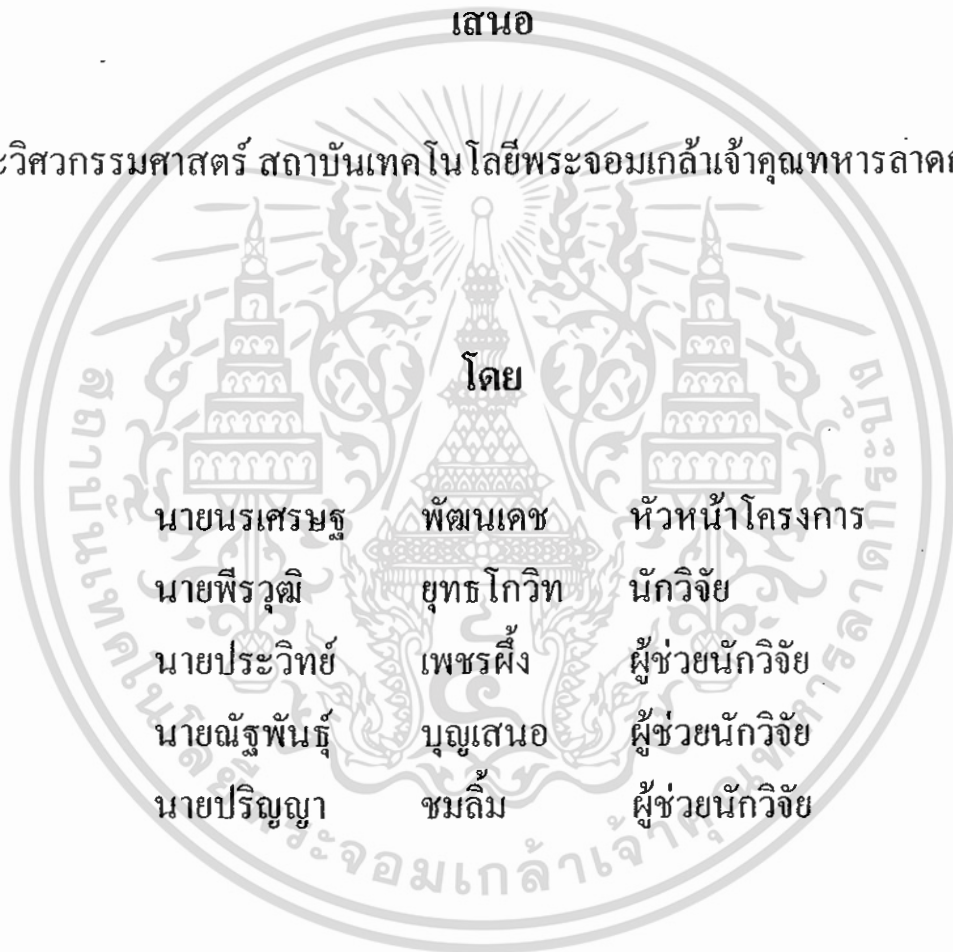


# โครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะประจำปี 2550

อุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดความต้านทานทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

เสนอ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญรูป.....	I
สารบัญตาราง.....	III
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการวัดกระแสอิมพัลส์.....	4
2.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน.....	4
2.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์.....	5
2.3 การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์.....	6
2.3.1 หลักการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์.....	7
2.3.2 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่.....	9
บทที่ 3 การวัดและการออกแบบตัวตรวจจับกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่.....	11
3.1 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่.....	11
3.1.1 หลักการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นที่.....	11
3.1.2 ชนิดของความต้านทานชั้นที่.....	12
3.1.2.1 ความต้านทานชั้นที่ แบบ Wire wound.....	12
3.1.2.2 ความต้านทานชั้นที่แบบท่อ Tubular.....	15
3.1.3 เคเบิลวัด (Measuring Cables).....	16
3.1.4 เวลาตอบสนอง (Response Time).....	18
3.2 การออกแบบตัวต้านทานชั้นที่.....	19
3.2.1 ข้อกำหนดของตัวต้านทานชั้นที่ที่ออกแบบ.....	19
3.2.2 ลักษณะมิติของตัวต้านทานที่ออกแบบ.....	19
3.3 ตัวต้านทานชั้นที่ที่ประกอบสร้างขึ้น.....	23

RCH

TK

321

ว 2240

เลขหาง.....

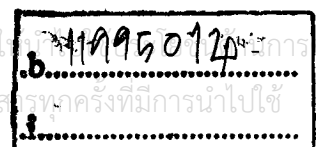
84545

เอกสารนี้เป็นเอกสาร

เลขทะเบียน.....

13 ต.ค. 2551

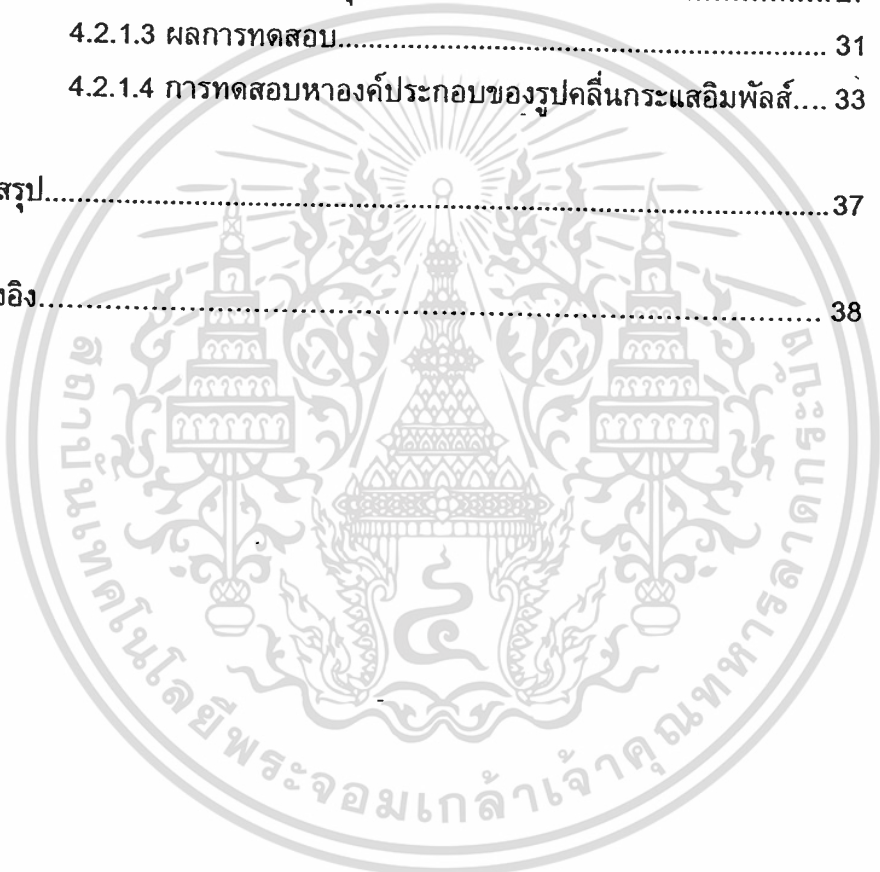
วันเดือนปี.....



รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้  
คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบระบบวัดกระแสสมพัลส์.....	24
4.1 การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของตัวต้านทานชั้นที่.....	24
4.2 การทดสอบหาคุณสมบัติของตัวต้านทานชั้นที่ใช้วัดกระแสสมพัลส์..	26
4.2.1 การทดสอบหาค่าสเกลแฟคเตอร์และคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น	26
4.2.1.1 การทดสอบหาค่าสเกลแฟคเตอร์ที่กำหนด (Assigned Scale Factor Test).....	26
4.2.1.2 การทดสอบหาคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น.....	27
4.2.1.3 ผลการทดสอบ.....	31
4.2.1.4 การทดสอบหาองค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสสมพัลส์....	33
บทที่ 5 สรุป.....	37
เอกสารอ้างอิง.....	38



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์มาตรฐาน.....	4
2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์.....	6
2.3 ขดลวดโรกอฟสกีคอยล์.....	7
2.4 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์.....	9
3.1 วงจรวัดกระแสिमพัลส์ด้วยชั้นท์ความต้านทานต่ำ.....	11
3.2 Star-type Wire wound Shunt.....	13
3.3 Squirrel cage Shuntโดยใช้ลวดความต้านทานแบบพับซ้อน.....	13
3.4 Squirrel cage Shunt.....	14
3.5 การต่อวัดความต้านทานชั้นท์แบบทรงกระบอก.....	15
3.6 ตัวต้านทานชั้นท์แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....	16
3.7 โครงสร้างตัวต้านทานชั้นท์.....	19
3.8 แท่งตัวนำ.....	20
3.9 แผ่นตัวนำมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำ 40 mm หนา 2 mm.....	20
3.10 ตัวต้านทานทรงกระบอกทำจากแผ่น nichrom.....	21
3.11 ฉนวนแข็ง.....	21
3.12 ฐานยึดตัวต้านทาน.....	22
3.13 กระบอกหุ้ม.....	22
3.14 สายสัญญาณ.....	23
3.15 ตัวต้านทานชั้นท์ที่ประกอบสร้าง.....	23
4.1 เครื่องวัดความต้านทานแบบหลักการ Kelvin bridge.....	24
4.2 การวัดค่าความต้านทาน.....	25
4.3 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์รูปคลื่นผสมที่มีความต้านทานชั้นท์ต่อวัดใน วงจร.....	27
4.4 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นท์.....	28
4.5 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์.....	28
4.6 เครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์.....	29
4.7 ออสซิลโลสโคป.....	29
4.8 ความต้านทานชั้นท์ที่ออกแบบ.....	30
4.9 สายเคเบิล.....	30
4.10 สายนำส่งแรงสูง.....	31
4.11 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 11.28 kA.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 24.11 kA.....	32
4.13 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 52.16 kA.....	32
4.14 ความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ทำการออกแบบสร้าง.....	33
4.15 โฟลชาร์ทแสดงการทำงานของโปรแกรม.....	35
4.16 ตัวอย่างการวิเคราะห์กระแสอิมพัลส์.....	36



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ข้อกำหนดการทดสอบวัดแรงดันคงเหลือเทียบกับพิกัดของกัปดักแรงดันเกิน..... 1
1.2	วิธีการดำเนินงานโครงการวิจัย..... 2
3.1	เวลาตอบสนองที่ต้องการของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์..... 18
4.1	ขนาดของความต้านทานชั้นที่..... 25
4.2	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิง...32
4.3	องค์ประกอบกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ขั้วบวกที่วัดด้วยระบบวัดอ้างอิงและระบบวัดที่ออกแบบสร้างขึ้น.....34



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แรงดันเกินที่เกิดจากรากฏการณ์ฟ้าผ่า (Lightning) และแรงดันเกินที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร (Switching) แรงดันทั้ง 2 แบบนี้จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น [1] ถ้าแรงดันเกินเกิดในระบบขึ้น ย่อมจะส่งผลกระทบต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

ในการป้องกันแรงดันเกินเนื่องจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า (Lightning) และแรงดันเกินที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร (Switching) สามารถป้องกันได้โดยติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน (Surge Arrester) ที่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หรือติดตั้งที่อุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า มาตรฐาน IEC 60099-4 [2] ได้กำหนดการทดสอบรายการหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าแรงดันคงเหลือ (Residual voltage) ของกัปกักแรงดันเกินของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน 3 รูปคลื่น คือ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse current) 8/20  $\mu$ s รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นชั้น 1/20  $\mu$ s และรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สวิดซิง 30/80  $\mu$ s ซึ่งข้อกำหนดการทดสอบการวัดแรงดันคงเหลือของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ใด ขึ้นอยู่กับพิกัดของกัปกักแรงดันเกินตามตารางที่ 1 [3]

ตารางที่ 1.1 ข้อกำหนดการทดสอบวัดแรงดันคงเหลือเทียบกับพิกัดของกัปกักแรงดันเกิน

	Standard nominal discharge current				
	20 kA	10 kA	5 kA	2.5 kA	1.5 kA
1. Rated voltage (kV <sub>rms</sub> )	$360 < U_r \leq 756$	$3 \leq U_r \leq 360$	$U_r \leq 132$	$U_r \leq 36$	Under consideration
2. Residual voltage test					
a) Steep current impulse residual voltage test	✓	✓	✓	✓	✓
b) Lightning impulse residual voltage test	✓	✓	✓	✓	✓
c) Switching impulse residual voltage test	✓	✓	×	×	×

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อทำการออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดความต้านทานทรงกระบอกซ้อน  
แกนร่วมเพื่อใช้วัดกระแสอิมพัลส์ในการทดสอบ BIL พิกัดกระแสสูงสุด 50 kA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดความต้านทานทรงกระบอกซ้อนกัน  
รวม พิกัดกระแสสูงสุด 50 kA แบนด์วิดท์ 3 MHz ความผิดพลาด  $\pm 3\%$

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดกระแสอิมพัลส์
- 2) ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ
- 3) ทำการออกแบบสร้างระบบวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานทรงกระบอกซ้อนกัน  
รวม 1 ชุด
- 4) ทำการทดสอบ และสรุปผลการทดลอง
- 5) ทำรายงานการทดสอบฉบับสมบูรณ์และส่งมอบชิ้นงานให้กับคณะ

ตารางที่ 1.2 วิธีการดำเนินงานโครงการวิจัย

วิธีการดำเนินงาน	พ.ศ. 2550							
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ต.ค.	ก.ย.	ค.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดกระแสอิมพัลส์	←→							
2. ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ		←→						
3. ทำการออกแบบสร้างระบบวัดกระแสอิมพัลส์				←→				
4. ทำการทดสอบ และสรุปผลการทดลอง					←→			
5. ทำรายงานฉบับสมบูรณ์ การทดสอบและส่งมอบชิ้นงานให้กับคณะ							←→	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

สามารถออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดความต้านทานทรงกระบอกซ้อน  
แกนร่วม พิกัดกระแสสูงสุด 50 kA แบนด์วิดท์ 3 MHz ความผิดพลาด  $\pm 3\%$  และนำมามอบให้  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ใช้เป็นต้นแบบงานวิจัยต่อไป และสามารถนำต้นแบบดังกล่าวไป  
ออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดความต้านทานทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม เพื่อใช้ในการ  
การวัดกระแสอิมพัลส์และนำไปใช้งานในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



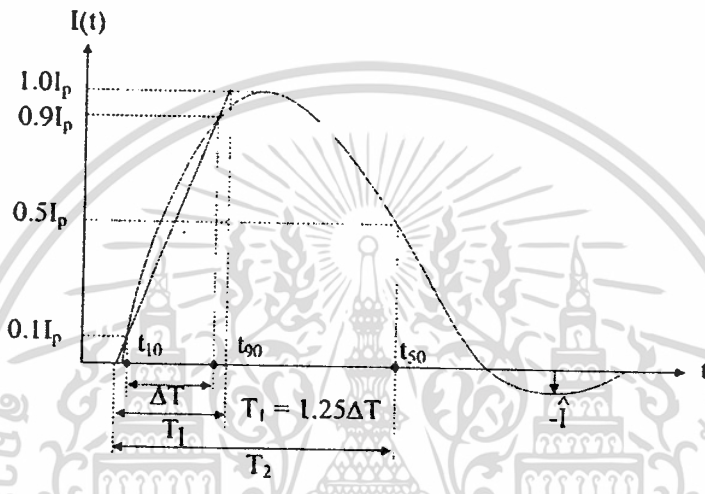
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการวัดกระแสอิมพัลส์

#### 2.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

มาตรฐาน IEC 60060-1 [4] ได้กำหนดลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

- 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,  $T_2$ ) เป็นช่วงเวลาดังแต่กระแสเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดกระแสอิมพัลส์ จนกระทั่งขนาดลดลงจนเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสอิมพัลส์
4. ขั้วของกระแส อาจจะเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดชนิดของรูปคลื่นกระแสिमพัลส์จะแทนด้วย เวลาหน้าคลื่นต่อเวลาหางคลื่น หรือ  $T_1/T_2$  เช่น รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ชนิด  $8/20 \mu s$  หมายความว่า เป็นรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $8 \mu s$  เวลาหางคลื่นเท่ากับ  $20 \mu s$  เป็นต้น

รูปคลื่นกระแสिमพัลส์แบบ Double exponential ตามมาตรฐานของ IEC 60060-1(1989)

[4] มีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด คือ

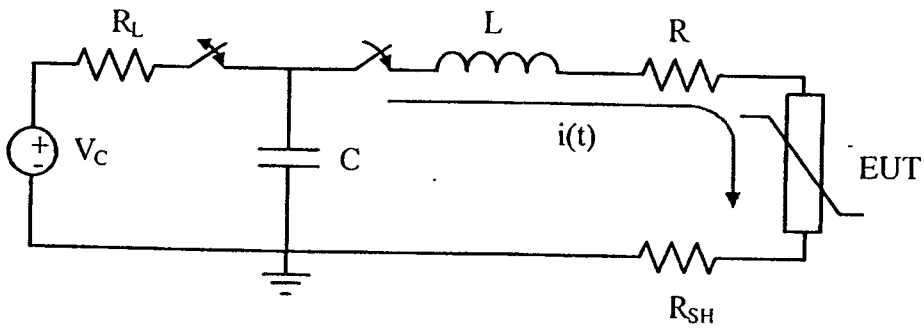
- 1)  $1/20 \mu s$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $1 \mu s$  และหางคลื่นเท่ากับ  $20 \mu s$
- 2)  $4/20 \mu s$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $4 \mu s$  และหางคลื่นเท่ากับ  $20 \mu s$
- 3)  $8/20 \mu s$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $8 \mu s$  และหางคลื่นเท่ากับ  $20 \mu s$
- 4)  $30/80 \mu s$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $30 \mu s$  และหางคลื่นเท่ากับ  $80 \mu s$

การวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์ จะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อน ทั้งนี้ต้องอยู่ในขอบเขตตามมาตรฐานของ IEC 60060-2 (1984) [5] ที่ได้กำหนดไว้ โดยมีรายละเอียดในการกำหนดค่าดังนี้

1. การวัดค่าช่วงเวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ ) ให้คำนวณจาก 1.25 เท่าของเวลาในช่วงที่รูปคลื่นกระแสिमพัลส์เพิ่มค่าจาก 10% ของค่ายอดจนถึงค่า 90% ของค่ายอดกระแสिमพัลส์
2. การวัดค่าช่วงเวลาหางคลื่น ( $T_2$ ) ให้คำนวณจากช่วงเวลาดังแต่จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ จนถึงจุดที่กระแสिमพัลส์ลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสिमพัลส์
3. จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสिमพัลส์คือ จุดตัดระหว่างแกนนอน (แกนเวลา) กับเส้นตรงที่ลากผ่านระหว่างจุด 10% ของค่ายอดกระแสिमพัลส์ และจุด 90% ของค่ายอดกระแสिमพัลส์หน้าคลื่น

## 2.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์ [6]

การสร้างกระแสिमพัลส์ทำได้โดยอาศัยหลักการของวงจรทรานเซียน (Transient) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ , ตัวต้านทาน , ตัวเหนี่ยวนำ , แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และในวงจรมีอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการคายประจุของตัวเก็บประจุในช่วงเวลาสั้นๆ โดยมีหลักการทำงาน คือ ตัวเก็บประจุ C, จะถูกอัดประจุหรือพลังงานไฟฟ้าเก็บไว้ แล้วทำการปล่อยให้ดิสชาร์จผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ก็จะทำให้เกิดการออสซิลเลชันแบบหน่วง เพราะในตัวเหนี่ยวนำ L นั้นจะมีความต้านทานโดยธรรมชาติและถ้าวัสดุทดสอบมีความต้านทานด้วยก็จะทำให้เกิด การหน่วงมากขึ้น ฉะนั้นวงจรของเครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์พื้นฐานจึงเขียนได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

$V_C$	คือ	แรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุ
$R_L$	คือ	ตัวต้านทานจำกัดกระแส
$C$	คือ	ตัวเก็บประจุในวงจร
$L$	คือ	ตัวเหนี่ยวนำในวงจร
$R_{SH}$	คือ	ตัวต้านทานแบบขนานสำหรับวัดค่ากระแสอิมพัลส์
$i(t)$	คือ	กระแสอิมพัลส์
EUT	คือ	วัสดุทดสอบ

การเกิดออสซิลเลชันของวงจรรูปที่ 2.2 จะเกิดการหน่วงมากขึ้นจะขึ้นอยู่กับความต้านทานรวม  $R$  ในวงจร และค่าความเหนี่ยวนำรวม  $L$  ในวงจร ค่ากระแสสูงสุดจะได้เมื่อค่า  $R$  มีค่าต่ำสุด คือ

$$R \ll 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.1)$$

### 2.3 การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ [6]

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

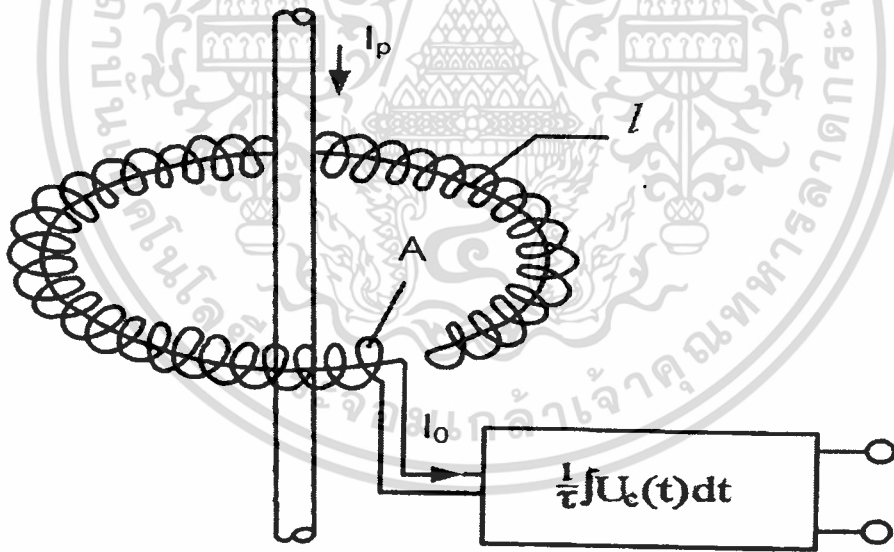
1. โรกอฟสกีคอยล์ (Rogowski coil)
2. ตัวต้านทานขนานชนิดต่ำ (Low ohmic shunts)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์ [1]

การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่เป็นวิธีการวัดแบบต่อผ่านตัวนำ (galvanic) จะมีขนาดใหญ่ตามขนาดกระแสใช้งาน มีความไม่สะดวกในการใช้งานหลายประการ และเป็นโพลดของวงจรวัดในทางปฏิบัติจึงไม่นิยมใช้ชั้นวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าสูง ๆ แต่จะใช้วัดด้วยอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าสูง และมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเร็ว โดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแสแบบพิเศษ เรียกว่า โรกอฟสกีคอยล์ (Rogowski coil)

การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์ เป็นการวัดกระแสโดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแส (CT) แบบพิเศษ กล่าวคือ โรกอฟสกีคอยล์เป็นอุปกรณ์วัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้เกิดการสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กนี้ไปคล้องขดลวดที่พันรอบแกนที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ที่วางอยู่รอบตัวนำที่มีกระแสที่ต้องการวัดไหลผ่านอยู่ จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายขดลวด คือ  $U_c(t)$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของกระแส  $di_p/dt$  ค่าแรงดันที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนกับรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวนำนั้น ถ้านำแรงดันเหนี่ยวนำนี้ผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสม ก็จะได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดอย่างถูกต้อง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขดลวด โรกอฟสกีคอยล์

การวัดกระแสอิมพัลส์ที่อาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก จะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อพื้นที่ภาคตัดขวาง และความถี่ของจำนวนรอบสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาวแกน อีกประการหนึ่ง สนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดต้องมาจากแหล่งกำเนิดที่เกิดจากระแสที่ต้องการวัดเพียงอย่างเดียว ไม่มีผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ฉะนั้น เพื่อให้การวัดมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถูกต้อง จึงต้องมีการพันโรกอฟสกีมีลักษณะพิเศษ คือ ต้องมีการพันย้อนกลับเข้าไปภายในขดลวดอีกหนึ่งรอบดังรูปที่ 2.3 ทั้งนี้ เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน

ในรูปที่ 2.3 ขดลวดโรกอฟสกีคล้องตัวนำที่มีกระแสไหล  $I_p$  โดยอาศัยกฎของแอมแปร์จะให้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวด ซึ่งอยู่ห่างจากตัวนำแนวรัศมีเท่ากับ  $x$  คือ

$$H_x = \frac{I_p}{2\pi x} \quad (2.2)$$

ขดลวดวางอยู่ในอากาศ จะให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ณ จุดนั้น คือ

$$B = \mu_0 H_x = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi x} \quad (2.3)$$

ถ้าขดลวดมีพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ  $A$  จึงหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่วิ่งผ่านคล็องขดลวด ซึ่งมีจำนวนรอบทั้งหมด  $N$  รอบ และมีความยาวเท่ากับ  $l = 2\pi x$  ได้คือ

$$\phi = \frac{\mu_0 A I_p}{l} \quad (2.4)$$

และโดยอาศัยกฎเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ จะหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดจำนวน  $N$  รอบได้

$$U_c(t) = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{N\mu_0 A}{l} \frac{di_p}{dt}$$

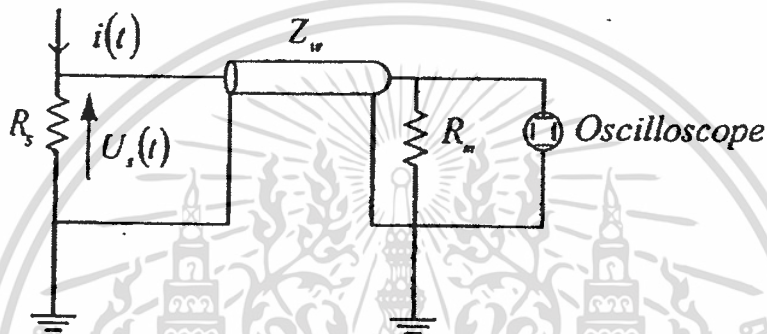
$$U_c(t) = M \frac{di_p}{dt} \quad (2.5)$$

โดยที่  $M = \frac{N\mu_0 A}{l}$  คือความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดโรกอฟสกีกับตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน  $I_p$

ดังนั้น การวัดกระแสอิมพัลส์ของโรกอฟสกีคอยล์ จึงต้องทำการอินทิเกรตค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด

### 2.3.2 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่

ตัวต้านทานชั้นที่ในที่นี้หมายถึง ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำๆ และทราบค่าถูกต้องแน่นอน ใช้สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ โดยให้กระแสอิมพัลส์ที่ต้องการจะวัดไหลผ่านตัวต้านทานชั้นที่ จากนั้นวัดแรงดันที่ตกคร่อม (Voltage drop) ตัวต้านทานชั้นที่ด้วยออสซิลโลสโคป โดยสัญญาณของแรงดันที่วัดได้จะถูกส่งผ่านสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial cable) ที่มีความต้านทานสมมูลกัน ( $R_m$ ) ต่อที่ปลายสายเคเบิลขนานกับออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่

เมื่อ	$R_s$	คือ	ตัวต้านทานชั้นที่
	$Z_w$	คือ	ค่าเสถียรจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล
	$R_m$	คือ	ตัวต้านทานสมมูล

จากรูปวงจรที่ 2.4 ถ้าหากตัวต้านทานชั้นที่มีคุณสมบัติเป็นความต้านทานล้วน และไม่คิดถึงค่าของเสถียรจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล ( $Z_w$ ) เพราะ  $R_s \ll Z_w$  จึงสามารถอาศัยกฎของโอห์มในการหาค่ากระแสได้คือ

$$i(t) = \frac{U_s(t)}{R_s} \quad (2.6)$$

ตัวอย่างเช่นเมื่อมีกระแสอิมพัลส์ไหลผ่านตัวต้านทานชั้นที่ที่มีความต้านทาน  $1 \text{ m}\Omega$

สามารถวัดแรงดัน

$$U_s(t) = 100V$$

$\therefore$  สามารถที่จะคำนวณกระแสอิมพัลส์ได้มีค่า  $i(t) = \frac{U_s(t)}{R_s} = 100kA$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดกระแสฮัมพัลส์ซึ่งเป็นกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงของ สัญญาณรูปคลื่นกระแส อย่างรวดเร็ว (มีความถี่สูง,  $\omega$ ) ดังนั้นผลของ Stray Capacitance ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแบบแกน ร่วมในวงจรวัดนั้นจะมีค่าของ Capacitance Reactance เท่ากับ  $\frac{1}{\omega C}$  แต่จะมีค่าน้อยมากซึ่งจะไม่ มีผลต่อระบบวัดมากนัก แต่ผลของสนามแม่เหล็กตกค้าง (Stray magnetic) ซึ่งจะมีค่า Reactance เท่ากับ  $\omega L$  จะส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นกระแสฮัมพัลส์ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป

ในทางปฏิบัติเมื่อกระแสไหลผ่านตัวต้านทานชั้นที่ จะเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังนั้นแรงดันตกคร่อมจริงจะเป็นไปตามสมการ

$$V(t) = R_i i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.7)$$

เพราะฉะนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ ตัวต้านทานชั้นที่ คือทำให้  $L$  มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจาก เป็นส่วนที่เราไม่ต้องการวัด ซึ่งถ้าไม่คำนึงถึงค่า  $L$  ส่วนของ  $L \frac{di(t)}{dt}$  ก็จะเป็น ค่าความผิดพลาดของการวัดที่ประกอบขึ้นเป็นค่า  $V(t)$

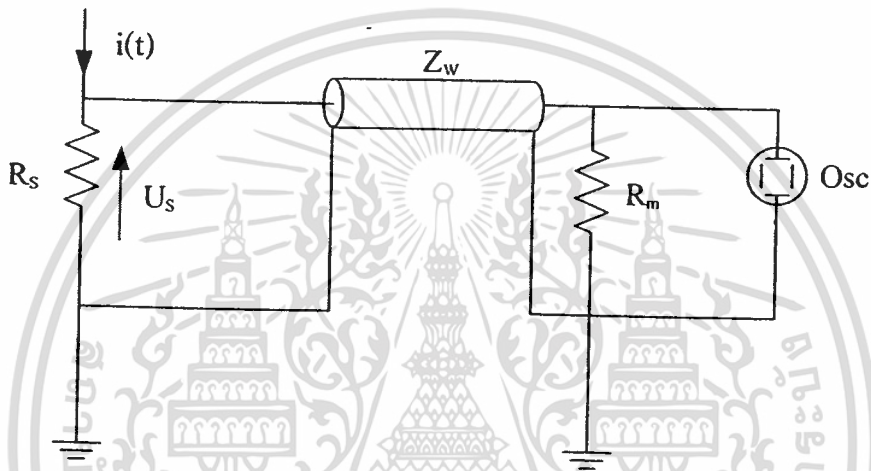
### บทที่ 3

## การวัดและการออกแบบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยตัวต้านทานชั้นที่

### 3.1 การวัดกระแสแม่เหล็กด้วยตัวต้านทานชั้นที่

#### 3.1.1 หลักการวัดกระแสแม่เหล็กด้วยตัวต้านทานชั้นที่

คือวัดแรงดันตกคร่อม ความต้านทานที่เราทราบค่าแน่นอนด้วย Oscilloscope ผ่านสายตัวนำเคเบิลดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรวัดกระแสแม่เหล็กด้วยชั้นที่ความต้านทานต่ำ

ในทางปฏิบัติเมื่อกระแสไหลผ่านตัวต้านทานชั้นที่ จะเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังนั้นแรงดันตกคร่อมจริงจะเป็นไปตามสมการ

$$V(t) = R_s i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $R_s$  คือ ตัวต้านทานชั้นที่สำหรับวัดกระแสแม่เหล็ก

$i(t)$  คือ กระแสแม่เหล็กที่ต้องการวัด

$L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดวงรอบกระแส

เพราะฉะนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบตัวต้านทานชั้นที่ คือทำให้  $L$  มีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากเป็นส่วนที่เราไม่ต้องการวัด ซึ่งถ้าไม่คำนึงถึงค่า  $L$  ส่วนของ  $L \frac{di(t)}{dt}$  ก็จะเป็นค่าความผิดพลาดของการวัดที่ประกอบขึ้นเป็นค่า  $V(t)$

### 3.1.2 ชนิดของตัวต้านทานชั้นที่ [6]

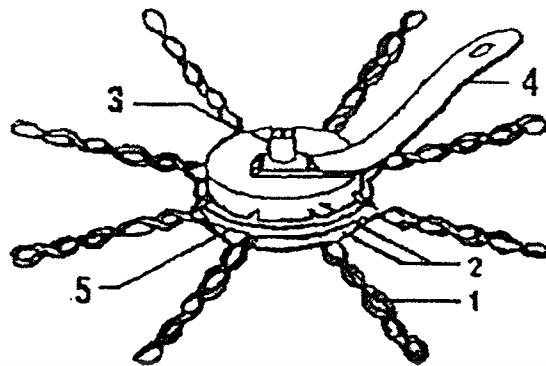
ตัวต้านทานชั้นที่กำหนดได้โดยระดับผลตอบแทนของเวลาและ การกระจายความร้อนของตัวต้านทาน ผลตอบแทนชั่วขณะสามารถตรวจสอบได้ในการทดสอบกับวงจรที่ผลิตสัญญาณ Square current pulse และ Oscilloscope ที่ใช้วัดจะต้องมีความเร็วพอที่จะจับสัญญาณได้ ค่าความร้อนของตัวต้านทานที่เกิดขึ้นสามารถปรับได้จากการปรับเปลี่ยนของวัสดุที่ใช้ทำตัวต้านทานเป็นอัตราส่วนของความต้านทานความร้อน และพิกัดของ Impulse current จากเป้าหมายของการออกแบบสามารถแบ่งแนวความคิดในการสร้างตัวต้านทานชั้นที่ ออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

#### 3.1.2.1 ตัวต้านทานชั้นที่ แบบ Wire wound หรือ Squirrel cage [6]

การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ในการบันทึกกระแสของหม้อแปลงเตสลา หรืออุปกรณ์ที่ต้องการวัด ตัวต้านทานชั้นที่เลือกใช้ต้องสามารถเข้ากับเครื่องบันทึกที่มีความไวสูง ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแรงสูงจะเป็นตัวทำให้เกิดสัญญาณรบกวนได้ในวงจรการวัดสัญญาณอิมพัลส์ ทำให้การวัดรูปคลื่นสัญญาณต่างๆ อาจคลาดเคลื่อนได้ถ้าอยู่ใกล้เครื่องกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งการรบกวนสามารถทำให้ลดลงได้โดยการ shielding ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการวัดทางด้าน ไฟฟ้าแรงสูง

การพันลวดตัวต้านทานชั้นที่แบบ wire wound นั้นเป็นการนำเอาหลักการในการไหลของกระแสบนตัวนำ ซึ่งทำให้เกิดมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นรอบๆ ของตัวนำนั้น โดยแนวความคิดนั้นคือจะทำอย่างไรให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นหายไป หรือทำให้เกิดการหักล้างกันไป ซึ่งวิธีการคือการทำให้กระแสที่ไหลนั้นเกิดการไหลวนกลับหรือทำให้ไหลสวนทางกัน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งวิธีการพันออกได้เป็น 3 ลักษณะด้วยกันคือ

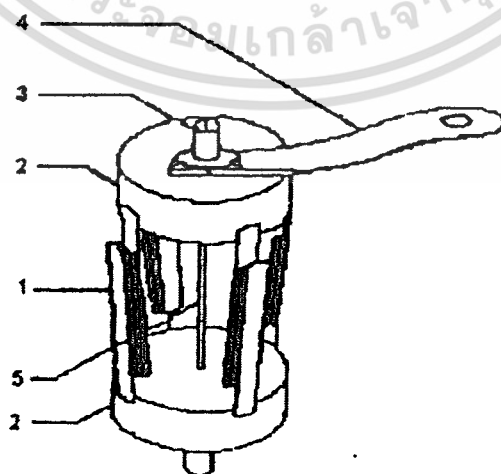
1) ชนิดของตัวต้านทานชั้นที่ที่พัฒนามาจากแบบ star เป็นการสร้างตัวต้านชั้นที่โดยการบิดหมุนลวดความต้านทานที่มีการหุ้มด้วยฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทำให้ทิศทางของกระแสที่ไหลเกิดการไหลวนกลับซึ่งจะทำให้เกิดการหักล้างกันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้



รูปที่ 3.2 Star-type Wire wound Shunt

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

2) วิธีการออกแบบ Star-type Shunt อีกแบบหนึ่ง ซึ่งก็จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดการหักล้าง โดยการทำให้ทิศทางการไหลของกระแสไหลสวนทางกันด้วยการนำแผ่นความต้านทานมาพับ โดยการพับนั้นจะเป็นลักษณะพับทบกันไปมาซึ่งในการพับทบกันในแต่ละครั้งนั้นก็จะมีฉนวนกันไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นการพับตัวต้านทานและจะแสดงการวางโครงสร้างของแผ่นตัวต้านทานด้วย



รูปที่ 3.3 Squirrel cage Shunt โดยใช้ลวดความต้านทานแบบพับซ้อน

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

3) การออกแบบตัวต้านทานชั้นที่อีกวิธีหนึ่ง จะเป็นการพัน โดยยึดหลักการเดิมเหมือนที่ผ่านมาแต่จะแตกต่างที่วิธีการพัน คือจะเป็นลักษณะของการนำเอาเส้นลวดความต้านทานมาพันบนท่อฉนวนดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยการพันนั้นพันในทิศทางที่ทำให้กระแสไหลสวนทางกันเช่นกัน ซึ่งในการพันกันในแต่ละครั้งนั้นก็จะมีฉนวนกันระหว่างเส้นลวดด้วยเช่นกัน



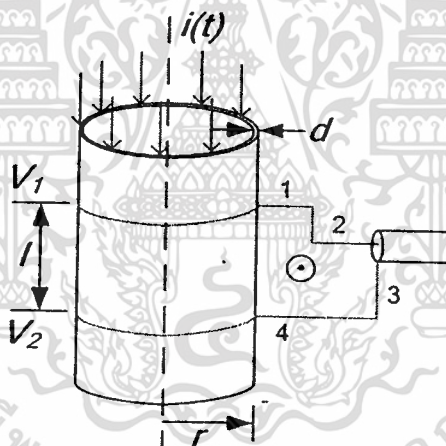
รูปที่ 3.4 Squirrel cage Shunt ที่สร้างจากลวดความเหนียวนำค่าพันกระจายให้การพันสม่ำเสมอบนฉนวนทรงกระบอก

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

แต่วิธีนี้จะมีความยุ่งอย่างมากและมีข้อเสียเนื่องจากการพันจะก่อให้เกิด เป็นลักษณะของวงรอบ (Loop) ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเหนียวนำได้ง่ายโดยจะทำให้ค่าความต้านทานชั้นนั้นมีค่าที่ผิดพลาดไปจากเดิมได้

### 3.1.2.2 ตัวต้านทานชั้นที่แบบท่อ Tubular [6]

ในการสร้างตัวต้านทานชั้นที่ใช้สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์นั้น จะต้องเป็นตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำ เพราะจะทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานต่ำไปด้วยเมื่อนำวัดค่าของกระแสอิมพัลส์ จึงได้มีการสร้างตัวต้านทานชั้นที่ขึ้นมาหลายชนิดด้วยกันดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นการสร้างตัวต้านทานชั้นที่แบบชนิด Wire wound ซึ่งตัวต้านทานชั้นประเภทนี้จะมีผลของค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะเป็นข้อเสียของตัวต้านทานชั้นประเภทนี้เนื่องจากในการออกแบบสร้างนั้นจะมีความเป็นไปได้ยากมากที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้ โดยเฉพาะเมื่อนำมาวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าสูงมากๆ ด้วยแล้วก็จะทำให้ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้มีมากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นจึงได้มีการสร้างตัวต้านทานชั้นที่สามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ด้วยการสร้างตัวต้านทาน ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกซ้อนกันแน่นขึ้น แทนที่จะเป็นการพันพันหรือม้วนอย่างเดิม แต่ปัญหาของการสร้างตัวต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอก จะมีปัญหาตรงที่ว่า จะต่อวัดแรงดันตกคร่อมที่ตัวความต้านทานนั้นอย่างไร เพราะการต่อจะเกิดเป็นบ่วงหรือวงรอบขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่บริเวณนั้น



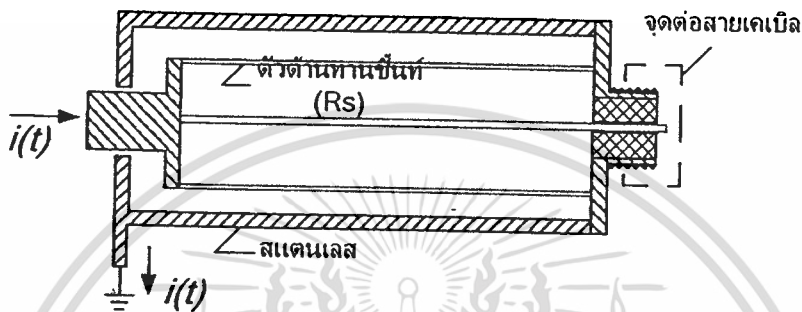
รูปที่ 3.5 การต่อวัดตัวต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอก

แรงดันคร่อมตัวต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกที่ปรากฏที่ขั้ว 2 และ 3 จะเท่ากับผลบวกของความต่างศักย์ กับค่าแรงดันเหนี่ยวนำเป็นไปตามสมการที่ (3.2) เมื่อ  $r_1$  คือ รัศมีภายในของทรงกระบอก  $r_2$  คือ รัศมีภายนอกของทรงกระบอก ความต้านทาน  $R_s$  เป็นความต้านทานจุดต่อที่วัดแรงดันที่ทำให้เกิดเป็นบ่วงขึ้น และ  $\mu_0$  คือ เปรอริมิบิลิตีมีค่า  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

$$\begin{aligned}
 U_s(t) &= (V_1 - V_2) \pm \frac{d\phi_{1-4}(t)}{dt} \\
 &= i(t)R_s + \left[ \frac{\mu_0}{2\pi} l \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \frac{di(t)}{dt} \right] \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการต่อวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกจะต้องไม่เป็นวงรอบหรือต่อในบริเวณที่ปลอดภัยแม่เหล็ก เพราะในกระบอกเหล็กที่เป็นกระบอกชั้นเดียว จะมีปัญหาเรื่องการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก จึงควรใช้กระบอก 2 ชั้น ดังในรูปที่ 3.6 เป็นตัวต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น ตัวความต้านทานชั้นที่จะได้รับการชิลด์จากสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งมีลักษณะสมมาตรต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำที่กระบอกความต้านทานลดน้อยลง และในการต่อวัดก็ไม่มีค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากวงรอบด้วย



รูปที่ 3.6 ตัวต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น

ดังนั้นในการสร้างตัวต้านทานชั้นที่แบบท่อ Tubular จะมีลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น จึงจำเป็นที่จะต้องหาระยะห่างระหว่างตัวความต้านทานชั้นที่กับตัวชิลด์รวมไปถึงแกนกลางของตัวต้านทานชั้นที่ด้วย ว่าควรใช้ระยะห่างเท่าใดถึงจะไม่เกิดการเบรคควาน์ของตัวต้านทานชั้นที่ในขณะวัด ซึ่งจะทำให้ตัวต้านทานชั้นที่เกิดความเสียหายได้ โดยในการคำนวณนั้นจะใช้สมการเหมือนกันกับการหาสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ของอิเล็กโตรระนาบ-ระนาบ

### 3.1.3 เคเบิลวัด (Measuring Cables)

การวัดหรือบันทึกภาพแรงดันด้วยออสซิลโลสโคปที่มีค่าแรงดันป้อนเข้าที่กำหนดสูง เวลาใช้งานจริงๆ ไม่สามารถที่จะนำไปต่อเข้าโดยตรงกับตัวต้านทานชั้นที่ต่ำได้ เพราะจะไม่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและเพื่อลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้น้อยลงจำเป็นต้องใช้ออสซิลโลสโคปให้อยู่ห่างจากตัวต้านทานชั้นที่พอสมควร ฉะนั้น การส่งสัญญาณแรงดันจากตัวต้านทานชั้นที่ต่ำไปยังออสซิลโลสโคป ซึ่งต้องใช้สายเคเบิลวัด โดยทั่วไปจะใช้เป็นแบบแกนร่วม (Coaxial Cable) เคเบิลแกนร่วมที่ใช้ต้องมีการชิลด์อย่างน้อยสองชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในชิลด์ อันเป็นส่วนหนึ่งของวงจรวัดแรงดันอันเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นรบกวนไปบนสัญญาณที่วัดได้

ในกรณีวัดสัญญาณแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และไม่มียิ่งประกอบของความถี่สูง เคเบิลและสายวัดอาจคิดค่า C หรือ L ขึ้นอยู่กับลักษณะของโหลดที่ปลายสายวัด แต่ในที่นี้เราต้องการวัดสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เคเบิลวัดจึงต้องพิจารณาเป็นวงจรที่มีพารามิเตอร์กระจาย คือ คิดเป็นแบบสัญญาณคลื่นจร (Traveling Wave) เมื่อคลื่นจรเข้ามาที่ต้นสาย เคเบิลจะมองเป็นเคเบิลเป็นความต้านทานบริสุทธิ์เท่ากับ  $Z_w$  (Surge impedance) ไม่ขึ้นอยู่กับโหลดที่ปลายสายเคเบิลว่าเปิดหรือลัดวงจร หรือมีโหลดอื่นใด โหลดที่ปลายทางจะไม่มีผลกระทบต่อสัญญาณต้นทาง จนกว่าจะถึงเวลา 2 เท่าของเวลาคลื่นเดินทาง (Transit Time) สายเคเบิลจะต้องเป็นแบบสายส่งทันที เมื่อ มีค่าใกล้เคียงกับเวลาขึ้นของคลื่น

เวลาช่วงเดินทาง  $\tau$  ของสัญญาณอาจหาได้จากความเร็วแผ่กระจาย (Propagation) ของคลื่น คือ [1]

$$\tau = \frac{l}{v} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $l$  คือ ความยาวของสายเคเบิล และความเร็วที่แผ่กระจายคลื่นหาได้จากความสัมพันธ์

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/sec)  
 $\epsilon_r$  และ  $\mu_r$  คือ เปรอริมิตติวิตีและเปอร์มิบิลิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลปกติสายเคเบิลจะมีค่า  $\mu_r = 1$  ฉะนั้น

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.5)$$

สายเคเบิลมาตรฐานที่ใช้กันอยู่มีฉนวนเป็น Polyethylene (PE) หรือ Teflon ซึ่งมีค่า  $\epsilon_r$  ประมาณ 2.1 – 2.3 ฉะนั้น ความเร็วของสัญญาณจะอยู่ประมาณ 60-70 % ของความเร็วแสง ดังนั้น เคเบิลที่ยาวกว่า  $\frac{1}{4}$  ของความยาวคลื่น คือ ช่วงเวลาขาขึ้น  $T_r$  นั้น อาจต้องคิดเป็นสายส่ง นั่นคือ จะต้องคำนึงถึงผลของคลื่นสะท้อนกลับ (Reflection) ปัญหานี้อาจแก้ไขโดยใช้การแมชชิงด้วยตัวต้านทานบริสุทธิ์ที่มีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ ( $Z_w$ ) ของสายวัดสัญญาณ

ความยาวของเคเบิลยังมีผลต่อการวัดแรงดัน คือ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม การวัดแรงดันเฉพาะที่มีการตัดช่วงหน้าคลื่นจะต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ เพราะจะทำให้ค่ายอดที่วัดได้พลาดโดยทั่วไปสายเคเบิลแกนร่วมยาวไม่เกิน 10 เมตร อาจทิ้งผลกระทบแรงดันตกคร่อมได้ ถ้าต้องใช้สายเคเบิลยาวๆ จึงควรเลือกสายเคเบิลที่มีค่าความต้านทานและอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวต้านทานเมซซิ่ง ในกรณีที่วัดสัญญาณแรงดันด้วยออสซิลโลสโคป โดยส่งสัญญาณที่วัดจากตัวต้านทานชั้นที่ต่ำไปยังออสซิลโลสโคปโดยผ่านสัญญาณด้วยสายเคเบิลแกนร่วม เพื่อไม่ให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับอันจะทำให้เกิดความผิดพลาดของค่าแรงดันที่วัดได้ จึงต้องใส่ตัวต้านทานเมซซิ่งระหว่างตัวต้านทานชั้น (Shunt) กับเครื่องวัด โดยจะต่อตัวต้านทานเมซซิ่ง  $R_m = Z_w$  (ความต้านทานคลื่นจร) ไว้ปลายสายเคเบิลที่ต่อเข้ากับออสซิลโลสโคป ในลักษณะขนานกับออสซิลโลสโคป

### 3.1.4 เวลาตอบสนอง (Response Time)

เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการถ่ายทอดพลังงานซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดียิ่งขึ้น เวลาตอบสนองจึงเป็นคุณสมบัติอีกประการหนึ่งของระบบวัดที่จะบอกให้ทราบว่า ระบบวัดจะใช้วัดกระแสอิมพัลส์ได้เหมาะสมหรือไม่

การหาผลตอบสนองเพื่อหาเวลาตอบสนอง จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการหาเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานล้วน นั่นคือ

$$T = \frac{\mu_0 \sigma d^2}{6} \quad (3.6)$$

โดยที่

- $T$  คือ เวลาตอบสนองของตัวต้านทานชั้นที่
- $\mu_0$  คือ เปรอมีบิลิตีมีค่า  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  (โลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก)
- $\sigma$  คือ สภาพความนำไฟฟ้าของความต้านทานมีค่าเป็น  $1/\rho$  หน่วยเป็น  $(\Omega \cdot m)^{-1}$
- $d$  คือ ความหนาของตัวต้านทานชั้นที่

โดยตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [5] ได้กำหนดความผิดพลาดในการวัดค่ายอดกระแสอิมพัลส์ยอมให้ผิดพลาดได้ไม่เกิน  $\pm 3\%$  อัตราส่วนกระแสอิมพัลส์ของตัวต้านทานชั้นที่จะต้องถูกต้องแน่นอน ยอมให้ผิดพลาดได้ไม่เกิน  $\pm 1\%$  ซึ่งเวลาตอบสนองของระบบที่ต้องการขึ้นอยู่กับรูปคลื่นของกระแสอิมพัลส์ คือ

ตารางที่ 3.1 เวลาตอบสนองที่ต้องการของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์	เวลาตอบสนองที่ต้องการ
8/20 $\mu\text{s}$	$T \leq 1.6 \mu\text{s}$
4/10 $\mu\text{s}$	$T \leq 0.8 \mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

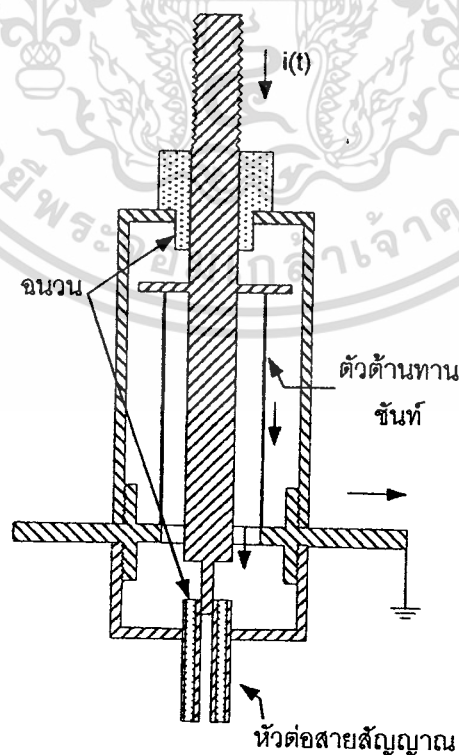
### 3.2 การออกแบบตัวต้านทานชั้น

ตัวต้านทานชั้นในที่นี้หมายถึงตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำๆ ที่ทราบค่าแน่นอน ใช้สำหรับวัดกระแสโดยให้กระแสที่ต้องการวัดนั้นไหลผ่านตัวต้านทานชั้น แล้ววัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานชั้นนั้นด้วยออสซิลโลสโคปโดยผ่านสายเคเบิลแกนร่วม ในการออกแบบความหนาของตัวต้านทานชั้นจะมีผลต่อเวลาการตอบสนองของตัวต้านทานชั้นจากสูตร  $T = \frac{\mu_0 \sigma d^2}{6}$  จะเห็นได้ว่าถ้าทำให้ตัวต้านทานชั้นที่มีความหนา  $d$  บางๆจะทำให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้นและเวลาขาขึ้น (rise time)  $T_r$  จะน้อยลง

#### 3.2.1 ข้อกำหนดของตัวต้านทานชั้นที่ออกแบบ

ทำการออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดความต้านทานทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมขนาด  $4.5 \text{ m}\Omega$  พิกัดกระแสสูงสุด  $50 \text{ kA}$  แบนด์วิดท์  $3 \text{ MHz}$  ความผิดพลาด  $\pm 3 \%$  โดยที่ตัวต้านทานที่ออกแบบเมื่อนำไปวัดค่ากระแสอิมพัลส์สูงสุดที่  $50 \text{ kA}$  จะได้แรงดัน  $225 \text{ โวลต์}$  ซึ่งจะทำให้การลดทอนขนาดของแรงดันอีกด้วยชุดลดทอนก่อนที่จะส่งสัญญาณไปยังออสซิลโลสโคป สำหรับสาเหตุที่ไม่ออกแบบให้ความต้านทานมีค่าน้อยกว่านี้เนื่องจากจะหลีกเลี่ยงผลของสัญญาณรบกวนเมื่อนำมาวัดค่ากระแสที่มีขนาดน้อยกว่าที่กำหนด เช่น ในกรณีของการวัดค่ากระแส  $1 \text{ kA}$  เป็นต้น

#### 3.2.2 ลักษณะมิติของตัวต้านทานที่ออกแบบ



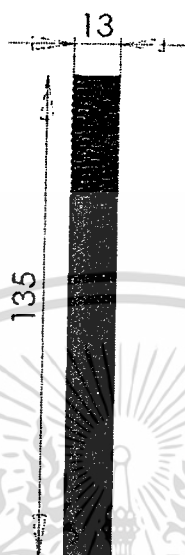
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.7 โครงสร้างตัวต้านทานชั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้

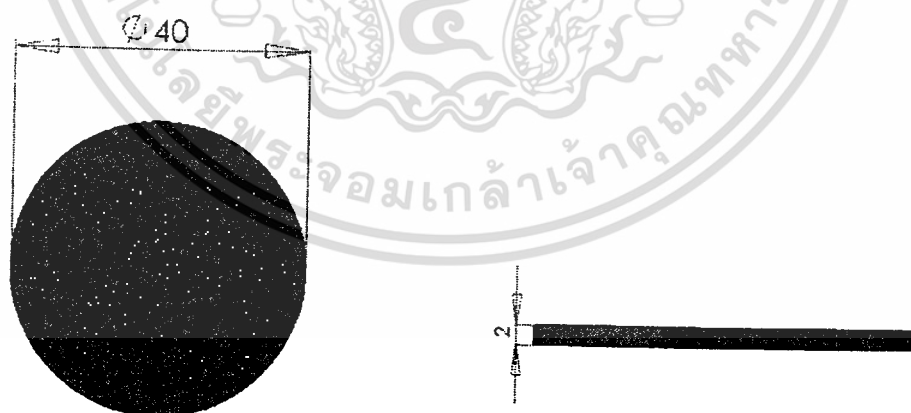
1) แกนของตัวต้านทานชั้นที่ ประกอบไปด้วย

- แท่งตัวนำ ทำจากทองเหลืองกลึงเกลียวมีความยาว 135 mm



รูปที่ 3.8 แท่งตัวนำ

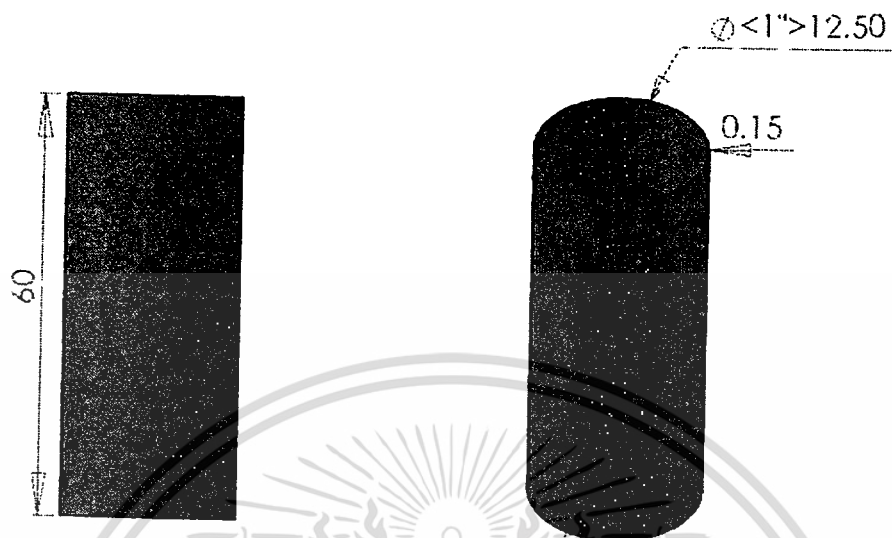
- แผ่นตัวนำ ทำจากทองเหลืองกลึงให้เป็นวงกลมมีความหนา 1.5 mm ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผ่นตัวนำมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำ 40 mm หนา 2 mm

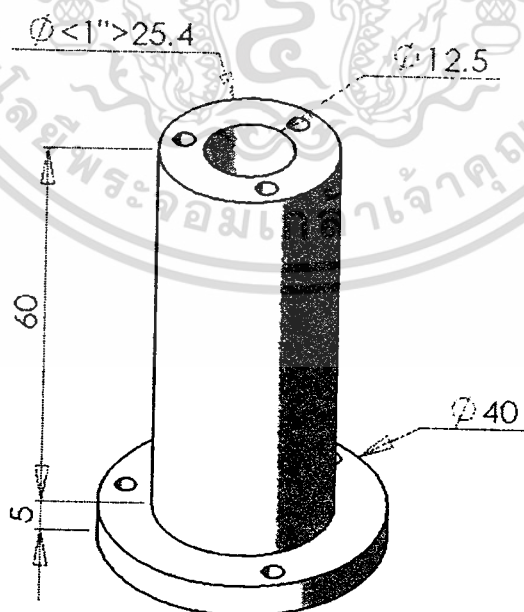
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ตัวต้านทานที่ใช้เป็นตัวต้านทานชั้นที่ จะใช้แผ่นนิโครมขนาดความหนา 0.15 mm ม้วน เป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ยาว 60 mm



รูปที่ 3.10 ตัวต้านทานทรงกระบอกทำจากแผ่น nichrom

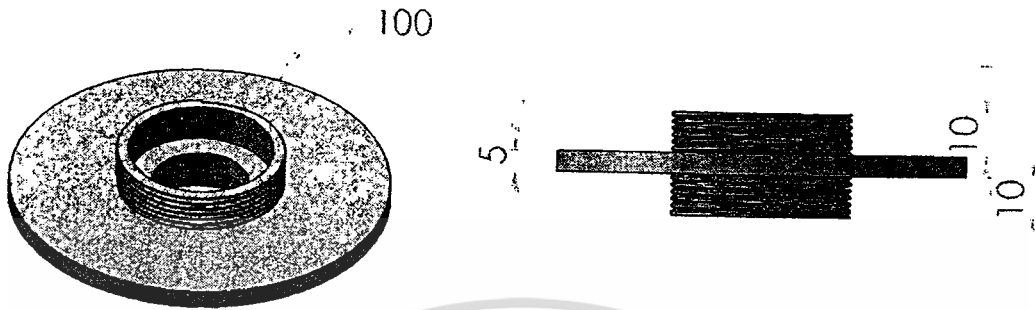
3) ฉนวน ใช้พลาสติกแข็งเป็นฉนวนที่แกนกลางเพื่อรับแรงทางกลลักษณะรูปร่างแสดงดัง  
รูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ฉนวนแข็ง

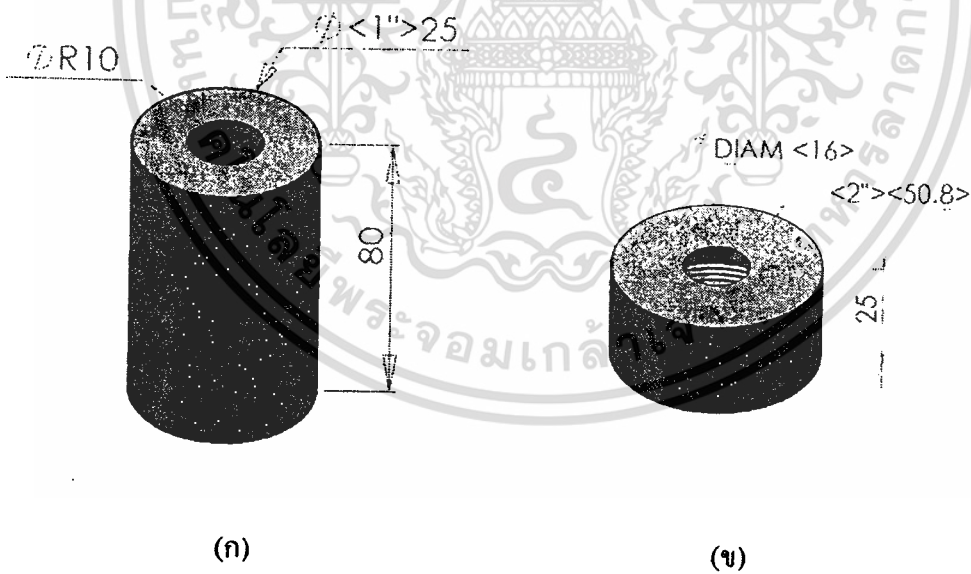
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ฐานยึดตัวด้านทาน ทำด้วยสแตนเลสถึงเกลียวทั้งสองด้านสำหรับใส่ฝาครอบตรงกลาง  
 เจาะรู 25.4 mm ให้มีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวด้านทานมีขนาดแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ฐานยึดตัวด้านทาน

5) ฝาครอบ ทำด้วยสแตนเลสเป็นทรงกระบอกปิดหนึ่งด้านและเจาะรู ประกอบด้วย  
 ด้านบนและล่างซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.13



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.13 ครอบหุ้ม

(ก) ฝาครอบส่วนบนมีความหนา 3 mm สูง 80 mm

(ข) ฝาครอบส่วนล่างมีความหนา 3 mm สูง 25 mm

### 6) สายสัญญาณ (สาย coaxial)

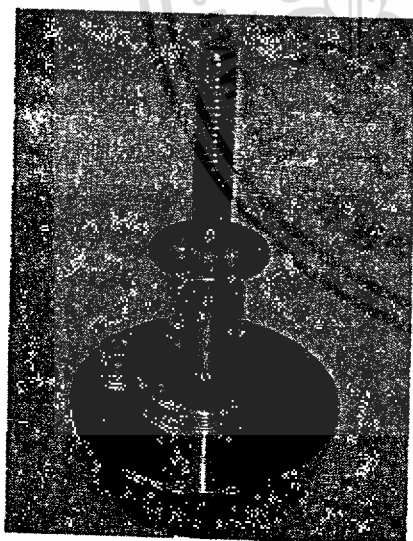
ประกอบด้วยแกนที่เป็นทองแดงที่ถูกหุ้มด้วยฉนวน ภายนอกฉนวนจะถูกหุ้มด้วยโลหะอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันสนามไฟฟ้ารบกวนจากภายนอก สายนำสัญญาณจะใช้ต่อจากอุปกรณ์วัดไปยังออสซิลโลสโคป ในการออกแบบจะใช้สาย RG-8 ซึ่งเป็นสายที่มีค่า impedance  $50\Omega$  มีเส้นผ่าศูนย์กลาง  $0.405\text{ in}$  ( $10.287\text{ mm}$ ) เป็นสายชนิด Thick Ethernet หรือสาย coaxial อย่างหนา มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ  $1\text{ cm}$ . เป็นสายสัญญาณที่มีฉนวนหุ้มหนา และมีแกนทองแดงที่ใช้ในการส่งสัญญาณหนากว่าสายอย่างบาง ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าสายอย่างบาง



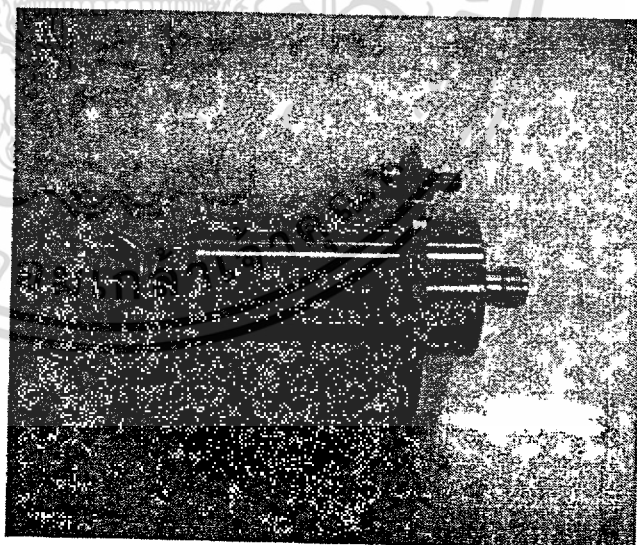
รูปที่ 3.14 สายสัญญาณ

### 3.3 ตัวต้านทานชั้นที่ประกอบสร้างขึ้น

ตัวต้านทานชั้นที่ประกอบสร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.15 โดยใช้นิโครมแบบแผ่นเป็นตัวต้านทานมีขนาด  $4.5\text{ m}\Omega$



ก)



ข)

### รูปที่ 3.15 ตัวต้านทานชั้นที่ประกอบสร้าง

ก) ภายในตัวต้านทานชั้น

ข) ตัวต้านทานชั้นที่ประกอบเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดสอบระบบวัดกระแสฮอลล์

การทดสอบระบบวัดกระแสฮอลล์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน

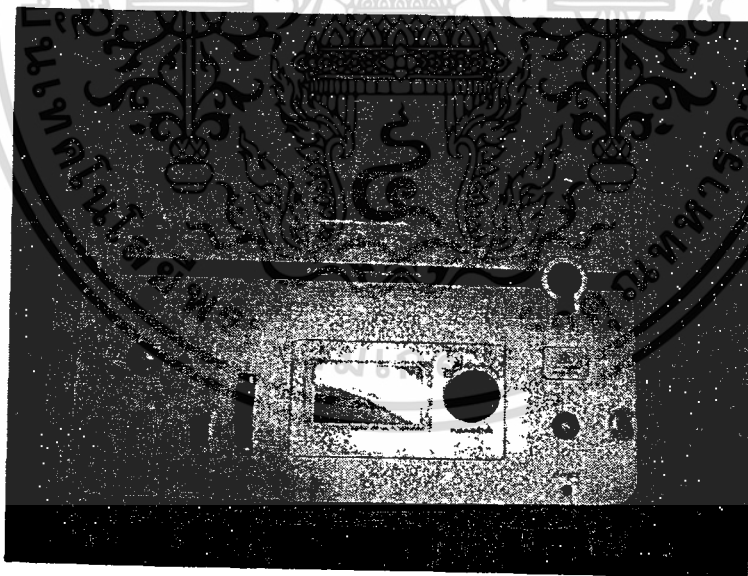
1) การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของตัวต้านทานชั้นที่ได้ออกแบบ

2) การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของตัวต้านทานชั้นที่ในการวัดค่ากระแสฮอลล์

ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น และการหาองค์ประกอบของรูปคลื่นฮอลล์

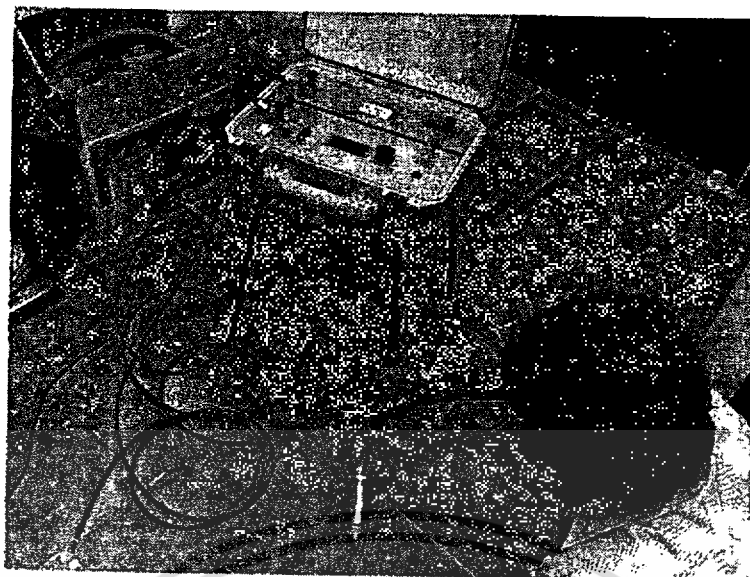
#### 4.1 การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของตัวต้านทานชั้นที่

เนื่องจากค่าความต้านทานของตัวต้านทานชั้นที่มีค่าน้อยมากจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคพิเศษหรือเครื่องมือวัดเฉพาะ เช่น วงจรบริดจ์ เพื่อใช้วัดค่าความต้านทาน หลังจากที่ได้ได้ออกแบบตัวต้านทานชั้นที่เสร็จแล้ว ได้นำตัวต้านทานชั้นที่ไปวัดหาขนาดความต้านทานด้วย Kelvin bridge ที่ห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้านครหลวง การหาขนาดความต้านทานชั้นที่ที่ได้สร้างขึ้นด้วยเครื่องวัดความต้านทานยี่ห้อ Tettex instrument, TYPE 2231 YB, SERI RL NO 148546 แสดงดังรูป 4.1 และลักษณะของการวัดค่าความต้านทานดังรูปที่ 4.2 ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องวัดความต้านทานแบบหลักการ Kelvin bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การวัดค่าความต้านทาน

ตารางที่ 4.1 ขนาดของความต้านทานชั้นที่ (วัดที่กระแส 10 kA)

ครั้งที่	ค่าความต้านทาน( $m\Omega$ )
1	4.359
2	4.378
3	4.379
4	4.390
5	4.405
6	4.385
7	4.358
8	4.370
9	4.393
10	4.383
เฉลี่ย	4.379

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบหาคุณสมบัติของตัวต้านทานชั้นที่เพื่อใช้วัดกระแสอิมพัลส์

### 4.2.1 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์และคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของการทดสอบและประเมินผล เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าตัวต้านทานชั้นที่ที่ออกแบบสร้างขึ้น มีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐานกำหนดไว้หรือไม่ ก่อนที่จะนำไปใช้ในการวัดกระแสอิมพัลส์จริง โดยมีการทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ การหาค่าสเกลแฟกเตอร์และการทดสอบวัดเปรียบเทียบ ทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น โดยใช้วัดกระแสอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [5] โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.2.1.1 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด (Assigned Scale Factor Test)

วิธีการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [5] ได้กำหนดวิธีทดสอบอ้างอิงไว้คือ ใช้วิธีการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง โดยถ้าเป็นไปได้ให้ทดสอบที่พิกัดของระบบวัดทดสอบคือ 50 kA โดยจะต้องทำการทดสอบไม่น้อยกว่า  $n$  ค่า ( $n \geq 10$ ) ซึ่งมีเงื่อนไขในการทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดจะหาได้จากค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันที่ได้อ่านได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ซึ่งกำหนดให้เป็น  $F_i$  ส่วนค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด  $F_m$  หาได้จากค่าเฉลี่ยของ  $F_i$  โดยที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $s$  คำนวณได้จาก

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

เมื่อ :  $S$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$F_i$  คือ ค่ากระแสจากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันจากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ

$F_m$  คือ ค่าเฉลี่ยของ  $F_i$

ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [5] ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้

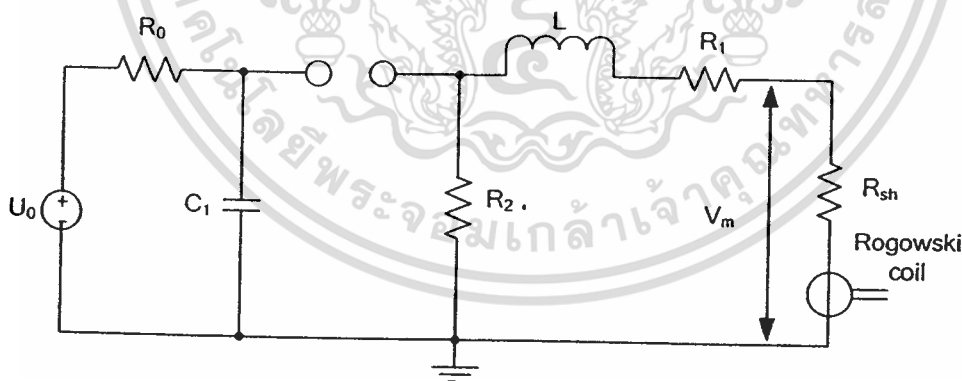
1. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จะต้องน้อยกว่า 1% ของ  $F_m$
2. ค่าพารามิเตอร์ทางเวลาจะต้องอยู่ในเงื่อนไขดังนี้
  - ค่าพารามิเตอร์ทางเวลาจะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 10\%$  ของค่าที่วัดได้จากระบบวัดอ้างอิง
  - อัตราส่วนของค่าที่วัดได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิงต้องมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 5% ของค่าเฉลี่ย

#### 4.2.1.2 การทดสอบหาคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

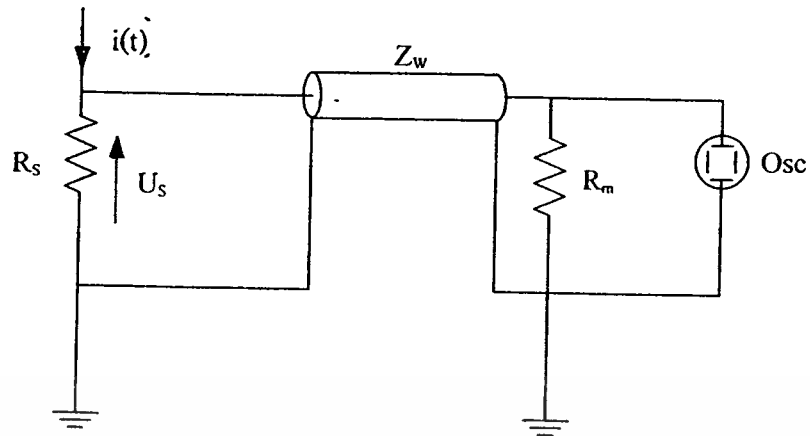
การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของตัวต้านทานชั้นที่แบบเชิงเส้นที่ออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [5] ได้ทดสอบเปรียบเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงที่เป็นอุปกรณ์วัดกระแสฮอลล์แบบโรกอฟสกีคอยล์ โดยแบ่งช่วงการทดสอบออกเป็น 3 ช่วง ตั้งแต่ 10 kA- 50 kA โดยในการวัดกระแสทดสอบแต่ละช่วงจะวัดช่วงละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของกระแสทดสอบในแต่ละช่วง ตามมาตรฐานมีข้อเสนอแนะในการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นไว้ว่า ควรทำการทดสอบให้เสร็จเร็วที่สุด เพื่อไม่ให้มีผลกระทบเนื่องจากสภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลง และไม่ต้องทำการปรับค่าที่วัดได้จากการทดสอบไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐานโดยวงจรการทดสอบใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.6

มาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [5] ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้ ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างกระแสทดสอบกับกระแสที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด มีค่าไม่เกิน 1% ของค่าเฉลี่ย ให้ถือว่าเครื่องมือวัดที่ทำการทดสอบมีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

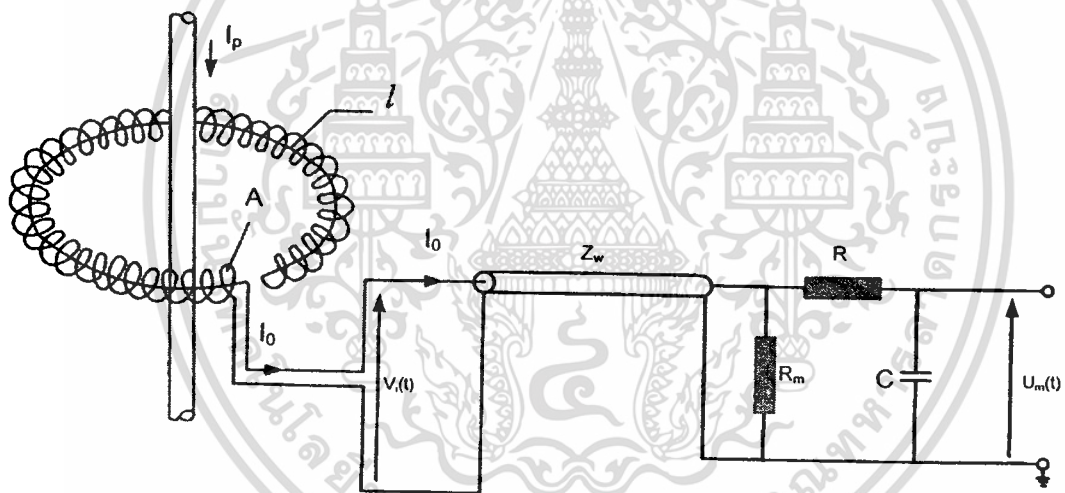
ในโครงการนี้จะทำการทดสอบตัวต้านทานชั้นที่ที่มีค่าความต้านทาน  $4.38 \text{ m}\Omega$  50 kA ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการวัดทดสอบจะใช้วิธีการวัดทดสอบเปรียบเทียบอ้างอิงกับโรกอฟสกีคอยล์มาตรฐาน ซึ่งในการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดนั้น จะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานการวัดกระแสฮอลล์ได้กำหนดไว้ โดยลักษณะวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.3 – 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสฮอลล์รูปคลื่นผสมที่มีความต้านทานชั้นที่ต่อวัดในวงจร



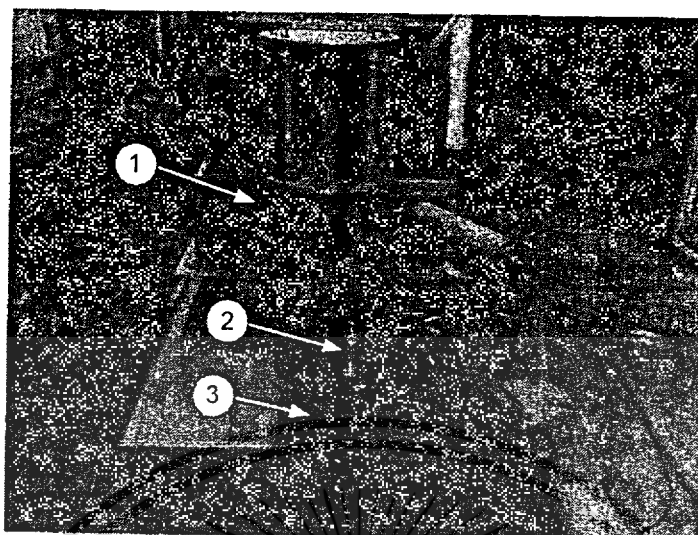
รูปที่ 4.4 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้วยตัวต้านทานชั้นที่



รูปที่ 4.5 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้วยโรกอฟสกีคอยล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ 8/20  $\mu$ s 200 kV

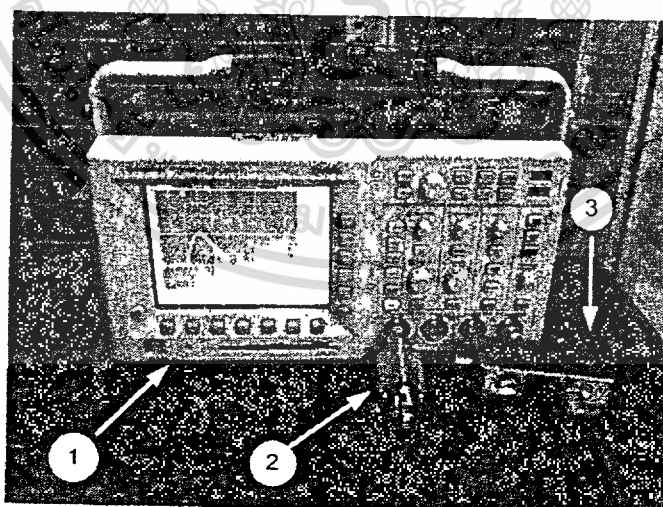


รูปที่ 4.6 เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

โดยที่

- 1) เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์
- 2) ตัวต้านทานชั้นที่ออกแบบสร้าง
- 3) ระบบวัดอ้างอิงแบบ โรกอฟสกีคอยล์

- ออสซิลโลสโคป ใช้สำหรับวัดรูปคลื่นสัญญาณอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการออสซิลโลสโคป



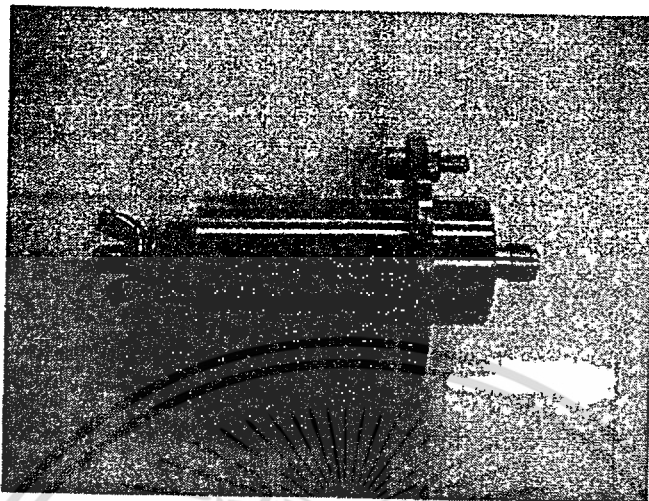
รูปที่ 4.7 ออสซิลโลสโคป

โดยที่

- 1) ออสซิลโลสโคป
- 2) ตัวลดทอน
- 3) อินทิเกรเตอร์ของระบบวัดอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวต้านทานชั้นที่ใช้ทดสอบ เป็นตัวต้านทานชั้นที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นที่พิกัดความต้านทาน  $4.38 \text{ m}\Omega$  50 kA



รูปที่ 4.8 ตัวต้านทานชั้นที่ออกแบบ

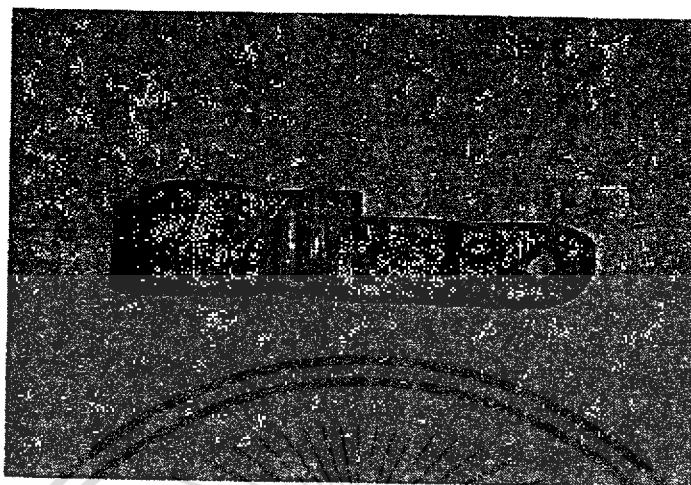
- สายเคเบิลวัด ใช้สำหรับนำสัญญาณแรงดันที่วัดได้มายังออสซิลโลสโคปสายที่ใช้เป็นสายโคแอกเชียล RG-8



รูปที่ 4.9 สายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

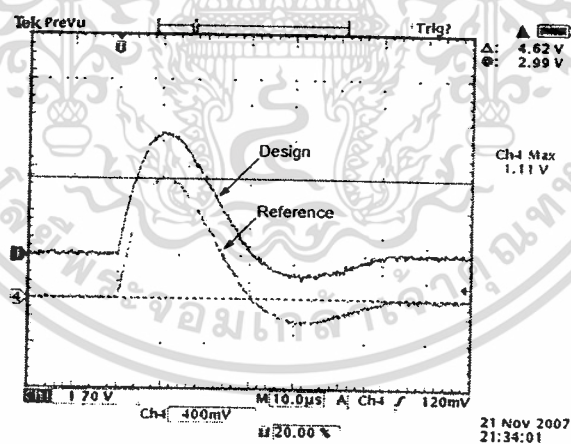
-สายนำส่งแรงสูง เป็นสายเชื่อมต่อวงจรจะต้องมีขนาดโตพอและไม่บางจนเกินไป สายนำส่งแรงสูงจะมีลักษณะกลมหรือแบนก็ได้



รูปที่ 4.10 สายนำส่งแรงสูง

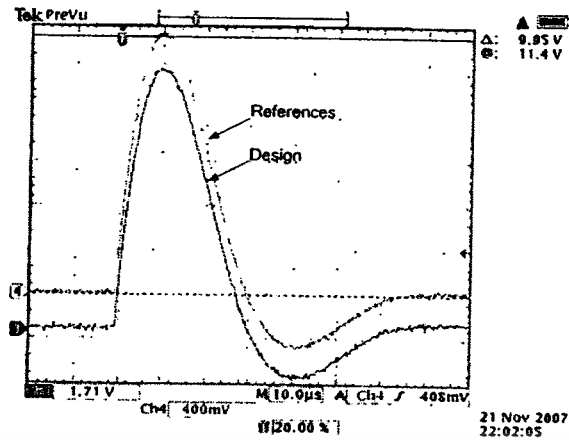
#### 4.2.1.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวต้านทานชั้นที่ที่ออกแบบที่ระดับกระแส 11.28 kV, 24.11 kV และ 52.16 kV แสดงดังรูปที่ 4.11 - 4.13 ตามลำดับ

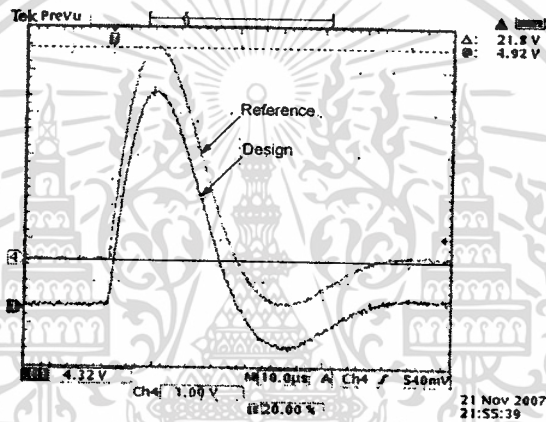


รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 11.28 kA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 24.11 kA



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 52.16 kA

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิง

ครั้งที่	กระแสทดสอบ ( $I_{REF}$ )kA	แรงดันที่วัดได้ ร่วมกับ Atten 1:10 ( $V_m$ )V	$I_{REF}/V_m$ (m $\Omega$ )
1	11.28	4.62	4.09
2	24.11	9.95	4.12
3	52.16	21.8	4.17
ค่าเฉลี่ย			4.12

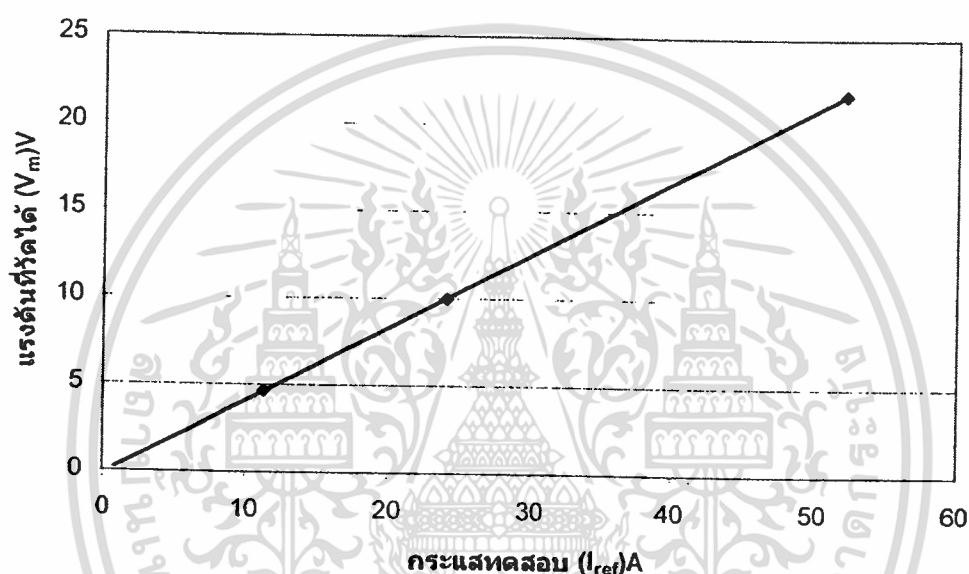
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หมายเหตุ:** ค่าแรงดันที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคปของระบบวัดที่ต้องการทดสอบคู่กับค่าสเกลแฟกเตอร์ (1:10)

สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบ

ความดันบรรยากาศ	758.0 mmHg
อุณหภูมิห้อง	28 °C
ความชื้นสัมพัทธ์	57.0 %

กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ทำการออกแบบสร้าง



รูปที่ 4.14 ความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ทำการออกแบบสร้าง

จากผลการทดสอบ หากคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิง เป็นไปตามกราฟข้างต้น แสดงให้เห็นว่าตัวต้านทานชั้นที่ ได้ออกแบบสร้างขึ้นมาี้มีคุณสมบัติใช้วัดกระแสอิมพัลส์ได้ตามมาตรฐาน

#### 4.2.1.4 การทดสอบหองค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

ระบบวัดกระแสที่ออกแบบสร้างขึ้นมาได้นำไปเปรียบเทียบกับระบบวัดกระแสอ้างอิงเพื่อหาองค์ประกอบเฉลี่ยของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ โดยทำการทดลองป้อนกระแสอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ โดยพิจารณาที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน 8/20  $\mu$ s ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

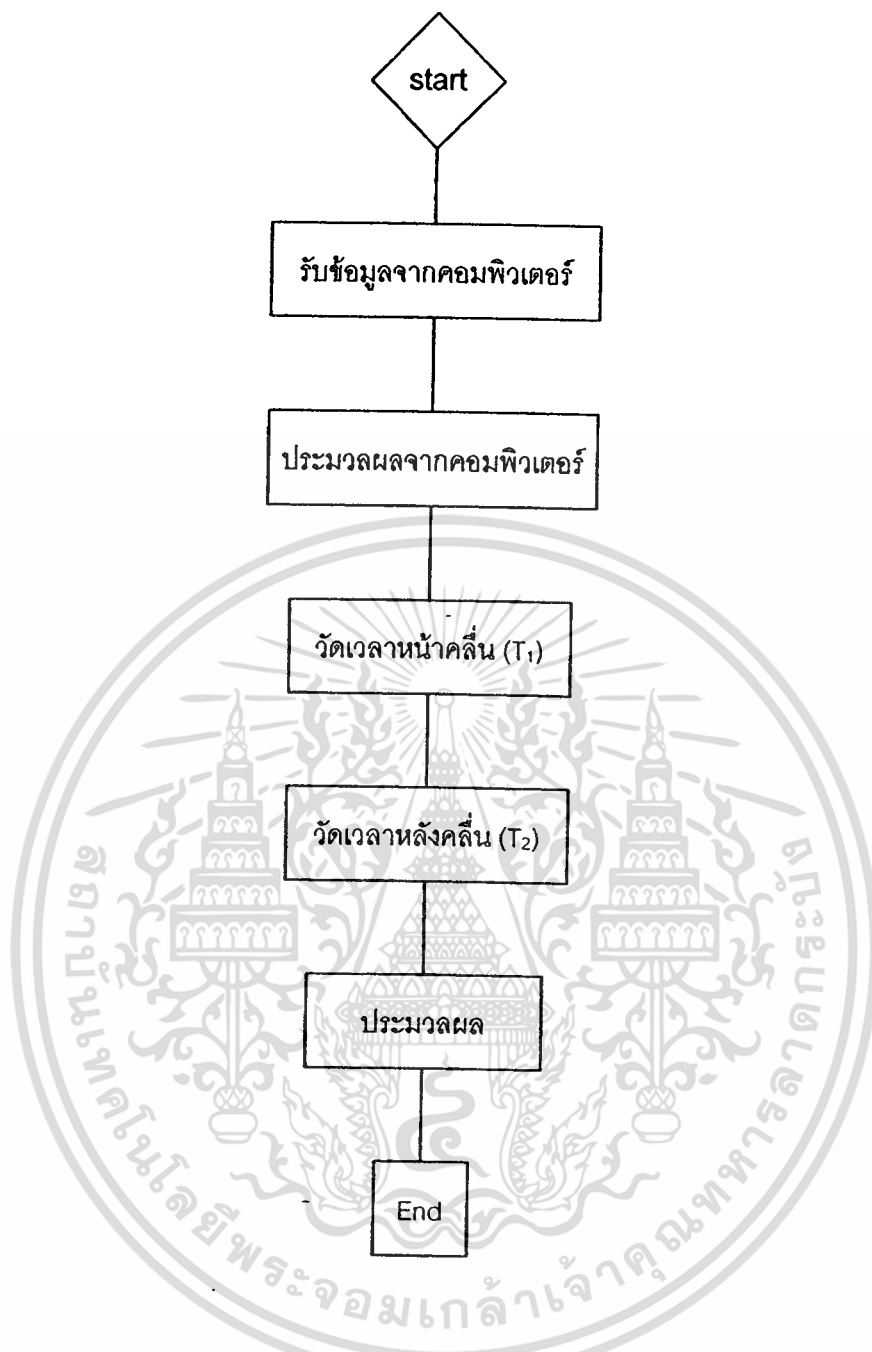
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบกระแสพัลส์รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ขั้วบวกที่วัดด้วยระบบวัดอ้างอิงและระบบวัดที่ออกแบบสร้างขึ้น

ค่าองค์ประกอบ	ระบบวัดอ้างอิง	ระบบวัดที่ออกแบบสร้าง	ความคลาดเคลื่อน
$T_1$	7.8	7.81	0.12%
$T_2$	20.8	21.0	0.96%
กระแสกลับขั้ว	18%	18%	0%

โดยที่การวิเคราะห์องค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสได้วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยอาจารย์ พิรุณี บุทธโกวิทและคณะ โปรแกรมที่ใช้ในการดึงค่าจากออสซิลโลสโคปมาวิเคราะห์ค่ายอด และองค์ประกอบทางเวลาของรูปคลื่นกระแสพัลส์มาตรฐาน ได้พัฒนาขึ้นมาบน labview ดังมีรายละเอียดแสดงใน โฟลชาร์ทดังรูปที่ 4.15



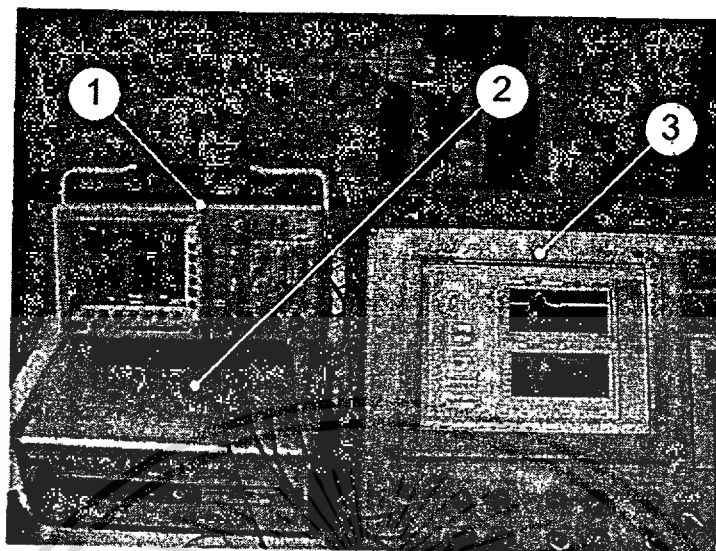
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 โฟลชาร์ทแสดงการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จอภาพแสดงรายละเอียดแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์การวัดกระแสฮาร์มอนิกส์



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกส์

- โดยที่
- 1) คณิตศาสตร์ของสวิตช์
  - 2) เครื่องคอมพิวเตอร์
  - 3) จอภาพแสดงผล โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุป

จากการทดสอบความสามารถในการวัดของระบบวัดกระแสอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้น เทียบกับระบบวัดกระแสอ้างอิง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนขององค์ประกอบทางเวลามีค่าน้อยกว่า 5 % และค่าความคลาดเคลื่อนของค่ายอดกระแสกลับขั้วน้อยกว่า 1 % ระบบวัดกระแสอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้น มีแบนด์วิธกว้างพอที่สามารถตรวจจับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1/20 us, 8/20 us, 4/10 us, 30/80 us โดยระบบวัดที่ทำการออกแบบสร้างขึ้นมีสเกลแฟกเตอร์ 4.12 kAV

#### 5.2 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณนายเกริก แซ่เลื่อง, นายสุชาติ มณฑาไปใหญ่, นายจิรายุ จันทร์ชู, นายจิตติพงษ์ เจียงสุขใส, นายธนากร เพ็ญทอง และนายธนสิทธิ์ หล่มสิริอนุสรณ์ ซึ่งได้ช่วยเหลือในการจัดสร้างและทดสอบตัวด้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมสำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ ขอขอบคุณ การไฟฟ้านครหลวงที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือวัดค่าความต้านทานชั้นที่ ห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความสะดวกในการทดสอบหาคุณสมบัติของตัวด้านทาน และสุดท้ายขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย รวมทั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้จัดสรรงบประมาณสำหรับการทำวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, 2549.
- [2] IEC 60099-4.Surge arrester – Part4 : **Metal-oxide surge arrester without gaps for a.c. system.**, 2001-12
- [3] ปริญญา ชมลิ้ม, พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, นรเศรษฐ พัฒนเดช, ปิยะบุตร พุกขานูบาล และ สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร, “การสร้างกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นขั้นและกระแสอิมพัลส์สวิตซ์ซิง”, การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 29, 2549.
- [4] IEC Publication 60060-1, “**High Voltage Test Techniques Part I:General Definations and Test Requirement**”, 1989.
- [5] IEC Publication 60060-2 , “**High Voltage Test Techniques Part II:Measuring system**”, 1994.
- [6] เจต อธิธิเวชชัย, เจษฎา มณีวงศ์ และ ชัยณรงค์ ธรรมจินดารักษ์, “การศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่า กับ โครงสร้างอาคาร”,ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [7] P.Yutthagowith, N. Pattanadech, A. Kunakorn and M. Leelajindakrairerk,“**Design and Construction of a Rogowski’s Coil with Compensated RC Integrator for Measuring Impulse Current**” 8<sup>th</sup> International Power Engineering Conference – IPEC, Singapore, 2007.



หนังสือเป็นสมบัติของท่าน

โปรดช่วยกันรักษา

[www.lib.kmitl.ac.th](http://www.lib.kmitl.ac.th)

สำนักหอสมุดกลาง โทร. 0 2739 2221

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้