	0.2072	707	0.4426	4.536	0.265
Cool to Ambient								
16	62.5	0.368	14.3	0.2204	703	0.4576	4.372	0.274
17	62.6	0.341	14.4	0.2042	704	0.4342	4.428	0.260
18	62.3	0.335	14.5	0.2006	705	0.4593	4.356	0.275
19	62.4	0.342	14.6	0.2048	706	0.4258	4.424	0.255
20	62.5	0.345	14.7	0.2066	705	0.4426	4.235	0.265
Test Result								
Mean	62.4	0.356	14.5	0.2134	706	0.4527	4.526	0.274

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.12 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/8 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 7/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/8 μ s			
Temperature : 32					Test Voltage : 164.6 kV			
%Humidity : 57					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 770			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-63.2	0.384	14.8	0.2299	-707	0.4634	4.948	0.277
2	-62.7	0.398	14.8	0.2383	-707	0.4626	4.945	0.277
3	-62.8	0.381	14.7	0.2281	-708	0.4693	5.001	0.281
4	-62.9	0.372	14.7	0.2228	-706	0.4609	4.856	0.276
5	-63.0	0.391	14.9	0.2341	-709	0.4759	4.942	0.285
Cool to Ambient								
6	-63.2	0.395	14.6	0.2365	-706	0.4559	4.926	0.273
7	-62.8	0.348	14.5	0.2084	-705	0.4526	4.812	0.271
8	-62.9	0.382	14.8	0.2287	-704	0.4509	5.024	0.270
9	-62.7	0.374	14.6	0.2239	-702	0.4426	5.128	0.265
10	-63.3	0.363	14.7	0.2174	-703	0.4559	4.981	0.273
Cool to Ambient								
11	-63.4	0.372	14.8	0.2228	-702	0.4992	4.902	0.269
12	-62.9	0.375	14.9	0.2162	-707	0.4476	4.856	0.268
13	-62.8	0.380	14.8	0.2275	-703	0.4542	5.124	0.272
14	-63.2	0.365	14.6	0.2186	-704	0.4776	5.326	0.286
15	-63.1	0.355	14.3	0.2126	-706	0.4242	4.948	0.254
Cool to Ambient								
16	-62.8	0.372	14.6	0.2228	-704	0.4526	4.326	0.271
17	-62.8	0.361	14.5	0.2162	-703	0.4476	4.858	0.268
18	-63.1	0.354	14.3	0.2119	-706	0.4576	4.926	0.274
19	-63.0	0.346	14.4	0.2072	-707	0.4392	5.212	0.263
20	-63.3	0.378	14.6	0.2263	-708	0.4576	5.024	0.274
Test Result								
Mean	-62.9	0.372	14.6	0.2225	-705	0.4549	4.735	0.272

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.13 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/10 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 5/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/10 μ s			
Temperature : 29					Test Voltage : 82.3 kV			
%Humidity : 66					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 768			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	51.3	0.431	15.1	0.2581	236	0.4216	4.005	0.252
2	51.3	0.414	15.1	0.2479	239	0.4283	4.102	0.256
3	51.1	0.508	15.1	0.3042	239	0.4283	4.102	0.256
4	51.4	0.544	15.1	0.3257	236	0.4216	4.005	0.252
5	51.9	0.577	14.7	0.3455	225	0.2797	3.750	0.167
Cool to Ambient								
6	51.3	0.500	15.2	0.2994	236	0.4216	4.005	0.252
7	51.4	0.530	15.2	0.3174	232	0.3039	4.153	0.182
8	51.2	0.528	15.2	0.3162	239	0.4283	4.102	0.256
9	51.2	0.524	15.2	0.3137	239	0.4283	4.102	0.256
10	51.5	0.531	15.1	0.3179	236	0.4216	4.005	0.252
Cool to Ambient								
11	51.4	0.528	15.2	0.3174	239	0.4283	4.151	0.256
12	51.2	0.528	15.2	0.3174	236	0.4216	4.102	0.252
13	51.4	0.524	15.1	0.3174	236	0.4216	4.102	0.252
14	51.3	0.510	15.2	0.3054	238	0.4283	4.099	0.256
15	51.2	0.576	15.1	0.3449	232	0.3259	4.153	0.195
Cool to Ambient								
16	51.4	0.530	15.3	0.3174	236	0.4216	4.102	0.252
17	51.9	0.529	15.1	0.3168	239	0.4177	4.009	0.250
18	51.1	0.544	15.6	0.3257	236	0.4434	4.125	0.255
19	51.3	0.544	15.1	0.3257	232	0.4283	4.201	0.256
20	51.3	0.508	15.2	0.3042	236	0.4283	4.102	0.256
Test Result								
Mean	51.4	0.520	15.2	0.3117	235	0.4074	4.074	0.243

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.14 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน STLI 1.2/10 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 5/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal Discharge current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/10 μ s			
Temperature : 29					Test Voltage : 82.3 kV			
%Humidity : 66					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 768			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-52.5	0.433	15.3	0.2593	-243	0.4375	4.115	0.262
2	-52.7	0.494	15.1	0.2958	-239	0.4283	4.102	0.256
3	-52.7	0.525	15.2	0.3144	-243	0.4375	4.115	0.262
4	-52.8	0.530	15.2	0.3173	-243	0.4375	4.115	0.262
5	-52.7	0.528	15.1	0.3162	-243	0.4375	4.115	0.262
Cool to Ambient								
6	-52.8	0.487	15.0	0.2916	-236	0.4216	4.005	0.252
7	-52.6	0.445	15.0	0.2665	-236	0.4216	4.005	0.252
8	-52.6	0.538	15.2	0.3222	-239	0.4283	4.102	0.256
9	-52.6	0.537	15.2	0.3215	-239	0.4283	4.102	0.256
10	-52.6	0.532	15.2	0.3185	-239	0.4283	4.102	0.256
Cool to Ambient								
11	-52.9	0.560	15.1	0.3353	-232	0.3039	4.153	0.182
12	-52.5	0.525	15.2	0.3144	-239	0.4258	4.102	0.255
13	-52.5	0.565	15.2	0.3383	-236	0.4375	4.105	0.262
14	-52.1	0.497	15.1	0.2976	-236	0.4283	4.102	0.256
15	-52.6	0.521	15.0	0.3119	-242	0.4283	4.102	0.256
Cool to Ambient								
16	-52.7	0.538	15.2	0.3222	-241	0.4216	4.110	0.252
17	-52.6	0.538	15.3	0.3222	-240	0.4278	4.095	0.256
18	-52.7	0.531	15.3	0.3179	-239	0.4436	4.102	0.265
19	-52.6	0.535	15.2	0.3204	-236	0.4278	4.115	0.256
20	-52.6	0.487	15.2	0.2916	-239	0.4216	4.102	0.252
Test Result								
Mean	-52.6	0.517	15.2	0.3098	-239	0.4236	4.098	0.254

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.15 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 7/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/10 μ s			
Temperature : 30					Test Voltage : 164.6 kV			
%Humidity : 58					Polarity : Positive			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 769			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	62.1	0.384	19.3	0.2299	691	0.4593	5.787	0.275
2	62.4	0.383	19.4	0.2293	699	0.4634	5.737	0.277
3	62.3	0.376	19.6	0.2251	701	0.4576	5.754	0.274
4	62.4	0.375	19.5	0.2246	695	0.4509	5.652	0.270
5	62.1	0.370	19.4	0.2216	697	0.4593	5.736	0.275
Cool to Ambient								
6	62.3	0.365	19.6	0.2186	694	0.4542	5.421	0.272
7	62.4	0.376	19.7	0.2251	699	0.4409	5.842	0.264
8	62.2	0.354	19.8	0.2119	694	0.4476	5.726	0.268
9	62.3	0.365	19.5	0.2186	692	0.4576	5.431	0.274
10	62.1	0.361	19.3	0.2162	693	0.4726	5.612	0.286
Cool to Ambient								
11	62.3	0.355	19.2	0.2126	694	0.4092	5.854	0.245
12	62.4	0.362	19.8	0.2168	698	0.4375	5.726	0.262
13	62.3	0.360	19.7	0.2156	698	0.4708	5.625	0.252
14	62.3	0.345	19.6	0.2066	694	0.4142	5.641	0.248
15	62.0	0.356	19.4	0.2132	694	0.4409	5.621	0.264
Cool to Ambient								
16	62.7	0.308	19.1	0.2084	701	0.4242	5.636	0.254
17	62.4	0.362	19.2	0.2168	700	0.4409	5.428	0.264
18	62.1	0.367	19.5	0.2198	702	0.4309	5.526	0.258
19	62.2	0.375	19.6	0.2246	699	0.4526	5.742	0.271
20	62.4	0.356	19.4	0.2132	698	0.4709	5.654	0.282
Test Result								
Mean	62.3	0.365	19.5	0.2184	697	0.4443	5.658	0.267

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.16 ผลการทดสอบกับดักฟ้าผ่า LAZ-P21 ด้วยแรงดัน SLI 1.2/10 μ s

Manufacturer & Model. : Precise LAZ-P21					Date/Time : 7/03/2004			
Rated Voltage : 21 kV					Nominal D.current : 5 kA			
Impulse 1.2/50 μ s (BIL) : 82.3 kV					Impulse test waveshape : 1.2/10 μ s			
Temperature : 30					Test Voltage : 164.6 kV			
%Humidity : 57					Polarity : Negative			
Reference standard : IEC 60099-4 (2001)					Pressure (mmHg) : 770			
No.	Residual (kV)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)	Current (A)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	Δ T (μ s)
1	-63.2	0.378	19.5	0.2263	-707	0.4429	4.875	0.265
2	-63.9	0.388	19.3	0.2323	-707	0.4618	4.940	0.276
3	-64.0	0.374	19.2	0.2239	-708	0.4593	4.852	0.275
4	-63.8	0.356	19.3	0.2132	-705	0.4609	4.921	0.276
5	-63.5	0.366	19.4	0.2192	-704	0.4426	4.756	0.265
Cool to Ambient								
6	-64.1	0.352	19.6	0.2108	-703	0.4576	4.824	0.274
7	-63.9	0.348	19.5	0.2084	-704	0.4509	4.726	0.270
8	-64.2	0.354	19.7	0.2119	-706	0.4759	4.954	0.285
9	-63.8	0.361	19.4	0.2162	-705	0.4892	4.695	0.263
10	-63.7	0.386	19.3	0.2311	-706	0.4759	4.701	0.285
Cool to Ambient								
11	-63.6	0.358	19.1	0.2144	-703	0.4743	4.826	0.284
12	-63.5	0.394	19.2	0.2359	-706	0.4676	4.854	0.280
13	-63.8	0.356	19.6	0.2132	-709	0.4576	4.926	0.274
14	-63.9	0.378	19.8	0.2263	-703	0.4526	4.852	0.271
15	-63.8	0.386	19.0	0.2311	-705	0.4743	4.954	0.284
Cool to Ambient								
16	-64.1	0.354	19.2	0.2119	-704	0.4108	4.726	0.246
17	-64.2	0.363	19.4	0.2174	-706	0.4808	4.894	0.252
18	-64.3	0.384	19.9	0.2299	-709	0.4225	4.628	0.253
19	-63.8	0.356	19.6	0.2132	-706	0.4359	4.724	0.261
20	-63.7	0.348	19.4	0.2084	-704	0.4342	4.654	0.260
Test Result								
Mean	-63.8	0.367	19.4	0.2198	-706	0.4539	4.574	0.244

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการชดเชยเวลาตอบสนองของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

Compensation Technique for Tuning the Response Time of the Resistive Impulse Voltage Divider for Steep-Front Impulse Voltage Measurements

ไชยพร หล่อทองคำ สิริวิวัฒน์ โทธิเวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ 02) 7372560-1, โทรสาร 02) 7372561, E-mail: chaiyapo@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการชดเชยค่าเวลาตอบสนองของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน สำหรับใช้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน โดยใช้เทคนิคการเพิ่มวงจรชดเชยในภาคแรงต้าน เพื่อหาขอบความถี่ถึงเทคนิคการชดเชยค่าเวลาตอบสนอง ซึ่งพัฒนาจากความสัมพันธ์ฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยหลักการวิเคราะห์ห้วงจรทางไฟฟ้า เทคนิคการชดเชยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการพัฒนาคุณลักษณะสมบัติเวลาตอบสนองแรงดันรูปชันของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อใช้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงได้เป็นอย่างดี จากผลการทดลองประยุกต์ใช้งานเทคนิคการชดเชยกับอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานขนาด 400 kV ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง พบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจมาก งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เพื่อรองรับการทดสอบและงานวิจัยในอนาคต

Abstract

This paper presents the novel technique called "compensation technique". The compensation technique can be applied to consider the response time of the resistive impulse voltage divider, which will be used to measure the steep-front impulse voltage. This technique has been done by adding the compensating circuit into the low-voltage part of divider. The technique is developed base on mathematics transfer function of the measured system. The details are described in the paper. The proposed model is proven using the circuit theory. By employing this technique, the response parameters of the impulse voltage divider can be improved. This compensation technique is convenient to applied in the high voltage laboratories. Also, it was found that this technique is satisfied when it was applied to a 400 kV resistive impulse voltage divider in the laboratory. The unit step response quite close to and ideal. The research is useful in the development of high voltage technology in order to support the high voltage test and research in the future.

Keywords: Voltage Divider, Steep-Front Impulse, Response Time.

1. บทนำ

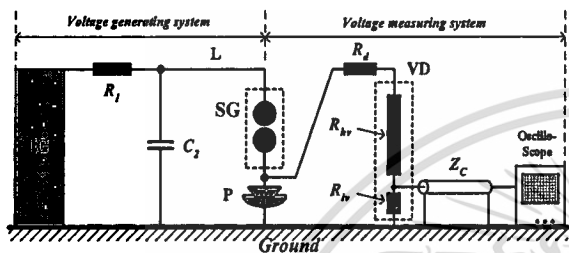
ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานผลิตลูกถ้วยฉนวนหลายแห่งที่สามารถผลิตลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่มีคุณภาพดีทัดเทียมกับต่างประเทศ ลูกถ้วยฉนวนที่ผลิตขึ้นนี้จำเป็นต้องผ่านการทดสอบคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ระดับความชันหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบมากกว่า 2500 kV/ μ s ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน [1-2] ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันทดสอบมีความชันหน้าคลื่นที่สูงมาก มีช่วงเวลาหน้าคลื่นประมาณ 100-200 ns อุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงดันในการทดสอบจึงต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวสูงมีเวลาตอบสนองที่รวดเร็วและมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากพอ [3-4] ในทางปฏิบัติจะใช้อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ต่อร่วมกับออสซิลโลสโคป ซึ่งตามข้อเสนอแนะของ [5] อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้ควรเป็นแบบมีความต้านทานต่ำ หรือแบบอื่นที่ให้ผลตอบสนองทางเวลาที่รวดเร็ว อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวหากนำเข้ามาจากต่างประเทศจะมีราคาที่สูงมาก จึงมีนักวิจัยหลายท่าน [6] ได้พัฒนาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่มีค่าเวลาตอบสนองที่เร็วขึ้นสำหรับใช้งานในห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงภายในประเทศ

บทความนี้จึงเสนอเทคนิคการชดเชยค่าเวลาตอบสนองของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน สำหรับใช้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ซึ่งแตกต่างจากรายงานผลการวิจัยของ [6] ที่เป็นการพัฒนาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหนึ่ง เทคนิคการชดเชยที่นำเสนอในงานวิจัยนี้พัฒนาจากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยหลักการวิเคราะห์ห้วงจรทางไฟฟ้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการพัฒนาปรับแก้คุณลักษณะสมบัติเวลาตอบสนองของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการใช้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันสำหรับการทดสอบและการศึกษาวิจัย เทคนิคนี้สะดวกต่อการใช้งานด้วยการเพิ่มองค์ประกอบวงจรชดเชยในภาคแรงต้านเพียงอย่างเดียว ผลการทดลองประยุกต์ใช้เทคนิคการชดเชยเวลาตอบสนองนี้กับอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานขนาด 400 kV เพื่อใช้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันในการทดสอบความคงทนต่อการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนของลูกถ้วยฉนวนประเภท Class 52-8 ในห้องปฏิบัติการทดสอบวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง พบว่าสามารถใช้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันได้เป็นอย่างดี และมีผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจมาก

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรทดสอบและระบบวัดแรงดันอินพัลส์หน้าคลื่นชัน

การทดสอบเจาะทะลุเนื้อฉนวนถูกด้วยไฟฟ้าด้วยแรงดันอินพัลส์หน้าคลื่นชัน โดยทั่วไปจะอาศัยหลักการสร้างแรงดันอินพัลส์หน้าคลื่นชันด้วยการใช้สปาร์กแกปตัดคลื่นแรงดันอินพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s ที่ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอินพัลส์ปกติในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง [5,7] ซึ่งลักษณะของวงจรทดสอบและระบบวัดแรงดันอินพัลส์หน้าคลื่นชันโดยทั่วไป สามารถแสดง ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรการทดสอบและระบบวัดแรงดันสูงอินพัลส์หน้าคลื่นชัน

โดยที่ IG คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอินพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน

R_1 คือ ความต้านทานปรับเวลาหน้าคลื่น

C_2 คือ ตัวเก็บประจุโหลดหรือตัวเก็บประจุคัปปลิ่ง

L คือ สายนำแรงสูง

SG คือ สปาร์กแกปตัดคลื่นบรรจุนับถึงฉนวนที่อัตราความดัน

P คือ ถูกด้วยฉนวนที่ทดสอบ

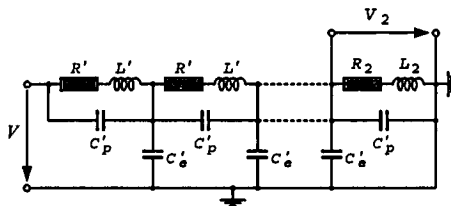
R_v คือ ความต้านทานหน่วง

VD คือ อินพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

Z_c คือ สายนำสัญญาณ (สายเคเบิล) ภาคแรงดันต่ำ

2.2 อินพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

อินพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานมีองค์ประกอบทั้งภาคแรงสูงและแรงต่ำเป็นตัวความต้านทานล้วน ความต้านทานภาคแรงสูงนิยมใช้เป็นแบบขดลวดพันรอบแกนฉนวน (Wire Wound Resistor) โดยออกแบบให้มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำมากๆ ในมาตรฐาน [3-4] ได้กำหนดลักษณะสมบัติทางด้านเวลาที่ต้องการของอินพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่สำคัญไว้ 2 ประการ คือ แบนด์วิดท์ (Bandwidth) และเวลาตอบสนอง (Response Time) ซึ่งวงจรมูลของอินพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2 โดยที่ V คือ แรงดันสูงป้อนเข้า, V_2 คือ แรงดันต่ำขาออกที่วัดได้, C_p' คือ Stray capacitance (parallel), C_e' คือ Stray capacitance to earth (or ground), R' และ L' เป็นองค์ประกอบความต้านทานย่อยและความเหนี่ยวนำย่อยแฝงของภาคแรงสูง ตามลำดับ, R_2 และ L_2 เป็นองค์ประกอบความต้านทานและความเหนี่ยวนำของภาคแรงต่ำ ตามลำดับ



รูปที่ 2 วงจรมูลของอินพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

2.3 เวลาตอบสนองของระบบวัด

อินพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์เป็นองค์ประกอบวงจรแบบพาสซีฟ ลักษณะสมบัติการถ่ายทอดแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ในฟังก์ชันของความถี่สามารถพิจารณาได้จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอน $H(\omega)$ ในรูปของอิมพลีจคอมเพล็กซ์ [8] ดังนั้นการวิเคราะห์คุณสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์จึงต้องพิจารณาทั้งผลตอบสนองอิมพลีจและเฟสของระบบ ในทางปฏิบัติการหาลักษณะการถ่ายทอดแรงดันของระบบวัดจะใช้วิธีหาค่าผลตอบสนองแรงดันรูปขั้น (Unit Step Response) [3-4] ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1) นั่นคือ

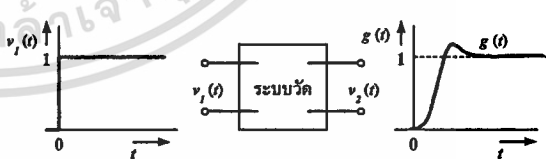
$$G(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{H(s)}{s} \right] \tag{1}$$

โดยที่ $H(s)$ เป็นลาปลาซทรานสฟอร์มในฟังก์ชันของความถี่ เมื่อเขียนให้อยู่ในเทอมของผลตอบสนองรูปขั้นในรูปนอร์มัลไลซ์ (Normalized) เป็น

$$g(t) = \frac{G(t)}{G(t \rightarrow 0)} \tag{2}$$

จากผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์, $g(t)$ สามารถคำนวณหาค่า ทารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบวัดได้ นั่นคือ ค่าเวลาตอบสนอง (Response Time, T_N) ของระบบวัด ซึ่งหมายถึงเวลาที่เข้าไปโดยเฉลี่ย ดังสมการ

$$T_N = \int_0^{\infty} [1 - g(t)] dt \tag{3}$$



รูปที่ 3 ผลตอบสนองรูปขั้นของระบบวัดแรงดันอินพัลส์

3. เทคนิคการหาค่าเวลาตอบสนอง

คุณลักษณะสมบัติของอินพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้งานในการวัดแรงดันอินพัลส์หน้าคลื่นชันจะต้องมีค่าเวลาตอบสนองที่เร็ว งานวิจัยนี้จึงเสนอเทคนิคการพัฒนาคุณลักษณะสมบัติเวลาตอบสนองของอินพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานที่มีใช้งานอยู่เดิม โดยพิจารณาจาก วงจรมูลของอินพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ดังรูปที่ 2 ซึ่งสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ (Normalized Transfer Function) [8] ได้เป็น

$$h_i(s) = n \frac{\sinh \frac{1}{n} \sqrt{\frac{(R+sL)sC_e}{1+(R+sL)sC_p}}}{\sinh \sqrt{\frac{(R+sL)sC_e}{1+(R+sL)sC_p}}} \quad (4)$$

เมื่อวิเคราะห์หาค่าผลตอบสนองรูปขึ้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ ของระบบจะได้ว่า

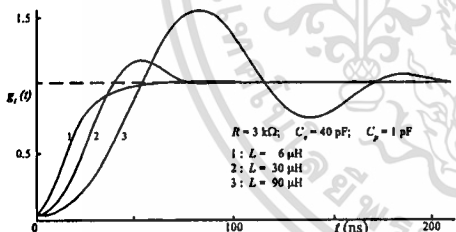
$$g(t) = 1 + 2e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \sinh(b_k t)}{1 + \frac{C_p}{C_e} k^2 \pi^2} \quad (5)$$

โดยที่ $a = R/2L$

$$b_k = \sqrt{a^2 - \frac{k^2 \pi^2}{LC_e [1 + k^2 \pi^2 (C_p/C_e)]}}$$

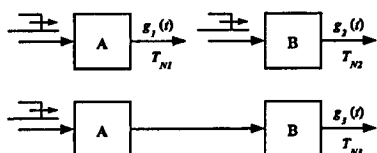
$k = 1, 2, 3, \dots, \infty$

จากสมการที่ (5) เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาแฟกเตอร์ขององค์ประกอบวงจรอิมพีแดนซ์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน ที่มีผลต่อฟังก์ชันผลตอบสนองรูปขึ้นนอร์มัลไลซ์ของระบบวัดและค่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์เอง พบว่าองค์ประกอบตัวเหนี่ยวนำ (L) เป็นแฟกเตอร์ที่น่าสนใจ สามารถประยุกต์ใช้เพื่อชดเชยค่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์ได้ โดยการเพิ่มองค์ประกอบตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมเข้าไปจะช่วยให้ผลตอบสนองรูปขึ้นนอร์มัลไลซ์ของระบบดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสำหรับงานวิจัยนี้



รูปที่ 4 ผลของค่าความเหนี่ยวนำภาคแรงต้านต่อฟังก์ชันผลตอบสนอง $g(t)$

จากแนวทางดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิควิธีเพิ่มวงจรชดเชย (Compensating Circuit) เข้าไปในภาคแรงต้านของโวลเตจดีไวเดอร์เพื่อชดเชยค่าเวลาตอบสนองของอิมพีแดนซ์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน โดยอาศัยหลักการ คือ เมื่อเราพิจารณาคุณสมบัติของระบบวัด 2 ระบบที่มีค่าเวลาตอบสนองแรงดันรูปขึ้น (Unit Step Response Time) เป็น T_{N1} และ T_{N2} ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะการต่ออนุกรมระบบวัดที่มีค่าเวลาตอบสนองต่างกัน

จากรูปที่ 5 เราสามารถคำนวณหาค่าเวลาตอบสนองแรงดันรูปขึ้น T_{N3} ของระบบวัดใหม่ที่ได้จากการนำเอา 2 ระบบแรกมาต่ออนุกรมกัน ดังนั้นจากนิยามของฟังก์ชันค่าเวลาตอบสนองแรงดันรูปขึ้นของระบบวัดทั้ง 3 ระบบดังกล่าว ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{N1} = \int_0^t [1 - g_1(t)] dt \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{1}{s} - G_1(s) \Big|_{s \rightarrow 0} \quad (6)$$

$$T_{N2} = \int_0^t [1 - g_2(t)] dt \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{1}{s} - G_2(s) \Big|_{s \rightarrow 0} \quad (7)$$

$$T_{N3} = \int_0^t [1 - g_3(t)] dt \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{1}{s} - G_3(s) \Big|_{s \rightarrow 0} \quad (8)$$

โดยที่ $G(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ของฟังก์ชัน $g(t)$ ดังนั้นเมื่อใช้หลักการอินทิกรัลผลคูณประสาน (Convolution Integral) เพื่อหาฟังก์ชันผลตอบสนองรูปขึ้นของระบบวัดใหม่ ($g_3(t)$) ตามรูปที่ 5 จะได้เป็น

$$g_3(t) = \int_0^t \frac{dg_1(t)}{dt} g_2(t - \tau) dt$$

$$G_3(s) = sG_1(s)G_2(s) \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) เราสามารถหาค่าเวลาตอบสนอง T_{N3} ของระบบวัดได้ โดยใช้นิยามจากสมการที่ (6), (7) และ (8) นั่นคือ

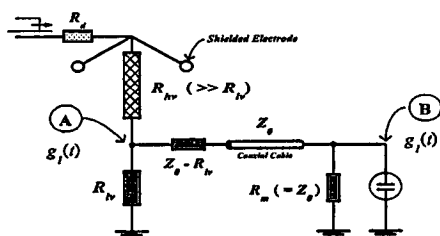
$$T_{N3} = \frac{1}{s} - sG_1(s)G_2(s) \Big|_{s \rightarrow 0}$$

$$T_{N3} = \frac{1}{s} - s \left(\frac{1}{s} - T_{N1} \right) \left(\frac{1}{s} - T_{N2} \right) \Big|_{s \rightarrow 0}$$

$$= T_{N1} + T_{N2} - sT_{N1}T_{N2} \Big|_{s \rightarrow 0}$$

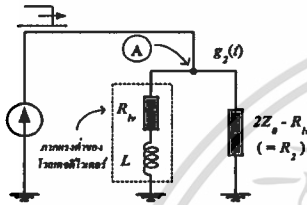
$$= T_{N1} + T_{N2} \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) แสดงว่าค่าเวลาตอบสนองแรงดันรูปขึ้นของระบบวัดที่ได้จากการนำระบบวัด 2 ระบบ มาต่ออนุกรมกันจะมีค่าเท่ากับผลรวมค่าเวลาตอบสนองของทั้ง 2 ระบบนั่นเอง



รูปที่ 6 องค์ประกอบวงจรอิมพีแดนซ์โวลเตจดีไวเดอร์ (R) ก่อนการชดเชย

เมื่อนำหลักการนี้มาวิเคราะห์เกี่ยวกับระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานปกติก่อนการชดเชย ที่พิจารณาองค์ประกอบรวมทั้งภาคแรงดันสูงและแรงดันต่ำ รวมทั้งสายนำสัญญาณแรงต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 6 ถ้ามีการทำแมชชิงวงจรด้านแรงต่ำอย่างเหมาะสมจะได้ฟังก์ชันผลตอบสนองแรงดันรูปขั้น ($g_1(t)$) ของระบบวัดก่อนการชดเชยที่จุด A และ B มีค่าเท่ากัน การชดเชยค่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานนี้ สามารถทำได้โดยการเพิ่มองค์ประกอบตัวเหนี่ยวนำชดเชยไว้ที่ภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาในห้วงที่ประกอบตัวเหนี่ยวนำชดเชยนี้เปรียบเสมือนระบบวัดระบบหนึ่งที่มีฟังก์ชันผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นเป็น ($g_2(t)$) ซึ่งสามารถเขียนวงจรมุมวลได้ดังแสดงในรูปที่ 7

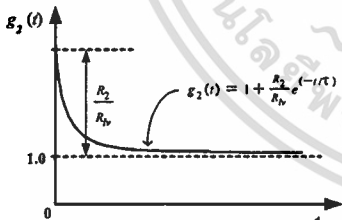


รูปที่ 7 วงจรมุมวลภาคแรงต่ำของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ (แบบ R) เมื่อใส่องค์ประกอบตัวเหนี่ยวนำชดเชยในภาคแรงต่ำ

จากวงจรมุมวลในรูปที่ 7 สามารถวิเคราะห์หาฟังก์ชันผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของระบบชดเชย ($g_2(t)$) ได้เป็น

$$g_2(t) = 1 + \frac{R_2}{R_{iv}} e^{-(t/\tau)} \quad (11)$$

โดยที่ $\tau = L/2Z_0$ และ $R_2 = 2Z_0 - R_{iv}$ กราฟของฟังก์ชันผลตอบสนองแรงดันรูปขั้น ($g_2(t)$) แสดงดังรูปที่ 8



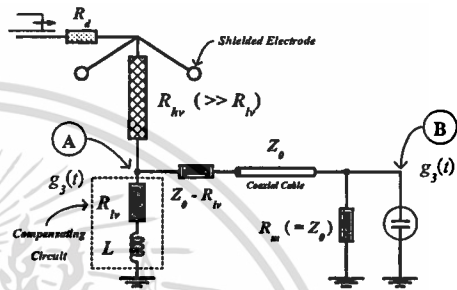
รูปที่ 8 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้น $g_2(t)$ ของวงจรถดเชยตามรูปที่ 7

จากสมการที่ (10) จะเห็นว่าถ้าค่าเวลาตอบสนองแรงดันรูปขั้นของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่ยังไม่ได้ชดเชย (T_{N1}) มีค่ามาก (ช้า) เราสามารถแก้ค่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์นี้ใหม่ให้มีค่าเร็วขึ้นได้ ด้วยการเพิ่มวงจรถดเชยตามรูปที่ 7 เข้าไปในองค์ประกอบภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ ดังนั้นค่าเวลาตอบสนองของวงจรถดเชยที่เพิ่มเข้าไปนี้จะต้องมีค่าเป็นลบ ($-T_{N2}$) อาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ (7) และ (11) เราสามารถคำนวณหาค่า T_{N2} ของวงจรถดเชยได้เป็น

$$T_{N2} = -[(1/R_{iv}) - (1/2Z_0)] \times L \quad (12)$$

เมื่อนำหลักการชดเชยจากวงจรในรูปที่ 7 รวมเข้ากับวงจรมุมวลของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานปกติก่อนการชดเชยในรูปที่ 6 ทำให้สามารถพัฒนาระบบวัดใหม่ที่มีคุณลักษณะสมบัติเวลาตอบสนองแรงดันรูปขั้นที่ดีขึ้น วงจรมวลแสดงดังรูปที่ 9 โดยที่ $g_3(t)$ เป็นฟังก์ชันผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของระบบวัดใหม่ที่ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถออกแบบหาค่าความเหนี่ยวนำ (L) ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าเวลาตอบสนองแรงดันรูปขั้นของระบบวัดใหม่ (T_{N3}) มีค่าใกล้เคียงศูนย์ นั่นคือ

$$T_{N3} = T_{N1} + T_{N2} \cong 0 \quad (13)$$



รูปที่ 9 วงจรถดเชยค่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์แบบ R

4. การทดสอบและวิเคราะห์ผล

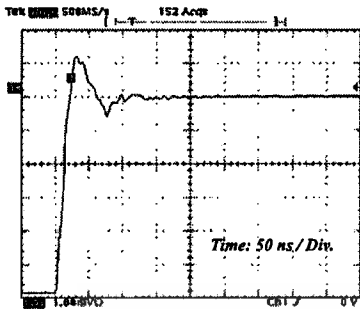
จากหลักการชดเชยค่าเวลาตอบสนองของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานขนาด 400 kV ที่มีใช้งานอยู่เดิม เพื่อให้สามารถใช้งานในการวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงได้ ข้อมูลองค์ประกอบของตัวอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่ทำการพัฒนาคุณสมบัติเวลาตอบสนองเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนและหลังการพัฒนาองค์ประกอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าในการพัฒนาคุณสมบัติของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานด้วยเทคนิคการชดเชยนี้ สามารถทำได้ง่ายมากโดยการแก้ไขปรับปรุงที่วงจรถดเชยภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์เพียงอย่างเดียว ส่วนองค์ประกอบอื่นยังคงเหมือนเดิม

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่พัฒนา

องค์ประกอบพื้นฐาน	คุณสมบัติที่ได้	
	ก่อนพัฒนา	หลังพัฒนา
พิกัดแรงดันอิมพัลส์	400 kV	400 kV
ความต้านทานภาคแรงสูง (R_{iv})	9178 Ω	9178 Ω
ความต้านทานภาคแรงต่ำ (R_{iv})	11.58 Ω	11.58 Ω
ความต้านทานหน้าวง (R_d)	371.65 Ω	371.65 Ω
ค่าความเหนี่ยวนำชดเชย (L)	-	44 nH
ค่า Scale Factor	827	824

รูปที่ 10 เป็นตัวอย่างผลการทดสอบคุณสมบัติผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ออสซิลโลสโคป

โคปแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Textronix รุ่น TSD744 (400 MHz) มีค่าเวลาขาขึ้นน้อยกว่า 12 ns ค่าความคลาดเคลื่อน 2% f.s. ผลที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2

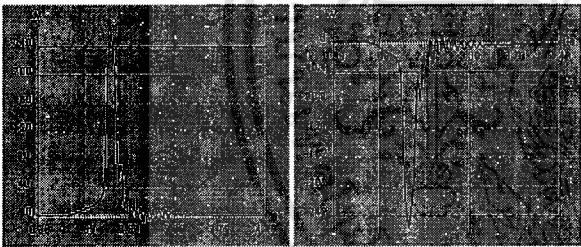


รูปที่ 10 ผลตอบสนองแรงดันรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเคอร์หลังการพัฒนา

ตารางที่ 2 คุณสมบัติผลตอบสนองแรงดันรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเคอร์

พารามิเตอร์	ผลการทดสอบ		มาตรฐาน [2] กำหนด
	ก่อนพัฒนา	หลังพัฒนา	
Rise Time (ns)	53	20.6	-
Over Shoot (%)	25.1	19.8	≤ 82.35
T_N (ns)	27.68 *	12.6 *	≤ 15 *

หมายเหตุ: * เวลาตอบสนองทั้งหมด (T_N) รวมออสซิลโลสโคปด้วย



(ก) ขั้วบวก steepness $\approx 2,700$ kV/ μ s (ข) ขั้วลบ steepness $\approx -2,600$ kV/ μ s

รูปที่ 12 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นที่วัดได้

รูปที่ 12 แสดงตัวอย่างสัญญาณแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นจากการทดสอบถูกด้วยฉนวนเปอร์เซเลน Class 52-8 ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้อิมพัลส์โวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานที่พัฒนาคุณสมบัติด้วยเทคนิคการชดเชยค่าเวลาตอบสนองเป็นตัววัด ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณที่ได้ค่อนข้างเรียบสามารถใช้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นได้เป็นอย่างดี

5. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการชดเชยค่าเวลาตอบสนองของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทาน สำหรับใช้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น เทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายสำหรับห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปที่มีอิมพัลส์โวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานใช้งานปกติอยู่แล้ว โดยการเพิ่มวงจรชดเชยในภาคแรงดัน

ของโวลเตจดีไวเคอร์ ในงานวิจัยนี้ได้แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเทคนิคที่นำเสนอในการแก้คุณสมบัติค่าเวลาตอบสนองแรงดันรูปขึ้นของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานขนาด 400 kV จะเห็นว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาขีดความสามารถของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ให้สามารถรองรับการทดสอบและการศึกษาวิจัยทางด้านนี้ต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Australian Standard, AS 2947.1, "Insulators – Porcelain and glass for Overhead Power Lines Voltage Greater Than 1000 V – A.C., Part 1 : Test Methods", 1989.
- [2] IEC Report 1211, "Insulator of Ceramic Material or Glass for Overhead Lines with Normal Voltage Greater Than 1000 V – Puncture Testing", Technical Report Type 2, 1994.
- [3] IEC Publication 60-2, "High-Voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems", 1994.
- [4] IEEE Std. 4, "Standard Techniques for High-Voltage Testing", IEEE Standard Board, March 1995.
- [5] Aro, M., Kawamura, T., Weck, K-H, "On the Specifying the Test Voltage for Impulse Voltage Puncture Test on Insulators", CIGRE, TF 33.07/03.01.
- [6] ประเสริฐ รังสีโสภณอารักษ์ และ สราวุธ สังข์สะอาด, "การพัฒนาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเคอร์วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 (EECON-23), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 23-24 พฤศจิกายน 2543, pp. 73-76.
- [7] สราวุธ สังข์สะอาด และ ณรงค์ชัย ลิ้มเศรษฐกานต์, "แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นมีผลทำให้ถูกด้วยฉนวนทะเล", Proceeding of the CEPT Seminar on Electrical Power Engineering in 2000, EMC-06, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 1999.
- [8] E.Kuffel, W.S. Zaengl, "High Voltage Engineering Fundamental", Pergamon Press, Oxford, 1984.

ประวัติผู้เขียน



นายไชยพร หล่อทองคำ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโท ในสาขาวิชาเดียวกันที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและระบบไฟฟ้ากำลัง เคยมีผลงานตีพิมพ์ทั้งในระดับประเทศและนานาชาติหลายบทความ



นายศิริวัฒน์ ไทธิราชกุล จบการศึกษาระดับปริญญาตรี และปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและระบบไฟฟ้ากำลัง เคยมีผลงานตีพิมพ์ทั้งในระดับประเทศและนานาชาติหลายบทความ

ผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นต่อระบบป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแกป

Effects of Short Tail Lightning Impulse Voltage on Overvoltage Protection with Spark Gap

ไชยพร หล่อทองคำ สิริวิวัฒน์ โพธิ์เวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ 02) 7373000 ต่อ 3515, 3931, โทรสาร 02) 7372561, E-mail: kpsiriwa@kmitl.ac.th, chaiyapo@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นรายงานผลการศึกษาระดับแรงดันเบรคดาวน์ในช่องแกปอากาศ เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นรูปคลื่น 1.2/4 μ s ซึ่งเกิดจากวาบไฟตามผิวขั้วของลวดของพวงลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบ เปรียบเทียบกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s การสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น 1.2/4 μ s ใช้การออกแบบคัดแปลงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานขนาด 400 kV ทำการทดสอบด้วยชุดอิเล็กโตรดแบบแท่งทองเหลืองแบบสมมาตรที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 3 แบบ คือ แบบแท่งสี่เหลี่ยมหัวตัด, แบบแท่งกลมหัวโค้งมน และแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ ที่ระยะแกป 10, 15 และ 20 cm จากผลการทดลองพบว่าทั้งค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{50\%}$) และระดับแรงดันเบรคดาวน์ของเส้นกราฟคุณลักษณะสมบัตินแรงดัน-เวลา (v-t curve) ของช่องว่างอากาศ กรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นจะมีค่าที่สูงกว่ากรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน ทุกรูปทรงอิเล็กโตรดที่ทดสอบทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นมีผลกระทบต่อระดับการฉนวนของอุปกรณ์ในระบบ

คำสำคัญ: อิมพัลส์ฟ้าผ่า, วาบไฟตามผิวขั้วของลวด, เส้นแรงดัน-เวลา

Abstract

This paper deals with the experimental study of the breakdown voltages of air – gaps when applied by the Short Tail Lightning Impulse (STLI) voltage, i.e. 1.2/4 μ s waveform, which is flash over occurred on the insulator string, compared with the Standard lightning Impulse (SLI) voltage, i.e. 1.2/50 μ s waveform. The STLI voltage was generated by the modification of a 400 kV standard impulse voltage generator. The geometry of the tested electrodes was studied under the symmetry shape condition. The test electrodes are brass rod electrodes. Three shapes of rod electrodes were used: square-rod, cylindrical rod with rounded extremity and cylindrical rod with smooth extremity, among the gap spacing of 10, 15 and 20 cm respectively. The results show that both $V_{50\%}$ and V-t curve of STLI voltages are higher than the SLI voltages. It is also found that both $V_{50\%}$ and V-t curve of STLI are higher than the SLI all case of electrode configurations and polarity of test voltages. The advantages of this research indicate that the STLI voltage can effect the insulation level of power equipment.

Keywords: Lightning Impulse, Back-Flashover, v-t characteristics

1. บทนำ

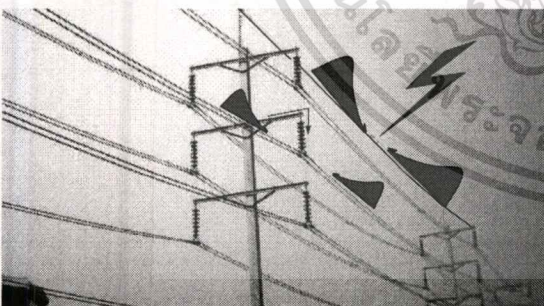
แรงดันเกินทรานเซียนต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากผลของฟ้าผ่าตามธรรมชาตินับเป็นปัญหาที่สำคัญและมีผลกระทบต่ออุปกรณ์การฉนวนในระบบ ดังจะเห็นได้จากรายงานผลการศึกษามากมาย [1-4] แรงดันเกินในระบบที่เป็นผลมาจากฟ้าผ่านี้ เรียกว่า “แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า” ซึ่งมาตรฐาน [5] ได้กำหนดรูปคลื่นเป็น 1.2/50 μ s แต่จากรายงานผลการศึกษามากมายพบว่าแรงดันเกินอิมพัลส์ที่เป็นผลจากการเหนี่ยวนำโดยข้อมและจากวาบไฟย้อนกลับ (Back Flashover) เข้าสู่สายตัวนำจะมีรูปคลื่นแตกต่างไปจากอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน [6-9] โดยเฉพาะกรณีเกิดวาบไฟย้อนกลับข้ามผ่านพวงลูกถ้วยฉนวนเข้าสู่สายตัวนำในระบบ รูปคลื่นแรงดันเกินนี้จะมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นลง เรียกว่า “อิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (Short Tail Lightning Impulse Voltage: STLI)” ซึ่งมีช่วงเวลาหางคลื่นประมาณ 2 ~ 4 μ s [6,8,9] เกิดเป็นคลื่นจร (Travelling Wave) ในระบบ ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ มีโอกาสได้รับแรงดัน STLI นี้ อุปกรณ์ที่ได้รับความเสียหายจากแรงดัน STLI อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน ซึ่งโดยปกติอุปกรณ์เหล่านี้จะได้รับการออกแบบและทดสอบอ้างอิงด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดัน STLI อาจส่งผลให้การทำงานผิดพลาดและทำให้ระดับแรงดันป้องกัน (Protective Level) คลาดเคลื่อนไปจากเดิมได้ ส่งผลต่อการฉนวนของอุปกรณ์อื่นในระบบที่ใช้หลักการประสานสัมพันธ์การฉนวน (Insulation Co-ordination) กันอยู่ การศึกษาลักษณะสมบัติของแรงดัน STLI จะช่วยให้การออกแบบและเลือกใช้ระดับการฉนวนมีความเหมาะสมยิ่งขึ้น ช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้

สำหรับประเทศไทยซึ่งอยู่ในแถบประเทศเขตร้อนชื้นที่มีความถี่ของการเกิดฝนฟ้าคะนองสูง และระบบส่งจ่ายจำหน่ายกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้เป็นระบบสายชิงในอากาศจึงมีโอกาสเกิดแรงดัน STLI ในระบบได้ง่าย แต่ข้อมูลการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นยังมีน้อย งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลกระทบจากแรงดันดังกล่าว โดยเน้นผลที่เกิดกับอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแกป ซึ่งนิยมใช้งานกันทั่วไปเนื่องจากมีราคาถูก โดยทดลองกับชุดอิเล็กโตรดแบบแท่ง (Rod) ทำด้วยทองเหลืองที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตแตกต่างกัน 3 แบบ ทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวน์เชิงสถิติ ($V_{50\%}$) และหากราฟคุณลักษณะแรงดัน-เวลา (V-t curve) ภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานรูปคลื่น 1.2/50 μ s เปรียบเทียบกับกรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้นรูปคลื่น 1.2/4 μ s ข้อมูลที่ได้แสดงถึงผลกระทบโดยตรงต่อการฉนวนของอุปกรณ์ในระบบ

2. หลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดควาไฟฟ้าย้อนกลับบนลูกถ้วยฉนวน

แรงดันเกินในระบบที่เป็นผลจากฟ้าผ่าตามธรรมชาติ แบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ เกิดจากฟ้าผ่าลงสู่สายตัวนำโดยตรง, เกิดจากควาไฟฟ้าย้อนกลับ (Back Flashover) ข้ามพวงลูกถ้วยฉนวนเข้าสู่สายตัวนำ และจากผลการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอ้อม (Induced Voltage) จากฟ้าผ่าบริเวณใกล้สายส่ง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นผลกระทบจากการเกิดควาไฟฟ้าย้อนกลับที่เป็นผลมาจากฟ้าผ่าลงบนสายดินเหนือศีรษะ (Overhead Ground Wire) ในระบบ ทำให้เกิดแรงดันเกินทรานเซียนต์ขึ้นโดยธรรมชาติแรงดันเกินนี้จะวิ่งลงสู่ดินผ่านระบบกราวด์สายดินในเสาส่ง ขนาดของแรงดันเกินนี้จะขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ค่าเสรีจิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) ของระบบ และ ค่าความต้านทานกราวด์สายดินที่เสาส่ง (Footing Resistance) เป็นต้น หากค่าความต้านทานมีค่าสูงเกินจะส่งผลให้ขนาดแรงดันเกินนี้มีค่าสูงมากและอาจสูงเกินกว่าแรงดันระบบในสายเฟสหลายเท่า โดยเฉพาะในระบบจำหน่ายและระบบสายส่งรอง (Sub-Transmission) หากค่าความแตกต่างของแรงดันเกินนี้มีค่าสูงเกินกว่าค่าแรงดันวาทตามคิวอิมพัลส์วิกฤติ (Critical Flashover Voltage: CFO) ของพวงลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าจะทำให้เกิดควาไฟฟ้าย้อนกลับเข้าสู่ระบบเป็นแรงดันเกินทรานเซียนต์ในสายเฟสวงกระจาย เป็นลักษณะคลื่นจรไปในสายส่ง ดังรูปที่ 1 หากไม่มีการป้องกันแรงดันเกินนี้จะส่งผลกระทบต่อกราวด์ของอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบ ปัญหานี้มีโอกาศเกิดมากขึ้นในระบบสายส่งที่เป็นเสาปูนและมีระบบกราวด์สายดินไม่ดีพอ หรือพวงลูกถ้วยฉนวนเกิดชำรุดเสียหายบางส่วนทำให้ค่า CFO ลดลง ซึ่งปัจจุบันระบบสายส่งรองและระบบจำหน่ายนิยมใช้เป็นเสาปูนกันมาก แต่ข้อมูลการศึกษาผลกระทบดังกล่าวยังมีน้อยมาก

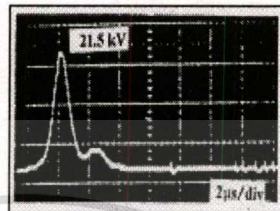


รูปที่ 1 ลักษณะการเกิด Back Flashover ในระบบสายส่งแบบเสาปูน

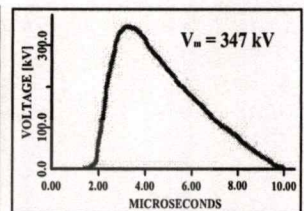
2.2 แรงดัน Short Tail Lightning Impulse : STLI

จากรายงานผลการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน [3,4,6,7,9] พบว่าแรงดันเกินอิมพัลส์จากผลของฟ้าผ่าไม่ได้มีรูปคลื่นเป็น 1.2/50 μ s ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน [5] ทุกกรณี โดยเฉพาะกรณีที่เกิดจากผลของการเหนี่ยวนำทางอ้อมและกรณีที่เกิดจากควาไฟฟ้าตามคิวอิมพัลส์ย้อนกลับเข้าสู่ระบบ ซึ่งในกรณีหลังนี้จะทำให้รูปคลื่นอิมพัลส์อิงผิดไปจากมาตรฐาน

มาก กล่าวคือช่วงเวลาหน้าคลื่นยังคงเป็นประมาณ 1.2 μ s แต่ช่วงเวลาหางคลื่นจะสั้นลง มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2 ~ 4 μ s [6,8-10] เรียกว่า “แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาหางคลื่นสั้น (STLI)” ตัวอย่างลักษณะของรูปคลื่น STLI จากการทดลองวัดจริงตามรายงานการวิจัยของต่างประเทศแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งเมื่อเทียบกับรูปคลื่นมาตรฐานจะเห็นว่ามีช่วงเวลาหลังคลื่นแตกต่างกันมาก ดังรูปที่ 3

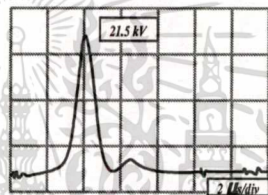


n) Induce Voltage ในระบบจำหน่าย [6]

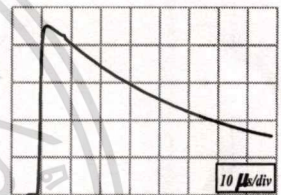


ข) Flashover Voltage [10]

รูปที่ 2 ตัวอย่างลักษณะแรงดัน STLI



ก) รูปคลื่น STLI



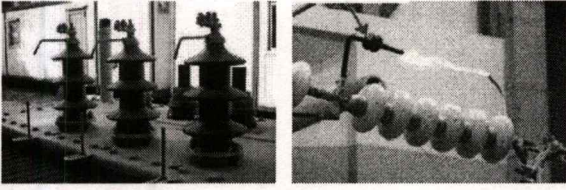
ข) รูป Standard Lightning Impulse

รูปที่ 3 รูปคลื่น STLI เปรียบเทียบกับรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน

ขนาดของแรงดันเกิน STLI นี้มีค่าสูงเกินกว่าแรงดันเฟสของระบบหลายเท่า กรณีในระบบจำหน่ายขนาดแรงดันเกินนี้อาจมีค่าสูงกว่าระดับการฉนวนของอุปกรณ์จนอาจสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ในระบบได้ แต่โดยปกติแล้วในทางปฏิบัติจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินไว้และที่นิยมใช้กันมากก็คืออุปกรณ์จำพวกสปาร์กแกป (Protective Gap) ในงานวิจัยนี้จึงสนใจผลกระทบที่เกิดกับอุปกรณ์ดังกล่าว เนื่องจากในการติดตั้งใช้งานอุปกรณ์จำพวกสปาร์กแกปจะอาศัยหลักการประสานสัมพันธ์กราวด์ โดยใช้แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามาตรฐานมาเป็นตัวกำหนด ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนเมื่อใช้งานจริง

2.3 การป้องกันแรงดันเกินด้วยสปาร์กแกป

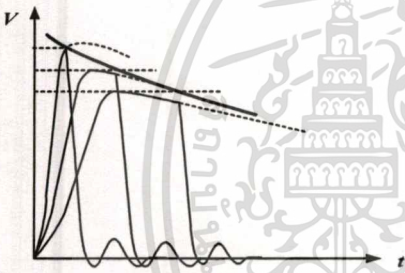
การป้องกันแรงดันเกินด้วยสปาร์กแกป เป็นหลักการที่ง่ายและมีราคาถูกจึงนิยมใช้งานกันมากในระบบส่งจ่ายและจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้แท่งอิเล็กโตรด (Rod) 2 แท่ง วางห่างกัน ช่องว่างอากาศระหว่างแกปจะช่วยเป็นฉนวนในสภาพปกติและเมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้นในระบบจะเกิดประกายข้ามผ่านช่องว่างอากาศ (Sparkover) เป็นการลัดวงจรลงสู่ดินเพียงชั่วคราว เพื่อป้องกันแรงดันเกินที่จะสร้างความเสียหายแก่ฉนวนของอุปกรณ์ที่มันทำหน้าที่ป้องกัน ตัวอย่างของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินประเภทนี้ได้แก่ Rod Gap และ Arcing Horn ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแก๊ปที่ใช้งานจริง

2.4 Voltage – Time Characteristics (v – t curve)

ค่าความคงทนของฉนวนแก๊สจะขึ้นอยู่กับรูปคลื่นแรงดันทดสอบ โดยเฉพาะกรณีของแรงดันอิมพัลส์จะมีปัจจัยผลของเวลาล่าช้า การเกิดเบรคความถี่เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกราฟเส้นคุณลักษณะสมบัติ แรงดัน – เวลา (Voltage – Time Characteristics หรือ v – t curve) ดังรูปที่ 5 เส้น v – t curve นี้มีความสำคัญมากต่อการกำหนดมิติการฉนวนของอุปกรณ์ที่ใช้ฉนวนก๊าซ (หรืออากาศ) และระบบป้องกันแรงดันเกินทรานเซียนต์แบบสปาร์กแก๊ป รวมถึงระบบการฉนวนที่ใช้หลักการประสานสัมพันธ์การฉนวนกับระบบการฉนวนอื่น เป็นต้น

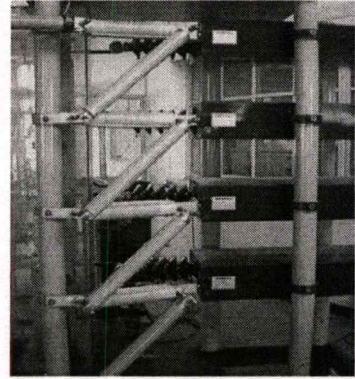


รูปที่ 5 Voltage – Time Characteristics

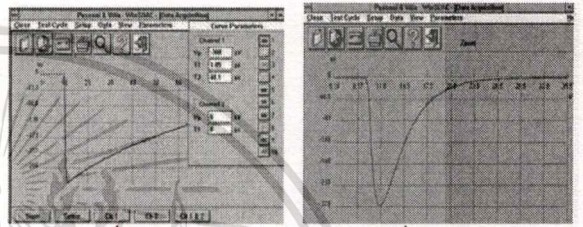
3. การออกแบบการทดลอง

3.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาห่างคลื่นสั้น

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาห่างคลื่นสั้น (STLI) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ กำหนดรูปคลื่นเป็น 1.2/4 μ s [6,9-10] สร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการดัดแปลงองค์ประกอบวงจรบางส่วนของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (SLI) รูปคลื่น 1.2/50 μ s ขนาด 400 kV, 14 kJ แบบ Marx's Type 4 - Stage ที่มีอยู่เดิม [12] ให้สามารถจ่ายแรงดัน STLI รูปคลื่น 1.2/4 μ s นี้ได้ การดัดแปลงองค์ประกอบวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารถทำได้ด้วยการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบความต้านทานหน่วงเวลา การหาค่าความต้านทานหน่วงที่เหมาะสมได้จากการคำนวณด้วยวิธีแบบประมาณ [13] พบว่าค่าองค์ประกอบวงจรที่เหมาะสมสำหรับแรงดัน STLI รูปคลื่น 1.2/4 μ s จะใช้ค่า $R_1 \approx 12 \Omega$ และ $R_2 \approx 5.4 \Omega$ รายละเอียดการออกแบบและประกอบสร้างตัวต้านทานหน่วงสามารถศึกษาได้จาก [13] ลักษณะการติดตั้งองค์ประกอบตัวต้านทานหน่วงแสดงดังรูปที่ 6 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดัน SLI และ STLI ที่ได้ แสดงในรูปที่ 7



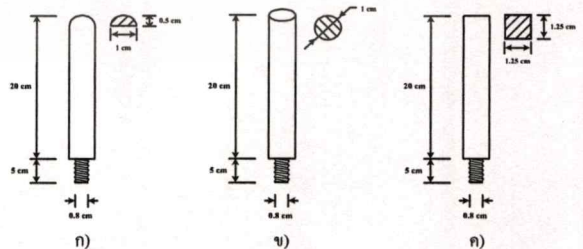
รูปที่ 6 ลักษณะการติดตั้งองค์ประกอบตัวต้านทานหน่วง



รูปที่ 7 ตัวอย่างรูปคลื่น SLI และ STLI ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2 การออกแบบชุดอิเล็กโทรด

ชุดอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ ออกแบบอ้างอิงจากอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแก๊ปที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ โดยใช้อิเล็กโทรดแท่งทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 cm ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 3 แบบ เพื่อศึกษาผลของรูปทรงอิเล็กโทรด (Electrodes Configuration) ที่มีต่อลักษณะการเกิดเบรคความถี่ในช่องแก๊สเมื่อได้รับแรงดัน STLI ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบรูปทรงอิเล็กโทรดสำหรับใช้ป้องกันแรงดันเกินให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ลักษณะรูปทรงอิเล็กโทรดและขนาดมิติต่างๆ แสดงดังรูปที่ 8

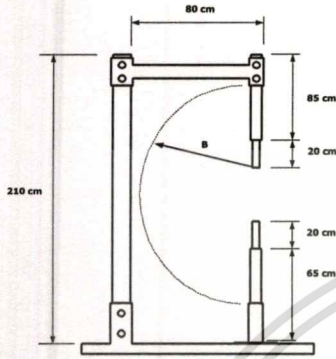


- ก) อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวโค้งมน
- ข) อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวตัดเรียบ
- ค) อิเล็กโทรดแบบแท่งสี่เหลี่ยมจัตุรัสหัวตัดเรียบ

รูปที่ 8 ชุดอิเล็กโทรดที่ใช้ในงานวิจัย

3.3 โครงสร้างของแท่นรองรับชุดอิเล็กโทรดทดสอบ

ลักษณะโครงสร้างของแท่นฉนวนรองรับชุดอิเล็กโทรดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 9 ออกแบบอ้างอิงตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60052 [14] ฉนวนที่ใช้ยึดแท่งอิเล็กโทรดทำจากแท่งพลาสติกชนิด Polypropylene ที่มีค่า CFO และค่าความคงทนสนามไฟฟ้าเบรคความสูง



รูปที่ 9 โครงสร้างฐานรองรับชุดอิเล็กโทรดทดสอบ

3.4 ระเบียบวิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของแรงดัน STLI ที่มีต่อลักษณะการเกิดเบรคความในช่องแก๊ปกาศแบบแท่งอิเล็กโทรด โดยทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความในช่องแก๊ปกาศที่ระยะ 10, 15 และ 20 cm ตามลำดับ ทำการทดสอบด้วยแรงดัน SLI รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s และแรงดัน STLI รูปคลื่น 1.2/4 μ s ทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) ด้วยวิธีปรับขึ้น-ลง (Up and Down Method) [5] และทดสอบหากราฟคุณลักษณะสมบัติเส้นแรงดัน-เวลา ($v-t$ curve) โดยอ้างอิงตามระเบียบวิธีที่แนะนำไว้ใน [5,9] การพล็อตเส้นกราฟ $v-t$ curve ในที่นี้ใช้ฟังก์ชันการถดถอยเชิงพหุนาม (Polynomial Regression) [13]

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$)

ผลการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$) แสดงดังตารางที่ 1 โดยค่าแรงดันเบรคความทุกค่าในตารางได้ทำการปรับแก้สู่สภาวะมาตรฐานอ้างอิง [5] เรียบร้อยแล้ว จากผลการทดลองพบว่าค่า $V_{b50\%}$ กรณีแรงดัน STLI จะมีค่าสูงกว่าในกรณีแรงดัน SLI ซึ่งเหมือนกันทุกรูปทรงอิเล็กโทรดและทุกระยะแก๊ปกาศ โดยค่าแรงดันเบรคความของอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบ จะมีค่าใกล้เคียงกันที่ระยะแก๊ปกาศเดียวกัน

เมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าแรงดัน $V_{b50\%}$ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 2 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $V_{b50\%}$ ที่ทุกรูปทรงอิเล็กโทรดจะอยู่ในช่วง 3.21% ถึง 17% โดยกรณีระยะแก๊ปกาศ 10 cm อิเล็กโทรดแบบแท่งสี่เหลี่ยมหัวตัดขั้วบวกมีค่าความแตกต่างมากที่สุด 17.00% กรณีระยะแก๊ปกาศ 20 cm อิเล็กโทรดแบบแท่งกลมหัวตัดขั้วบวกจะมีค่าความแตกต่างต่ำสุด 3.21%

ตารางที่ 1 ผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรคความเชิงสถิติ ($V_{b50\%}$)

แบบอิเล็กโทรด	ขั้ว	$V_{b50\%}$ กรณี SLI (kV)			$V_{b50\%}$ กรณี STLI (kV)		
		D = 10 cm	D = 15 cm	D = 20 cm	D = 10 cm	D = 15 cm	D = 20 cm
แบบ ก)	+	92.72	133.21	166.11	98.99	143.43	182.41
	-	93.71	136.38	178.51	101.27	146.05	196.27
แบบ ข)	+	94.03	132.57	175.45	97.78	145.01	181.09
	-	95.46	136.29	180.05	101.98	145.87	190.27
แบบ ค)	+	95.60	122.02	165.13	111.80	140.30	179.00
	-	100.12	132.07	182.42	109.50	146.25	202.22

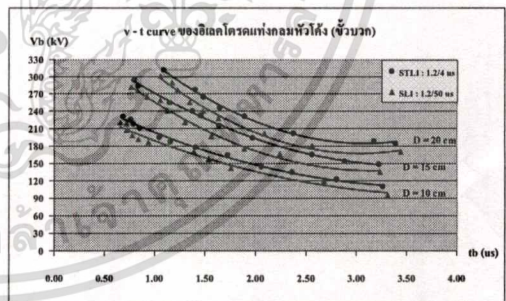
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่าแรงดัน $V_{b50\%}$

แบบอิเล็กโทรด	ขั้ว	% $\Delta V_{b50\%}$		
		D = 10 cm	D = 15 cm	D = 20 cm
แบบ ก)	+	6.76	7.60	9.81
	-	8.06	7.09	9.95
แบบ ข)	+	3.99	9.38	3.21
	-	6.83	7.32	5.68
แบบ ค)	+	17.00	14.98	8.39
	-	9.36	10.73	10.85

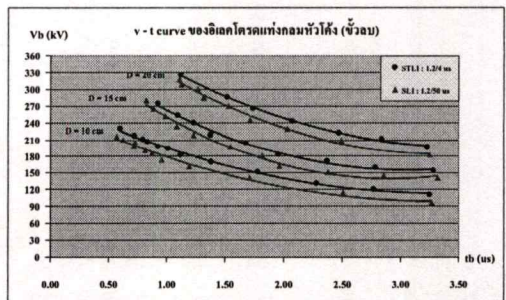
$$\text{หมายเหตุ: } \% \Delta V_{b50\%} = \left[\frac{V_{b50\%}(STLI) - V_{b50\%}(SLI)}{V_{b50\%}(SLI)} \times 100 \right]$$

4.2 ผลการทดสอบหากราฟเส้นแรงดัน-เวลา ($v-t$ curve)

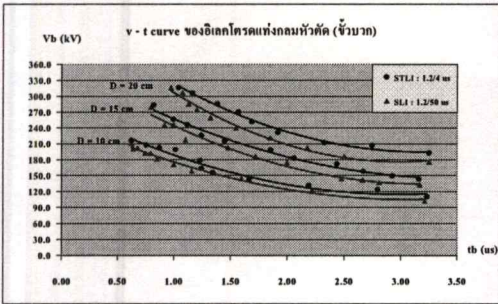
ผลการทดสอบหากราฟเส้นแรงดัน-เวลา ($v-t$ curve) ที่ระยะแก๊ปกาศต่างๆ ของอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบ เมื่อทดสอบด้วยแรงดัน STLI เปรียบเทียบกับ SLI ทั้งขั้วบวกและลบ แสดงดังรูปที่ 11 ถึง 16



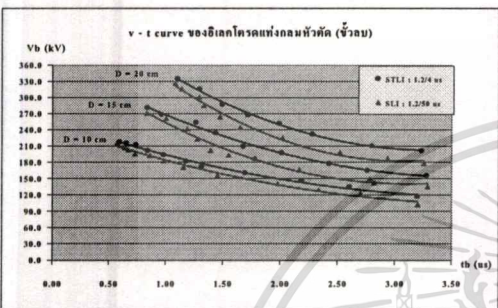
รูปที่ 11 กราฟ $v-t$ curve กรณีชุดอิเล็กโทรดแบบ ก) ขั้วบวก



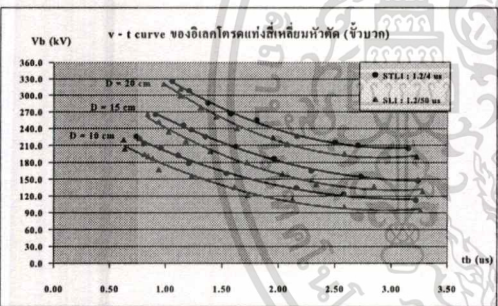
รูปที่ 12 กราฟ $v-t$ curve กรณีชุดอิเล็กโทรดแบบ ก) ขั้วลบ



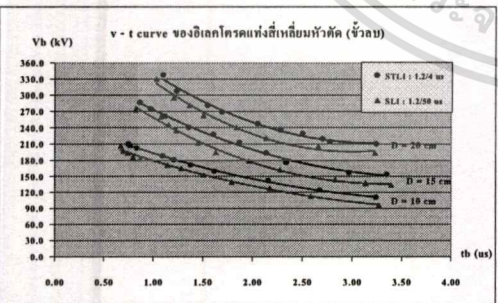
รูปที่ 13 กราฟ v - t curve กรณีชุดอิเล็กโทรดแบบ ข) ขั้วบวก



รูปที่ 14 กราฟ v - t curve กรณีชุดอิเล็กโทรดแบบ ข) ขั้วลบ



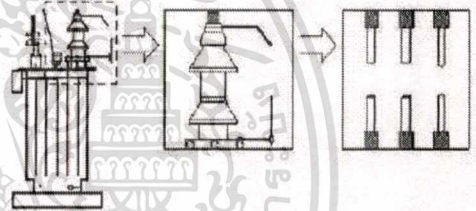
รูปที่ 15 กราฟ v - t curve กรณีชุดอิเล็กโทรดแบบ ค) ขั้วบวก



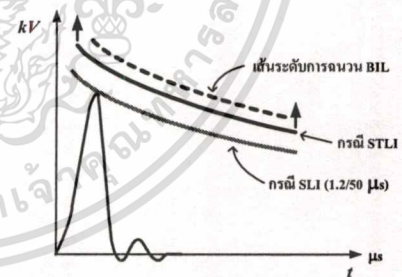
รูปที่ 16 กราฟ v - t curve กรณีชุดอิเล็กโทรดแบบ ค) ขั้วลบ

ประสานสัมพันธ์การคำนวณของระบบคิดเพี้ยนไป ส่งผลต่อความเสียหาย ที่อาจเกิดขึ้นกับฉนวนของอุปกรณ์ที่ใช้การป้องกันในลักษณะดังกล่าว

กรณีนี้อาจพิจารณาจากตัวอย่างการป้องกันแรงดันเกินบน อุปกรณ์ด้วยหลักการสปาร์กแก๊ป ดังรูปที่ 17 ในทางปฏิบัติการปรับตั้ง ระยะแก๊ปจะอ้างอิงด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (1.2/50 μs) ลักษณะการทำประสานสัมพันธ์การคำนวณอาจแสดงได้ดังรูปที่ 18 ระดับ การคำนวณของอุปกรณ์ (BIL) จะอยู่เหนือระดับเส้นเบรคความด้วยแรง- ดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานของแก๊ปป้องกัน แต่จากข้อมูลงานวิจัยนี้พบว่า ถ้าเกิดแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) เข้ามา ในระบบ ระยะแก๊ปป้องกันที่ตั้งไว้เดิมจะไม่สามารถป้องกันแรงดันเกิน STLI ที่ระดับแรงดันป้องกันเดิมได้ กล่าวคือสปาร์กแก๊ปจะไม่ทำงาน หรือทำงานที่ระดับแรงดันสูงขึ้นกว่าเดิม นั่นหมายความว่าแรงดันที่เส็ด ลอดเข้าสู่อุปกรณ์จะมีระดับที่สูงขึ้นจนเข้าใกล้ระดับ BIL มากขึ้น และมี โอกาสสูงกว่าระดับ BIL ของอุปกรณ์ได้ ถ้าหากแรงดัน STLI ที่เข้ามานั้น มีค่ายอดแรงดันที่สูงมากพอ ซึ่งแรงดันเกิน STLI นี้ อาจเป็นสาเหตุหนึ่ง ของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ติดตั้งใช้งานในระบบปัจจุบัน



รูปที่ 17 การป้องกันแรงดันเกินบนอุปกรณ์ด้วย Rod Gap



รูปที่ 18 การประสานสัมพันธ์การคำนวณและผลของแรงดัน STLI

จากข้อมูลผลการศึกษาลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็ก- โตรด (Electrodes Configuration) ต่อลักษณะการเกิดเบรคความ [13] พบ ว่าระดับแรงดันเบรคความของอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบ มีค่าใกล้เคียงกันมาก ที่ระยะแก๊ปเดียวกันทั้งกรณีแรงดัน SLI และ STLI แสดงว่ารูปทรงของ ชุดอิเล็กโทรดแบบแท่งทองเหลืองไม่มีผลต่อการออกแบบใช้งาน ซึ่งข้อ มูลผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ [9]

งานวิจัยนี้เป็นผลการศึกษาเบื้องต้น โดยใช้แรงดัน STLI รูป คลื่น 1.2/4 μs เป็นตัวอย่างในการศึกษา ข้อมูลผลการวิจัยในประเด็นอื่น ที่น่าสนใจ ขณะนี้อยู่ระหว่างการศึกษารายงานซึ่งจะได้รายงานให้ทราบต่อไป

จากผลการทดลองรูปที่ 11 – 16 พบว่ากรณีทดสอบด้วยแรงดัน STLI ระดับแรงดันเบรคความจะมีค่าสูงกว่ากรณี SLI ทุกรูปแบบอิเล็ก- โตรดที่ใช้ทดสอบทั้งขั้วบวกและลบ แสดงให้เห็นว่าแรงดัน STLI มีผล กระทบต่อระบบการป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแก๊ป ซึ่งจะทำการ

5. บทสรุป

บทความนี้เป็นการศึกษาผลกระทบจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น (STLI) ที่เป็นผลจากการเกิดวายุไฟย้อนกลับต่อระบบป้องกันแรงดันเกินแบบสปาร์กแก๊ป โดยทดลองกับชุดอิเล็กโตรดแบบแท่งทองเหลือง (rod) ที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตแตกต่างกัน 3 แบบ ทดสอบหาค่าแรงดันเบรคควาน์เชิงสถิติ ($V_{50\%}$) และหาคุณลักษณะสมบัติเส้นแรงดัน-เวลา (v-t curve) ภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s เปรียบเทียบกับกรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นรูปคลื่น 1.2/4 μ s จากข้อมูลผลทดลองที่ได้ พบว่าระดับแรงดันเบรคควาน์ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้นจะมีค่าสูงกว่ากรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน แสดงให้เห็นถึงผลกระทบโดยตรงต่อระบบการฉนวนของอุปกรณ์ที่ใช้หลักการประสานสัมพันธ์การฉนวนอ้างอิงกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน เมื่อเกิดแรงดันเกินแบบ STLI ขึ้นในระบบ สปาร์กแก๊ปป้องกันที่ออกแบบไว้รองรับแรงดันเกินแบบ SLI จะไม่ทำงานที่ระดับแรงดันค่าเดิม แต่จะเกิดสปาร์กที่ระดับแรงดันสูงขึ้น ทำให้อุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันได้รับขนาดแรงดันเกินนี้ แม้ว่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจะมีเวลาช่วงคลื่นที่สั้นแต่ก็มีขนาดแรงดันที่สูงมากพอ อาจส่งผลให้ฉนวนของอุปกรณ์เสียหายแบบฉับพลันหรือเป็นสาเหตุของความเสียหายอื่นตามมา เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงดันเกินในลักษณะนี้ซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ข้อมูลผลการศึกษาค้างนี้จะยังเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและปรับตั้งระยะแก๊ปป้องกันแรงดันเกิน เพื่อการประสานสัมพันธ์การฉนวนให้มีความเหมาะสมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณธีรยุทธ พิมเพชร, คุณสรวิศ วัฒนวิทย์, คุณอนุชา ชุมแสง และ คุณพงษ์ศักดิ์ คชรรัตน์ นักศึกษาระดับปริญญาตรีที่ช่วยจัดเตรียมการทดสอบและทำการทดลองเก็บผลในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจนได้ผลการทดลองที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.J.Eriksson, M.F.Stringfellow and D.V.Meal, "Lightning-induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines", IEEE Trans., Vol. PAS-101, No. 4, pp. 960-968, 1982.
- [2] M.J.Master and M.A.Uman, "Lightning Induced Voltages on Power Lines: Theory", IEEE Trans., Vol. PAS-103, pp. 2502-18, 1984.
- [3] S.Yokoyama, K.Miyake, H.Mitani and N.Yamazaki, "Advanced Observations of Lightning Induced Voltage on Power Distribution Lines", IEEE Trans., Vol. PWRD-1, pp. 129-139, 1986.
- [4] P.Chowdhuri, "Analysis of Lightning-induced Voltage on Overhead Lines", IEEE/PES 1988 W. M. No. 88 WM 070-5, New York, 1988.
- [5] IEC Publication 60-1, "High-Voltage Test Techniques, Part 1: General definitions and test requirements", Geneva, 1989.

- [6] S.Yokoyama, K.Miyake, and S. Fukui, "Advanced Observations of Lightning Induced Voltage on Power Distribution Lines (II)", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2196-2203, 1989.
- [7] S.Grzybowski, M.M.Abou-Rahal, "Experimental Studies of Flashover Voltage under Lightning and Steep-Front Pulse on Distribution Line Construction", IEEE Proceeding, Suotheascon, 1990, pp. 664-669.
- [8] E.Cinieri and F.Muzi, "Lightning Induced Overvoltages. Improvement in Quality of Service in MV Distribution Lines by Addition of Shield wires", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 361-372, 1996.
- [9] A.Carrus, E.Cinieri, A.Fumi, and C.Mazzetti, "Short Tail Lightning Impulse Behaviour of Medium Voltage Line Insulation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp. 218-226, January 1999.
- [10] H.Motoyama, "Experimental Study and Analysis of Breakdown Characteristic of Long Air Gaps with Short Tail Lightning Impulse", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 972-979, April 1996.
- [11] P.Chowdhuri, and B.W.McConnell, "Volt-Time Characteristics of Short Air Gaps under Nonstandard Lightning Voltage Waves", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997.
- [12] PASSONI&VILLA EXPERTS IN HIGH VOLTAGE, Impulse Generator type GTU 400 kV - 14 kJ, May 1996.
- [13] สรวิศ วัฒนวิทย์, หอมปาน และคณะ, "การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติการเกิดเบรคควาน์ในช่องว่างอากาศขนาดใหญ่ เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมีช่วงเวลาทางคลื่นสั้น", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง, ม.เทคโนโลยีมหานคร, 2545.
- [14] IEC 60052, "High-Voltage Measurement by means of sphere gaps", Geneva, 2002.

ประวัติผู้เขียน



นายไชยพร ห่อทองคำ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโท ในสาขาวิชาเดียวกันที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและระบบไฟฟ้ากำลัง เคยมีผลงานตีพิมพ์ทั้งในระดับประเทศและนานาชาติหลายบทความ



นายศิริวัฒน์ โพธิ์ราชกุล จบการศึกษาระดับปริญญาตรี และปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, วิศวกรรมไฟฟ้า, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เคยมีผลงานตีพิมพ์ทั้งในระดับประเทศและนานาชาติหลายบทความ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายไชยพร หล่อทองคำ
วัน เดือน ปีเกิด	14 พฤษภาคม 2516 ที่ จังหวัดสุพรรณบุรี
ที่อยู่	93/32 ซอยไทยยานนท์ ถ.สนามบินน้ำ ต.ท่าทราย อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000 โทร. 0-2588-4775
ประวัติการศึกษา	2539 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 2547 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง 2) ระบบไฟฟ้ากำลัง 3) การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2540 - ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รางวัลเกียรติคุณ	
พ.ศ. 2546	รางวัลบทความวิจัยดีเด่น จำนวน 2 บทความ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 (EECON-26) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้