สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่ากับโครงสร้างอาคาร

(The study of Lightning phenomena striking on building Construction)

โดย

1. นาย เจด	อิทธิเวชชัย	รหัส 46010127
2. นาย เจษฎา	มณีวงศ์	รหัส 46010130
3. นาย ชัยณรงค์	ธรรมจินดารัช	รหัส 46010157

วพ.
จ 688 ก
ล49

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 72628
วัน,เดือน,ปี 21 ธ.ค. 2550

b 11770518
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่ากับโครงสร้างอาคาร

The study of Lightning phenomena striking on building Construction

โดย

นาย เจด อิทธิเวชชัย

นาย เจษฎา มณีวงศ์

นาย ชัยณรงค์ ธรรมจินดารัช

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช

ดร.วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I

การศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่ากับโครงสร้างอาคาร

นาย เจด อิทธิเวชชัย
นาย เจษฎา มณีวงศ์
นาย ชัยณรงค์ ธรรมจินดารัช
อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.วุฒิชัย ชาดิพัฒนานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับพฤติกรรมฟ้าผ่าตัวอาคาร โดยได้จัดสร้างตัวตรวจจับกระแสอิมพัลส์ ชนิดด้วยความต้านทานชั้นท์พิกัด 0.1 โอห์ม เพื่อตรวจจับกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า ตัวต้านทานชั้นท์ที่จัดสร้างขึ้นมีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด และได้นำไปทดสอบกับโครงสร้างอาคารจำลอง เพื่อศึกษาการกระจายของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยการควบคุมเปลี่ยนค่าความต้านทานดินของโครงสร้างอาคาร ขั้นตอนการศึกษาได้ทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้กับโครงสร้างของตัวอาคาร แล้วทำการวัดค่ากระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นตามจุดต่างๆ ของโครงสร้าง รายละเอียดผลการทดลองดังนำเสนอในปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่ากับโครงสร้างอาคาร

ผู้จัดทำ

นาย เจด	อิทธิเวชชัย	46010127
นาย เจษฎา	มณีวงศ์	46010130
นาย ชัยณรงค์	ธรรมจินดารัช	46010157

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The study of Lightning phenomena striking on building Construction

Jade Ittivetchai
Jetsada Maneevong
Chainarong Thumjindarat
Norasage Pattanadech Advisor
Dr. Vuttichai Chatpattananan Advisor
2006

ABSTRACT

This project studies the behavior of the lightning striking on buildings. By constructing a Shunt's impulse current detector at 0.1 ohm in order to detect the impulse current of lightning. The constructed Shunt's resistor has the standard properties as indicated. The resistor was tested with a simulated building structure to study the distribution of the impulse current by adjusting a ground resistance of the structure. The first procedure of the study is done by feeding the impulse voltage to the structure , and then measuring the impulse current occurring at any point of the structure. All details and test results are shown in this project

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงด้วยดีเนื่องด้วยคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากหลายๆฝ่าย ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ อาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ดร.วุฒิชัย ชาดิพัฒนานันท์ ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ทั้งยังให้คำปรึกษาชี้แนะ และแนะนำแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ต่อคณะผู้จัดทำและได้ตรวจสอบแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทำให้ผู้จัดทำมีความภูมิใจเป็นอย่างมากที่ได้มีโอกาสทำปริญญานิพนธ์นี้

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณการไฟฟ้าที่อนุเคราะห์ความต้านทานชั้นท์ตัวมาตรฐานเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับความต้านทานชั้นท์ที่ได้จัดทำขึ้น

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ อ.สุรัช ณ สงขลา และ พี่ ณัฐพงษ์ ประพฤติ และรุ่นพี่ปริญญาโทที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะทำให้การทดสอบเป็นไปด้วยความเรียบร้อย

ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิปราสาทวิชาและให้ความช่วยเหลือในทุกด้านแก่คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ..... I
ABSTRACT..... II
กิตติกรรมประกาศ..... III
สารบัญ..... IV
สารบัญรูป..... VIII
สารบัญตาราง..... XI
บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ที่มาของปัญหา..... 2
1.2 งานวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง..... 2
1.3 ขอบเขตของโครงการ..... 2
1.4 วัตถุประสงค์..... 2
1.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
1.7 แผนการในการดำเนินโครงการ..... 3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 5
2.1 ธรรมชาติของการเกิดฟ้าผ่า..... 5
2.1.1 ฟ้าผ่าคืออะไร..... 5
2.1.2 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า..... 5
2.2 คุณลักษณะของฟ้าผ่า..... 5
2.2.1 ฟ้าผ่าลง-ฟ้าผ่าขึ้น..... 5
2.2.2 ขั้วของกระแสฟ้าผ่าและรูปคลื่น..... 7
2.2.3 ฟ้าผ่าซ้ำ..... 8
2.2.4 ขนาดของกระแสฟ้าผ่า..... 9
2.3 ผลจากฟ้าผ่า..... 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1 ผลทางความร้อน....10
2.3.2 ผลจากแรงทางกลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า....10
2.3.3 ผลจากการรบกวนทางสนามแม่เหล็ก....11
2.3.4 ผลจากการเกิดแรงดัน สปาร์กด้านข้าง....11
2.3.5 ผลที่เกิดจากฟ้าผ่าคนโดยตรง....11
2.3.6 ผลจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส....11
2.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่าต่ออาคารและสิ่งปลูกสร้างตามมาตรฐาน IEC....12
2.4.1 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก....13
2.4.1.1 ตัวนำล่อฟ้า....13
2.4.1.2 ตัวนำลงดิน....18
2.4.1.3 รากสายดิน....18
2.5 การวัดกระแสอิมพัลส์....19
2.5.1 ชนิดและมาตรฐานของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์....19
2.5.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์....22
2.5.3 การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์....23

บทที่ 3 การวัดและการออกแบบตัวตรวจจับกระแสอิมพัลส์....25
3.1 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์....25
3.1.1 หลักการทำงานของความต้านทานชั้นท์....25
3.1.2 ชนิดของความต้านทานชั้นท์....26
3.1.2.1 ความต้านทานชั้นท์แบบ Wire wound หรือ Squirrel cage....26
3.1.2.2 ความต้านทานชั้นท์แบบท่อ Tubular....29
3.1.3 เคเบิลวัด (Measuring Cables)....31
3.1.4 เวลาตอบสนอง (Response Time)....32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2 การออกแบบความต้านทานชั้นท์.....34
3.2.1. แกนของชั้นท์.....34
3.2.1.1 แท่งตัวนำ.....34
3.2.1.2 แผ่นตัวนำ.....35
3.2.1.3 ตัวต้านทานที่ใช้เป็นตัวต้านทานชั้นท์.....35
3.2.1.4 ฉนวน.....36
3.2.2 กระบอกชีลด์.....37
3.2.3 สายสัญญาณ.....38

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....39
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ.....39
4.1.1. เครื่องกำเนิดอิมพัลส์.....39
4.1.2. ออสซิลโลสโคป.....39
4.1.3. ความต้านทานชั้นท์ที่ใช้เป็นมาตรฐาน.....40
4.1.4. ความต้านทานชั้นท์ที่ใช้ทดสอบ.....40
4.1.5. สายเคเบิลวัด.....41
4.1.6. สายนำส่งแรงสูง.....41
4.1.7. อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้อง.....42
4.1.8. ตะขอกราวด์.....42
4.2 การทดสอบหาสเกลแฟคเตอร์ที่กำหนด.....45
4.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น.....52
4.4 การทดสอบดูการกระจายของกระแสในโครงสร้างอาคารจำลอง.....58

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....64
5.1 สรุป.....64
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....66

ภาคผนวก.....67

ภาคผนวก ก ตัวอย่างสมการที่ใช้ในการออกแบบ.....68

ภาคผนวก ข การประกอบสร้าง.....70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ฟ้าผ่าลง....6

2.2 ฟ้าผ่าขึ้น....6

2.3 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า....7

2.4 กระบวนการเกิดฟ้าผ่าซ้ำ....8

2.5 แรงสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว....12

2.6 ส่วนประกอบของระบบป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่าแบบฟาราเดย์....13

2.7 air termination แบบวิธีโครงสร้างดาข่าย....14

2.8 termination เมื่อหลังคาทำจากวัสดุที่ติดไฟได้....15

2.9 การใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่เป็น air termination....16

2.10 ระยะการป้องกันโดย 2 Air-termination....16

2.11 ระยะการป้องกันโดยหลาย ๆ Air-termination....18

2.12 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1(1989) [2]....20

2.13 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์....22

2.14 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์....24

3.1 วงจรวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยชั้นท์ความต้านทานต่ำ....25

3.2 Star-type Wire wound Shunt....27

3.3 Squirrel cage Shunt โดยใช้ลวดความต้านทานแบบพับซ้อน....28

3.4 Squirrel cage Shunt ที่สร้างจากลวดความเหนี่ยวนำต่ำพันกระจายให้การพันสม่ำเสมอบนฉนวนทรงกระบอก....28

3.5 การต่อวัดความต้านทานชั้นท์แบบทรงกระบอก....29

3.6 ความต้านทานชั้นท์แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม....30

3.7 แท่งตัวนำ....34

3.8 แผ่นตัวนำ....35

3.9 ตัวต้านทานชนิด metal film....35

3.10 ฉนวน....36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.11	กระบอกชีลด์	37
3.12	สายสัญญาณ	38
4.1	ชุดเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ 6 kV, 3 kA	39
4.2	ออสซิลโลสโคป	39
4.3	ความต้านทานชั้นท์ที่ใช้เป็นมาตรฐาน	40
4.4	ความต้านทานชั้นท์ที่ใช้ทดสอบ	40
4.5	สายเคเบิลวัด	41
4.6	สายนำส่งแรงสูง	41
4.7	อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้องทดลอง	42
4.8	ตะขอกราวด์	42
4.9	วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมที่มีความต้านทานชั้นท์ต่อวัดในวงจร	43
4.10	วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์	43
4.11	วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์ (รูปวงจรจริง)	44
4.12	ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานขั้วบวก	46
4.13	ผลการทดสอบ R-shunt ที่กลุ่มโครงงานได้ทำการสร้างขึ้นมาขั้วบวก	47
4.14	ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่มโครงงานได้ทำการสร้างขึ้นมา	47
4.15	ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานขั้วลบ	50
4.16	ผลการทดสอบ R-shunt ที่กลุ่มโครงงานได้ทำการสร้างขึ้นมาขั้วลบ	50
4.17	ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่มโครงงานได้ทำการสร้างขึ้นมา	50
4.18	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 200A (ขั้วบวก)	53
4.19	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 400A (ขั้วบวก)	53
4.20	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 600A (ขั้วบวก)	53
4.21	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 800A (ขั้วบวก)	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.22	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 1000A (ขั้วบวก)	54
4.23	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 200A (ขั้วลบ)	55
4.24	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 400A (ขั้วลบ)	56
4.25	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 600A (ขั้วลบ)	56
4.26	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 800A (ขั้วลบ)	56
4.27	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 1000A (ขั้วลบ)	57
4.28	วงจรการทดสอบการกระจายของกระแสในโครงสร้างอาคารจำลอง	58
4.29	วงจรการทดสอบการกระจายของกระแสในโครงสร้างอาคารจำลอง (รูปวงจรจริง)	59
4.30	ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 2 โอห์ม	61
4.31	ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 20 โอห์ม	62
4.32	ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 100 โอห์ม	63
5.1	ตัวต้านทานที่เกิดการเสื่อมสภาพ	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟ้าผ่า	9
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการป้องกันและชนิดของระบบการป้องกัน	12
2.3	ความหนาน้อยที่สุดของแผ่นโลหะหรือท่อโลหะที่ใช้ในระบบ Air termination	15
2.4	ตารางแสดงการคำนวณระยะป้องกัน	17
3.1	เวลาตอบสนองที่ต้องการของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์	33
4.1	ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ S (ขั้วบวก)	46
4.2	ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ S (ขั้วลบ)	49
4.3	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิง (ขั้วบวก)	52
4.4	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิง (ขั้วลบ)	55
4.5	ผลการทดสอบการกระจายของกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ S	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่งซึ่งสร้างความเสียหายให้แก่ชีวิตและทรัพย์สินได้เป็นอย่างมาก ดังนั้นมนุษย์จึงได้พยายามคิดค้นวิธีป้องกันฟ้าผ่าขึ้นมา ซึ่งก็คือ การป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่า จากการวิจัยคิดค้นวิธีการป้องกันฟ้าผ่าที่คิดขึ้นมาตั้งแต่ยุคแรกจนถึงปัจจุบันก็ยังมีหลักการที่คล้ายคลึงกันแต่ในยุคปัจจุบันนี้มีการป้องกันที่รัดกุมมากขึ้น ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยมากขึ้น ความจำเป็นในการป้องกันก็มีสูงขึ้น เนื่องจากสถานที่บางแห่งถ้าถูกฟ้าผ่าจะเกิดความเสียหายมีค่ามหาศาล เช่น คลังน้ำมันขนาดใหญ่ เสาส่งไฟฟ้าแรงสูง อาคารสถานที่บางแห่ง

การป้องกันฟ้าผ่าในปัจจุบันยังใช้วิธีใช้ตัวนำล่อฟ้าในการป้องกัน หลักการในการออกแบบและติดตั้ง ตัวนำล่อฟ้านั้นมีหลักการที่ง่ายๆ ไม่ซับซ้อน พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบก็มีค่าคงที่และตัวแปรไม่กี่ตัว แต่ถ้าพิจารณาดูในจุดนี้แล้ว จะพบข้อสงสัยในหลายประการที่เกี่ยวกับระบบตัวนำล่อฟ้าที่ใช้อยู่ ปัญหาเหล่านี้ เช่น

ระบบป้องกันที่ใช้อยู่มีประสิทธิภาพเพียงใด
ระบบป้องกันได้ในขนาดของความแรงฟ้าผ่าในช่วงใด
ถ้าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวนำล่อฟ้าเปลี่ยนไป ผลการป้องกันจะเป็นอย่างไร

ปัญหาเหล่านี้ ถ้าดูจากหลักทฤษฎีในการออกแบบตัวนำล่อฟ้าแล้วคงไม่สามารถตอบได้ เนื่องจากในการออกแบบตัวนำล่อฟ้าที่ใช้อยู่นั้นไม่ได้เป็นฟังก์ชั่นหรือเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ทางฟ้าผ่าและโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยการศึกษาปัญหาเกี่ยวกับการป้องกันฟ้าผ่านั้นมีน้อยมาก ข้อมูลด่างๆ ค่อนข้างที่จะหายาก ซึ่งถ้ามีการวิจัยอย่างมีหลักเกณฑ์แล้ว เราสามารถจะออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าให้ถูกต้องเหมาะสมได้ และช่วยลดความเสียหายจากการถูกฟ้าผ่าได้

ในการเกิดฟ้าผ่านั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงกระแสอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นกระแสทรานเซี้ยน ซึ่งสามารถสร้างกระแสนี้ได้โดยเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ และใช้ป้อนให้กับการทดสอบของตัวอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องทำงานเพื่อป้องกันกระแสทรานเซี้ยน โดยกระแสทรานเซี้ยนเป็นกระแสที่มีเวลาขึ้น (Rise Time) ตั้งแต่นาโนวินาทีจนถึงหลายๆไมโครวินาทีซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ในการวัดสัญญาณที่มีการตอบสนองทางเวลาที่เร็วพอเช่นความต้านทานชั้นท์สำหรับวัดค่ากระแสในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ที่มาของปัญหา

การเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติซึ่งสร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินและชีวิตของมนุษย์ซึ่งมีความรุนแรงมากและไม่สามารถห้ามได้ จึงต้องมีการศึกษาว่าปรากฏการณ์ฟ้าผ่านั้น เกิดขึ้นได้อย่างไร มีสาเหตุในการเกิดอย่างไร และจึงต้องมีการคิดหาวิธีป้องกัน โดยทั่วไปเมื่อฟ้าผ่าลงบนโครงสร้างตัวอาคาร เชื่อกันว่าถ้าตัวอาคารมีระบบกราวด์อยู่แล้ว อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อใช้งานอยู่ในตัวอาคารก็จะไม่ได้รับผลโดยตรง แต่ก็มีไม่น้อยเช่นกันที่เกิดความเสียหายเกิดขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่าตัวอาคารจำลองนี้ โดยอาศัยตัวต้านทานชั้นท์เป็นตัวตรวจจับ

1.2 งานวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 IEC 61024-1-2 Protection of structures against lightning

1.2.4 IEC 61312-3 Protection against lightning electromagnetic impulse

1.2.5 IEC Publication 60060-1 High Voltage Test Techniques Part I General Definations and Test Requirement

1.2.4 IEC Publication 60060-2 High Voltage Test Techniques Part II Measuring system

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษากระบวนการเกิดฟ้าผ่าและวัดสัญญาณฟ้าผ่า

1.3.2 สร้างตัวตรวจจับสัญญาณฟ้าผ่าประเภท ความต้านทานชั้นท์ซึ่งมีพิกัดขนาด 0.1 โอห์ม ให้เป็นไปตามมาตรฐาน

1.3.3 ทดลองและวิเคราะห์ผลจากการจำลองกระแสฟ้าผ่าจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์แรงสูง

1.4 วัตถุประสงค์

1.4.1 เพื่อศึกษากระบวนการเกิดฟ้าผ่าและผลกระทบจากฟ้าผ่า

1.4.2 เพื่อศึกษาวิธีการวัดสัญญาณอิมพัลส์

1.4.3 เพื่อสร้างตัวตรวจจับสัญญาณฟ้าผ่าเพื่อใช้ในกระบวนการตรวจจับฟ้าผ่าที่จำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการ

1.4.4 เพื่อศึกษาผลจากกระแสฟ้าผ่าในโครงสร้างอาคารซึ่งมีความต้านทานดินแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.5.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับฟ้าผ่าและระบบป้องกันฟ้าผ่าและวิธีป้องกัน

1.5.2 ทฤษฎีการวัดและตรวจจับกระแสฟ้าผ่า

1.5.3 ทฤษฎีการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทราบถึงกระบวนการเกิดฟ้าผ่า

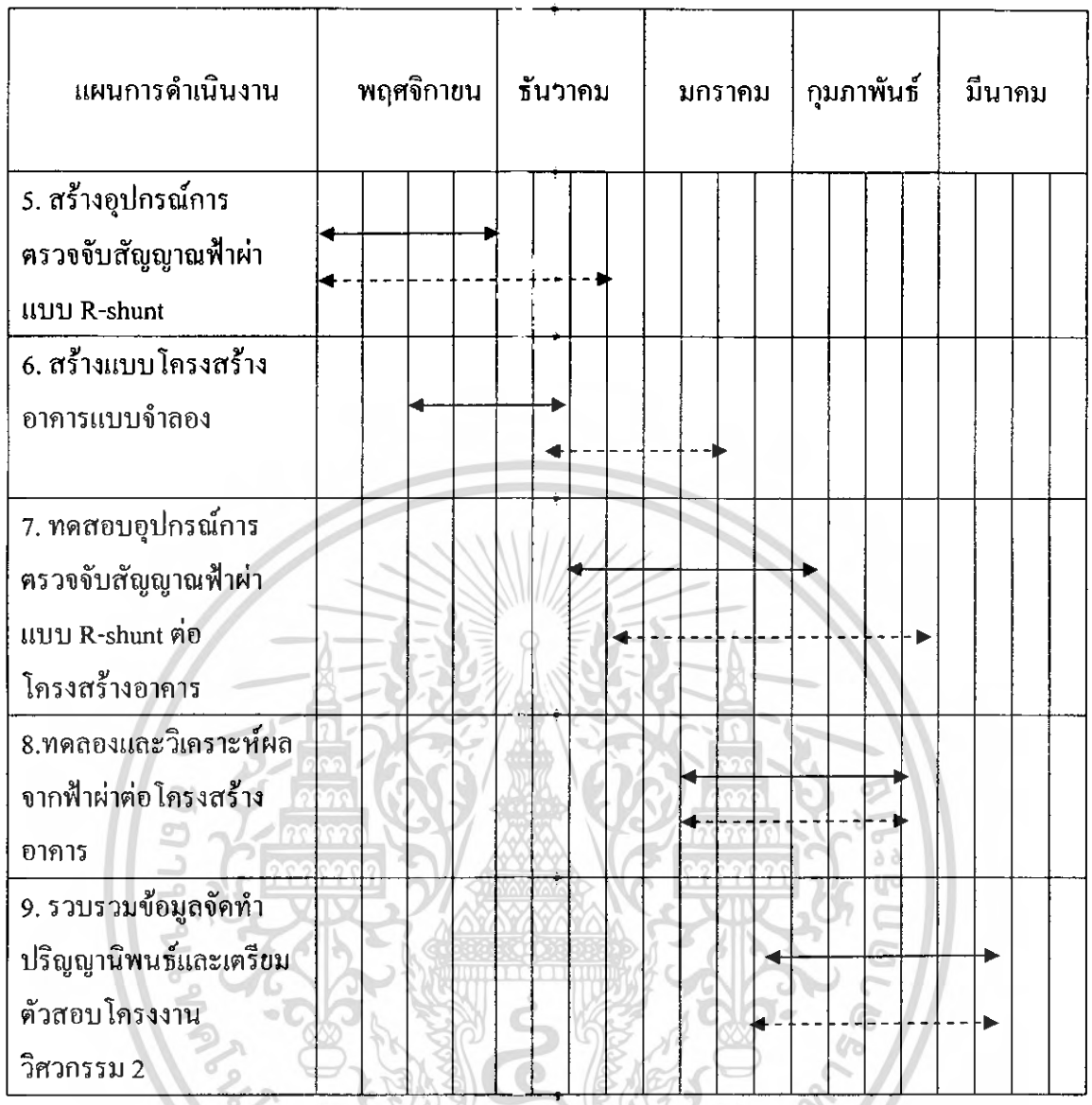
1.6.2 ทราบถึงผลกระทบจากฟ้าผ่าต่อโครงสร้างอาคารและวิธีการป้องกัน

1.6.3 สามารถออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณฟ้าผ่า แบบความต้านทานชั้นท์

1.7 แผนการในการดำเนินโครงการ

แผนการดำเนินงาน	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดฟ้าผ่าและวิธีตรวจวัดสัญญาณฟ้าผ่า	←→	←→			
2. ศึกษามาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดฟ้าผ่าและวิธีตรวจวัดสัญญาณฟ้าผ่า	←→	←→			
3. ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์การตรวจจับสัญญาณฟ้าผ่าแบบ R-shunt		←→	←→	←→	
4. เตรียมตัวสอบโครงงานวิศวกรรม 1				←→	←→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธรรมชาติของการเกิดฟ้าผ่า

2.1.1 ฟ้าผ่าคืออะไร [1]

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากการ ดิสชาร์จ (Discharge) ของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆกับพื้นโลก การสะสมประจุในก้อนเมฆมีปริมาณมาก ทำให้ก้อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูง ตั้งแต่ 10-100 MV จนอากาศที่ฉนวนระหว่าง ก้อนเมฆกับพื้นโลก เกิดการเบรกดาวน์ (Breakdown) เกิดเป็นวาบฟ้าผ่า นอกจากนี้ ยังมีการเกิด ดิสชาร์จระหว่าง ก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือ ฟ้าแลบ

2.1.2 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า [1]

ในก้อนเมฆ จะมีการสะสมประจุ ซึ่งประจุลบจะอยู่ที่ฐานของก้อนเมฆ ประจุบวกจะอยู่ด้านบนของก้อนเมฆ ซึ่งฟ้าผ่าส่วนใหญ่เป็นฟ้าผ่าแบบประจุลบ เพราะระยะใกล้พื้นโลกมากกว่าประจุบวกในก้อนเมฆ แต่ฟ้าผ่าแบบประจุบวก ก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน

กระบวนการเกิดฟ้าผ่า คือ เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าในก้อนเมฆถึงจุดวิกฤต จะเกิดการไอออไนเซชั่น ตามหลักการเกิด ดิสชาร์จ ในก๊าซ การเกิดไอออไนเซชั่นของอากาศจะเป็นลีดเดอร์ (Leader) หรือ หัวนำร่องมีทิศทางลงสู่พื้นโลกในลักษณะจังหวะก้าว (stepped leader) โดยเฉลี่ยช่วงก้าวละประมาณ 50 เมตร ในทิศทางที่แตกตัวง่ายที่สุดความเร็ว 10-100 km/s แต่ละจังหวะก้าวจะหยุดพักราว 10-50 μs ก่อนที่จะกระโดดก้าวต่อไป เมื่อหัวนำร่องเข้ามาใกล้พื้นโลก จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่พื้นโลก ที่ยอดแหลมของอาคาร สิ่งปลูกสร้างหรือต้นไม้ เป็นต้น เกิดไอออไนซ์ เป็นสตรีมเมอร์ (streamer) มีความยาว 1-100 เมตร เฉลี่ย 20 เมตร วิ่งเข้าหาหัวนำร่อง จนมาพบกันเกิดเป็นลำฟ้าผ่า (main stroke) มีแสงจ้าจากพื้นวิ่งไปหาก้อนเมฆด้วยความเร็วสูงกว่า 50-1000 km/s ตามแนวที่หัวนำร่องกรุยทางลงมาเอง ระยะทางสุดท้ายที่หัวนำร่องกระโดด เข้าหา สตรีมเมอร์ เรียกว่า ระยะฟ้าผ่า (striking distance) มีระยะเฉลี่ยประมาณ 50 เมตร การเคลื่อนที่ของประจุในลำฟ้าผ่า คือ กระแสฟ้าผ่านั่นเอง

2.2 คุณลักษณะของฟ้าผ่า

2.2.1 ฟ้าผ่าลง-ฟ้าผ่าขึ้น [1]

ปรากฏการณ์ที่ประจุในก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลก ที่กล่าวมาเรียกว่า ฟ้าผ่าลง ซึ่งฟ้าผ่าลงจะสังเกตจากลำแสงฟ้าผ่าว่าจะมีการแขนงจากลำฟ้าผ่ากระจายสู่พื้นโลกมีลักษณะคล้ายรากต้นไม้ เนื่องจากว่า หัวนำร่องที่กรุยทางมานั้น อาจคืบหน้ามาหลายทางตามทางที่ขยายตัวได้ง่ายกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟ้าผ่าขึ้นมีกระบวนการฟ้าผ่า เช่นเดียวกับ ฟ้าผ่าลง แต่หัวนำร่องจะเริ่มก่อตัวจาก ยอดโครงสร้างที่สูงจากพื้นดินตั้งแต่ 100 เมตร ขึ้นไป เช่นต้นไม้ สิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น สังเกตจากลำแสง จะคล้ายรากต้นไม้ เช่นเดียวกันแต่ จะแตกจากพื้นดินขึ้นฟ้า จากการสังเกตพบว่าฟ้าผ่าขึ้นมักเป็นผลอันเนื่องจากฟ้าผ่าลง

รูปที่ 2.1 ฟ้าผ่าลง

รูปที่ 2.2 ฟ้าผ่าขึ้น

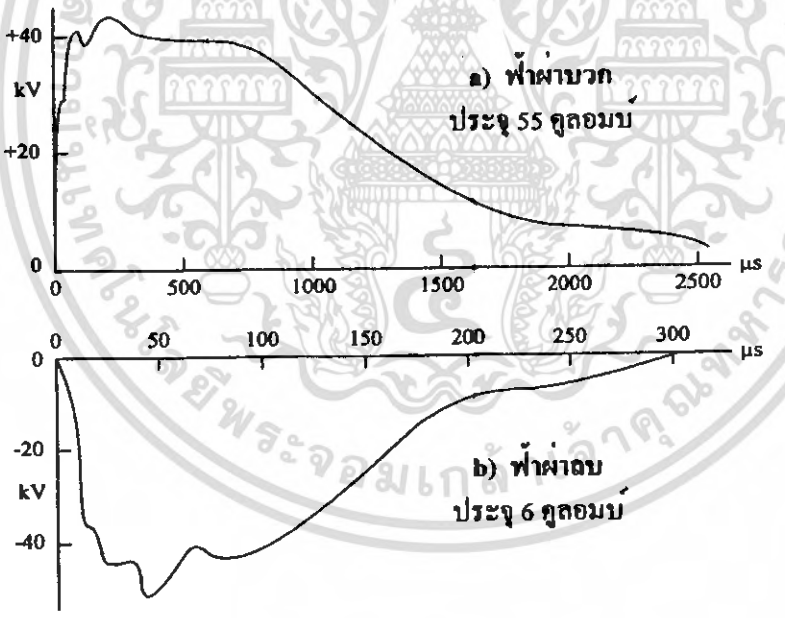
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ขั้วของกระแสฟ้าผ่าและรูปคลื่น [1]

ฟ้าผ่าที่นำประจุลบจากก้อนเมฆสู่พื้นโลกเรียกว่า ฟ้าผ่าลบ ฟ้าผ่าที่นำประจุบวกลงมาเรียกว่า ฟ้าผ่าบวก จากข้อมูลพบว่า 80-85% มักเป็น ฟ้าผ่าลบและฟ้าผ่าลบ มักเป็นการผ่าซ้ำหลายครั้ง ส่วนฟ้าผ่าบวกมักเป็นฟ้าผ่าลำเดี่ยว

จากข้อมูลพบว่าประจุฟ้าผ่าบวกจะมีมากกว่า ประจุฟ้าผ่าลบถึง 9 เท่า และเวลาของรูปคลื่นก็ยาวมากกว่าถึง 9 เท่าเช่นกัน อธิบายได้ว่า ประจุบวกจะอยู่ด้านบนของก้อนเมฆ ประจุลบจะอยู่ที่ฐานของก้อนเมฆ ซึ่งประจุลบใกล้กว่าประจุบวก ประจุบวกจึงต้องสะสมประจุให้มากพอก็จะทำให้เกิดเบรกดาวน์มายังพื้นโลกได้

ลักษณะรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า อาจกำหนดด้วยช่วงหน้าคลื่น (เวลาที่กระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด) และหางคลื่น (เวลาตั้งแต่เริ่มต้นคลื่นจนกระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด) ลักษณะที่สำคัญของช่วงหน้าคลื่น คืออัตราเพิ่มของกระแส di/dt หน่วยเป็น kA/μS ซึ่งมีผลทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายตัวนำ $\Delta v = L\, di/dt$ ซึ่งต้องคำนึงถึงเมื่อออกแบบสายล่อฟ้า



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

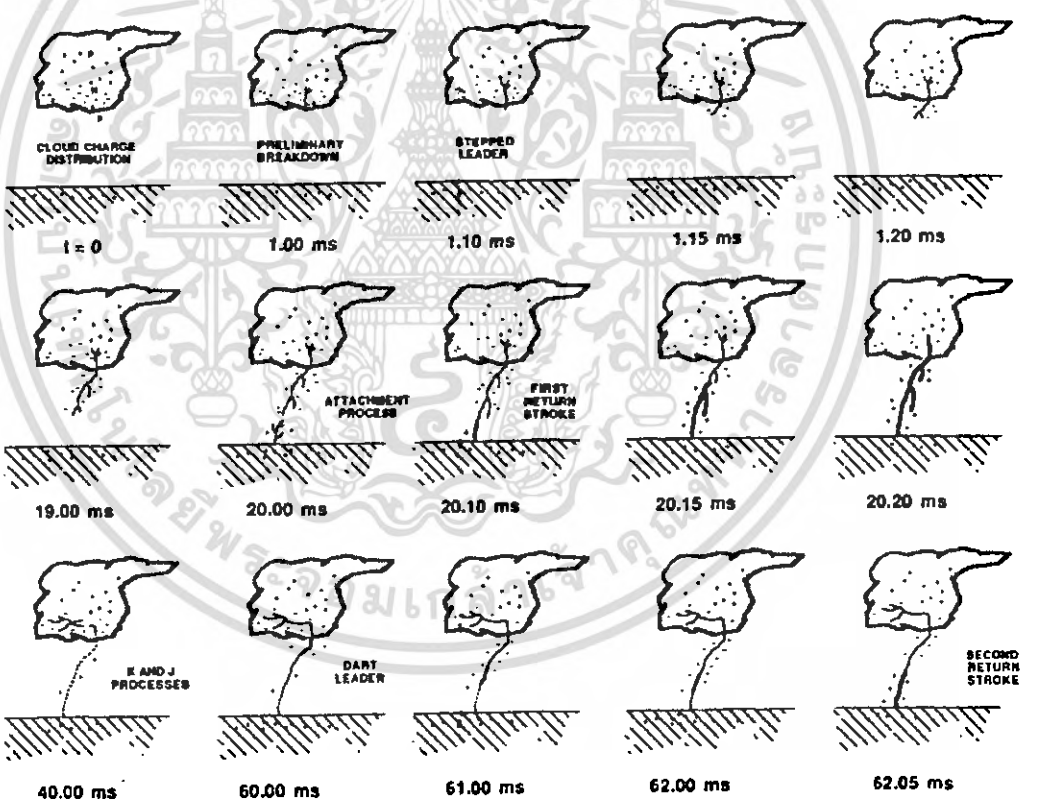
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ฟ้าผ่าซ้ำ [1]

ในก้อนเมฆอาจมีจุดศูนย์กลางรวมกลุ่มหลายแห่ง เมื่อกลุ่มใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตก่อนก็จะดิสชาร์จลงสู่พื้นโลกเป็นฟ้าผ่าลำแรกและหลังจากกลุ่มประจุแรกดิสชาร์จไปหมดแล้วก็จะทำให้เกิด สตรีมเมอร์ระหว่างประจุในก้อนเมฆ และเกิดดิสชาร์จลงสู่พื้นโลกตามแนวฟ้าผ่าลำแรก ที่เป็นเช่นนี้ เพราะในอากาศในแนวฟ้าผ่าลำแรกยังไม่คืนสภาพความเป็นฉนวน จึงทำให้ก้อนเมฆจากกลุ่มอื่น ดิสชาร์จได้ง่ายตามแนวนี้เรียกว่าฟ้าผ่าซ้ำ

ฟ้าผ่าซ้ำจะมีช่วงเว้นต่อเนื่องระหว่างครั้งประมาณ 5-30 มิลลิวินาที ฟ้าผ่าซ้ำจะไม่มีแขนง เพราะไม่มีการขยายตัวเป็นจังหวะก้าวของหัวนำร่อง และหน้าคลื่นของฟ้าผ่าอีกทั้ง จะมีความร้อนสูงมาก

จากข้อมูลพบว่าการเกิดฟ้าผ่าซ้ำขึ้นกับภูมิประเทศ ในประเทศเขตหนาวจะมีฟ้าผ่าลำเดียวเป็นส่วนใหญ่ แต่ในประเทศเขตร้อน จะมีฟ้าผ่าซ้ำมากกว่า



รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดฟ้าผ่าซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ขนาดของกระแสฟ้าผ่า [1]

ขนาดของกระแสฟ้าผ่าหมายถึง ค่ายอดของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ขนาดของกระแสฟ้าผ่ามีค่ามากหรือน้อย ขึ้นกับปริมาณของประจุที่ดิสชาร์จขึ้นกับขั้วของกระแสฟ้าผ่าว่าเป็นบวกหรือลบ ขึ้นกับฟ้าผ่าขึ้นหรือลง จากการบันทึกของ Berger พบว่ากระแสฟ้าผ่าขั้วลบมีค่าสูงถึง 90 กิโลแอมป์ และขั้วบวกมีค่าสูงถึง 270 กิโลแอมป์

พารามิเตอร์ต่างๆของฟ้าผ่าคือ ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า ประจุในลำฟ้าผ่า ช่วงเวลาหน้าคลื่นและความชันของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ที่มีความน่าจะเกิดขึ้นร้อยละ 95,50 และ 5 ซึ่งเป็นผลงานบันทึกของ Berger ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟ้าผ่า

จำนวนฟ้าผ่า	พารามิเตอร์	หน่วย	ความน่าจะเกิดเป็นร้อยละ		
			95	50	5
	ค่ายอดกระแสไฟฟ้า				
99	กระแสฟ้าผ่าลบลำแรก	kA	14	30	80
137	กระแสฟ้าผ่าลบลำผ่าตาม	kA	4.6	12	30
28	กระแสฟ้าผ่าบวก	kA	4.6	35	250
	ประจุไฟฟ้า				
91	ประจุไฟฟ้าผ่าลบลำแรก	C	1.1	5.2	24
124	ประจุไฟฟ้าผ่าลบลำผ่าตาม	C	0.2	1.4	11
88	ประจุไฟฟ้าผ่าลบทั้งหมด	C	1.3	7.5	40
26	ประจุไฟฟ้าผ่าบวก	C	20	80	350
	ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์				
88	ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์ลำแรก	C	1.1	4.5	20
119	ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์ลำผ่าตาม	C	0.22	0.95	4.0
25	ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์บวก	C	2.0	16	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนฟ้าผ่า	พารามิเตอร์	หน่วย	ความน่าจะเกิดเป็นร้อยละ		
			95	50	5
	เวลาช่วงหน้าคลื่น				
87	ฟ้าผ่าลบลำแรก	μS	1.8	5.5	18
120	ฟ้าผ่าลบลำผ่าตาม	μS	0.22	1.1	4.5
19	ฟ้าผ่าบวก	μS	3.5	22	200
	เวลาช่วงหลังคลื่น				
78	ฟ้าผ่าลบลำแรก	μS	30	75	200
104	ฟ้าผ่าลบลำผ่าตาม	μS	6.5	32	140
16	ฟ้าผ่าบวก	μS	25	230	2,000
	ความชัน (di / dt)				
90	ฟ้าผ่าลบลำแรก	kA/μS	5.5	12	32
124	ฟ้าผ่าลบลำผ่าตาม	kA/μS	12	40	120
21	ฟ้าผ่าบวก	kA/μS	0.20	2.4	32
133	ช่วงเวลาระหว่างลำฟ้าผ่าลบ	mS	7	35	150

2.3 ผลจากฟ้าผ่า

2.3.1 ผลทางความร้อน [1]

เนื่องจากกระแสฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมาก จากข้อมูลอาจมากถึง 30000 เคลวิน เมื่อฟ้าผ่าลงที่ใด ก็อาจเกิดเพลิงไหม้ได้ หรือ แม้แต่โลหะก็อาจหลอมละลายได้

2.3.2 ผลจากแรงทางกลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [1]

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเมื่อไหลผ่านตัวนำไฟฟ้า จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้ เกิดแรงบิด ซึ่งแรงบิดนี้อาจทำให้โครงสร้างอาคารเสียหายได้หรือแม้แต่ระบบล่อฟ้า ก็มีโอกาสเสียหายได้ ถ้าระบบล่อฟ้าไม่ดีพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ผลจากการรบกวนทางสนามแม่เหล็ก [1]

เมื่อกระแสฟ้าผ่าไหลผ่านตัวนำ ก็จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งไปรบกวนระบบสื่อสาร ระบบควบคุม รวมทั้งระบบการวัด ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็คทรอนิคส์ ถ้าอุปกรณ์เหล่านี้ มีความไวต่อสนามแม่เหล็ก ผลที่ได้จากอุปกรณ์จากระบบเหล่านี้ ไม่อาจเชื่อถือได้ ดังนั้นในการใช้อุปกรณ์หรือซื้ออุปกรณ์ ต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ทางสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญเช่นเดียวกับระบบล่อฟ้า

2.3.4 ผลจากการเกิดแรงดัน สปาร์กด้านข้าง [1]

ถ้ากระแสฟ้าผ่าไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ (L) และมีความต้านทานดิน (R) จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำและความต้านทาน

$$\Delta v = Ri + L\frac{di}{dt} \qquad (2.1)$$

เนื่องจากกระแสฟ้าผ่ามี $\frac{di}{dt}$ สูง ดังนั้น ในการออกแบบระบบล่อฟ้าต้องคำนึงถึงค่า L และ R ด้วยแรงดัน Δv อาจสูงมากพอที่จะทำให้เกิดการสปาร์ก ด้านข้าง หรือกระโดดเข้าหาส่วนที่ต่อลงดินอย่างดี

2.3.5ผลที่เกิดจากฟ้าผ่าต่อคนโดยตรง [1]

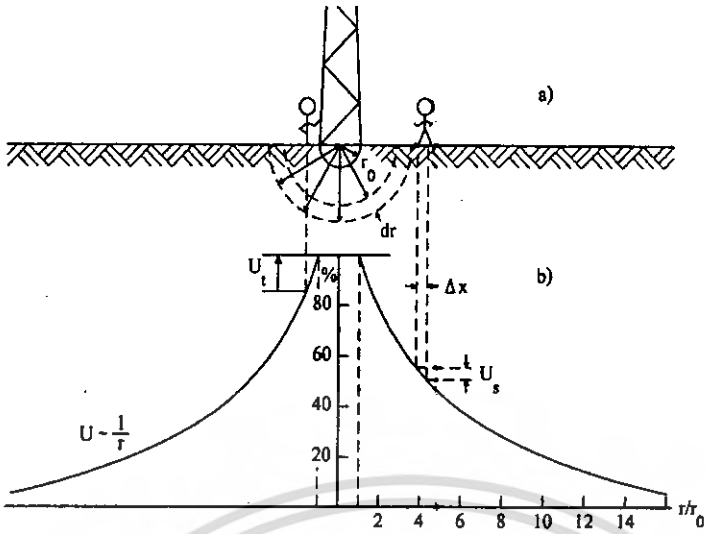
โดยธรรมชาติแล้วฟ้าจะผ่าที่สูงเด่นกว่าสิ่งอื่น ดังนั้น ควรหลีกเลี่ยงไม่ให้คน ไปอยู่ในที่โล่งแจ้ง ไม่มีต้นไม้ หรือพื้นที่เสี่ยงใดๆ ซึ่งกระแสฟ้าผ่านี้ อาจทำให้เสียหายถึงชีวิตได้

2.3.6ผลจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส [1]

ฟ้าผ่าลงที่ใด เมื่อกระแสลงดิน แผ่กระจายออกไปในดิน ซึ่งมีความต้านทาน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่าง 2 จุดบนดิน ซึ่งอาจเกิดอันตรายได้ เรียกว่าแรงดันช่วงก้าว

ส่วนแรงดันสัมผัส หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ หรือโครงสร้างที่กระแสไหลผ่านไป สู่รากสายดินที่คนมีโอกาสสัมผัส ถึงกับดินที่ยืนอยู่ เพราะฉะนั้น ต้องคำนึงถึง แรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส ในการออกแบบระบบล่อฟ้าด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แรงสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว

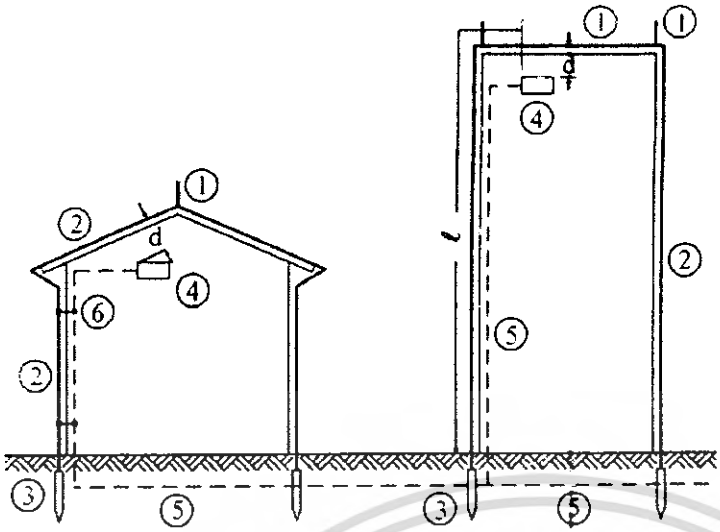
2.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่าต่ออาคารและสิ่งปลูกสร้างตามมาตรฐาน IEC [2]

การป้องกันฟ้าผ่าต่อสิ่งปลูกสร้าง และสิ่งมีชีวิต ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 [3] โดยที่มาตรฐาน IEC 60060-2 ได้บอกความต้องการสำหรับป้องกันของสิ่งปลูกสร้างในระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบป้องกันฟ้าผ่าและป้องกันต่ออันตรายเนื่องจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการป้องกันและชนิดของระบบการป้องกัน

Protection levels	Type of LPS
I	I
II	II
III	III
IV	IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของระบบป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่าแบบฟาราเดย์

2.4.1 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก (External lightning Protection System) [2]

การป้องกันฟ้าผ่าโดยตรงต่อสิ่งปลูกสร้างซึ่งรวมถึงการผ่าด้านข้าง ที่จะนำกระแสฟ้าผ่าลงดินเพื่อให้กระแสแพร่ลงในดินให้ปราศจากผลจากความร้อนและทางกล รวมถึงการสปาร์ก ซึ่งอาจทำให้เกิดไฟไหม้และการระเบิด

ส่วนประกอบของการป้องกัน จะใช้วัสดุที่นำไฟฟ้าที่มีอยู่ในสิ่งปลูกสร้างมาประยุกต์

เนื่องด้วยความสูงของตัวอาคาร และการพัฒนาทางอุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ ทำให้ระบบล่อฟ้ากลายเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอาคาร และระบบล่อฟ้าที่จะกล่าวต่อไปนี้ ได้รับความนิยมในการป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่า เนื่องจากความสะดวก และการทำงานที่ไวต่อสนามไฟฟ้ารอบตัวมัน

ระบบป้องกันฟ้าผ่าประกอบด้วย

- ตัวนำล่อฟ้า
- สายตัวนำลงดิน
- รากสายดิน

2.4.1.1 ตัวนำล่อฟ้า (Air terminal)

ตัวนำล่อฟ้าอาจเป็นแท่งตัวนำหรือสายตัวนำยึดไว้บนยอดสูงสุดของสิ่งปลูกสร้างอาคาร หรือ สิ่งที่ต้องการป้องกัน ตัวนำล่อฟ้ามักนิยมทำปลายยอดให้แหลม เพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดนั้นสูงกว่าที่อื่นในบริเวณใกล้เคียง และ สร้างสตรีมเมอร์ได้ง่าย ทำหน้าที่ล่อฟ้าให้ผ่าลงที่ตัวนำล่อฟ้าหากเกิดฟ้าผ่าที่บริเวณนั้น ตำแหน่งที่ติดตั้งตัวนำล่อฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะสิ่งปลูกสร้างส่วนบนสุด เช่นหลังคาทรงแหลมปล่องไฟเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Air termination จะประกอบด้วย การรวมกันของวัสดุเหล่านี้

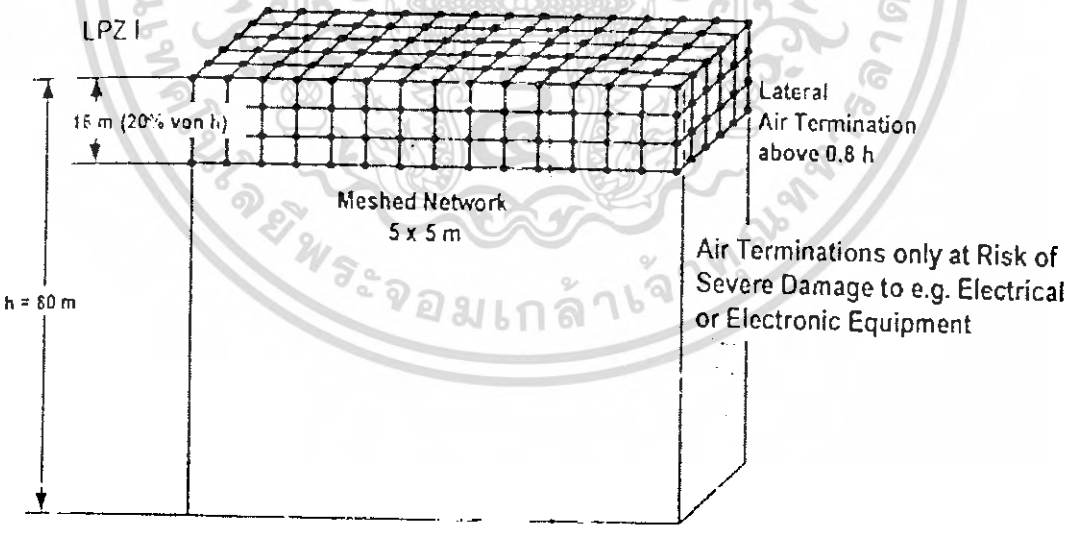
- แท่งตัวนำ
- สายตัวนำ
- โครงตาข่าย

การออกแบบวิธีการป้องกันฟ้าผ่าวิธีต่อไปนี้จะถูกใช้โดยพิจารณาจากตำแหน่งของ Air termination system

- วิธีมุมป้องกัน เหมาะสมสำหรับอาคารปกติ แต่วิธีนี้สำหรับอาคารที่มีความสูงจำกัด
- วิธีทรงกลมกลิ้ง เหมาะสำหรับทุกอาคาร
- วิธีโครงสร้างตาข่าย เหมาะสำหรับการป้องกันบนอาคารที่มีลักษณะเป็นระนาบ

ที่สิ่งปลูกสร้างที่สูงกว่า 60 เมตร ฟ้าผ่าด้านข้างอาจเกิดขึ้น แต่โอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับฟ้าผ่าด้านบน เราจึงให้ความสำคัญกับฟ้าผ่าด้านบนมากกว่า

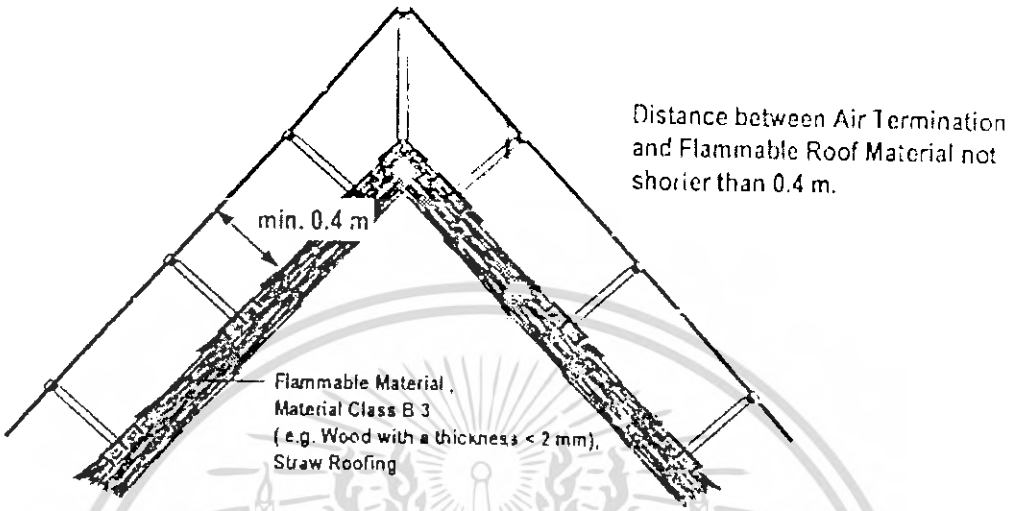
ถ้าบนสิ่งปลูกสร้างที่มีความสูง การผ่าด้านข้างอาจทำให้เกิดอันตรายต่ออาคารได้มีการกำหนดตำแหน่งของ Air termination system บนส่วนของอาคาร



รูปที่ 2.7 air termination แบบวิธีโครงสร้างตาข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหลังคาทำด้วยวัสดุที่ติดไฟได้ ระยะทางระหว่างหลังคาและตัวนำล่อฟ้าจะต้องไม่น้อยกว่า 0.4 เมตรของ Air termination system ที่ประกอบด้วยแท่งตัวนำ สายตัวนำ หรือโครงสร้างตาข่าย



รูปที่ 2.8 air termination เมื่อหลังคาทำจากวัสดุที่ติดไฟได้

วัสดุที่จะกล่าวต่อไปนี้ที่อาคารมีอยู่แล้วอาจจะพิจารณาเป็น Air termination system

แผ่นโลหะ (Metal sheet) บนสิ่งปลูกสร้าง ที่มีคุณสมบัติดังนี้

- แต่ละชิ้นของโลหะต้องเชื่อมกันทางไฟฟ้าอย่างถาวร
- ความหนาของแผ่นโลหะต้องไม่น้อยกว่า t^a ถ้าได้แผ่นโลหะเป็นวัสดุที่ติดไฟได้ง่าย
- แผ่นโลหะต้องไม่ถูกปกคลุมโดยวัสดุที่เป็นฉนวน

ตารางที่ 2.3 ความหนาน้อยที่สุดของแผ่นโลหะ หรือ ท่อโลหะที่สามารถใช้ในระบบ Air termination system

Type of LPS	Material	Thickness t^a(mm)	Thickness t^b (mm)
I to IV	Fe	4	0.5
	Cu	5	0.5
	Al	7	0.7

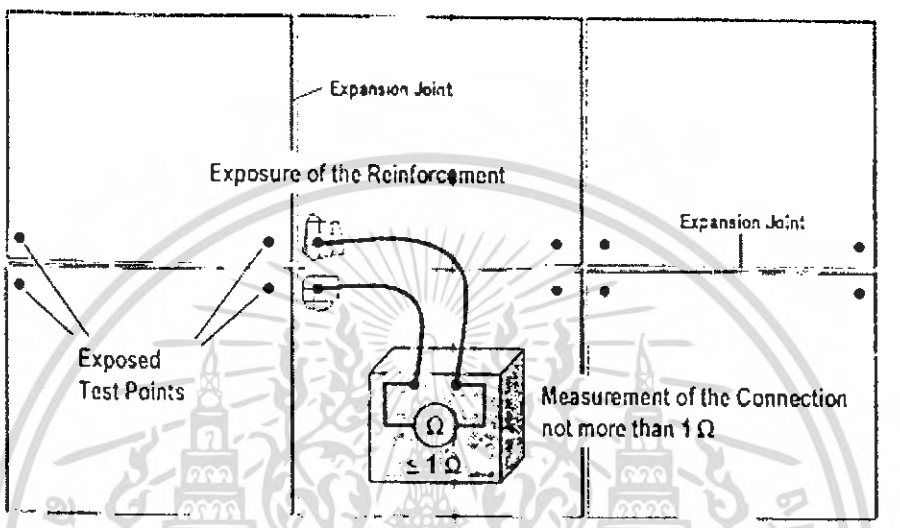
t^a prevents puncture hot spot or ignition

t^b only for metal streets if it is not important to prevent puncture hot spot or ignition problems

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

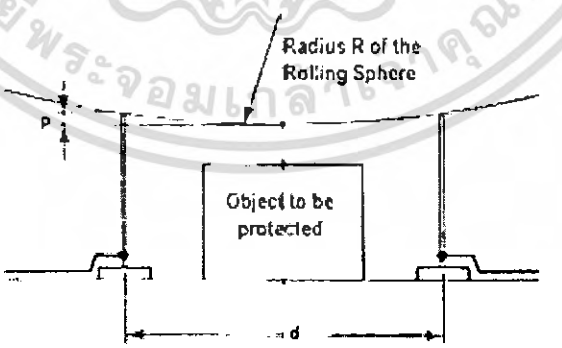
โลหะที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีต อาจถูกพิจารณาว่าได้รับการเชื่อมอย่างถาวรทั้งแนวนอนและแนวตั้ง

ในกรณีที่โครงสร้างถูกทำไว้ล่วงหน้าก่อนจะออกแบบสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่า การเชื่อมกันทางไฟฟ้าของโลหะที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตจะเชื่อมระหว่างแต่ละ ช่วงของคอนกรีต โดยความต้านทานของแต่ละช่วงคอนกรีตต้องน้อยกว่า 1 Ω



รูปที่ 2.9 การใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่เป็น air termination

ระบบป้องกันของ 2 Air-termination แท่งโลหะ/สายโลหะ



รูปที่ 2.10 ระยะการป้องกันโดย 2 Air-termination

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะ p สามารถคำนวณได้จาก

$$p = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d^2}{4}\right)} \qquad (2.2)$$

เมื่อ p = Penetration

R = Radius of the Rolling Sphere

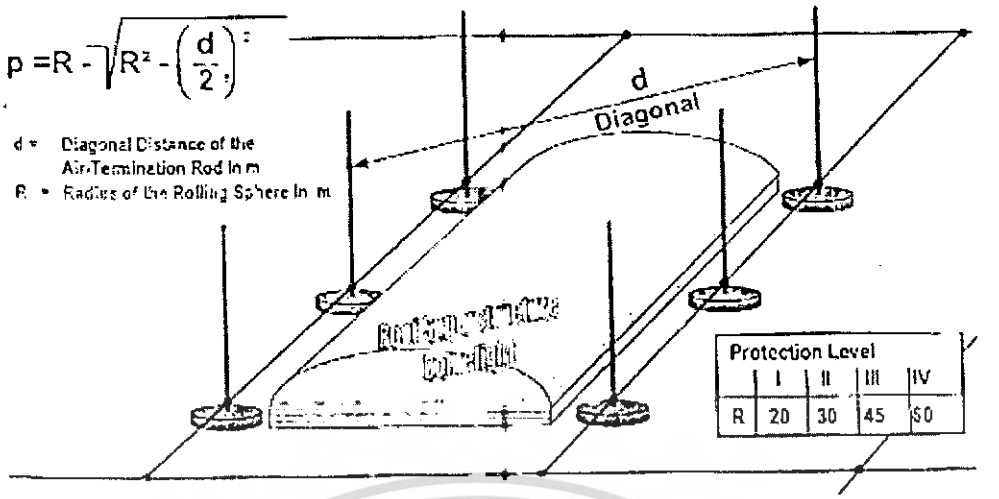
d = Distance between two Air-termination Rods or two parallel Air- termination Lines

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงการคำนวณระยะป้องกัน

d=Distance of the Air-Termination Rods/Mesh Size [m]	**Protection Level**			
	I	**II**	**III**	**IV**
	R=Radius of the Rolling Sphere [m]			
	20.00	30.00	45.00	60.00
	P=Penetration of the Rolling Sphere [m]			
2.00	0.03	0.02	0.01	0.01
3.00	0.06	0.04	0.03	0.02
4.00	0.10	0.07	0.04	0.03
5.00	0.16	0.10	0.07	0.05
6.00	0.23	0.15	0.10	0.08
7.00	0.31	0.20	0.14	0.10
8.00	0.40	0.27	0.18	0.13
9.00	0.51	0.34	0.23	0.17
10.00	0.64	0.42	0.28	0.21
15.00	1.46	0.95	0.63	0.47
20.00	2.68	1.72	1.13	1.84

72628

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ระยะการป้องกันโดยหลาย ๆ Air-termination

2.4.1.2 ตัวนำลงดิน (down conducter)

ตัวนำลงดินจะต้องต่อทางไฟฟ้าอย่างดีกับตัวนำล่อฟ้า เมื่อฟ้าผ่าลงบนตัวนำล่อฟ้าแล้ว กระแสจะไหลลงผ่านพื้นดิน ผ่านตัวนำลงดินกระจายออกไปในดินอย่างรวดเร็วผ่านทางรากสายดิน ตัวนำลงดินซึ่งต่อกับตัวนำล่อฟ้า กับสายรากดิน จะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำๆ มีความเหนี่ยวนำน้อยๆ ฉะนั้นในบางกรณีอาจต้องใช้สายตัวนำลงดินหลายๆเส้นขนานกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างยาวของตัวอาคาร ถ้าตัวอาคารยิ่งกว้างมากก็ต้องใช้ตัวนำลงดินมากขึ้น และต้องเชื่อมโยงกันในช่วงกลางของความสูงด้วย ถ้าตัวอาคารยิ่งสูงมากๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสปาร์กด้านข้างเนื่องจาก แรงดันเหนี่ยวนำ

ความยาวโดยประมาณของตัวนำลงดินที่ต้องการมีการเชื่อมโยงถึงกัน

$$l \leq 20d \qquad (2.3)$$

เมื่อ l คือ ความยาวของสายตัวนำลงดินเป็นเมตร (m)

d คือ ระยะช่องว่างในอากาศระหว่างตัวนำลงดินกับส่วนที่เป็นโลหะอื่น ต่อลงดินเป็นเมตร โดยทั่วไปจะเชื่อมโยงส่วนที่เป็นโลหะ เช่น ถังโลหะ บันไดเหล็ก ท่อน้ำประปาโลหะ เข้ากับตัวนำลงดิน หรือ ระบบป้องกันฟ้าผ่า

2.4.1.3 รากสายดิน (earth electrode)

รากสายดินเป็นตัวนำที่ฝังอยู่ในดิน เช่น แท่งทองแดงหรือแท่งเหล็กชุบสังกะสี หรือเหล็กหุ้มด้วยทองแดง เพื่อช่วยให้ความต้านทานของระบบสายดิน หรือของระบบป้องกันฟ้าผ่ามีค่าต่ำ กระแสฟ้าผ่าจะได้ไหลกระจายออกไปได้สะดวกและรวดเร็ว ในบางกรณีจำเป็นต้องใช้รากสายดินจำนวนหลายอันและฝังให้ลึกลงไปในดินมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้านทานจำเพาะของดิน ขนาดของสิ่งปลูกสร้างที่ต้องการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยคำนึงถึงหลักสองประการ คือ ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทานของระบบสายดินจะต้องไม่ทำให้เกิดสปาร์ก ด้านข้างภายในอาคาร อันเนื่องจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานดังกล่าว และจะต้องไม่ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างช่วงก้าว (ประมาณ 1 เมตร) บนพื้นดินรอบๆ อาคารซึ่งเรียกว่า แรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัสเกินกว่าที่กำหนด เพราะจะทำให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่เดินอยู่ในบริเวณนั้นขณะเกิดฟ้าผ่า

เพื่อมิให้เกิดสปาร์กด้านข้างภายในอาคาร อันเนื่องจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานของรากสายดิน R_e ค่าความต้านทานจะต้องมีค่าต่ำกว่าที่คำนวณได้จากสมการ

$$R_e \leq 5d \qquad (2.4)$$

เมื่อ d คือ ช่องว่างในอากาศระหว่างตัวนำลงดินกับส่วนที่เป็นโลหะอื่นที่ต่อถึงดิน หน่วยเป็นเมตร

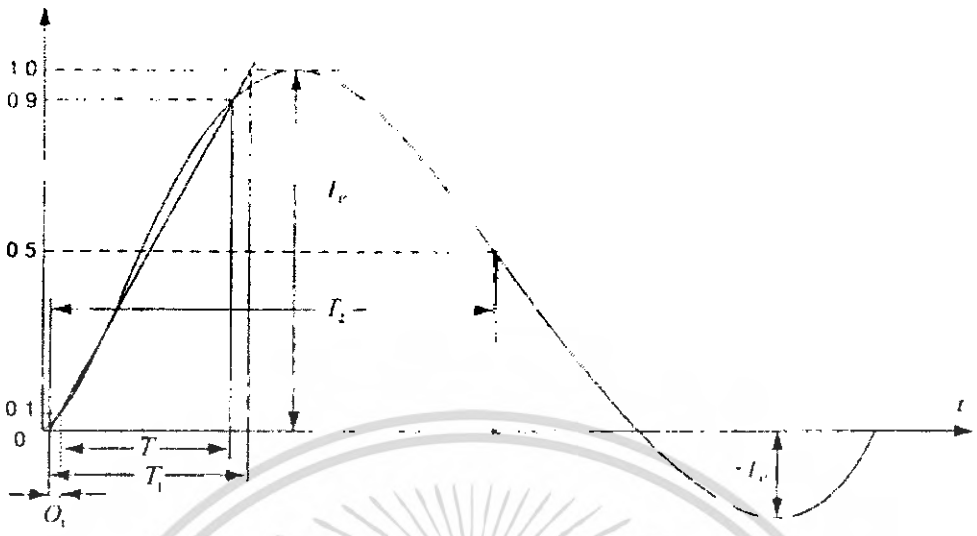
2.5 การวัดกระแสอิมพัลส์

ในการวิจัยทางด้านเทคนิคและวิทยาศาสตร์หลายอย่างมักจะพบกับความจำเป็นที่ต้องวัดกระแสทรานเซี้ยน คือ กระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น กระแสฟ้าผ่าธรรมชาติ หรือการเลียนแบบสร้างกระแสอิมพัลส์ขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ การวัดกระแสดีสชาร์จในการวิจัยพลาสมาฟิสิกส์ กระแสลัดวงจรในระบบส่งจ่ายกระแสทรานเซี้ยนในเอสซีอาร์ กระแสผ่านเซอร์กิทเบรคเกอร์ ในขณะขั้วสัมผัสทำงาน ค่ากระแสที่วัดอาจจะมีค่าตั้งแต่สิบยี่สิบแอมป์ไปจนถึงสองสามร้อยกิโลแอมป์ ซึ่งมีเวลาขึ้น (rise time) ตั้งแต่นาโนวินาทีไปจนถึงหลายๆ ไมโครวินาที การวัดและบันทึกกระแสที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็วเช่นนี้มีความจำเป็นต้องใช้ระบบวัดที่มีแบนด์วิดท์กว้าง (wide-band measuring system) และมีเวลาขึ้นเร็วในเกณฑ์เดียวกับกระแสที่วัด ถึงแม้กระแสอิมพัลส์จะค่อนข้างช้าก็ตามก็ต้องใช้เครื่องวัดหรือบันทึกที่มีเวลาขาขึ้นสั้นมากพอเพื่อวัดกระแสสไปด์หรือยอดแหลมได้ถูกต้องหากใช้ชั้นท์วัดที่มีเวลาคงตัวนานเกินไปจะทำให้ผลการวัดผิดพลาดได้

2.5.1 ชนิดและมาตรฐานของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ [6]

กระแสอิมพัลส์เป็นกระแสทรานเซี้ยน ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเสมือนเช่น กระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งเกิดเนื่องจากการคายประจุระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกนั่นเอง โดยขนาดของกระแสฟ้าผ่าจริงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาตินั้น จะมีขนาดของกระแสเป็นกิโลแอมป์จนถึงหลายร้อยกิโลแอมป์ แต่โดยปกติแล้วการเกิดฟ้าผ่าในแต่ละครั้งจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 20 kA ถึง 30 kA ในขณะที่กระแสอิมพัลส์เป็นกระแสที่จำลองจากลักษณะรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าโดยที่มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่จะมีปริมาณประจุในระดับที่น้อยลงและภายในระยะเวลาที่สั้นกว่า เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เช่น การทดสอบกับดักฟ้าผ่า การวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดจากผลของปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามาตรฐาน IEC 60060-1(1989) [2]

เมื่อ T_1 คือ Rise time

T_2 คือ Time to half value

I_p คือ Current peak value

ซึ่งรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วยค่าองค์ประกอบที่สำคัญดังนี้คือ

1. ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ (Impulse Current peak, I_p)

2. เวลาหน้าคลื่น (Front time, T_1) เป็นช่วงเวลาที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดกระแสอิมพัลส์

3. เวลาหางคลื่น (Time to half-value หรือ tail time, T_2) เป็นช่วงเวลาตั้งแต่กระแสเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดกระแสอิมพัลส์ จนกระทั่งขนาดลดลงจนเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสอิมพัลส์

4. ขั้วของกระแส อาจจะเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดชนิดของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จะแทนด้วย เวลาหน้าคลื่นต่อเวลาหางคลื่น หรือ T_1/T_2 เช่น รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ชนิด 8/20 μs หมายความว่าเป็นรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ 8 μs เวลาหางคลื่นเท่ากับ 20 μs เป็นต้น

รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แบบ Double exponential ตามมาตรฐานของ IEC 60060-1(1989) [2] มีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด คือ

1) 1/20 μs รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ 1 μs และหางคลื่นเท่ากับ 20 μs
2) 4/20 μs รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ 4 μs และหางคลื่นเท่ากับ 20 μs
3) 8/20 μs รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ 8 μs และหางคลื่นเท่ากับ 20 μs
4) 30/80 μs รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ 30 μs และหางคลื่นเท่ากับ 80 μs

การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ จะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อน ทั้งนี้ต้องอยู่ในขอบเขตตามมาตรฐานของ IEC 60060-2 (1984) [3] ที่ได้กำหนดไว้ โดยมีรายละเอียดในการกำหนดค่าดังนี้

1. การวัดค่าช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) ให้คำนวนจาก 1.25 เท่าของเวลาในช่วงที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เพิ่มค่าจาก 10% ของค่ายอดจนถึงค่า 90% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์

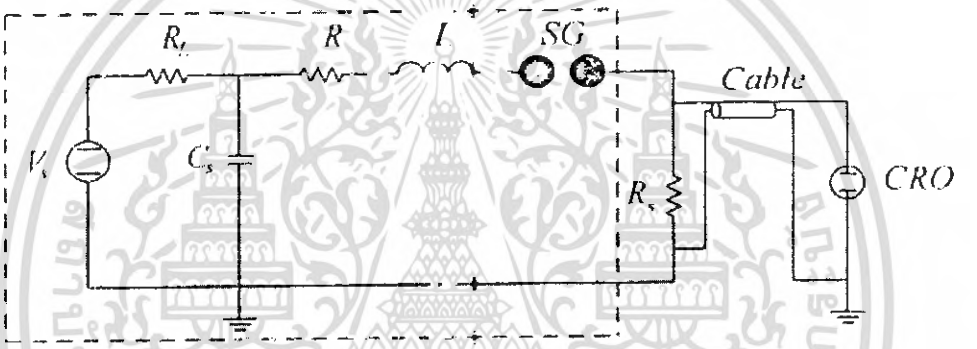
2. การวัดค่าช่วงเวลาหางคลื่น (T_2) ให้คำนวณจากช่วงเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ จนถึงจุดที่กระแสอิมพัลส์ลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแส

3. จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์คือ จุดตัดระหว่างแกนนอน (แกนเวลา) กับเส้นตรงที่ลากผ่านระหว่างจุด 10% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์ และจุด 90% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ [6]

การสร้างกระแสอิมพัลส์ทำได้โดยอาศัยหลักการของวงจรทรานเซี้ยน (Transient) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ , ตัวต้านทาน , ตัวเหนี่ยวนำ , แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและในวงจรมีอิเล็กโตรดทรงกลมเพื่อควบคุมการคายประจุของตัวเก็บประจุในช่วงเวลาสั้นๆ โดยมีหลักการทำงาน คือ ตัวเก็บประจุ C_s จะถูกอัดประจุหรือพลังงานไฟฟ้าเก็บไว้ แล้วทำการปล่อยให้ดิสชาร์จผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ก็จะเกิดการออสซิเลสแบบหน่วง เพราะในตัวเหนี่ยวนำ L นั้นจะมีความต้านทานโดยธรรมชาติและถ้าวัสดุทดสอบมีความต้านทานด้วยก็จะทำให้เกิด การหน่วงมากขึ้น ฉะนั้นวงจรของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์พื้นฐานจึงเขียนได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

เมื่อ V_s คือ แรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุ

R_L คือ ตัวต้านทานจำกัดกระแส

R_S คือ ตัวต้านทานแบบชั้นท์

R คือ ตัวต้านทานในวงจร

L คือ ตัวเหนี่ยวนำในวงจร

C_S คือ ตัวเก็บประจุในวงจร

SG คือ สปาร์กแกปมีไกสวิตช์ (Trigger)

----- คือ ส่วนของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดออสซิเลชั่นของวงจรรูปที่ 2.13 จะเกิดการหน่วงมากน้อยจะขึ้นอยู่กับความด้านทานรวม R ในวงจร และค่าความเหนี่ยวนำรวม L ในวงจร ค่ากระแสสูงสุดจะได้เมื่อค่า R มีค่าต่ำสุด คือ

$$R \ll 2\sqrt{\frac{L}{C}} \tag{2.3}$$

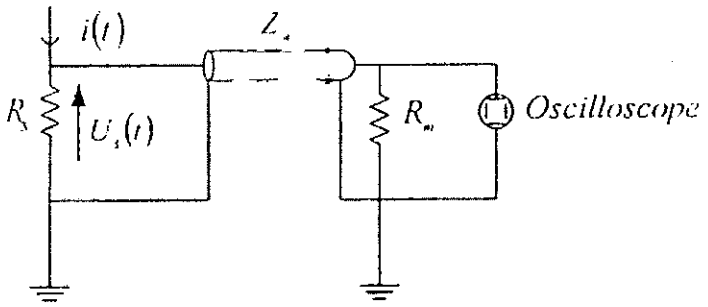
2.5.3 การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ [6]

การวัดและบันทึกสัญญาณของกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้ระบบวัดที่มีแบนด์วิดท์กว้าง (Wide-band measuring) และมีเวลาขึ้นเร็วในเกณฑ์เดียวกับกระแสที่วัด ดังนั้นต้องใช้เครื่องวัดที่มีเวลาขึ้น (Rise time) ดีพอ เพื่อให้สามารถวัดกระแสที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างรวดเร็วได้ ซึ่งในการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สามารถวัดได้หลายวิธี ได้แก่

1. ชั้นท์ความต้านทานต่ำ (Low ohmic shunts)
2. ขดลวดเหนี่ยวนำ (Rogowski coil)
3. หม้อแปลงกระแส (Current Transformer)

แต่ในที่นี้จะอธิบายถึงการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความด้านทานชั้นท์ โดยความต้านทานชั้นท์ในที่นี้หมายถึง ความต้านทานที่มีค่าโอห์มต่ำๆ และทราบค่าถูกต้องแน่นอน ใช้สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ โดยให้กระแสอิมพัลส์ที่ต้องการจะวัดไหลผ่านความด้านทานชั้นท์ จากนั้นวัดแรงดันที่ตกคร่อม (Voltage drop) ความต้านทานชั้นท์ด้วยออสซิลโลสโคป โดยสัญญาณของแรงดันที่วัดได้จะถูกส่งผ่านสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial cable) ที่มีความต้านทานสมคู่กัน (R_m) ต่อที่ปลายสายเคเบิลขนานกับออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์

เมื่อ R_s คือ ความต้านทานชั้นท์

Z_w คือ ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล

R_m คือ ความต้านทานสมดู่

จากรูปวงจรที่ 2.14 ถ้าหากความต้านทานชั้นท์เป็นความต้านทานล้วน และไม่คิดถึงค่าของเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล (Z_w) เพราะ $R_s << Z_w$ จึงสามารถอาศัยกฎของโอห์มในการหาค่ากระแสได้คือ

$$U_s(t) = i(t)R_s$$

ตัวอย่างเช่น

$$i(t) = 100\ \text{kV}$$

$$U_s(t) = 100\ \text{V}$$

$$R_s = \frac{U_s(t)}{i(t)} = 1\ \text{m}\Omega$$

ในการวัดกระแสอิมพัลส์ซึ่งเป็นกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงของ สัญญาณรูปคลื่นกระแสอย่างรวดเร็ว (มีความถี่สูง, ω) ดังนั้นผลของ Stray Capacitance ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแบบแกนร่วมในวงจรวัดนั้นจะมีค่าของ Capacitance Reactance เท่ากับ $\frac{1}{\omega C}$ แต่จะมีค่าที่น้อยมากซึ่งจะไม่มีผลต่อระบบวัดมากนัก แต่ผลของสนามแม่เหล็กตกค้าง (Stray magnetic) ซึ่งจะมีค่า Reactance เท่ากับ ωL จะส่งผลต่อรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป

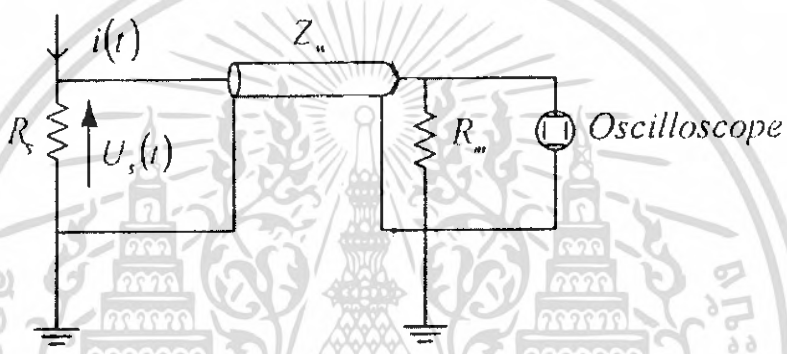
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การวัดและการออกแบบตัวตรวจจับกระแสอิมพัลส์

3.1 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์

3. 1.1 หลักการทำงานของความต้านทานชั้นท์

หลักการ คือวัดแรงดันตกคร่อม ความต้านทานที่เราทราบค่าแน่นอนด้วย Oscilloscope ผ่านสายตัวนำเคเบิลดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยชั้นท์ความต้านทานต่ำ

ในทางปฏิบัติเมื่อกระแสไหลผ่าน R-Shunt จะเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังนั้น แรงดันตกคร่อมจริงจะเป็นไปตามสมการ

$$V = RI+L\frac{dI}{dt} \tag{3.1}$$

เพราะฉะนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ R-Shunt คือทำให้ L มีค่าน้อยที่สุดเนื่องจาก เป็นส่วนที่เราไม่ต้องการวัด ซึ่งถ้าไม่คำนึงถึงค่า L ส่วนของ $L\frac{dI}{dt}$ ก็จะเป็นค่าความผิดพลาดของการวัดที่ประกอบขึ้นเป็นค่า V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ชนิดของความต้านทานชั้นท์ [6]

ความต้านทานชั้นท์กำหนดได้โดยระดับผลตอบสนองทางเวลาและ การกระจายความร้อนของความต้านทาน ผลตอบสนองชั่วขณะสามารถตรวจสอบได้ในการทดสอบกับวงจรที่ผลิตสัญญาณ Square current pulse และ Oscilloscope ที่ใช้วัดจะต้องมีความเร็วพอที่จะจับสัญญาณได้ ค่าความร้อนของความต้านทานที่เกิดขึ้นสามารถปรับได้จากการปรับเปลี่ยนของวัสดุที่ใช้ทำความต้านทานเป็นอัตราส่วนของความต้านทานความร้อน และพิกัดของ Impulse current จากเป้าหมายของการออกแบบสามารถแบ่งแนวความคิดในการสร้างความต้านทานชั้นท์ ออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

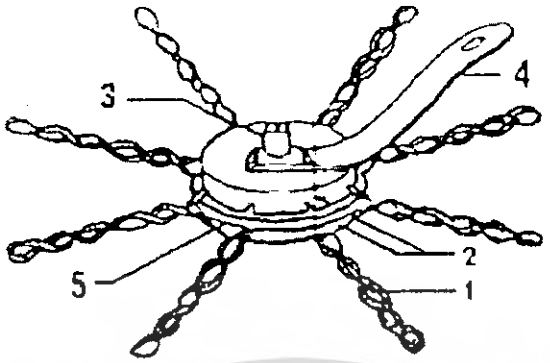
3.1.2.1 ความต้านทานชั้นท์ แบบ Wire wound หรือ Squirrel cage [6]

การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ในการบันทึกกระแสของหม้อแปลงเทสล่า หรืออุปกรณ์ที่ต้องการวัดเช่น วัดกระแสในวงจร Shunt Resistance ที่เลือกใช้ต้องสามารถเข้ากับเครื่องบันทึกที่มีความไวสูง ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแรงสูงจะเป็นตัวทำให้เกิดสัญญาณรบกวนได้ในวงจรการวัดสัญญาณอิมพัลส์ ทำให้การวัดรูปคลื่นสัญญาณต่างๆ อาจคลาดเคลื่อนได้ถ้าอยู่ใกล้เครื่องกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งการรบกวนสามารถทำให้ลดลงได้โดยการ shielding ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการวัดทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

การพันด้วยลวดความต้านทาน Shunt แบบ wire wound นั้นเป็นการนำเอาหลักการในการไหลของกระแสบนตัวนำ ซึ่งทำให้เกิดมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นรอบๆ ของตัวนำนั้น โดยแนวความคิดนั้นคือจะทำยังไงให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นหายไป หรือทำให้เกิดการหักล้างกันไป ซึ่งวิธีการคือการทำให้กระแสที่ไหลนั้นเกิดการไหลวนกลับหรือทำให้ไหลสวนทางกัน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งวิธีการพันออกได้เป็น 3 ลักษณะด้วยกันคือ

- ชนิดของ Shunt ที่พัฒนามาจากแบบ star เป็นสร้างความต้านชั้นท์โดยการบิดหมุนลวดความต้านทานที่มีการหุ้มด้วยฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทำให้ทิศทางของกระแสที่ไหลเกิดการไหลวนกลับซึ่งจะทำให้เกิดการหักล้างกันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

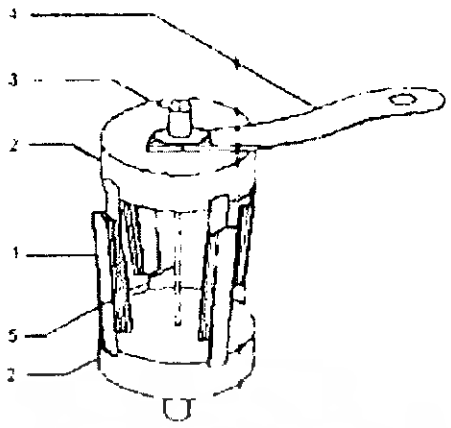


รูปที่ 3.2 Star-type Wire wound Shunt

1. ชุดขดลวดความต้านทานที่ทำโดยการบิดหมุนลวดที่มีการหุ้มด้วยฉนวน
2. จุดต่อของกระแสเป็นทองแดงแผ่นหนาทรงกลม
3. จุดต่อกับสาย Coaxial
4. Grounding Strap
5. แผ่นฉนวนต่อระหว่างแผ่นทองแดง

- วิธีการออกแบบ Star-type Shunt อีกแบบหนึ่ง ซึ่งก็จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดการหักล้าง โดยการทำให้ทิศทางการไหลของกระแสไหลสวนทางกันด้วยการนำแผ่นความต้านทานมาพับ โดยการพับนั้นจะเป็นลักษณะทับทบกันไปมาซึ่งในการพับทบกันในแต่ละครั้งนั้นก็จะมีฉนวนกั้นไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นการพับตัวต้านทานและจะแสดงการวางโครงสร้างของแผ่นตัวต้านทานด้วย

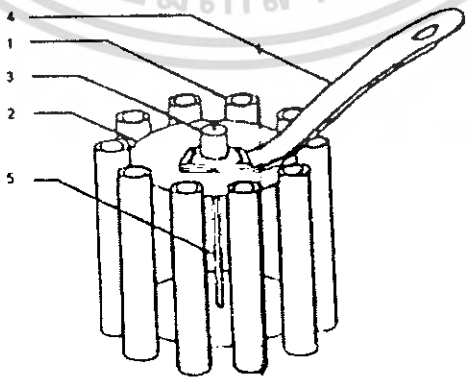
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 Squirrel cage Shunt โดยใช้ลวดความต้านทานแบบพับซ้อน

1. การพับความต้านทานที่หุ้มและกั้นด้วยฉนวน
2. จุดต่อของกระแสที่ทำมาจากแผ่นทองแดงกลม
3. จุดต่อสาย Coaxial
4. Grounding Strap
5. Output circuit conductor

- จะเป็นการพันโดยยึดหลักการเดิมเหมือนที่ผ่านมาแต่จะแตกต่างที่วิธีการพัน คือจะเป็นลักษณะของการนำเอาเส้นลวดความต้านทานมาพันบนท่อฉนวนดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยการพันนั้นพันในทิศทางที่ทำให้กระแสไหลสวนทางกันเช่นกัน ซึ่งในการพันกันในแต่ละครั้งนั้นก็จะมีฉนวนกั้นระหว่างเส้นลวดด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3.4 Squirrel cage Shunt ที่สร้างจากลวดความเหนี่ยวนำต่ำพันกระจายให้การพันสม่ำเสมอบนฉนวนทรงกระบอก

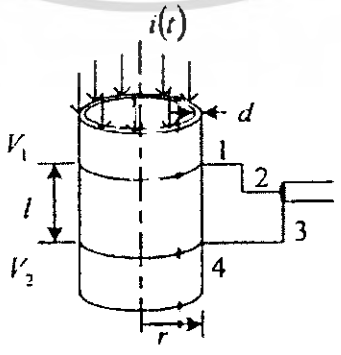
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความต้านทานความเหนี่ยวนำต่ำพันบนท่อฉนวน
2. จุดต่อของกระแสโดยทำจากแผ่นทองแดงกลม
3. จุดต่อสาย Coaxial
4. Grounding Strap
5. Output circuit conductor

แต่วิธีนี้จะมีความยุ่งอย่างมากและมีข้อเสียเนื่องจากการพันจะก่อให้เกิด เป็นลักษณะของวงรอบ (Loop) ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ง่ายโดยจะทำให้ค่าความต้านทานของชั้นท์นั้นมีค่าที่ผิดพลาดไปจากเดิมได้

3.1.2.2 ความต้านทานชั้นท์แบบท่อ Tubular [6]

ในการสร้างความต้านทานชั้นท์ที่ใช้สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์นั้น จะต้องเป็นความต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำๆ เพราะจะทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานต่ำไปด้วยเมื่อนำมาวัดค่าของกระแสอิมพัลส์ จึงได้มีการสร้างความต้านทานชั้นท์ขึ้นมาหลายชนิดด้วยกันดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นการสร้างความต้านทานชั้นท์แบบชนิด Wire wound ซึ่งความต้านทานชั้นท์ประเภทนี้ จะมีผลของค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะเป็นข้อเสียของความต้านทานชั้นท์ประเภทนี้ เนื่องจากในการออกแบบสร้างนั้นจะมีความเป็นไปได้ยากมากที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้ โดยเฉพาะเมื่อนำมาวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าสูงมากๆ ด้วยแล้วก็จะทำให้ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้มีมากขึ้น นั้นเอง ดังนั้นจึงได้มีการสร้างความต้านทานชั้นท์ที่สามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ด้วยการสร้างความต้านทาน ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมขึ้นแทนที่จะเป็นการพันพับ หรือม้วนอย่างเดิม แต่ปัญหาของการสร้างความต้านทานชั้นท์แบบทรงกระบอก จะมีปัญหาตรงที่ว่าจะต่อวัดแรงดันตกคร่อมที่ตัวความต้านทานนั้นอย่างไร เพราะการต่อจะเกิดเป็นบ่วงหรือวงรอบขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่บริเวณนั้น



รูปที่ 3.5 การต่อวัดความต้านทานชั้นท์แบบทรงกระบอก

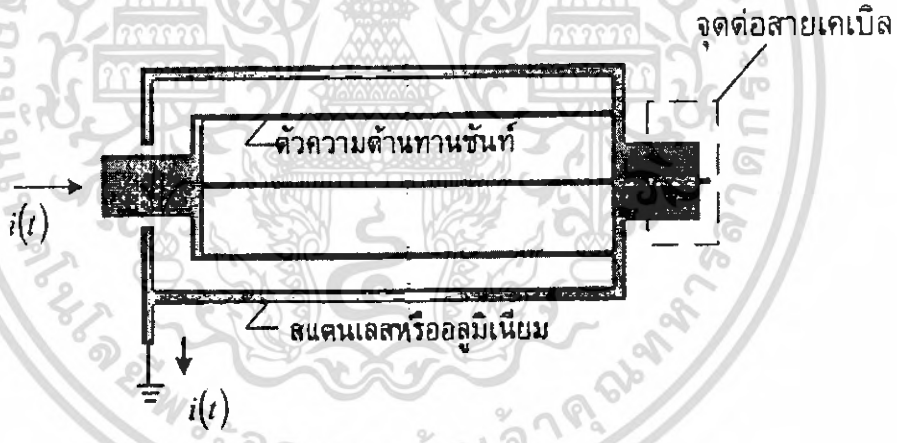
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันคร่อมความต้านทานชั้นท์แบบทรงกระบอกที่ปรากฏที่ขั้ว 2 และ 3 จะเท่ากับผลบวกของความต่างศักย์ กับค่าแรงดันเหนี่ยวนำเป็นไปตามสมการที่ (3.2)

$$U_s(t) = (V_1 - V_2) \pm \frac{d\phi_{1-4}(t)}{dt}$$

$$= i(t)R_4 + \left[\frac{\mu_0}{2\pi}\lambda \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\frac{di(t)}{dt}\right] \qquad (3.2)$$

ดังนั้นการต่อวัดแรงดันตกคร่อมความต้านทานชั้นท์แบบทรงกระบอกจะต้องไม่เป็นวงรอบ หรือต้องต่อในบริเวณที่ปลอดสนามแม่เหล็ก เพราะในกระบอกเหล็กที่เป็นกระบอกชั้นเดียว จะมีปัญหาเรื่องการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก จึงควรใช้กระบอก 2 ชั้น ดังในรูปที่ 3.6 เป็นความต้านทานชั้นท์แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ตัวความต้านทานชั้นท์จะได้รับการชีลด์จากสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งมีลักษณะสมมาตรต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำที่กระบอกความต้านทานลดน้อยลง และในการต่อวัดก็ไม่มีความเหนี่ยวนำที่เกิดจากวงรอบด้วย [1]



รูปที่ 3.6 ความต้านทานชั้นท์แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ดังนั้นในการสร้างความต้านทานชั้นท์แบบท่อ Tubular จะมีลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม จึงจำเป็นที่จะต้องหาระยะห่างระหว่างตัวความต้านทานชั้นท์กับตัวชีลด์ รวมไปถึงแกนกลางของความต้านทานชั้นท์ด้วย ว่าควรใช้ระยะห่างเท่าใดถึงจะไม่เกิดการเบรกดาวน์ของความต้านทานชั้นท์ในขณะวัด ซึ่งจะทำให้ตัวความต้านทานชั้นท์เกิดความเสียหายได้ โดยในการคำนวณนั้นจะใช้สมการเหมือนกันกับการหาสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ของอิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เคเบิลวัด (Measuring Cables)

การวัดหรือบันทึกภาพแรงดันด้วยออสซิลโลสโคปที่มีค่าแรงดันป้อนเข้าที่กำหนดสูง เวลาใช้งานจริงๆ ไม่สามารถที่จะนำไปต่อเข้าโดยตรงกับชั้นท์ความต้านทานต่ำได้ เพราะจะไม่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและเพื่อลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้น้อยลงจำเป็นต้องตั้งออสซิลโลสโคป ให้อยู่ห่างจากชั้นท์ความต้านทานพอสมควร ฉะนั้น การส่งสัญญาณแรงดันจากชั้นท์ความต้านทานต่ำไปยังออสซิลโลสโคป ซึ่งต้องใช้สายเคเบิลวัด โดยทั่วไปจะใช้เป็นแบบแกนร่วม (Coaxial Cable) เคเบิลแกนร่วมที่ใช้ต้องมีการชีลด์อย่างน้อยสองชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในชีลด์ อันเป็นส่วนหนึ่งของวงจรวัดแรงดันอันเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นรบกวนไปบนสัญญาณที่วัดได้

ในกรณีวัดสัญญาณแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และไม่มีองค์ประกอบของความถี่สูง เคเบิลและสายวัดอาจคิดค่า C หรือ L ขึ้นอยู่กับลักษณะของโหลดที่ปลายสายวัด แต่ในที่นี้เราต้องการวัดสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เคเบิลวัดจึงต้องพิจารณาเป็นวงจรที่มีพารามิเตอร์กระจาย คือ คิดเป็นแบบสัญญาณคลื่นจร (Traveling Wave) เมื่อคลื่นจรเข้ามาที่ต้นสายเคเบิลจะมองเป็นเคเบิลเป็นความต้านทานบริสุทธิ์เท่ากับ Z_w (Surge impedance) ไม่ขึ้นอยู่กับโหลดที่ปลายสายเคเบิลว่าเปิดหรือลัดวงจร หรือมีโหลดอื่นใด โหลดที่ปลายทางจะไม่มีผลกระทบถึงสัญญาณต้นทาง จนกว่าจะถึงเวลา 2 เท่าของเวลาคลื่นเดินทาง (Transit Time) สายเคเบิลจะต้องเป็นแบบสายส่งทันที เมื่อ มีค่าใกล้เคียงกับเวลาขึ้นของคลื่น

เวลาช่วงเดินทาง τ ของสัญญาณอาจหาได้จากความเร็วแผ่กระจาย (Propagation) ของคลื่น คือ [1]

$$\tau = \frac{l}{v} \tag{3.3}$$

เมื่อ l คือ ความยาวของสายเคเบิล และความเร็วที่แผ่กระจายคลื่นหาได้จากความสัมพันธ์

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \tag{3.4}$$

เมื่อ c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/sec)

ε_r และ μ_r คือ เปอร์มิตติวิตี้และเปอร์มีบิลลิตี้สัมพันธ์ของฉนวนสายเคเบิลปกติสายเคเบิลจะมีค่า $\mu_r = 1$ ฉะนั้น

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{3.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายเคเบิลมาตรฐานที่ใช้กันอยู่มีฉนวนเป็น Polyethylene (PE) หรือ Teflon ซึ่งมีค่า ε_r ประมาณ 2.1 – 2.3 ฉะนั้น ความเร็วของสัญญาณจะอยู่ประมาณ 60-70 % ของความเร็วแสง ดังนั้น เคเบิลที่ยาวกว่า $1/4$ ของความยาวคลื่น คือ ช่วงเวลาขึ้น T_r นั่น อาจต้องคิดเป็นสายส่ง นั่นคือ จะต้องคำนึงถึงผลของคลื่นสะท้อนกลับ (Reflection) ปัญหานี้อาจแก้ไขโดยใช้การแมชชิ่งด้วยความต้านทานบริสุทธิ์ที่มีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Z_w) ของสายวัดสัญญาณ

ความยาวของเคเบิลยังมีผลต่อการวัดแรงดัน คือ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม การวัดแรงดันเฉพาะที่มีการตัดช่วงหน้าหน้าคลื่นจะต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ เพราะจะทำให้ค่ายอดที่วัดได้พลาด โดยทั่วไปสายเคเบิลแกนร่วมยาวไม่เกิน 10 เมตร อาจทิ้งผลกระทบแรงดันตกคร่อมได้ ถ้าต้องใช้สายเคเบิลยาวๆ จึงควรเลือกสายเคเบิลที่มีค่าความต้านทานและอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำๆ

ความต้านทานแมชชิ่ง ในกรณีที่วัดสัญญาณแรงดันด้วยออสซิลโลสโคป โดยส่งสัญญาณที่วัดจากความต้านทานต่ำไปยังออสซิลโลสโคปโดยผ่านสัญญาณด้วยสายเคเบิลแกนร่วม เพื่อไม่ให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับอันจะทำให้เกิดความผิดพลาดของค่าแรงดันที่วัดได้ จึงต้องใส่ความต้านทานแมชชิ่งระหว่างความต้านทานชั้นท์ (Shunt) กับเครื่องวัด โดยจะต่อความต้านทานแมชชิ่ง $R_m = Z_w$ (ความต้านทานคลื่นจร) ไว้ปลายสายเคเบิลที่ต่อเข้ากับออสซิลโลสโคป ในลักษณะขนานกับออสซิลโลสโคป

3.1.4 เวลาตอบสนอง (Response Time)

เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการถ่ายทอดพลังงานซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดีขึ้น เวลาตอบสนองจึงเป็นคุณสมบัติอีกประการหนึ่งของระบบวัดที่จะบอกให้ทราบว่า ระบบวัดจะใช้วัดกระแสอิมพัลส์ได้เหมาะสมหรือไม่

การหาผลตอบสนองเพื่อหาเวลาตอบสนอง จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการหาเวลาตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานล้วน นั่นคือ

$$T = \frac{\mu_0 \sigma d^2}{6} \tag{3.6}$$

โดยที่ T คือ เวลาตอบสนองของความต้านทานชั้นท์

μ_0 คือ เปอร์มีบิลลิตี้มีค่า $4\pi \times 10^{-7}\ H/m$ (โลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก)

σ คือ สภาพความนำไฟฟ้าของความต้านทานมีค่าเป็น $1/\rho$ หน่วยเป็น $(\Omega - m)^{-1}$

d คือ ความหนาของความต้านทานชั้นท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3] ได้กำหนดความผิดพลาดในการวัดค่ายอดกระแสอิมพัลส์ยอมให้ผิดพลาดได้ไม่เกิน ±3 % อัตราส่วนกระแสอิมพัลส์ของความต้านทานชั้นท์จะต้องถูกต้องแน่นอน ยอมให้ผิดพลาดได้ไม่เกิน ±1 % ซึ่งเวลาตอบสนองของระบบที่ต้องการขึ้นอยู่กับรูปคลื่นของกระแสอิมพัลส์ คือ

ตารางที่3.1 เวลาตอบสนองที่ต้องการของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์	เวลาตอบสนองที่ต้องการ
8/20 μs	$T \leq 1.6$ μs
4/10 μs	$T \leq 0.8$ μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบ R-shunt

ความต้านทานชั้นท์ในที่นี้หมายถึงความต้านทานที่มีค่าโอห์มต่ำๆ ที่ทราบค่าแน่นอน ใช้สำหรับวัดกระแสโดยให้กระแสที่ต้องการวัดนั้นไหลผ่านความต้านทานของชั้นท์ แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชั้นท์นั้นด้วยออสซิลโลสโคปโดยผ่านสายเคเบิลแกนร่วม ในการออกแบบความหนาของชั้นท์จะมีผลต่อเวลาการตอบสนองของชั้นท์ จากสูตร $T = \frac{\mu_0 \sigma d^2}{6}$ จะเห็นได้ว่าถ้าทำให้ชั้นมีความหนา d บางๆจะทำให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้นและเวลาขึ้น (rise time) Tr จะน้อยลง

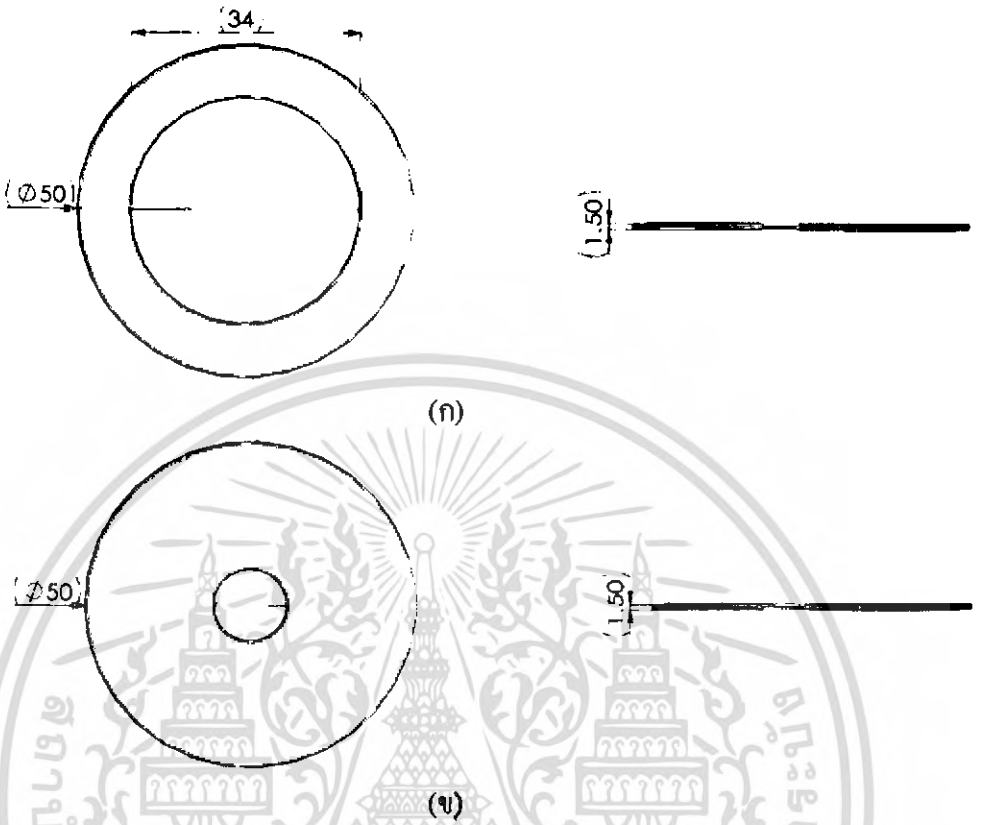
3.2.1 แกนของชั้นท์ ประกอบไปด้วย

3.2.1.1 แท่งตัวนำ ทำจากสแตนเลสกลึงเกลียวทั้งสองข้างมีความยาว 230 mm

รูปที่ 3.7 แท่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 แผ่นตัวนำ ทำจากทองเหลืองกลึงให้เป็นวงกลมมีความหนา 1.5 mm ซึ่งจะแบ่งเป็นตัวนำด้านบนและตัวนำด้านล่างดังรูปที่ 3.8

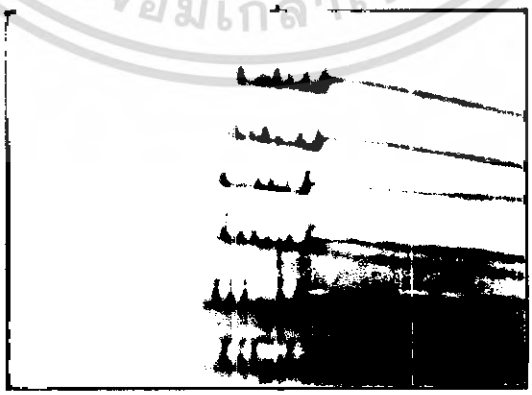


(ก) ตัวนำด้านบนมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำ 50 mm ตรงกลางเจาะรูกว้าง 34 mm

(ข) ตัวนำด้านล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำ 50 mm ตรงกลางเจาะรูกว้าง 11 mm

รูปที่ 3.8 แผ่นตัวนำ

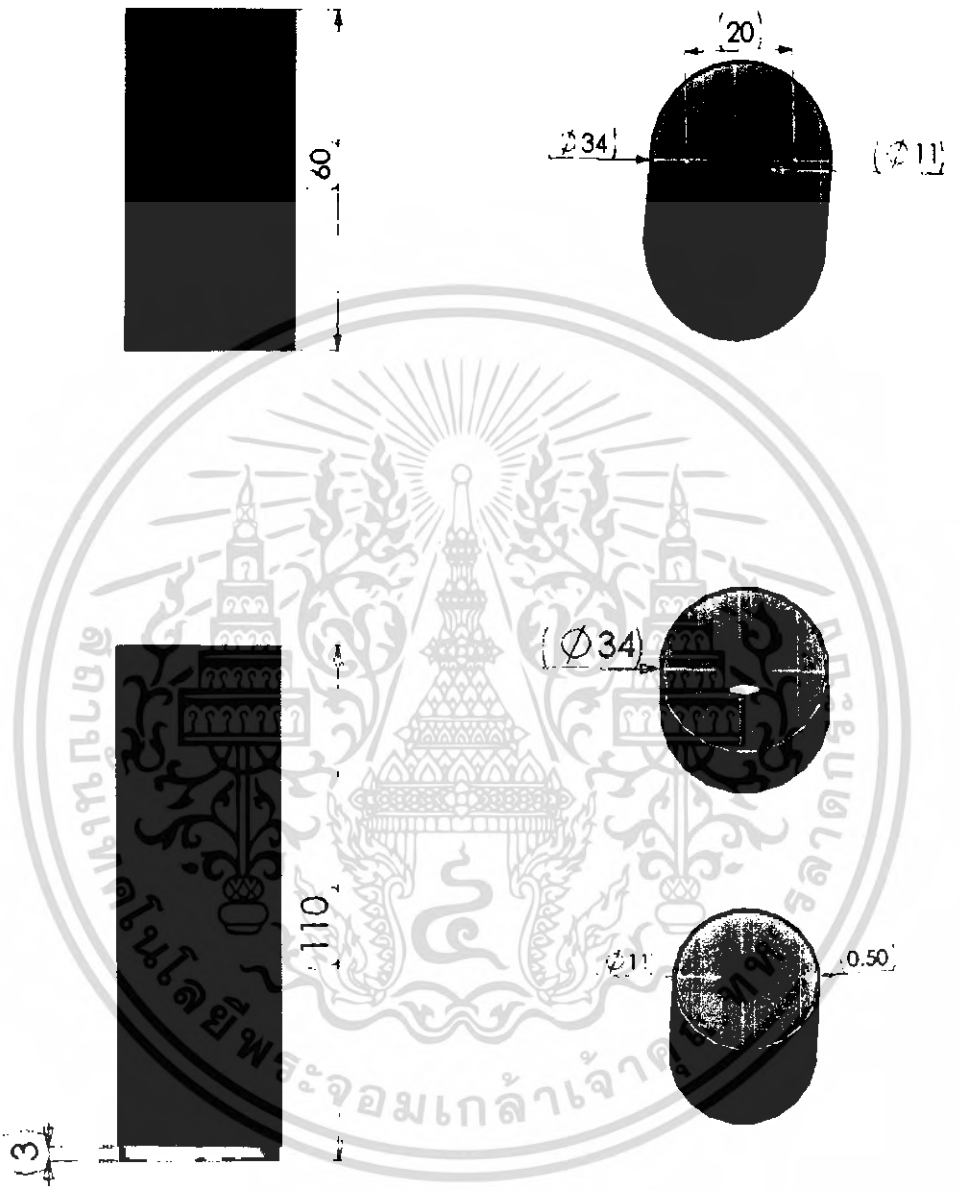
3.2.1.3 ตัวต้านทานที่ใช้เป็นตัวต้านทานชั้นท์ จะใช้ตัวต้านทานชนิด metal film มีความต้านทาน 1 โอห์ม 2 วัตต์



รูปที่ 3.9 ตัวต้านทานชนิด metal film

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

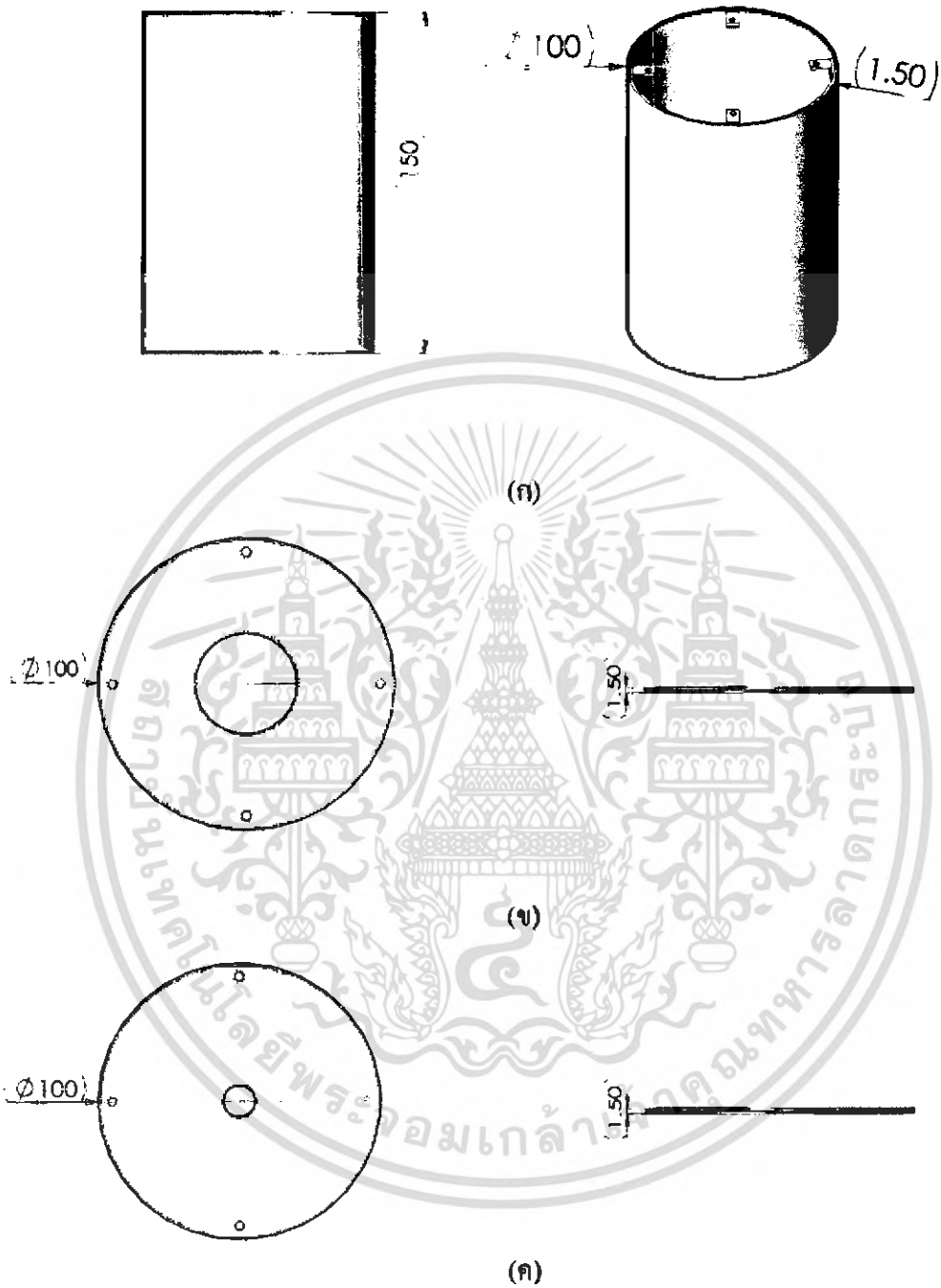
3.2.1.4 ฉนวน ใช้เบกาไลท์ (Bakelite) เป็นฉนวนลักษณะรูปร่างแสดงดังรูป



รูปที่ 3.10 ฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 กระบอกชีลด์ ทำด้วยแผ่นทองเหลืองขึ้นรูปมีมิติดังรูป



(ก) กระบอกชีลด์มีความหนา 1.5 mm สูง 150 mm

(ข) ฝาปิดชีลด์ด้านบนมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำ 100 mm

(ค) ฝาปิดชีลด์ด้านล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำ 100 mm

รูปที่ 3.11 กระบอกชีลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 สายสัญญาณ (สาย coaxial)

ประกอบด้วยแกนที่เป็นทองแดงที่ถูกหุ้มด้วยฉนวน ภายนอกฉนวนจะถูกหุ้มด้วยโลหะอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันสนามไฟฟ้ารบกวนจากภายนอก สายนำสัญญาณจะใช้ต่อจากอุปกรณ์วัดไปยังออสซิลโลสโคป ในการออกแบบจะใช้สาย RG-8 ซึ่งเป็นสายที่มีค่า impedance 50Ω มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.405 in (10.287mm) เป็นสายชนิด Thick Ethernet หรือสาย coaxial อย่างหนา มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ซ.ม. เป็นสายสัญญาณที่มีฉนวนหุ้มหนา และมีแกนทองแดงที่ใช้ในการส่งสัญญาณหนากว่าสายอย่างบาง ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าสายอย่างบาง

รูปที่ 3.12 สายสัญญาณ

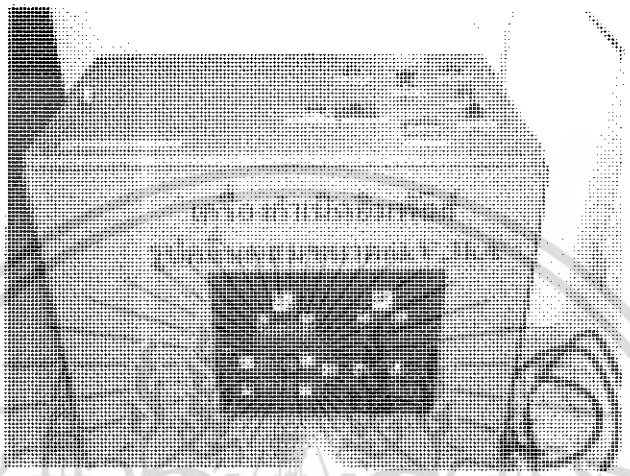
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

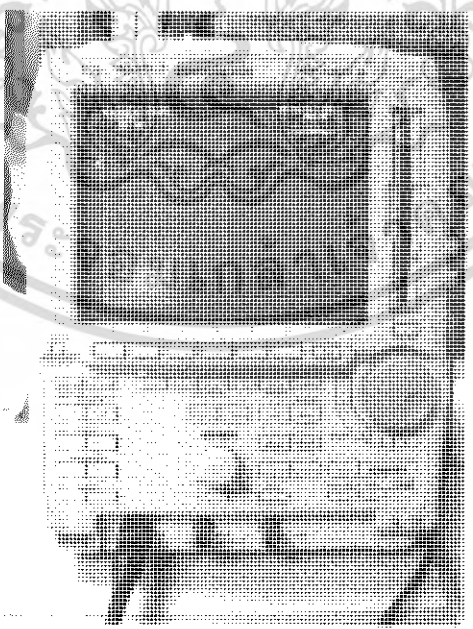
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1 เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ เครื่องกำเนิดอิมพัลส์รูปคลื่นผสม (Combination Wave Impulse Generator) 8/20 μs 6 kV, 3 kA



รูปที่ 4.1 ชุดเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ 6 kV, 3 kA

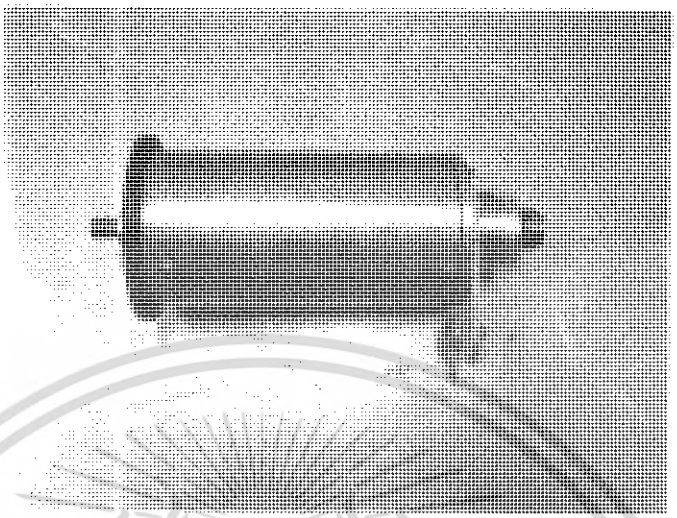
4.1.2 ออสซิลโลสโคป ใช้สำหรับวัดรูปคลื่นสัญญาณอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการ ออสซิลโลสโคปที่ใช้ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL1520



รูปที่ 4.2 ออสซิลโลสโคป

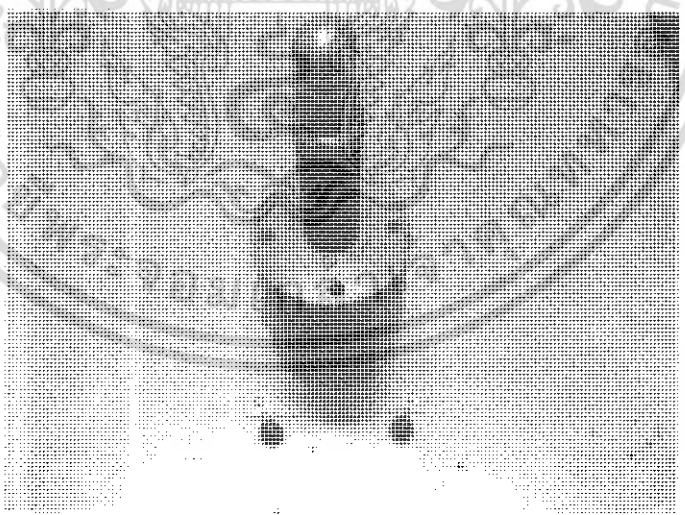
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ความต้านทานชั้นท์ที่ใช้เป็นมาตรฐาน เป็นชั้นท์ความต้านทานซึ่งรับความอนุเคราะห์จากการไฟฟ้าซึ่งเป็นชั้นท์ความต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม



รูปที่ 4.3 ความต้านทานชั้นท์ที่ใช้เป็นมาตรฐาน

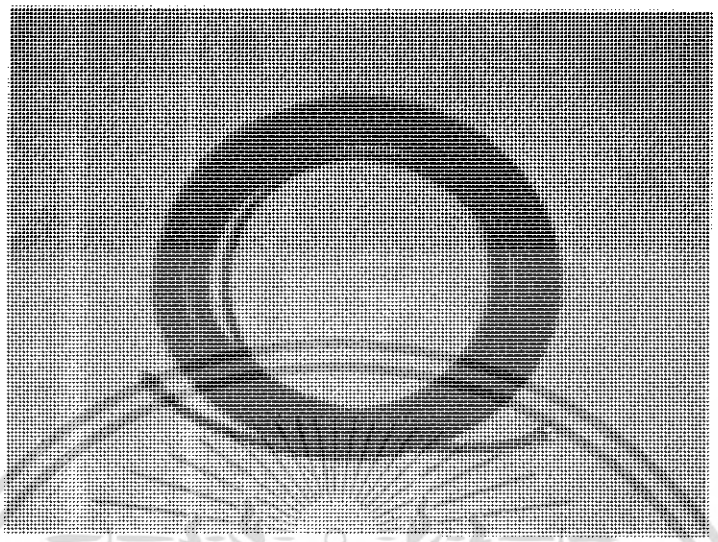
4.1.4 ความต้านทานชั้นท์ที่ใช้ทดสอบ เป็นชั้นท์ความต้านทานที่ใช้ความต้านทานชนิด metal film ขนาด 1 โอห์ม 2 วัตต์ต่อขนานกัน 10 ตัวทำให้ ค่าความต้านทานรวมของชั้นท์นี้เท่ากับ 0.1 โอห์ม



รูปที่ 4.4 ความต้านทานชั้นท์ที่ใช้ทดสอบ

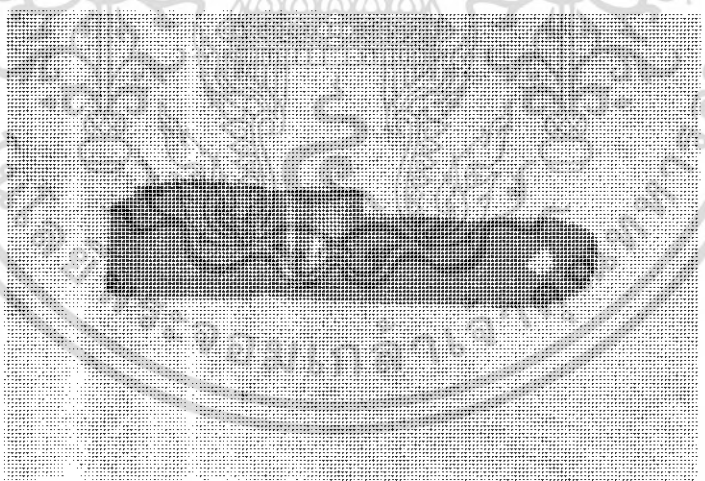
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 สายเคเบิลวัด ใช้สำหรับนำสัญญาณแรงดันที่วัดได้มายังออสซิลโลสโคปสายที่ใช้เป็นสายโคแอกเชียล RG-8



รูปที่ 4.5 สายเคเบิล

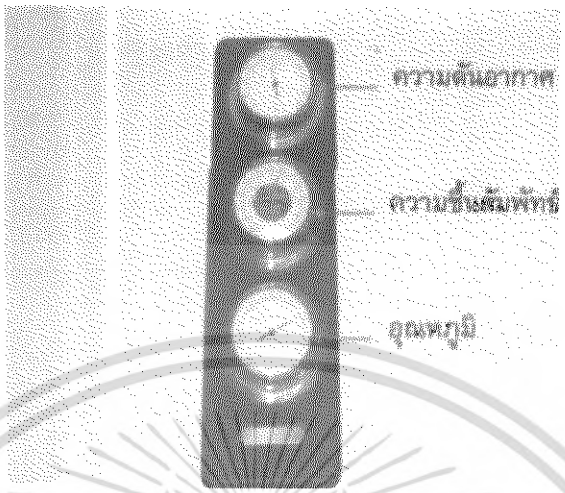
4.1.6 สายนำส่งแรงสูง เป็นสายเชื่อมต่อวงจรจะต้องมีขนาดโตพอและไม่บางจนเกินไป สายนำส่งแรงสูงจะมีลักษณะกลมหรือแบนก็ได้



รูปที่ 4.6 สายนำส่งแรงสูง

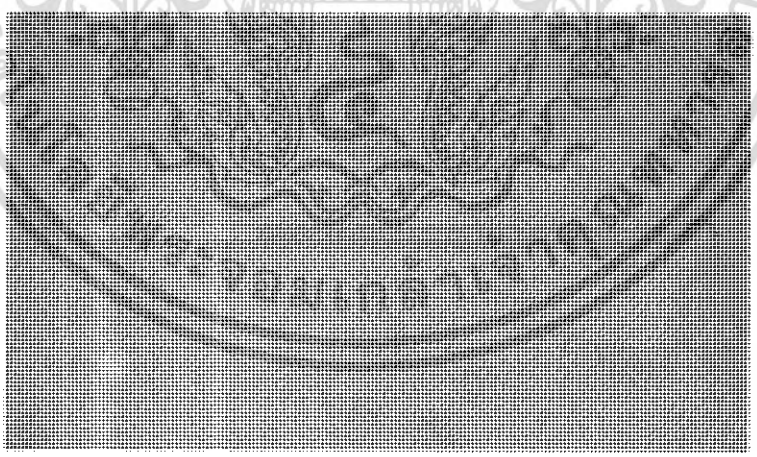
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้อง เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับวัดค่าความดันอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิในห้องทดสอบ



รูปที่ 4.7 อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้องทดลอง

4.1.8 ตะขอกราวด์ ในระบบแรงดันสูงเมื่อถอดระดับแรงดันหมดแล้ว แต่ประจุที่ค้างอยู่ในอุปกรณ์ทดลองจะเป็นอันตรายได้ ดังนั้นจึงต้องมีตะขอกราวด์เอาไว้สัมผัสกับอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ดิสชาร์จประจุไฟฟ้าที่ค้างอยู่ให้หมดก่อนที่จะเข้าไปในบริเวณทดสอบ และตะขอกราวด์ควรสัมผัสกับอุปกรณ์ตลอดเวลาเมื่ออยู่ในบริเวณที่ทดสอบ

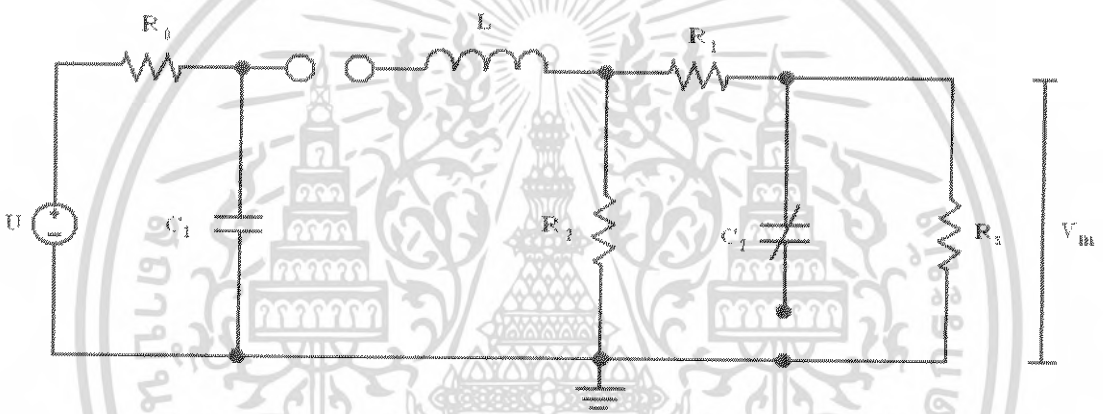


รูปที่ 4.8 ตะขอกราวด์

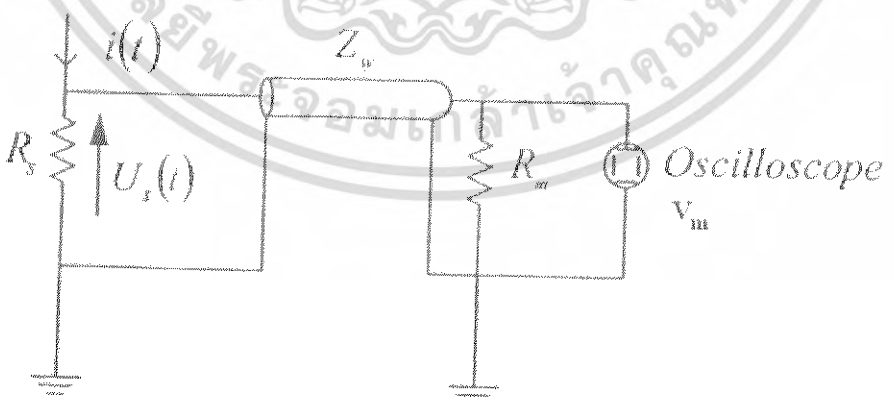
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของการทดสอบและประเมินผล เพื่อเป็นการตรวจสอบดูว่าความต้านทานชั้นท์ที่ออกแบบสร้างขึ้น มีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐานกำหนดไว้หรือไม่ ก่อนที่จะนำไปใช้ในการวัดกระแสอิมพัลส์จริง โดยมีการทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ การทดสอบวัดเปรียบเทียบ ทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น โดยใช้วัดกระแสอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม (Combination Wave Impulse Generator) 8/20 μs 6 kV, 3 kA ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3]

ในโครงงานนี้ได้ทำการทดสอบความต้านทานชั้นท์ที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ 0.1 Ω 1 kA ได้นำไปทดสอบกับเครื่องกำเนิดอิมพัลส์รูปคลื่นผสมขนาด 6 kV, 3 kA โดยการวัดทดสอบจะใช้วิธีการวัดทดสอบเปรียบเทียบอ้างอิงกับความต้านทานชั้นท์มาตรฐาน ซึ่งมีพิกัดความต้านทานอยู่ที่ 0.1 Ω ซึ่งในการเปรียบเทียบจากค่าที่ได้จากการวัดนั้น จะให้เป็นไปตามที่มาตรฐานการวัดกระแสอิมพัลส์ได้กำหนดไว้

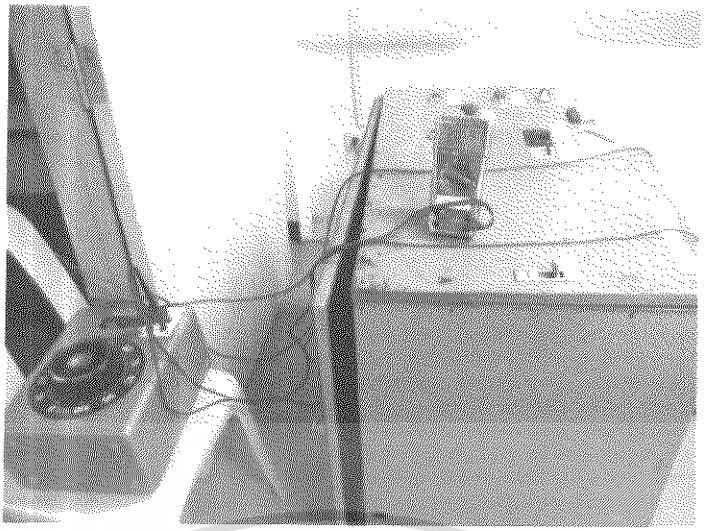


รูปที่ 4.9 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมที่มีความต้านทานชั้นท์ต่อวัดในวงจร

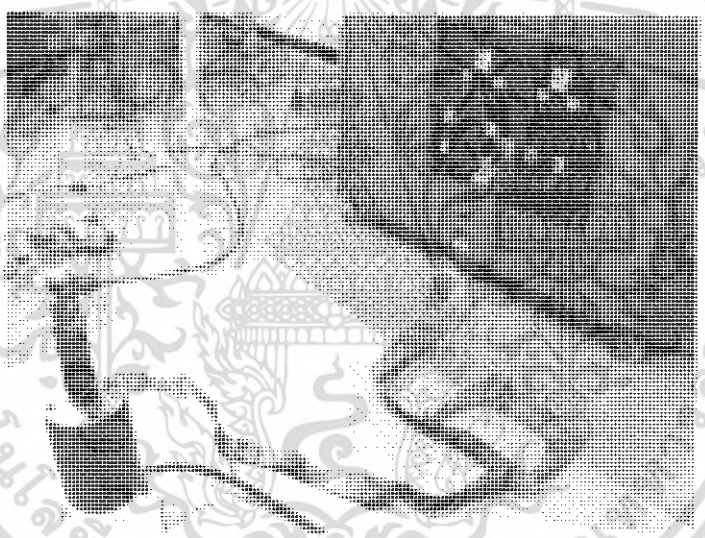


รูปที่ 4.10 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์ (รูปวงจรจริง)

วงจรการทดสอบวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์จากรูปที่ 4.11 (ก) เป็นการจ่ายแรงดันเข้าสู่เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ด้วย variac แล้ววัดแรงดันที่ variac จ่ายให้กับเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ ส่วนรูปที่ 4.11 (ข) เป็นวงจรการทดสอบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์โดยจ่ายกระแสอิมพัลส์เข้าสู่ความต้านทานชั้นท์แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชั้นท์นั้นเพื่อหาขนาดกระแสอิมพัลส์และวัดหน้าคลื่นหลังคลื่นให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด (Assigned Scale Factor Test)

วิธีการทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3] ได้กำหนดวิธีทดสอบอ้างอิงไว้คือ ใช้วิธีการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง โดยถ้าเป็นไปได้ให้ทดสอบที่พิกัดของระบบวัดทดสอบ ในกรณีที่พิกัดของระบบวัดทดสอบมีค่า 3 kA ก็จะทำการทดสอบที่พิกัดกระแส 3 kA แต่เนื่องจากเครื่องมือวัดเปรียบเทียบที่ใช้เป็นระบบวัดอ้างอิง มีพิกัดกระแสอยู่ที่ 1 kA ดังนั้นในการทดสอบจะทำการทดสอบที่ 1 kA ในการทดสอบอ่านค่ากระแสจากระบบวัดอ้างอิงและค่าแรงดันจากระบบวัดทดสอบ โดยจะต้องทำการทดสอบไม่น้อยกว่า n ค่า ($n \geq 10$) ซึ่งมีเงื่อนไขในการทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดจะหาได้จากค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันที่ได้อ่านได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ซึ่งกำหนดให้เป็น F_i ส่วนค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด F_m หาได้จากค่าเฉลี่ยของ F_i โดยที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน s คำนวณได้จาก

$$S = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)^2}{n-1}} \qquad (4.1)$$

เมื่อ : S คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

F_i คือ ค่ากระแสจากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันจากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ

F_m คือ ค่าเฉลี่ยของ F_i

ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3] ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้

1. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จะต้องน้อยกว่า 1% ของ F_m
2. ค่าพารามิเตอร์ทางเวลาจะต้องอยู่ในเงื่อนไขดังนี้
   - ค่าพารามิเตอร์ทางเวลาจะต้องมีค่าไม่เกิน ± 10% ของค่าที่วัดได้จากระบบวัดอ้างอิง
   - อัตราส่วนของค่าที่วัดได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิงต้องมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 5% ของค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ S (ขั้วบวก)

ครั้งที่	I_{REF} (kA)	V_m (V)	F_i (A/V)	T_1 (μ s)			T_2 (μ s)		
				REF	LRC	REF/LRC	REF	LRC	REF/LRC
1	1	100.0	10.00	8.22	8.20	1.0024	21.75	21.56	1.0088
2	1	100.1	9.99	8.30	8.28	1.0024	21.57	21.25	1.0151
3	1	100.1	9.99	8.26	8.30	0.9952	21.48	21.55	0.9968
4	1	100.1	9.99	8.20	7.98	1.0276	21.59	21.40	1.0089
5	1	100.2	9.98	8.20	8.17	1.0037	21.76	21.35	1.0192
6	1	100.0	10	8.38	8.35	1.0036	21.60	21.39	1.0098
7	1	100.3	9.97	8.39	8.42	0.9964	21.83	21.85	0.9991
8	1	100.2	9.98	8.25	8.24	1.0012	21.72	21.75	0.9986
9	1	100.1	9.99	8.34	8.35	0.9988	21.67	21.70	0.9986
10	1	100.0	10.0	8.26	8.28	0.9976	21.65	21.38	1.0126
$\bar{x}$	1	100.11	9.989	8.280	8.257	1.0087	21.662	21.518	1.0067
F_m	9.989			1.0087			1.0067		
s	0.00994			0.00919			0.00794		
ค่าพารามิเตอร์ทางเวลา				0.27%			0.66%		

หมายเหตุ : REF คือ ระบบวัดอ้างอิง, LRC คือ ระบบวัดที่ต้องการทดสอบ

สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบ

ความดันบรรยากาศ 758.0 mmHg

อุณหภูมิห้อง 28.0 $\circ c$

ความชื้นสัมพัทธ์ 57.0 %

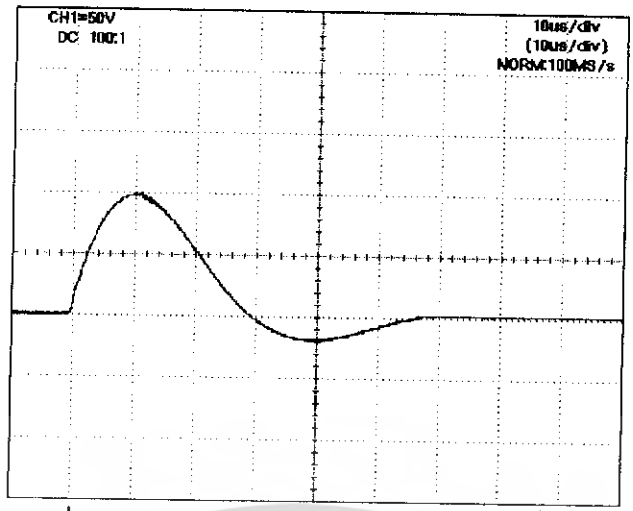
เมื่อ I_{REF} คือ ค่ากระแสจากระบบวัดอ้างอิง

V_m คือ แรงดันที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป

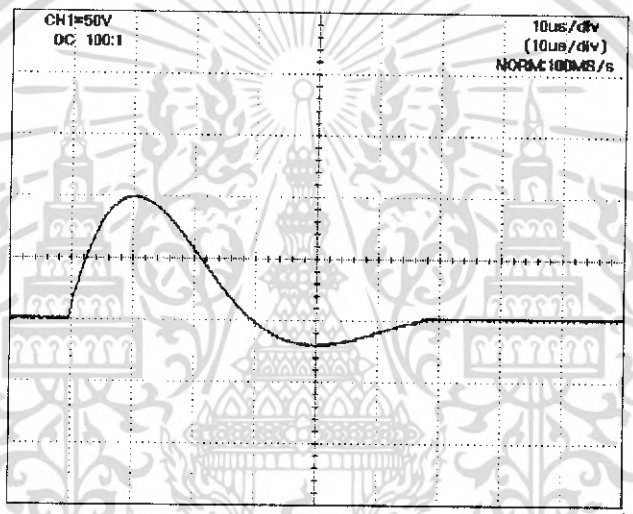
F_i คือ ค่ากระแสจากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันจากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ

จากผลการทดสอบ R-shunt แบบเชิงเส้น โดยการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ S ขั้วบวก ตามตารางที่ 4.1 ค่าสเกลแฟกเดอร์ที่กำหนด F_m มีค่าเท่ากับ 9.989 A/V และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.994% ของ F_m (มีค่าน้อยกว่า 1%) สำหรับค่าพารามิเตอร์ทางเวลา T_1 = 0.27% T_2 = 0.66% (มีค่าน้อยกว่า ± 10%) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.919%, 0.794% ของค่าเฉลี่ย (มีค่าน้อยกว่า 5%) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

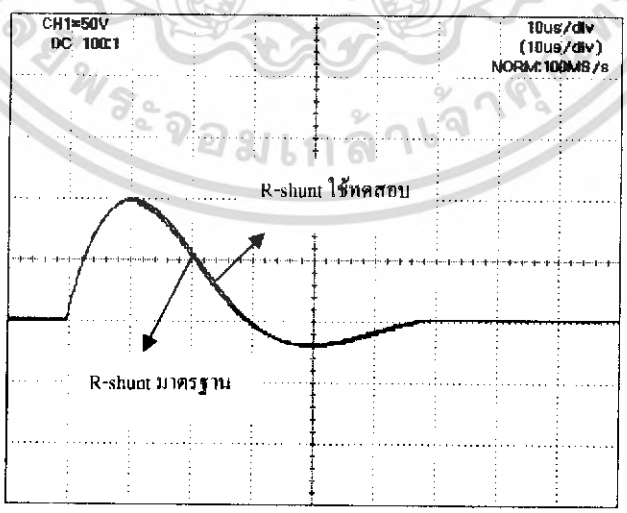
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานขั้วบวก



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบ R-shunt ที่กลุ่มโครงงานได้ทำการสร้างขึ้นมาขั้วบวก



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่มโครงงานได้ทำการสร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 เป็นกราฟการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่มโครงงานได้ทำการสร้างขึ้นมา ซึ่งทำการทดสอบที่พิกัดกระแส 1.0 kA ขั้วบวก ค่าที่อ่านได้เป็นดังนี้ V_m = 100.11 V เพราะฉะนั้น I_m = 1 kA ค่าสเกลแฟคเตอร์กำหนดเท่ากับ 9.989 A/V โดย T_1 = 8.257 μS T_2 = 21.518 μS จะเห็นว่าค่าที่ได้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ S (ขั้วลบ)

ครั้งที่	I_{REF} (kA)	V_m (V)	F_i (A/V)	T_1 (μ s)			T_2 (μ s)		
				REF	LRC	REF/LRC	REF	LRC	REF/LRC
1	1	100.0	10.00	8.00	8.02	0.998	21.18	21.36	0.992
2	1	100.1	9.99	7.84	8.00	0.980	21.40	21.40	1.000
3	1	100.2	9.98	7.96	8.02	0.993	21.18	21.06	1.006
4	1	100.3	9.97	8.06	8.04	1.002	21.80	21.69	1.005
5	1	100.2	9.98	8.11	8.12	0.999	21.31	21.24	1.003
6	1	100.1	9.99	7.99	8.01	0.998	21.62	21.51	1.005
7	1	100.3	9.97	8.68	8.54	1.016	21.90	21.90	1.000
8	1	100.2	9.98	7.98	8.00	0.998	21.60	21.35	1.012
9	1	100.1	9.99	8.11	8.12	0.999	21.60	21.52	1.004
10	1	100.2	9.98	8.06	8.17	0.987	21.45	21.80	0.984
$\bar{x}$	1	100.17	9.983	8.079	8.104	0.9969	21.504	21.483	1.0010
F_m	9.983			0.9969			1.0010		
s	0.00948			0.00961			0.00792		
ค่าพารามิเตอร์ทางเวลา				-0.31%			0.097%		

หมายเหตุ : REF คือ ระบบวัดอ้างอิง, LRC คือ ระบบวัดที่ต้องการทดสอบ

สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบ

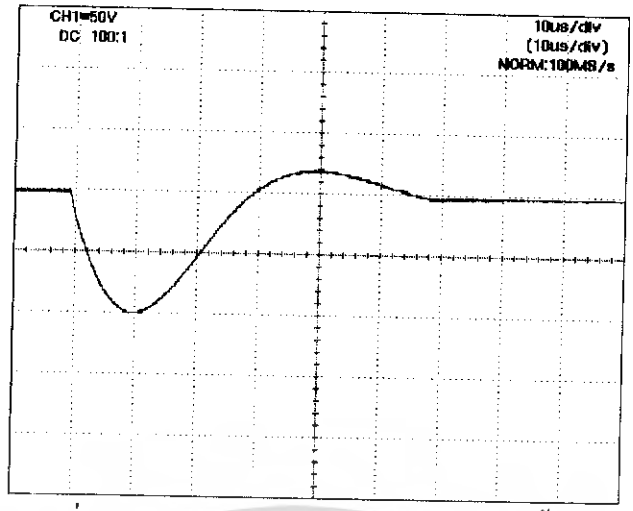
ความดันบรรยากาศ 758.0 mmHg

อุณหภูมิห้อง 28.0 $\circ c$

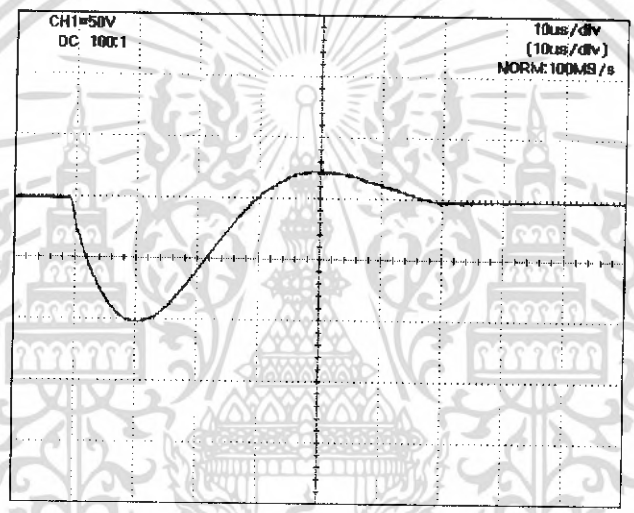
ความชื้นสัมพัทธ์ 57.0 %

จากผลการทดสอบ R-shunt แบบเชิงเส้น โดยการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ S ขั้วลบ ตามตารางที่ 4.2 ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด F_m มีค่าเท่ากับ 9.983 A/V และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.948% ของ F_m (มีค่าน้อยกว่า 1%) สำหรับค่าพารามิเตอร์ทางเวลา T_1 = -0.31% T_2 = 0.097% (มีค่าน้อยกว่า ± 10%) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.961%, 0.792% ของค่าเฉลี่ย (มีค่าน้อยกว่า 5%) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

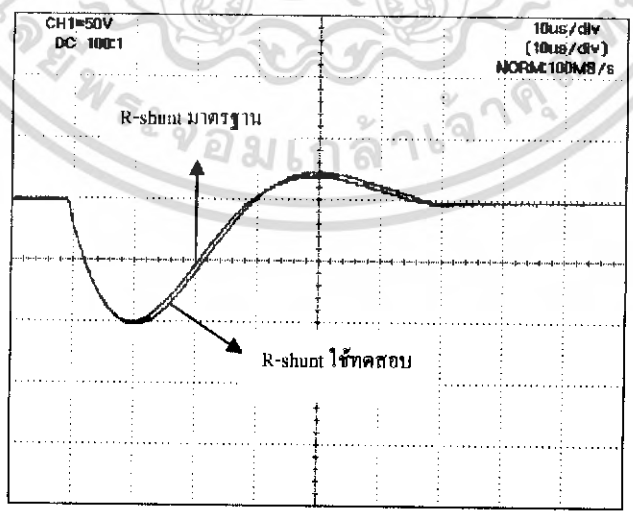
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานขั้วลบ



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบ R-shunt ที่กลุ่มโครงงานได้ทำการสร้างขึ้นมาขั้วลบ



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่มโครงงานได้ทำการสร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 เป็นกราฟการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่มโครงงานได้ทำการสร้างขึ้นมา (ขั้วลบ) ซึ่งทำการทดสอบที่พิกัดกระแส 1.0 kA ขั้วบวก ค่าที่อ่านได้เป็นดังนี้ V_m = 100.17 V เพราะฉะนั้น I_m = 1 kA ค่าสเกลแฟกเตอร์กำหนดเท่ากับ 9.983 A/V โดย T_1 = 8.104 μ S T_2 = 21.483 μ S จะเห็นว่าค่าที่ได้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของ R-shunt แบบเชิงเส้นที่ออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3]ได้ทดสอบปรับเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิง ตามมาตรฐานต้องมีการทดสอบทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เนื่องจากเครื่องมือวัดเปรียบเทียบที่ใช้เป็นระบบวัดอ้างอิง มีพิกัดกระแสอยู่ที่ 1.0 kA ดังนั้นในการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นได้แบ่งช่วงการทดสอบออกเป็น 5 ช่วง ตั้งแต่ 200A- 1.0 kA โดยในการวัดกระแสทดสอบแต่ละช่วงจะวัดช่วงละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของกระแสทดสอบในแต่ละช่วง ตามมาตรฐานมีข้อแนะนำในการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นไว้ว่า ควรทำการทดสอบให้เสร็จเร็วที่สุด เพื่อไม่ให้มีผลกระทบเนื่องจากสภาวะอากาศที่เปลี่ยนไปและไม่ต้องทำการปรับค่าที่วัดได้จากการทดสอบไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน โดยวงจรการทดสอบใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.9

มาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3] ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้ ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างกระแสทดสอบกับกระแสที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด มีค่าไม่เกิน 1% ของค่าเฉลี่ย ให้ถือว่าเครื่องมือวัดที่ทำการทดสอบมีความเป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิง (ขั้วบวก)

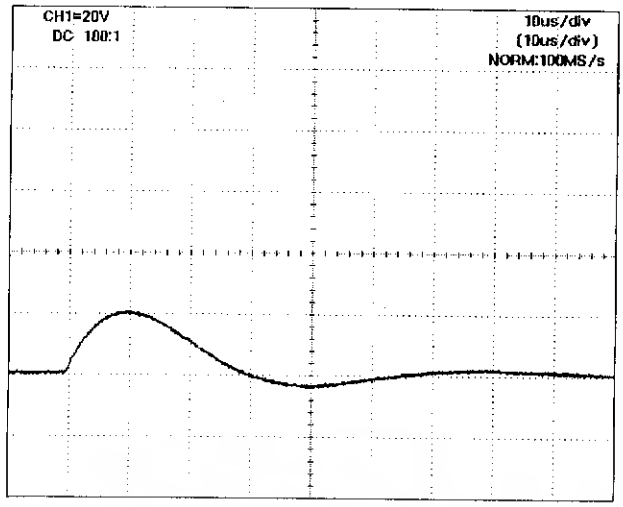
ครั้งที่	กระแสทดสอบ(I_{REF})	กระแสที่วัดได้ (I_m)	I_{REF}/I_m
1	208.00	208.00	1.0000
2	408.32	410.57	0.9945
3	600.08	595.84	1.0071
4	804.84	807.53	0.9967
5	1000.00	1008.02	0.9920
ค่าเฉลี่ย			0.9981
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.0058

หมายเหตุ : ค่ากระแสที่วัดได้ คือ ค่าแรงดันที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคปของระบบวัดที่ต้องการทดสอบคูณกับค่าสเกลแฟกเตอร์ (F_m = 9.989 A/V)

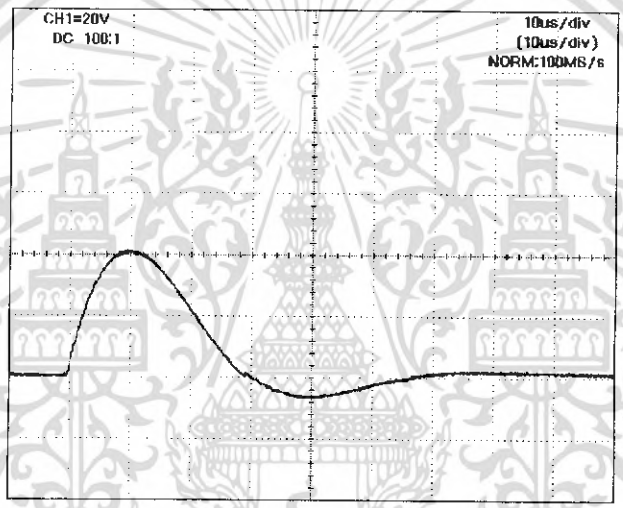
สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบ

ความดันบรรยากาศ	758.0 mmHg
อุณหภูมิห้อง	28.0 $\circ c$
ความชื้นสัมพัทธ์	57.0 %

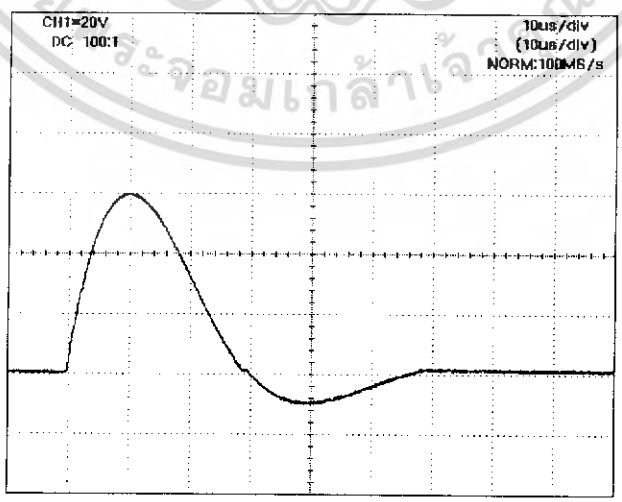
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 200A (ขั้วบวก)

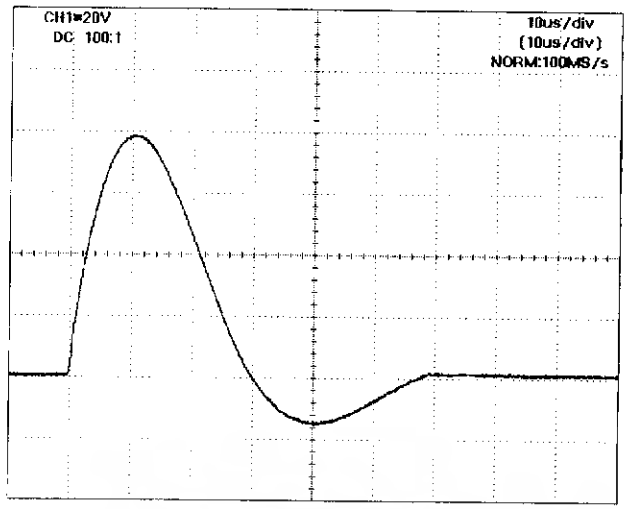


รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 400A (ขั้วบวก)

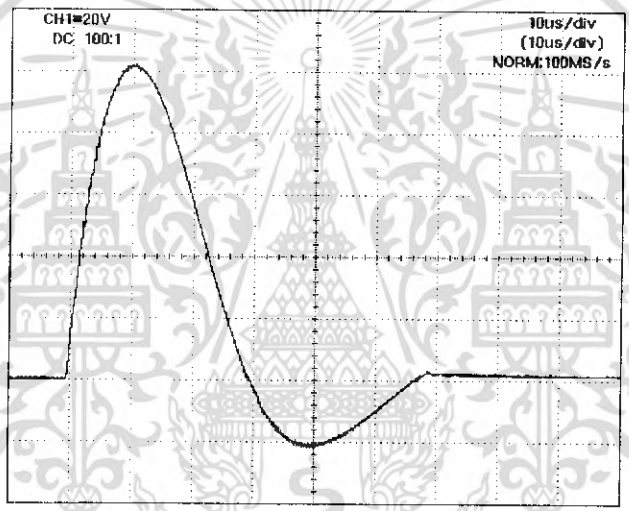


รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 600A (ขั้วบวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 800A (ขั้วบวก)



รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 1000A (ขั้วบวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

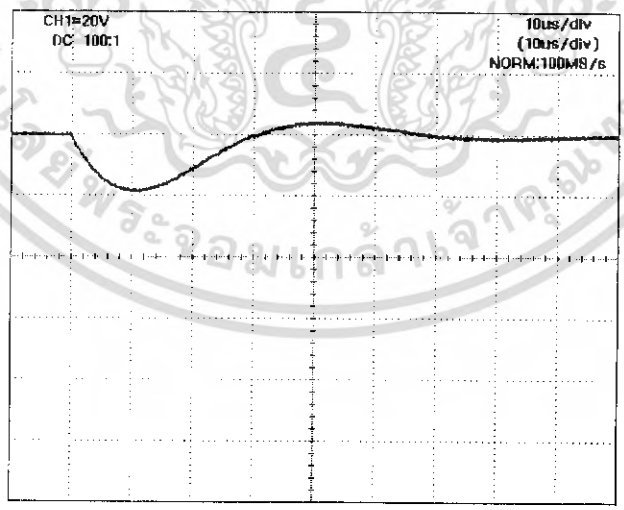
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิง (ขั้วลบ)

ครั้งที่	กระแสทดสอบ(I_{REF})	กระแสที่วัดได้ (I_m)	I_{REF} / I_m
1	198.15	194.86	1.0169
2	395.24	396.28	0.9973
3	608.04	604.87	1.0052
4	824.17	822.42	1.0021
5	1000	1000	1.0000
ค่าเฉลี่ย			1.0043
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.0076

หมายเหตุ : ค่ากระแสที่วัดได้ คือ ค่าแรงดันที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคปของระบบวัดที่ต้องการทดสอบคูณกับค่าสเกลแฟกเตอร์ (F_m = 9.983 A/V)

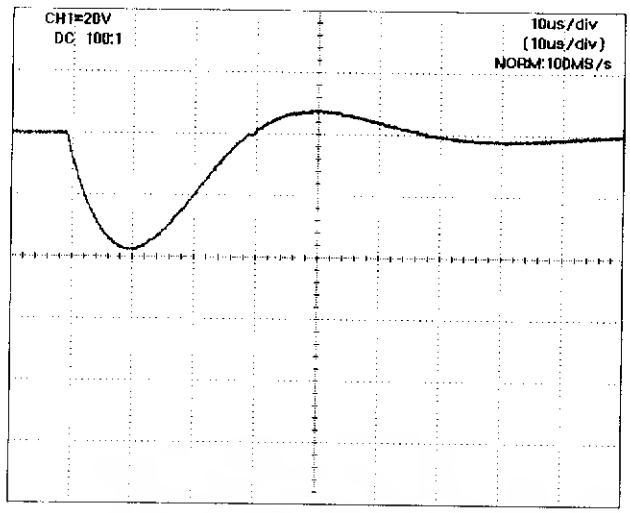
สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบ

ความดันบรรยากาศ	758.0 mmHg
อุณหภูมิห้อง	28.0 ∘c
ความชื้นสัมพัทธ์	57.0 %

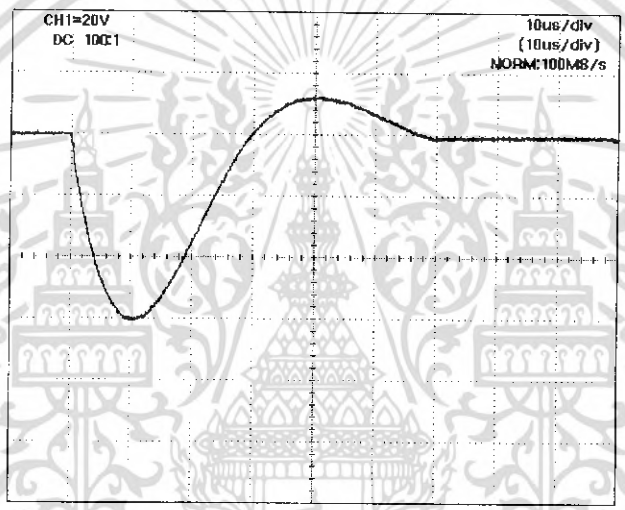


รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 200A (ขั้วลบ)

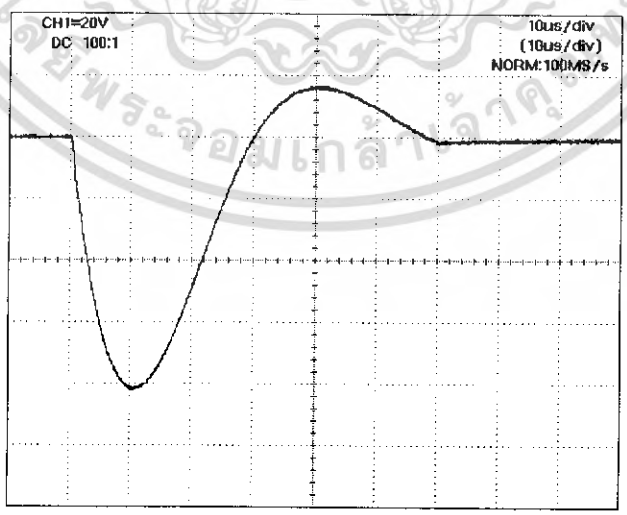
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 400A (ขั้วลบ)

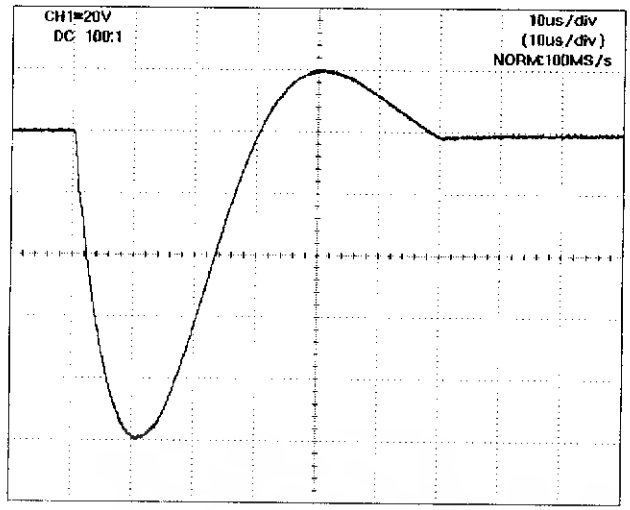


รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 600A (ขั้วลบ)



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 800A (ขั้วลบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 1000A (ขั้วลบ)

จากผลการทดสอบ หาคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เป็นไปดังกราฟข้างต้น แสดงให้เห็นว่า R-shunt ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมานี้มีคุณสมบัติใช้วัดกระแสอิมพัลส์ได้ตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

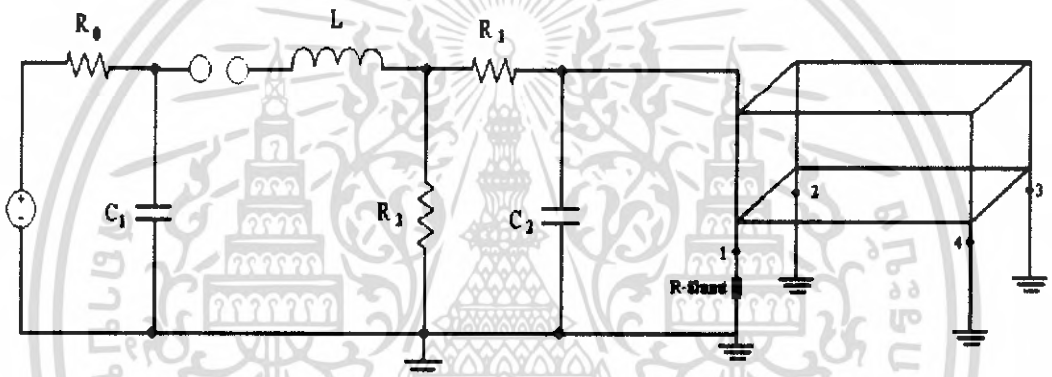
4 .4 การทดสอบดูการกระจายของกระแสในโครงสร้างอาคารจำลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV, 3 kA
2. ออสซิลโลสโคป
3. แผ่นพรีอบปี้ดิสขนาด 1.44 MB
4. R-shunt ที่ออกแบบ
5. โครงสร้างอาคารจำลอง

ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

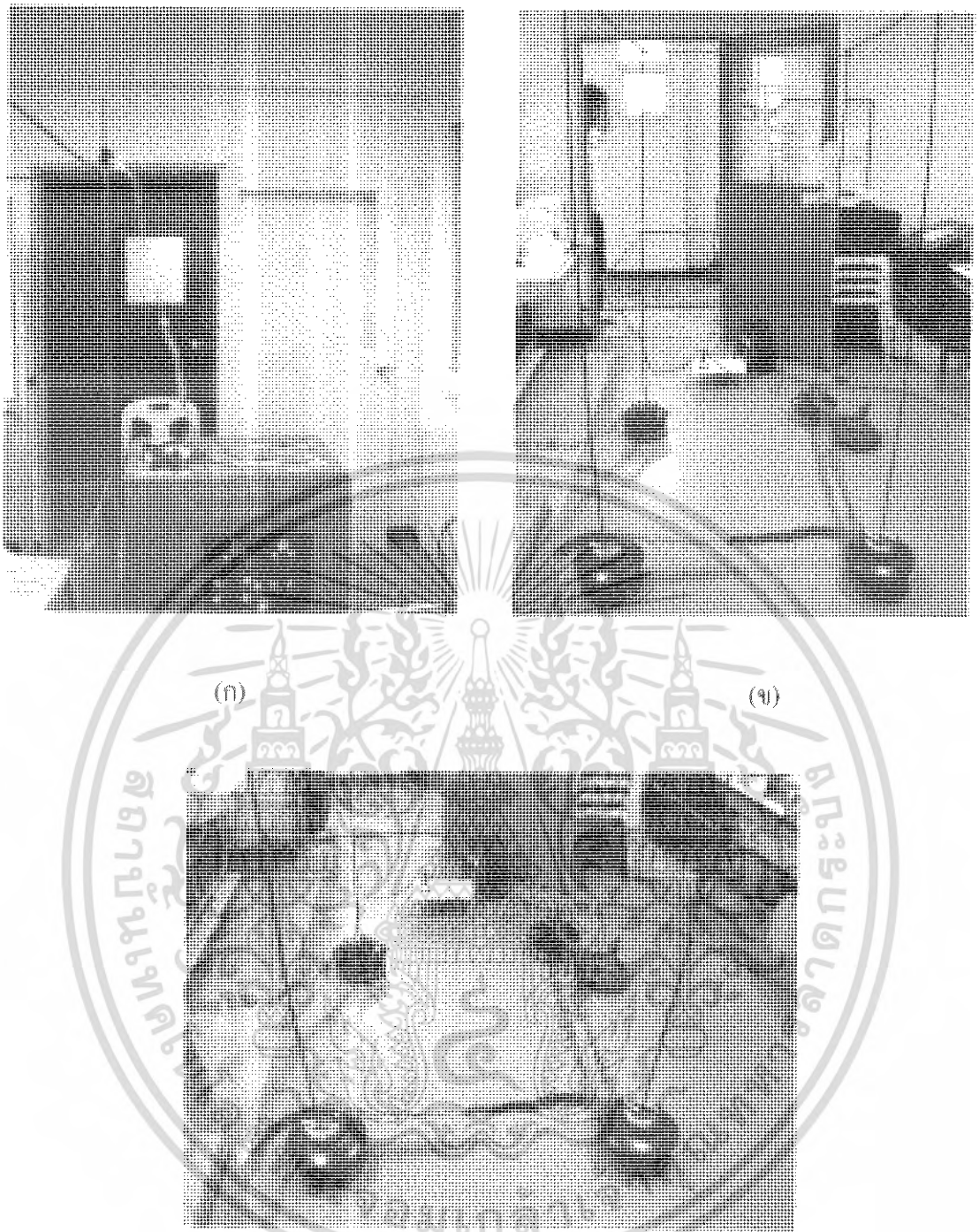
1. บันทึกสภาพบรรยากาศห้องทดลอง
2. ต่อวงจรตามรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 วงจรการทดสอบการกระจายของกระแสในโครงสร้างอาคารจำลอง

3. ต่อความต้านทานที่จุด 1, 2, 3 และ4 เริ่มจากค่าความต้านทาน 2 โอห์มและนำความต้านทานชั้นท์ไปต่อยังจุดทดสอบจุดที่ 1
4. ทำการป้อนแรงดัน Impulse ขนาด 1000 V, 1500V และ 2000V ให้กับโครงสร้างอาคาร
5. บันทึกรูปคลื่นที่ได้และคำนวณขนาดกระแสจากค่าสเกลแฟกเตอร์
6. เปลี่ยนความต้านทานชั้นท์ไปทดสอบตรงจุดทดสอบที่ 2, 3 และ4 แล้วป้อนแรงดัน Impulse เหมือนข้อ 4. แล้วบันทึกรูปคลื่นที่ได้
7. เปลี่ยนความต้านทานที่จุด1, 2, 3 และ4 เป็น 20 และ 100โอห์มตามลำดับแล้วทดสอบซ้ำ
8. บันทึกรูปคลื่นและเปรียบเทียบรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

(ค)

รูปที่ 4.29 วงจรการทดสอบการกระจายของกระแสในโครงสร้างอาคารจำลอง (รูปวงจรจริง)

วงจรการทดสอบการกระจายของกระแสในโครงสร้างอาคารจำลองโดยรูปที่ 4.29 (ก) เป็นการจ่ายแรงดันอิมพัลส์เข้าสู่โครงสร้างอาคารจำลอง ส่วนรูปที่ 4.29 (ข) และ รูปที่ 4.29 (ค) เป็นการต่อระบบกราวด์ของโครงสร้าง โดยแต่ละขาของโครงสร้างจะมีความต้านทานต่ออยู่ เสมือนว่ามีความต้านทานดินเท่ากันทั้งสี่ขา จากขาของโครงสร้างก็จะทำการวัดด้วยความต้านทานชั้นท์ทีละขา ส่วนขาที่เหลือก็ต่อลงกราวด์ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.5 ผลการทดสอบการกระจายของกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ S

ค่าความต้านทานดิน(โอห์ม)	พิกัดกำลัง (V)	กระแสที่วัดได้ (A)			
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
2	1000	108	116	9	104
	1500	160	166	15.2	158
	2000	226	214	18.4	212
20	1000	48	44	6	43
	1500	70	69	9.6	68
	2000	92	90	12.8	91
100	1000	12	14	ตรวจจับไม่ได้	16.4
	1500	20	22	ตรวจจับไม่ได้	22.4
	2000	28.8	28.6	ตรวจจับไม่ได้	28.5

สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบ

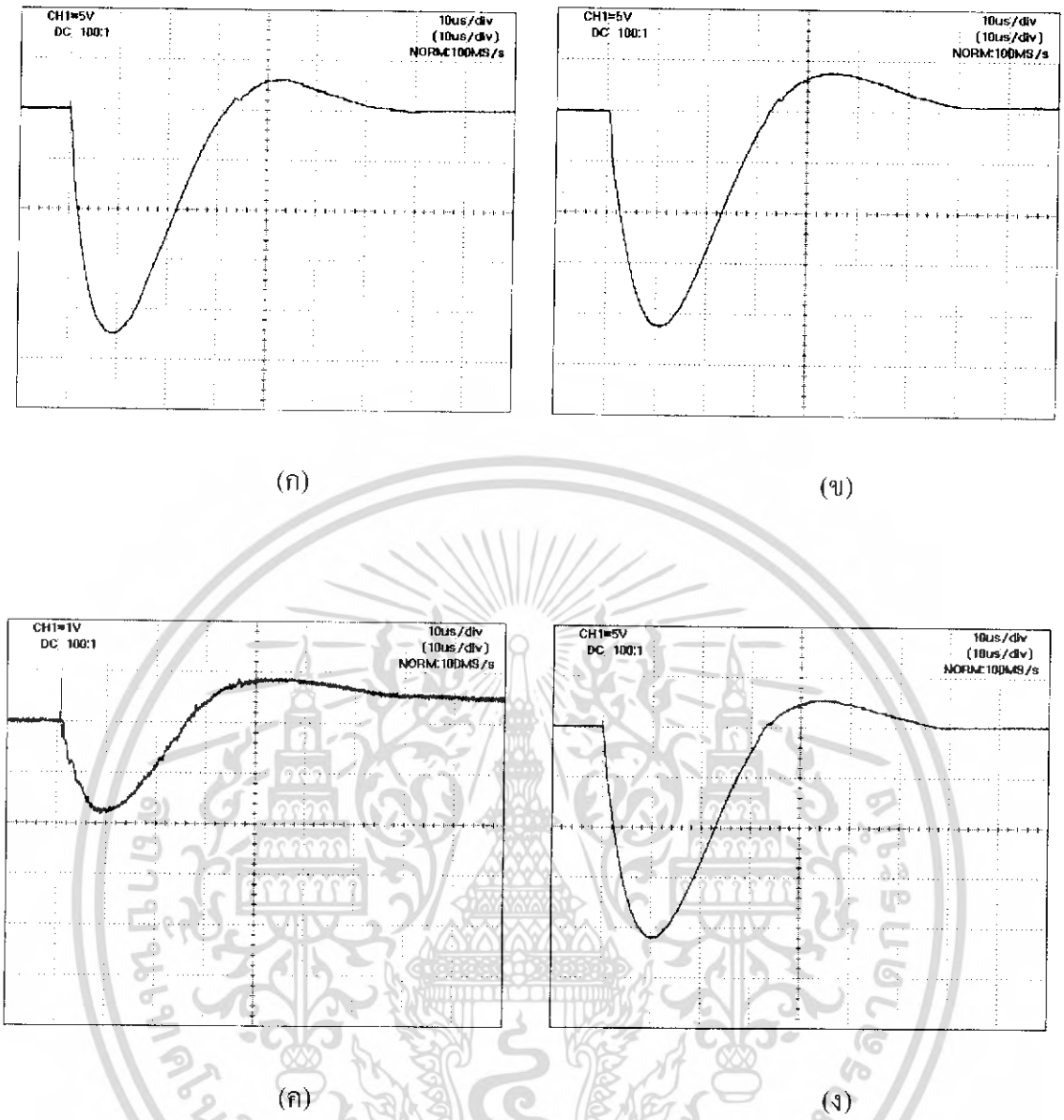
ความดันบรรยากาศ	758.0 mmHg
อุณหภูมิห้อง	28.0 $\circ c$
ความชื้นสัมพัทธ์	57.0 %

จากผลการทดสอบโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1.0 kV , 1.5 kV และ 2.0 kV ที่ค่าความต้านทานดินขนาด 2 Ω , 20 Ω และ 100 Ω โดยวัดขนาดกระแสที่ขาทั้ง 4 ของโครงสร้างอาคาร ดังแสดงในตารางที่ 4.5

เมื่อพิจารณาที่ขาโครงสร้างเดียวกัน และความต้านทานดินเดียวกันโดยเปลี่ยนขนาดแรงดันอิมพัลส์พบว่าค่าขนาดกระแสที่ได้แปรผันตรงกับ ขนาดแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนอย่างเป็นเชิงเส้นแสดงว่า กระแสฟ้าผ่าของธรรมชาติขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันที่เบรกดาวน์ผ่านอากาศโดยตรง

เมื่อพิจารณาที่โครงสร้างเดียวกันและขนาดแรงดันอิมพัลส์เดียวกัน โดยเปลี่ยนความต้านทานดิน พบว่าขนาดของกระแสที่ได้ เมื่อค่าความต้านทานดินมากขึ้นกระแสที่วัดได้น้อยลง เป็นเพราะเมื่อโครงสร้างมีความต้านทานดินสูง ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างสูงเมื่อเทียบกับวัสดุที่ต่อลงดินอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 2 โอห์ม

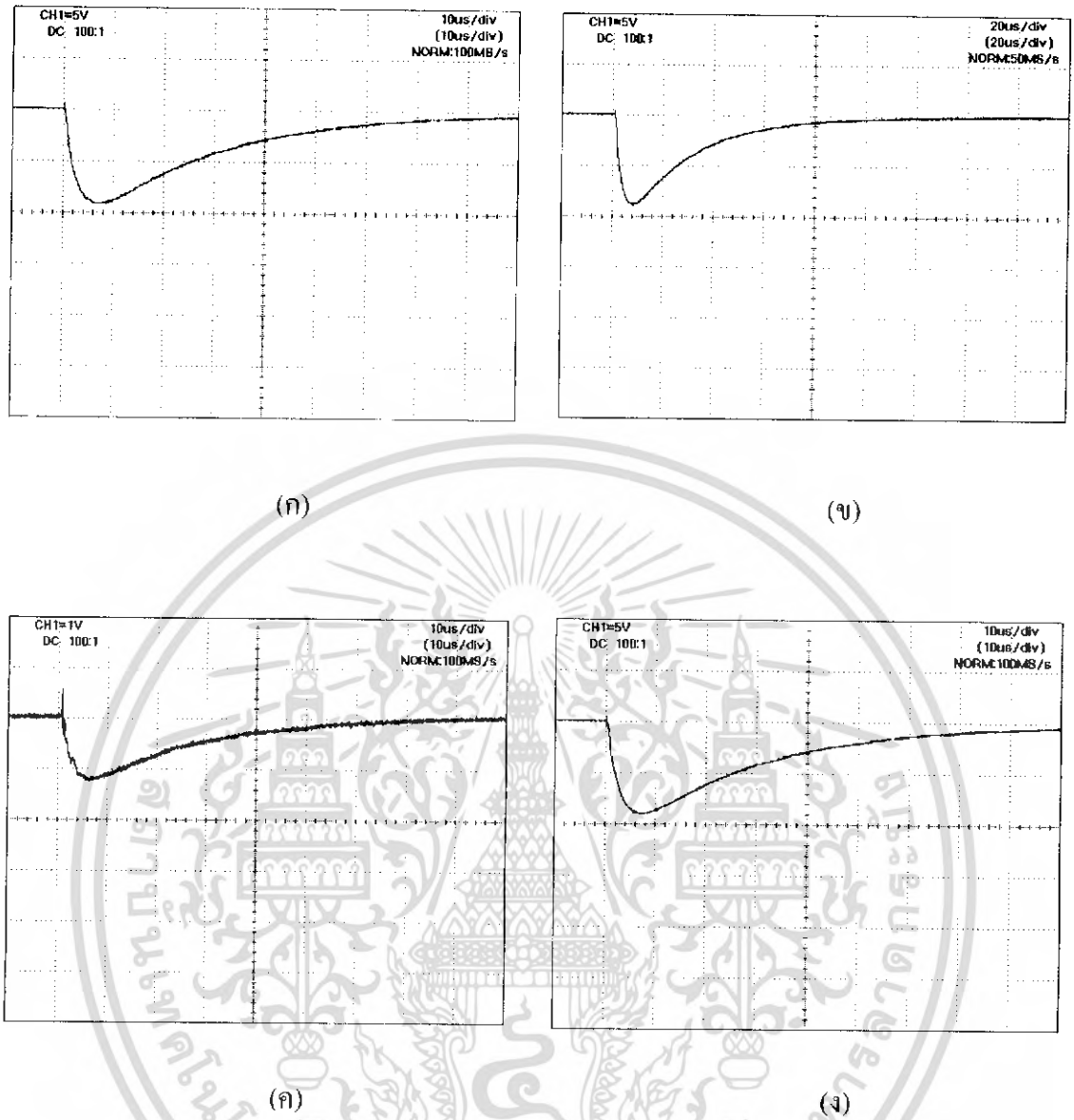
(ก) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 1 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div

(ข) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 2 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div

(ค) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 3 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 1 Volt/Div

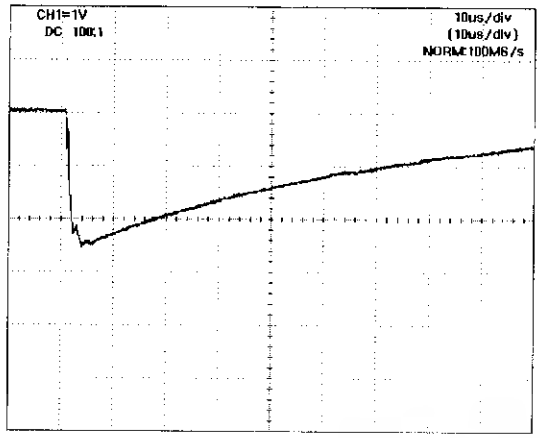
(ง) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 4 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

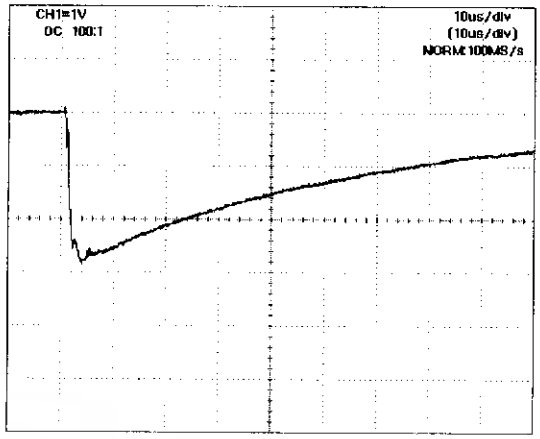


รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 20 โอห์ม
(ก) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 1 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div
(ข) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 2 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div
(ค) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 3 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 1 Volt/Div
(ง) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 4 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div

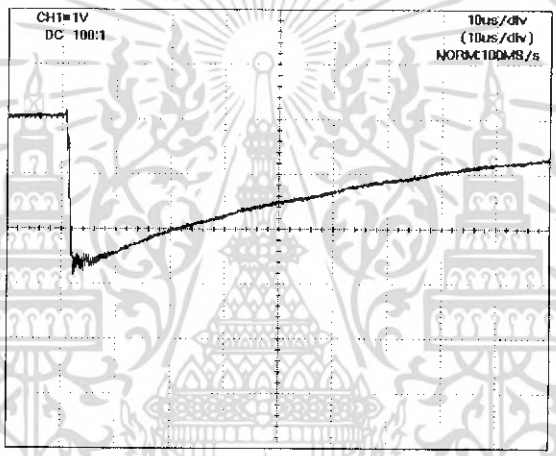
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 100 โอห์ม
(ก) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 1 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 1 Volt/Div
(ข) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 2 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 1 Volt/Div
(ค) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 4 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 1 Volt/Div
หมายเหตุ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์วัดจากจุดที่ 3 ของโครงสร้างที่ความต้านทานดิน 100 Ω มีค่าน้อยมาก

เมื่อพิจารณาที่ขนาดของแรงดันอิมพัลส์เดียวกัน ค่าความต้านทานดินเดียวกันโดยเปลี่ยนขาของโครงสร้าง พบว่า กระแสไม่เท่ากันทุกขา เนื่องจากขาที่ 3 ซึ่งอยู่ห่างจากขาที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์มากที่สุด และจากการที่กระแสอิมพัลส์มีคาบเวลาน้อยมาก กระแสอิมพัลส์จึงไปในทิศทางที่ง่ายที่สุด ซึ่งไม่เหมือนในทฤษฎีการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

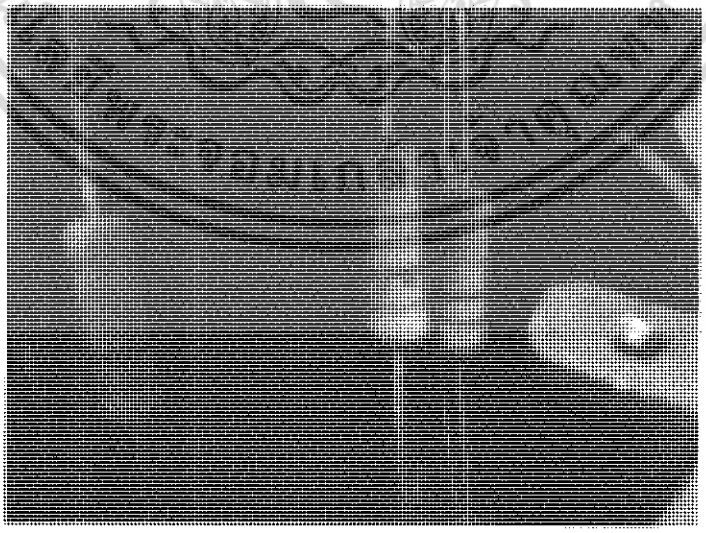
บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุป

การทดลองระบบรากสายดิน ซึ่งระบบรากสายดินเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1 kV , 1.5 kV และ 2 kV ใส่โครงสร้างอาคารจำลอง และทำการเปลี่ยนความต้านทานดินที่ค่า 2 Ω , 20 Ω และ 100 Ω พบว่าที่แรงดันเท่ากัน ค่ากระแสที่วัดได้ของระบบที่มีความต้านทานดินต่ำ กระแสจะมีขนาดสูงกว่าที่ความต้านทานสูง และเมื่อพิจารณาที่ค่าความต้านทานดินเดียวกัน กระแสที่วัดได้จะแปรผันตามแรงดันอย่างเป็นเชิงเส้น และการกระจายของกระแสไม่สมมาตรเท่ากันทุกขาของโครงสร้าง จากทฤษฎีกล่าวว่า ค่าความต้านทานดินต้องมีค่าต่ำๆ เพื่อกระแสฟ้าผ่าจะได้ไหลกระจายออกไปได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ซึ่งอธิบายได้จากผลการทดลองของโครงงานนี้ กล่าวคือ ยิ่งกระแสที่วัดได้มีขนาดต่ำๆ หมายถึงศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างมีค่าสูง ซึ่งเป็นอันตรายต่อบุคคลที่สัมผัสโครงสร้างจาก แรงดันสัมผัส และอาจเกิดการสปาร์กด้านข้าง ซึ่งอาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้อีกด้วย ดังนั้นในการออกแบบระบบรากสายดินจึงต้องทำให้ค่าความต้านทานดินมีค่าต่ำมากๆ

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

เนื่องจากในโครงงานนี้ใช้ ตัวต้านทานชนิด metal film ซึ่งมีราคาถูกแต่คุณภาพต่ำ เมื่อทดสอบที่พิกัด 1 kA ติดต่อกันหลายๆ ครั้งตัวต้านทานจะร้อนและฉนวนจะเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งไม่สามารถใช้วัดต่อไปได้ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวต้านทานที่เกิดการเสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบควรทดสอบในห้องที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ หรือทำการทดลองให้เสร็จภายในวันเดียวเพื่อจะได้ผลการทดลองที่ถูกต้องและแม่นยำ และในการทดสอบจะใช้ออสซิลโลสโคป เพื่อป้องกันความเสียหายจากการเกิดแรงดันเกินหรือ เสิร์จจากภายนอก ดังนั้นควรต่อออสซิลโลสโคปกับหม้อแปลง isolated 1:1

ในการทดสอบเป็นการทดสอบเพื่อดูการกระจายของกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์ ถ้าเป็นไปได้ควรใช้โรโกสกี้คอยล์ทดสอบร่วมกับความต้านทานชั้นท์เพื่อจะได้ศึกษาการกระจายของกระแสอิมพัลส์ในรูปแบบอื่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] สำรวย สังข์สะอาด , **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง** , 1st(ฉบับปรับปรุง) , กรุงเทพ , วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์ , 2547

[2] IEC Publication 60060-1, "**High Voltage Test Techniques Part I:General Definations and Test Requirement**", Geneva 1989

[3] IEC Publication 60060-2 , "**High Voltage Test Techniques Part II:Measuring system**",Geneva 1994.

[4] Peter Hasse , **"สัมมนาระบบป้องกันฟ้าผ่า** ," 2546

[5] zweisprachig , "**Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard**," 2006

[6] เชาวน์วัศ แพน้อย ขจรยศ ภักดี พนาดร ธิวงค์ษา และ วีระวัฒน์ เรียงเสนาะ,"การออกแบบและสร้างความต้านทานชั้นท์สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ขนาดพิกัด 20 kA," **ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหานคร** ,ปี2549,หน้า 8-28

[7] H.Griffiths and N.Pilling , "Lightning phenomena and protection systems," **Advances in high voltage engineering** , pp. 79-121

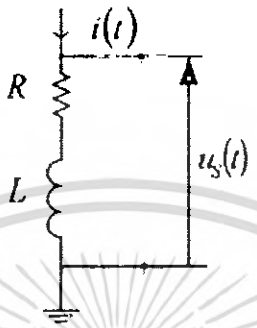
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างสมการที่ใช้ในการออกแบบ

ความต้านทานชั้นท์ (R-shunt)



รูปที่ ผ.ก.1 วงจรสมมูลของความต้านทานชั้นท์

Shunt ในทางปฏิบัติประกอบด้วยทั้งค่า R และ L

$$V_1 = I_p R_s + L\frac{dI_p}{dt} \qquad (ก.1)$$

จากสมการถ้า L >>R

$$V_1 = L\frac{dI_p}{dt} \qquad (ก.2)$$

ซึ่งทำให้ค่าที่ได้ผิดจากความเป็นจริง ดังนั้นในการออกแบบ R >> L

$$V_1 = I_p R_s + L\frac{dI_p}{dt} \qquad (ก.3)$$

ค่าพลังงานที่สูญเสียไปกับ Shunt

$$P_{loss} = I_p^2 R_s \qquad (ก.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Shunt มีหลักการการวัดในลักษณะเดียวกันกับ Voltage divider ซึ่งมี

แบนด์วิดท์ $$f_B = \frac{1.46}{RC_e} \quad (ก.5)$$

และ เวลาดอบสนอง $$T = \frac{RC_e}{6} \quad (ก.6)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับ Shunt ซึ่ง $RC_e \approx \mu_0 \sigma d^2$ (ก.7)

ดังนั้น

$$f_B = \frac{1.46}{\mu_0 \sigma d^2} \quad (ก.8)$$

และ $$T = \frac{\mu_0 \sigma d^2}{6} \quad (ก.9)$$

ค่า Parameter ต่าง ๆ

μ_0	คือ	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m = ค่า permeability ของสุญญากาศ
R	คือ	ค่าความต้านทาน
L	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำ
C	คือ	ค่าตัวเก็บประจุ
R_s	คือ	ค่าความต้านทานของ Shunt
f_B	คือ	Bandwidth
T	คือ	ค่า Time Response
σ	คือ	สภาพความนำของตัวต้านทาน
d	คือ	ความหนาของ Shunt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การประกอบสร้าง

1. การประกอบสร้าง ความต้านทานชั้นท์

1.1 ส่วนประกอบของชั้นท์

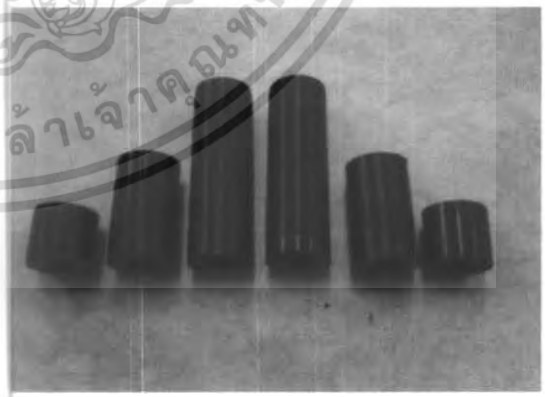
จากการออกแบบชั้นท์ในบทที่ 3 ซึ่งจะนำมาประกอบสร้าง โดยเริ่มจากการสร้างชิ้นส่วนของชั้นท์ให้ได้ขนาดตามที่ได้ออกแบบ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1.1.1 แกนของชั้นท์

(ก)

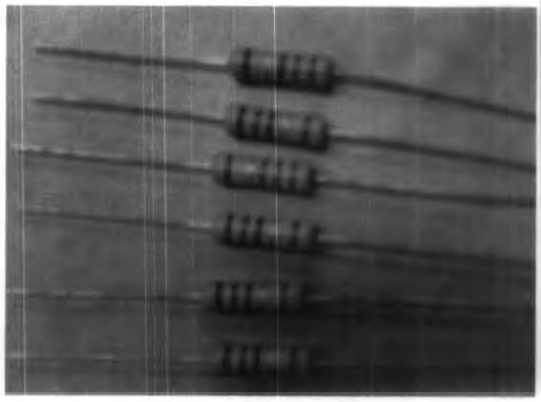
(ข)

(ค)



(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

(ฉ)

(ช)

รูปที่ ผ.ข.1 ส่วนประกอบแกนของชั้นท์

(ก) แท่งตัวนำทำมาจากสแตนเลสกลึงเกลียวทั้ง 2 ด้าน

(ข),(ค) แผ่นตัวนำ

(ง) ฉนวนเบกาไลด์

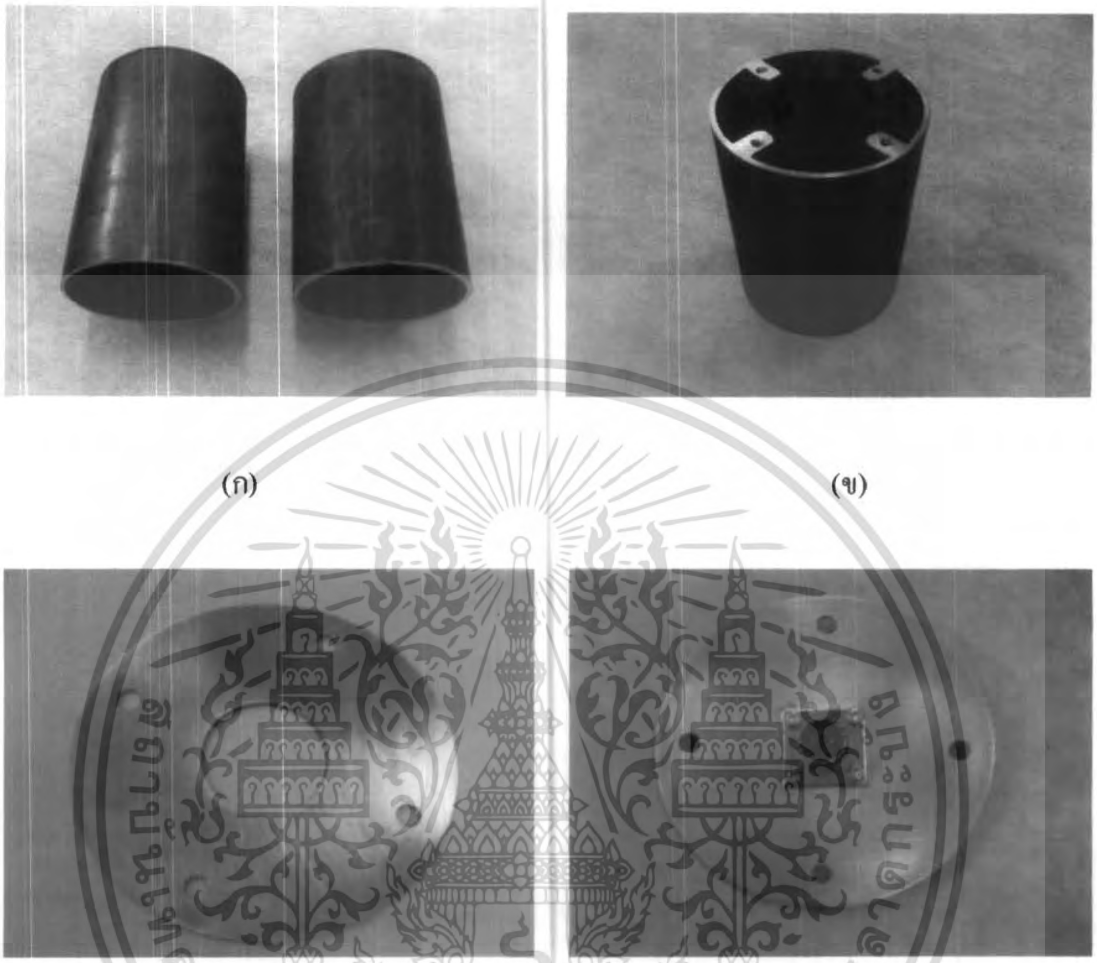
(จ) ความต้านทานชนิด metal film ขนาด 1 โอห์ม 2 วัตต์

(ฉ) หางปลา

(ช) อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2 กระบอกชีลด์



(ก) (ข)

(ค) (ง)

รูปที่ ผ.ข.2 ส่วนประกอบของกระบอกชีลด์

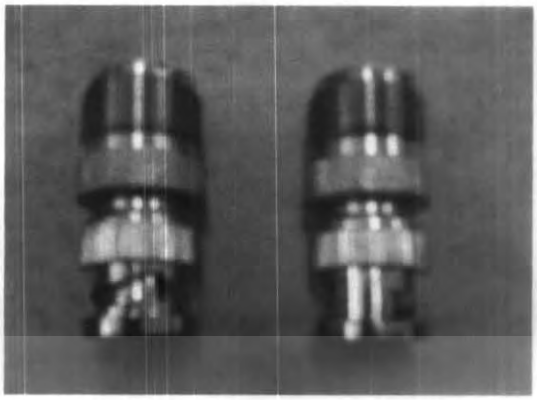
(ก),(ข) กระบอกชีลด์

(ค) ฝาปิดชีลด์ด้านบน

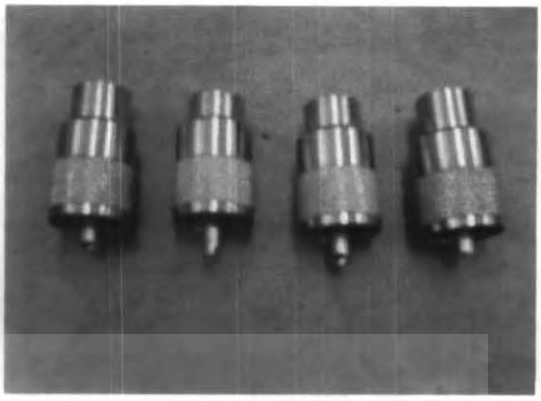
(ง) ฝาปิดชีลด์ด้านล่างประกอบอยู่กับหัวต่อ UHF-female

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

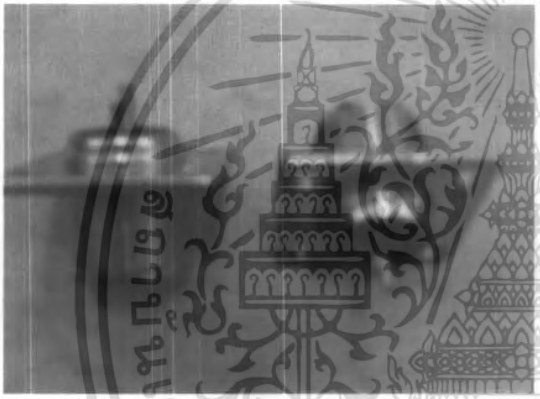
1.1.3 ส่วนประกอบอื่นๆ



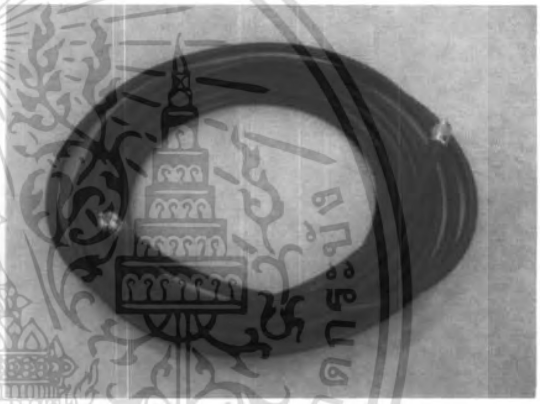
(ก)



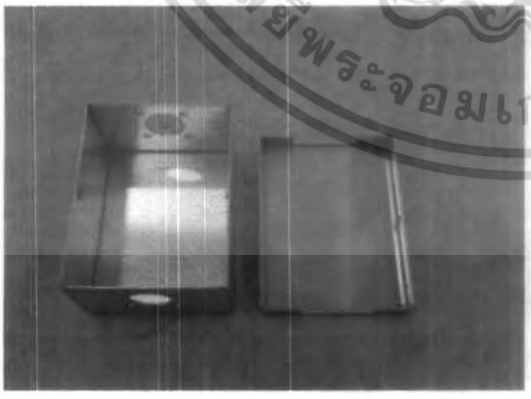
(ข)



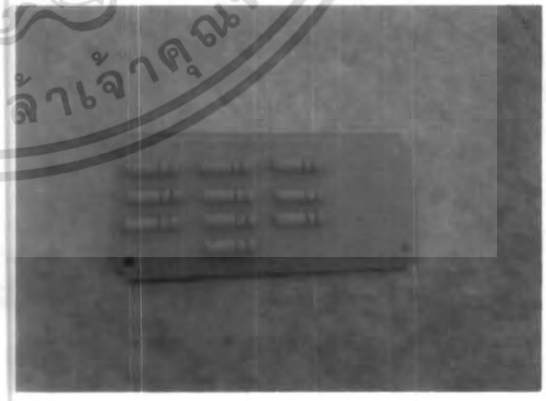
(ค)



(ง)

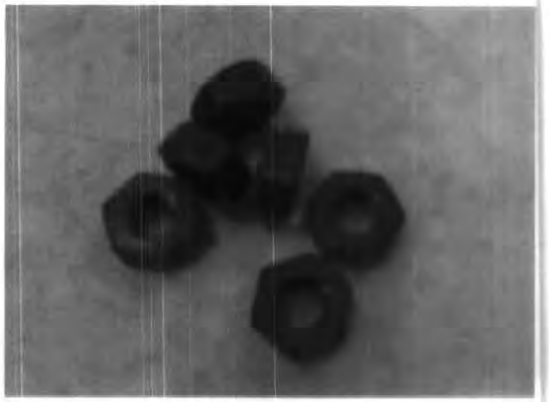


(จ)



(ฉ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช)

(ซ)

รูปที่ ผ.ข.3 ส่วนประกอบ r-shunt

(ก) หัวต่อ BNC

(ข) หัวต่อ UHF-male

(ค) หัวต่อ UHF-female

(ง) สายโคแอกเชียล RG-8

(จ) กล่องชีลด์ของความต้านทานแมชชิ่งทำมาจากอะลูมิเนียม

(ฉ) ความต้านทานแมชชิ่ง

(ช) น็อตล็อคแกนของชั้นท์

(ซ) น็อตใช้สำหรับประกอบฐานของชั้นท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

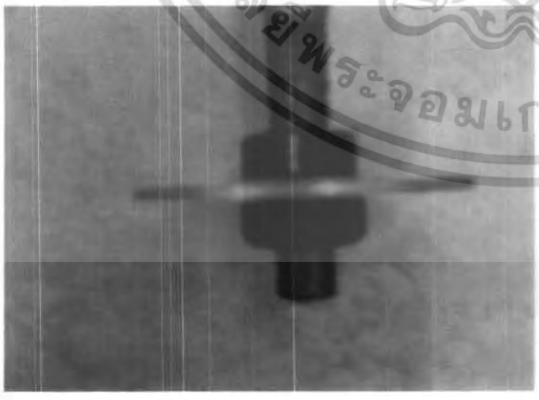
1.2 ขั้นตอนการประกอบสร้าง R-shunt

(ก)

(ข)

(ค)

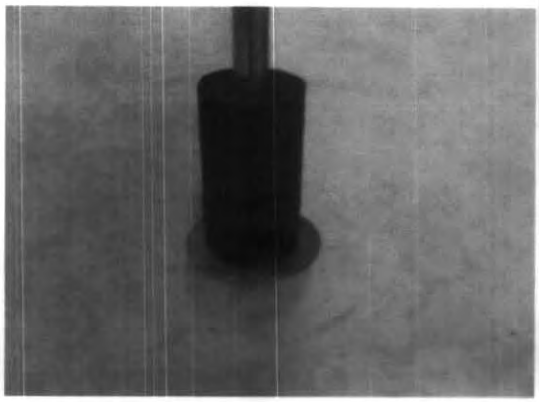
(ง)



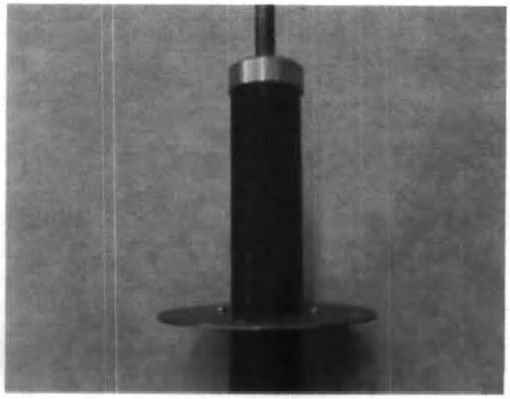
(จ)

(ฉ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช)

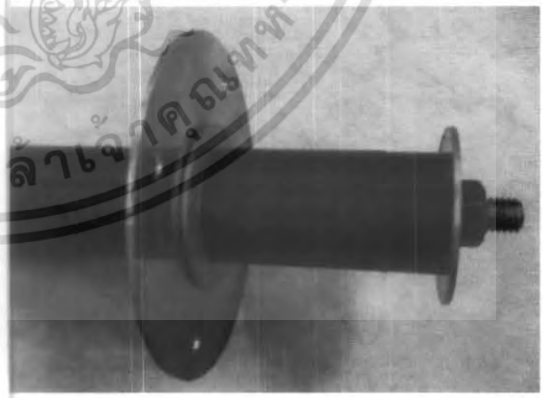


(ซ)

(ฌ)

(ญ)

(ฎ)



(ฏ)

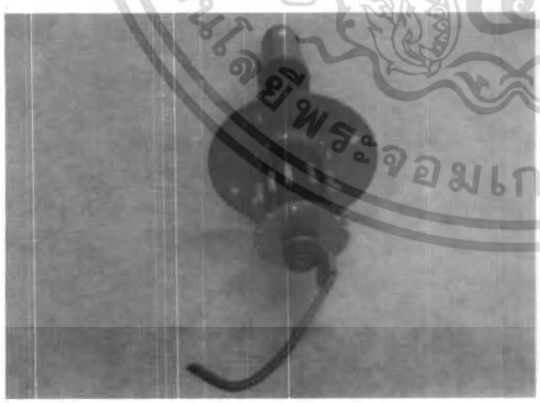
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ฐ)

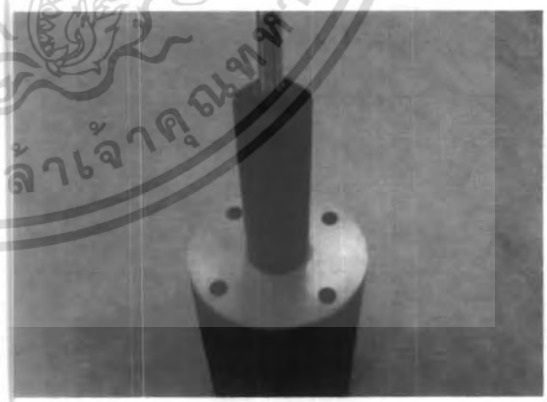
(ฑ)

(ฒ)

(ณ)



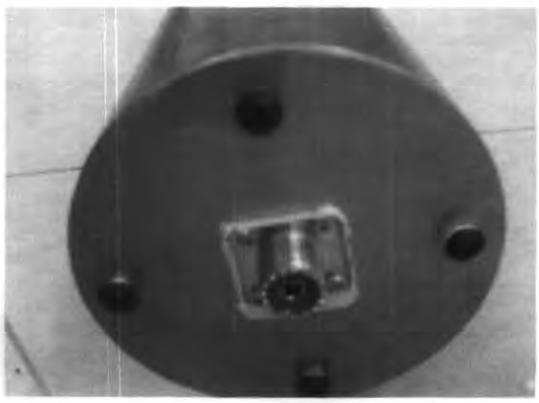
(ด)



(ต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ถ)



(ท)

(ธ)

(น)

รูปที่ ผ.ข.4 ขั้นตอนการประกอบ r-shunt

(ก) ขั้นตอนการกลึงแท่งตัวนำ

(ข) สว่านเจาะ

(ค) ขั้นตอนการเจาะแผ่นตัวนำ

(ง),(จ) นำแผ่นตัวนำล่างไปประกอบกับแท่งตัวนำแล้วล็อคด้วยน๊อตทั้งบนและล่าง

(ฉ),(ช) นำฉนวน(Bakelite)มาประกอบกับแท่งตัวนำ

(ซ) นำแผ่นตัวนำบนซึ่งประกอบกับฝาปิดซีลด์มาประกอบ

(ฌ),(ญ) ประกอบหัวต่อของแกนของชั้นท์

(ฎ),(ฏ) แกนของชั้นท์ที่ทำการประกอบเรียบร้อยแล้วแต่ยังไม่ต่อความต้านทาน

(ฐ) อุปกรณ์สำหรับบัดกรี

(ฑ) ทำการบัดกรีตัวต้านทานและอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินกับแกนของชั้นท์

(ฒ),(ณ) แกนของชั้นท์ที่ทำการต่อความต้านทานและอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) นำหางปลาที่ต่อกับสายตัวนำต่อเข้ากับแกนของชั้นท์

(ค),(ฉ) นำแกนของชั้นท์ประกอบเข้ากับกระบอกชีลด์

(ท) ประกอบฝาปิดชีลด์ด้านล่างเข้ากับกระบอกชีลด์

(ธ) ประกอบชั้นท์ความต้านทานเข้ากับฐาน

(น) ชั้นท์ความต้านทานที่ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้