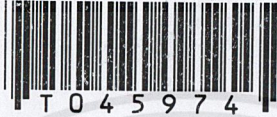


การบำรุงรักษาและศึกษาการติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลท์ และ 1500
กิโลโวลท์ ของโรงทดลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่

Maintenance and Study of Installation 200 kV & 1500 kV Impulse High Voltage Generator Test
Equipment of New High Voltage Laboratory



โดย
ฐิติ เตังพานิชกุล
ณัฐชาติ ศรีมูล
บุญช่วย เกตุรักษา

ปศ.
๕ ๖ ๖ ๑ ๖
๖ ๕ ๖ ๖ ๖

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 45974
วัน, เดือน, ปี 26 ก.พ. 2546

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2544

การบำรุงรักษาและศึกษาการติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ และ 1500

กิโลโวลต์ ของโรงทดลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่

Maintenance and Study of Installation 200 kV & 1500 kV Impulse High Voltage Generator Test

Equipment of New High Voltage Laboratory



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศิริวัฒน์ โทษเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

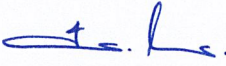
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การบำรุงรักษาและศึกษาการติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ และ 1500
กิโลโวลต์ ของโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่

คณะผู้จัดทำ

1. นายฐิติ เต็งพานิชกุล
2. นายณัฐชาติ ศรีมูล
3. นายบุญช่วย เกตุรักษา


อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบำรุงรักษาและศึกษาการติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ และ 1500
กิโลโวลต์ ของโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่

คณะผู้จัดทำ

นายฐิติ เต็งพานิชกุล รหัส 41014121

นายณัฐชาติ ศรีมูล รหัส 41014130

นายบุญช่วย เกตุรักษา รหัส 41014233

รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

2544

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ แสดงการบำรุงรักษาและออกแบบ วางผังการติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ และ 1500 กิโลโวลต์ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ของโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่ แล้วจะทำการเคลื่อนย้ายเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลต์ไปติดตั้งและทดสอบในห้องใหม่ พร้อมทั้งตรวจเช็ค แก้ไข ปรับเปลี่ยน บำรุงรักษา และ เก็บผลการทดสอบเปรียบเทียบกับรูปคลื่นมาตรฐาน เพื่อที่จะสามารถเตรียมการทดสอบให้ได้ตาม IEC Standard Publication NO. 71 และ IEC Standard Publication NO. 60.

Maintenance and Study of Installation 200 kV & 1500 kV Impulse High Voltage Generator Test
Equipment of New High Voltage Laboratory

Thiti Tengpanitchakul

Nuttachart Srimoon

Boonchuey Katruksa

Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul Adviser

2001

Abstract

This project presents the maintenance and design and layout of the installation of 200 kV and 1500 kV Impulse High Voltage Generator. Installation and testing of the 200 kV Impulse Generator are moved to the new place to inspect , fix , replace , maintain and test following the IEC Standard Publication No. 71 and IEC Standard Publication No. 60.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1. บทนำ	1
บทที่ 2. การสร้างแรงดันอิมพัลส์	3
2.1 ข้อกำหนดครูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	3
2.1.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นเต็ม	4
2.1.2 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด	4
2.1.3 แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง	6
2.2 วงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	6
2.3 ขนาดแรงดันทดสอบ	8
บทที่ 3. ส่วนประกอบ และคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 และ 1500 กิโลโวลต์	12
3.1 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์	12
3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์	17
บทที่ 4. ขั้นตอนการใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 และ 1500 กิโลโวลต์	21
4.1 ขั้นตอนการใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์	21
4.2 ขั้นตอนการใช้เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ขนาด 1500 กิโลโวลต์ (การใช้งานแบบ Manual)	30
บทที่ 5. ทฤษฎีการวางผังโดยทั่วไปสำหรับห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง	35
5.1 ระยะห่างเพื่อความปลอดภัย (Safety Clearances)	35
5.2 การวางผังจัดตำแหน่งของอุปกรณ์ทดสอบและเครื่องมือ ในการวัดแรงดันอิมพัลส์โดยการใช้โวลต์เตจดีไวเซอร์	36
5.3 การวางผังอุปกรณ์ลงในห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง	38
5.3.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1.1	ระยะห่างสำหรับการทดสอบ lightning Impulse	38
5.3.1.2	ระยะห่างสำหรับการทดสอบ switching Impulse	38
5.3.2	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์	42
5.3.2.1	ระยะห่างสำหรับการทดสอบ Lightning Impulse	42
5.3.2.2	ระยะห่างสำหรับการทดสอบ Switching Impulse	42
5.4	การทดสอบความต้านทานการต่อลงดินของห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง	48
บทที่ 6.	การดำเนินการแก้ไข ซ่อมแซมและบำรุงรักษา	51
6.1	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์	51
6.1.1	ปัญหาของลูกถ้วยทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร	51
6.1.2	ปัญหาของมิเตอร์ปรับ spark gap เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร	52
6.2	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์	57
6.2.1	ปัญหาของมอเตอร์ปรับ gap และ ground device	57
6.2.2	ปัญหาของโปรแกรม WinSDAC	61
6.3	การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์	66
6.3.1	การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์	66
6.3.2	การทดสอบสายสัญญาณจาก C Divider	70
6.3.3	การทดสอบความต้านทาน Switching (Rs)	75
6.4	การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ ก่อนการเคลื่อนย้าย	77
6.5	การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ขนาด 200 กิโลโวลต์ หลังการติดตั้ง	86
บทที่ 7.	การวางแผนการเคลื่อนย้ายเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 และ 1500 กิโลโวลต์	104
7.1	การเคลื่อนย้ายและติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์	104
7.2	การเคลื่อนย้ายและติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์	105
บทที่ 8.	สรุปและวิจารณ์การดำเนินการทั้งหมด	115
	ภาคผนวก	117
	กิตติกรรมประกาศ	159
	บรรณานุกรม	160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะเต็มคลื่น	4
รูปที่ 2.2 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หลังคลื่น	5
รูปที่ 2.3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หน้าคลื่น	5
รูปที่ 2.4 แรงดันอิมพัลส์สวิตซ์	6
รูปที่ 2.5 รูปวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หนึ่งชั้น วงจร a และ วงจร b	6
รูปที่ 3.1 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	16
รูปที่ 4.1 แสดงเซอร์กิตเบรกเกอร์ HV1 ในห้องควบคุม	21
รูปที่ 4.2 แสดง Window 3.1 และไอคอน program manager	22
รูปที่ 4.3 แสดงไอคอน Vcsda เพื่อเข้าสู่โปรแกรม WinSDAC	22
รูปที่ 4.4 แสดงภาพเมื่อเริ่มเข้าสู่โปรแกรม WinSDAC	23
รูปที่ 4.5 แสดงเมนูเลือกการทำงานของโปรแกรม WinSDAC	23
รูปที่ 4.6 แสดงหน้าจอการทำงานของโปรแกรม WinSDAC	24
รูปที่ 4.7 แสดง หลังจากเลือก Setup → Modify ที่เมนูบาร์ ของ โปรแกรม WinSDAC	25
รูปที่ 4.8 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ตั้งค่าไว้ใน โปรแกรม WinSDAC	25
รูปที่ 4.9 แสดงหน้าต่าง Waveform Data หลังคลิก Start ของ โปรแกรม WinSDAC	26
รูปที่ 4.10 แสดงบล็อกข้อความให้รอสักครู่ โปรแกรม WinSDAC กำลังรอการเบรกดาวน	26
รูปที่ 4.11 แสดงการผิดพลาดในการต่อออสซิลโลสโคป	27
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระยะแยกกับแรงดันเบรกดาวน (ในที่นี้คือ Sphere gap ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 cm)	28
รูปที่ 4.13 กราฟแสดง Starting Characteristic สำหรับแรงดันอัดประจุบวก	31
รูปที่ 4.14 กราฟแสดง Starting Characteristic สำหรับแรงดันอัดประจุลบ	32
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของมิเตอร์และระยะแยก	33
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของมิเตอร์และระยะแยก	34
รูปที่ 5.1 การจัดวงจรทดสอบและการวัด	36
รูปที่ 5.2 วงจรของสายควบคุมและสายนำสัญญาณของการวัดแรงดันอิมพัลส์	37
รูปที่ 5.3 แสดงระยะ Clearance ของลูกทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง D เซนติเมตร	40
รูปที่ 5.4 แสดง Floor plan โรงประลองไฟฟ้าแรงสูง	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 5.5 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ลงในโรงประลองไฟฟ้าแรงสูง	45
รูปที่ 5.6 แสดงถึงระยะห่างความปลอดภัยของอุปกรณ์แต่ละตัว	46
รูปที่ 5.7 แสดงการติดตั้ง Sphere gap เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร	47
รูปที่ 5.8 แสดงการต่อวงจรที่ใช้ในการทดลอง	48
รูปที่ 5.9 แสดงจุดต่อลงดินที่ทำการทดสอบความต้านทาน	49
รูปที่ 5.10 การทดสอบการต่อลงดิน โรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่	50
รูปที่ 6.1 ภายในของ Case ของเครื่องปรับ Sphere Gap diameter 100cm. ประกอบด้วย หม้อแปลง มอเตอร์ และอุปกรณ์ควบคุม	51
รูปที่ 6.2 ปุ่มปรับระยะแกปของ sphere gap เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 cm.	52
รูปที่ 6.3 ขั้วเบรกเกอร์วงจรควบคุมมอเตอร์ปรับระยะแกปของ sphere gap เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 cm. (เบรกเกอร์ด้านซ้าย)	52
รูปที่ 6.4 วงจรมิเตอร์ปรับสปาร์กแกป	53
รูปที่ 6.5 ความต้านทาน Wire wound type B 10 k Ω	53
รูปที่ 6.6 วงจรของ DC power supply 24 Vdc	54
รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและระยะแกป	56
รูปที่ 6.8 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบ motor ปรับ sphere gap	58
รูปที่ 6.9 แสดงมอเตอร์ปรับระยะห่างของ sphere gap	58
รูปที่ 6.10 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบ ground devices	58
รูปที่ 6.11 box diagram แสดงการทำงานของชุด control	59
รูปที่ 6.12 แสดงหลักการทำงานของ PLC	59
รูปที่ 6.13 ส่วนประกอบของ PLC	60
รูปที่ 6.14 แสดง PLC ของชุดควบคุม	60
รูปที่ 6.15 แสดง ground device ของเครื่อง	61
รูปที่ 6.16 แสดงข้อผิดพลาดเมื่อเชื่อมต่อสวิตช์โลสโคปไม่ถูกต้อง หรือไม่ได้ต่อสวิตช์โลสโคป	62
รูปที่ 6.17 แสดงข้อผิดพลาดหลังจากกด OK ที่รูป 7.16	62
รูปที่ 6.18 หน้าต่างของโปรแกรม WinSDAC	63
รูปที่ 6.19 แสดงการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และออสซิลโลสโคป	63
รูปที่ 6.20 แสดงออสซิลโลสโคป	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 6.21 แสดง Interface Card ของคอมพิวเตอร์	64
รูปที่ 6.22 วงจรทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 kV	67
รูปที่ 6.23 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่ Generating Voltage เท่ากับ + 400 kV	68
รูปที่ 6.24 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่ Generating Voltage เท่ากับ + 600 kV	68
รูปที่ 6.25 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่ Generating Voltage เท่ากับ - 400 kV	69
รูปที่ 6.26 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่ Generating Voltage เท่ากับ - 600 kV	69
รูปที่ 6.27 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองทดสอบสายสัญญาณ C divider	71
รูปที่ 6.28 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจาก Signal Generator ที่ความถี่ 100 Hz Volt/div 5 V Time/div 5mS	71
รูปที่ 6.29 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจากคั่นสายสัญญาณ divider ที่ความถี่ 100 Hz Volt/div 5 V Time/div 5 mS	72
รูปที่ 6.30 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจากปลายสายสัญญาณ divider ที่ความถี่ 100 Hz Volt/div 5 V Time/div 5 mS	72
รูปที่ 6.31 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจาก Signal Generator ที่ความถี่ 20 kHz Volt/div 5 V Time/div 50 μ S	73
รูปที่ 6.32 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจากคั่นสายสัญญาณ divider ที่ความถี่ 20 kHz Volt/div 5 V Time/div 50 μ S	73
รูปที่ 6.33 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจากปลายสายสัญญาณ divider ที่ความถี่ 20 kHz Volt/div 5 V Time/div 50 μ S	74
รูปที่ 6.34 แสดงวงจรที่ใช้ในการวัดความต้านทาน R_s	75
รูปที่ 6.35 วงจรที่ใช้ทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV	78
รูปที่ 6.36 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่แรงดันอัดประจุ + 62.5 kV/state $R_0 = 35 \Omega$	79
รูปที่ 6.37 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่แรงดันอัดประจุ + 85 kV/state $R_0 = 35 \Omega$	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 6.38 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ -62.5 kV/state $R_0 = 35 \Omega$	80
รูปที่ 6.39 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ -85 kV/state $R_0 = 35 \Omega$	80
รูปที่ 6.40 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ $+62.5 \text{ kV/state}$ $R_0 = 65 \Omega$	81
รูปที่ 6.41 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ $+85 \text{ kV/state}$ $R_0 = 65 \Omega$	81
รูปที่ 6.42 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ -62.5 kV/state $R_0 = 65 \Omega$	82
รูปที่ 6.43 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ -85 kV/state $R_0 = 65 \Omega$	82
รูปที่ 6.44 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ $+62.5 \text{ kV/state}$ $R_0 = 100 \Omega$	83
รูปที่ 6.45 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ $+85 \text{ kV/state}$ $R_0 = 100 \Omega$	83
รูปที่ 6.46 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ -62.5 kV/state $R_0 = 100 \Omega$	84
รูปที่ 6.47 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ -85 kV/state $R_0 = 100 \Omega$	84
รูปที่ 6.48 วงจรทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิง	87
รูปที่ 6.49 วงจรทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นไฟฟ้า สักขณะคลื่นตัด	87
รูปที่ 6.50 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ 62.5 kV/state $R_0 = 35 \Omega$	91
รูปที่ 6.51 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ 62.5 kV/state $R_0 = 65 \Omega$	91
รูปที่ 6.52 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ 62.5 kV/state $R_0 = 100 \Omega$	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 6.53 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่แรงดันอัดประจุ $-62.5 \text{ kV/state } R_0 = 35 \Omega$	92
รูปที่ 6.54 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่แรงดันอัดประจุ $-62.5 \text{ kV/state } R_0 = 65 \Omega$	93
รูปที่ 6.55 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่แรงดันอัดประจุ $-62.5 \text{ kV/state } R_0 = 100 \Omega$	93
รูปที่ 6.56 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ ที่แรงดันอัดประจุ $47.5 \text{ kV/state } R_0 = 0 \Omega$	96
รูปที่ 6.57 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ ที่แรงดันอัดประจุ $47.5 \text{ kV/state } R_0 = 35 \Omega$	96
รูปที่ 6.58 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ ที่แรงดันอัดประจุ $47.5 \text{ kV/state } R_0 = 65 \Omega$	96
รูปที่ 6.59 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ ที่แรงดันอัดประจุ $47.5 \text{ kV/state } R_0 = 100 \Omega$	97
รูปที่ 6.60 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ ที่แรงดันอัดประจุ $-47.5 \text{ kV/state } R_0 = 0 \Omega$	97
รูปที่ 6.61 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ ที่แรงดันอัดประจุ $-47.5 \text{ kV/state } R_0 = 35 \Omega$	97
รูปที่ 6.62 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ ที่แรงดันอัดประจุ $-47.5 \text{ kV/state } R_0 = 65 \Omega$	98
รูปที่ 6.63 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ ที่แรงดันอัดประจุ $-47.5 \text{ kV/state } R_0 = 100 \Omega$	98
รูปที่ 6.64 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันขั้วบวก , ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 2 cm.	101
รูปที่ 6.65 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันขั้วบวก , ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 3 cm.	101
รูปที่ 6.66 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันขั้วบวก , ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 4 cm.	101

	หน้า
รูปที่ 6.67 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันชั่วพล, ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 2 cm.	102
รูปที่ 6.68 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันชั่วพล, ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 3 cm.	102
รูปที่ 6.69 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันชั่วพล, ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 4 cm.	102
รูปที่ 7.1 วงจรการติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV	110
รูปที่ 7.2 วงจรควบคุมความปลอดภัย	111
รูปที่ 7.3 วงจรสัญญาณเตือนให้ปิดประตู	111
รูปที่ 7.4 แสดงโรงประลองไฟฟ้าแรงสูง ตึกปฏิบัติการรวมคณะวิศวกรรมศาสตร์ 2	112
รูปที่ 7.5 แสดงโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงเดิม	112
รูปที่ 7.6 แสดงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลท์ ที่ติดตั้งในโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงเดิม	113
รูปที่ 7.7 แสดงชุดควบคุมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ติดตั้ง ในห้องควบคุมโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงเดิม	113
รูปที่ 7.8 แสดงการเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลท์ที่ติดตั้งใน โรงประลองไฟฟ้าแรงสูง ตึกปฏิบัติการรวมคณะวิศวกรรมศาสตร์ 2	114
รูปที่ 7.9 แสดงชุดควบคุมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ติดตั้งในห้องควบคุม โรงประลองไฟฟ้าแรงสูง ตึกปฏิบัติการรวมคณะวิศวกรรมศาสตร์ 2	114

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานการฉนวนระดับ $1 \text{ kV} < U_m < 52 \text{ kV}$	8
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานการฉนวนระดับ $52 \text{ kV} \leq U_m < 300 \text{ kV}$	9
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการฉนวนระดับ $U_m \geq 300 \text{ kV}$	10
ตารางที่ 5.1 แสดงค่า Clearance around the sphere gap	41
ตารางที่ 5.2 ขนาดวัดแรงดันได้สูงสุดด้วยช่องว่างทรงกลม	41
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ	49
ตารางที่ 5.4 แสดงความต้านทานการต่อลงดินที่จุด Ground Rod	50
ตารางที่ 6.1 ตารางเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างแรงดันและระยะแกป	55
ตารางที่ 6.2 ตารางแสดงค่าต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ แรงดันอัดประจุ Generating Voltage (ได้จาก ระยะแกปของ sphere gap 100 cm.) ระยะแกปเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	67
ตารางที่ 6.3 แสดงแรงดัน และ กระแสของ R_s	76
ตารางที่ 6.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลท์	89
ตารางที่ 6.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ของแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ (Switching Impulse) เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลท์	94
ตารางที่ 6.5 (ต่อ) แสดงค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ของแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ (Switching Impulse) เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลท์	95
ตารางที่ 6.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบคลื่นตัด (Lightning Impulse Chopped Wave) เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลท์	99
ตารางที่ 7.1 ค่าใช้จ่ายต่างๆ ในการดำเนินงานเคลื่อนย้ายและติดตั้ง	109

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ได้มีการสร้างอาคารปฏิบัติการรวมวิศวกรรมศาสตร์ 2 ชั้นมาใหม่ ซึ่งมีโรงทดลองไฟฟ้าแรงสูงที่มีความสมบูรณ์กว่าห้องเดิม และมีแผนการในอนาคตที่จะใช้เป็นศูนย์การทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูง จึงทำให้ต้องทำการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูงไปติดตั้งยังโรงทดลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่ รวมไปถึงการซ่อมแซมและบำรุงรักษาเพื่อให้สามารถทำการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลต์ และ 1500 กิโลโวลต์ เพื่อนำมาแก้ไข ซ่อมแซมเครื่องให้สามารถทำงานได้ตามปกติ
2. วางแผนการติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลต์ และ 1500 กิโลโวลต์ ในโรงทดลองไฟฟ้าแรงสูง ตามหลักการสนามไฟฟ้า
3. ทดสอบใช้เครื่องสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า สวิตซ์ และฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดเปรียบเทียบกับรูปคลื่นมาตรฐาน

ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้

- 1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์ และการสร้างแรงดันอิมพัลส์ประเภทต่างๆ
- 2 ระบบกราวด์ของห้องทดสอบแรงสูง
- 3 การออกแบบและวางผังห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

ขอบเขตของโครงการ

ในการออกแบบ วางผัง และติดตั้งเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ จะพิจารณาถึงความปลอดภัยให้มากที่สุด และใช้มาตรฐาน IEC Publ. 60 และ IEC Publ. 71 เป็นมาตรฐานอ้างอิงในการทดสอบเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ ส่วนในการซ่อมแซมบำรุงรักษาจะศึกษาแยกตามประเภทของปัญหา และทำการแก้ไขโดยมีทฤษฎีอ้างอิง ปรึกษาผู้เชี่ยวชาญจากบริษัทเอกชน และหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการสร้างแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันที่เกิดจากเหตุภายนอก คือ เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่า เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายใน ระบบส่งจ่ายเอง คือ เกิดจากการทำงานของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์แบบสวิตช์ ซึ่ง ความมุ่งหมายของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นในห้องทดลองก็เพื่อที่จะนำไปทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ก่อนที่จะนำไปใช้งาน เพื่อที่จะดูว่าทนต่อแรงดันเกินเหล่านี้ได้ไหม ความคงทนต่อแรงดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์ของฉนวนมิใช่ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันสูงสุดเท่านั้น หากแต่ยังขึ้นอยู่กับการแปรของแรงดันไปตามเวลาอีกด้วย ฉะนั้นเพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จึงมีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานขึ้น โดยยึดเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์

รูปลักษณะของคลื่นอิมพัลส์อาจกำหนดด้วย

1. ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดันในกรณีที่มีคลื่นระลอกซ้อน ซึ่งเกิดจากออสซิลเลชันในคลื่น ๆ ยอดรูปคลื่นให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
2. ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
3. เวลาช่วงหน้าคลื่น T1 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด
4. เวลาช่วงหลังคลื่น T2 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

2.1 ข้อกำหนดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ทั้งสองเกิดขึ้น จะมีรูปคลื่นและคาบเวลาที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบขึ้นมา คือ มาตรฐาน IEC 60-1 (1989) HIGH VOLTAGE TEST TECHNIQUES Part I (Section 6 –Section 7)

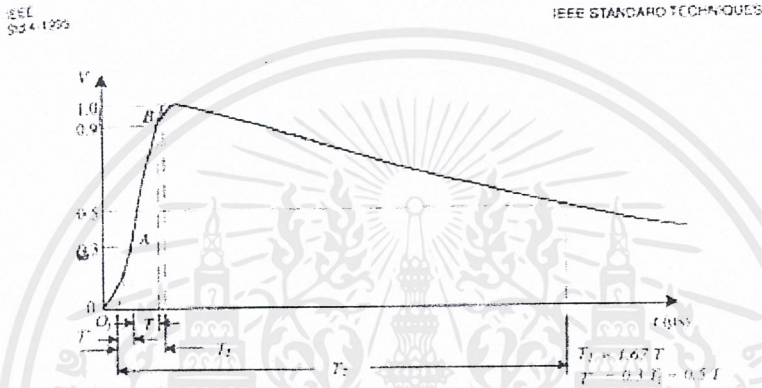
2.1.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นเต็ม (Lightning Impulse Full Wave)

$$T_1 / T_2 = 1.2 / 50 \mu\text{sec}$$

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{sec} \pm 30\%$

เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{sec} \pm 20\%$

ค่ายอดแรงดันทดสอบ $U_m = 3\%$



รูปที่ 2.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะเต็มคลื่น

โดยที่ จุด A คือ จุดที่ 30% ของค่ายอด

จุด B คือ จุดที่ 90% ของค่ายอดขาขึ้น

จุด C คือ จุดที่ 50% ของค่ายอดขาลง

จุด O_1 คือ จุดที่เส้นตรง AB ตัดกับแกน t (จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์)

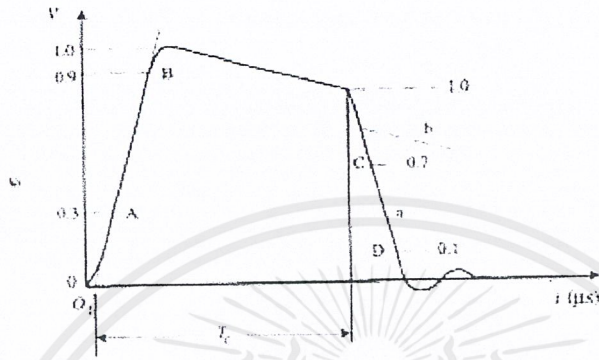
จุด $O_1 - O_2$ คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1

จุด $O_1 - O_3$ คือ เวลาช่วงหลังคลื่น T_2

2.1.2 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด (Lightning Impulse chopped Wave)

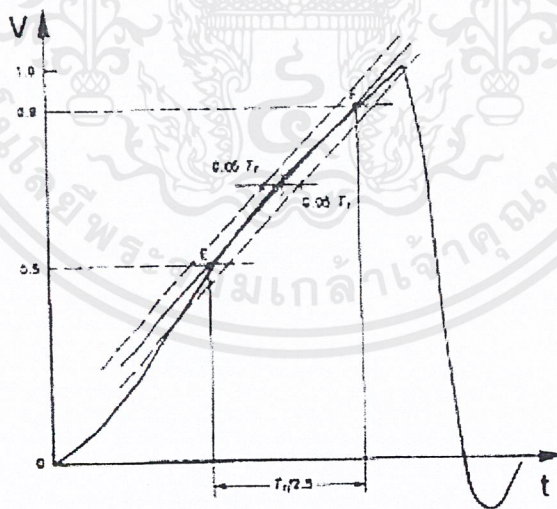
มีได้ 2 แบบ คือ ลักษณะคลื่นตัดที่หน้าคลื่นและหลังคลื่น เวลาช่วงคลื่นตัด $T_c = 2 - 6$

μsec (IEC) หรือ $1 - 3 \mu\text{sec}$ (ANSI)



1—Chopped wave caused by a disruptive discharge
 2—Chopped wave caused by a non-disruptive discharge

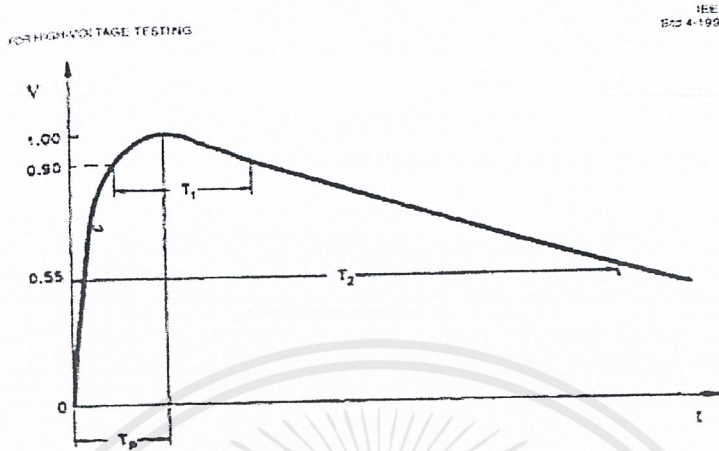
รูปที่ 2.2 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หลังคลื่น



รูปที่ 2.3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 แรงดันอิมพัลส์สวิตจิง (Switching Impulse)



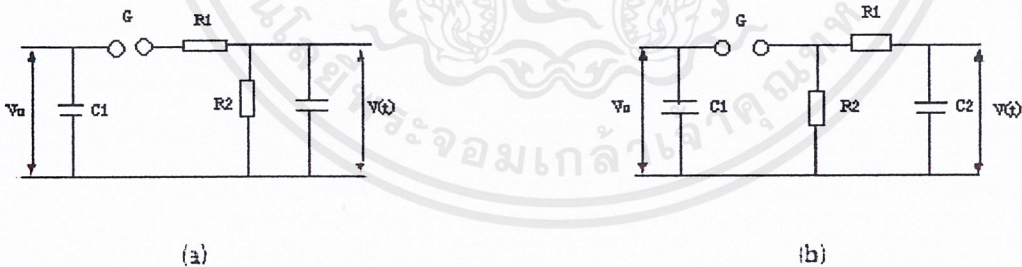
รูปที่ 2.4 แรงดันอิมพัลส์สวิตจิง

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_{cr} = 250 \mu\text{sec} \pm 20\%$

เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 2500 \mu\text{sec} \pm 60\%$

เวลาช่วงยอดคลื่น T_d คือช่วงเวลาที่ 90% ของหน้าคลื่น

2.2 วงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 2.5 รูปวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หนึ่งชั้น วงจร a และ วงจร b

โดยที่ V_0 = แรงดันอัดประจุกระแสตรง

$V(t)$ = แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น

C_1 = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน

C_2 = โหลดฉนวนทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_1 = ความต้านทานหน้าคลื่น (wave front time resistance)

R_2 = ความต้านทานหลังคลื่น (wave tail time resistance)

G = สปาร์คแกปทรงกลม

จากวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยที่เวลา $t < 0$ ตัวเก็บประจุ C_1 มีค่าแรงดันเท่ากับ V_0 และที่เวลา $t > 0$ จะเกิดการดิซชาร์จผ่านแกปทรงกลม พลังงานสูงสุดที่เกิดจากการถ่ายเทประจุจาก C_1 จึงมีค่าเท่ากับ

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot V_{0(\max)}^2 \quad \text{Joule} \quad (1)$$

การหาขนาดส่วนประกอบของวงจร ในการหา R_1 และ R_2 โดยทั่วไปจะต้องทราบค่า C_1 และ C_2 ก่อน สำหรับเครื่องกำเนิดขนาดใหญ่มักจะต้องมีค่าตัวเก็บประจุดิซชาร์จที่เหมาะสม เพื่อที่จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องสูง โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ $C_1/(C_1 + C_2)$ (สำหรับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (T_1 / T_2)) ทั้งนี้เราสามารถคำนวณค่าความต้านทานที่ยังไม่ทราบค่าได้ ซึ่งจะมีค่าดังนี้

สมการวงจร b (เป็นสมการเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หนึ่งชั้น)

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

$$R_2 = \frac{1}{2 \cdot (C_1 - C_2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot C_1}} \right] \quad (3)$$

สมการที่ 2 และ 3 ประกอบด้วยค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนคงที่ (K) กับ ช่วงเวลา T_1 และ T_2 ตามชนิดของรูปคลื่นแบบต่าง ๆ สามารถประมาณการได้ตามสมการที่ 4 และ 5 โดย

$$T_1 = K_2 * \frac{1}{\alpha_2} \quad (4)$$

$$T_2 = K_1 * \frac{1}{\alpha_1} \quad (5)$$

แรงดันอิมพัลส์หนึ่งชั้น จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V(t) = \frac{V_0}{k} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[e^{(-\alpha_1 t)} - e^{(-\alpha_2 t)} \right] \quad ; \text{ เมื่อ } k = R_1 * C_2 \quad (6)$$

สมการเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลาย ๆ ชั้น เมื่อ n คือ จำนวนชั้น จะได้

$$R_1 = R_0 + \sum^n R_f \quad (7)$$

$$R_2 = nR_1 = \sum^n R_i \quad (8)$$

$$\frac{1}{C_1} = \sum^n \frac{1}{C} \quad (9)$$

$$C_2 = D \quad (10)$$

$$V(t) = \frac{V_0}{k} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[e^{(-\alpha_1 t)} - e^{(-\alpha_2 t)} \right] \quad (11)$$

2.3 ขนาดแรงดันทดสอบ

การเลือกขนาดแรงดันทดสอบขึ้นอยู่กับระดับการฉนวน (Insulation level) นั่นคือ ขึ้นอยู่กับระบบแรงดันที่จะนำเอาอุปกรณ์หรือวัสดุนั้น ๆ ไปใช้งาน แต่ละประเทศจะกำหนดมาตรฐานการทดสอบของตนเอง อย่างไรก็ตามอาจใช้มาตรฐานสากล (IEC Recommendation) ซึ่งเป็นที่ยอมรับของนานา ๆ ประเทศเป็นค่าอ้างอิงหรือตกลงกันระหว่างประเทศ IEC Publ.71-1976 : Insulation Co-ordination Part 1. ได้กำหนดระดับแรงดันทดสอบตามช่วงระบบแรงดันสูงสุดออกเป็น 3 ช่วงได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1

มาตรฐานการฉนวนระดับ $1 \text{ kV} < U_m < 52 \text{ kV}$

Highest voltage for equipment U_m (r.m.s.)	Rated lightning impulse withstand voltage (peak)		Rated power-frequency short duration withstand voltage (r.m.s.)
	List 1	List 2	
kV	kV	kV	kV
3.6	20	40	10
7.2	40	60	20
12	60	75	28
17.5	75	95	38
24	95	125	50
36	145	170	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lists 1 and 2 to VDE 0110 or IEC 71-1 (selection of lightning impulse withstand level in relation to degree of risk)

U_m maximum continuous system operating voltage (rms value between conductors)

ตารางที่ 2.2

มาตรฐานการฉนวนระดับ $52 \text{ kV} \leq U_m < 300 \text{ kV}$

1	2	3	4
Highest voltage for equipment U_m (r.m.s.)	Base for p.u. values $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ (peak)	Rated lightning impulse withstand voltage (peak)	Rated power-frequency short duration withstand voltage (r.m.s.)
kV	kV	kV	kV
52	42.5	250	95
72.5	59	325	140
123	100	450	185
145	118	550	230
170	139	650	275
245	200	750	325
		850	360
		950	395
		1050	460

In this range lightning overvoltages are the prime consideration when selecting insulation levels

123 kV , also for existing networks with $U_m = 125$

245 kV , also for existing networks with $U_m = 250$

Note. If more than one insulation level is indicated , the highest level is to be selected for an earth-fault factor > 1.4 .

ตารางที่ 2.3

มาตรฐานการฉนวนระดับ $U_m \geq 300$ kV

1	2	3	4	5	6
Highest voltage for equipment U_m (rms)	Base for p.u. values $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ (peak)	Rated switching impulse withstand voltage (peak)		Ratio between rated lightning and switching impulse withstand voltages	Rated lightning impulse withstand voltage (peak)
kV	kV	p.u.	kV		kV
300	245	3.06	750	1.13	850
		3.47	850	1.27	950
362	296	2.86	850	1.12	950
		3.21	950	1.24	1050
420	343	2.76	950	1.11	1050
		3.21	950	1.24	1175
525	429	3.06	1050	1.12	1175
		2.45	1050	1.24	1300
		2.74	1175	1.11	1300
765	625	2.03	1300	1.36	1425
		2.28	1425	1.21	1425
		2.48	1550	1.10	1425
		2.28	1425	1.32	1550
765	625	2.28	1425	1.19	1550
		2.48	1550	1.09	1550
		2.28	1425	1.38	1800
		2.48	1550	1.26	1800
765	625	2.48	1550	1.16	1800
		2.48	1550	1.26	1950
		2.48	1550	1.47	2100
765	625	2.48	1550	1.55	2400
		2.48	1550	1.55	2400

The Table is based on the assumption that in this voltage range switching overvoltages are

the prime consideration when selecting insulation levels.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 จะพบว่า มีแรงดันที่ใช้ในการทดสอบมี 3 อย่างคือ

1. Power frequency withstand voltage คือ การทดสอบความทนอยู่ได้ของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สูงกว่าพิกัดประมาณ 2 เท่า (หรือต่ำกว่านี้ถ้า $U_m \geq 400 \text{ kV}$) นาน 1 นาทีที่ความถี่ปกติ 50-60 Hz

2. Lightning impulse withstand voltage คือ การทดสอบความทนอยู่ได้ของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

3. Switching impulse withstand voltage คือ การทดสอบความทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตซ์ (ทดสอบเฉพาะอุปกรณ์ที่มีพิกัดแรงดันใช้งาน 200 kV และสูงกว่า)



บทที่ 3

ส่วนประกอบ และคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 และ 1500 กิโลโวลต์

3.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดลองเป็นของ PASSION VILLA โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

3.1.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

3.1.2 เครื่องอัดประจุ

3.1.3 ตู้ควบคุม

3.1.4 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน

3.1.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Generator) มีข้อกำหนดดังนี้

- Charging Rated Voltage :	200	kV
- Max. Output Voltage 1.2/50 μ s (depending on the load) :	180	kV
- Max. Output Voltage 250/2500 μ s (depending on the load) :	155	kV
- Rated Energy :	5	kJ
- Number of Stages :	2	Stages
- Charging Voltage per Stage :	100	kV
- Stage Rates Capacitance :	0.5	μ F
- Rated Recurrence Frequency : between Following Impulses :	30	sec
- Generator Inductance :	15	μ H
- Related Humidity :	35 % - 95 %	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Working Temperature : -10°C to $+40^{\circ}\text{C}$

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์

1) Main Capacitors

- Rated Voltage : 100 kV-DC
- Rated Capacitance : 0.5 μF
- Tolerance on the Capacitance : +10 % - 5 %
- Deviation from the Average Value : 5 %
- Rated Voltage A.C., Continuous Duty : 25 kV rms
- Loss Factor (Tand) at 25 kV rms : about $5 \cdot 10^{-3}$
- Partial Discharge Level at 10 kV rms : about 5 pC
- Max. Inductance : about 0.5 μH
- Working Temperature : -10°C to $+40^{\circ}\text{C}$

The Quantity Supplied is 1 Capacitor for Stage.

2) Charging Resistor for L.I. and S.I. Wave

- Rated Value : 25000 Ω
- Resistor Inductance : 5 μH
- Thermal Capacitance for an Impulse
each 30 s : 2.5 kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor.

3) Front Resistor for L.I. Wave

- Rated Value : 12 $\Omega \pm 5\%$
- Resistor Inductance : 1.5 μH
- Thermal Capacitance for an Impulse
each 30 s : 2.5 kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor for Stage.

4) Tail Resistor for L.I. Wave

- Rated Value : 150 $\Omega \pm 5\%$
- Resistor Inductance : 2 μH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Thermal Capacitance for an Impulse

each 30 s : 2.5 kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor for Stage.

5) Output Resistor for L.I. Wave (2 sections)

- Total Rated Value : 100 $\Omega \pm 10\%$

- Resistor Inductance : about 5 μH

- Thermal Capacitance for an Impulse

each 30 s : 2.5 kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor for Stage.

6) Front Resistor for S.I. Wave

- Rated Value : 12 $\Omega \pm 5\%$

- Thermal Capacitance for an Impulse

each 30 s : 2.5 kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor for Stage.

7) Front Resistor for S.I. Wave

- Rated Value : 12 $\Omega \pm 5\%$

- Thermal Capacitance for an Impulse

each 30 s : 2.5 kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor for Stage.

8) Trigger Capacitor

- Rated Voltage : 100 kV-DC

- Rated Capacitance : 850 μF

- Rated Resistance : 900 Ω

The Quantity Supplied is 1 Capacitor.

3.1.2 เครื่องอัดประจุ (charging)

เครื่องอัดประจุเป็นตัวสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง เพื่อทำการอัดประจุให้กับ unicapacitor ทุกๆ ตัวในแต่ละ stage โดยมีแรงคั้นขาเข้า (input voltage) เป็น 220 Vac. แล้วไปผ่านชุดเรียงกระแส (rectifier) ซึ่งเป็นแบบ full wave ซึ่งใช้ Diode 2 ตัว ทำงานสลับกัน ในแต่ละ cycle ไคโอดแต่ละตัวจะทำการอัดประจุให้กับคาปาซิเตอร์แต่ละตัว ซึ่งคาปาซิเตอร์แต่ละตัว

ละตัวจะต่ออนุกรมกันทำให้เกิดแรงดันทวีคูณ 2 เท่า เกิดขึ้นที่ด้านแรงดันขาออกเพื่ออัดประจุให้กับเครื่องกำเนิดกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์อีกทีหนึ่ง

โดยเครื่องอัดประจุมีข้อกำหนดดังนี้

- Feeding Voltage at 50 Hz :	220	V
- Output Voltage :	± 100	kV DC
- Output Current :	100	mA

ส่วนประกอบของเครื่องอัดประจุ

1) Transformer

- Primary Voltage :	220	V
- Secondary Voltage :	48	kV
- Rated Power :	600	VA

2) Rectifying Sections

- Rated Voltage :	150	kV DC
- Rated Current :	225	mA

3) Diode Protection Resistors

- Rated Voltage :	100	kV DC
- Rated Resistance :	15	k Ω

4) Doubling Capacitor

- Rated Voltage :	50	kV
- Rated Capacitance :	2.5	nF

5) Measuring Resistor

- Continuous Rated Voltage :	1000	kV DC
- Rated Resistance :	200	M Ω
- Tolerance on the Rated Voltage :	$\pm 5\%$	
- Connector Type :	AMPHENOL	

3.1.3 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน (Capacitor voltage divider)

คาปาซิเตอร์โวลเตจดีไวเดอร์ทำหน้าที่เป็นตัววัดขนาดและรูปร่างของแรงดันที่เกิดขึ้นด้านขาออกของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยสัญญาณที่ได้จะถูกต่อไปยัง oscilloscope อีกทีหนึ่ง เพื่อแสดงรูปคลื่นสัญญาณและขนาดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาปาซิเตอร์โวลเตจดีโวลเตอร์ มีพิกัดดังนี้

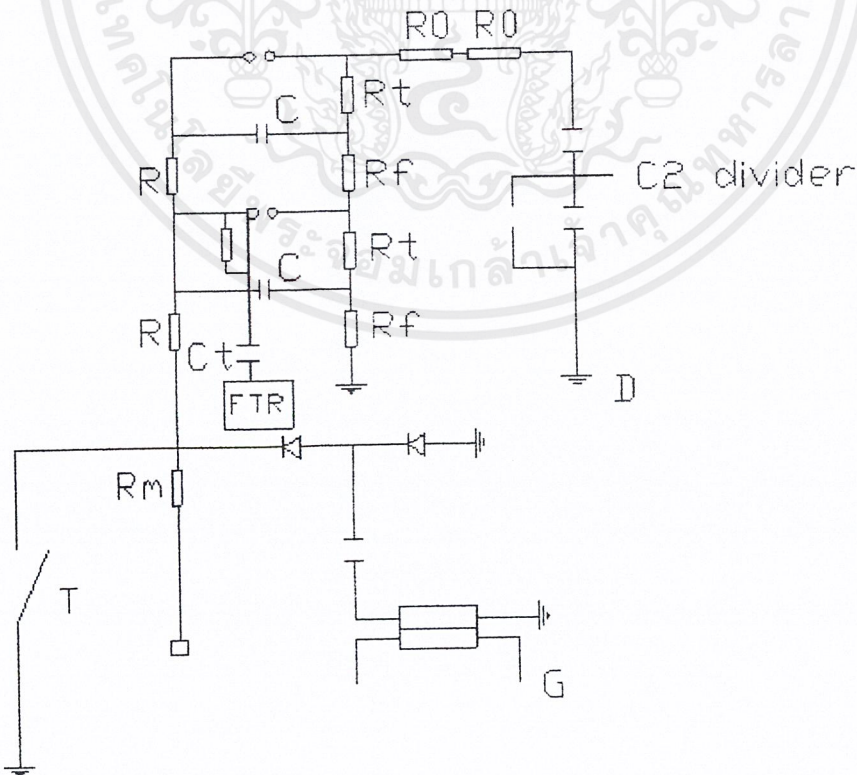
- Rated Capacitance :	4200	pF
- Rated Voltage L.I. :	200	kV
- Rated Voltage to 50 Hz :	50	kV
- Rated Ratio :	230.5	
- Connector Type :	LEMO RA 4250	

3.1.4 ผู้ควบคุม

ผู้ควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทุกอย่างของวงจร รวมถึงแสดงสถานะของแต่ละขั้นตอนการทดสอบ เริ่มตั้งแต่ป้อนแรงดันขนาด 220 Vac. เข้าที่ชุด charging voltage ไปจนถึงเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอิมพัลส์

ผู้ควบคุมมีข้อกำหนดดังนี้

- Voltage : 220 V - 60 Hz
- Phase : Single
- Power : 1 kVA



รูปที่ 3.1 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

G	เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง		
T	ระบบกราวด์		
$R_f(R_1)$	ความต้านทานหน้าคลื่น	12 Ω (lightning)	6000 Ω (Switching)
$R_r(R_2)$	ความต้านทานหลังคลื่น	150 Ω (lightning)	6000 Ω (Switching)
R_m	ความต้านทานวัดแรงดันอัดประจุกระแสตรง		200 M Ω
R	ความต้านทานอัดประจุ		1450 Ω
R_o	ความต้านทานเอาต์พุท		100 (65 + 35) Ω
$C(C_1)$	คาปาซิเตอร์หลัก		0.5 μ F
C_t	ทริกเกอร์คาปาซิเตอร์		850 pF
$D(C_2)$	คาปาซิเตอร์โวลต์เตจดีไวเดอร์		4200 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์

มีส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

3.2.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

3.2.2 เครื่องอัดประจุ

3.2.3 ตู้ควบคุม

3.2.4 ลูกทรงกลมมาตรฐาน

3.2.5 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน

3.2.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Generator) มีข้อกำหนดดังนี้

- Nominal Voltage : 1500(1200) kV
- Generating Voltage : 1200(1000) kV
- Static Capacitance : 0.025 μ F
- Maximum Charging Energy : 28.1 kJ
- Charging Voltage : ± 75 kV
- Wave form : Lightning 1.2/50 μ s
- : Switching 250/2500 μ s
- Polarization : Positive / Negative
- Trigger System : Needle Gap
- Operation : Manual

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์

1) Insulated Stages	11	stage
2) Unit Capacitor	20	pcs.
Nominal Voltage	75	kV
Test Voltage	100	kV
Static Capacitance	0.5	μ F
3) Damping Resistor	10	Ω
4) Charging Resistor	30	k Ω 29 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	100	$k\Omega$	2	ตัว
5) Discharge Resistor	91.1	Ω	20	ตัว
6) Matching Resistor	(5+75)	Ω	1	ตัว
7) Divided Resistor	(0.5+0.5)	Ω	2	ตัว
8) Shunt Capacitor For Wave Form	2000	pF	1	ตัว
9) Discharge Gap	125	mm.	20	ตัว

3.2.2 เครื่องอัดประจุ (charging)

เครื่องอัดประจุเป็นตัวสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง เพื่อทำการอัดประจุให้กับ unicapacitor ทุกๆ ตัวในแต่ละ stage โดยมีแรงดันขาเข้า (input voltage) เป็น 220 Vac. แล้วไปผ่านชุดเรียงกระแส (rectifier) ซึ่งเป็นแบบ full wave ซึ่งใช้ Diode 2 ตัว ทำงานสลับกันในแต่ละ cycle ไดโอดแต่ละตัวจะทำการอัดประจุให้กับคาปาซิเตอร์แต่ละตัว ซึ่งคาปาซิเตอร์แต่ละตัวจะต่ออนุกรมกันทำให้เกิดแรงดันทวีคูณ 2 เท่า เกิดขึ้นที่ด้านแรงดันขาออกเพื่ออัดประจุให้กับเครื่องกำเนิดกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์อีกทีหนึ่ง

โดยเครื่องอัดประจุมีส่วนประกอบดังนี้

1. หม้อแปลง 1 ชุด มีพิกัดดังนี้

- Primary : 220 Vac.
- Secondary : 60 kV
- Capacity : 5 kVA

2. Rectifier ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำมัน

- Peak Reverse Voltage : 250 kV
- Nominal Current : 50 mA

3. Pulse Suppressing Capacitor 2 ตัว มีพิกัดดังนี้

- Nominal Voltage : 75 kV
- Static Capacitor : 0.1 μF
- ความต้านทานสำหรับระดับแรงดัน : 800 $M\Omega$

3.2.3 คู่ควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทุกอย่างของวงจร รวมถึงแสดงสถานะของแต่ละขั้นตอนการทดสอบ เริ่มตั้งแต่ป้อนแรงดันขนาด 220 Vac. เข้าที่ชุด charging voltage ไปจนถึงเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอิมพัลส์

ผู้ควบคุมจะประกอบด้วย

1.Voltage Controller 7.5 kVA. 1 ชุด

สำหรับควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

2.มิเตอร์

- มิเตอร์วัดแรงดันกระแสตรงขนาด 300 V
- มิเตอร์วัดระยะช่องว่าง (Gap meter) ขนาด 100 mm.
- ตัวกำเนิดสัญญาณ trigger pulse 10 kV
- มิเตอร์วัดแรงดันกระแสสลับขนาด 80 (160) kV
- อุปกรณ์อื่นๆ

3.2.4 ทรงกลมมาตรฐาน (Standard sphere gap)

ทรงกลมมาตรฐานมีไว้เพื่อเป็นภาระ (load) ของวงจรทดสอบ โดยจะกำหนดค่าแรงดันเบรคดาวนให้ผ่านอากาศแทน โดยค่าแรงดันเบรคดาวนนี้สามารถหาได้จากเส้นกราฟใช้หาค่าแรงดันเบรคดาวน 50 % แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถคาดคะเนแรงดันเบรคดาวนนี้ผ่านอากาศของทรงกลมมาตรฐานได้อย่างคร่าวๆ โดยคิดจากแรงดันเบรคดาวนผ่านอากาศจะเท่ากับ 25 kV/cm

ดังนั้นถ้าเราต้องการค่าแรงดันเบรคดาวนเท่าไรก็สามารถคาดคะเนได้คร่าวๆ แต่ทั้งนี้ระยะห่างของ stand sphere gap จะต้องสอดคล้องระยะห่างของ spark gap ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วย

พิกัดของทรงกลมมาตรฐาน

- Diameter : 1000 mm.

3.2.5 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน (Capacitor voltage divider)

คาปาซิเตอร์โวลเตจดีไวเดอร์ทำหน้าที่เป็นตัววัดขนาดและรูปร่างของแรงดันที่เกิดขึ้นด้านขาออกของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยสัญญาณที่ได้จะถูกต่อไปยัง oscilloscope อีกทีหนึ่งเพื่อแสดงรูปคลื่นสัญญาณและขนาดแรงดัน

คาปาซิเตอร์โวลเตจดีไวเดอร์ มีพิกัดดังนี้

- ขนาด : 1600 kVA

- HV. Capacitor :	2000	pF		
- LV. Capacitor :	100	μF	50	μF
with matching resistance	75	Ω	1	ตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ขั้นตอนการใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 และ 1500 กิโลโวลต์

4.1 ขั้นตอนการใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์

1. เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ I.G. 1 ในตู้ load center E4 หน้าห้องควบคุม
2. เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ HV 1 ในห้องควบคุม แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงเซอร์กิตเบรกเกอร์ HV1 ในห้องควบคุม

3. เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ Q.1 ที่ด้านหน้าตู้ควบคุมอิมพัลส์เจนเนอเรเตอร์ แล้วสับสวิตช์ ฟิวส์ F.1 และ F.2 ตามลำดับ

4. ต่อสาย Probe Channel A เข้ากับ CH1 ของออสซิลโลสโคป แล้วกดสวิตช์เมนออสซิลโลสโคป จะใช้เวลาประมาณ 15 วินาที ถ้าไม่ได้ใช้เครื่องนานให้รอประมาณ 3-5 นาที

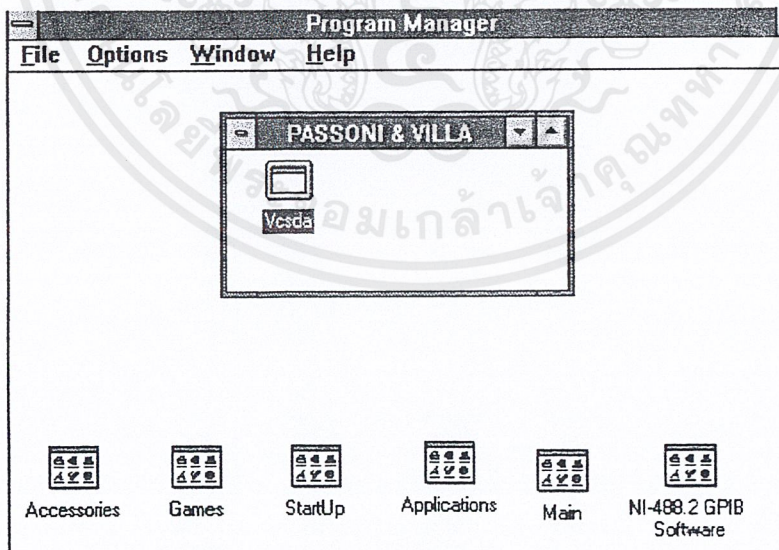
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เปิด Power สวิตช์ของคอมพิวเตอร์ รอจนกระทั่งคอมพิวเตอร์เข้าโปรแกรม Window 3.1 เรียบร้อย

6. ดับเบิ้ลคลิกที่ไอคอน Program Manager แล้วดับเบิ้ลคลิกที่ไอคอน Vcsda จากนั้น ประมาณ 5 วินาที จะเข้าสู่โปรแกรม ดังรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 ตามลำดับ



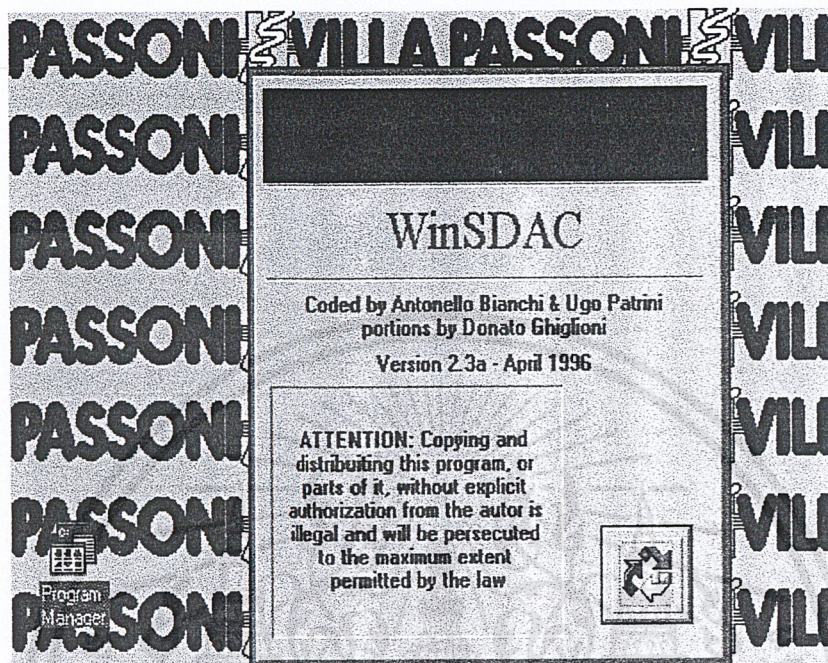
รูปที่ 4.2 แสดง Window 3.1 และ ไอคอน Program Manager



รูปที่ 4.3 แสดงไอคอน Vcsda เพื่อเข้าสู่โปรแกรม WinSDAC

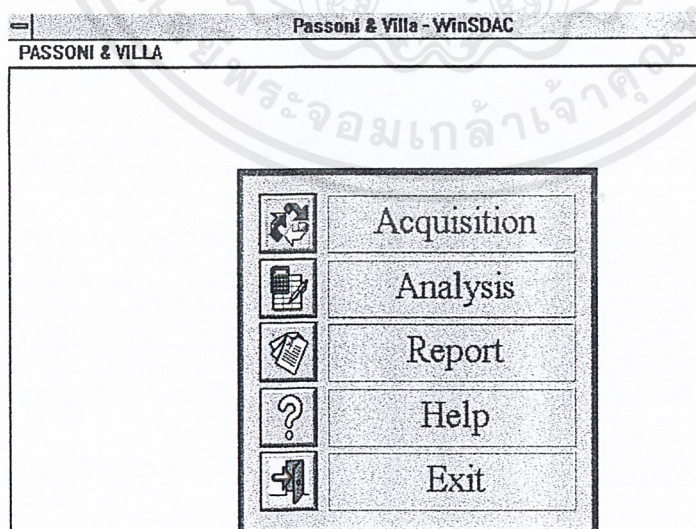
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. หลังจากนั้นหน้าจอจะขึ้นมาดังรูปที่ 4.4 ให้คลิกที่ ปุ่มลูกศร สีน้ำเงิน แดง เหลือง



รูปที่ 4.4 แสดงภาพเมื่อเริ่มเข้าสู่โปรแกรม WinSDAC

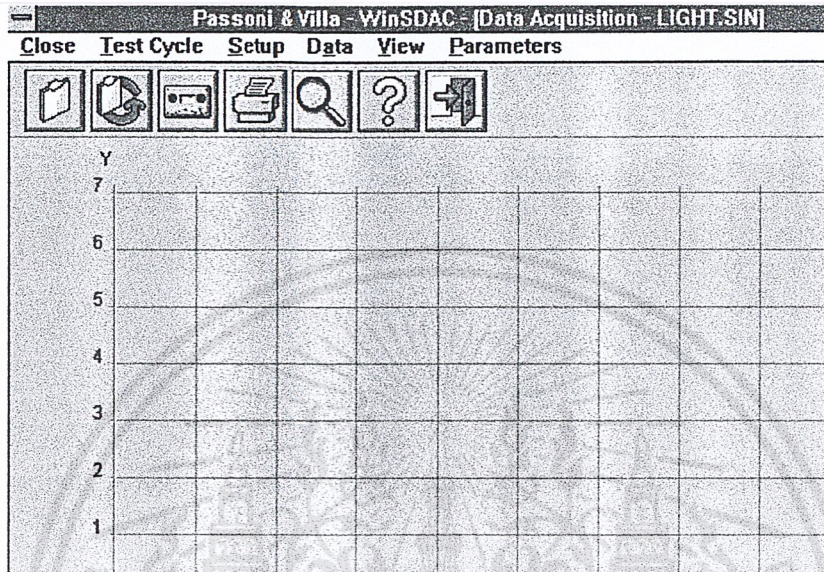
8. หลังจากนั้นหน้าจอจะขึ้นดังรูปที่ 4.5 ให้คลิก Acquisition



รูปที่ 4.5 แสดงเมนูเลือกการทำงานของโปรแกรม WinSDAC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

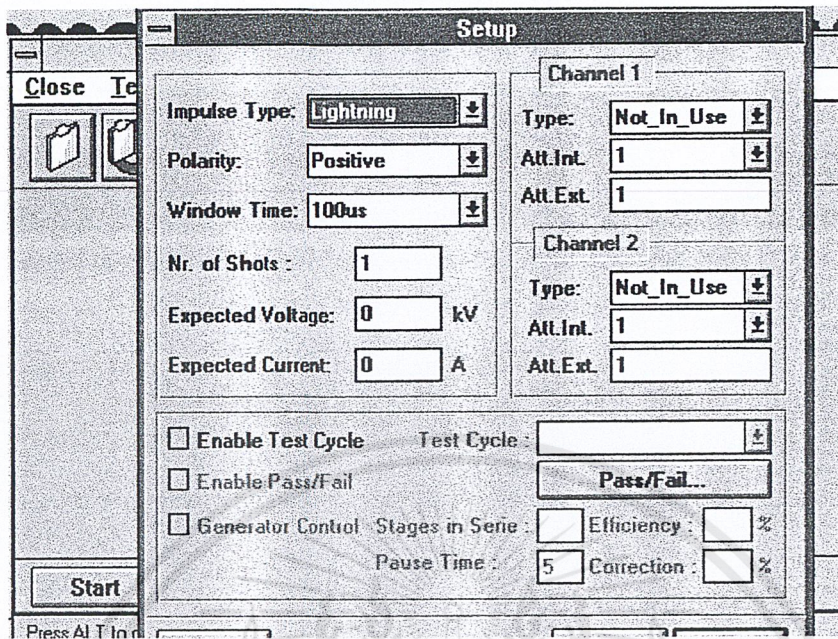
9. หน้าจอจะแสดงดังรูปที่ 4.6 คลิกที่ Setup → Open เลือกเพิ่มข้อมูลที่ต้องการเปิด แล้วคลิกที่ OK หลังจากนั้นไปที่ Setup → Modify



รูปที่ 4.6 แสดงหน้าจอการทำงานของโปรแกรม WinSDAC

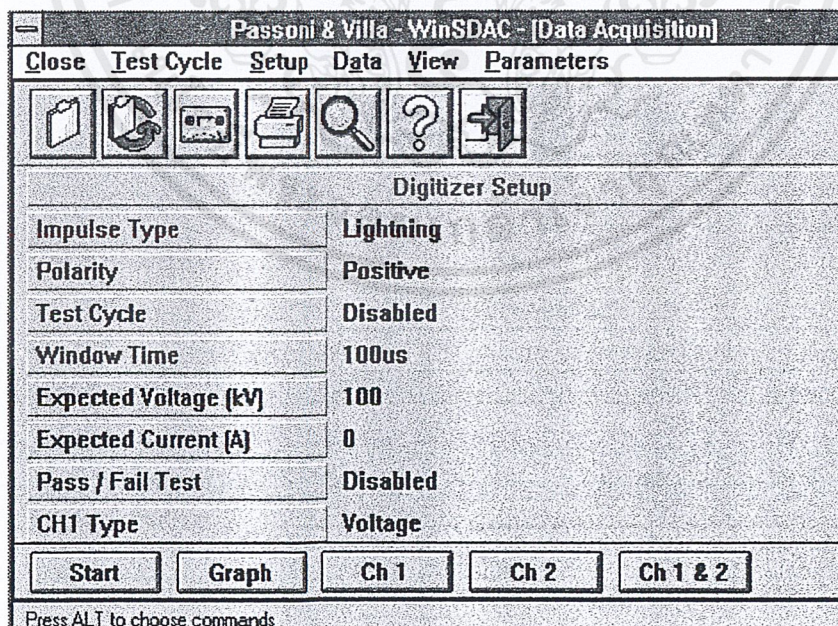
10. หลังจากที่ได้เลือก Setup → Modify หน้าจอจะขึ้นดังรูปที่ 4.7 แล้วเลือกค่าต่าง ๆ ตามที่
ต้องการทดลอง

- ค่า Expected voltage ให้ใช้ค่าเป็น 2 เท่าของแรงดันอัดประจุที่ตั้งไว้ที่ชุดควบคุม
- Impulse Type ให้กำหนดประเภทแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการทดสอบ
- Att. Int. = 100
- Att. Ext. = 230.5
- Polarity เลือกตามขั้วของแรงดันจากหม้อแปลงอัดประจุ
- Window Time เลือก ตามชนิดของแรงดันอิมพัลส์ (Switching = 5 ms , Lightning = 100 μ sec , Chopped = 10 μ sec)
- Expected Current เลือก ตามชนิดของแรงดันอิมพัลส์ (Switching = 200A , Lightning = 0 A , Chopped = 200 A)



รูปที่ 4.7 แสดง หลังจากเลือก Setup → Modify ที่เมนูบาร์ ของโปรแกรม WinSDAC

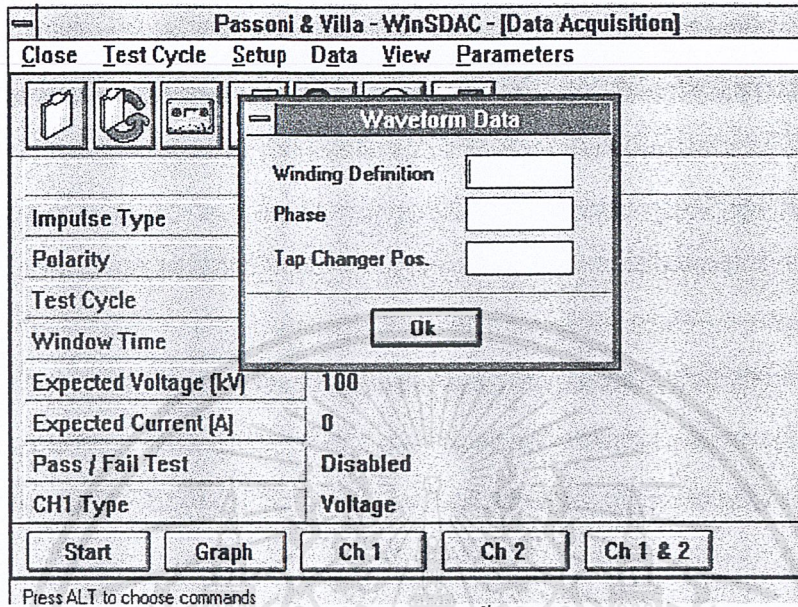
11. หลังจากนั้นหน้าจอจะขึ้น ดังรูปที่ 4.8 ให้คลิก Start



รูปที่ 4.8 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ตั้งค่าไว้ในโปรแกรม WinSDAC

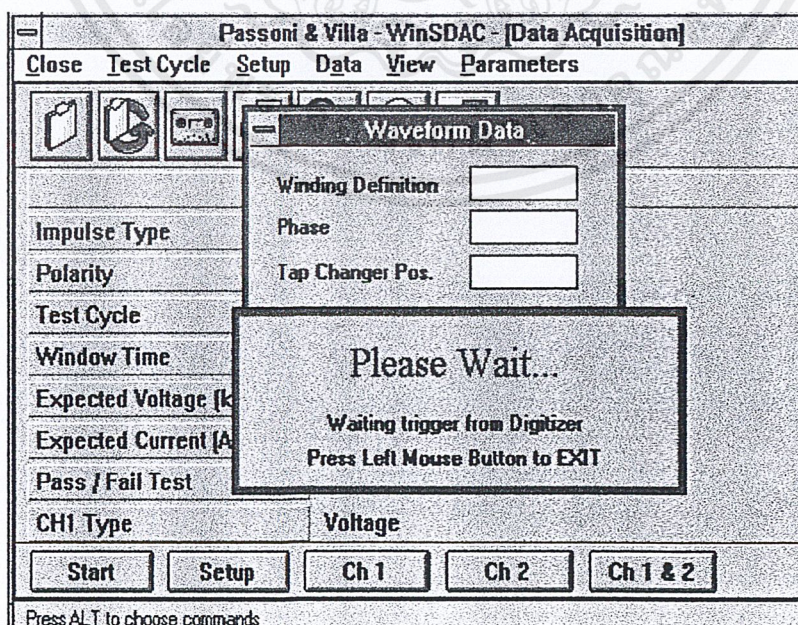
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. หน้าจอจะขึ้นดังรูปที่ 4.9 ให้คลิก OK



รูปที่ 4.9 แสดงหน้าต่าง Waveform Data หลังคลิก Start ของโปรแกรม WinSDAC

13. หน้าจอจะขึ้นดังรูปที่ 4.10 ให้ปลด Emergency Switch ปลด Earthing Switch โดยกดปุ่มสีแดง เริ่มการเบรคคาวน์โดยกดปุ่ม ON แล้วเครื่องก็จะทำงานโดยอัตโนมัติ รอจนกว่าจะมีการเบรคคาวน์ หน้าจอจะแสดงรูปคลื่นที่ทดลอง



รูปที่ 4.10 แสดงบล็อกข้อความให้รอสักครู่ โปรแกรม WinSDAC กำลังรอการเบรคคาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการทำ Lightning Impulse ขนาด 125 kV ตั้งค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. คลิก OK หลังจากนั้น คลิก Start เพื่อเริ่มการเบรคความ จะปรากฏ โดอะถ็อกบถ็อกดังรูปที่ 4.9 ให้คลิก OK ผ่านไปเลย

2. โปรแกรมจะแสดง โดอะถ็อกบถ็อกขึ้นดังรูปที่ 4.10

3. หลังจากนั้นมาตั้งค่าต่างๆ หน้าผู้ควบคุม ดังรูปที่ 4.11 ดังนี้

- ค่า Charging Preset เท่ากับครึ่งหนึ่ง ของค่าที่ตั้งไว้ในโปรแกรม ในที่นี้ ตามตัวอย่างก็

คือ $125/2 = 62.5 \text{ kV}$

- ค่า Time Interval เท่ากับ 5

- ค่า Shot Number เท่ากับ 1 (ในกรณีที่ทำเบรคความเพียงครั้งเดียว)

- ตั้งค่าปรับ Sphere Gap แบบ Automatic Control

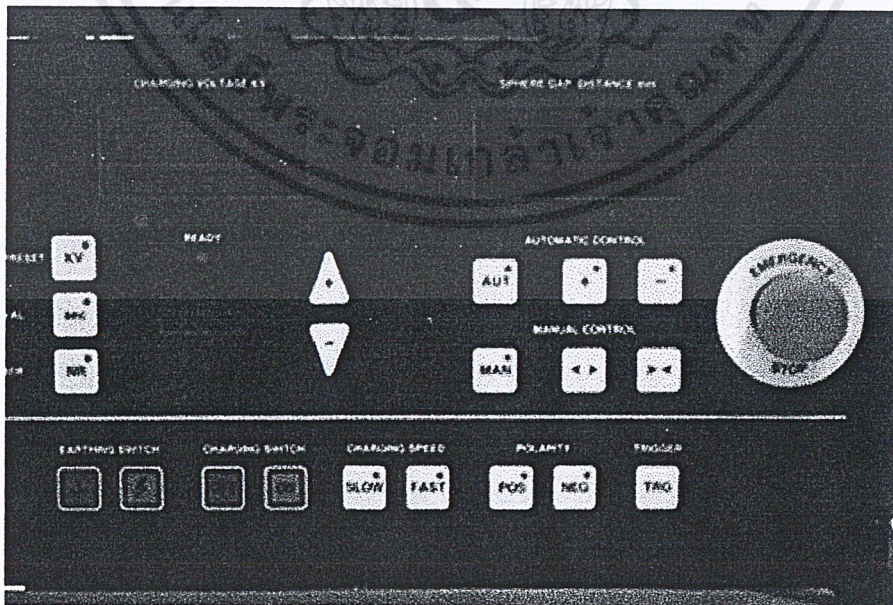
- ตั้งค่า Charging Speed เป็น Fast ในกรณีที่ เบรคความ โวลท์เตจมากกว่า 100 kV (ถ้าน้อยกว่าให้ตั้งเป็นแบบ Slow)

- ปลด Emergency Switch โดยการหมุนแหวนของสวิตช์ด้านในตามเข็มนาฬิกา

- ปลด Earthing Switch โดยกดปุ่มสีแดง

- เริ่มการเบรคความ โดยกดปุ่ม ON แล้วเครื่องก็จะทำงาน โดยอัตโนมัติ

4. หลังจากเบรคความเสร็จให้กด Emergency Switch ลง



รูปที่ 4.11 แสดง control panel ของชุดควบคุมเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อควรระวัง

- ก่อนจะสัมผัสส่วนใดส่วนหนึ่งของตัวเครื่องอิมพัลส์ ในห้องทดสอบ ต้องใช้ไม้ Ground Stick คีบขารัจประจุทุกครั้ง และในการนำเข้าไปขารัจประจุควรเข้าไป 2 คน
- ก่อนเข้าไปในห้องเพื่อจะทำการใดๆ ต้องกด Emergency Switch ลงทุกครั้ง
- ก่อนจะปิดเบรกเกอร์ของชุดควบคุมทุกครั้ง ให้ปิดสวิทช์ Mains Oscilloscope ก่อนทุกครั้ง
- การปิดเครื่อง ให้ OFF เซอร์กิตเบรกเกอร์ Q.1 ก่อนแล้วปลดฟิวส์ F.1 และ F.2 ออกด้วยทุกครั้ง
- เมื่อทำการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว ต้องปิดเบรกเกอร์ HV1 และ I.G. 1 ในตู้ Load Center E4 ทุกครั้ง

ปัญหาที่พบบ่อยและการแก้ไข

1. ในกรณีที่เปิดโปรแกรม Vcsda แล้วปรากฏไดอะล็อก บล็อก ขึ้นมาดังรูปที่ 4.12 ให้เช็คตามขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.12 แสดงการผิดพลาดในการต่อออสซิลโลสโคป

- ตรวจสอบว่าทำการเปิดออสซิลโลสโคปแล้วหรือไม่
- ตรวจสอบสายสัญญาณจาก Divider เข้า Probe และจาก probe เข้าออสซิลโลสโคป ว่าต่อ Channel เดียวกันหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กลุ่ม Utilities ที่ตัวออสซิลโลสโคป เลือก GPIB/RS232 SETUP แล้วตั้งค่าดังต่อไปนี้

Remote control from	เลือก GPIB
Parity	เลือก none
Stop bits	เลือก 1
Baud Rate	เลือก 9600



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ขั้นตอนการใช้เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ขนาด 1500 กิโลโวลต์ (การใช้งานแบบ Manual)

1. คำนวณหาแรงดันอัดประจุ จากสูตร

$$V = e/n.\eta$$

โดยที่ e = Generating Voltage

n = จำนวนของคาปาซิเตอร์

สำหรับเครื่องกำเนิดอิมพัลส์แบบ IVG*1500 B $\eta = 0.8$, $n = 20$

2. ค่า Generating Voltage ได้จากรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแถบที่ต้องการทดสอบกับ Generating Voltage ค่านี้จะได้จากค่าแถบที่ต้องการทดสอบ

จากรูปที่ 4.12 สมมติว่า ต้องการทดสอบที่ระยะแถบ 40 mm. จะได้ Generating Voltage เท่ากับ 112 kV แล้วนำไปคำนวณหาค่าแรงดันอัดประจุในสมการในข้อ 1 จะได้ $V = 112 / (0.8 \times 20) = 7kV$ และนำค่านี้ไปพิจารณาในข้อที่ 9

3. ผลัก NO FUSE BREAKER ไปที่ ON หลอดไฟ (SOURCE), (MANUAL) หรือ (AUTO) และ (+) หรือ (-) ติด

4. ผลักสวิทช์ไปที่ (MANUAL) หลอดไฟ (MANUAL) ติด

5. กดสวิทช์ (P.C.) ขั้วของแรงดันอิมพัลส์จะเปลี่ยนไปตามต้องการซึ่งแสดงโดยหลอดไฟ (+) หรือ (-)

6. กดสวิทช์ (R.E.D) ดิสชาร์จ bar บนตัวอัดประจุ (Charger) จะสัมผัสขั้วจ่ายเพื่อทำการคายประจุที่หลงเหลืออยู่

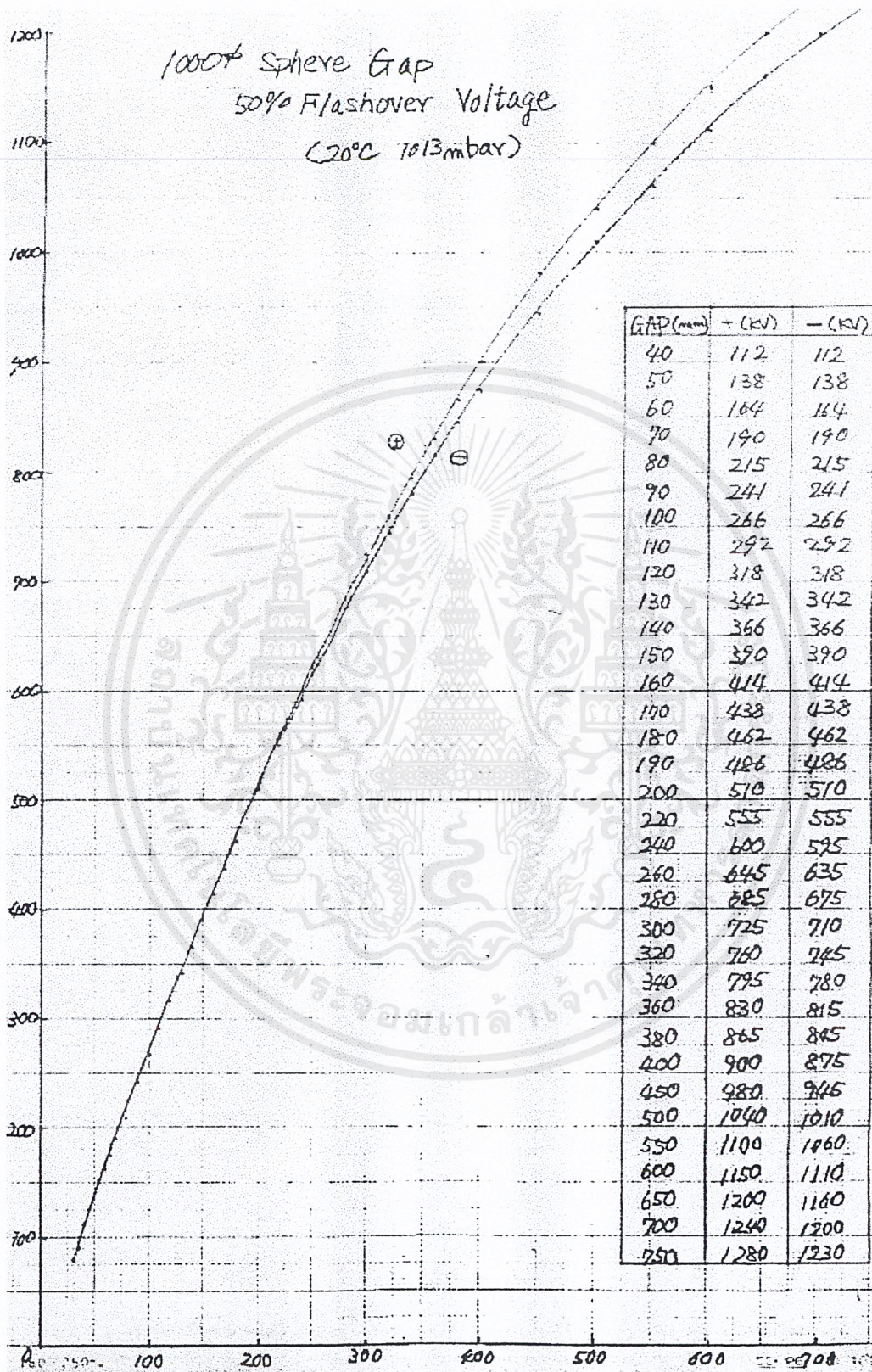
7. กดปุ่ม (ALARM) เสมอเพื่อเตือนให้ผู้ที่อยู่ในบริเวณห้องทดลองออกจากบริเวณนั้นเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้

8. ปิดสวิทช์ (mA) เพื่อปรับมิเตอร์ไปที่ ($\times 0.1$) และการใช้งานไม่ควรให้กระแส charging เกินกว่า 50 mA

9. กดปุ่ม (ON) หลอดไฟ (HV) ติด ซึ่งจะจ่าย โวลต์ เตจ ให้กับคาปาซิเตอร์ มิเตอร์ (kV) แสดง โวลต์ เตจ charging ซึ่งเราต้องทำการปรับให้ได้ค่าตามที่คำนวณได้จากข้อ 1 แล้วหมุน Variac ปรับแรงดันให้ได้ตามที่ คำนวณไว้จากสมการข้างต้น จากตัวอย่างข้างต้นก็คือ 7 kV หลังจากนั้น กดปุ่ม (OFF)

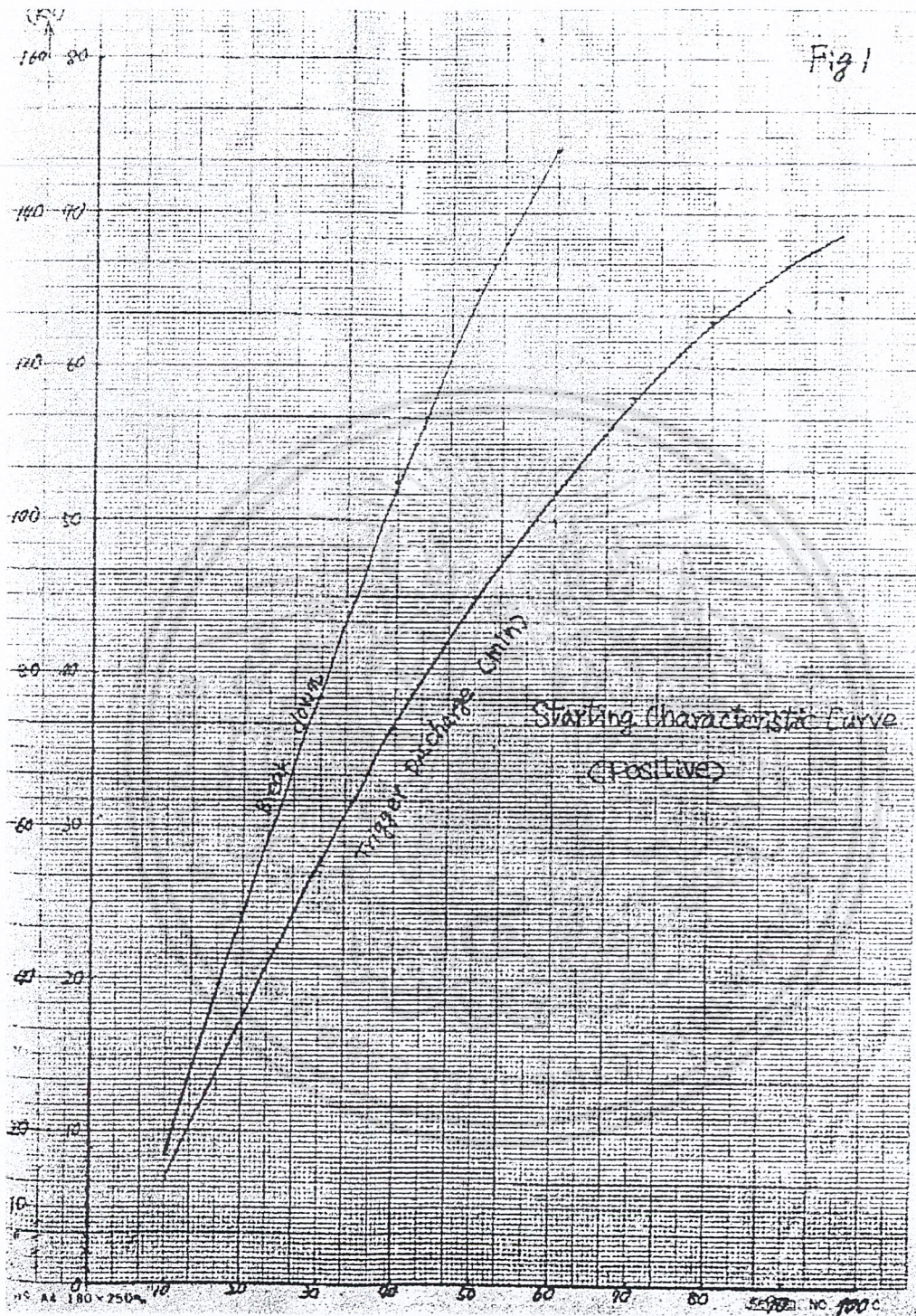
10. กดปุ่ม (CLOSE) เพื่อปรับระยะของสปาร์ก gap ให้เหมาะสมโดยพิจารณาได้จากเส้นกราฟ Starting Characteristic ดังรูปที่ 4.14 – 4.15 (ก่อนจะทำการเบรคควาน์ให้ OPEN แถบให้มีระยะมากกว่าระยะตาม Starting Characteristic เล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระยะแวกกับแรงดันเบรคควาน์ (ในที่นี้คือ Sphere gap ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 cm)

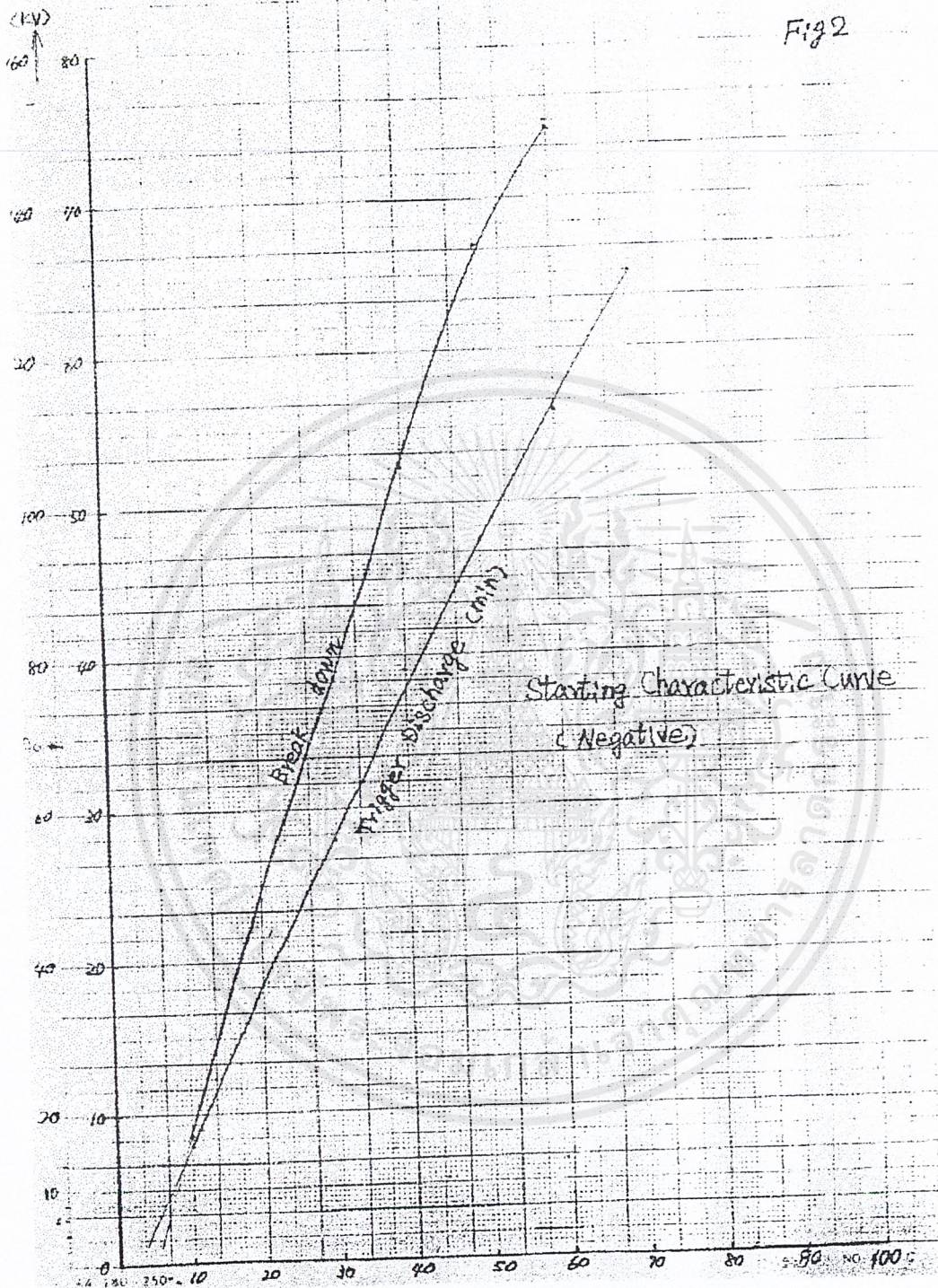
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดง Starting Characteristic สำหรับแรงดันอัดประจุบวก

จากกราฟ แนวตั้งจะเป็นแรงดันอัดประจุ แนวนอนเป็นระยะแกป จากค่าแรงดันอัดประจุที่ต้องการทดสอบ ให้ลากเส้นลงมาเพื่อหาระยะแกปที่เหมาะสมกับแรงดันอัดประจุ (ใช้กราฟ Break down) เช่น แรงดันอัดประจุ 10 kV (ใช้ตัวเลขด้านใน) จะได้ระยะแกปประมาณ 12 mm.

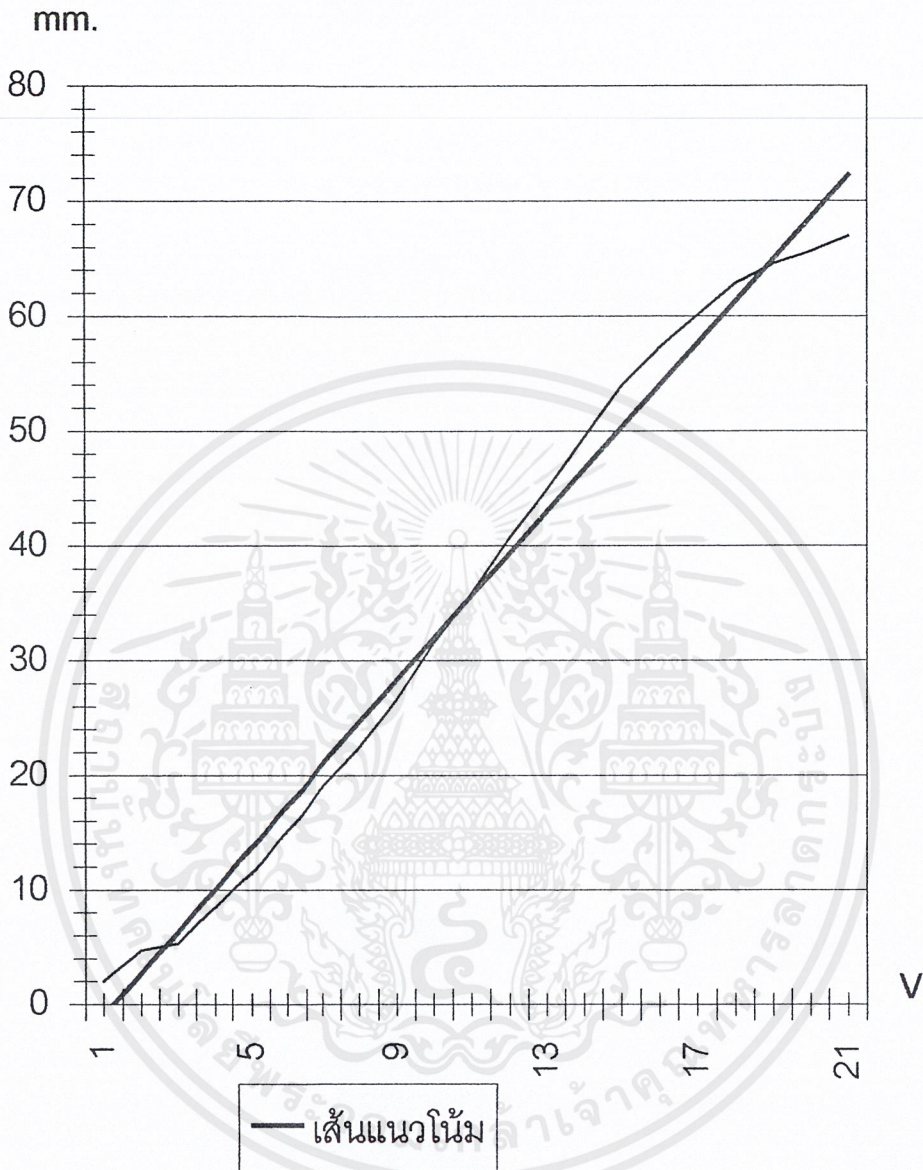
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดง Starting Characteristic สำหรับแรงดันอัดประจุลบ

จากกราฟ แนวตั้งจะเป็นแรงดันอัดประจุ แนวนอนเป็นระยะแกป จากค่าแรงดันอัดประจุที่ต้องการทดสอบ ให้ลากเส้นลงมาเพื่อหาระยะแกปที่เหมาะสมกับแรงดันอัดประจุ (ใช้กราฟ Break down) เช่น ค่าแรงดันอัดประจุ -20 kV (ใช้ตัวเลขด้านใน) จะได้แกปประมาณ 16.6 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของมิเตอร์และระยะแกป

11. ในการวัดระยะแกป เนื่องจากเครื่องกำเนิดอิมพัลส์เครื่องนี้ได้เปลี่ยนจากมิเตอร์วัดสเกล mm. มาเป็น dc - voltage ดังนั้นค่าแกปที่วัดเทียบได้จากรูปที่ 4.16

จากรูปที่ 4.16 สมมติว่า ได้ค่าระยะแกปที่ต้องการทดลอง จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 เท่ากับ 20 mm. จะได้ค่าโวลท์จากรูปที่ 4.16 ประมาณ 5.5 โวลท์ ดังนั้น จะต้องปรับระยะแกป ที่ปุ่ม open หรือ close จนกระทั่งค่าแรงดันที่มิเตอร์มีค่าเท่ากับ 5.5 โวลท์ Spark Gap ก็จะเกิดการเบรคควาน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวางผังโดยทั่วไปสำหรับห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

5.1 ระยะห่างเพื่อความปลอดภัย (Safety Clearances)

โดยปกติแล้วขนาดของห้องปฏิบัติการทดสอบ มักจะขึ้นอยู่กับ

- ขนาดของแรงดันทดสอบสูงสุดที่ห้องปฏิบัติการทดสอบถูกออกแบบไว้
- จำนวนชั้นของอุปกรณ์ทดสอบ เช่น จำนวนชั้นของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ หรือ หม้อ

แปลงทดสอบที่นำมาต่อแบบคาสเคดกัน

- ระยะ air gap และระยะปลอดภัยทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวบังคับ และจะต้องรักษาระยะนี้ไว้ให้ได้

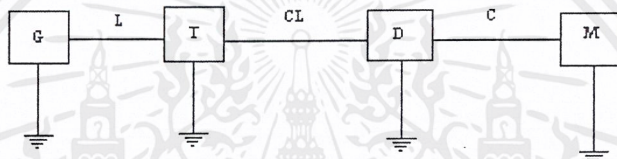
- ชนิดของการทดสอบ และขนาดของวัสดุอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบ

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะระยะห่างสำหรับการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เท่านั้น ระดับแรงดันทดสอบสูงสุดสำหรับแรงดัน lightning impulse ขณะนี้อยู่ที่ประมาณ 6-7 MV ระยะห่างเพื่อความปลอดภัยที่ต้องการก็เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับแรงดันทดสอบเช่นกัน โดยทุก ๆ ระดับ 1000 kV จะต้องการระยะห่างเพิ่มขึ้น 2 เมตร สมการ lightning impulse flashover เมื่อใช้ rod-plane gap คือ $V_{50} = 500 \cdot d$ เมื่อ V_{50} มีหน่วยเป็น kV และ d มีหน่วยเป็น เมตร ทั้งนี้โดยทั่วไปจะถือว่าการทดสอบแบบ 80% ของ V_{50} ที่ระยะห่างระหว่าง rod-plane gap เป็น 2 เมตร วัสดุที่ถูกทดสอบจะสามารถทนแรงดันได้ 800 kV_{peak} แต่ถ้าใช้ gap ชนิดอื่นที่ระยะห่าง 2 เมตรเช่นกัน ก็จะสามารถทนต่อแรงดันทดสอบที่สูงกว่าได้

ระยะห่างสำหรับการทดสอบด้วยแรงดัน switching impulse ระยะห่าง d สำหรับการทดสอบนี้ หาได้จาก $d = (MV)^2$ นั่นคือ ระยะห่าง 4 เมตรที่ 1000 kV_{peak} และ 16 เมตรที่ 2000 kV_{peak} ในกรณีที่ใช้ Paris ' formula เพื่อหาระยะห่าง d ของ rod-plane gap ตามสมการ $V_{50} = 500 \cdot d^{0.6}$ จะได้ $d = 3.2$ เมตรสำหรับ 1000 kV_{peak} และ 10.1 เมตรสำหรับ 2000 kV_{peak} ในกรณีทดสอบแบบ 80 % ของ V_{50} CFO (Critical Flash Over) ระยะห่าง d ที่ต้องการคือ 4.6 เมตรสำหรับ 1000 kV_{peak} และ 14.6 เมตรสำหรับ 2000 kV_{peak} เมื่อได้ทราบระยะห่างเพื่อความปลอดภัยแล้วก็สามารถจัดวางอุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ ซึ่งต้องอาศัยระยะห่างเพื่อความปลอดภัยของอุปกรณ์ทดสอบชนิดอื่นประกอบด้วย โดยจะไม่ขอกล่าวรายละเอียดในที่นี้

5.2 การวางผังจัดตำแหน่งของอุปกรณ์ทดสอบและเครื่องมือในการวัดแรงดันอิมพัลส์ โดยการใช้โวลต์เตจดีไวเซอร์

ในการวัดขนาดแอมพลิจูด ของแรงดันอิมพัลส์นั้น หากระดับแรงดันไม่สูงมากนัก และอยู่ในช่วง 2-3 kV ก็จะสามารถจะวัดและบันทึกที่รูปคลื่นสัญญาณอิมพัลส์ได้ โดยการ ใช้อิมพัลส์ออสซิลโลสโคป ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่ถูกออกแบบมาสำหรับจุดประสงค์นี้โดยเฉพาะ แต่ถ้าเป็นการวัดขนาดแรงดันอิมพัลส์สูงมาก ๆ ในระดับหลายร้อย kV หรือ MV การวัดค่าโดยตรงย่อมเป็นไปได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะนิยมทำการวัดโดยใช้โวลต์เตจดีไวเซอร์ หรือช่องว่างทรงกลม

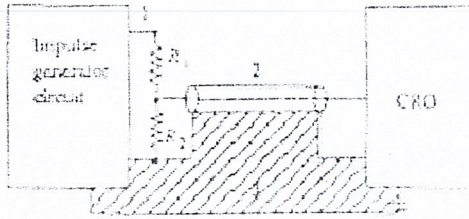


รูปที่ 5.1 การจัดวางจรทดสอบและการวัด

รูปที่ 5.1 แสดงถึงการ วางผังจัดตำแหน่งของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ (G), อุปกรณ์ที่ถูกทดสอบ (T), สายตัวนำ L (lead), ซึ่งจะมีค่าความต้านทานอยู่ค่าหนึ่งสำหรับ damp oscillation หรือทำหน้าที่จำกัดกระแสลัดวงจรในกรณีที่วัสดุ หรืออุปกรณ์ที่ทดสอบเกิดเสียหาย (failed) และสายตัวนำ CL(connecting lead) ซึ่งจะใช้ในการต่อเชื่อมระหว่างอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบเข้ากับโวลต์เตจดีไวเซอร์ D จะถูกนำไปต่อเข้ากับวงจรเครื่องมือวัดต่าง ๆ เช่น ออสซิลโลสโคป (M) ภายในห้องควบคุมการทดสอบ

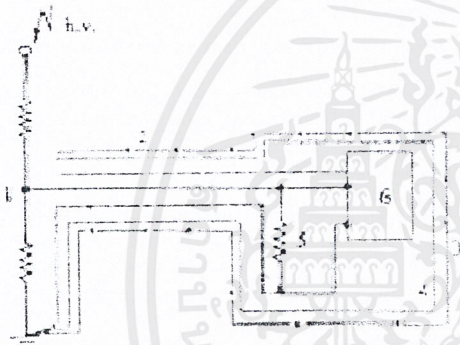
เพื่อให้การวัดเป็นไปอย่างถูกต้องแม่นยำมากขึ้น การจัดวางตำแหน่งของเครื่องมือวัดต่าง ๆ และสายนำสัญญาณควรจะเป็นไปตามรูปที่ 5.1 พยายามวางตำแหน่งการวัดของโวลต์เตจดีไวเซอร์ ให้อยู่นอกวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดัน และวัสดุที่ถูกทดสอบเสมอ ทั้งนี้ก็เพราะว่าหากต่อดีไวเซอร์ไว้ร่วมกับวงจร เมื่อวัสดุทดสอบเกิดการคิซซาร์จก็จะส่งย้อนกลับคืนไปยังเครื่องกำเนิดและดีไวเซอร์ ทำให้โวลต์เตจดีไวเซอร์ถูกโหลด (loaded) โดยแรงดันตกคร่อมระหว่างสายตัวนำ L ทำให้การวัดขนาดของแรงดันอิมพัลส์คลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง

รูปที่ 5.2 มีประโยชน์มากในการจัดวางจรการวัดแรงดันอิมพัลส์ โดยเฉพาะการเลือกใช้สายของวงจรควบคุม (control cable) และสายสัญญาณ (signal cable) ที่ต่อเข้าออกซิลโลสโคปซึ่งนิยมใช้สายแกนร่วม (coaxial) โดยที่จะต้องมีการชิลด์อย่างดี



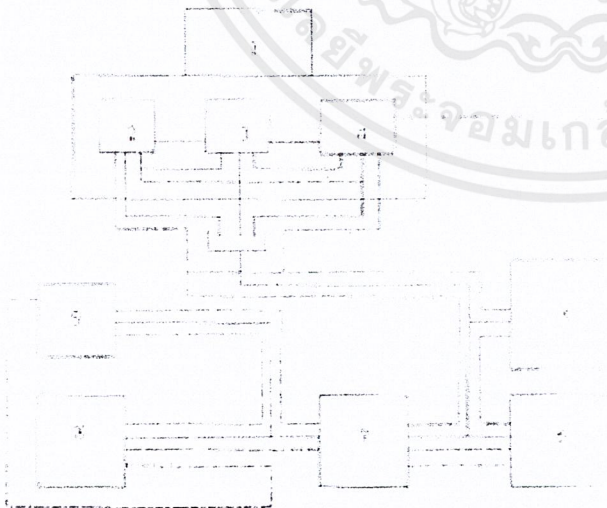
- 1. Potential divider
- 2. Control signal cable
- 3. Ground loop

(a) Ground loop in impulse measuring systems



- 1. Potential divider
- 2. Triple shielded cable
- 3. Outer shield enclosure
- 4. Inner shielded enclosure
- 5. Terminating impedance
- 6. CRO

(b) Impulse measurements using multiple shield enclosures and signal cable



- 1. Control room
- 2. Peak reading meter
- 3. Oscilloscope
- 4. Central centre
- 5. Rectifier for impulse generator
- 6. Impulse generator
- 7. Voltage divider
- 8. Test object
- 9. Sphere gap

(c) Layout of an impulse testing laboratory with control and signal cables

รูปที่ 5.2 วงจรของสายควบคุมและสายนำสัญญาณของการวัดแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การวางผังอุปกรณ์ลงในห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

5.3.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์

จากทฤษฎีในหัวข้อที่ผ่านมาจะสามารถทำการหาระยะห่างเพื่อความปลอดภัย (Safety Clearances) ของเครื่องกำเนิด 1500 kV ได้ดังนี้

สำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 kV ในห้องทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูงจะประกอบด้วย

- generator 1500 kV 11 stage 28.1 kJ
- charger +- 75 kV
- shunt capacitor for waveform
- standard sphere gap diameter 100 cm.

5.3.1.1 ระยะห่างสำหรับการทดสอบ lightning Impulse

จากการคำนวณโดยใช้สมการ impulse flashover เมื่อใช้ rod-plane gap คือ

$$V_{50} = 500.d \quad (5.1)$$

$$1500/0.8 = 500.d$$

$$d = 3.75 \text{ m.}$$

เราจึงใช้ระยะห่างน้อยสุดสำหรับทดสอบ lightning impulse เป็น 3.75 เมตร

5.3.1.2 ระยะห่างสำหรับการทดสอบ switching Impulse

จากการคำนวณโดยใช้ positive 50% switching impulse voltage สำหรับระยะห่าง 2-8 m. คำนวณ Paris ' formula

$$V_{50} = k.500.d^{0.6} \quad (5.2)$$

เมื่อ $k=1$ สำหรับ rod-plane gap จะได้

$$V_{50} = 500 \cdot d^{0.6}$$

ทดสอบแบบ 80% ของ V_{50} CFO(Critical Flashover)

$$1200/0.8 = 500 \cdot d^{0.6}$$

$$d^{0.6} = 1200/(500 \times 0.8)$$

$$d^{0.6} = 3$$

$$d = 6.25 \text{ m.}$$

โดยการคำนวณทั้งสองอย่างนี้จะใช้สำหรับ Impulse Generator และ Shunt Capacitor ซึ่งเมื่อดูระยะ clearances ของการทดสอบ switching impulse แล้วเป็นระยะที่มากเกินไปสำหรับห้องทดสอบที่มีขนาดเล็ก และอีกทั้งการทดสอบแบบ switching impulse ไม่ได้ทำการทดสอบที่แรงดันสูงๆบ่อยครั้งมากนัก ดังนั้นเมื่อจะทำการทดสอบ switching impulse ก็อาจจะเคลื่อนย้ายอุปกรณ์รอบข้างหรือตัวของมันเอง โดยอุปกรณ์ทุกตัวอาจจะมีารติดล้อเลื่อนให้สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายและสะดวกขึ้น จึงใช้ระยะของ lightning impulse ซึ่งเท่ากับ 3.75 เมตร มาคำนวณ ซึ่งจะได้ระดับแรงดัน switching impulse ที่สามารถทำได้ประมาณไม่เกิน 880 kV

$$V_b/0.8 = 500 \times (3.75)^{0.6}$$

จะได้แรงดันที่เบรคดาวน์ ได้สูงสุดเท่ากับ 884.05 kV ส่วน charger นั้นระดับแรงดันน้อยมากจึงไม่คิด

สำหรับ Sphere Gap diameter 100 cm. จะทำการติดตั้งตามมาตรฐาน IEC Publ. NO.52 แนะนำไว้ดังรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.1

แสดงค่า Clearance around the sphere gap

Sphere diameter D (mm.)	Minimum value of A	Maximum value of A	Minimum value of B
62.5	7D	9D	14S
125	6D	8D	12S
250	5D	7D	10S
500	4D	6D	8S
750	4D	6D	8S
1000	3.5D	5D	7S
1500	3D	4D	6S
2000	3D	4D	6S

ตารางที่ 5.2

ขนาดวัดแรงดันได้สูงสุดด้วยช่องว่างทรงกลม

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D ตามมาตรฐาน (cm.)	ระยะช่องว่าง d ห้ามไม่เกิน (cm.)	วัดแรงดันได้สูงสุด (kV)
2	1	30.7
5	1.4	65.5
6.25	3	79.5
10	5	123.0
12.5	6	146.0
15	7.5	177
25	12	275
50	25	515
75	36	750
100	50	1010
150	75	1440
200	100	1840

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากตาราง Clearance around the sphere gap จะได้

$$\text{minimum value of } A = 3.5D$$

$$\text{maximum value of } A = 5D$$

$$\text{minimum value of } B = 7S$$

เมื่อ $D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ sphere gap $= 1 \text{ m.}$

$$S = \text{ระยะแกปมากที่สุด} = 0.5 \text{ m.}$$

ดังนั้น จะได้ระยะ

$$\text{min. } A = 3.5 \text{ m.}$$

$$\text{max. } A = 5 \text{ m.}$$

$$\text{min. } B = 7 \times 0.5 = 3.5 \text{ m.}$$

5.3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์

5.3.2.1 ระยะห่างสำหรับการทดสอบ Lightning Impulse

จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่ 5.1 เมื่อใช้ rod-plane gap จะได้

$$V_{50} = 500.d$$

$$200/0.8 = 500.d$$

$$d = 0.5 \text{ m.}$$

เราจึงใช้ระยะห่างน้อยสุดสำหรับการทดสอบ Lightning Impulse เป็น 0.5 เมตร

5.3.2.2 ระยะห่างสำหรับการทดสอบ Switching Impulse

ใช้ positive 50% switching impulse voltage สำหรับระยะห่าง 2 - 8 m. จากสมการที่ 5.2 จะได้

$$V_{50} = k.500.d^{0.6}$$

เมื่อ $k=1$ สำหรับ rod-plane gap จะได้

$$V_{50} = 500.d^{0.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบแบบ 80% ของ V_{50} CFO (Critical Flashover)

$$200/0.8 = 500.d^{0.6}$$

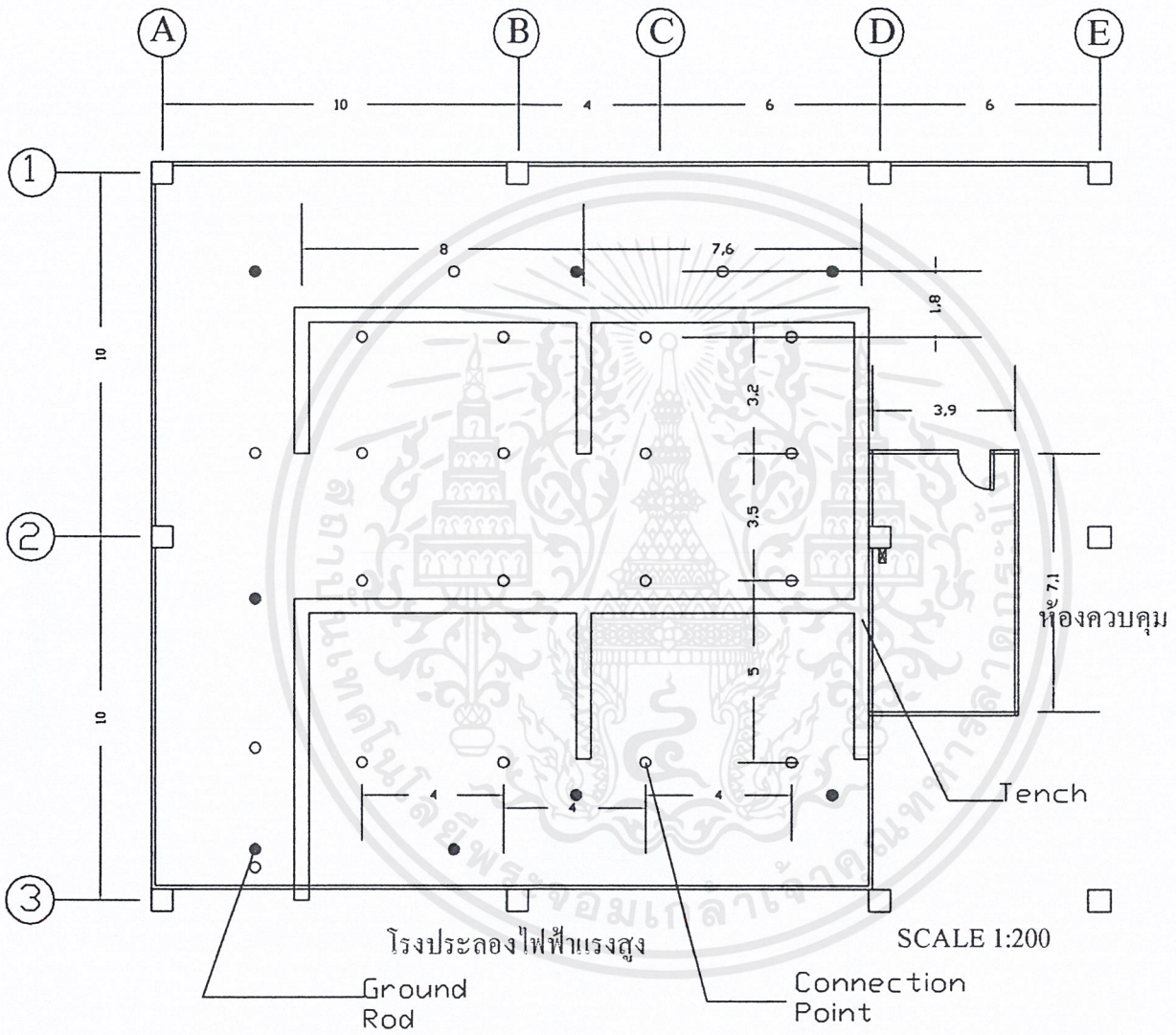
$$d^{0.6} = 200/(500 \times 0.8)$$

$$d^{0.6} = 0.5$$

$$d = 0.315 \text{ m.}$$

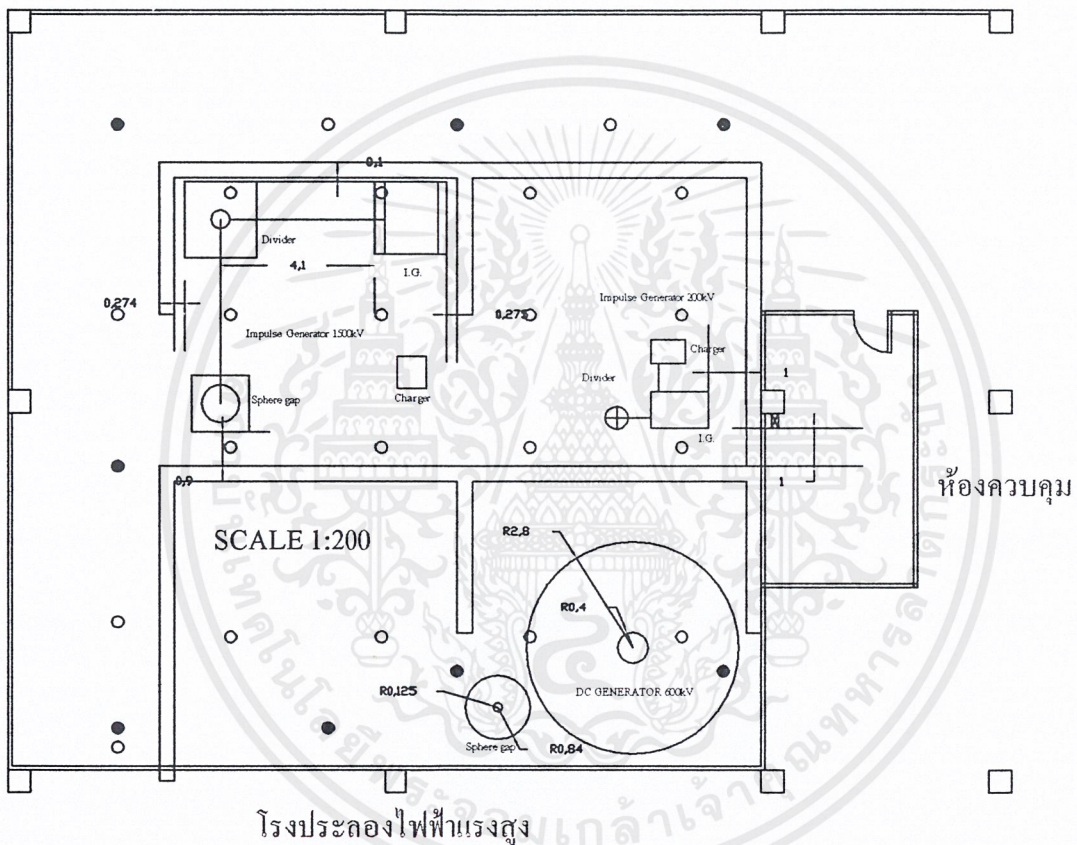
เราจึงใช้ระยะห่างน้อยสุดสำหรับทดสอบ Switching impulse เป็น 0.315 เมตร





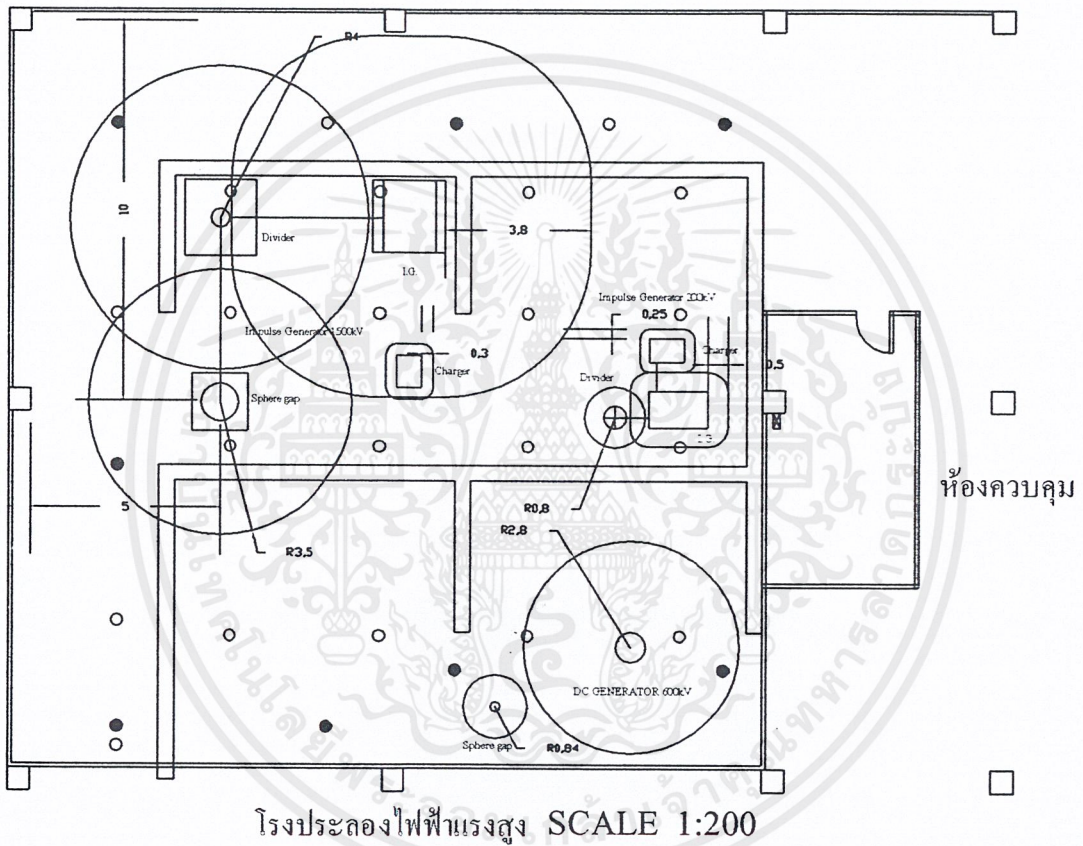
รูปที่ 5.4 แสดง Floor plan โรงประดองไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



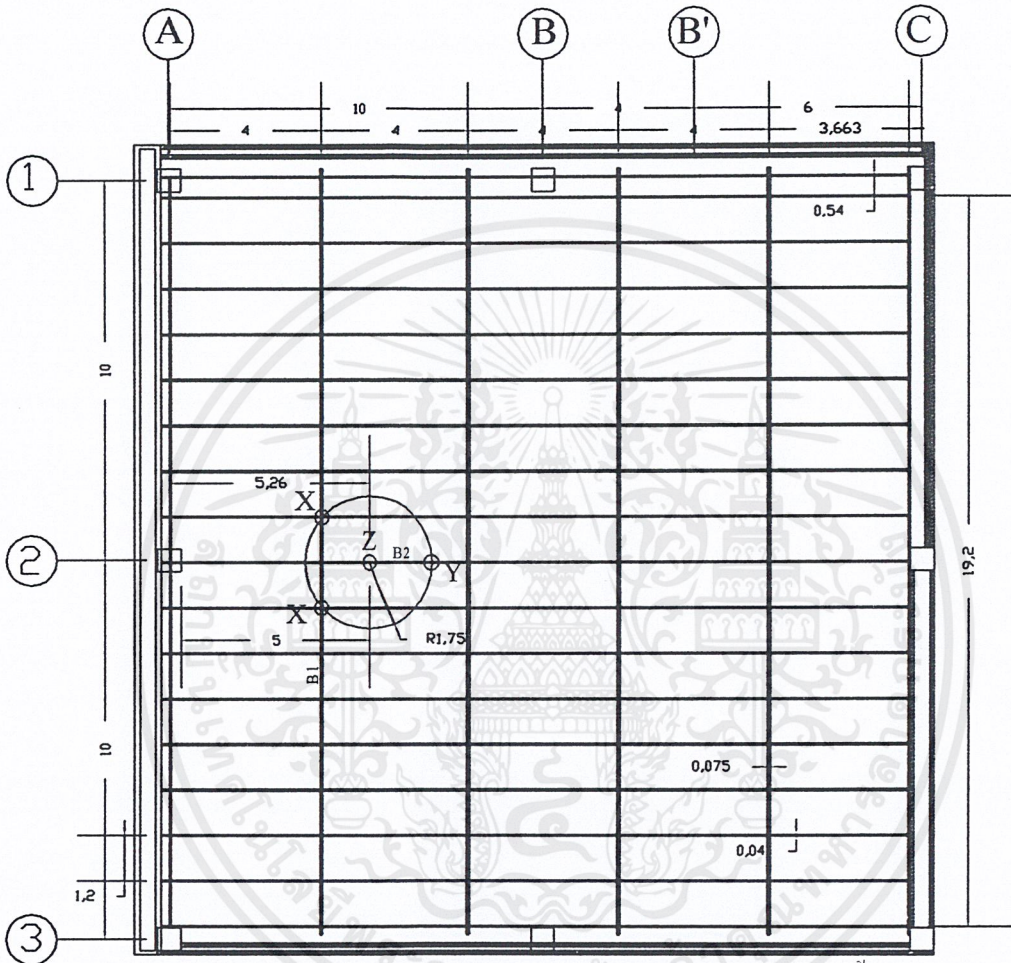
รูปที่ 5.5 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ลงในโรงประตองไฟฟ้าแรงตุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงถึงระยะห่างความปลอดภัยของอุปกรณ์แต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แปลน โครงเหล็กรับตาข่ายเหล็กนิกโครงประลองฯและการติดตั้ง
Sphere gap ϕ 100cm.

B1 = □ - 150x75x4.5 mm. SCALE 1:200

B2 = □ - 75x40x3.2 mm.

รูปที่ 5.7 แสดงการติดตั้ง Sphere gap ผ่านศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดสอบความต้านทานการต่อลงดินของห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

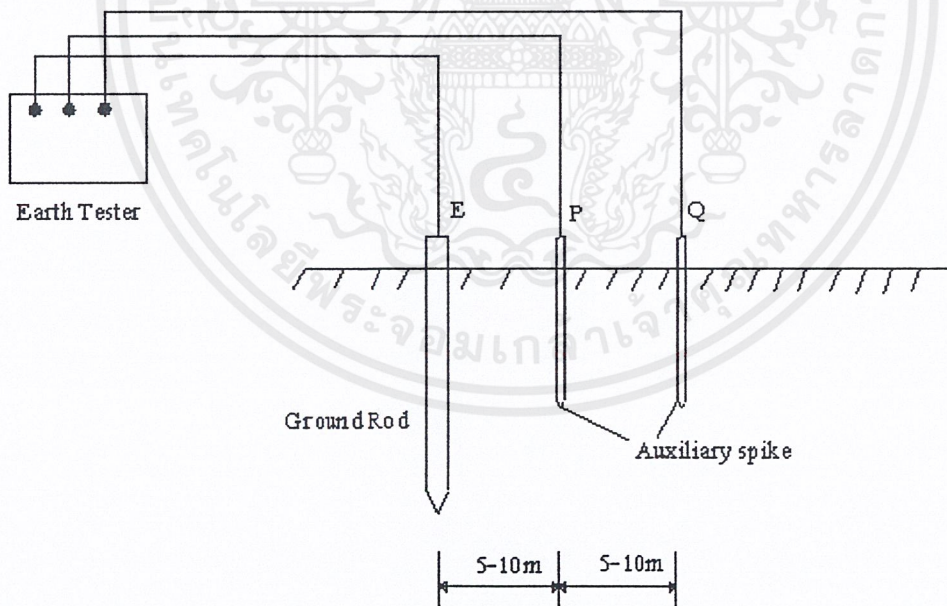
วัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าความต้านทานการต่อลงดินของห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

อุปกรณ์การทดลอง

1. Earth Tester ของ Yokogawa Electric Works 1 เครื่อง

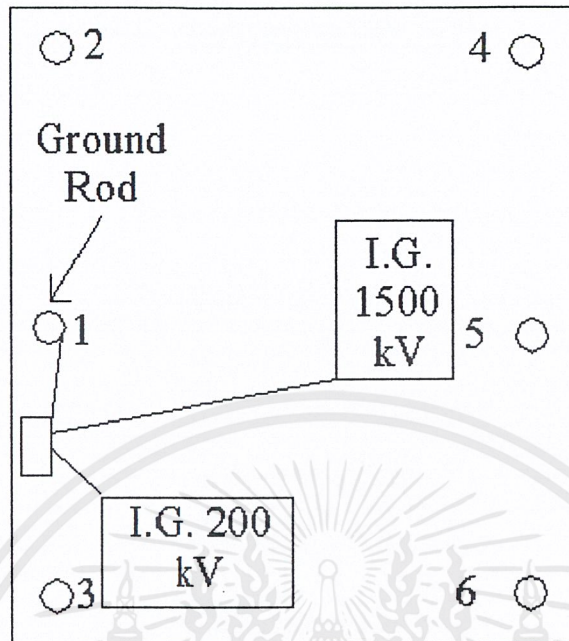
ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อดวงจรดังรูปที่ 5.8
2. ทำการวัดและบันทึกผลการทดลองที่ได้
3. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 5.8 แสดงการต่อดวงจรที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โรงประลองไฟฟ้าแรงสูง(เดิม)

รูปที่ 5.9 แสดงจุดต่อลงดินที่ทำการทดสอบความต้านทาน

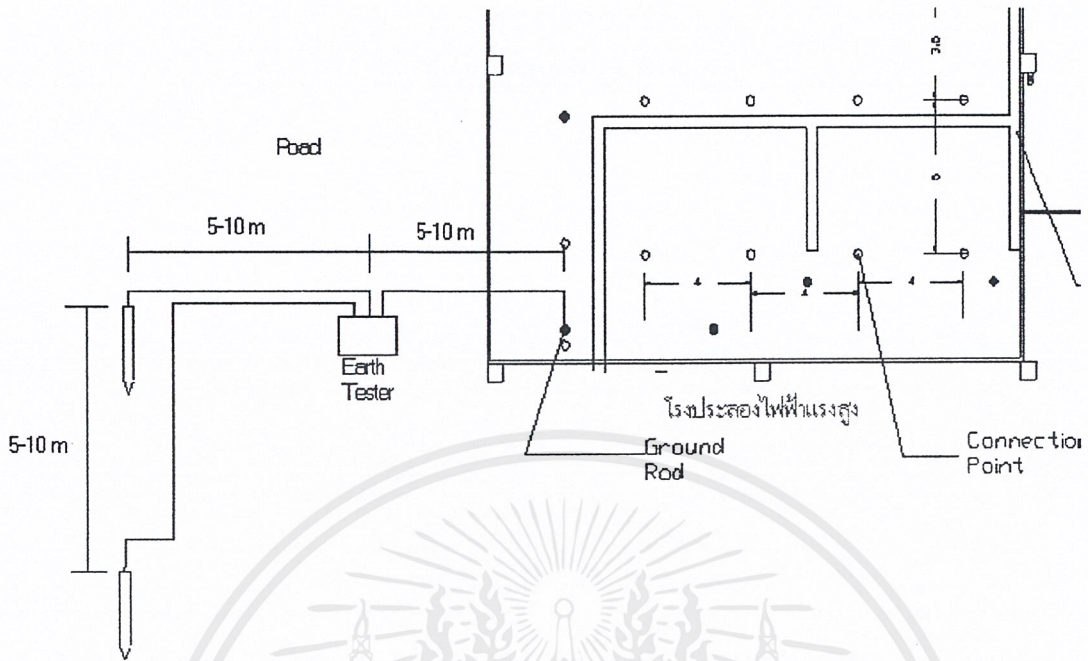
ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.3

แสดงค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ

จุดที่ทำการวัดความต้านทานการต่อลงดิน	ความต้านทานการต่อลงดิน(โอห์ม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	-
2	13.5	13.5	14	13.7
3	15	14	13.5	14
4	14	13	12.5	13
5	13	13.5	14.5	13.7
6	15	16	15.5	15.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 การทดสอบการต่อลงดิน โรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่

ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.4

แสดงความต้านทานการต่อลงดินที่จุด Ground Rod

ความต้านทานการต่อ ลงดิน(โอห์ม)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	120	130	125

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้ทั้งสองครั้งจะพบว่า ที่โรงประลองไฟฟ้าแรงสูงเดิมมีค่าความต้านทานดินที่มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐาน(ค่ามาตรฐานเท่ากับ 5 โอห์ม) ดังนั้น อาจจะมีผลกระทบต่อการใช้งานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ส่วนโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่ค่าความต้านทานที่วัดได้นั้นมีค่าสูงกว่ามาตรฐานอยู่มาก ซึ่งอาจเกิดจากการตำแหน่งที่ใช้ทดลองไม่เป็นไปตามวิธีการใช้งานเครื่องตามรูปที่ 8.1

หมายเหตุ สาเหตุที่ไม่สามารถจัดตำแหน่งของ Auxiliary spike ให้เป็นตามวิธีการใช้งานของเครื่องได้เนื่องจาก บริเวณข้างเคียงของโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่เป็นพื้นปูนและถนน ไม่มีพื้นที่ที่เป็นดินในการปัก Auxiliary spike ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การดำเนินการแก้ไข ซ่อมแซม บำรุงรักษา และทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดัน อิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ และ 1500 กิโลโวลต์

6.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์

6.1.1 ปัญหาของลูกถ้วยทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร

ปัญหา

- เมื่อ ON เบรกเกอร์เพื่อป้อนไฟฟ้าเข้าวงจรควบคุมมอเตอร์ปรับระยะแกป เบรกเกอร์จะ

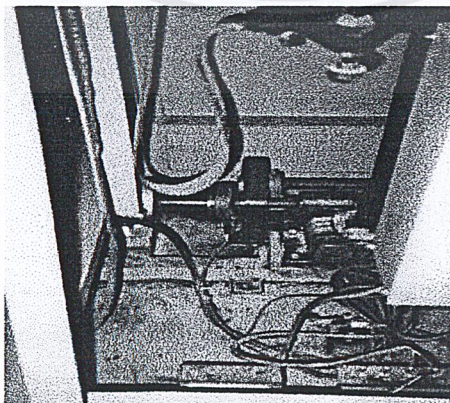
Trip กลับทันที

วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

- อาจเกิดจากการ short circuit ขึ้นในส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจร
- อาจเกิดจากมีการ short ลงกราวด์ของสาย Line

การดำเนินการแก้ไข

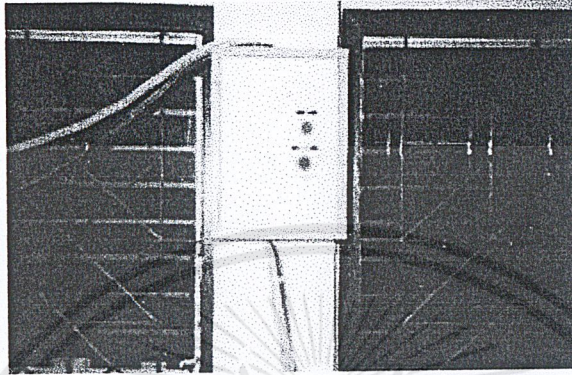
- ถอดสายกราวด์ออกแล้วลอง ON เบรกเกอร์ ปรากฏว่าเบรกเกอร์ไม่ Trip วงจรควบคุมมอเตอร์ปรับระยะแกปสามารถทำงานได้



รูปที่ 6.1 ภายในของ Case ของเครื่องปรับ Sphere Gap diameter 100cm. ประกอบด้วย หม้อแปลง
มอเตอร์ และอุปกรณ์ควบคุม

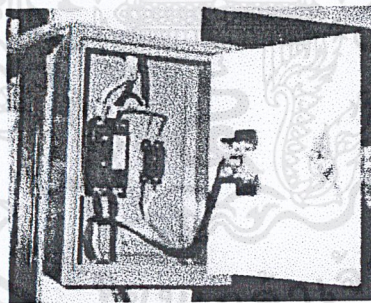
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตอนนี้รู้ปัญหาแล้วว่ามีการ short ลงกราวด์แน่นอน (ตัดปัญหา short circuit ระหว่างสาย Line กับ สาย Neutral)



รูปที่ 6.2 ปุ่มปรับระยะแยกของ sphere gap เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 cm.

- ใช้ Check Lamp เช็คไฟที่ขั้วหม้อแปลง ปรากฏว่ามีไฟผ่านสาย Neutral แสดงว่าสาย Line กับ Neutral สลับกันจึงทำให้ไฟผ่านสาย Neutral ลงกราวด์



รูปที่ 6.3 ขั้วเบรกเกอร์วงจรควบคุมมอเตอร์ปรับระยะแยกของ sphere gap เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 cm. (เบรกเกอร์ด้านซ้าย)

- สลับสาย Line กับ Neutral ที่ขั้วเบรกเกอร์และต่อกราวด์ปกติ เมื่อ ON เบรกเกอร์ในรูปที่ 7.3 จะไม่ Trip วงจรควบคุมมอเตอร์สามารถทำงานได้ตามปกติ

6.1.2 ปัญหาของมิเตอร์ปรับ spark gap เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร

ปัญหา

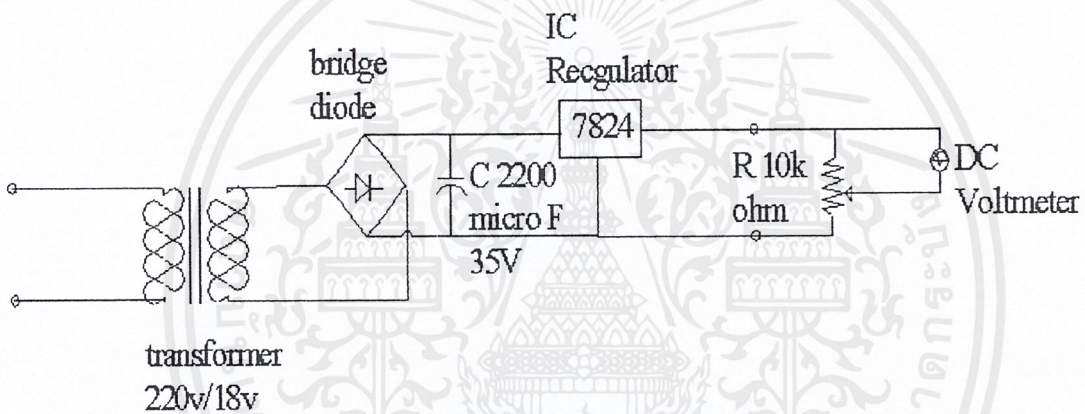
Variac ที่เป็นส่วนหนึ่งของวงจรระยะแยก winding ขาด และมีการแตกหักของแกนที่ใช้

พินิจถลวด

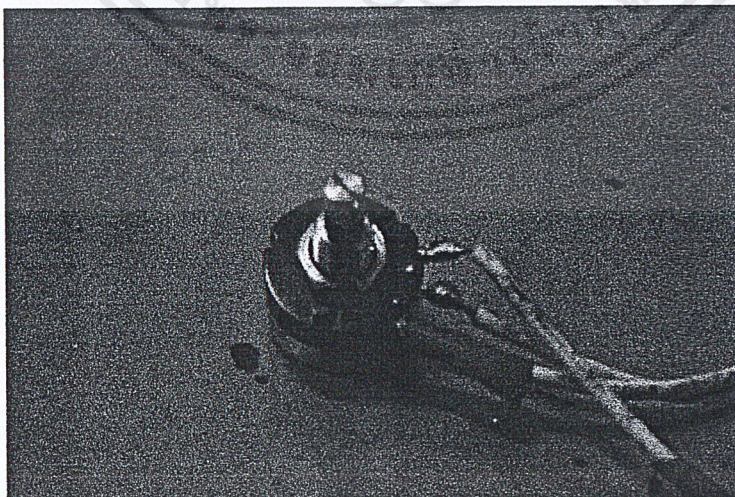
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ปัญหา

เนื่องจาก Variac ที่ใช้อยู่มีขนาดพิกัด 100 V, 50VA แต่ Variac ที่มีขายตามท้องตลาดส่วนใหญ่จะมีขนาดพิกัด 220V ดังนั้นจึงไม่สามารถหาซื้ออะไหล่มาทดแทนอุปกรณ์เดิมได้ ซึ่งอาจจะต้องสั่งทำโดยเฉพาะเท่านั้น จากการศึกษาที่ได้อัดต่อไปยังแหล่งที่รับพันหม้อแปลงแล้วราคาในการสั่งทำจะอยู่ที่ 1200-1500 บาท ซึ่งมีราคาสูง และไม่มีความเหมาะสมในการจัดซื้อทำให้ไม่มีอุปกรณ์มาใช้งาน จึงนำ Linear Wire Wound Resistance $10\text{ k}\Omega$ ต่อเข้าแทน แล้วต่อ dc supply เพื่อจ่ายไฟให้กับ Wire Wound Resistance ซึ่งสามารถแสดงการต่อวงจรได้ดังรูปที่ 6.4

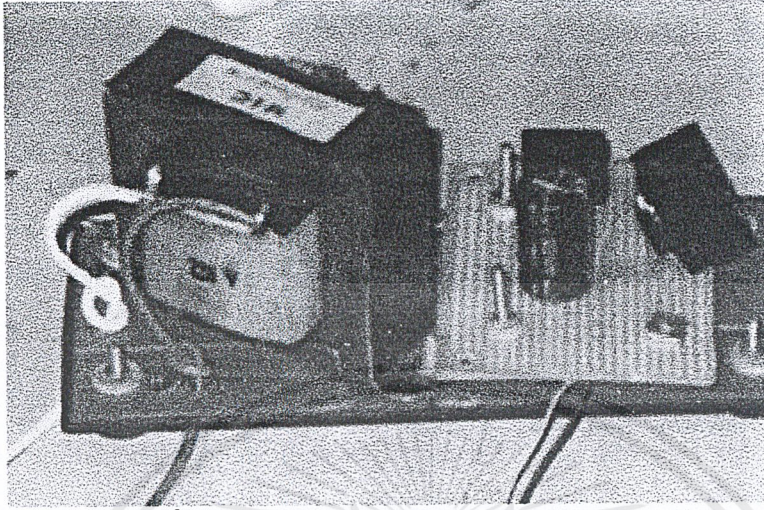


รูปที่ 6.4 วงจรมิเตอร์ปรับสปาร์คแกป



รูปที่ 6.5 ความต้านทาน Wire wound type B $10\text{ k}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 วงจรของ DC Power Supply 24 Vdc

ในการทดลองปรับแรงดันตั้งแต่ 1-20 โวลต์ แล้วใช้ไมโครมิเตอร์และเวอร์เนียวีกระยะห่างของสปาร์กแก๊ป มีค่าระยะห่างของสปาร์กแก๊ปดังตารางที่ 6.1 จากนั้นนำค่าแรงดันและระยะห่างของแก๊ปไปพล็อตกราฟ จะได้กราฟดังรูปที่ 6.7

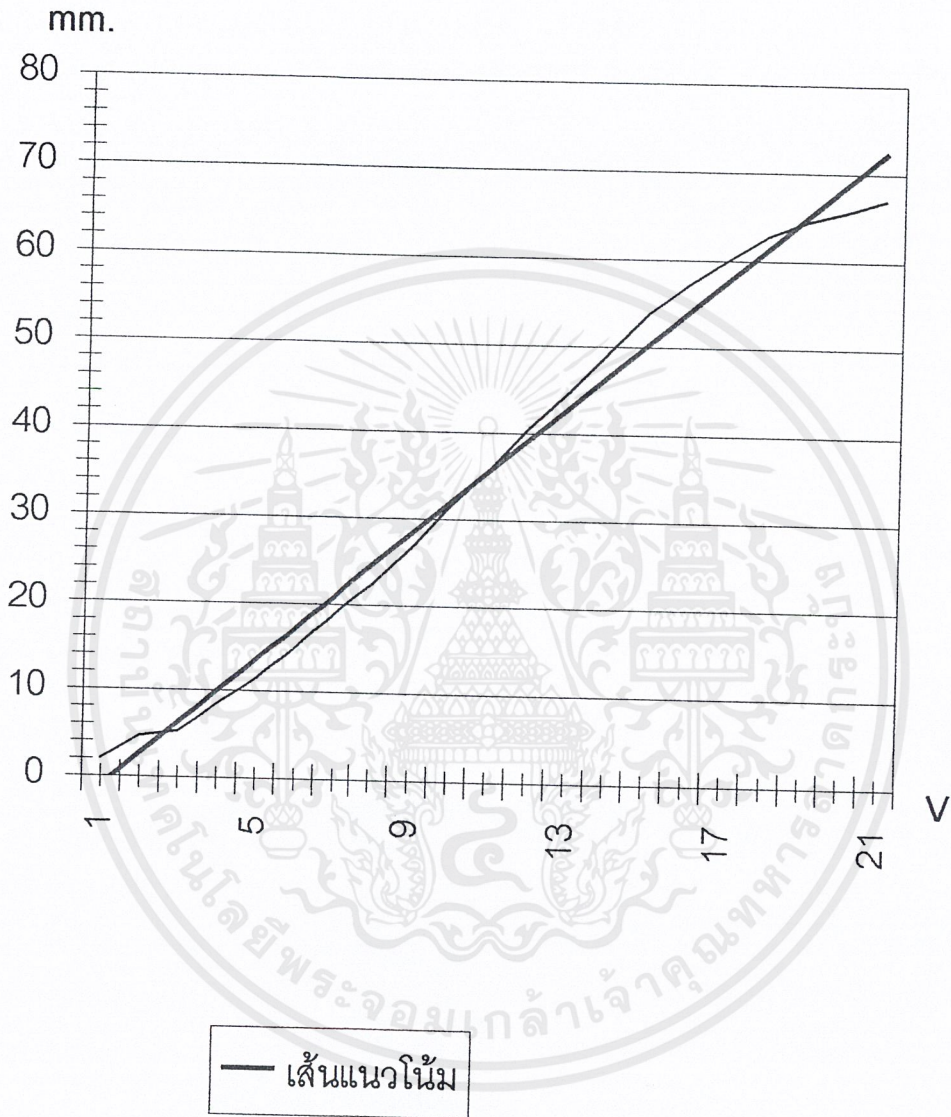
ตารางที่ 6.1

ตารางเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างแรงดันและระยะแกป

แรงดัน(V)	ระยะแกป (mm.)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	1.52	2.54	2.02	2.03
1	4.38	5.16	4.58	4.71
2	5.32	5.20	5.40	5.31
3	8.90	8.42	8.16	8.49
4	11.60	11.32	11.48	11.47
5	15.10	15.10	15.10	15.10
6	19.18	18.68	19.06	18.97
7	22.34	22.06	22.80	22.40
8	27.06	26.00	26.78	26.61
9	31.18	31.84	31.48	31.50
10	35.66	35.70	36.00	35.79
11	41.00	40.20	40.90	40.70
12	44.72	44.70	45.02	44.81
13	48.94	49.02	50.10	49.35
14	53.64	53.66	54.30	53.87
15	57.32	57.10	57.20	57.21
16	60.18	59.52	60.42	60.04
17	62.72	63.00	62.80	62.84
18	64.46	64.32	64.88	64.55
19	65.52	65.68	65.68	65.63
20	67.34	66.80	66.84	66.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและระยะแกป



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและระยะแกป

สรุปและวิเคราะห์

จากการดำเนินการแก้ไขเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์ สามารถแก้ไขได้บางส่วนที่มีงบประมาณเพียงพอ บางส่วนที่ไม่สามารถแก้ไขได้ เช่น การเปลี่ยนแกปเนื่องจากมีรอยบุบ สายสัญญาณที่ซัดชำรุด และ อุปกรณ์อื่นๆอีก เพราะมีงบประมาณไม่พอ ได้เสนอแนวทางในการแก้ไขไว้ เพื่อให้ทางภาควิชาดำเนินการแก้ไขต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์

6.2.1 ปัญหาของมอเตอร์ปรับ gap และ ground device

ปัญหา

1. เมื่อตั้งงานจากชุด control ทั้งแบบ auto และแบบ manual ในการปรับ sphere gap ปรากฏว่า sphere gap ไม่สามารถปรับระยะได้
2. เมื่อกดสวิทช์ตั้งงาน ground device ปรากฏว่า ไบมีคของ ground device ไม่สามารถดับ ขึ้นลงตามคำสั่งได้

วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

สาเหตุของปัญหาที่ 1

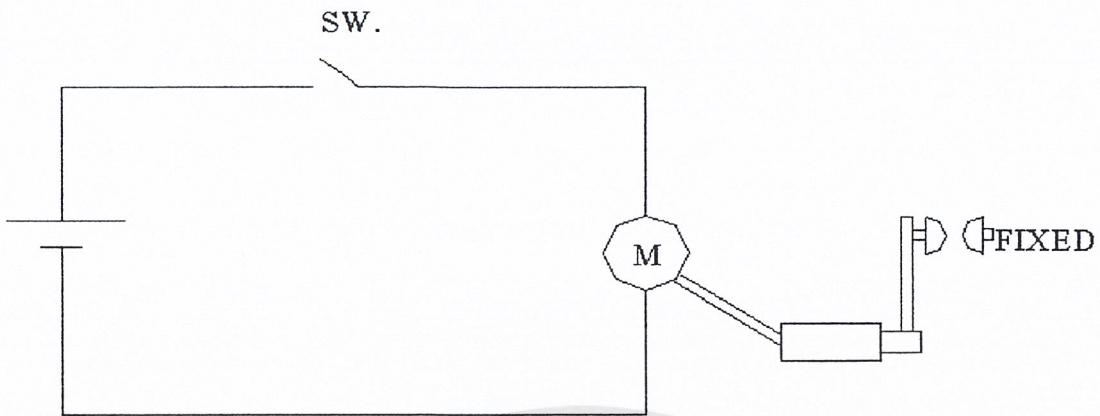
- มอเตอร์เสียหายหรือ short
- PLC เสีย
- Switch ตั้งงาน PLC ของมอเตอร์ปรับ sphere gap เสีย

สาเหตุของปัญหาที่ 2

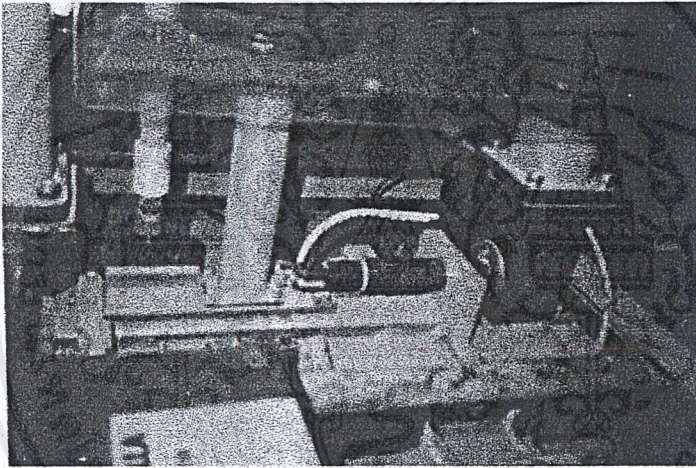
- coil ที่ตั้งไบมีคของ ground device เสีย
- magnetic contactor เสีย
- PLC เสีย
- Switch ตั้งงาน PLC ของ ground device เสีย

การดำเนินการแก้ไข

1. ทำการตรวจสอบว่า dc motor เสียหรือไม่ โดยการป้อนไฟ 24 Vdc ให้มอเตอร์ดังรูปที่ 6.9 ผลปรากฏว่า dc motor สามารถทำงานได้ตามปกติ หมุนได้ทั้งทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา จึงสามารถตัดปัญหานี้ไปได้

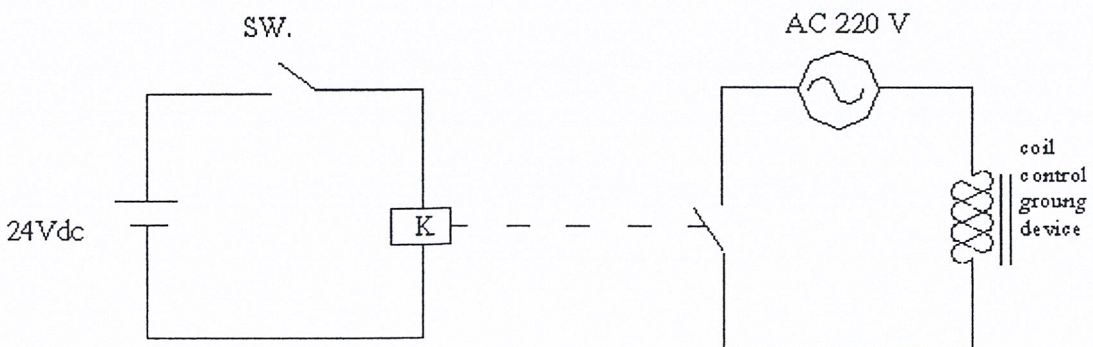


รูปที่ 6.8 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบ motor ปรับ sphere gap



รูปที่ 6.9 แสดงมอเตอร์ปรับระยะห่างของ sphere gap

2. ทำการตรวจเช็ควงจรเพื่อหา magnetic ที่ตั้งงาน coil ควบคุม ground device และทดสอบ โดยการป้อนไฟ 24 Vdc เข้าที่ magnetic แทนแหล่งจ่ายจากชุด control ดังรูปที่ 6.10 ผลปรากฏว่าทำงานได้ตามปกติ

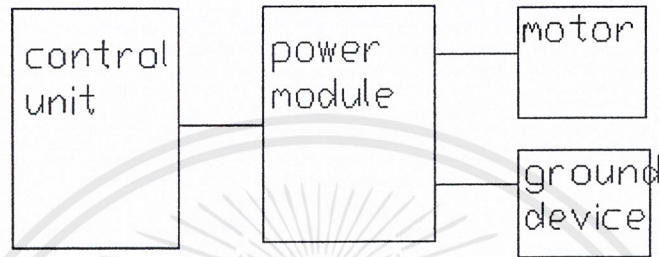


รูปที่ 6.10 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบ ground devices

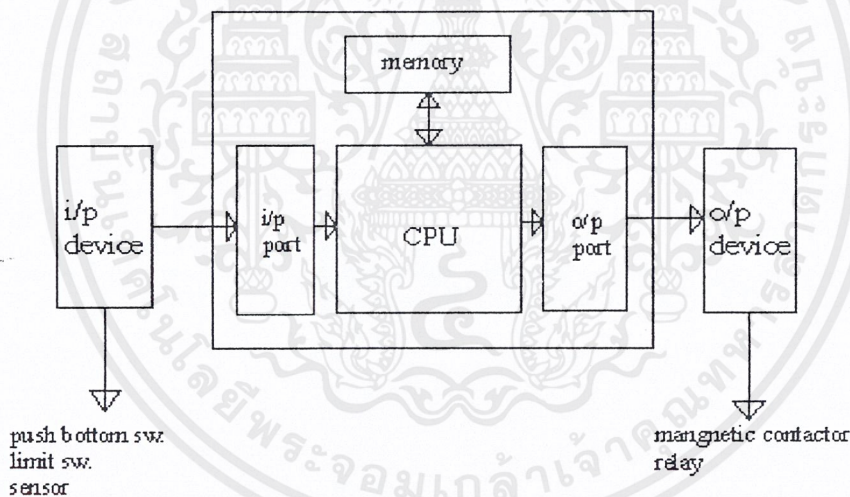
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ดังนั้น สาเหตุของปัญหาที่เหลืออกอยู่จึงอยู่ที่ชุด control จึงดำเนินการตรวจสอบวงจรชุด control โดยอ้างอิงจากคู่มือของเครื่องที่มีอยู่ 1 ชุด (รูปวงจรจะใช้ภาษา Italian อธิบาย)

หมายเหตุ ในส่วนของโปรแกรมการทำงานของ PLC ไม่สามารถทราบได้เนื่องจากไม่มีโปรแกรม interface เข้าคอมพิวเตอร์



รูปที่ 6.11 box diagram แสดงการทำงานของชุด control



รูปที่ 6.12 แสดงหลักการทำงานของ PLC

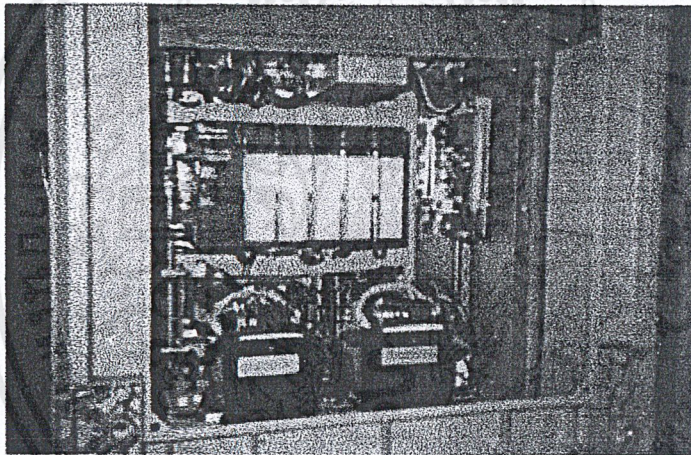
โดย PLC มี input 2 slot และ output 3 slot โดยแต่ละ slot จะมีไฟ LED แสดงสถานะอยู่ดัง

รูปที่ 6.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GE Fam c series 90-30	FWR OK FCIN BAITB	A12345678 B 12345678	A12145678 B 12145678	A12345678 B 12345678	A12345678 B 12345678	A12345678 B 12345678
RS 232						
battery 24V	INPUT SLOT1	INPUT SLOT2	OUTPUT SLOT3	OUTPUT SLOT4	OUTPUT SLOT5	

รูปที่ 6.13 ส่วนประกอบของ PLC



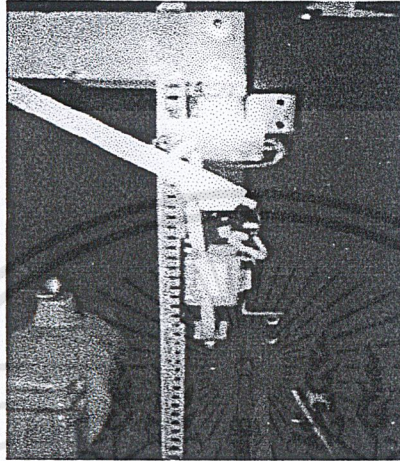
รูปที่ 6.14 แสดง PLC ของชุดควบคุม

- เมื่อตรวจเช็คสายของวงจรควบคุม ปรากฏว่าสายของ emergency switch ที่ต่อไปยัง input ของ PLC ขาดจึงทำการเชื่อมต่อเข้าที่เดิม
- ทดสอบใช้เครื่องผลปรากฏว่า sphere gap สามารถปรับได้ทั้งแบบ auto และ manual แต่ ground device ยังไม่ทำงาน
- เมื่อกดสวิตช์ ชกและสับ ground device ปรากฏว่า ไฟแสดงสถานะ input ของสวิตช์ทั้งสองติด แต่ไฟแสดงสถานะ output ที่ไปสั่งงาน ground device ไม่ติด จึงสรุปได้ว่า ไม่มีสัญญาณไฟฟ้าออกจาก output port ไปสั่งงาน ground device เป็นไปได้ว่า output port ขานั้นอาจจะเสีย จึงทำการสับเปลี่ยน slot เดิมกับ slot ที่ไม่ได้ใช้ขาของ port ขาเดียวกับ ground device สาเหตุที่ไม่สามารถสับขาใน slot เดียวกันได้ เนื่องจากไม่สามารถแก้ไข program สั่งงาน PLC ได้(ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถ program จาก computer และไม่รู้ program การทำงานของ PLC) และทำการต่อสาย สัญญาณดั้งเดิม

- กดสวิทช์สับและปลด ground device ปรากฏว่า ground device สามารถทำงานได้ตามปกติ



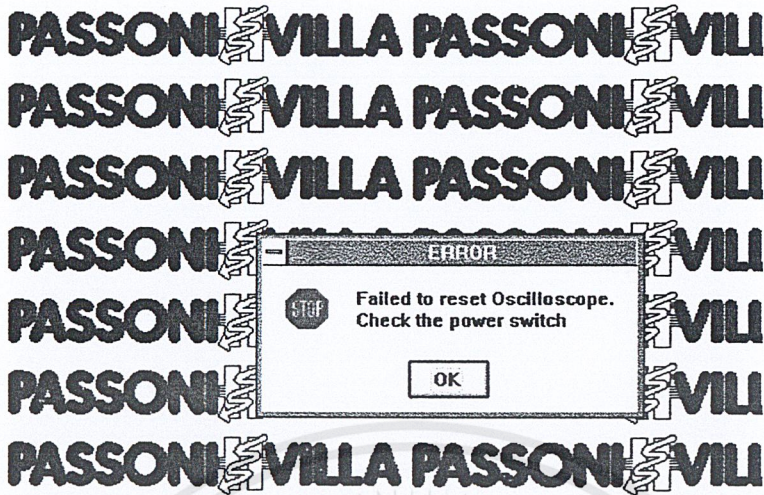
รูปที่ 6.15 แสดง ground device ของเครื่อง

หมายเหตุ แต่ยังไม่พบอาการค้างของ ground device เป็นบางครั้ง (ไม่สามารถสับลงได้) จึงทำการตรวจเช็คกลไกทาง mechanic ของ ground device และ limit switch พบว่าแกนเหล็กที่ควบคุม ไบมีดของ ground device ไปติดกับตัวถังของเครื่อง จึงทำการปรับให้ห่างออกมา จึงสามารถใช้งานได้ตามปกติ

6.2.2 ปัญหาของโปรแกรม WinSDAC

ปัญหา

1. เมื่อคลิกเมาส์ที่ไอคอนของโปรแกรม WinsDAC เพื่อใช้งาน จะปรากฏ Dialog Box Error ขึ้นดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 แสดงข้อผิดพลาดเมื่อเซตออสซิลโลสโคปไม่ถูกต้อง หรือไม่ใ้ต่อออสซิลโลสโคป

ระบุว่า “ Failed to reset Oscilloscope. Check the power switch ” เมื่อคลิกเมาส์ คำว่า OK ผ่านไปจะปรากฏ Dialog Box Error ขึ้นอีกดังรูปที่ 6.17

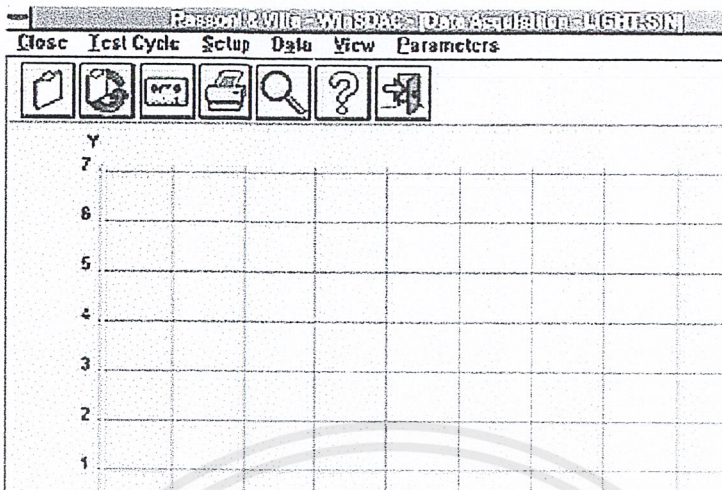


รูปที่ 6.17 แสดงข้อผิดพลาดหลังจากกด OK ที่รูป 6.16

เมื่อคลิกเมาส์ คำว่า OK ผ่านไปจึงจะเข้าสู่ตัวโปรแกรม

2. เมื่อเข้าสู่ตัวโปรแกรม WinsDAC แล้วลองทดสอบการเบรกคาวน์ ปรากฏว่าไม่มีรูปคลื่นอิมพัลส์บนจอคอมพิวเตอร์ มีเฉพาะบนออสซิลโลสโคปเท่านั้น

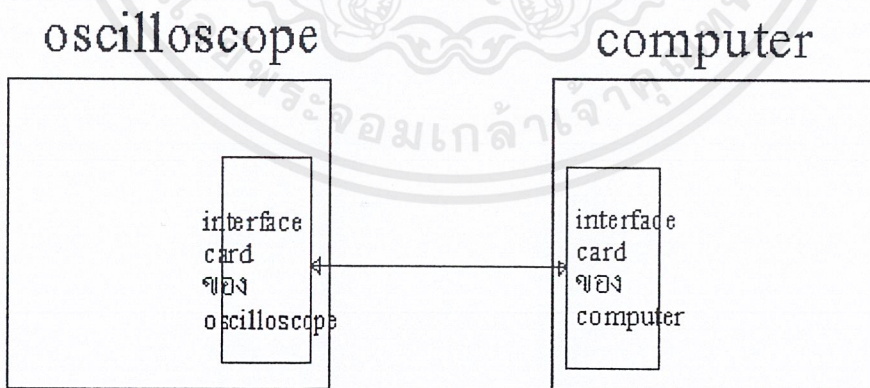
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.18 หน้าต่างของโปรแกรม WinSDAC

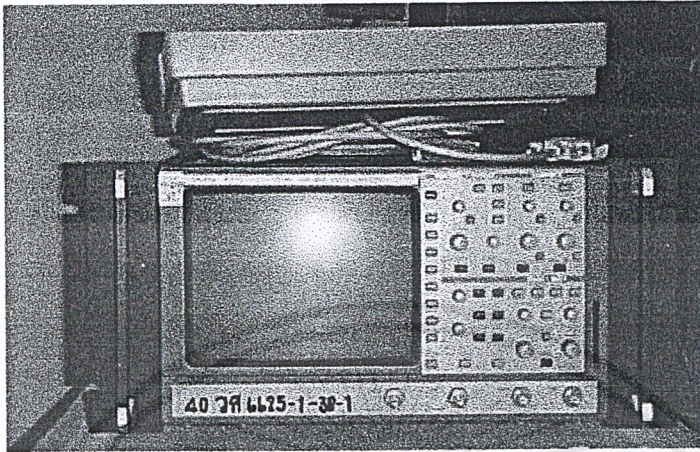
วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

1. โปรแกรม WimsDAC
2. Interface Card ของ Oscilloscope



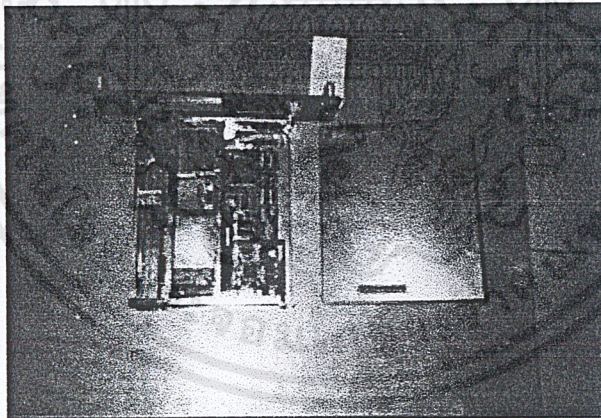
รูปที่ 6.19 แสดงการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และออสซิลโลสโคป

3. สายสัญญาณจาก Oscilloscope ที่เชื่อมต่อกับ Interface Card



รูปที่ 6.20 แสดงออกซิดิลอสโคป

4. Interface Card ของคอมพิวเตอร์



รูปที่ 6.21 แสดง Interface Card ของคอมพิวเตอร์

การดำเนินการแก้ไข

ขั้นที่ 1 นำเครื่องคอมพิวเตอร์และออสซิลโลสโคปไปทำการตรวจเช็คที่ ม.มหานคร โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. ใช้คอมพิวเตอร์ของภาคกระบังต่อกับออสซิลโลสโคปของ ม.มหานคร ผลปรากฏว่าสามารถทำงานได้ตามปกติ (ใช้สายสัญญาณของภาคกระบัง)
2. ใช้ออสซิลโลสโคปของภาคกระบังต่อกับคอมพิวเตอร์ของ ม.มหานคร ผลปรากฏว่าไม่สามารถใช้งานโปรแกรม WinSDAC ได้เหมือนที่กล่าวมาข้างต้น
ดังนั้น จึงสามารถตัดปัญหาในข้อที่ 1, 3, 4 ไปได้

ขั้นที่ 2 นำออสซิลโลสโคปไปตรวจเช็คที่บริษัท เมอเซอโทนิคส์

ผลปรากฏว่าที่คอมพิวเตอร์ไม่สามารถตั้งงานออสซิลโลสโคปและแสดงผลรูปภาพแรงดันอิมพัลส์ได้นั้น เกิดจากการตั้งค่าการติดต่อของออสซิลโลสโคปกับคอมพิวเตอร์ผิดพลาด โดยการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และออสซิลโลสโคปนั้นมี 2 แบบ คือ GPIB และ RS-232 ซึ่งปกติจะตั้งค่าไว้ที่ GPIB แต่อาจจะเกิดจากความผิดพลาดของผู้ใช้งานที่ไปเปลี่ยนค่านี้โดยไม่ได้ตั้งใจ

สรุปผลการแก้ไข

จากปัญหาข้างต้นจะเห็นได้ว่า เป็นปัญหาที่เรียกว่าเส้นผมบังภูเขาที่หาได้ ดังนั้นทำโครงการจึงเสนอให้มีการจัดทำคู่มือการใช้งานโดยละเอียด เพื่อที่จะสามารถใช้งานเครื่องได้อย่างถูกต้อง และเมื่อเกิดปัญหาก็จะค้นหาสาเหตุได้อย่างรวดเร็ว และสามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้อง โดยได้กล่าวถึงวิธีการใช้งานแล้วในบทที่ 4 ซึ่งอาจจะใช้เป็นแนวทางในการจัดทำคู่มือใช้งานต่อไปในอนาคต

หมายเหตุ ห้องประลองแรงดันสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เป็นเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ขนาด 400 kV 4 state ยี่ห้อ PASSION VILLA

6.3 การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์

การทดสอบที่ 6.3.1 การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์

จุดประสงค์

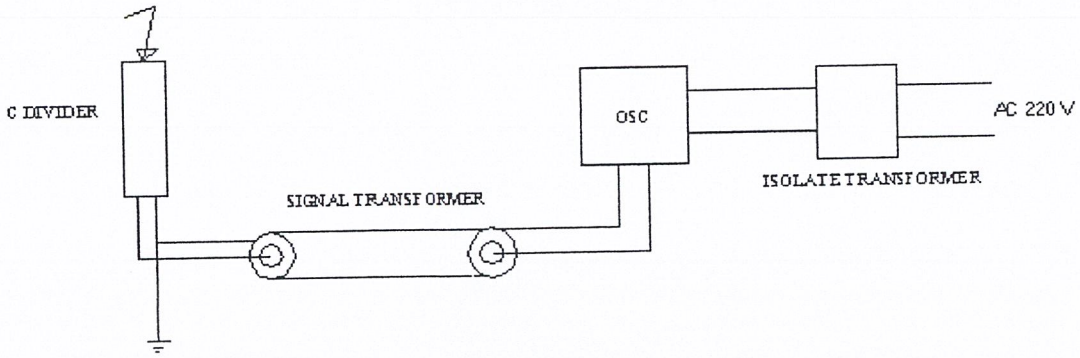
1. เพื่อศึกษารูปคลื่นไฟฟ้า ที่แรงดันต่างๆ
2. เพื่อตรวจสอบเครื่องว่าใช้งานได้หรือไม่ และตรวจเช็คอุปกรณ์ต่างๆของเครื่องอิมพัลส์จากปัญหาที่ได้จากการทดสอบ เพื่อทำการแก้ไขต่อไป
3. เพื่อศึกษา พารามิเตอร์ที่มีผลต่อรูปคลื่นของเครื่องเพื่อดำเนินการแก้ไข เพื่อให้ท่านที่จะทำการย้ายและติดตั้งใหม่ นำไปใช้ประกอบในการพิจารณา

อุปกรณ์ที่ใช้

1. ออสซิลโลสโคป Yokokawa DL1520
2. Isolate Transformer
3. โพรบ 1×100
4. ปลั๊กพ่วง

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 6.22
2. ตั้ง Time / Div ไว้ที่ 20 μ sec
3. ตั้ง Volt / Div ตามระดับแรงดัน Out put ทดลอง
4. เปิดเครื่องสร้างแรงดันอิมพัลส์
5. เมื่อตั้งค่าทุกอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้วต่อสายสัญญาณจาก C divider เข้าสู่โคป
6. แล้วทำตามวิธีใช้เครื่องในบทที่ 4 (4.2)
7. ทำการทดลองตามระยะแกป แสดงในตารางที่ 6.2
8. บันทึกกราฟที่ได้จากการทดลองลงในแผ่นดิสก์



รูปที่ 6.22 วงจรทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 kV

ตารางที่ 6.2

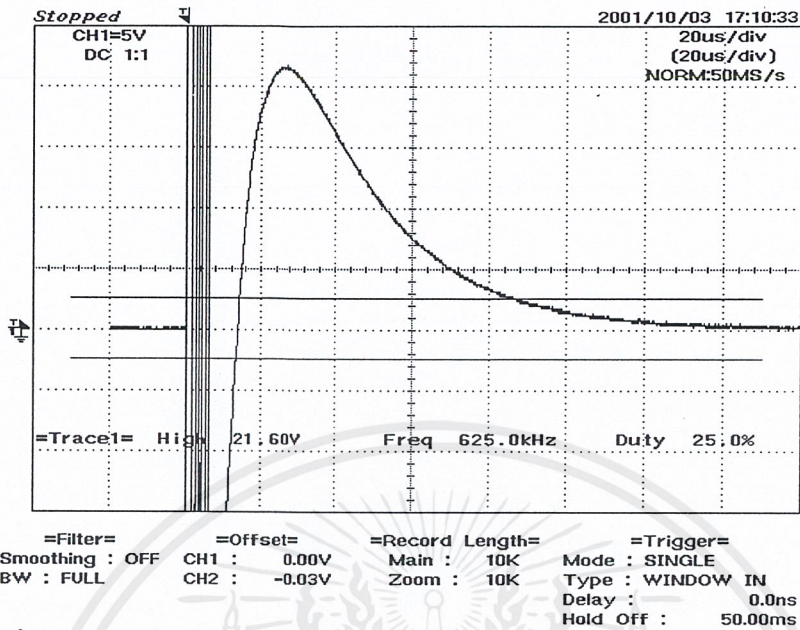
ตารางแสดงค่าต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ แรงดันอิมพัลส์ Generating Voltage (ได้จาก ระยะแกป ของ sphere gap 100 cm.) ระยะแกปเครื่องกำเนิดอิมพัลส์

ขั้วของ แรงดัน อิมพัลส์	แรงดัน อิมพัลส์ (kV / state)	Generating Voltage (kV)	T1 (μ sec)	T2 (μ sec)	ระยะแกป ของเครื่อง (mm.)
+	25	400	-	52	22
	37.5	600	-	60	32
-	25	400	-	52	22
	37.5	600	-	60	32

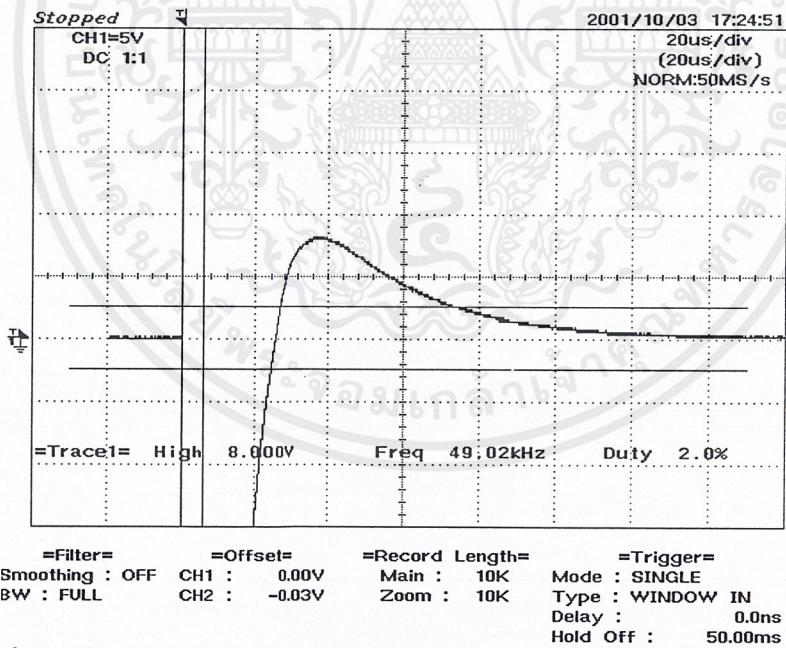
* หมายเหตุ ไม่สามารถวัดค่า T1 และ Vpeak ได้

ผลการทดลอง

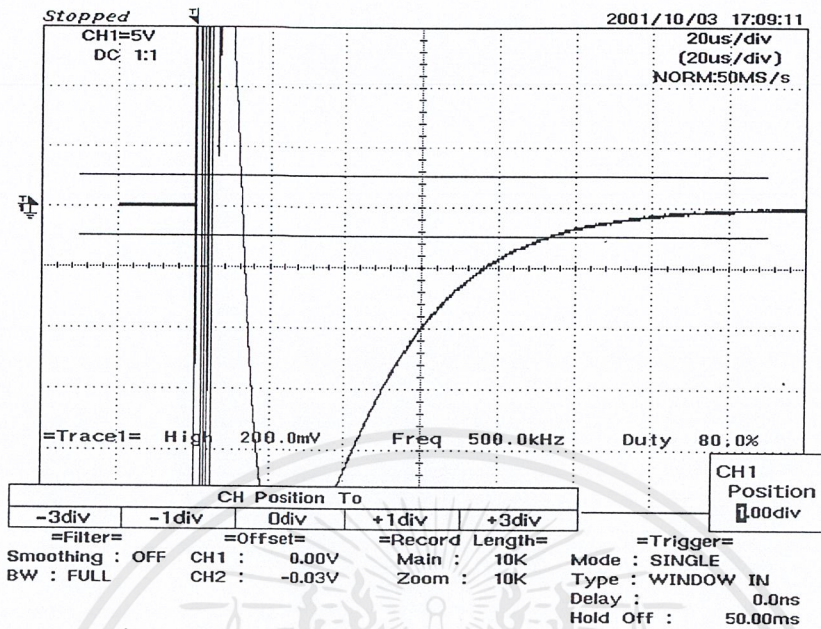
แสดงดังรูปที่ 6.23-6.26



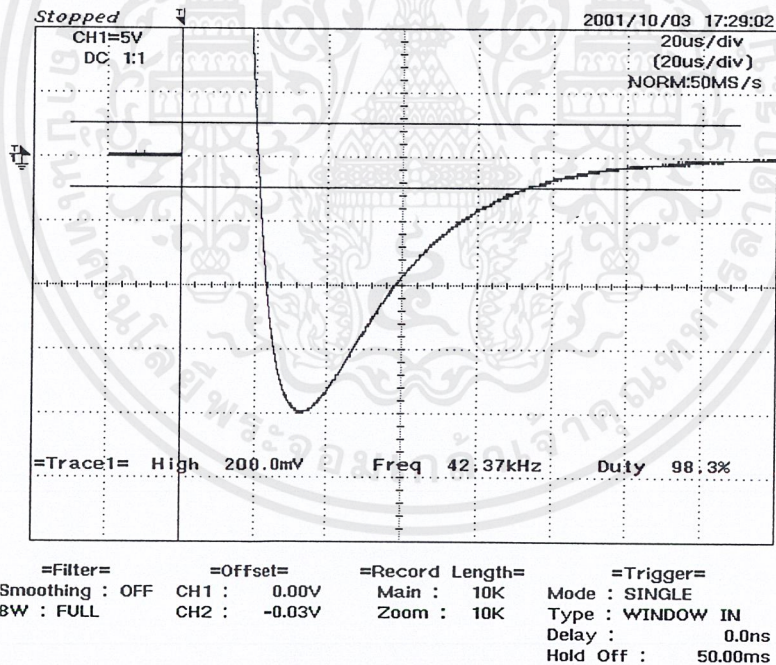
รูปที่ 6.23 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่ Generating Voltage เท่ากับ + 400 kV



รูปที่ 6.24 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่ Generating Voltage เท่ากับ + 600 kV



รูปที่ 6.25 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่ Generating Voltage เท่ากับ -400 kV



รูปที่ 6.26 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่ Generating Voltage เท่ากับ -600 kV

สรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ได้ จากการทดลอง จะพบว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากเกิดการ Damping ขึ้น อาจเกิดจากความเสียหายของ Damping Resistance หรือ สายสัญญาณ C Divider จึงทำให้รูปคลื่นไม่ได้มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบที่ 6.3.2 การทดสอบสายสัญญาณจาก C Divider

วัตถุประสงค์

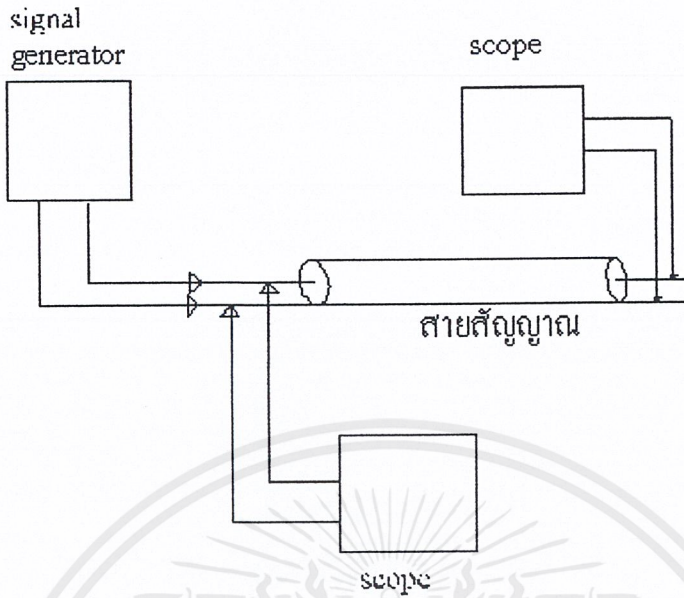
1. เพื่อทดสอบสายสัญญาณจาก C Divider เนื่องจากสายชำรุด

อุปกรณ์

1. Storage Scope	1	ตัว
2. Signal Generator	1	ตัว
3. สาย Probe	1	เส้น
4. ปลั๊กพ่วง	1	เส้น

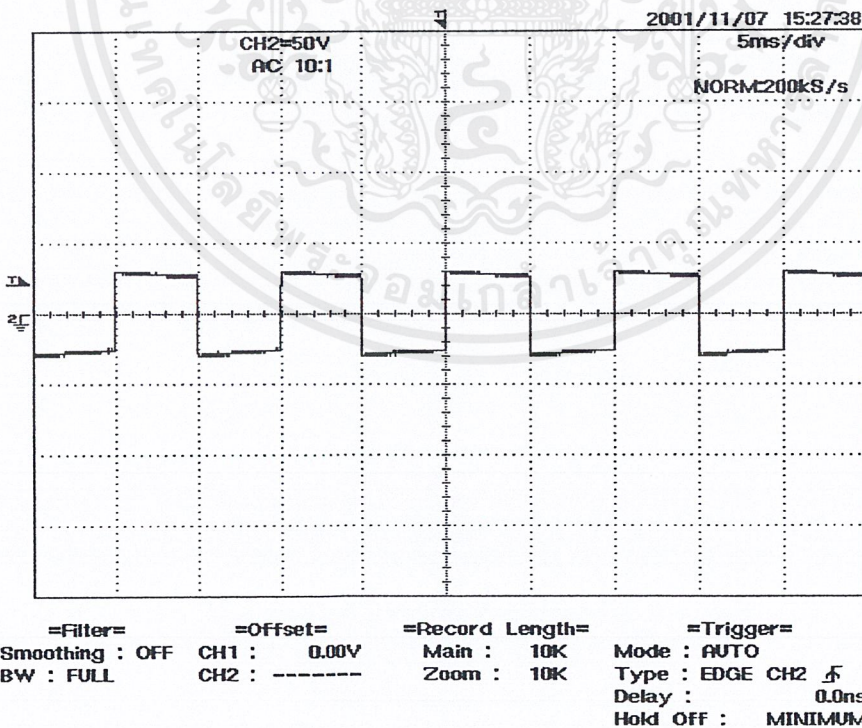
ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 6.27
2. วัดสัญญาณที่ออกมาจาก Signal Generator ซึ่งเป็นสัญญาณแบบ Square Wave ความถี่ 100 Hz และ 20 kHz
3. ป้อนสัญญาณที่ออกมาจาก Signal Generator ซึ่งเป็นสัญญาณแบบ Square Wave ความถี่ 100 Hz และ 20 kHz เข้าสายสัญญาณจาก C Divider (สายที่มีการชำรุด) แล้ววัดสัญญาณที่ได้ทางต้นทาง
4. ป้อนสัญญาณที่ออกมาจาก Signal Generator ซึ่งเป็นสัญญาณแบบ Square Wave ความถี่ 100 Hz และ 20 kHz เข้าสายสัญญาณจาก C Divider (สายที่มีการชำรุด) แล้ววัดสัญญาณที่ได้ทางปลายทาง
5. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 6.27 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองทดสอบสายสัญญาณ C divider

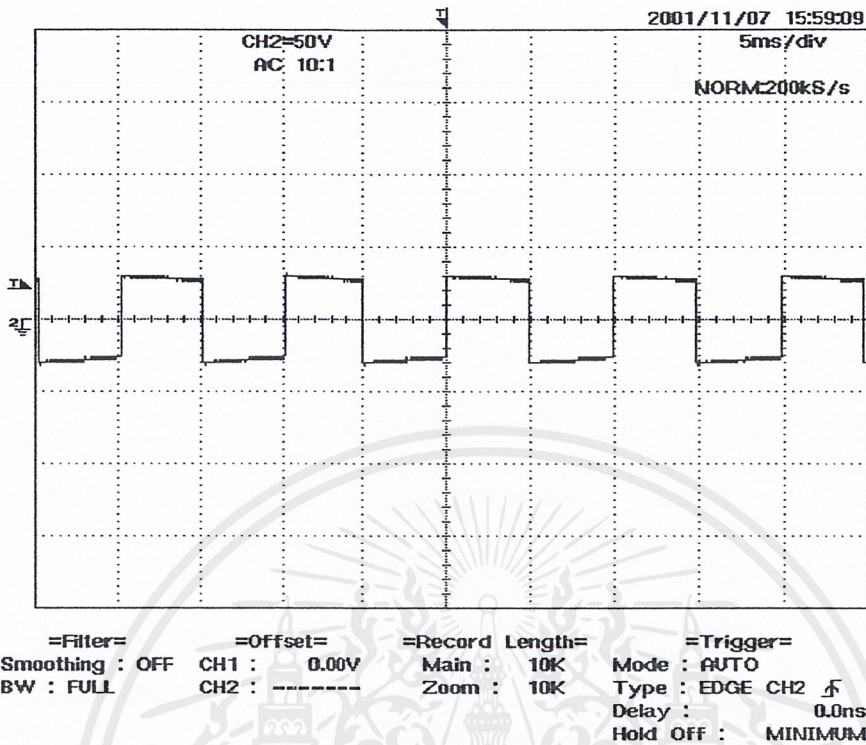
ผลการทดลอง



รูปที่ 6.28 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจาก Signal Generator ที่ความถี่ 100 Hz

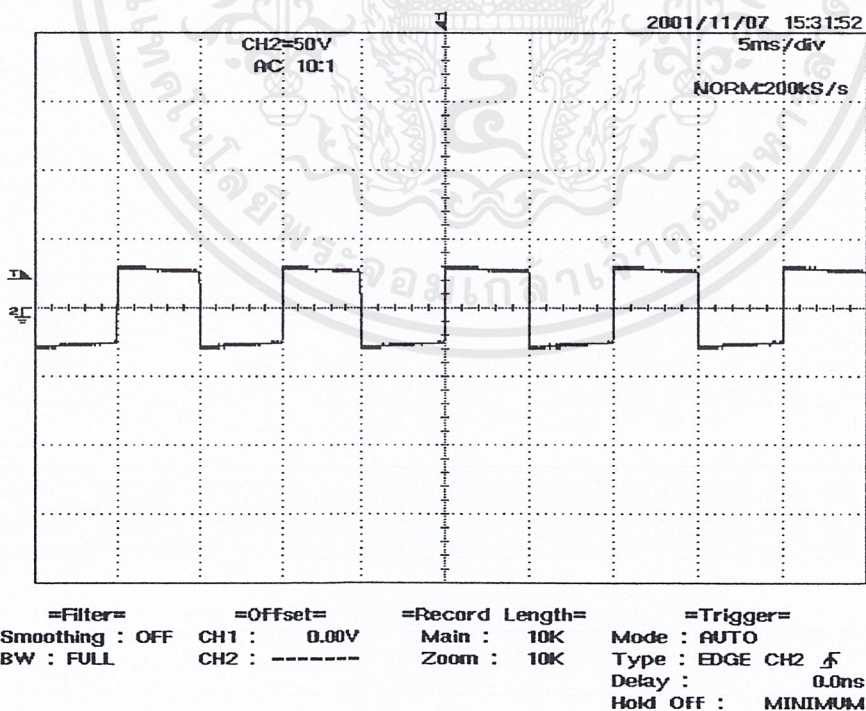
Volt/div 5 V Time/div 5mS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



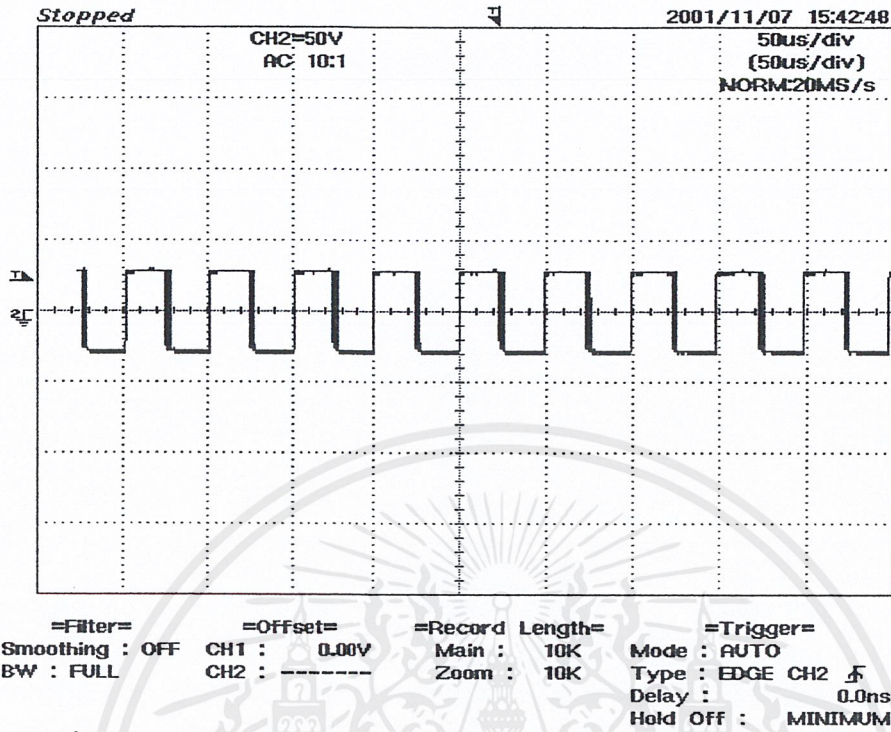
รูปที่ 6.29 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจากต้นสายสัญญาณ divider ที่ความถี่ 100 Hz

Volt/div 5 V Time/div 5 mS



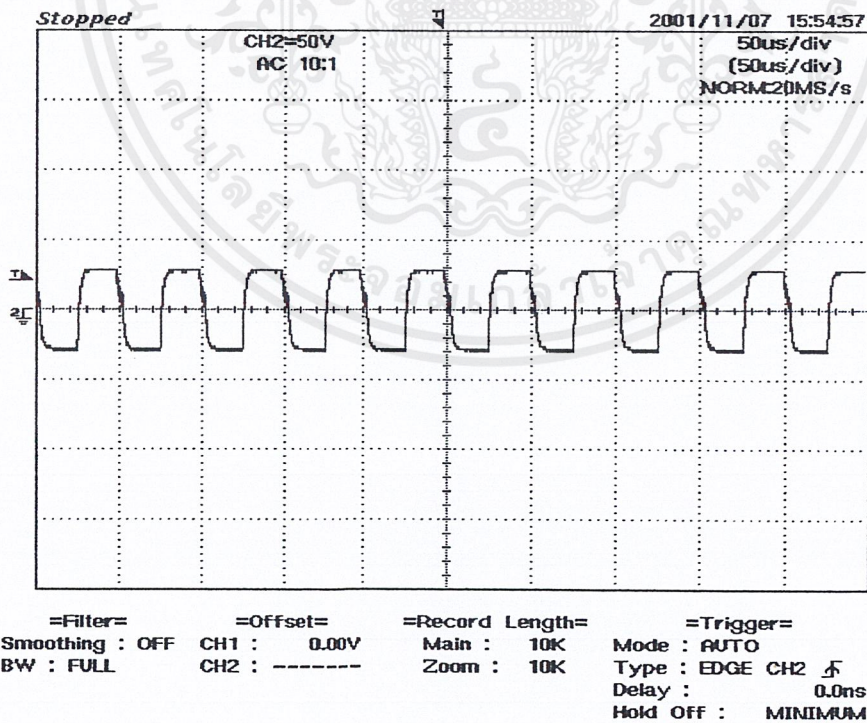
รูปที่ 6.30 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจากปลายสายสัญญาณ divider ที่ความถี่ 100 Hz

Volt/div 5 V Time/div 5 mS



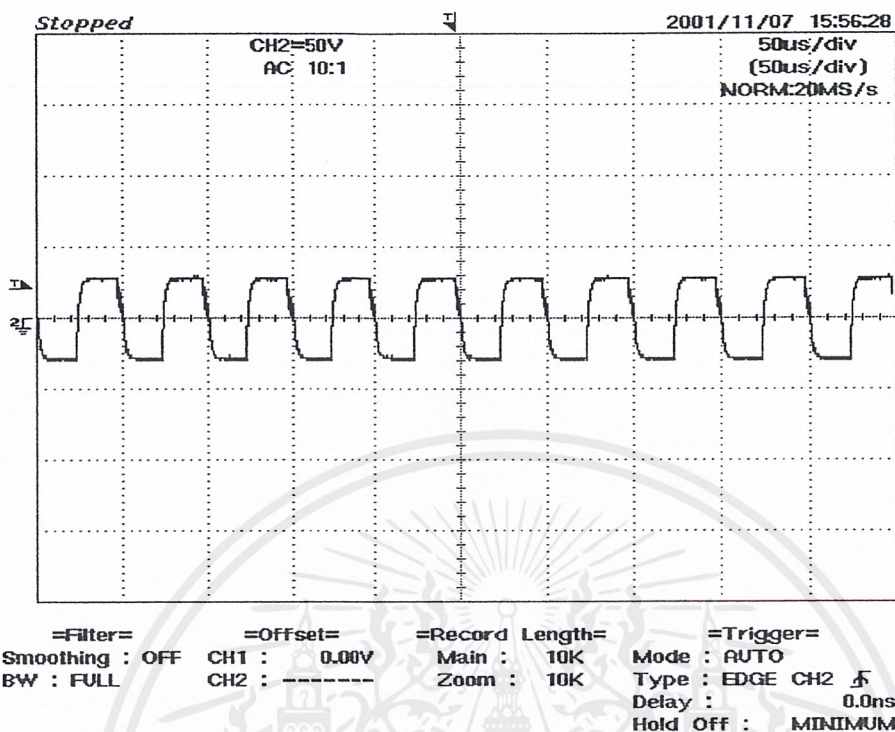
รูปที่ 6.31 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจาก Signal Generator ที่ความถี่ 20 kHz

Volt/div 5 V Time/div 50 μ S



รูปที่ 6.32 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจากต้นสายสัญญาณ divider ที่ความถี่ 20 kHz

Volt/div 5 V Time/div 50 μ S



รูปที่ 6.33 แสดงสัญญาณที่ได้จากการวัดจากปลายสายสัญญาณ divider ที่ความถี่ 20 kHz

Volt/div 5 V Time/div 50 μ S

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ต่ำคือ 100 Hz รูปคลื่นสัญญาณที่ปลายสายจะไม่มี ความผิดเพี้ยน หรือ ผิดเพี้ยนน้อยมาก แต่ที่ความถี่สูงที่ 20 kHz จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณที่ปลาย สายมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นที่ออกมาจาก signal generator

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่ความถี่สูงจะมีความผิดเพี้ยนของสายสัญญาณเกิดขึ้น ซึ่งรูปคลื่นแรง ดันอิมพัลส์ก็เป็นรูปคลื่นความถี่สูงเช่นกัน ดังนั้นจึงมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิด จากการชำระคของสายสัญญาณ

การทดสอบที่ 6.3.3 การทดสอบความต้านทาน Switching (R_s)

วัตถุประสงค์

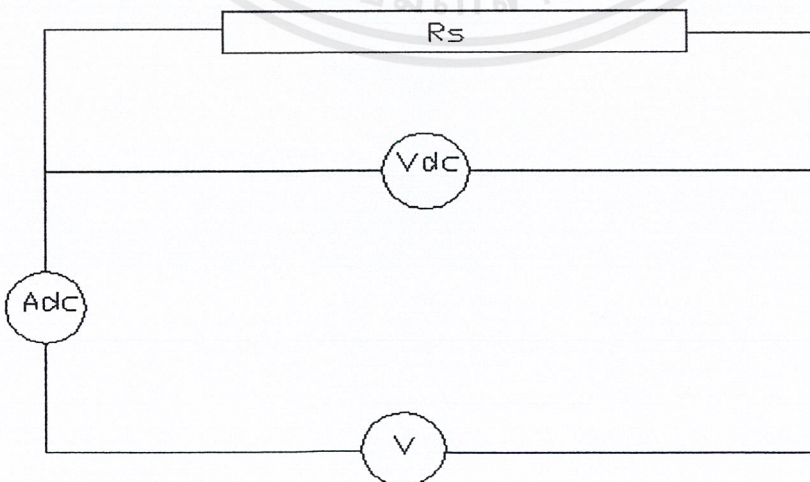
1. เพื่อทดสอบความต้านทาน R_s เนื่องจากการแตกชำรุด

อุปกรณ์

1. Variac 0-220 V 1 เฟส	1	ตัว
2. DC Voltmeter	1	ตัว
3. DC Ammeter	1	ตัว
4. Bridge Rectifier	1	ชุด
5. สายไฟต่อวงจร	5	เส้น
6. โอห์มมิเตอร์	1	ตัว

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 6.34
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ความต้านทาน R_s วัดค่ากระแสที่ได้และแรงดันไฟฟ้าที่ได้โดยวิธี VI-Method
3. ใช้โอห์มมิเตอร์วัดค่าความต้านทาน R_s
4. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 6.34 แสดงวงจรที่ใช้ในการวัดความต้านทาน R_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

วิธี VI-Method

ตารางที่ 6.3

แสดงแรงดัน และ กระแสของ Rs

แรงดันไฟฟ้า ที่วัดได้ (V)	40	80	120	160	200	240
กระแสไฟฟ้า ที่วัดได้ (mA)	1.15	2.35	3.55	4.70	5.90	7.10

$$\text{คำนวณค่าความต้านทานที่วัดได้} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1}$$

จะได้

$$R_1 = \frac{80 - 40}{2.35 - 1.15} = 33.33 \text{ k}\Omega \quad R_4 = \frac{200 - 160}{5.90 - 4.70} = 33.33 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{120 - 80}{3.55 - 2.35} = 33.33 \text{ k}\Omega \quad R_5 = \frac{240 - 200}{7.10 - 5.90} = 33.33 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{160 - 120}{4.20 - 3.55} = 37.78 \text{ k}\Omega$$

$$R_{เฉลี่ย} = \frac{33.33 \times 4 + 34.78}{5} = 33.62 \text{ k}\Omega$$

โดย โอห์มมิเตอร์

$$\text{ความต้านทานที่วัดได้} = 38 \text{ k}\Omega$$

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าความต้านทานที่วัดจากการวัดโดยวิธี VI-Method จะได้ค่าความต้านทานน้อยกว่าวัดด้วย โอห์มมิเตอร์ ซึ่งอาจเกิดจากการแตกร้าวของความต้านทานจึงทำให้มีผลลดทอนค่าความต้านทานลงเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้

6.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ ก่อนการเคลื่อนย้าย

วัตถุประสงค์

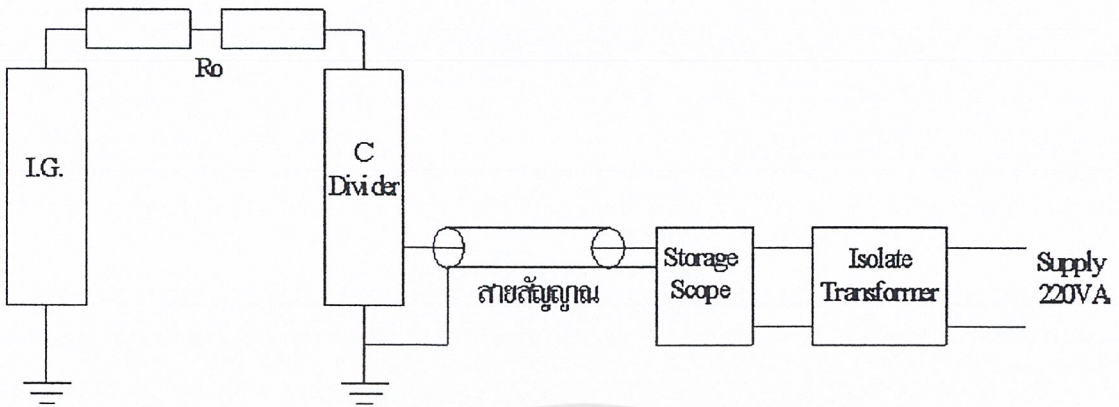
1. เพื่อทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ว่าสามารถใช้งานได้ตามปกติหรือไม่ หลังจาก
ที่ทำการแก้ไข ซ่อมแซมเครื่อง

อุปกรณ์การทดลอง

1. Storage Scope (Yokogawa model DL 1520)	1	เครื่อง
2. หม้อแปลง isolate 1:1	1	ตัว
3. แผ่นดิสก์	1	แผ่น
4. สายโพรบ 1:100	1	เส้น

ขั้นตอนการทดลอง

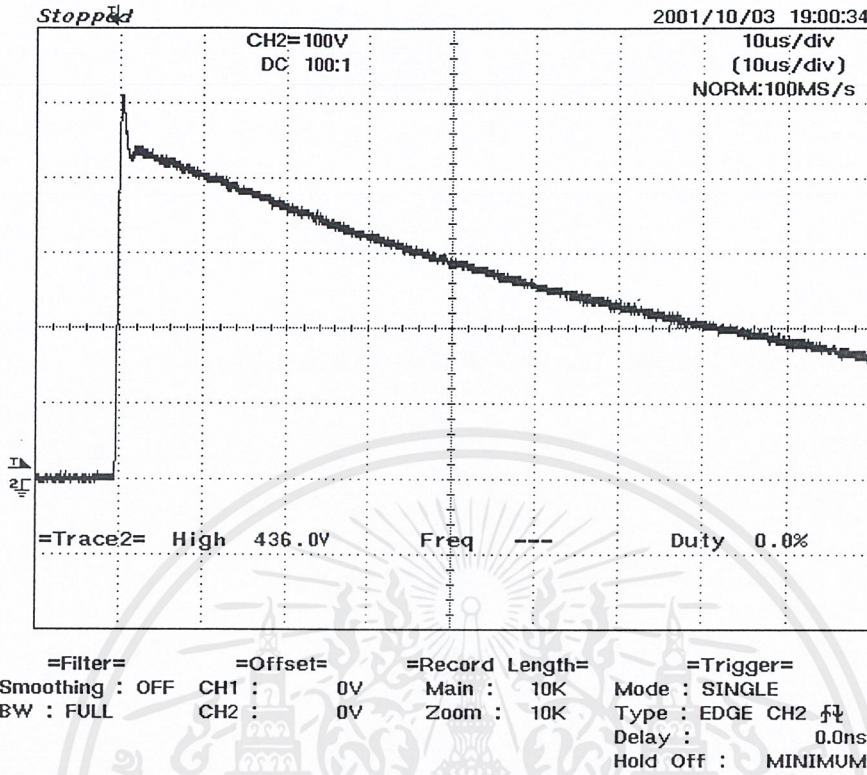
1. ต่อบางจรงรูปที่ 6.35
2. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์(เพื่อทดสอบถึงผลกระทบของการเบรคควาน์ แต่ไม่ได้สั่งงาน
จากคอมพิวเตอร์)
3. ทดลองที่ค่าแรงดัน 125 kV และ 170 kV ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ที่ เอาท์พุทรีซิสแตนซ์ 35
ohm, 65 ohm และ 100 ohm ตามลำดับ
4. ทำการวัดและบันทึกผลการทดลองที่ได้
5. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลอง



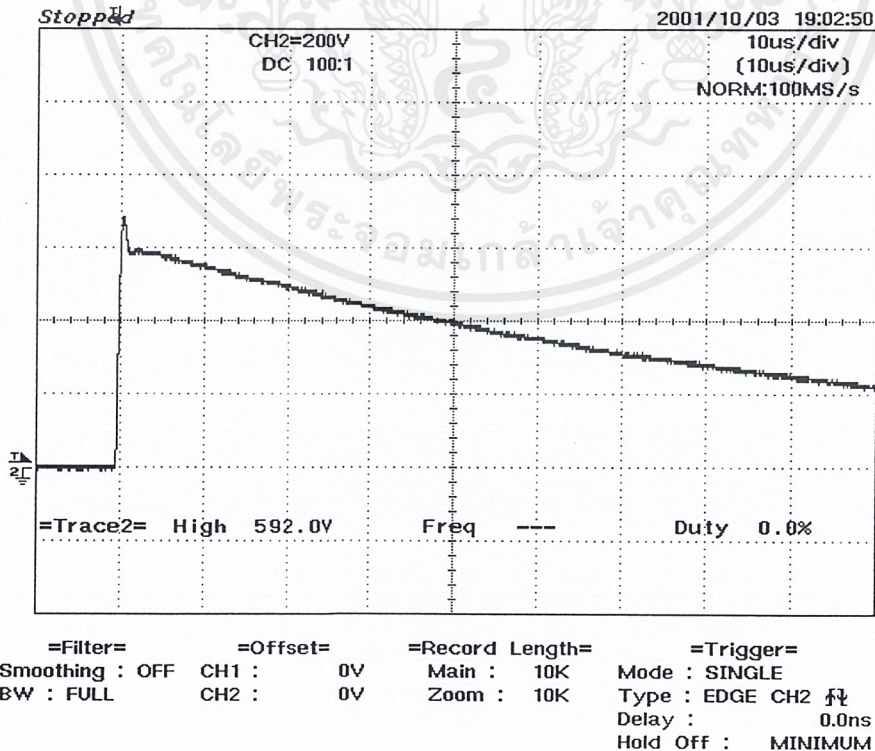
รูปที่ 6.35 วงจรที่ใช้ทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลท์

ผลการทดลอง

ขั้ว	แรงดันอัตรา (kV/state)	Ro	Sphere gap (mm.)
+	62.5	35	24.0
	85	35	36.4
	62.5	65	24.5
	85	65	36.7
	62.5	100	24.2
	85	100	36.4
-	62.5	35	24.0
	85	35	36.4
	62.5	65	24.4
	85	65	34.3
	62.5	100	24.2
	85	100	36.4

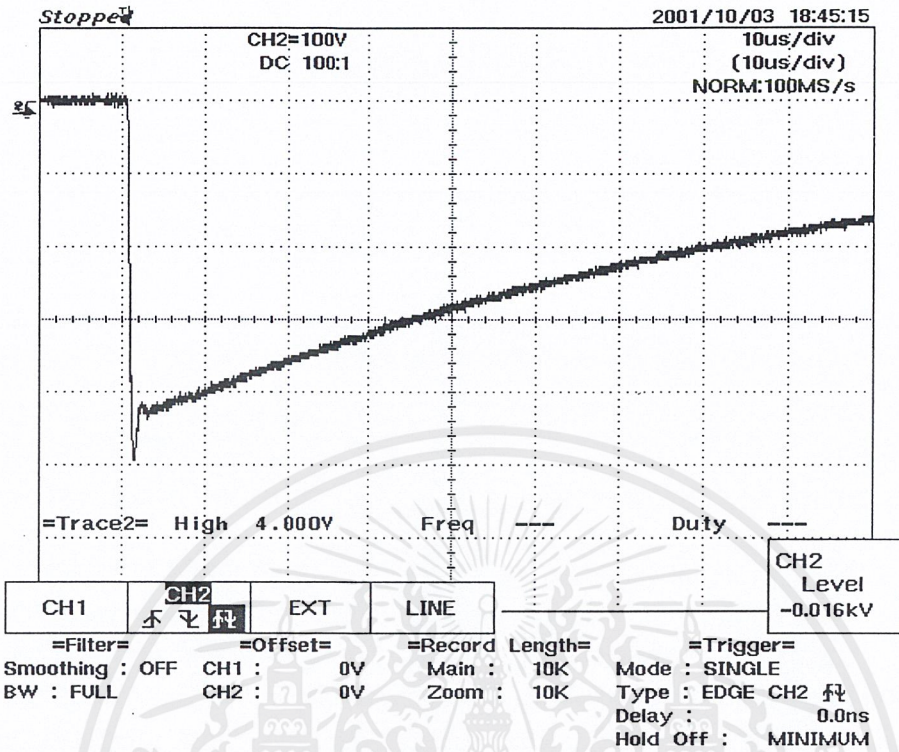


รูปที่ 6.36 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่แรงดันอัดประจุ +62.5 kV/state $R_0 = 35 \Omega$

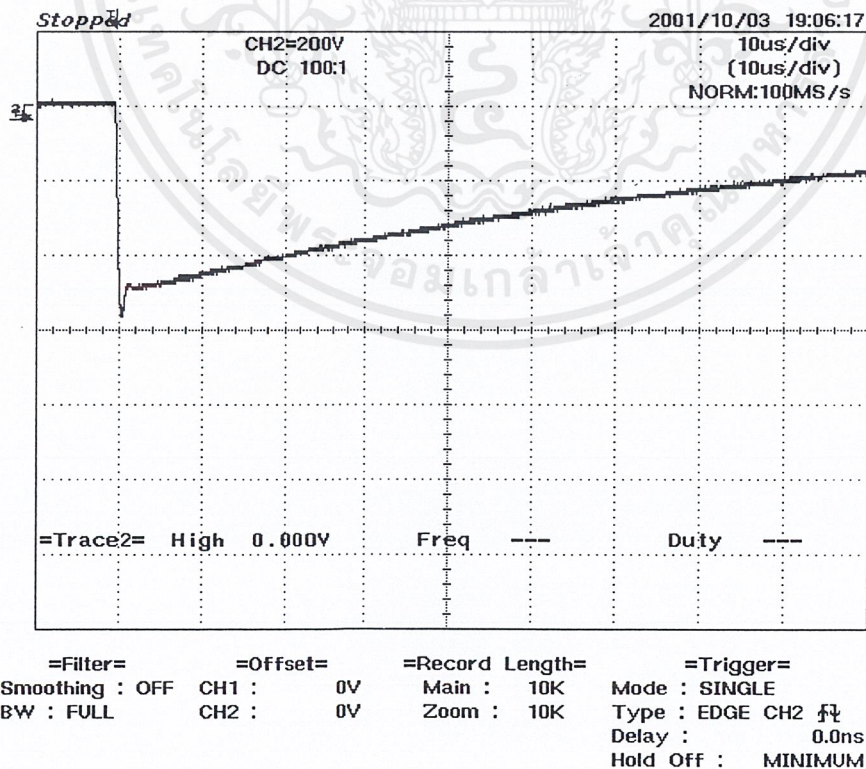


รูปที่ 6.37 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่แรงดันอัดประจุ +85 kV/state $R_0 = 35 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

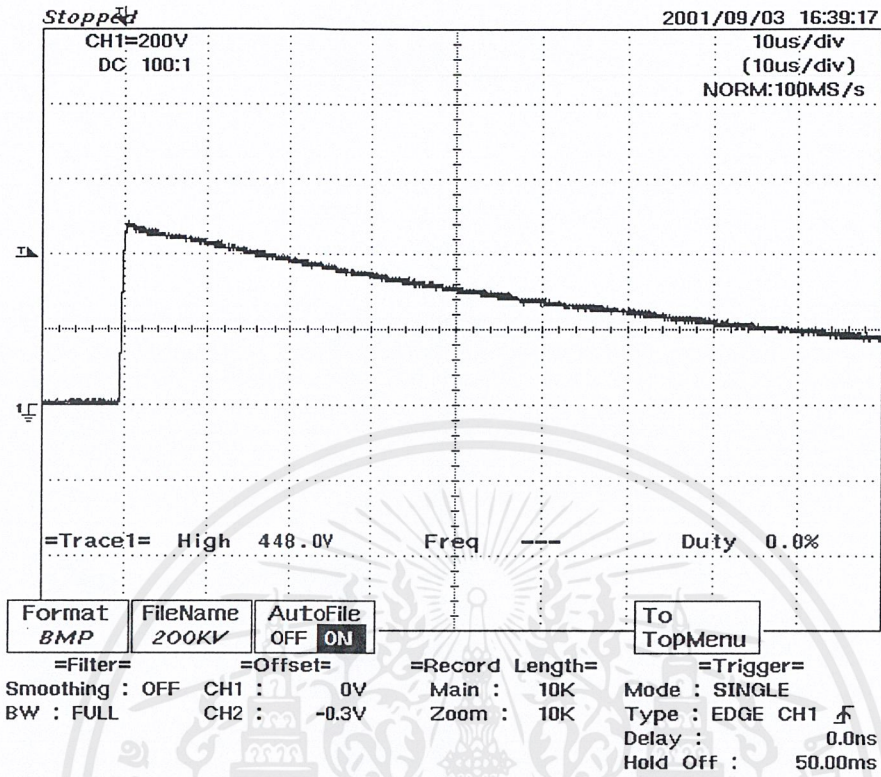


รูปที่ 6.38 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่แรงดันอัดประจุ - 62.5 kV/state $R_0 = 35 \Omega$

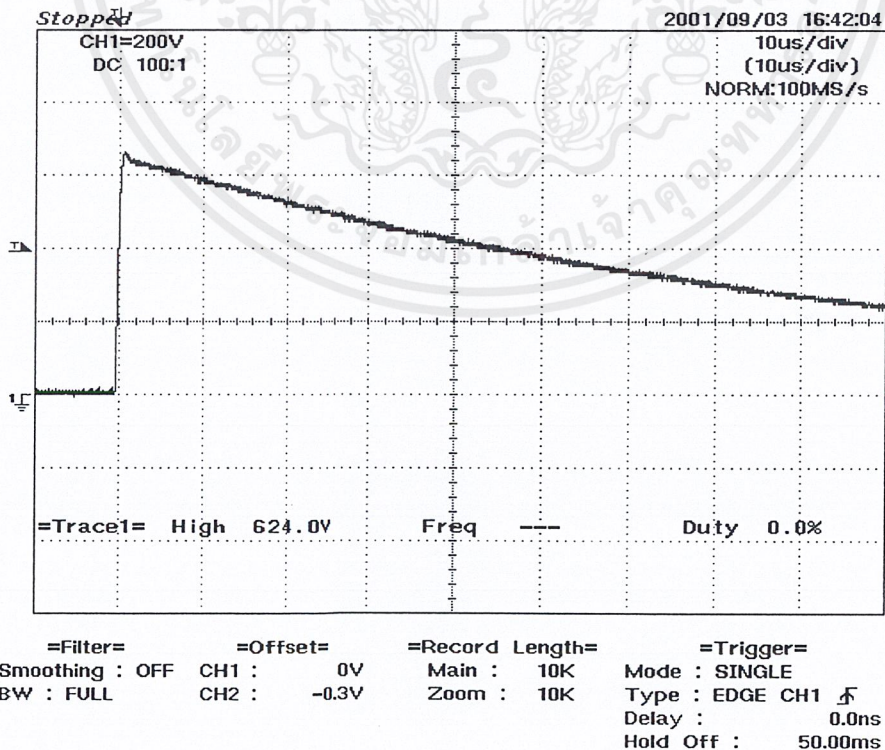


รูปที่ 6.39 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่แรงดันอัดประจุ - 85 kV/state $R_0 = 35 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

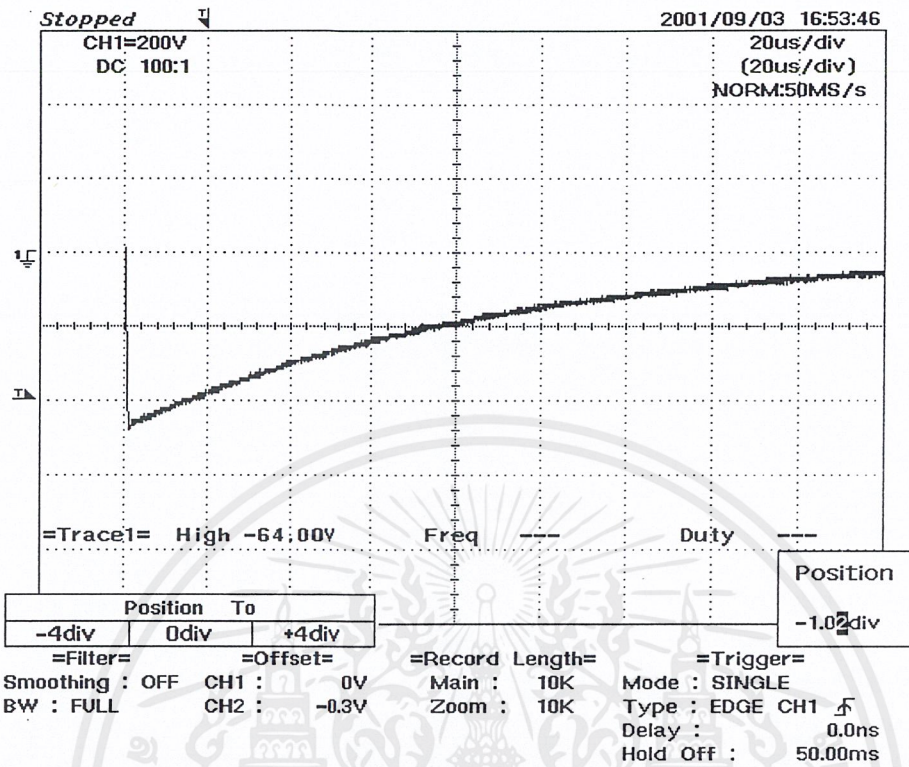


รูปที่ 6.40 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ + 62.5 kV/state $R_0 = 65 \Omega$

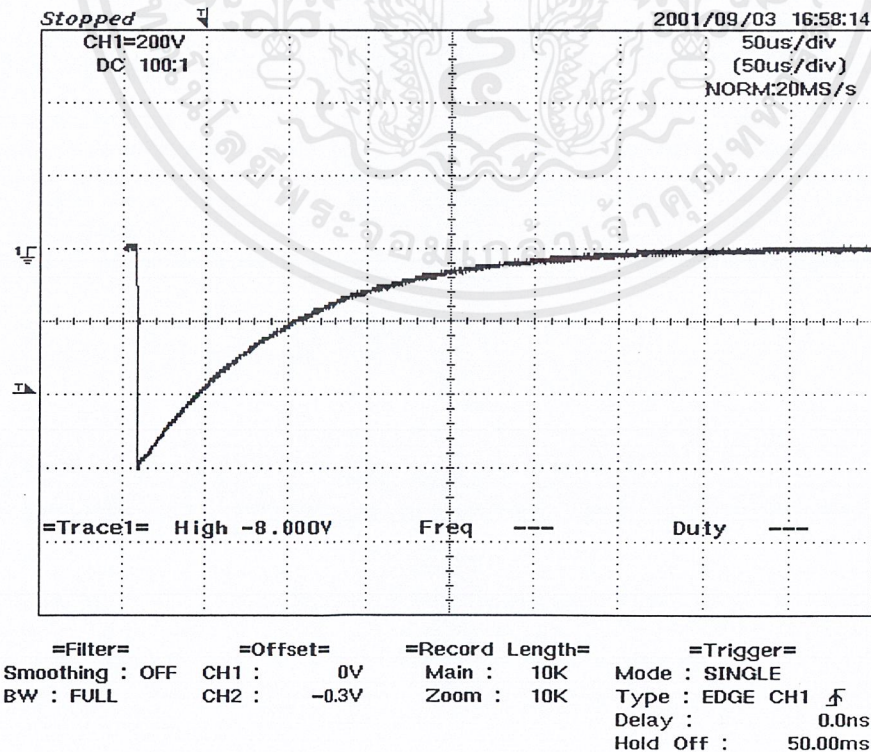


รูปที่ 6.41 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ + 85 kV/state $R_0 = 65 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

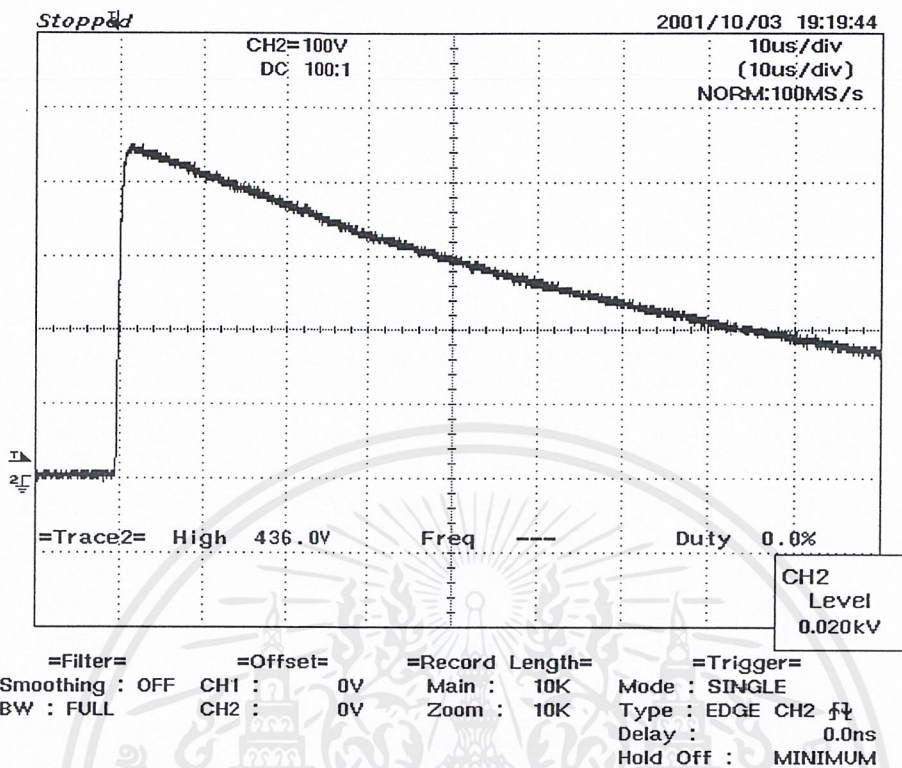


รูปที่ 6.42 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ - 62.5 kV/state $R_0 = 65 \Omega$

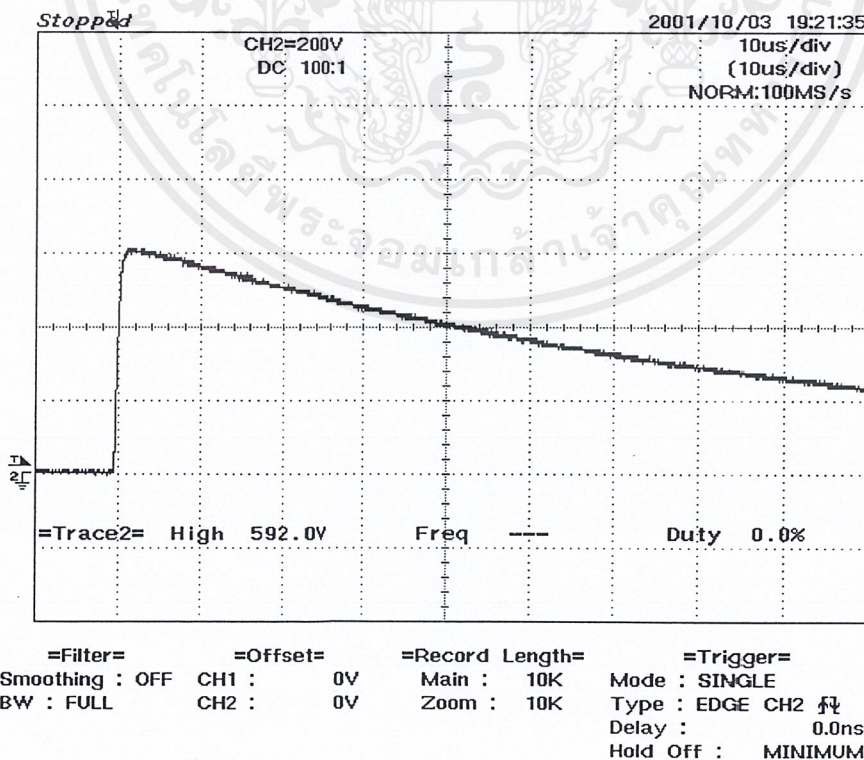


รูปที่ 6.43 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ - 85 kV/state $R_0 = 65 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

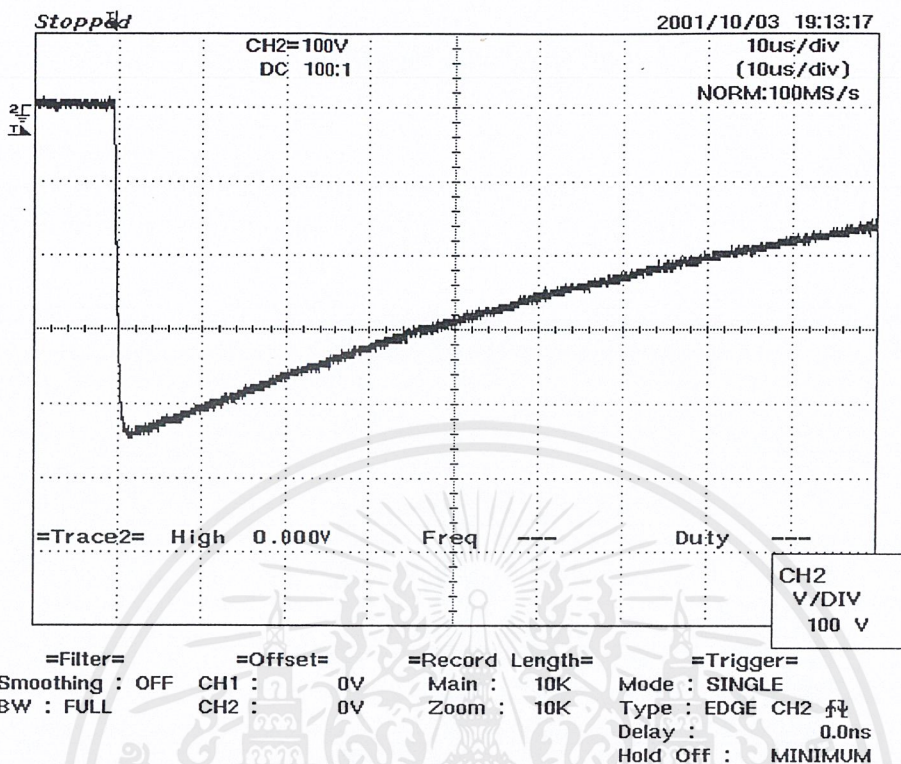


รูปที่ 6.44 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ + 62.5 kV state $R_0 = 100 \Omega$

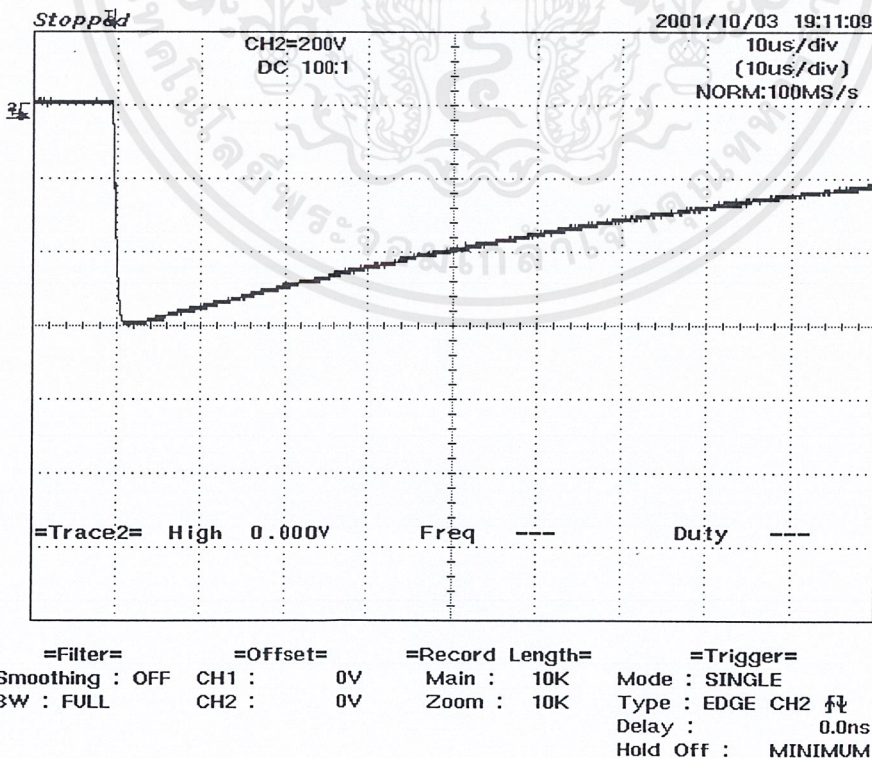


รูปที่ 6.45 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ + 85 kV/state $R_0 = 100 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.46 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ - 62.5 kV/state $R_0 = 100 \Omega$



รูปที่ 6.47 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่ใช้แรงดันอัดประจุ - 85 kV/state $R_0 = 100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองเบรคคาวน์แบบรูปคลื่นไฟฟ้าในแต่ละค่าแรงดัน (ทั้งขั้วบวกและลบ) และแต่ละค่าเอาต์พุตรีซีสแดนท์ จะพบว่า ที่ระดับแรงดัน 170 ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ของทุกค่าเอาต์พุตรีซีสแดนท์ เมื่อการเบรคคาวน์เสร็จสิ้นคอมพิวเตอร์จะเกิดอาการรวนจนไม่สามารถใช้งานได้ ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากผลกระทบของ EMI (Electromagnetic Interference) ซึ่งมี 2 แบบ คือ conducted (มาตามตัวนำไฟฟ้า) และ Radiate (แผ่กระจายมาตามอากาศ)



6.5 การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ขนาด 200 กิโลโวลต์ หลังการติดตั้ง

วัตถุประสงค์

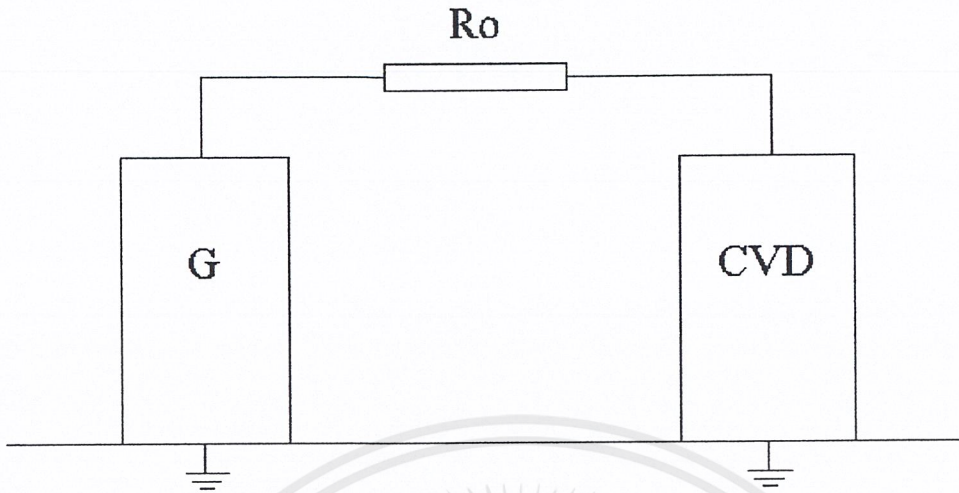
1. ทดสอบเครื่องหลังการติดตั้งว่าใช้งานได้หรือไม่
2. เพื่อทดสอบคุณลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประเภทต่าง ๆ นำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน และนำผลที่จากการทดสอบมาใช้ในการพิจารณาปรับปรุงแก้ไข

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ 2 stage 200 kV, 5 kJ
2. แผ่นคิสก์
3. ช่องว่างทรงกลมมาตรฐาน (standard sphere gap)
เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm. (เพื่อใช้ในการทดสอบรูปคลื่นฟ้าผ่าแบบคลื่นตัด)
4. Printer

ขั้นตอนการทดลอง

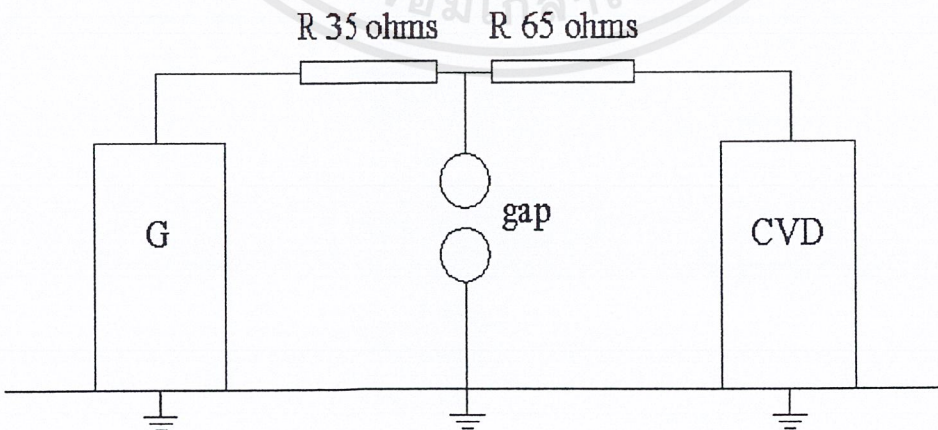
- ตอนที่ 1 ทดสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ลักษณะเต็มคลื่น (Lightning Impulse Full Wave)



รูปที่ 6.48 วงจรทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตซ์

1. ต่อยังตามรูปที่ 6.48
2. สร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยทำการเปลี่ยน $R_0 = 35 \Omega, 65 \Omega, 100 \Omega$ โดยทดสอบที่ แรงดันทั้งชั่ว บวกและชั่วลบ ของสัญญาณ
3. บันทึกผลการทดลอง และ Print ผลรูปคลื่น
4. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ตอนที่ 2 ทดสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ (Switching Impulse)



รูปที่ 6.49 วงจรทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ลักษณะคลื่นตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เปลี่ยน R_f จาก 12Ω เป็น 6000Ω และเปลี่ยน R_t จาก 150Ω เป็น 6000Ω
2. ต่อวงจรตามรูปที่ 6.48
3. สร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยทำการเปลี่ยน $R_0 = 35 \Omega, 65 \Omega, 100 \Omega$ โดยทดสอบที่ แรงดันทั้งชั่ว บวก และ ชั่วลบของสัญญาณ
4. บันทึกผลการทดลอง และ Print ผลรูปคลื่น
5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ตอนที่ 3 ทดสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ลักษณะคลื่นตัด (Lightning Impulse chopped Wave)

1. เปลี่ยน R_f, R_t เป็นแบบรูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า
2. ต่อวงจรตามรูปที่ 6.49
3. สร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยทดสอบที่ แรงดันทั้งชั่ว บวก และ ชั่วลบของสัญญาณ
4. บันทึกผลการทดลอง และ Print ผลรูปคลื่น
5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ ตอนที่ 1

ตารางที่ 6.4

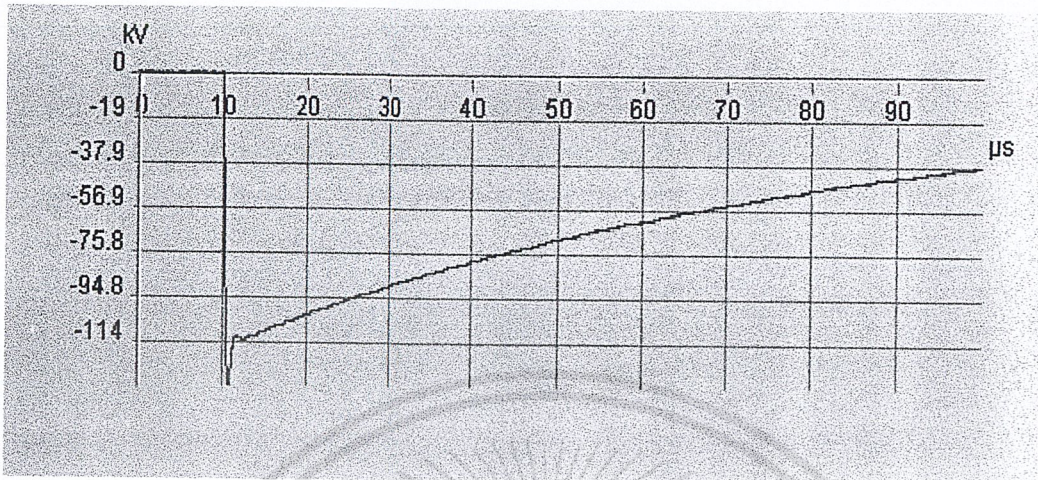
แสดงค่า พารามิเตอร์ (Parameter) ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลท์

ข้อของ แรงดัน	แรงดัน ประจุ (kV/state)	R0 (Ω)	แรงดันอิมพัลส์ (kV)			เวลาช่วงหน้า คลื่น (μ sec)	เวลาช่วงหลัง คลื่น (μ sec)	ระยะ แกป (mm.)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
+	62.5	35	131	131	131	0.63	44.93	24.50
	85	35	172	173	174	0.65	46.97	36.60
	62.5	65	117	117	114	0.75	55.77	24.50
	85	65	155	155	155	0.78	56.83	36.80
	62.5	100	99.3	102	103	1.11	57.70	24.43
-	85	100	140	142	143	1.13	59.43	36.50
	62.5	35	131	132	132	0.63	45.50	24.70
	85	35	172	175	175	0.64	47.76	36.73
	62.5	65	115	116	115	0.77	55.53	24.50
	85	65	150	151	152	0.75	59.00	36.80
	62.5	100	111	111	112	1.08	58.13	24.50
	85	100	145	146	146	1.12	60.16	36.56

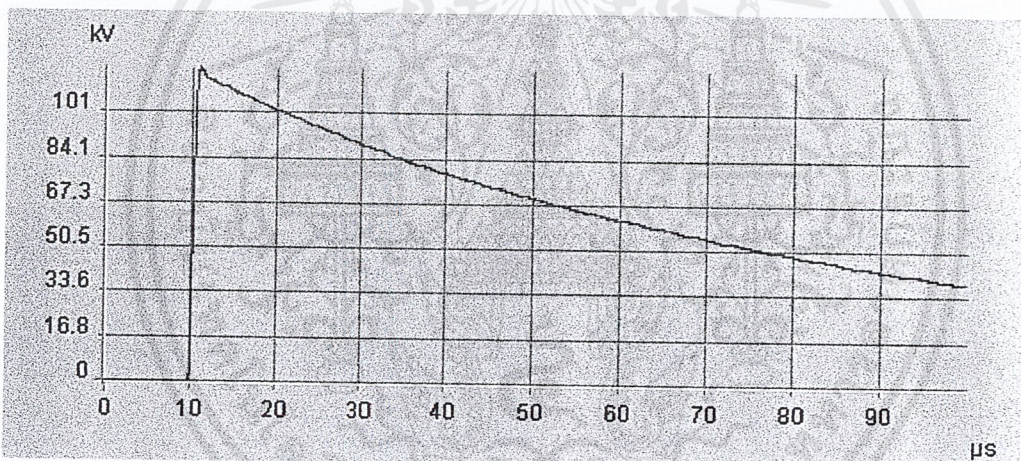
หมายเหตุ

- เวลาหน้าคลื่นและเวลาหลังคลื่นเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง
- ค่าระยะแถบเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง
- เวลาช่วงหน้าคลื่น = T1, เวลาช่วงหลังคลื่น = T2, R0 = เอกลักษณ์ที่แคบ

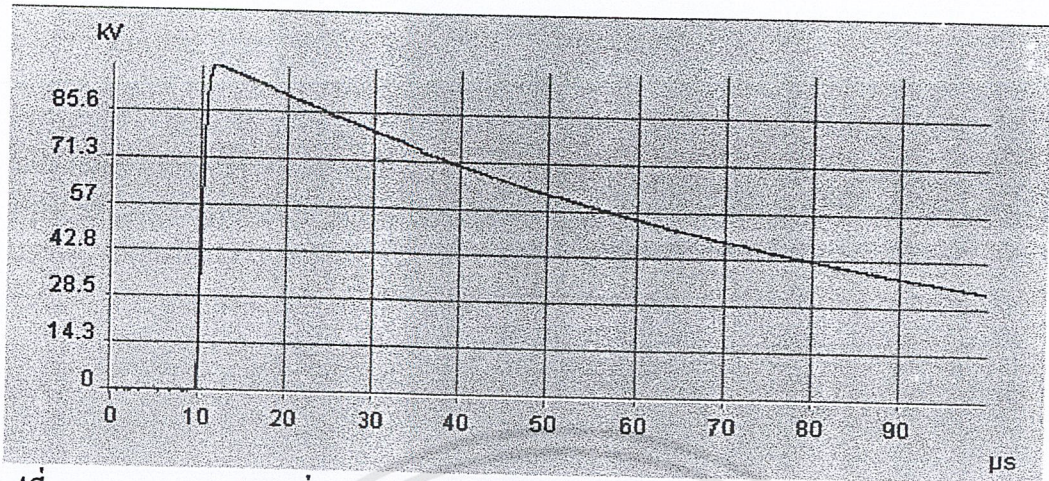




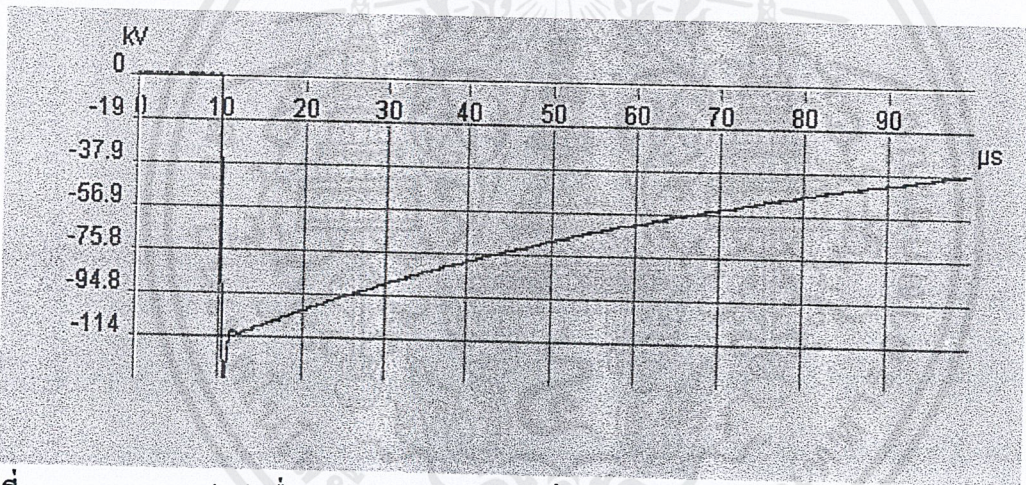
รูปที่ 6.50 แสดงกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ 62.5 kV/state $R_0 = 35 \Omega$



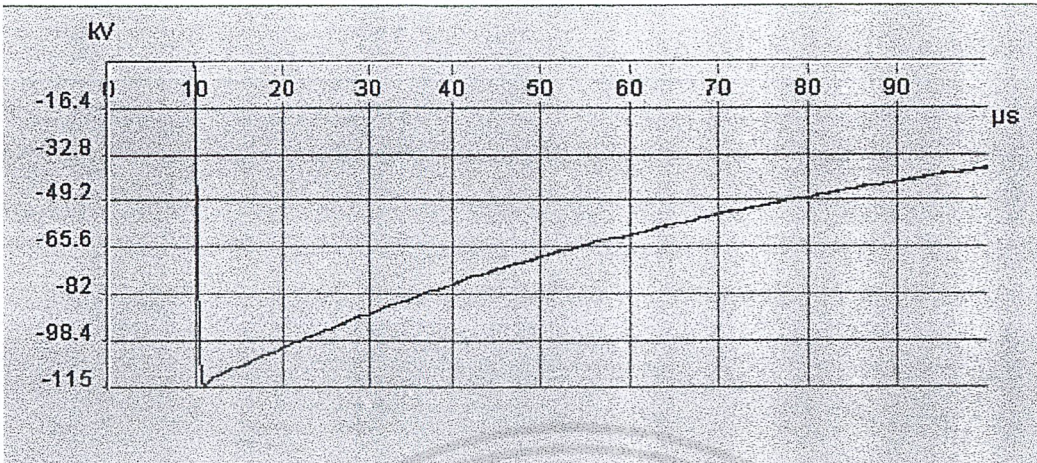
รูปที่ 6.51 แสดงกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ 62.5 kV/state $R_0 = 65 \Omega$



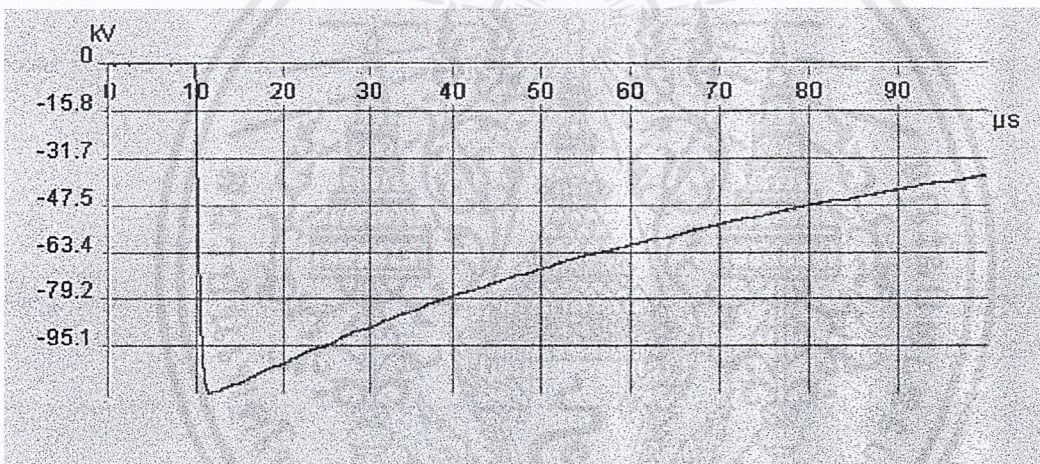
รูปที่ 6.52 แสดงกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัตรา 62.5 kV/state $R_0 = 100 \Omega$



รูปที่ 6.53 แสดงกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัตรา -62.5 kV/state $R_0 = 35 \Omega$



รูปที่ 6.54 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ -62.5 kV/state $R_0 = 65 \Omega$



รูปที่ 6.55 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ที่แรงดันอัดประจุ -62.5 kV/state $R_0 = 100 \Omega$

ผลการทดสอบ ตอนที่ 2 (Switching Impulse)

ตารางที่ 6.5

แสดงค่า พารามิเตอร์ (Parameter) ของแรงดันอินพัลส์ที่ติดตั้ง (Switching Impulse) เครื่องกำเนิดอินพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลท์

ชื่อของแรงดัน	แรงดันประจุ (kV/state)	R0 (Ω)	แรงดันอินพัลส์ (kV)				เวลาช่วงหน้าคลื่น (μsec)	เวลาช่วงหลังคลื่น (μsec)	T ₉₀ (μsec)	ระยะแกป (mm.)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย				
+	95	0	75.4	75.2	75.5	75.36	207.15	2347.67	487.20	18.10
	145	0	115.0	115.0	115.0	115.00	209.75	2372.00	486.81	30.93
	95	35	75.9	75.9	76.0	75.93	206.75	2361.67	493.53	18.13
	145	35	116.0	116.0	116.0	116.00	216.25	2367.00	494.51	30.80
	95	65	75.9	75.9	75.9	75.90	208.16	2353.00	490.99	18.10
	145	65	116.0	116.0	116.0	116.00	210.00	2374.00	497.69	30.00
	95	100	72.4	72.1	73.0	72.50	209.33	2342.00	491.80	18.10
	145	100	112.0	112.0	112.0	112.00	210.58	2367.67	500.19	31.00

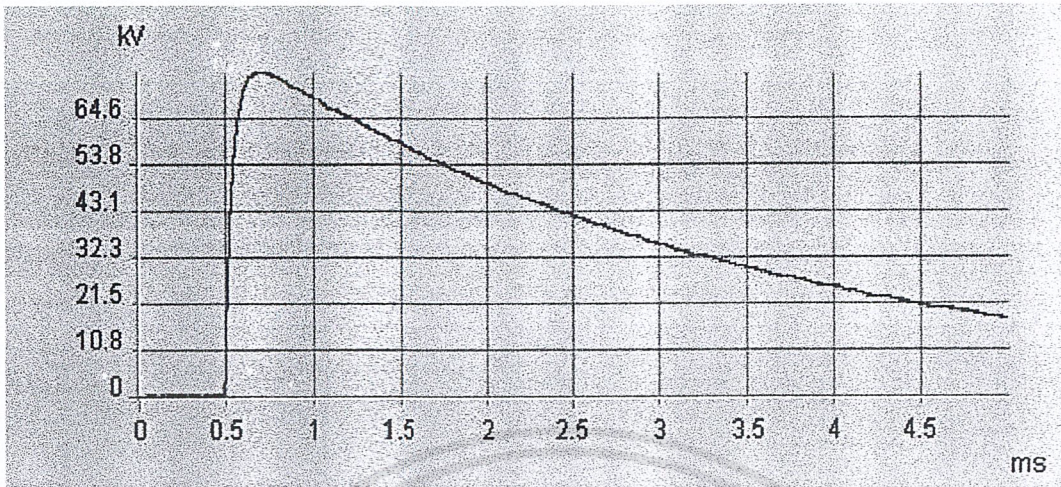
ตารางที่ 6.5 (ต่อ)

แสดงค่า พารามิเตอร์ (Parameter) ของแรงดันอินพัลส์สวิตจิง (Switching Impulse) เครื่องกำเนิดอินพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลท์

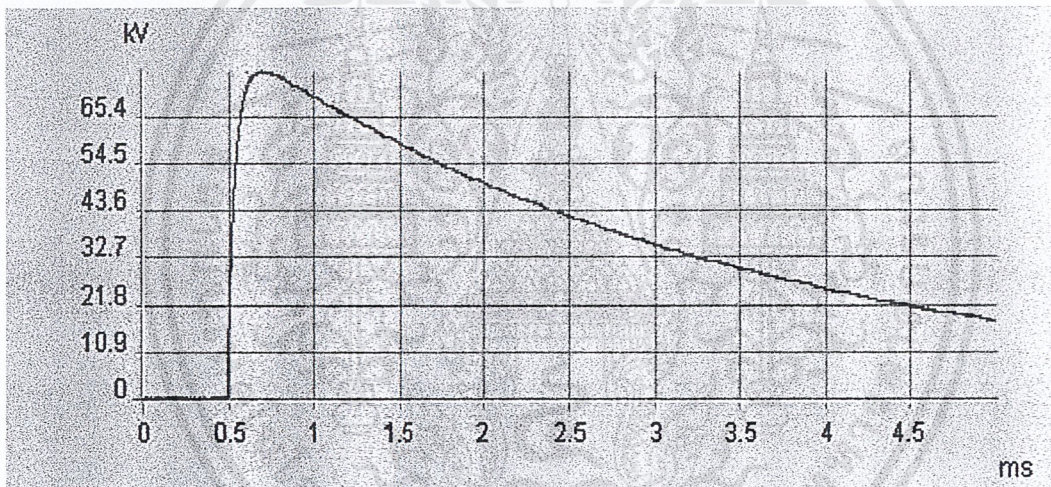
ชื่อของแรงดัน	แรงดันประจุ (kV)	R_0 (Ω)	แรงดันอินพัลส์ (kV)			เวลาช่วงหน้าคลื่น (μ sec)	เวลาช่วงหลังคลื่น (μ sec)	T_{90} (μ sec)	ระยะแกป (mm.)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
	95	0	74.9	74.8	74.5	74.7	2365.67	498.02	18.00
	145	0	114.0	114.0	114.0	114.0	2402.33	504.05	30.90
	95	35	75.9	75.9	76.0	75.9	2378.67	499.26	18.17
	145	35	116.0	116.0	117.0	116.3	2409.00	514.31	31.00
	95	65	76.1	76.1	76.4	76.2	2380.67	503.86	18.10
	145	65	116.0	116.0	116.0	116.0	2405.00	508.15	30.80
	95	100	73.8	74.2	74.2	74.1	2373.00	496.01	18.00
	145	100	112.0	112.0	112.0	112.0	2389.67	507.38	31.10

หมายเหตุ

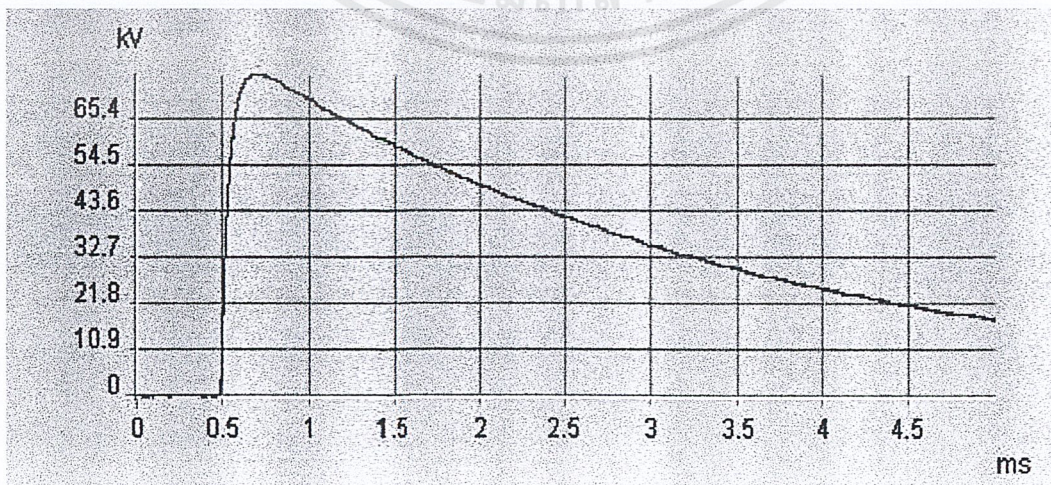
- เวลาหน้าคลื่น, เวลาช่วงคลื่นตัด, ระยะแกปและเวลาที่ 90% เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง
- เวลาหน้าคลื่น = T_1 , เวลาหลังคลื่น = T_2 , R_0 = เอกลักษณ์พีเดเมนท์, T_{90} = เวลาที่ค่าแรงดันมีค่าเท่ากับ 90% ของค่ายอด



รูปที่ 6.56 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง ที่แรงดันอัดประจุ 47.5 kV/state $R_0 = 0 \Omega$

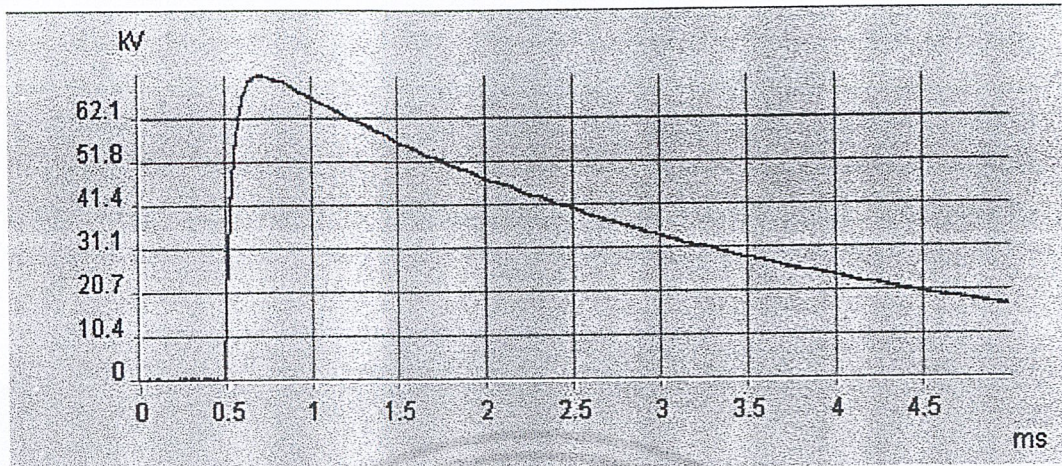


รูปที่ 6.57 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งที่แรงดันอัดประจุ 47.5 kV/state $R_0 = 35 \Omega$

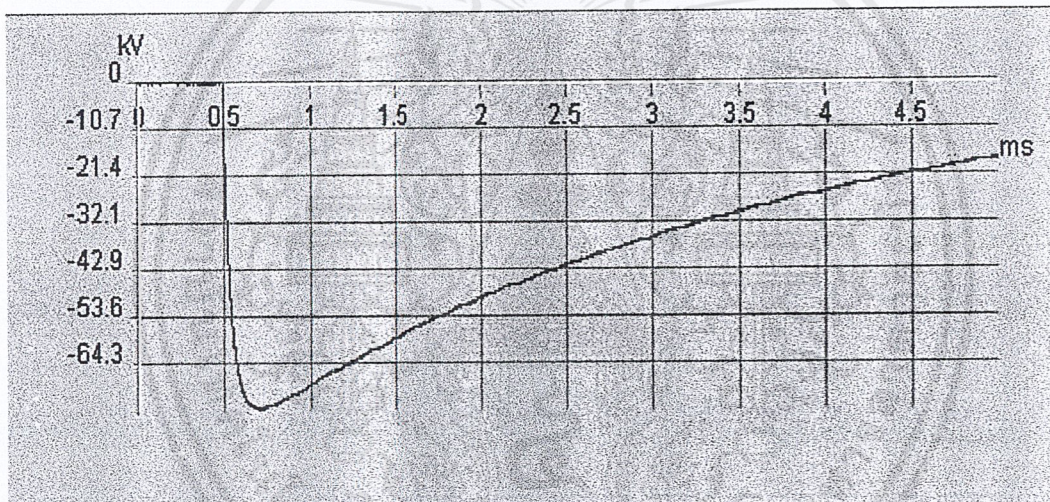


รูปที่ 6.58 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง ที่แรงดันอัดประจุ 47.5 kV/state $R_0 = 65 \Omega$

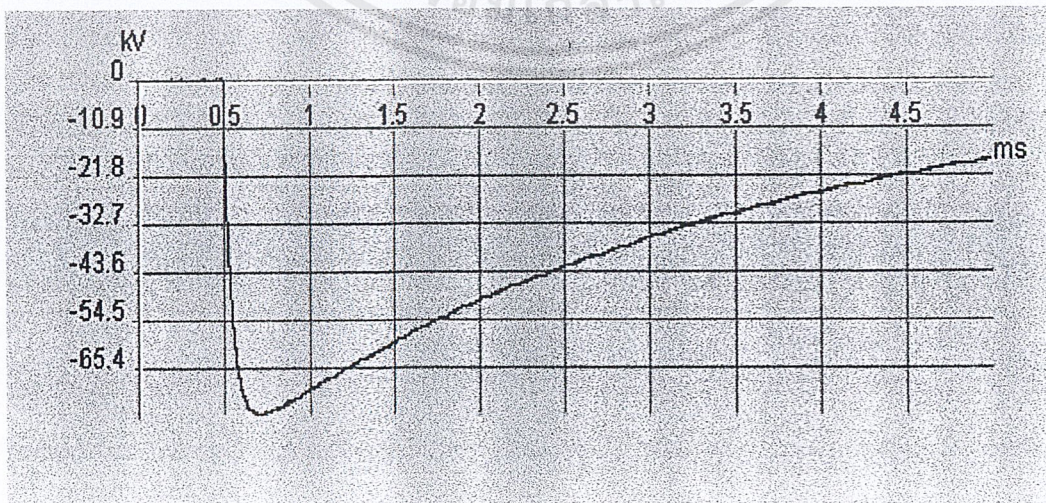
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.59 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง ที่แรงดันอัดประจุ 47.5 kV/state $R_0 = 100 \Omega$

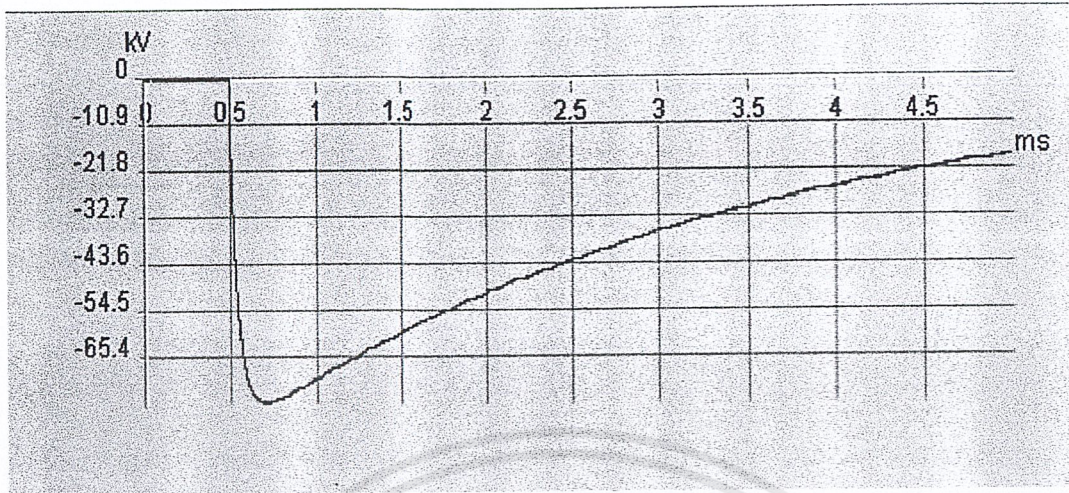


รูปที่ 6.60 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง ที่แรงดันอัดประจุ -47.5 kV/state $R_0 = 0 \Omega$

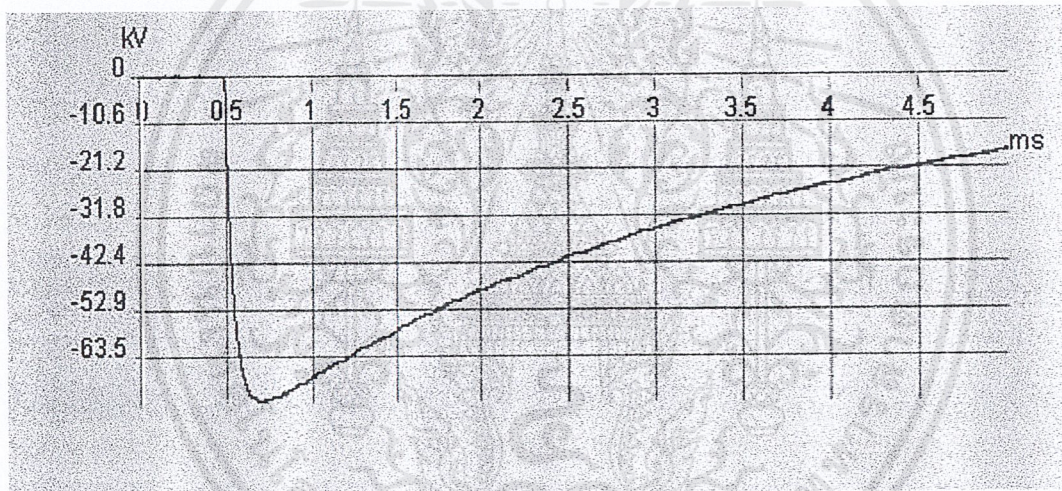


รูปที่ 6.61 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง ที่แรงดันอัดประจุ -47.5 kV/state $R_0 = 35 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.62 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอินพุตพัลส์สวิดซิ่ง ที่แรงดันอัดประจุ -47.5 kV/state $R_0 = 65 \Omega$



รูปที่ 6.63 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอินพุตพัลส์สวิดซิ่ง ที่แรงดันอัดประจุ -47.5 kV/state $R_0 = 100 \Omega$

ผลการทดสอบ ตอนที่ 3

ตารางที่ 6.6

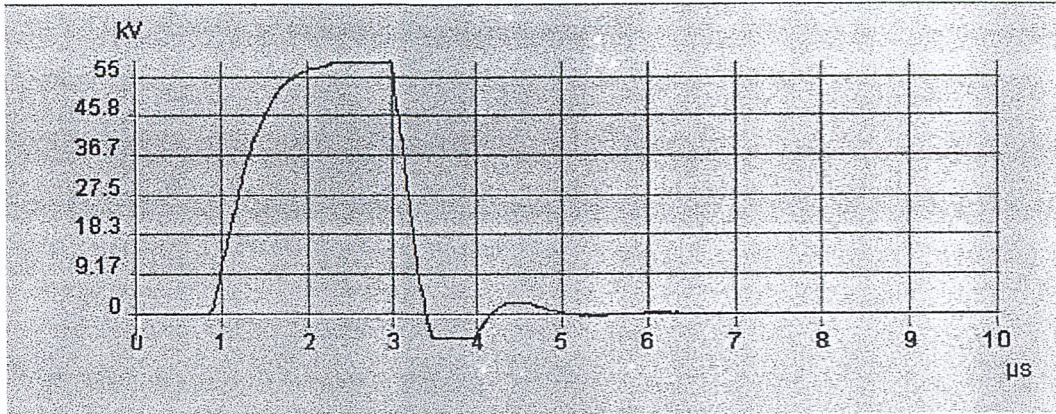
แสดงค่า พารามิเตอร์ (Parameter) ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบคลื่นตัด (Lightning Impulse Chopped Wave) เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลท์

ชื่อของ แรงดัน	ระยะแกป วัตถุ ทดสอบ (cm.)	แรงดันประจุ (kV/strate)						แรงดันอิมพัลส์ (kV)			เวลาช่วง หน้าคลื่น (μ sec)	เวลาช่วง คลื่นตัด (μ sec)	ระยะ แกป (mm.)
		ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1			
+	1	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	29.7	31.1	32.0	30.9	1.05	1.72	4.90
	2	33.5	33.0	33.0	33.0	33.1	56.6	58.6	59.5	58.2	1.08	1.97	10.50
	3	48.0	47.5	49.0	49.0	48.1	80.9	82.4	86.1	83.0	1.09	2.63	18.23
	4	62.0	62.0	61.0	61.0	62.0	105.0	106.0	107.0	106.0	1.08	2.76	23.86
-	1	19.5	19.0	19.0	19.0	19.1	34.6	34.8	34.8	34.7	1.08	1.30	5.46
	2	33.5	34.0	34.0	34.0	33.8	59.1	61.2	61.2	60.5	1.04	2.47	10.70
	3	49.0	50.5	50.0	50.0	49.8	84.5	87.8	89.2	87.1	1.08	2.33	19.00
	4	68.0	63.5	64.0	64.0	45.1	117.0	112	115.0	114.6	1.08	3.11	25.43

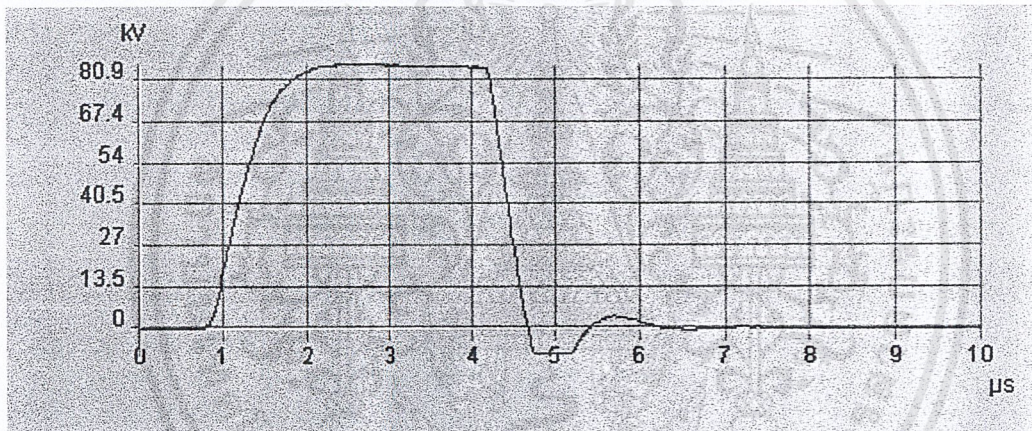
หมายเหตุ - จากค่าที่ได้ค่าที่เป็นตัวแปรต้นคือ ระยะแกปของ Sphere ที่ทดสอบ และแรงดันที่เบรคดาวน์จะมี 3 ค่า แล้วนำมาเฉลี่ย

- ค่าเวลาช่วงคลัตช์ , เวลาช่วงหน้ำคลัตช์ , ระยะแถบของเครื่องกำเนินคิมพัลส์ เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง
- เวลาช่วงหน้ำคลัตช์ = $T1$, เวลาช่วงคลัตช์ตัด = Tc

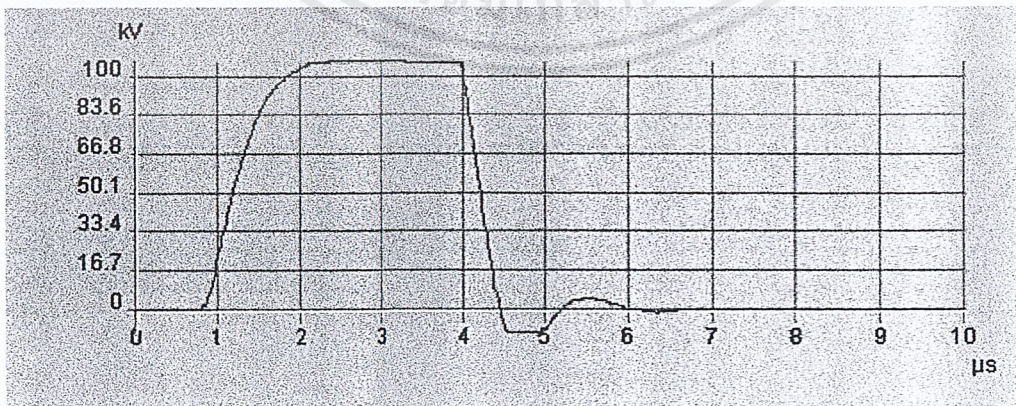




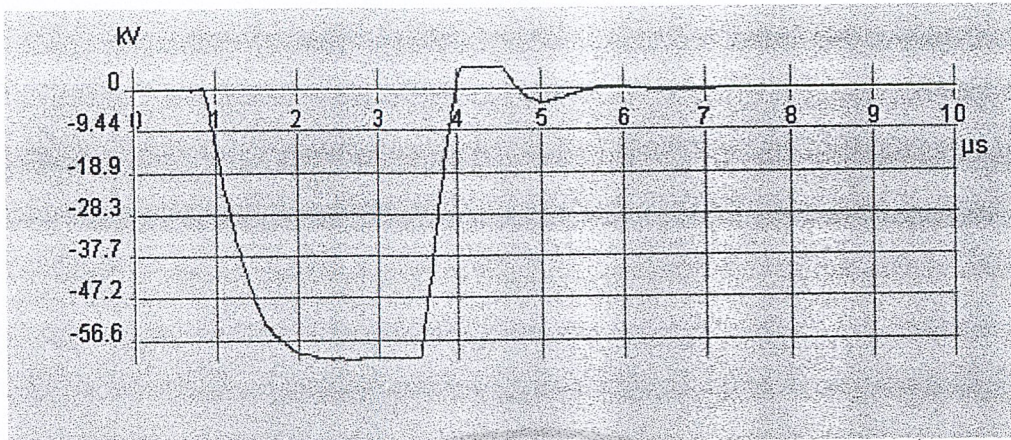
รูปที่ 6.64 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันขั้วบวก ,
ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 2 cm.



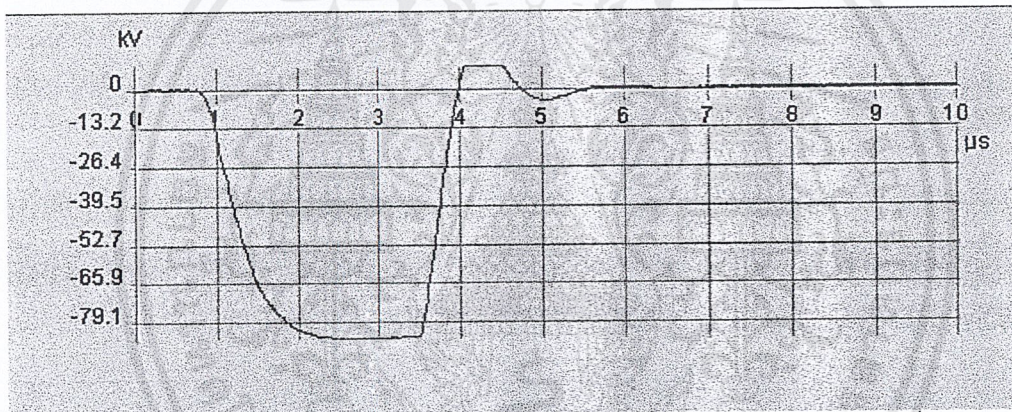
รูปที่ 6.65 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันขั้วบวก ,
ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 3 cm.



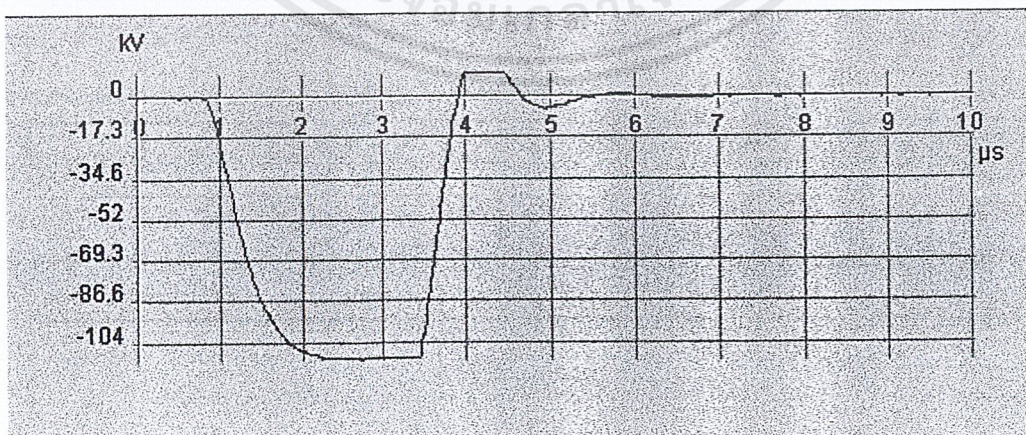
รูปที่ 6.66 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันขั้วบวก ,
ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 4 cm.



รูปที่ 6.67 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันขั้วลบ ,
ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 2 cm.



รูปที่ 6.68 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันขั้วลบ ,
ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 3 cm.



รูปที่ 6.69 กราฟแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด ที่แรงดันขั้วลบ ,
ระยะระหว่างทรงกลมทดสอบ = 4 cm.

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบตอนที่ 1 พบว่า แรงดันอิมพัลส์ เวลาช่วงหน้าคลื่น เวลาช่วงหลังคลื่น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มค่า R_0 เนื่องจาก R_0 เป็นตัวหน่วงในการ ชาร์จ และ ดิสชาร์จ จะเกิด Overshoot ขึ้นที่ค่า $R_0 = 35 \Omega$ เนื่องจากค่าหน่วงในการ ชาร์จและดิสชาร์จน้อย โดยรวมแล้ว ค่า เวลาช่วงหน้าคลื่น และเวลาช่วงหลังคลื่น ได้มาตรฐาน

จากการทดสอบตอนที่ 2 พบว่า แรงดันอิมพัลส์ เวลาช่วงหน้าคลื่น เวลาช่วงหลังคลื่น มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปลี่ยน R_0 โดยรวมแล้วค่าที่ได้มาตรฐาน

จากการทดสอบตอนที่ 3 พบว่า แรงดันอิมพัลส์เพิ่มขึ้นตามระยะเก็บทรงกลมที่ใช้ทดสอบ เวลาช่วงหน้าคลื่นใกล้เคียงกัน แต่เวลาช่วงคลื่นตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเก็บของทรงกลม ทดสอบ



บทที่ 7

การวางแผนการเคลื่อนย้ายเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ และ 1500 กิโลโวลต์

7.1 การเคลื่อนย้าย และติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์

ขั้นตอนการเคลื่อนย้าย

1. ถอดแยกชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องทั้งในส่วนของอุปกรณ์แรงสูง และอุปกรณ์ชุดควบคุมเพื่อเตรียมขนย้าย
2. เคลื่อนย้ายแผ่นอลูมิเนียมรองพื้นจากห้องเก่าไปติดตั้งยังโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่
3. เคลื่อนย้ายเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ ไปติดตั้งยังโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่ และต่อสายสัญญาณทั้งหมดดั้งเดิม

วัสดุอุปกรณ์และพาหนะที่ต้องใช้

- | | |
|---|--------|
| 1. สว่านเจาะ (พร้อมคอกสว่านเจาะพื้นปูนและอลูมิเนียม) | 1 ชุด |
| 2. เครื่องตัด (เจีย) โลหะ | 1 ชุด |
| 3. Revet พร้อมลูก | 1 ชุด |
| 4. รถกระบะขนย้าย | 1 คัน |
| 5. แผ่นทองแดงรีดบาง (Copper strip) ความกว้างXความยาว 0.2 x 1 เมตร | 1 แผ่น |
| 6. พุกฝังพื้น และน็อตยึด | 1 ชุด |
| 7. หนังสือขอเคลื่อนย้ายครุภัณฑ์ | 1 ชุด |
| 9. เครื่องปรับอากาศในห้องควบคุม | 1 ชุด |

7.2 การเคลื่อนย้าย และติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลท์

ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายเครื่อง

ขั้นที่1 การเตรียมการก่อนวันเคลื่อนย้าย

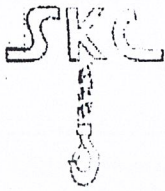
1. ติดต่อบริษัท S.K CRANE & SERVICE CO., LTD. (บริษัท อัญระพร เอ็นจิเนียริง จำกัด) ซึ่งเป็นบริษัทที่เคยทำการติดตั้งเครนในโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงเดิม ให้มาทำการเคลื่อนย้ายเครนไปติดตั้งในโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่



ใบเสนอราคาขายเครน บริษัท S.K CRANE & SERVICE CO., LTD.

26-DEC-01 15:39

P.01



บริษัท เอส.เค.เครน แอนด์ เซอร์วิส จำกัด
S. K. CRANE & SERVICE CO.,LTD.

อาคาร หมู่ที่ 7 ถนนแจ้งวัฒนะ เขตจตุจักร จังหวัด กรุงเทพฯ 10220 โทร : 521-7633-5, 521-7647 โทรสาร : 521-7644
Kasatua Moo 7, Chulalongkorn Rd., Anusavari, Bangkok, Bangkok 10220 Tel. : 521-7633-5, 521-7647 Fax : 521-7644

ใบเสนอราคา

26 ธันวาคม 2544

พี.261201/3

ภาควิศวกรรมไฟฟ้า

สถานีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ : 01 - 733 - 9708

โทรสาร : 0 - 2514 - 1000

เรื่อง ขอเสนอเช่ากรู้อะไหล่และขั้วไฮดรอลิกเครน ขนาด 5 ตัน

เรียน รศ.ศิริวัฒน์ โทษิวาฑกุล และ คุณสุจิตี ศังหาวิฑกุล

ข้อที่ 1 ค่าบริการ

รายการที่ 1 ราคากลางและรวมพร้อมอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดทดสอบไฟฟ้าเดิม

รายการที่ 2 ขนย้ายซากทั้งหมดทดสอบไฟฟ้าเดิมไปทั้งหมดทดสอบไฟฟ้าใหม่

รายการที่ 3 ขาดคิดตั้งวางและยกากลางพร้อมอุปกรณ์ไฟฟ้า

รวมรายการที่ 1-3 ราคา 60,000 บาท

หมายเหตุ

1.ราคานี้ยังไม่รวมค่าขนส่งและค่าเก็บ

2.ราคานี้ยังไม่รวมค่าอะไหล่อื่น ๆ ที่จะต้องเปลี่ยนเนื่องจากหมดสภาพการใช้งาน

ซึ่งต้องทำการเช็คว่ามีอะไรที่จำเป็นต้องเปลี่ยน

ขอแสดงความนับถือ

(นายอนุชิต อิมพัทธ์)

2. ติดบริษัทรถบรรทุกเครน รถกระเช้า ซ้อ เช่าอุปกรณ์ทุกอย่างที่ต้องใช้ในการเคลื่อนย้าย
3. เตรียมเนื้อคสำหรับยึดฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่โรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่
4. ถอดสายสัญญาณและสายจ่ายไฟทั้งหมด
5. ถอดความต้านทาน Rs (Switching resistor) ออกและสายเชื่อมระหว่าง Sphere gap และ Shunt capacitor

6. ถอด Spark gap $\phi 25$ mm., เสายึด Spark gap, Discharge resistor, Damping resistor, Charging resistor, Static resistor แต่ยังคงเหลือ Static capacitor แทนรองแต่ละชั้นและฉนวนลูกถ้วย

7. จัดหากระเช้าและสาย Safety ที่ใช้ทำงานในที่สูง เพื่อทำการปลด Sphere gap ที่แขวนติดกับเพดานลงมาโดยใช้รอกมือเป็นอุปกรณ์ช่วย

8. ถอดแยก Shunt capacitor ออกเป็น 3 ชั้น เพื่อสะดวกในการเคลื่อนย้าย
9. ถอดแยกชิ้นส่วนของ Impulse generator ทีละ 2 ชั้นและฐานยึด
10. จัดแยกอุปกรณ์ที่ถอดแยกชิ้นส่วนเก็บไว้เป็นหมวดหมู่เพื่อทำการเคลื่อนย้ายต่อไป
11. ถอดประตูทางออกส่วนบนและรางเลื่อนออกเพื่อให้รถเครนสามารถยกอุปกรณ์ออกจากห้องได้
12. เคลื่อนย้าย Charger, เครื่องปรับ Sphere gap $\phi 100$ cm., Shunt capacitor, Control desk มาไว้ตรงทางออก

ขั้นที่ 2 การเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ออกจากโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงเดิม

1. ใช้รถบรรทุกติดเครนเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ไปยังห้องทดสอบใหม่และจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสมในการประกอบ และอำนวยความสะดวกในการเข้าออกของรถขนย้ายและรถกระเช้าที่จะมาดำเนินการต่อไป
2. ใช้รถเครนและนั่งร้านช่วยในการประกอบ Impulse gen. ที่จุดที่เตรียมเนื้อคยึดไว้แล้ว

ขั้นที่ 3 การติดตั้ง Sphere gap กับเพดานโรงประลองไฟฟ้าแรงสูง

1. ใช้รถกระเช้าขึ้นไปติดรอกกับจุดยึดของโครงหลังคา เพื่อที่จะใช้ยก Sphere gap ขึ้นไปติดตั้ง พร้อมทั้งติดจุดยึดจำนวน 4 จุด
2. ใช้รอกที่ติดไว้ยก Sphere gap ขึ้นไปติดกับจุดยึดที่เตรียมไว้

หมายเหตุ เนื่องจากความสูงของทดสอบเปลี่ยนไปจึงต้องใช้ลวดยึดที่ยาวกว่าเดิม 4 เมตร

วัสดุอุปกรณ์และพาหนะที่ต้องใช้ในขั้นที่ 1

1. กระเช้า (รับน้ำหนักได้ 150 กิโลกรัม)	1 ตัว
2. รอกมือรับน้ำหนักได้ 1 คัน (คิดที่ความสูงสูงสุด 16 เมตร)	1 ตัว
3. เครื่องตัดโลหะ	1 เครื่อง
4. ลวดสลิง	2 เส้น
5. นั่งร้าน (พร้อมล้อเลื่อน)	2 ชุด
6. ชุดเครื่องมือในการถอดชิ้นส่วน	1 ชุด
7. ชุดน็อตยึดฐานเครื่องกำเนิดฯ	1 ชุด

วัสดุอุปกรณ์และพาหนะที่ต้องใช้ในขั้นที่ 2

1. รถบรรทุกติดเครนยกน้ำหนักได้สูงสุด 2 ตัน ยกได้สูง 7 เมตร	1 คัน
2. นั่งร้าน (พร้อมล้อเลื่อน)	2 ชุด
3. ชุดเครื่องมือในการประกอบ	1 ชุด
4. ลวดสลิง	2 เส้น

วัสดุอุปกรณ์และพาหนะที่ต้องใช้ในขั้นที่ 3

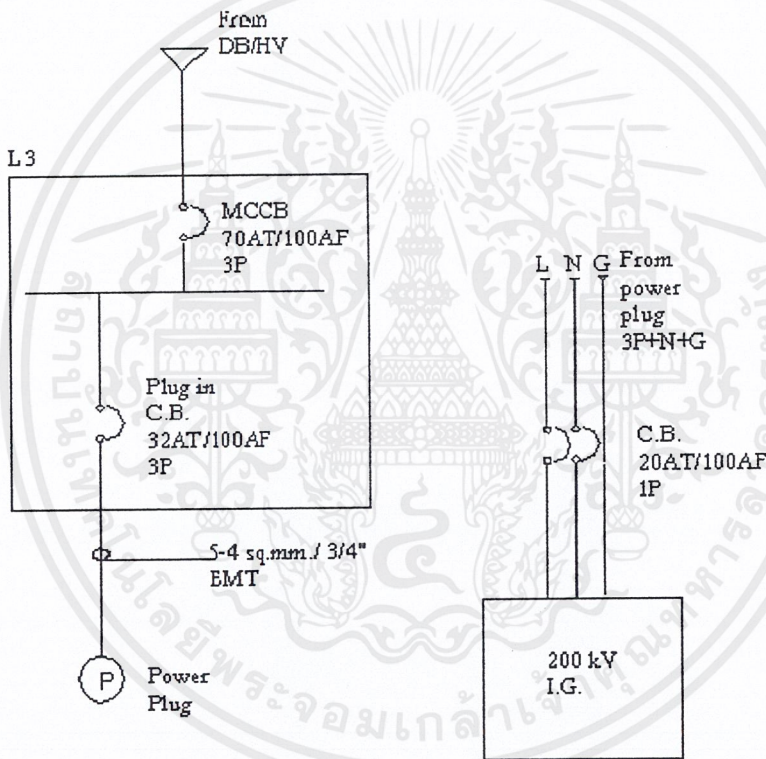
1. รถกระเช้ายกได้สูง 16 เมตร	1 คัน
2. รอกมือรับน้ำหนักได้ 1 คัน (คิดที่ความสูงสูงสุด 16 เมตร)	1 ตัว
3. Clamp ยึด Sphere gap จำนวน (600 kg 1 set, 200 kg 3 set)	4 ตัว
4. เครื่องตัดโลหะและตัดฝ้า	1 ตัว

ตารางที่ 7.1
ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการดำเนินงานเคลื่อนย้ายและติดตั้ง

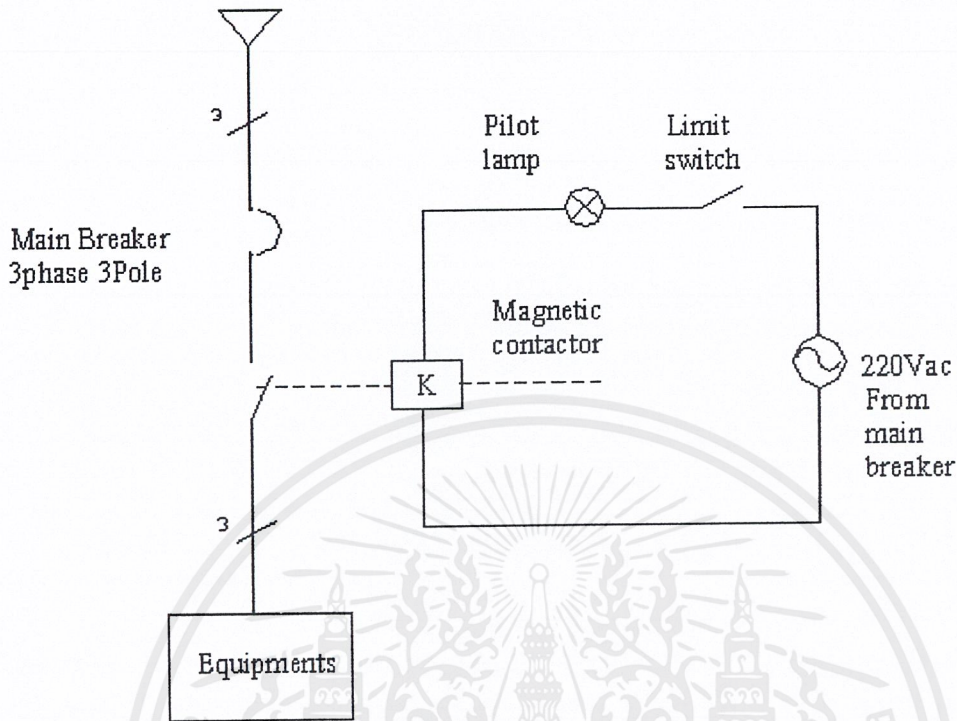
ลำดับที่	รายการ	จำนวนเงิน (บาท)	หมายเหตุ
1	ค่าเช่ารถบรรทุกติดเครนในการขนย้าย	4,000/วัน	ใช้ระยะเวลา 3 วัน
2	ค่าเช่ารถกระเช้าในการติดตั้ง	4,500/วัน	ใช้ระยะเวลา 3 วัน
3	รถยกพิคค 1 คัน	6,800 /1set	
4	เครื่องปรับอากาศและค่าติดตั้ง(ขนาด 24,000 BTU)	31,565/1ชุด	ห้องควบคุมมีพื้นที่ 28 ตารางเมตร
5	ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบไฟฟ้าในห้องทดสอบ 6.1 Magnetic contactor – ขนาด 80 A (3 Main contactot) 6.2 Circuit Breaker 70AT/100AF ,3P IC> = 18kA	1,550/1ตัว 650/1ตัว	ใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องทดสอบเดิม(สายไฟและเบรกเกอร์)
6	ลวดสลิงความยาว 7 เมตร พร้อมตะขอ	2,000/2เส้น	ใช้จำนวน 2 เส้น
7	สาย Safety สำหรับทำงานในที่สูง	1,330/ชุด	ใช้จำนวน 1 ชุด
8	รื้อกั้นเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลท์, เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรง 600 กิโลโวลท์ และประตูทางเดิน	20,000	พื้นที่ทั้งหมด 25.5 ตารางเมตร
9	ค่ารถถอน ขนย้าย และติดตั้งเครนติดเพดาน	60,000	ระยะเวลา 7 วัน
	รวม	149,395	บาท

สรุปผลการดำเนินการเคลื่อนย้าย

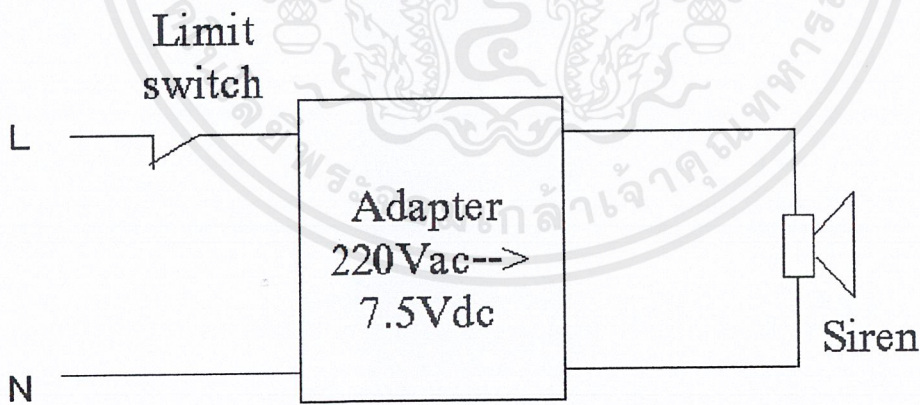
เนื่องมีปัญหาเรื่องงบประมาณในการดำเนินการเคลื่อนย้าย ดังนั้นจึงได้ทำการเคลื่อนย้ายเฉพาะเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 กิโลโวลต์ ทำการเคลื่อนย้ายโดยใช้งบประมาณของผู้จัดทำ และทำการติดตั้งด้วยตัวเองทั้งหมด ส่วนเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 กิโลโวลต์ ต้องใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ และแรงงานในการเคลื่อนย้ายซึ่งมีงบประมาณสูง ส่วนรั้วกันและประตูก็มีปัญหาเรื่องงบประมาณเช่นกัน



รูปที่ 7.1 วงจรการติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์



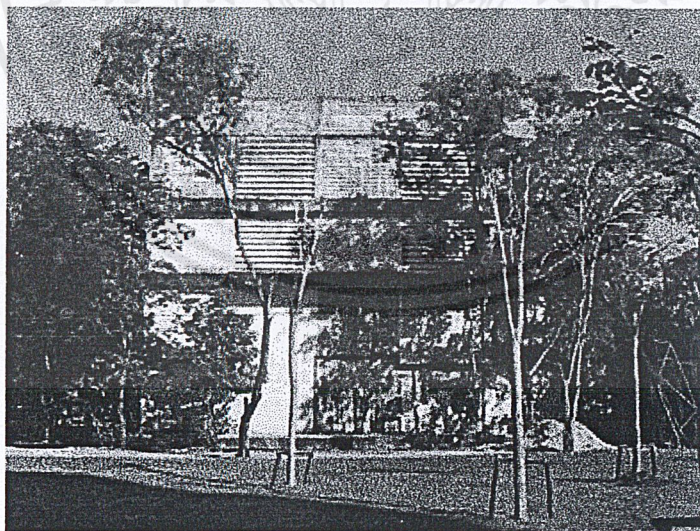
รูปที่ 7.2 วงจรควบคุมความปลอดภัย



รูปที่ 7.3 วงจรสัญญาณเตือนให้ปิดประตู

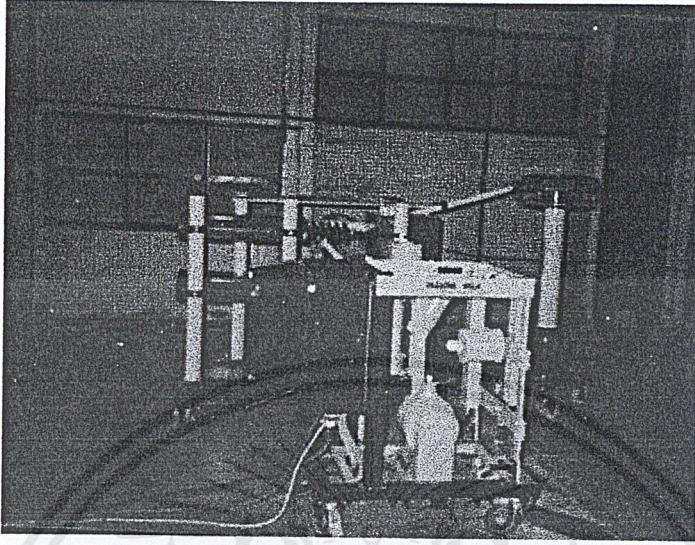


รูปที่ 7.4 แสดงโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่ อาคารปฏิบัติการรวมวิศวกรรมศาสตร์ 2

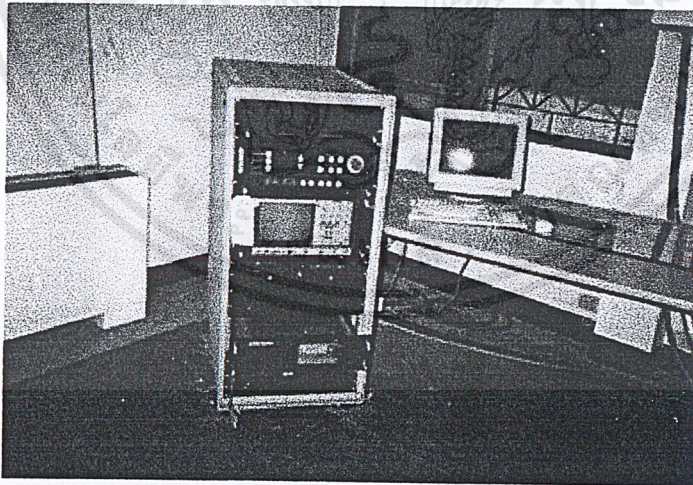


รูปที่ 7.5 แสดงโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงเดิม

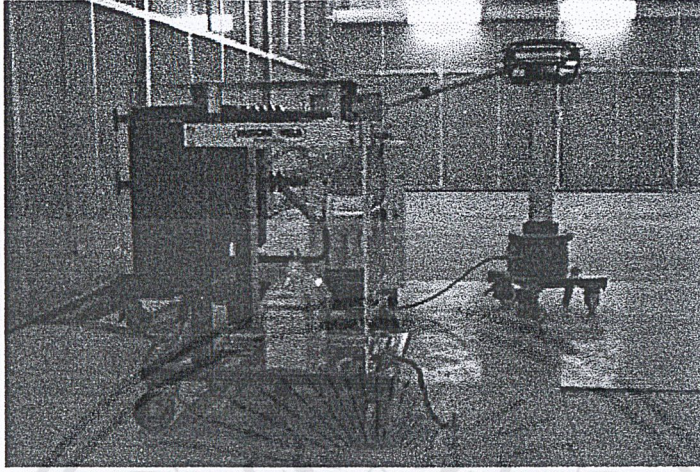
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



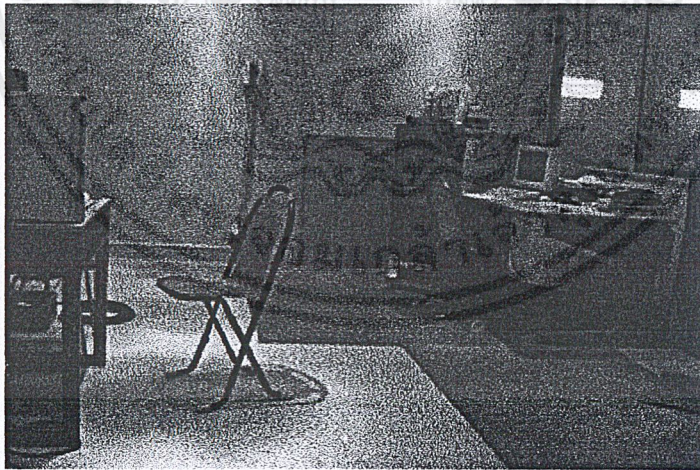
รูปที่ 7.6 แสดงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ ที่ติดตั้งในโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงเดิม



รูปที่ 7.7 แสดงชุดควบคุมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ติดตั้งในห้องควบคุม
โรงประลองไฟฟ้าแรงสูงเดิม



รูปที่ 7.8 แสดงการเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ ที่ติดตั้งในโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่ อาคารปฏิบัติการรวมวิศวกรรมศาสตร์ 2



รูปที่ 7.9 แสดงชุดควบคุมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ ที่ติดตั้งในห้องควบคุมโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่ อาคารปฏิบัติการรวมวิศวกรรมศาสตร์ 2

บทที่ 8

สรุปและวิจารณ์การดำเนินการทั้งหมด

สรุปผลการดำเนินงานทั้งหมดที่ผ่านมา

- ได้ทำการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ จากที่ไม่สามารถใช้งานได้ จนสามารถใช้งานได้ตามปกติ และได้ทำการเคลื่อนย้ายและติดตั้งในโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่ใหม่และใช้เป็นเครื่องมือในโครงการทดสอบหัวล่อฟ้าตามมาตรฐาน เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ซึ่งเครื่องสามารถใช้งานได้ตามปกติ ไม่มีอาการรวนของคอมพิวเตอร์ดังเช่นโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงเดิมแต่อย่างใด

- ทำการออกแบบและวางผังอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยคำนึงถึงระยะห่างความปลอดภัย คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ และ 1500 กิโลโวลต์ รวมถึงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ลงในโรงประลองไฟฟ้าแรงสูง แต่ยังมีปัญหาทางด้านงบประมาณการเคลื่อนย้ายเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์

ข้อเสนอแนะในการดำเนินการต่อไป

- การเคลื่อนย้ายเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์ ได้ทำการอธิบายวิธีดำเนินการเคลื่อนย้าย และทำการออกแบบ วางผังอุปกรณ์ในห้องประลองไฟฟ้าแรงสูงไว้ เพื่อให้ทางภาควิชาสามารถทำการเคลื่อนย้ายได้ต่อไป

- โรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่ควรมีการทดสอบระบบกราวนด์ ก่อนที่จะมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์ และอุปกรณ์แรงสูงอื่น ๆ

- จากผลการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 กิโลโวลต์ พบว่ารูปคลื่นที่ได้ไม่ได้มาตรฐาน เนื่องจากอายุการใช้งานของเครื่องและความเสียหายของอุปกรณ์ที่เป็นอยู่ ดังนั้นควรได้รับการตรวจเช็คจากบริษัทผู้ผลิต หรือผู้เชี่ยวชาญต่อไป

- ควรจะดำเนินการคิดเครื่องปรับอากาศในห้องควบคุม โรงประลองไฟฟ้าแรงสูงใหม่โดยรีบด่วน เนื่องจากชุดควบคุมเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความร้อนในขณะที่ใช้งานสูง อีกทั้งห้องควบคุมยังมีอุณหภูมิสูง อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องและอายุการใช้งานของเครื่องในระยะยาวได้

- จัดทำระบบความปลอดภัยของการใช้งานโรงประลองไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงรั้วกัน ประคูดทางเดิน ตามที่ได้ออกแบบในโครงการนี้หรือปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นต่อไป
- ศึกษาผลกระทบของ EMI (Electromagnetic Interference) ที่มีผลต่อเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ประโยชน์ที่ผู้จัดทำได้รับจากโครงการนี้

- สามารถนำความรู้เกี่ยวกับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การออกแบบวางผังห้องประลองไฟฟ้าแรงสูง ไปใช้ในการทำงานต่อไปในอนาคต
- เรียนรู้การทำงานเป็นทีม รู้จักคิด วางแผนการดำเนินงาน การลงมือทำงานในระดับปฏิบัติการ และเรียนรู้การติดต่อประสานงานกับบุคคลหลายระดับ หลากหลายองค์กร ในการขอความช่วยเหลือในการดำเนินงาน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการทำงานต่อไปในอนาคต
- สามารถใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ในการทดสอบฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ระดับแรงดัน 24 และ 33 กิโลโวลต์
- สามารถใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์ในการทดสอบหัวล่อฟ้าตามมาตรฐาน

ฐาน



ภาคผนวก ก

IEC Standard Publ. No.60-1989.

High Voltage Test Techniques

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

HIGH VOLTAGE TEST TECHNIQUES

Part 1: General definitions and test requirements

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects examined.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by IEC Technical Committee 42: High Voltage testing techniques .

The text of this standard is based upon the following documents:

Six Month's Rule	Report on Voting
42(CO)40	42(CO)41

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the Voting Report indicated in the above table.

เรื่องสรุป
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

HIGH VOLTAGE TEST TECHNIQUES

PART 1:
GENERAL DEFINITIONS AND TEST REQUIREMENTS

Section 1: General

1 Scope

This standard is applicable to:

- dielectric tests with direct voltage;
- dielectric tests with alternating voltage;
- dielectric tests with impulse voltage;
- tests with impulse current;
- tests with combinations of the above.

This standard is applicable only to tests on equipment having its highest voltage for equipment U_n above 1 kV.

This standard is not intended to be used for electromagnetic compatibility tests on electric or electronic equipment.

2 Object

The object of this standard is:

- to define terms of both general and specific applicability;
- to present general requirements regarding test objects and test procedures;
- to describe methods for generation and measurement of test voltages and currents;
- to describe test procedures;
- to describe methods for the evaluation of test results and to indicate criteria for acceptance or refusal.

Definitions and requirements concerning approved measuring devices and checking methods are given in IEC Publication 60-3: High Voltage Test Techniques — Measuring Devices.

Alternative test procedures may be required to obtain reproducible and significant results. The choice of a suitable test procedure should be made by the relevant Technical Committee.

Section 2: General Definitions

3 Impulses

An impulse is an intentionally applied aperiodic transient voltage or current which usually rises rapidly to a peak value and then falls more slowly to zero.

For special purposes, impulses having approximately linearly rising fronts or transients of oscillating or approximately rectangular form are used.

The term "impulse" is to be distinguished from the term "surge" which refers to transients occurring in electrical equipment or networks in service.

3.1 *Lightning and switching impulses*

A distinction is made between lightning and switching impulses on the basis of duration of the front. Impulses with front duration up to 20 μ s are defined as lightning impulses and those with longer fronts are defined as switching impulses.

Generally, switching impulses are also characterized by total durations considerably longer than those of lightning impulses.

4 Characteristics related to disruptive discharge and test voltages

4.1 *Disruptive discharge*

In this standard, the term "disruptive discharge" (sometimes referred to as "electrical breakdown") relates to phenomena associated with the failure of insulation under electrical stress, in which the discharge completely bridges the insulation under test, reducing the voltage between the electrodes practically to zero. It applies to electrical breakdown in solid, liquid and gaseous dielectrics and combinations of these.

Non-sustained disruptive discharge in which the test object is momentarily bridged by a spark or arc may occur. During these events the voltage across the test object is momentarily reduced to zero or to a very small value. Depending on the characteristics of the test circuit and the test object, a recovery of dielectric strength may occur and may even permit the test voltage to reach a higher value. Such an event should be interpreted as a disruptive discharge unless otherwise specified by the relevant Technical Committee.

Non-disruptive discharges such as those between intermediate electrodes or conductors may also occur without reduction of the test voltage to zero. Such an event should not be interpreted as a disruptive discharge unless so specified by the relevant Technical Committee.

Some non-disruptive discharges are termed "partial discharges" and are dealt with in IEC Publication 270: Partial Discharge Measurements.

The term "sparkover" is used when a disruptive discharge occurs in a gaseous or liquid medium.

The term "flashover" is used when a disruptive discharge occurs over the surface of a dielectric in a gaseous or liquid medium.

The term "puncture" is used when a disruptive discharge occurs through a solid dielectric.

A disruptive discharge in a solid dielectric produces permanent loss of dielectric strength; in a liquid or gaseous dielectric the loss may be only temporary.

4.2 *Characteristics of the test voltage*

The characteristics of a test voltage are those characteristics specified in this standard for designating the different types of voltage excursion that define the test voltage.

4.2.1 *Prospective characteristics of a test voltage*

The prospective characteristics of a test voltage causing disruptive discharge are the characteristics which would have been obtained if no disruptive discharge had occurred. When a prospective characteristic is used, this shall always be stated.

4.2.2 *Actual characteristics of a test voltage*

The actual characteristics of a test voltage are those which occur during the test at the terminals of the test object.

4.2.3 *Value of the test voltage*

The value of the test voltage is defined in the relevant Clauses of the present standard.

4.3 *Disruptive discharge voltage of a test object*

The disruptive discharge voltage of a test object is the value of the test voltage causing disruptive discharge, as specified, for the various tests, in the relevant Clauses of the present standard.

4.4 *Statistical characteristics of disruptive discharge voltages*

Disruptive discharge voltages are subject to random variations and, usually, a number of observations must be made in order to obtain a statistically significant value of the voltage. The test procedures, described in the present standard, are generally based on statistical considerations. Information on the statistical evaluation of test results is given in Appendix A.

4.4.1 *Disruptive discharge probability p of a test object*

The disruptive discharge probability p of a test object is the probability that one application of a certain prospective voltage value of a given shape will cause disruptive discharge in the test object. The parameter p may be expressed as a percentage or a fraction.

60-1 © IEC 1989

4.4.2 *Withstand probability q of a test object*

The withstand probability q of a test object is the probability that one application of a certain prospective voltage value of a given shape does not cause a disruptive discharge on the test object. If the disruptive discharge probability is p , the withstand probability q is $(1 - p)$.

4.4.3 *50% disruptive discharge voltage U_{50} of a test object*

The 50% disruptive discharge voltage is the prospective voltage value which has a 50% probability of producing a disruptive discharge on the test object.

4.4.4 *$p\%$ disruptive discharge voltage U_p of a test object*

The $p\%$ disruptive discharge voltage of a test object is the prospective voltage value which has $p\%$ probability of producing a disruptive discharge on the test object.

4.4.5 *Conventional deviation z of the disruptive discharge voltage of a test object*

The conventional deviation z of the disruptive discharge voltage of a test object is the difference between its 50% and 16% disruptive discharge voltages. It is often expressed in per unit or percentage value, referred to the 50% disruptive discharge voltage.

NOTE — If the disruptive-discharge probability function (see Appendix A) is close to a Gaussian function, z is correspondingly close to its standard deviation.

4.5 *Withstand voltage of a test object*

The withstand voltage of a test object is a specified prospective voltage value which characterizes the insulation of the object with regard to a withstand test.

Unless otherwise specified, withstand voltages are referred to standard reference atmospheric conditions (see Clause 11.1).

4.6 *Assured disruptive discharge voltage of a test object*

The assured disruptive discharge voltage of a test object is a specified prospective voltage value which characterizes its performance with regard to a disruptive discharge test.

5 **Classification of insulation in test objects**

Insulation systems of apparatus and high voltage structures must basically be classified into self-restoring and non-self-restoring insulation and may consist of external and/or internal insulation.

5.1 *External insulation*

External insulation is the air insulation and the exposed surfaces of solid insulation of the equipment, which are subject both to dielectric stresses and to the effects of atmospheric and other external conditions such as pollution, humidity and vermin.

5.2 *Internal insulation*

Internal insulation comprises the internal solid, liquid or gaseous elements of the insulation of equipment, which are protected from the effects of atmospheric and other external conditions such as pollution, humidity and vermin.

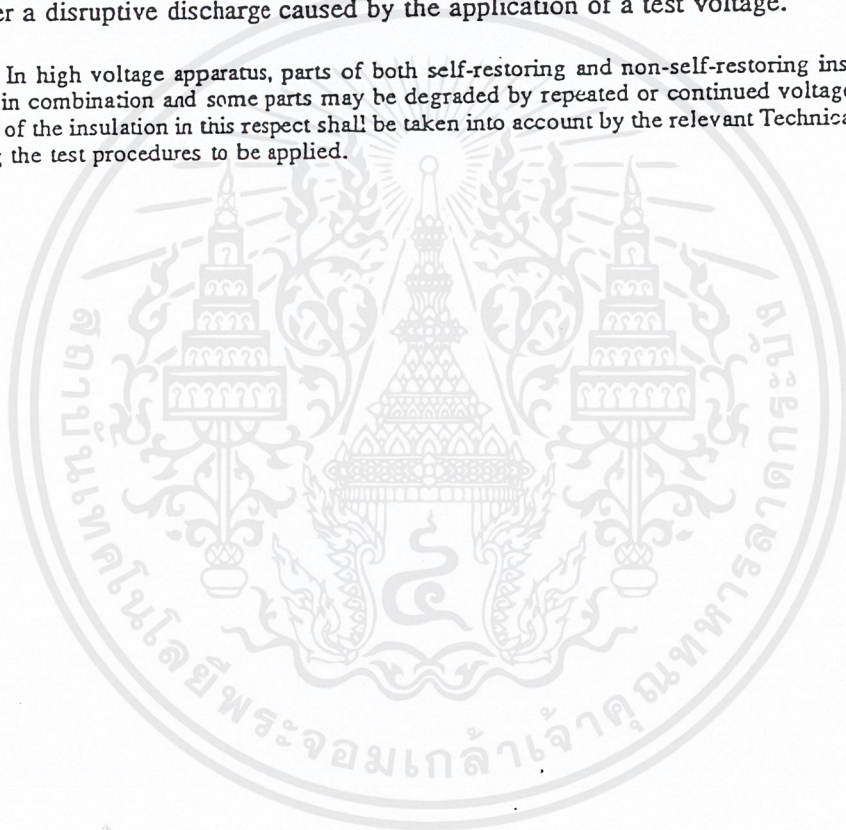
5.3 *Self-restoring insulation*

Self-restoring insulation is the insulation which completely recovers its insulating properties after a disruptive discharge caused by the application of a test voltage.

5.4 *Non-self-restoring insulation*

Non-self-restoring insulation is insulation which loses its insulating properties, or does not recover them completely, after a disruptive discharge caused by the application of a test voltage.

NOTE — In high voltage apparatus, parts of both self-restoring and non-self-restoring insulation are always operating in combination and some parts may be degraded by repeated or continued voltage applications. The behaviour of the insulation in this respect shall be taken into account by the relevant Technical Committee when specifying the test procedures to be applied.



Section 6: Tests with Lightning Impulse Voltage

18 Definitions for lightning impulse tests

18.1 Definitions of general applicability

These definitions apply to impulses without oscillations or overshoot or to the mean curve drawn through the oscillations and overshoot.

18.1.1 Full lightning impulse

A full lightning impulse is a lightning impulse which is not interrupted by a disruptive discharge (see figure 5). See Clause 3 for definition of impulse and 3.1 for distinction between lightning and switching impulses.

18.1.2 Chopped lightning impulse

A chopped lightning impulse is a lightning impulse during which a disruptive discharge causes a rapid collapse of the voltage, practically to zero value (see figures 7–9). The collapse can occur on the front, at the peak or on the tail.

NOTE — The chopping can be accomplished by an external chopping gap or may occur due to a discharge in the internal or external insulation of a test object.

18.1.3 Value of the test voltage

For a lightning impulse without oscillations, the value of the test voltage is its peak value.

The determination of the peak value in the case of oscillations or overshoot on standard lightning impulses is considered in 19.2.

For other impulse shapes (see for example figures 10 e–h) the relevant Technical Committee shall define the value of the test voltage taking into account the type of test and test object.

18.1.4 Front time T_1

The front time T_1 of a lightning impulse is a virtual parameter defined as 1,67 times the interval T between the instants when the impulse is 30% and 90% of the peak value (points A and B, figures 6–9).

18.1.5 Virtual origin O_1

The virtual origin O_1 of a lightning impulse is the instant preceding that corresponding to point A (see figures 6–9) by a time $0,3T_1$. For records having linear time scales, this is the intersection with the time axis of a straight line drawn through the reference points A and B on the front.

60-1 © IEC 1989

18.1.6 *Time to half-value T_2*

The time to half-value T_2 of a lightning impulse is a virtual parameter defined as the time interval between the virtual origin O_1 and the instant when the voltage has decreased to half the peak value.

18.2 *Definitions applicable only to chopped impulses*

A chopped lightning impulse is a lightning impulse during which a disruptive discharge causes a rapid collapse of the voltage, which then falls to zero or nearly to zero, with or without oscillations (see figures 7-9).

NOTE — With some test objects or test arrangements, there may be a flattening of the peak or a rounding off of the voltage before the final voltage collapse. Similar effects may also be observed due to the imperfections of the measuring system. Exact determination of the parameters related to chopping (18.2.1 to 18.2.5) requires the presence of both a sharp discontinuity and a special measuring system. Other cases are left to the relevant Technical Committees for consideration.

18.2.1 *Instant of chopping*

The instant of chopping is that at which the rapid collapse of voltage which characterizes the chopping first occurs.

18.2.2 *Time to chopping T_c*

The time to chopping T_c is a virtual parameter defined as the time interval between the virtual origin O_1 and the instant of chopping.

18.2.3 *Characteristics related to the voltage collapse during chopping*

The virtual characteristics of the voltage collapse during chopping are defined in terms of two points C and D at 70% and 10% of the voltage at the instant of chopping, see figure 7. The duration of the voltage collapse is 1.67 times the time interval between points C and D. The steepness of the voltage collapse is the ratio of the voltage at the instant of chopping to the duration of voltage collapse.

NOTE — The use of points C and D is for definition purposes only; it is not implied that the duration and steepness of chopping can be measured with any degree of accuracy using conventional measuring systems.

18.2.4 *Linearly rising front-chopped impulses*

A voltage rising with approximately constant steepness, until it is chopped by a disruptive discharge, is described as a linearly rising front-chopped impulse.

To define such an impulse, the best fitting straight line is drawn through the part of the front between 30% and 90% of the peak amplitude; the intersections of this with the 30% and 90% amplitudes then being designated E and F, respectively (see figure 9).

The impulse is defined by:

- the peak voltage U ,
- the front time T_1 ,

— the virtual steepness S :

$$S = U / T_1$$

This is the slope of the straight line drawn through the points E and F, usually expressed in kilovolts per microsecond.

This chopped impulse is considered to be approximately linearly rising if the front, from 30% amplitude up to the instant of chopping, is entirely enclosed between two lines parallel to the line EF, but displaced from it in time by $\pm 0,05 T_1$ (see figure 9).

NOTE — The value and the tolerance on the virtual steepness S shall be specified by the relevant Technical Committee.

18.3 *Voltage/time curves*

18.3.1 *Voltage/time curves for linearly rising impulses*

The voltage/time curve for impulses with fronts rising linearly is the curve relating the peak voltage to the front time T_1 . The curve is obtained by applying impulses with linear fronts of different steepness.

18.3.2 *Voltage/time curve for impulses of constant prospective shape*

The voltage/time curve for impulses with constant prospective shape is the curve relating the discharge voltage of the test object to the time to chopping, which may occur on the front, at the peak or on the tail. The curve is obtained by applying impulse voltages of constant shape but with different prospective peak values (see figure 11).

19 Test Voltage

19.1 *Standard lightning impulse*

The standard lightning impulse is a full lightning impulse having a front time of $1,2 \mu\text{s}$ and a time to half-value of $50 \mu\text{s}$. It is described as a 1,2/50 impulse.

19.2 *Tolerances*

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the following differences are accepted between specified values for the standard impulse and those actually recorded:

Peak value	$\pm 3\%$
Front time	$\pm 30\%$
Time to half-value	$\pm 20\%$

NOTE 1 — It is emphasized that the tolerances on the peak value, front time and time to half-value constitute the permitted differences between specified values and those actually recorded by measurements. These differences should be distinguished from measuring errors which are the difference between the values actually recorded and the true values. For information on measuring errors, see IEC Publication 60-3 and 60-4.

60-1 © IEC 1989

With some test circuits, oscillations or an overshoot may occur at the peak of the impulse, see figures 10 a to d; if the frequency of such oscillations is not less than 0,5 MHz or the duration of overshoot not more than 1 μ s, a mean curve should be drawn as in figures 10 a and b and, for the purpose of measurement, the maximum amplitude of this curve is chosen as the peak value defining the value of the test voltage.

Overshoot or oscillations in the neighborhood of the peak, measured by a system according to IEC Publication 60-3, are tolerated provided their single peak amplitude is not larger than 5% of the peak value. In commonly used impulse generator circuits, oscillations on that part of the wavefront during which the voltage does not exceed 90% of the peak value have generally negligible influence on test results. If the relevant Technical Committee finds these are of importance, it is recommended that their amplitudes, measured by a suitable measuring device, as specified in IEC Publication 60-3, are under the straight line drawn through the points A' B' (see figure 12). These points are taken on the verticals of, respectively, the points A and B determined according to 18.1.4, the distance AA' being equal to 25% and BB' to 5% of the peak value.

The impulse should be essentially unidirectional, but see Note 2.

NOTE 2 — In specific cases, such as during tests on low impedance objects or on UHV test circuits having large dimensions, it may be impossible to adjust the shape of the impulse within the tolerances recommended, to keep the oscillations and/or the overshoot within the specified limits or to avoid a polarity reversal. Such cases should be dealt with by the relevant Technical Committee.

19.3 *Standard chopped lightning impulse*

A standard chopped lightning impulse is a standard impulse chopped by an external gap after 2 to 5 μ s. Other times to chopping may be specified by the relevant Technical Committee. Because of practical difficulties in measurements, the duration of voltage collapse has not been standardized.

19.4 *Special lightning impulses*

In some cases oscillating lightning impulses may be applied. This offers the possibility of producing impulses with shorter front times or with peak values corresponding to a generator efficiency greater than 1.

19.5 *Generation of the test voltage*

The impulse is usually produced by an impulse generator consisting essentially of a number of capacitors which are charged in parallel from a direct voltage source and then discharged in series into a circuit which includes the test object.

19.6 *Measurement of the test voltage and determination of impulse shape*

19.6.1 *Measurement with devices approved under IEC Publication 60-3*

The measurement of the peak value, the time parameters and the overshoot or oscillations on the test voltage should in general be made with devices which have passed the approval procedure referred to in IEC Publication 60-3. The measurement shall be made with the test object in the circuit and, in general, the impulse shape shall be checked for each test object. Where a number of test objects of the same design and size are tested under identical conditions, the shape needs only to be verified once.

20.1.2 Withstand voltage test: Procedure B

Fifteen impulses of the specified shape and polarity at the withstand voltage level are applied to the test object. The requirements of the test are satisfied if not more than two disruptive discharges occur in the self-restoring part of the insulation and if no indication of failure in the non-self-restoring insulation is obtained by the detection methods specified by the relevant Technical Committee.

20.1.3 Withstand voltage test: Procedure C

Three impulses of the specified shape and polarity at the withstand voltage level are applied to the test object. If no disruptive discharge occurs the test object has passed the test. If more than one disruptive discharge occurs the test object has failed to pass the test. If one disruptive discharge occurs in the self-restoring part of the insulation, then nine additional impulses are applied and if no disruptive discharge occurs the test object has passed the test.

If any detection of failure in a non-self-restoring part of insulation is observed with the detection methods specified by the relevant Technical Committee during any part of the test, the test object has failed to pass the test.

NOTE — This procedure corresponds to an American practice modified so as to be statistically equivalent to Procedure B.

20.1.4 Withstand voltage test: Procedure D

For self-restoring insulation the 10% impulse disruptive discharge voltage U_{10} may be evaluated by using statistical test procedures described in Appendix A.

These test methods permit either direct evaluation of U_{10} and U_{50} or indirect evaluation of U_{10} .

In the latter case U_{10} is derived from the U_{50} value using the relationship:

$$U_{10} = U_{50}(1 - 1,3z)$$

The relevant Technical Committee shall specify the value to be assumed for the conventional deviation z of the disruptive discharge voltage. For dry tests on air insulation, without any other insulation involved, the per-unit value $z = 0,03$ can be used.

The test object is deemed to be satisfactory if U_{10} is not less than the specified impulse withstand voltage.

The following test methods can be used to evaluate U_{50} :

- a) the multiple-level method (see Clause A.1.1) with $n \geq 4$ voltage levels, and $m \geq 10$ impulses per level;
- b) the up-and-down method (Clause A.1.2) with $m = 1$ impulse per group and $n \geq 20$ useful applications.

To evaluate U_{10} , the up-and-down withstand method, with $m = 7$ impulses per group and at least eight useful groups, can be used.

In all the cases the voltage interval between levels ΔU should be approximately from 1,5 to 3% of the estimated value of U_{50} .

20.2 Procedures for assured discharge voltage tests

The procedures for an assured discharge voltage test are similar to those described in 20.1 with the appropriate changes between discharge and withstand conditions.

The relevant Technical Committee may also specify other procedures for specific test objects.



Section 7: Tests with Switching Impulses

21 Definitions for switching impulse tests

21.1 Switching impulse

A switching impulse (as distinct from a lightning impulse) is defined in 3.1. The characteristics of a switching impulse are expressed by the parameters defined in 21.2 to 21.7 (see figure 13).

Additional parameters can be specified by the relevant Technical Committee when considering specific tests.

21.2 Value of the test voltage

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the value of the test voltage is the prospective peak value.

21.3 Time to peak T_p

The time to peak T_p is the time interval between the actual origin and the instant when the voltage has reached its peak value.

21.4 Time to half-value T_2

The time to half-value T_2 for a switching impulse is the time interval between the actual origin and the instant when the voltage has first decreased to half the peak value.

21.5 Time above 90% T_d

The time above 90% T_d is the time interval during which the impulse voltage exceeds 90% of its peak value.

21.6 Time to zero T_0

The time to zero T_0 is the time interval between the actual origin and the instant when the voltage has its first passage to zero.

Specification of the time above 90% and time to zero instead of the time to half-value is found useful, for instance, when the form of the impulse is dictated by saturation phenomena in the test object or the test circuit, or where the severity of the test on important parts of internal insulation of the test object is considered to be highly dependent on these parameters. When specifying a switching impulse, only one set of parameters related to the waveshape is generally given. The particular time parameters defined should be clearly indicated by reference, for example, to a T_p/T_2 or $T_p/T_d/T_0$ impulse.

NOTE — to 21.3 to 21.6 — The front duration for switching impulses is sometimes alternatively defined in the same manner as the front for lightning impulses (18.1.4) or in a similar manner with other reference points and multiplying factors. For switching impulses with time parameters as given in 22.1, the time to peak is between 1.4 and 1.8 times the front time.

© IEC 1989

1.7 Time to chopping T_c

The time to chopping T_c of a switching impulse is the time interval between the actual origin and the instant of chopping.

1.8 Linearly rising impulse

The definition of a linearly rising impulse (applicable to both lightning and switching impulses) is given in 18.2.4.

Test voltage

2.1 Standard switching impulse

The standard switching impulse is an impulse having a time to peak T_p of 250 μs and a time to half-value of 2500 μs . It is described as a 250/2500 impulse.

2.2 Tolerances

Not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the following differences are accepted between specified values and those actually recorded, both for standard and special impulses (see Note 1 in 19.2):

Peak value	$\pm 3\%$
Time to peak	$\pm 20\%$
Time to half-value	$\pm 60\%$

In certain cases, for instance with low impedance test objects, it may be difficult to adjust the shape of the impulse to within the tolerances recommended. In such cases other tolerances or other impulse shapes may be specified by the relevant Technical Committee.

NOTE — The disruptive discharge voltage of long gaps in air may be influenced by both the time to peak and the time to half-value of a switching impulse. Therefore it is recommended for such test objects that the applied switching impulse be characterized by its actual time parameters. Larger tolerances in the prospective time to half-value may be allowed in the case of a disruptive discharge occurring before or at the peak.

2.3 Special switching impulses

For special purposes, when the use of the standard switching impulse is not considered sufficient or appropriate, special switching impulses of either aperiodic or oscillating form may be prescribed by the relevant Technical Committee.

NOTE — When a discharge is initiated by a leader in air from a positively-charged electrode, two impulses may generally be considered as equivalent, when they have the same peak value and the same time interval between the respective two points on the front at 70% and 100% of the peak value.

22.4 Generation of the test voltage

Switching impulses are usually generated by a conventional impulse generator (see 19.5). They can also be generated by the application of a voltage impulse to the low-voltage winding of a testing transformer (or of a transformer to be tested). Other methods of generating switching impulses can be used, for example, involving the rapid interruption of current in a transformer winding.

The elements of a circuit for generating switching impulses should be chosen so as to avoid excessive distortion of the impulse shape due to non-disruptive discharge currents in the test object. Such currents can reach quite large values, especially during pollution tests on external insulation at high voltages. In test circuits having high internal impedance, they may cause severe distortion of the voltage or even prevent a disruptive discharge from occurring.

22.5 Measurement of test voltage and determination of impulse shape

The measurement of the test voltage and the determination of the impulse shape should be made as described in 19.6.1 and 19.6.2. Note that although IEC Publication 52, 1960, gives no information specifically related to the measurement of the peak value of switching impulses, measurements indicate that the sphere-gap can be regarded as an approved measuring device for switching impulse voltages.

23 Test procedures

The test procedures are in general the same as for lightning impulse testing and similar statistical considerations apply (see Clause 20 and Appendix A). Unless otherwise specified by the relevant Technical Committee, the conventional deviation of the disruptive discharge voltage for dry and wet tests on air insulation, without any other insulation involved, can be assumed to be:

$$z = 0,06$$

Correspondingly larger voltage intervals ΔU may be used when applying the multiple level or the up-and-down procedures.

NOTE — With switching impulses, disruptive discharges frequently occur at random times well before the peak. In presenting the results of discharge tests made in accordance with 20.1.4, the relationship between disruptive discharge probability and voltage is generally expressed in terms of the prospective peak value. However, another method is also in use in which the actual disruptive discharge voltage for every impulse is measured; the probability distribution of the measured voltage values is then determined by the method described for Class 3 tests in Appendix A.

Appendix A: Statistical Treatment of Test Results

A.1 Classification of tests

Disruptive discharge test procedures can be divided into three classes for the purpose of statistical evaluation.

A.1.1 Class 1: Multiple-level tests

In a Class 1 test, m_i substantially equal voltage stresses (e.g., lightning impulses) are applied at each of n voltage levels U_i ($i = 1, 2, \dots, n$). While this procedure is usually employed with impulse voltages, some tests with alternating and direct voltages also fall into this class.

The test results are the n numbers m_i of voltage applications and the corresponding numbers d_i of disruptive discharges at each voltage level U_i .

A.1.2 Class 2: Up-and-down tests

In a Class 2 test, n groups of m substantially equal voltage stresses are applied at voltage levels U_i . The voltage level for each succeeding group of stresses is increased or decreased by a small amount ΔU according to the result of the previous group of stresses.

Two testing procedures are commonly used. The withstand procedure, aimed at finding voltage levels corresponding to low disruptive discharge probabilities and the discharge procedure, which finds voltage levels corresponding to high disruptive discharge probabilities. In the withstand procedure, the voltage level is increased by an amount ΔU if no disruptive discharge occurs in a group of m voltage applications, otherwise the voltage level is decreased by the same amount. In the discharge procedure, the voltage level is increased by ΔU if one or more withstands occur, otherwise it is decreased by the same amount.

Where $m = 1$, the two procedures become identical and correspond to the up-and-down 50% disruptive discharge voltage test.

Tests with other values of m are also used to determine voltages corresponding to other disruptive discharge probabilities. The results are the numbers k_i of stress groups applied at the voltage levels U_i . The first level U_i taken into account is that at which at least two groups of stresses were applied. The total number of useful groups is $n = \sum k_i$.

A.1.3 Class 3: Successive Discharge Tests

In a Class 3 test, a procedure leading to a disruptive discharge on the test object is applied n times. The test voltage may be increased continuously until a disruptive discharge occurs or held constant at some level until a disruptive discharge is observed. The results are the n values of voltage U_i or time t_i at which the disruptive discharge occurred.

Such tests are made with direct, alternating or impulse voltages. Tests where disruptive discharges occur on the front of the impulse fall into this class.

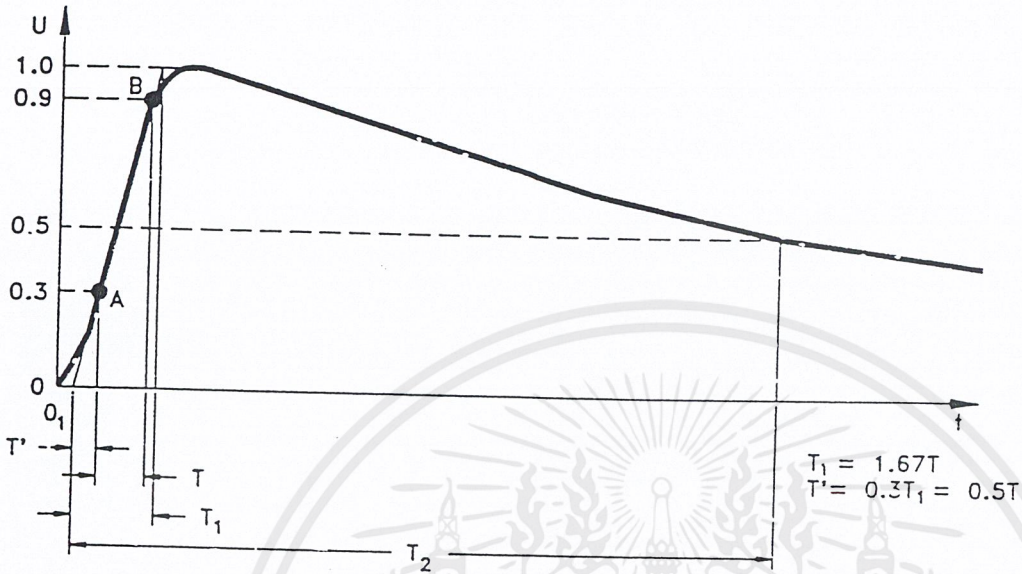


Figure 6 Choc de foudre plein.
Full lightning impulse.

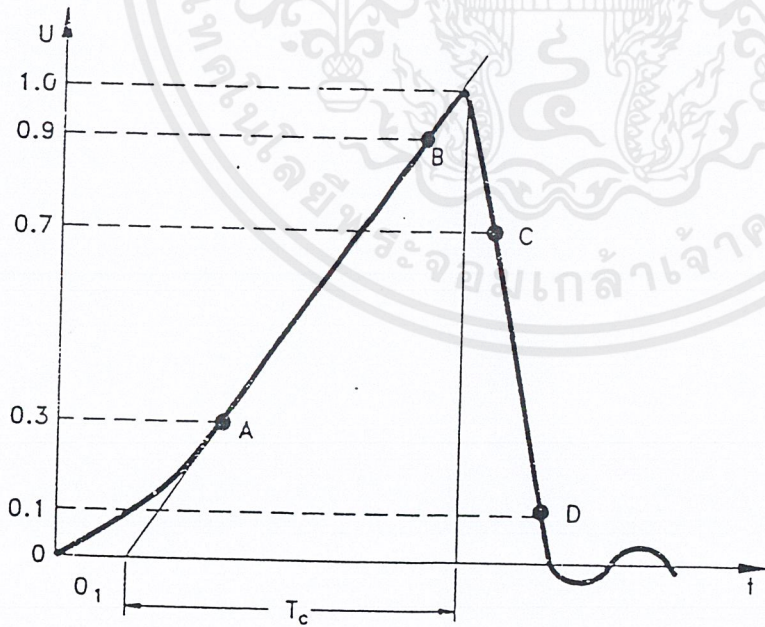


Figure 7 Choc de foudre coupé sur le front.
Lightning impulse chopped on the front.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

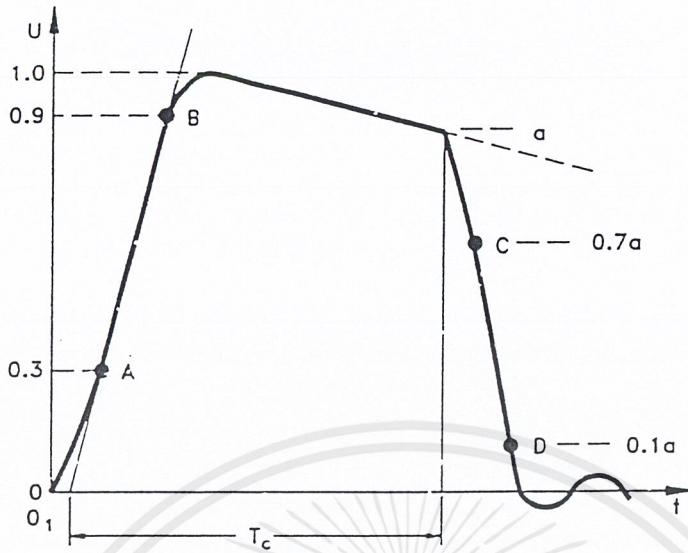


Figure 8 Choc de foudre coupé sur la queue.

Lightning impulse chopped on the tail.

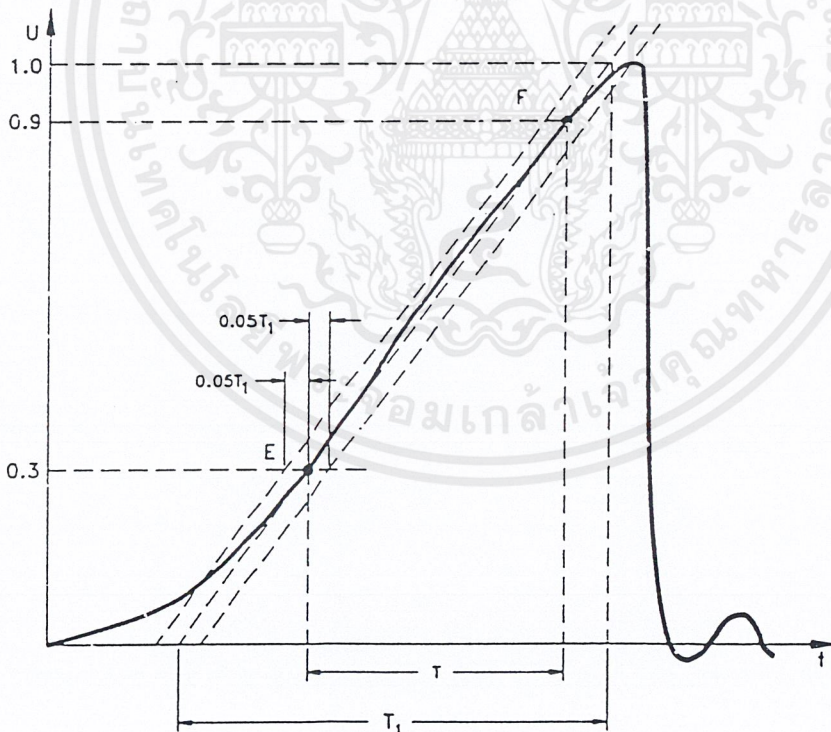


Figure 9 Choc coupé ayant un front linéaire.

Linearly rising front chopped impulse.

NOTE — Determination of the impulse shape by calculation from the test circuit parameters is not considered to be satisfactory.

19.6.2 Calibration of a non-approved measuring device with an approved measuring device

The procedure usually consists of establishing a relationship between the display of some device related to the test voltage (for instance the maximum charging voltage of the first stage of the impulse generator) and a measurement of the same voltage performed in accordance with 19.6.1 or with a sphere-gap, used in accordance with IEC Publication 52.

The relationship may be dependent on the presence of the test object, of the sphere-gap, etc. Hence, it is important that these conditions are the same during the calibration and the actual test, except that during the test the sphere-gap may be opened sufficiently to prevent sparkover.

For tests on objects with self-restoring insulation, the calibration should be made at or near 100% of the test voltage. For tests on objects with non-self-restoring insulation, extrapolation may be unavoidable but such extrapolation shall be made from not less than 50% of the test voltage. The extrapolation is only permissible if it can be shown that the test voltage is proportional to the related quantity.

19.7 Measurement of current during tests with impulse voltages

The relevant Technical Committee shall specify the characteristics of a current flowing in the test object that should be measured during tests with high impulse voltages. When this type of measurement is used for comparative purposes wave shape is of importance and the measurement of the absolute value of this current may be of lesser importance.

20 Test Procedures

20.1 Withstand voltage tests

The recommended test procedure depends on the nature of the test object, as defined in Clause 5. The relevant Technical Committee shall specify which procedure shall be applied.

In procedures A, B and C the voltage applied to the test object is only the specified withstand value, while in procedure D several voltage levels have to be applied.

20.1.1 Withstand voltage test: Procedure A

Three impulses of the specified shape and polarity at the rated withstand voltage level are applied to the test object. The requirements of the test are satisfied if no indication of failure is obtained, using methods of detection specified by the relevant Technical Committee.

NOTE — This procedure is recommended for tests on degradable or non-self-restoring insulation.

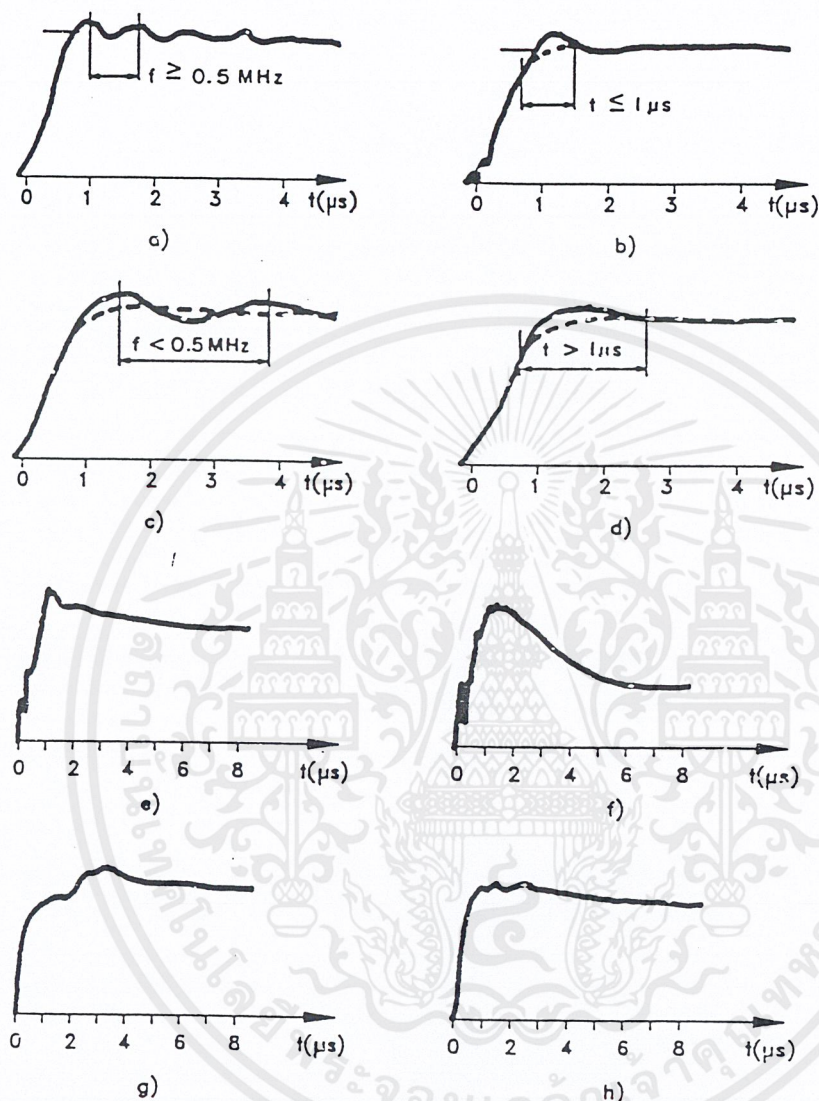


Figure 10 Exemples de chocs de foudre avec des oscillations ou un lancé.

a,b La valeur de la tension d'essai est déterminées par une courbe moyenne (en lignes pointillées).

c,d La valeur de la tension d'essai est déterminées par la valeur de crête.

e,f,g,h Aucun renseignement général ne peut être donné pour la détermination de la valeur de crête.

Examples of lightning impulses with oscillations or overshoot.

a,b The value of the test voltage is determined by a mean curve (broken line).

c,d The value of the test voltage is determined by the crest value.

e,f,g,h No general guidance can be given for the determination of the value of the test voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

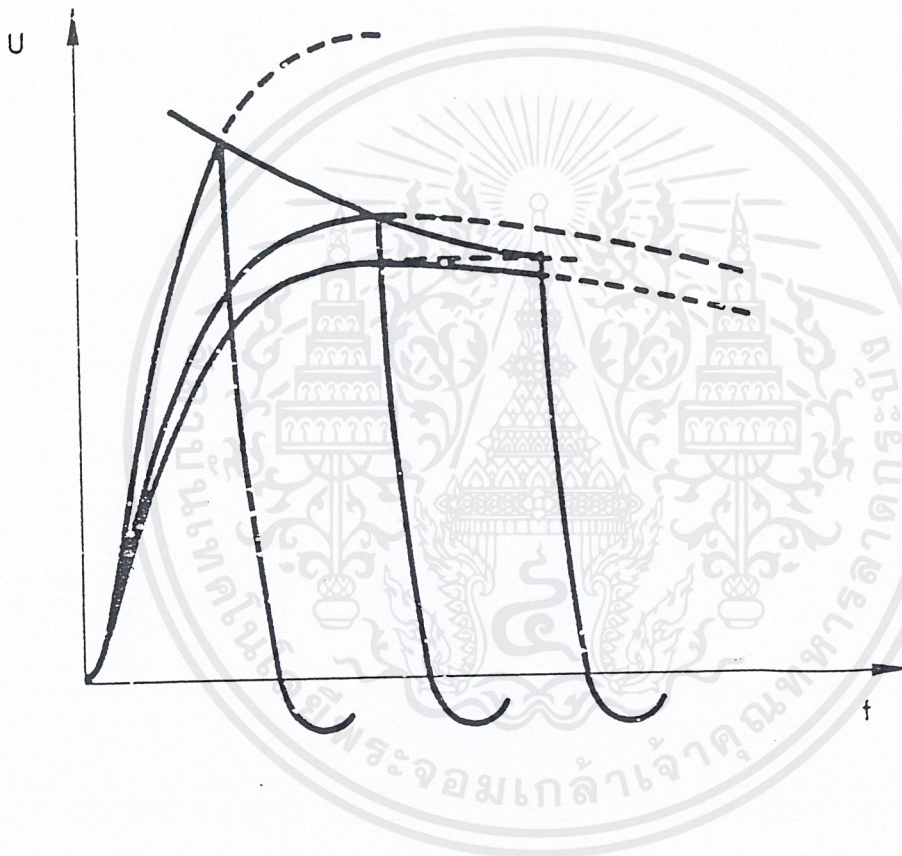


Figure 11 Courbe tension/temps pour tensions de choc ayant une forme présumée constante.

Voltage/time curve for impulses of constant prospective shape.

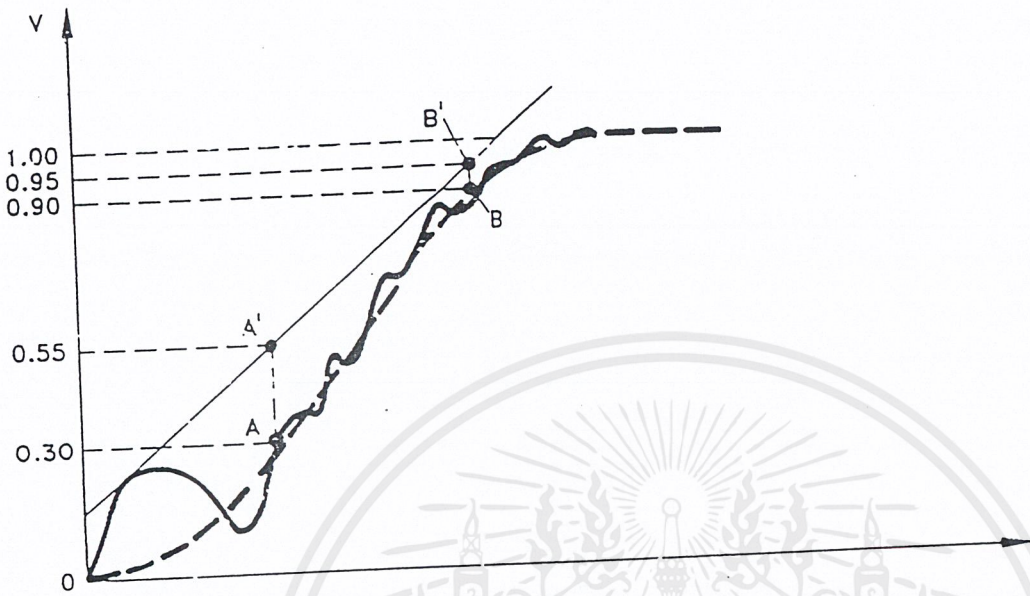


Figure 12 «Amplitude maximale admissible des oscillations sur le front de l'onde».
 "Maximum permissible amplitude of oscillations on the wave-front".

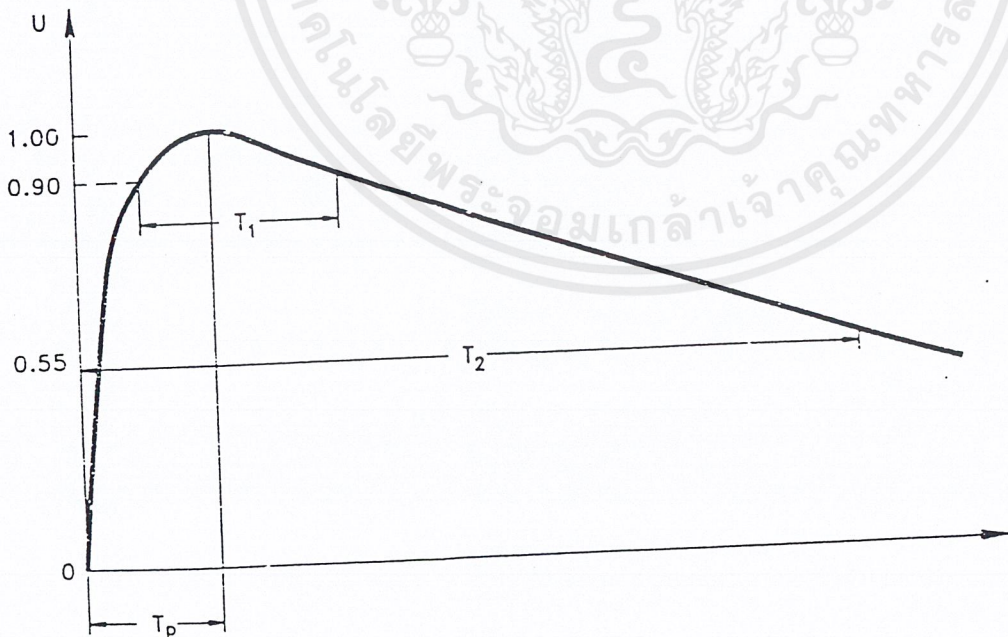


Figure 13 Choc de manoeuvre plein.

Full switching impulse.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

IEC Standard Publ. No.71-1993.

Insulation Co-ordination

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

INSULATION CO-ORDINATION

Part 1: Definitions, principles and rules

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

International Standard IEC 71-1 has been prepared by IEC technical committee 28 - Insulation co-ordination.

This seventh edition cancels and replaces the sixth edition published in 1976 which dealt only with insulation co-ordination between phase and earth, and the first part of the first edition - published in 1982 - of IEC Publication 71-3 which dealt with insulation co-ordination between phases.

This standard constitutes a technical revision and forms Part 1 of IEC Publication 71.

IEC Publication 71-2 (in preparation) will constitute the Application Guide for the insulation co-ordination of electrical equipment.

The text of this standard is based on the following documents:

DIS	Report on voting
28(CO)58	28(CO)60

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

Annex A is for information only.

INSULATION CO-ORDINATION

Part 1: Definitions, principles and rules

1 Scope

This part of International Standard IEC 71 applies to three-phase a.c. systems having a highest voltage for equipment above 1 kV. It specifies the procedure for the selection of the standard withstand voltages for the phase-to-earth, phase-to-phase and longitudinal insulation of the equipment and the installations of these systems. It also gives the lists of the standardized values from which the standard withstand voltages shall be selected.

This part recommends that the selected withstand voltages should be associated with the highest voltage for equipment. This association is for insulation co-ordination purposes only. The requirements for human safety are not covered by this Standard.

Although the principles of this part also apply to transmission line insulation, the values of the withstand voltages may be different from the standard withstand voltages.

The apparatus committees are responsible for specifying the withstand voltages and the test procedures suitable for the relevant equipment taking into consideration the recommendations of this Standard.

NOTE – in IEC 71-2 Application Guide, (under revision), all rules for insulation co-ordination given in this Standard are justified in detail, in particular the association of the standard withstand voltages with the highest voltage for equipment. When more than one set of standard withstand voltages is associated with the same highest voltage for equipment, guidance is provided for the selection of the most suitable set.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 71-1. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 71-1 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 38: 1983, *IEC standard voltages*

IEC 60-1: 1989, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

3 Definitions

For the purposes of this International Standard, the following definitions apply.

3.1 Insulation co-ordination: The selection of the dielectric strength of equipment in relation to the voltages which can appear on the system for which the equipment is intended and taking into account the service environment and the characteristics of the available protective devices. [IEV 604-03-08, modified]

NOTE – By "dielectric strength" of the equipment, is meant here its rated or its standard insulation level as defined in 3.32 and 3.33 respectively.

3.2 external insulation: The distances in atmospheric air, and the surfaces in contact with atmospheric air of solid insulation of the equipment which are subject to dielectric stresses and to the effects of atmospheric and other external conditions, such as pollution, humidity, vermin, etc. [IEV 604-03-02, modified]

NOTE – External insulation is either *weather-protected* or *non-weather-protected*, designed to operate inside or outside closed shelters respectively.

3.3 Internal insulation: The internal solid, liquid, or gaseous parts of the insulation of equipment which are protected from the effects of atmospheric and other external conditions. [IEV 604-03-03]

3.4 self-restoring insulation: Insulation which completely recovers its insulating properties after a disruptive discharge. [IEV 604-03-04]

3.5 non-self-restoring insulation: Insulation which loses its insulating properties, or does not recover them completely, after a disruptive discharge. [IEV 604-03-05]

NOTE – The definitions of 3.4 and 3.5 apply only when the discharge is caused by the application of a test voltage during a dielectric test. However, discharges occurring in service may cause a self-restoring insulation to lose partially or completely its original insulating properties.

3.6 Insulation configuration terminal: Any of the electrodes between any two of which a voltage that stresses the insulation can be applied. The types of terminal are:

- a) **phase terminal**, between which and the neutral is applied in service the phase-to-neutral voltage of the system;
- b) **neutral terminal**, representing, or connected to, the neutral point of the system (neutral terminal of transformers, etc.);
- c) **earth terminal**, always solidly connected to earth in service (tank of transformers, base of disconnectors, structures of towers, ground plane, etc.).

3.7 insulation configuration: The complete geometric configuration of the insulation in service, consisting of the insulation and of all terminals. It includes all elements (insulating and conducting) which influence its dielectric behaviour. The following insulation configurations are identified:

- **three-phase:** having three phase terminals, one neutral terminal and one earth terminal.
- **phase-to-earth:** a three-phase insulation configuration where two phase terminals are disregarded and, except in particular cases, the neutral terminal is earthed.

- **phase-to-phase:** a three-phase insulation configuration where one phase terminal is disregarded. In particular cases, the neutral and the earth terminals are also disregarded.
- **longitudinal,** having two phase terminals and one earth terminal. The phase terminals belong to the same phase of a three-phase system temporarily separated into two independently energized parts (open switching devices). The four terminals belonging to the other two phases are disregarded or earthed. In particular cases one of the two phase terminals considered is earthed.

3.8 nominal voltage of a system: A suitable approximate value of voltage used to designate or identify a system. [IEV 601-01-21]

3.9 highest voltage of a system: The highest value of operating voltage which occurs under normal operating conditions at any time and at any point in the system. [IEV 601-01-23]

3.10 highest voltage for equipment (U_m): The highest r.m.s. value of phase-to-phase voltage for which the equipment is designed in respect of its insulation as well as other characteristics which relate to this voltage in the relevant equipment Standards. [IEV 604-03-01]

3.11 Isolated neutral system: A system where the neutral point is not intentionally connected to earth, except for high impedance connections for protection or measurement purposes. [IEV 601-02-24]

3.12 solidly earthed neutral system: A system whose neutral point(s) is(are) earthed directly. [IEV 601-02-25]

3.13 impedance earthed (neutral) system: A system whose neutral point(s) is(are) earthed through impedances to limit earth fault currents. [IEV 601-02-26]

3.14 resonant earthed (neutral) system: A system in which one or more neutral points are connected to earth through reactances which approximately compensate the capacitive component of a single-phase-to-earth fault current. [IEV 601-02-27]

NOTE - With resonant earthing of a system, the residual current in the fault is limited to such an extent that an arcing fault in air is usually self-extinguishing.

3.15 earth fault factor: At a given location of a three-phase system, and for a given system configuration, the ratio of the highest r.m.s. phase-to-earth power frequency voltage on a healthy phase during a fault to earth affecting one or more phases at any point on the system to the r.m.s. phase-to-earth power frequency voltage which would be obtained at the given location in the absence of any such fault. [IEV 604-03-06]

3.16 overvoltage: Any voltage between one phase conductor and earth or between phase conductors having a peak value exceeding the corresponding peak of the highest voltage for equipment. [IEV 604-03-09, modified]

NOTES

1 Unless otherwise clearly indicated, such as for surge arresters, overvoltage values expressed in p.u. shall be referred to $U_m \times \sqrt{2/\sqrt{3}}$.

2 For any insulation configuration, an overvoltage is any voltage across its terminals higher than the peak of the power-frequency voltage existing between them when all phase terminals of the equipment are energized with the highest voltage for equipment.

3.17 Classification of voltages and overvoltages

According to their shape and duration, voltages and overvoltages are divided in the following classes (see also table 1):

a) **continuous (power frequency) voltage:** Power-frequency voltage, considered having constant r.m.s. value, continuously applied to any pair of terminals of an insulation configuration.

b) **temporary overvoltage:** Power frequency overvoltage of relatively long duration. [IEV 604-03-12, modified]

NOTE – The overvoltage may be undamped or weakly damped. In some cases its frequency may be several times smaller or higher than power frequency.

c) **transient overvoltage:** Short-duration overvoltage of few milliseconds or less, oscillatory or non-oscillatory, usually highly damped. [IEV 604-03-13]

NOTE – Transient overvoltages may be immediately followed by temporary overvoltages. In such cases the two overvoltages are considered as separate events.

Transient overvoltages are divided into:

– **slow-front overvoltage:** Transient overvoltage, usually unidirectional, with time to peak $20 \mu\text{s} < T_p \leq 5\,000 \mu\text{s}$, and tail duration $T_2 \leq 20 \text{ ms}$.

– **fast-front overvoltage:** Transient overvoltage, usually unidirectional, with time to peak $0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$, and tail duration $T_2 < 300 \mu\text{s}$.

– **very-fast-front overvoltage:** Transient overvoltage, usually unidirectional with time to peak $T_f \leq 0,1 \mu\text{s}$, total duration $< 3 \text{ ms}$, and with superimposed oscillations at frequency $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$.

d) **combined (temporary, slow-front, fast-front, very-fast-front) overvoltage,** consisting of two voltage components simultaneously applied between each of the two phase terminals of a phase-to-phase (or longitudinal) insulation and earth. It is classified by the component of higher peak value.

3.18 Standard voltage shapes

The following voltage shapes are standardized:

a) The **standard short-duration power-frequency voltage:** a sinusoidal voltage with frequency between 48 Hz and 62 Hz, and duration of 60 s.

b) The **standard switching impulse:** an impulse voltage having a time to peak of 250 μs and a time to half-value of 2 500 μs .

c) The **standard lightning impulse:** an impulse voltage having a front time of 1,2 μs and a time to half-value of 50 μs .

NOTE – More detailed definitions of these standard voltage shapes are given in IEC 60-1 (see also table 1).

d) The **standard combined switching impulse**: Combined impulse voltage having two components of equal peak value and opposite polarity. The positive component is a standard switching impulse and the negative one is a switching impulse whose times to peak and half value should not be less than those of the positive impulse. Both impulses should reach their peak value at the same instant. The peak value of the combined voltage is, therefore, the sum of the peak values of the components.

3.19 representative overvoltages (U_{rp}): Overvoltages assumed to produce the same dielectric effect on the insulation as overvoltages of a given class occurring in service due to various origins. They consist of voltages with the standard shape of the class, and may be defined by one value or a set of values or a frequency distribution of values that characterize the service conditions.

NOTE – This definition also applies to the continuous power frequency voltage representing the effect of the service voltage on the insulation.

3.20 overvoltage limiting device: Device which limits the peak values of the overvoltages or their durations or both. They are classified as **preventing devices** (e.g., a preinsertion resistor) or as **protective devices** (e.g., a surge arrester).

3.21 lightning (or switching) impulse protective level: The maximum permissible peak voltage value on the terminals of a protective device subjected to lightning (or switching) impulses under specific conditions. [IEV 604-03-56 and 604-03-57]

3.22 performance criterion: The basis on which the insulation is selected so as to reduce to an economically and operationally acceptable level the probability that the resulting voltage stresses imposed on the equipment will cause damage to equipment insulation or affect continuity of service. This criterion is usually expressed in terms of an acceptable failure rate (number of failures per year, years between failures, risk of failure, etc.) of the insulation configuration.

3.23 withstand voltage: The value of the test voltage to be applied under specified conditions in a withstand test, during which a specified number of disruptive discharges is tolerated. The withstand voltage is designated as:

- a) **conventional assumed withstand voltage**, when the number of disruptive discharges tolerated is zero. It is deemed to correspond to a withstand probability $P_w = 100\%$;
- b) **statistical withstand voltage**, when the number of disruptive discharges tolerated is related to a specified withstand probability. In this Standard the specified probability is $P_w = 90\%$.

NOTE – In this Standard, for non-self-restoring insulation are specified conventional assumed withstand voltages, and for self-restoring insulation are specified statistical withstand voltages.

3.24 co-ordination withstand voltage (U_{cw}): For each class of voltage, the value of the withstand voltage of the insulation configuration, in actual service conditions, that meets the performance criterion.

3.25 co-ordination factor (K_c): The factor by which the value of the representative overvoltage must be multiplied in order to obtain the value of the co-ordination withstand voltage.

3.26 Standard reference atmospheric conditions

The standard reference atmospheric conditions are:

- temperature $t_o = 20\text{ °C}$
- pressure $b_o = 101,3\text{ kPa (1 013 mbar)}$
- absolute humidity $h_{ao} = 11\text{ g/m}^3$

3.27 required withstand voltage (U_{rw}): The test voltage that the insulation must withstand in a standard withstand test to ensure that the insulation will meet the performance criterion when subjected to a given class of overvoltages in actual service conditions and for the whole service duration. The required withstand voltage has the shape of the co-ordination withstand voltage, and is specified with reference to all the conditions of the standard withstand test selected to verify it.

3.28 atmospheric correction factor (K_a): The factor to be applied to the co-ordination withstand voltage to account for the difference between the average atmospheric conditions in service and the standard reference atmospheric conditions. It applies to external insulation only.

3.29 safety factor (K_s): The overall factor to be applied to the co-ordination withstand voltage, after the application of the atmospheric correction factor (if required), to obtain the required withstand voltage, accounting for all other differences between the conditions in service and those in the standard withstand test.

3.30 standard withstand voltage (U_w): The standard value of the test voltage applied in a standard withstand test. It is a rated value of the insulation and proves that the insulation complies with one or more required withstand voltages.

3.31 test conversion factor (K_t): The factor applied to the required withstand voltage, in the case where the standard withstand voltage is selected of different shape, so as to obtain the lower limit of the standard withstand test voltage that can be assumed to prove it.

3.32 rated insulation level: A set of standard withstand voltages which characterize the dielectric strength of the insulation.

3.33 standard insulation level: A rated insulation level, the standard withstand voltages of which are associated to U_m as recommended in tables 2 and 3.

3.34 standard withstand voltage tests: A dielectric test performed in specified conditions to prove that the insulation complies with a standard withstand voltage. This standard covers:

- short-duration power-frequency tests;
- switching impulse tests;
- lightning impulse tests;
- combined voltage tests.

NOTES

- 1 More detailed information on the standard withstand voltage tests are given in IEC 60-1 (see also table 1 for the test voltage shapes).
- 2 The very-fast impulse standard withstand voltage tests should be specified by the relevant apparatus committees, if required.

4 Procedure for insulation co-ordination

4.1 General outline of the procedure

The procedure for insulation co-ordination consists of the selection of a set of standard withstand voltages which characterize the insulation of the equipment within the scope of this standard. This procedure is outlined in figure 1 and its steps are described in 4.2 to 4.5. The optimization of the procedure may require reconsideration of some input data and repetition of part of the procedure.

The standard withstand voltages shall be selected from the lists of 4.6 and 4.7. The set of selected standard voltages constitutes a *rated* insulation level. If the standard withstand voltages are also associated with the same U_m according to 4.9, this set constitutes a *standard* insulation level.

4.2 Determination of the representative overvoltages (U_{rp})

The voltages and the overvoltages that stress the insulation shall be determined in amplitude, shape and duration by means of a system analysis which includes the selection and location of the overvoltage limiting devices.

For each class of overvoltage, this analysis shall then determine a representative overvoltage, taking into account the characteristics of the insulation.

The representative overvoltage may be characterized either by:

- an *assumed maximum*, or
- a *set of peak values*, or
- a *complete statistical distribution* of peak values.

NOTE 1 - In the last case additional characteristics of the overvoltage shapes may have to be considered.

When the adoption of an assumed maximum is considered adequate, the representative overvoltage of the various classes shall be:

- for the **continuous power-frequency voltage**: a power-frequency voltage with r.m.s. value equal to the highest voltage of the system, and with duration corresponding to the lifetime of the equipment.
- for the **temporary overvoltage**: a standard power-frequency short-duration voltage with an r.m.s. value equal to the assumed maximum of the temporary overvoltages divided by $\sqrt{2}$.
- for the **slow-front overvoltage**: a standard switching impulse with peak value equal to the peak value of the assumed maximum of the slow-front overvoltages.
- for the **fast-front overvoltage**: a standard lightning impulse with peak value equal to the peak value of the assumed maximum of the fast-front overvoltages.

- for the **very-fast-front overvoltage**: the characteristics for this class of overvoltage are specified by the relevant apparatus committees.
- for the **slow-front phase-to-phase overvoltage**: a standard combined switching impulse with peak value equal to the peak value of the assumed maximum of the slow-front phase-to-phase overvoltages.

NOTE 2 - An useful characteristic is the actual ratio, α , in service of the peak value of the negative component, U^- , to the peak value, $U^+ + U^-$, of the assumed maximum phase-to-phase overvoltage: $\alpha = U^-(U^+ + U^-)$.

- for the **slow-front [or fast-front] longitudinal overvoltage**: a combined voltage consisting of a standard switching [or lightning] impulse and of a power-frequency voltage, each with peak value equal to the two relevant assumed maximum peak values, and with the instant of impulse peak coinciding with the peak of the power-frequency of opposite polarity.

4.3 Determination of the co-ordination withstand voltages (U_{cw})

The determination of the co-ordination withstand voltages consists of determining the lowest values of the withstand voltages of the insulation meeting the performance criterion when subjected to the representative overvoltages under service conditions.

The co-ordination withstand voltages of the insulation have the shape of the representative overvoltages of the relevant class and their values are obtained by multiplying the values of the representative overvoltages by a co-ordination factor. The value of the co-ordination factor depends on the accuracy of the evaluation of the representative overvoltages and on an empirical, or on a statistical, appraisal of the distribution of the overvoltages and of the insulation characteristics.

The co-ordination withstand voltages can be determined as either **conventional assumed withstand voltages** or **statistical withstand voltages**. This affects the determination procedure and the values of the co-ordination factor.

Simulations of overvoltage events combined with the simultaneous evaluation of the risk of failure, using the relevant insulation characteristics, permit the direct determination of the statistical co-ordination withstand voltages without the intermediate step of determining the representative overvoltages.

4.4 Determination of the required withstand voltages (U_{rw})

The determination of the required withstand voltages of the insulation consists of converting the co-ordination withstand voltages to appropriate standard test conditions. This is accomplished by multiplying the coordination withstand voltages by factors which compensate for the differences between the actual in-service conditions of the insulation and those in the standard withstand tests.

The factors to be applied shall compensate for:

- the differences in the equipment assembly;
- the dispersion in the product quality;
- the quality of installation;
- the ageing of the insulation during the expected lifetime;
- other unknown influences.

If, however, these factors cannot be evaluated individually, an overall safety factor, derived from experience, shall be adopted.

For external insulation only, an additional factor shall be applied to account for the differences between the standard reference atmospheric conditions and those expected in service.

4.5 Selection of the rated insulation level

The selection of the rated insulation level consists of the selection of the most economical set of standard withstand voltages (U_w) of the insulation sufficient to prove that all the required withstand voltages are met.

The continuous power-frequency withstand voltage of the insulation, that is its highest voltage for equipment, is then chosen as the next standard value of U_m equal to or higher than the required continuous power-frequency withstand voltage.

Standardization of tests, as well as the selection of the relevant test voltages, to prove the compliance with U_m , are performed by the relevant apparatus committees (e.g. pollution tests or partial discharge inception voltage tests).

The withstand voltages to prove that the required temporary, slow-front and fast-front withstand voltages are met, for phase-to-earth, phase-to-phase and longitudinal insulation, may be selected with the same shape as the required withstand voltage, or with a different shape, exploiting, for this last selection, the intrinsic characteristics of the insulation.

The value of the withstand voltage is then selected in the list of the standard withstand voltages reported in 4.6 and 4.7, as the next value equal to or higher than:

- the required withstand voltage in the case of the same shape;
- the required withstand voltage multiplied by the relevant test conversion factor in the case of a different shape.

NOTE - This may allow the adoption of a single standard withstand voltage to prove compliance with more than one required withstand voltage, thus giving the possibility of reducing the number of standard withstand voltages that would define a rated insulation level (see 4.9, for example).

The selection of the standard withstand voltage to prove the compliance with the very-fast-front required withstand voltage shall be considered by the relevant apparatus committees.

4.6 List of standard short-duration power frequency withstand voltages

The following r.m.s. values, expressed in kV, are standardized:

10	20	28	38	50	70	95	140
175	230	275	325	360	395	460	510
630	680						

4.7 List of standard impulse withstand voltages

The following peak values, expressed in kV, are standardized:

20	40	60	75	95	125	145	170
250	325	450	550	650	750	850	950
1 050	1 175	1 300	1 425	1 550	1 675	1 800	1 950
2 100	2 250	2 400					

4.8 Ranges for highest voltage for equipment

The standard highest voltages for equipment are divided in to two ranges:

Range I: Above 1 kV to 245 kV included. This range covers both transmission and distribution systems. The different operational aspects, therefore, shall be taken into account in the selection of the rated insulation level of the equipment.

Range II: Above 245 kV. This range covers mainly transmission systems.

4.9 Selection of the standard insulation levels

The association of standard withstand voltages with the highest voltage for equipment has been standardized to benefit from the experience gained from the operation of systems designed according to IEC standards and to enhance standardization.

The standard withstand voltages are associated with the highest voltage for equipment according to table 2 for range I and table 3 for range II. The associations obtained by connecting standard withstand voltages of all columns without crossing horizontal marked lines are defined as standard insulation levels.

NOTES

1 In some countries other values of U_m and of rated withstand voltages are still in use for range I. Table A.1 of annex A reports these values as well as the relevant associations, which, however, do not constitute standard insulation levels.

2 If, for the *switching impulse* withstand voltage test, the apparatus committees specify a positive component lower than the negative, the required withstand voltage of the external insulation is not proven unless a suitable test conversion factor is introduced.

Furthermore, the following associations are standardized for phase-to-phase and longitudinal insulation:

– For *phase-to-phase insulation, range I*, the standard short-duration *power-frequency* and *lightning impulse* phase-to-phase withstand voltages are equal to the relevant phase-to-earth withstand voltages (table 2). The values in brackets, however, may be insufficient to prove that the required withstand voltages are met and additional phase-to-phase withstand tests may be needed.

– For *phase-to-phase insulation, range II*, the standard *lightning impulse* withstand voltage phase-to-phase is equal to the lightning impulse phase-to-earth.

- For longitudinal insulation, range I, the standard short-duration power-frequency and lightning impulse withstand voltages are equal to the relevant phase-to-earth withstand voltages (table 2).
- For longitudinal insulation, range II, the standard switching impulse component of the combined withstand voltage is given in table 3, while the peak value of the power-frequency component of opposite polarity is $U_m \times \sqrt{2/\sqrt{3}}$, and the standard lightning impulse component of the combined withstand voltage is equal to the relevant phase-to-earth withstand voltage (table 3), while the peak value of the power-frequency component of opposite polarity is $0,7 \times U_m \times \sqrt{2/\sqrt{3}}$.

More than one preferred association is foreseen for most of the highest voltages for equipment to allow for the application of different performance criteria or overvoltage patterns.

For the preferred associations, only two standard withstand voltages are sufficient to define the standard insulation level of the equipment:

- For equipment in range I:
 - a) the standard lightning impulse withstand voltage, and
 - b) the standard short-duration power-frequency withstand voltage.
- For equipment in range II:
 - a) the standard switching impulse withstand voltage, and
 - b) the standard lightning impulse withstand voltage.

If technically and economically justified, other associations may be adopted. The recommendations of 4.2 to 4.8 shall be followed in every case. The resulting set of standard withstand voltages shall be termed, therefore, rated insulation level. Particular examples are:

- For external insulation, for the higher values of U_m in range I, it may be more economical to specify a standard switching impulse withstand voltage instead of a standard short-duration power-frequency withstand voltage.
- For internal insulation in range II, high temporary overvoltages may require the specification of a standard short-duration power-frequency withstand voltage.

5 Requirements for standard withstand voltage tests

5.1 General requirements

Standard withstand voltage tests are performed to demonstrate, with suitable confidence, that the actual withstand voltage of the insulation is not lower than the corresponding specified withstand voltage. The voltages applied in withstand voltage tests are standard withstand voltages unless otherwise specified by the relevant apparatus committees.

In general, withstand voltage tests consist of dry tests performed in a standard situation (test arrangement specified by the relevant apparatus committees and standard reference atmospheric conditions). However, for non-weather-protected external insulation, the standard short-duration power-frequency and switching impulse withstand tests consist of wet tests performed under the conditions specified in IEC 60-1.

During wet tests, the rain shall be applied simultaneously on all air and surface insulation under voltage.

If the atmospheric conditions in the test laboratory differ from standard conditions, the test voltages shall be corrected according to IEC 60-1.

All impulse withstand voltages shall be verified for both polarities, unless the relevant apparatus committees specify one polarity only.

When it has been demonstrated that one condition (dry or wet) or one polarity or a combination of these produces the lowest withstand voltage, then it is sufficient to verify the withstand voltage for this particular condition.

The insulation failures that occur during the test are the basis for the acceptance or rejection of the test specimen. The relevant apparatus committees or IEC technical committee 42 shall define the occurrence of a failure and the method to detect it.

When the standard withstand voltage of phase-to-phase (or longitudinal) insulation is equal to that of phase-to-earth insulation, it is recommended that phase-to-phase (or longitudinal) insulation tests and phase-to-earth tests be performed together by connecting one of the two phase terminals to earth.

5.2 *Standard short-duration power-frequency withstand voltage tests*

A standard short-duration power-frequency withstand voltage test consists of one application of the relevant standard withstand voltage to the terminals of the insulation configuration.

Unless otherwise specified by the relevant apparatus committees, the insulation is considered to have passed the test if no disruptive discharge occurs. However, if one disruptive discharge occurs on the self-restoring insulation during a wet test, the test may be repeated once and the equipment is considered to have passed the test if no further disruptive discharge occurs.

When the test cannot be performed (such as for transformers with non-uniform insulation), the relevant apparatus committees may specify frequencies up to a few hundred hertz and durations shorter than one minute. Unless otherwise justified, the test voltages shall be the same.

5.3 *Standard impulse withstand voltage tests*

A standard impulse withstand voltage test consists of a specified number of applications of the relevant standard withstand voltage to the terminals of the insulation configuration. Different test procedures may be selected to demonstrate that the withstand voltages are met with a degree of confidence that experience has shown to be acceptable.

The test procedure shall be selected by the apparatus committees from the following test procedures which are standardized and fully described in IEC 60-1:

- Three-impulse withstand test in which no disruptive discharge is tolerated.
- Fifteen-impulse withstand test in which up to two disruptive discharges on the self-restoring insulation are tolerated.

- Three-impulse withstand test in which one disruptive discharge on the self-restoring insulation is tolerated. If this occurs, nine additional impulses are applied during which no disruptive discharge is tolerated.
- The up-and-down withstand test with seven impulses per level in which disruptive discharges on self-restoring insulation are tolerated.
- The up-and-down test with one impulse per level, which is recommended only if the conventional deviation, z , defined in IEC 60-1 is known. The values suggested there, $z = 6\%$ for switching and $z = 3\%$ for lightning impulses, shall be used if, and only if, it is known that $z \leq 6\%$ and $z \leq 3\%$ respectively. Otherwise other methods shall be used.

In all the test procedures described above no disruptive discharge is tolerated on the non-self-restoring insulation.

No statistical meaning can be given to the three-impulse withstand test in which no disruptive discharge is tolerated (P_w is assumed to be 100 %). Its use is limited to cases in which the non-self-restoring insulation may be damaged by a large number of voltage applications.

When selecting a test for equipment in which non-self-restoring insulation is in parallel with self-restoring insulation, serious consideration should be given to the fact that in some test procedures voltages higher than the rated withstand voltage may be applied and many disruptive discharges may occur.

5.4 *Alternative test situation*

When it is too expensive or too difficult or even impossible, to perform the withstand tests in standard test situations, the apparatus committees, or IEC technical committee 42, shall specify the best solution to prove the relevant standard withstand voltages. One possibility is to perform the test in an alternative test situation.

An alternative test situation consists of one or more different test conditions (test arrangements, values or types of test voltages, etc.). It is necessary, therefore, to demonstrate that the physical conditions for the disruptive discharge development, relevant to the standard situation, are not changed.

NOTE – A typical example is the use of a single voltage source for the tests of longitudinal insulation, while insulating the base, instead of a combined voltage test. In this case, the demonstration mentioned above concerning the disruptive discharge development is a very stringent condition for the acceptance of the alternative.

5.5 *Phase-to-phase and longitudinal insulation standard withstand voltage tests for equipment in range I*

a) *Power-frequency tests*

For some equipment with $123 \text{ kV} \leq U_m \leq 245 \text{ kV}$, the phase-to-phase (or longitudinal) insulation may require a power-frequency withstand voltage higher than the phase-to-earth power-frequency withstand voltage as shown in table 2. In such cases the test shall preferably be performed with two voltage sources. One terminal shall be energized with the phase-to-earth power-frequency withstand voltage and the other with the difference between the phase-to-phase (or longitudinal) and the phase-to-earth power-frequency withstand voltages. The earth terminal shall be earthed.

Alternatively the test may be performed:

- with two equal power-frequency voltage sources in phase opposition, each energizing one phase terminal with half of the phase-to-phase (or longitudinal) insulation power-frequency withstand voltage. The earth terminal shall be earthed.
- with one power-frequency voltage source. The earth terminal may be allowed to assume a voltage to earth sufficient to avoid disruptive discharges to earth or to the earth terminal.

NOTE – If the voltage that the terminal, which is earthed in service, assumes to earth in the test influences the electrical stresses on the phase terminal (as occurs in compressed gas longitudinal insulation having $U_m \geq 72,5$ kV), means shall be adopted to maintain this voltage as close as possible to the difference between the test voltage of the phase-to-phase (or longitudinal) insulation and that of the phase-to-earth insulation.

b) *Phase-to-phase (or longitudinal) insulation lightning impulse tests*

The phase-to-phase (or longitudinal) insulation may require a lightning impulse withstand voltage higher than the standard phase-to-earth withstand voltage as shown in table 2. In such cases, the relevant tests shall be performed immediately after the phase-to-earth insulation tests increasing the voltage without changing the test arrangement. In evaluating the test results, the impulses leading to disruptive discharge to earth are considered as non-events.

When the number of discharges to earth does not allow the test to be performed, a combined test shall be adopted with an impulse component equal to the phase-to-earth lightning impulse withstand voltage and a power-frequency component with the peak value of opposite polarity equal to the difference between the phase-to-phase (or longitudinal) and the phase-to-earth lightning impulse withstand voltages. Alternatively, for external insulation, the relevant apparatus committees may specify that the phase-to-earth insulation be increased.

5.6 *Phase-to-phase and longitudinal insulation standard withstand voltage tests for equipment in range II*

The combined voltage withstand test shall be performed meeting the following requirements:

- the test configuration shall suitably duplicate the service configuration, especially with reference to the influence of the earth plane;
- each component of the test voltage shall have the value specified in 4.9;
- the earth terminal shall be connected to earth;
- in phase-to-phase tests the terminal of the third phase shall be either removed or earthed;
- in longitudinal insulation tests the terminals of the other two phases shall be either removed or earthed.

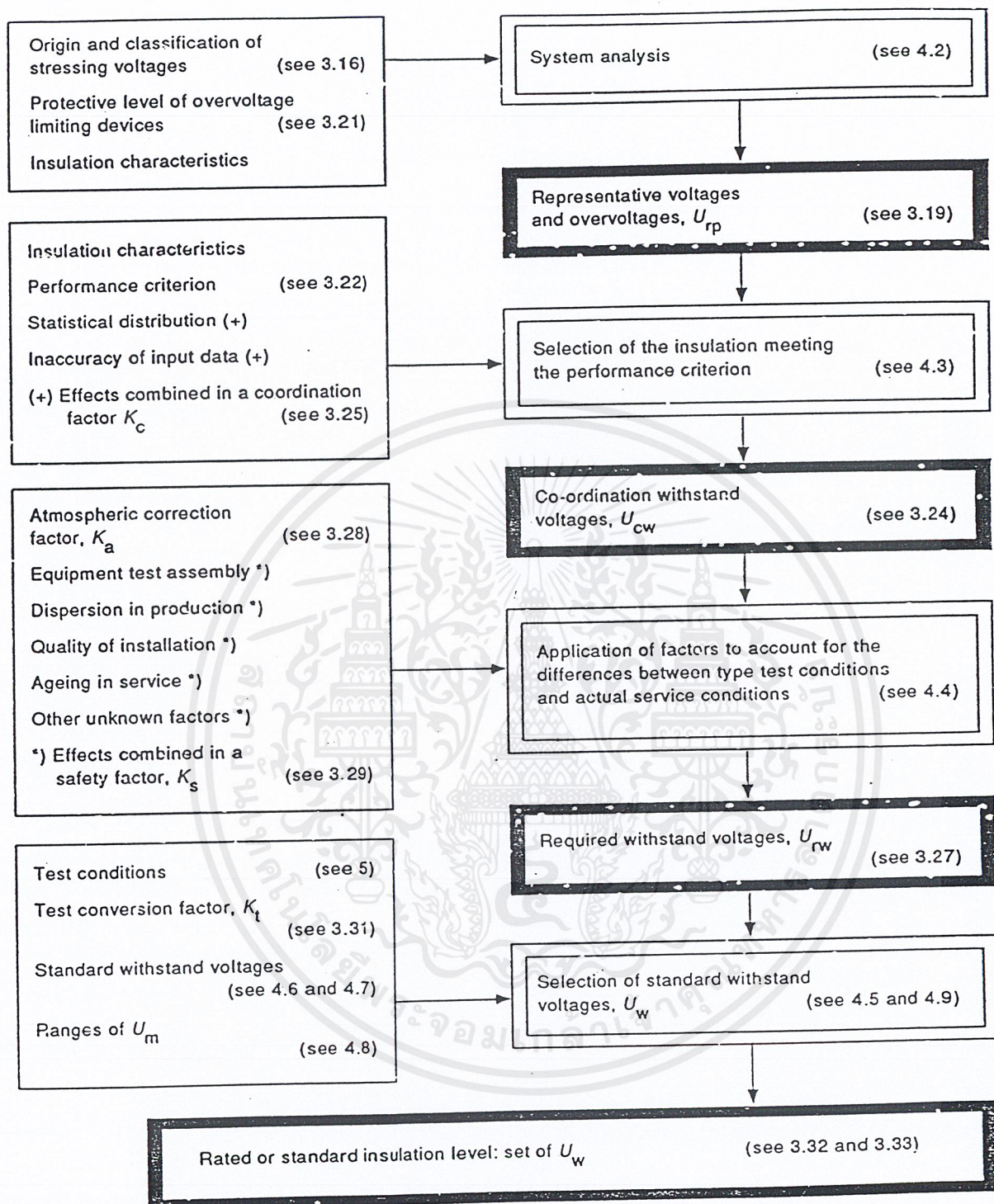
The test shall be repeated for all possible combinations of the phase terminals, unless proved unnecessary by considerations of electrical symmetry.

The longitudinal insulation lightning impulse withstand test of equipment in range II also proves the phase-to-earth lightning impulse withstand in the open position.

In the evaluation of the test results, any disruptive discharge is counted. More detailed recommendations for the tests are given by apparatus committees and IEC 60-1.

For special applications, the relevant apparatus committees may extend to longitudinal insulation lightning impulse withstand tests of range II the same test procedure applicable to equipment of range I.





NOTE - In brackets the subclauses reporting the definition of the term or the description of the action.

- sided boxes refer to required input.
- ===== sided boxes refer to performed actions.
- sided boxes refer to obtained results.

Figure 1 - Flow chart for the determination of rated or standard insulation level

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญาานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจากท่าน รศ. ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล ซึ่งได้ให้คำแนะนำผู้ทำโครงการและชี้แนวทางในการทำปริญญาานิพนธ์ตลอดมา และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณ สืบพงศ์ สุวรรณภู และนักศึกษปริญญาโทห้อง Staff 2 ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ทั้งเสบียงอาหาร และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการ คุณ ประเสริฐ รั้งสีโสภณอารมณ์ ศูนย์บำรุงรักษาระบบส่ง บางพลี ที่เอื้อเพื่อให้เอกสารคู่มือการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และคำแนะนำดีๆ คุณ โกศล รมณ์ยสมิต บริษัท เมอเซอร์โทนิคส์ จำกัด ที่ให้คำปรึกษาในการซ่อมแซมอุปกรณ์

ขอขอบพระคุณ สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเพื่อมาตรฐานการทดสอบอุปกรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงการ

และขอขอบพระคุณผู้ที่ให้การช่วยเหลือผู้ทำโครงการนี้ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทุกๆ ท่าน เป็นอย่างสูง

คณะผู้จัดทำ

บรรณานุกรม

- [1] E.Kuffel and W.S. Zaengl . **High-Voltage Engineering fundamental** . A. Wheaton & Co. Ltd. , Exeter , 1998
- [2] M S NAIDU and V KAMARAJU . **High Voltage Engineering** . Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited . NEW DELHI ,1983
- [3] Dieter Kind . **An introduction to High-Voltage Experimental Technique** . Friedr,Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH , Braunschweig , 1978
- [4] PASSONI VILLA Co. Ltd . **คู่มือการใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV 5 kJ** . MILANO-Viale Suzzani , 1995
- [5] Pulse Electronic Engineering Co. Ltd . **คู่มือการใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 kV** .Tokyo. Japan , 1982
- [6] IEC Standard Publ. NO. 60-1989 . **High Voltage Test Techniques**
- [7] IEC Standard Publ. NO. 71-1993 . **Insulation Co-ordination**
- [8] IEC Standard Publ. NO. 52-1960 . **High-Voltage Measurement by Means of Sphere-gaps**
- [9] ตำราวย สังข์สะอาด , ดร. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง** . ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2528
- [10] วีระศักดิ์ พิรักษา . **การออกแบบและวางผังห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง** . เทคนิค 145 , มีนาคม 2540
- [11] สิริวัฒน์ โทธิเวชกุล . **เอกสารประกอบรายวิชา High Voltage Technology** . ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [12] ศุทธิ บรรจงจิตร . **ระบบสายดินของห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง** . วิศวกรรมสาร , 3 มิถุนายน 2527