

โครงการวิจัยโดยใช้งบรายได้อัตโนมัติประจำปี 2550

อุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดขดลวด โรกอฟสกี

เสนอ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดย

นายนเรศรชฎ พัฒนเดช หัวหน้าโครงการ
นายพีรวิทย์ ยุทธโกวิท นักวิจัย
นายประวิทย์ เพชรผึ้ง ผู้ช่วยนักวิจัย
นายณัฐพันธ์ บุญเสนอ ผู้ช่วยนักวิจัย
นายปรีชญญา ชมลิ้ม ผู้ช่วยนักวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สารบัญ

	หน้า
สารบัญรูป.....	I
สารบัญตาราง.....	II
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีการวัดกระแสอิมพัลส์.....	3
2.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน.....	3
2.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์.....	4
2.3 การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์.....	5
2.4 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์.....	6
2.4.1 หลักการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์.....	6
2.4.2 การผันขดลวดโรกอฟสกี.....	6
2.4.3 วงจรต้านขาออกของขดลวดโรกอฟสกี.....	7
2.5 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นที่.....	10
2.6 เคมเบิลวัด (Measuring Cables).....	11
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้างระบบวัดกระแสอิมพัลส์.....	14
3.1 การออกแบบสร้างระบบวัดกระแสอิมพัลส์.....	14
3.1.1 การออกแบบสร้างโรกอฟสกีคอยล์.....	15
3.1.2 การออกแบบอินทิเกรเตอร์.....	16
บทที่ 4 การทดสอบระบบวัดกระแสอิมพัลส์.....	18
4.1 มาตรฐานการทดสอบหาค่าสเกลแพกเตอร์.....	18
4.2 การทดสอบหาค่าสเกลแพกเตอร์.....	19
4.2.1 การต่อวงจรทดสอบ.....	20
4.2.2 วิธีการทดสอบ.....	21

RCH
TK

321

น 2240

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 84546

วันที่..... 13 ต.ค. 2551

วัน,เดือน,ปี.....

สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุก

1199999X
b.....
i.....

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.3 ผลการทดลอง.....	22
4.3 การทดสอบห้วงค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์.....	23
4.4 โปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของกระแสอิมพัลส์.....	25
บทที่ 5 สรุป.....	27

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปคลื่นกระแสिमพัลส์มาตรฐาน.....	3
2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์.....	5
2.3 ขดลวดโรกอฟสกี.....	6
2.4 โรกอฟสกีคอยล์ต่อด้วย LR อินทิเกรเตอร์.....	8
2.5 ผลตอบสนองความถี่ LR อินทิเกรเตอร์.....	9
2.6 โรกอฟสกีคอยล์ต่อด้วย RC อินทิเกรเตอร์.....	9
2.7 ผลตอบสนองความถี่ RC อินทิเกรเตอร์.....	10
2.8 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นที่.....	10
3.1 สเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นกระแสिमพัลส์.....	14
3.2 ระบบวัดกระแสिमพัลส์ประกอบด้วยขดลวดโรกอฟสกีและอินทิเกรเตอร์ 3 ชั้น	14
3.3 พื้นที่หน้าตัดของแกนอะคลีลิก.....	15
3.4 โรกอฟสกีคอยล์ที่ทำการออกแบบ.....	16
3.5 RC อินทิเกรเตอร์แบบ 3 ชั้น.....	17
4.1 โรกอฟสกีคอยล์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ.....	19
4.2 วงจรสมมูลของการทดสอบ.....	20
4.3 การต่อวงจรทดสอบจริง.....	21
4.4 ผลการทดลองการเปรียบเทียบสเกลแฟกเตอร์.....	22
4.5 สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดกระแสिमพัลส์ที่ออกแบบสร้าง.....	23
4.6 ผลการวิเคราะห์กระแสिमพัลส์.....	24
4.7 โพลซาร์ทแสดงการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา.....	25
4.8 ลักษณะของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา.....	26

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ข้อกำหนดการทดสอบวัดแรงดันคงเหลือเทียบกับพิกัดของกัปดักแรงดันเกิน..... 1
1.2	วิธีการดำเนินงานโครงการวิจัย..... 2
4.1	องค์ประกอบกระแสิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 μ s..... 23



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แรงดันเกินที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า (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) ของกั๊บดักแรงดันเกินของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ มาตรฐาน 3 รูปคลื่น คือ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse current) 8/20 μ s รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นชั้น 1/20 μ s และรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สวิดซิง 30/80 μ s ซึ่งข้อกำหนดการทดสอบการวัดแรงดันคงเหลือของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ได้ ขึ้นอยู่กับพิกัดของกั๊บดักแรงดันเกินตามตารางที่ 1 [3]

ตารางที่ 1.1 ข้อกำหนดการทดสอบวัดแรงดันคงเหลือเทียบกับพิกัดของกั๊บดักแรงดันเกิน

	Standard nominal discharge current				
	20 kA	10 kA	5 kA	2.5 kA	1.5 kA
1. Rated voltage (kV _{rms})	360 < U, ≤ 750	3 ≤ U, ≤ 360	U, ≤ 132	U, ≤ 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

เพื่อทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดขดลวดโรกอฟสกี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดกระแสिमพัลส์ชนิดขดลวดโรกอฟสกีให้สามารถวัดกระแสिमพัลส์ 4/10, 8/20 μ s พิกัดกระแสสูงสุด 50 kA แบนวิดท์ 3 MHz ความผิดพลาด \pm 3%

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดกระแสिमพัลส์
- 2) ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ
- 3) ทำการออกแบบสร้างระบบวัดกระแสिमพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี
- 4) ทำการทดสอบ และสรุปผลการทดลอง
- 5) ทำรายงานฉบับสมบูรณ์และส่งมอบชิ้นงานให้กับคณะ

ตารางที่ 1.2 วิธีการดำเนินงานโครงการวิจัย

วิธีการดำเนินงาน	พ.ศ. 2550							
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดกระแสिमพัลส์	←	→						
2. ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ	←		→					
3. ทำการออกแบบสร้างระบบวัดกระแสिमพัลส์			←			→		
4. ทำการทดสอบ และสรุปผลการทดลอง					←		→	
5. ทำรายงานฉบับสมบูรณ์และส่งมอบชิ้นงานให้กับคณะ							←	→

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

สามารถออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดกระแสिमพัลส์ชนิดขดลวดโรกอฟสกี ที่มีคุณสมบัติในการวัดกระแสिमพัลส์ 4/10, 8/20 μ s พิกัดสูงสุด 50 kA แบนวิดท์ 3 MHz ความผิดพลาด \pm 3% ได้ และนำมอบให้คณะวิศวกรรมศาสตร์ใช้เป็นต้นแบบงานวิจัยต่อไป และสามารถนำต้นแบบดังกล่าวไปออกแบบสร้างขดลวดโรกอฟสกี เพื่อใช้วัดกระแสिमพัลส์ และนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

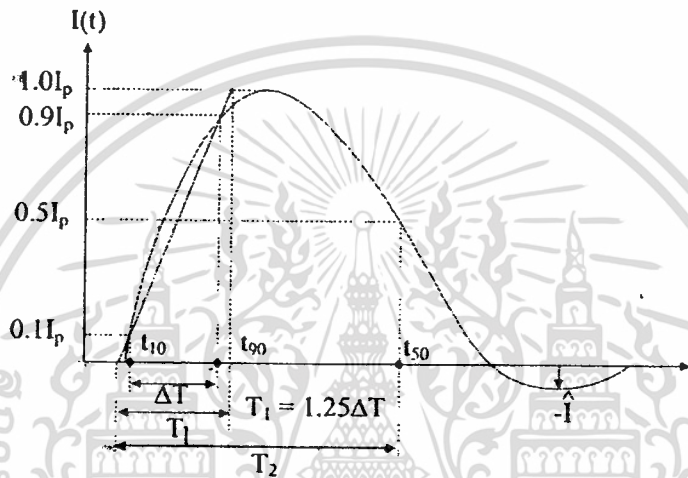
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การกำหนดชนิดของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จะแทนด้วย เวลาหน้าคลื่นต่อเวลาหางคลื่น

หรือ T_1/T_2 เช่น รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ชนิด 8/20 μs หมายความว่า เป็นรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ 8 μs เวลาหางคลื่นเท่ากับ 20 μs เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

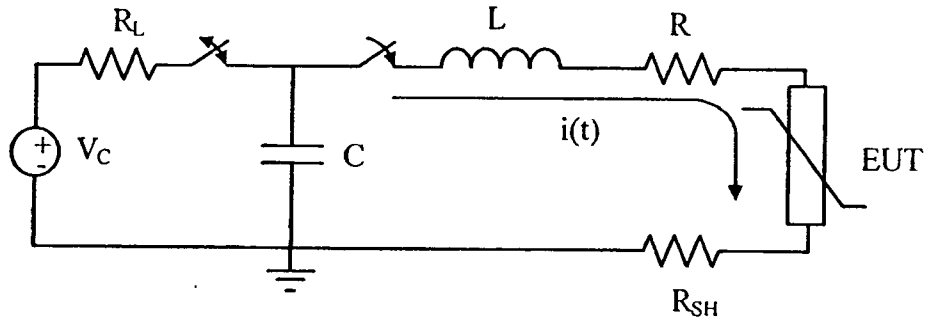
- 1) $1/20 \mu s$ รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ $1 \mu s$ และหางคลื่นเท่ากับ $20 \mu s$
- 2) $4/20 \mu s$ รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ $4 \mu s$ และหางคลื่นเท่ากับ $20 \mu s$
- 3) $8/20 \mu s$ รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ $8 \mu s$ และหางคลื่นเท่ากับ $20 \mu s$
- 4) $30/80 \mu s$ รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ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

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

1. การวัดค่าช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) ให้คำนวณจาก 1.25 เท่าของเวลาในช่วงที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เพิ่มค่าจาก 10% ของค่ายอดจนถึงค่า 90% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์
2. การวัดค่าช่วงเวลาหางคลื่น (T_2) ให้คำนวณจากช่วงเวลาดังแต่จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ จนถึงจุดที่กระแสอิมพัลส์ลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสอิมพัลส์
3. จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์คือ จุดตัดระหว่างแกนนอน (แกนเวลา) กับเส้นตรงที่ลากผ่านระหว่างจุด 10% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์ และจุด 90% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น

2.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ [6]

การสร้างกระแสอิมพัลส์ทำได้โดยอาศัยหลักการของวงจรทรานเซียน (Transient) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ , ตัวต้านทาน , ตัวเหนี่ยวนำ , แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และในวงจรมีอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์เพื่อควบคุมการคายประจุของตัวเก็บประจุในช่วงเวลาสั้นๆ โดยมีหลักการทำงาน คือ ตัวเก็บประจุ C_s จะถูกอัดประจุหรือพลังงานไฟฟ้าเก็บไว้ แล้วทำการปล่อยให้ดิสชาร์จผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ก็จะเกิดการแกว่งของสัญญาณแบบหนึ่ง เพราะในตัวเหนี่ยวนำ L นั้นจะมีความต้านทานโดยธรรมชาติและถ้าวัสดุทดสอบมีความต้านทานด้วยก็จะทำให้เกิด การหน่วงมากขึ้น ฉะนั้นวงจรของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์พื้นฐานจึงเขียนได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

V_c	คือ	แรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุ
R_L	คือ	ตัวต้านทานจำกัดกระแส
C	คือ	ตัวเก็บประจุในวงจร
R	คือ	ตัวต้านทานในวงจร
L	คือ	ตัวเหนี่ยวนำในวงจร
R_{SH}	คือ	ตัวต้านทานแบบชั้นสำหรับวัดกระแสอิมพัลส์
$i(t)$	คือ	กระแสอิมพัลส์
EUT	คือ	วัสดุทดสอบ

การเกิดการแกว่งของสัญญาณกระแสของวงจรรูปที่ 2.2 จะเกิดการหน่วงมากน้อยจะขึ้นอยู่กับความต้านทานรวม R ในวงจร และค่าความเหนี่ยวนำรวม L ในวงจร ค่ากระแสสูงสุดจะได้เมื่อค่า R มีค่าต่ำสุด คือ

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

2.3 การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ [6]

การวัดและบันทึกสัญญาณของกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้ระบบวัดที่มีแบนวิดท์กว้าง (Wide-band measuring) และมีเวลาขึ้นเร็วในเกณฑ์เดียวกับกระแสที่วัด ดังนั้นต้องใช้เครื่องวัดที่มีเวลาขึ้น (Rise time) ตีพอ เพื่อให้สามารถวัดกระแสที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างรวดเร็วได้ ซึ่งในการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สามารถวัดได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

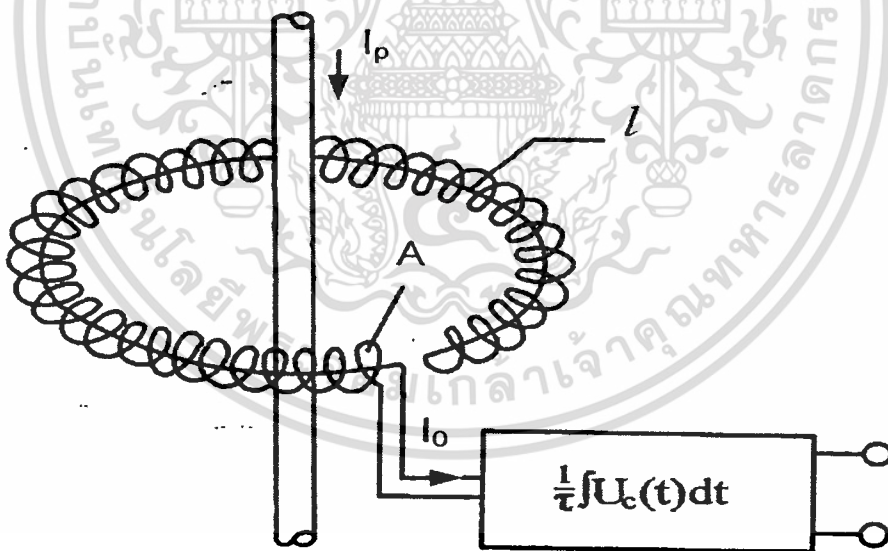
1. โรกอฟสกีคอยล์ (Rogowski coil)
2. ชั้นความต้านทานต่ำ (Low ohmic shunts)

2.4 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์ [1]

การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยชั้นที่เป็นวิธีการวัดแบบต่อผ่านตัวนำ (galvanic) จะมีขนาดใหญ่ตามขนาดกระแสใช้งาน มีความไม่สะดวกในการใช้งานหลายประการ และเป็นโหลดของวงจรวัด ในทางปฏิบัติจึงไม่นิยมใช้ชั้นวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าสูง ๆ แต่จะใช้วัดด้วยอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าสูง และมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลารวดเร็ว โดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแสแบบพิเศษ เรียกว่า โรกอฟสกีคอยล์ (Rogowski's coil)

2.4.1 หลักการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอยล์

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 ขดลวดโรกอฟสกี

2.4.2 การพันขดลวดโรกอฟสกี

การวัดกระแสอิมพัลส์ที่อาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก จะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อพื้นที่ภาคตัดขวาง และความถี่ของจำนวนรอบสมมาตรเสมอตลอดช่วงความยาวแกน อีกประการหนึ่งสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดต้องมาจากแหล่งกำเนิดที่เกิดจากกระแสที่ต้องการวัดเพียงอย่างเดียว ไม่มีผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ฉะนั้นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้การวัดมีความถูกต้อง จึงต้องมีการพันโรกอฟสกีที่มีลักษณะพิเศษ คือ ต้องมีการพันย้อนกลับเข้าไปภายในขดลวดอีกหนึ่งรอบดังรูปที่ 2.3 ทั้งนี้ เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน

ในรูปที่ 2.3 ขดลวดโรกอฟสกีคล้องตัวนำที่มีกระแสไหล I_p โดยอาศัยกฎของแอมแปร์ จะให้ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวด 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 จึงหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่วิ่งผ่านคล่องขดลวด ซึ่งมีจำนวนรอบทั้งหมด N รอบ และมีความยาวเท่ากับ $l = 2\pi x$ ได้คือ

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

และโดยอาศัยกฎเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ จะหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดจำนวน N รอบ ได้

$$U_c(t) = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{N\mu_0 A}{l} \frac{di_p}{dt} \quad (2.5)$$

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

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

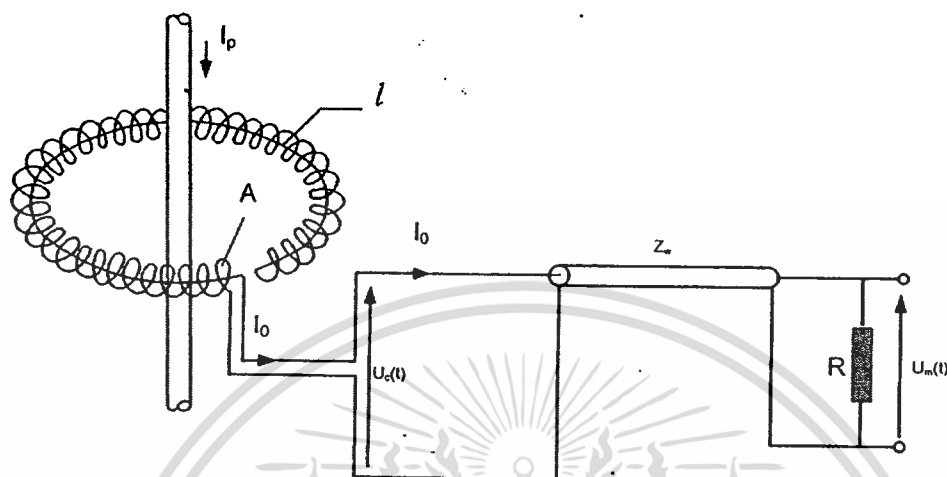
จากสมการที่ 2.5 จะพบว่า การวัดกระแสอิมพัลส์ของโรกอฟสกีคอยล์ จะต้องทำการอินทิเกรตค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด

2.4.3 วงจรด้านขาออกของขดลวดโรกอฟสกี

แรงดันด้านขาออกของโรกอฟสกีคอยล์ขึ้นกับอิมพีแดนซ์ขาออก ที่นำมาต่อเข้ากับโรกอฟสกีคอยล์ ซึ่งเป็นวงจรอินทิเกรตที่เป็นพาสซีฟ ในทางปฏิบัติที่ใช้กันอยู่มี 2 แบบ คือ แบบ LR อินทิเกรเตอร์และแบบ RC อินทิเกรเตอร์

เขาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) LR อินทิเกรเตอร์จะมีโหลดเป็น R ซึ่งมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด ดังรูปที่ 2.4



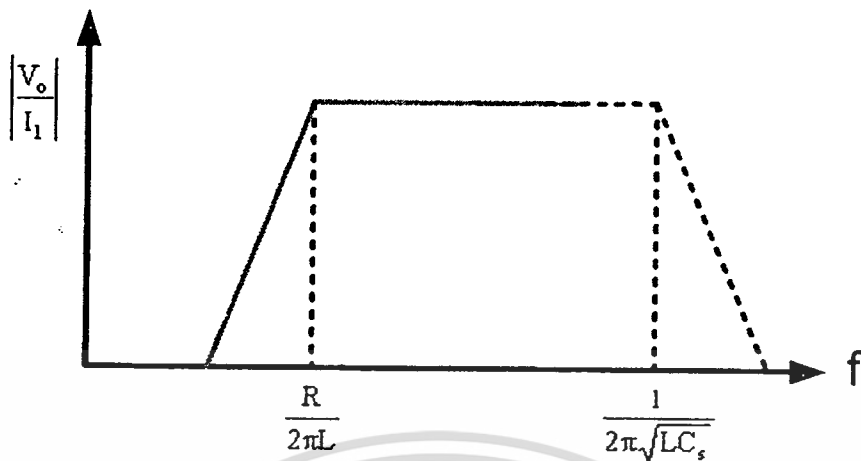
รูปที่ 2.4 โรกอฟสกีคอยล์ต่อด้วย LR อินทิเกรเตอร์

ความหมายในรูปวงจร

- $U_c(t)$ = แรงดันเหนี่ยวนำ
- L_c = ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกีคอยล์
- R_c = ความต้านทานของขดลวดโรกอฟสกีคอยล์
- R = ความต้านทานโหลด
- Z_w = เสรีจิมพีแดนซ์ของสายวัดและความต้านทานสมมูลกัน
- $U_m(t)$ = แรงดันที่วัดได้

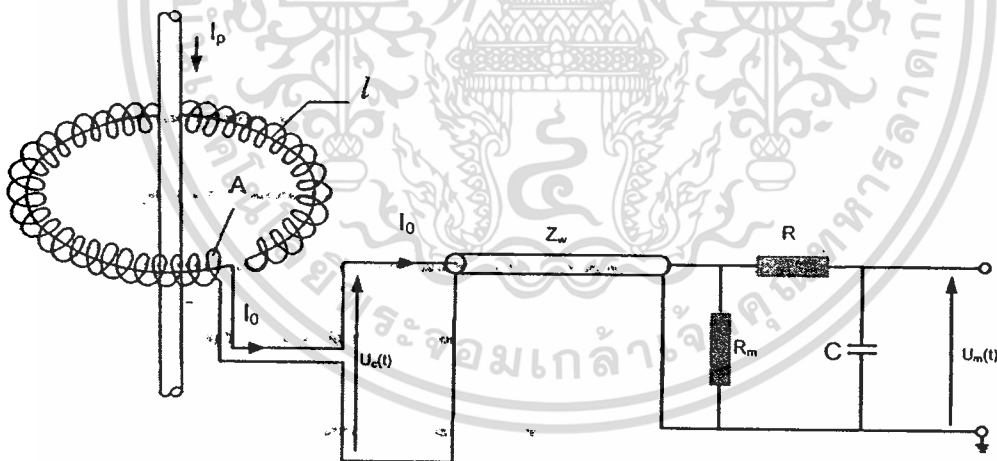
การต่อด้วย LR อินทิเกรเตอร์มีขีดจำกัดความถี่ต่ำ $\omega L \gg (R+R_c)$ แรงดันที่วัดได้ $U_m(t)$ จะสามารถวัดกระแสในตัวนำที่ต้องการวัดได้จากความสัมพันธ์

$$U_m = \frac{R}{L_c} M i_p(t) \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองความถี่ LR อินทิเกรเตอร์

2) RC อินทิเกรเตอร์ จะเป็นวงจรที่มีความต้านทานสูง ($R \gg Z_w$) ต่ออันดับอยู่กับตัวเก็บประจุ แล้ววัดแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C ดังรูปที่ 2.6 โดยมีเงื่อนไข $\omega L \ll Z_w$ และ $\frac{1}{\omega C} \ll R$, โดยที่ R_m เป็นความต้านทานแมชชิง

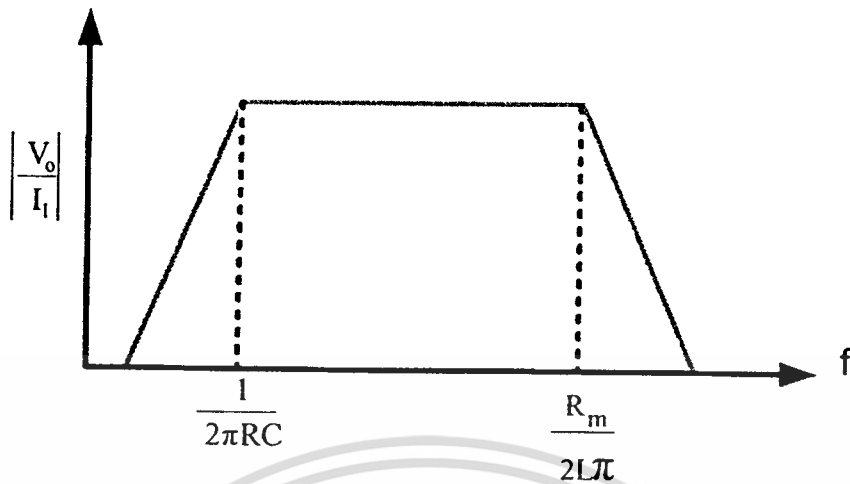


รูปที่ 2.6 โรกอพสกีคอยล์ต่อด้วย RC อินทิเกรเตอร์

การต่อโรกอพสกีคอยล์ด้วย RC อินทิเกรเตอร์ จะมีขีดจำกัดความถี่ล่างและบน เป็นความถี่แถบผ่านแรงดันที่วัดได้ $U_m(t)$ จะหาค่ากระแสที่ต้องการวัดได้จากความสัมพันธ์

$$U_m = \frac{M}{RC} i_p(t) \quad (2.7)$$

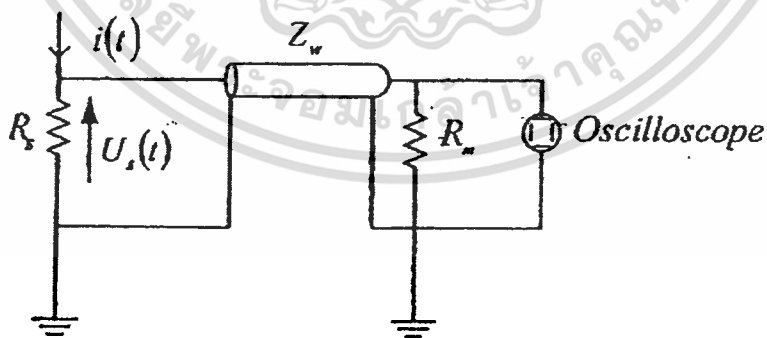
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ผลตอบสนองความถี่ RC อินทิเกรเตอร์

2.5 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่ [6]

ตัวต้านทานชั้นที่ในที่นี้หมายถึง ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำๆ และทราบค่าถูกต้องแน่นอน ใช้สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ โดยให้กระแสอิมพัลส์ที่ต้องการจะวัดไหลผ่านตัวต้านทานชั้นที่ จากนั้นวัดแรงดันที่ตกคร่อม (Voltage drop) ตัวต้านทานชั้นที่ด้วยออสซิลโลสโคป โดยสัญญาณของแรงดันที่วัดได้จะถูกส่งผ่านสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial cable) ที่มีตัวต้านทานสมคู่กัน (R_m) ต่อที่ปลายสายเคเบิลขนานกับออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานชั้นที่

- เมื่อ R_s คือ ตัวต้านทานชั้นที่
- Z_w คือ ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล
- R_m คือ ตัวต้านทานสมคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปวงจรที่ 2.8 ถ้าหากตัวต้านทานชั้นที่มีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานล้วน และไม่คิดถึงค่าของเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล (Z_w) เพราะ $R_s \ll Z_w$ จึงสามารถอาศัยกฎของโอห์มในการหาค่ากระแสได้คือ

$$i(t) = \frac{U_s(t)}{R_s} \quad (2.8)$$

ตัวอย่างเช่นเมื่อมีกระแสอิมพัลส์ไหลผ่านตัวต้านทานชั้นที่มีความต้านทาน $1 \text{ m}\Omega$

สามารถวัดแรงดัน

$$U_s(t) = 100V$$

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

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

ในทางปฏิบัติเมื่อกระแสไหลผ่านตัวต้านทานชั้นที่จะเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังนั้นแรงดันตกคร่อมจริงจะเป็นไปตามสมการ

$$V(t) = R_s i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.9)$$

เพราะฉะนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบตัวต้านทานชั้นคือทำให้ L มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจาก เป็นส่วนที่เราไม่ต้องการวัด ซึ่งถ้าไม่คำนึงถึงค่า L ส่วนของ $L \frac{di(t)}{dt}$ ก็จะเป็นค่าความผิดพลาดของการวัดที่ประกอบขึ้นเป็นค่า $V(t)$

2.6 เคเบิลวัด (Measuring Cables)

การวัดหรือบันทึกภาพแรงดันด้วยออสซิลโลสโคปที่มีค่าแรงดันป้อนเข้าที่กำหนดสูง เวลาใช้งานจริงๆ ไม่สามารถที่จะนำไปต่อเข้าโดยตรงกับขดลวดโรกอฟสกีได้ เพราะจะไม่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและเพื่อลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้น้อยลงจำเป็นต้องตั้งออสซิลโลสโคป ให้อยู่ห่างจากขดลวดโรกอฟสกีพอสมควร ฉะนั้นการส่งสัญญาณแรงดันจากขดลวดโรกอฟสกีไปยังออสซิลโลสโคป ซึ่งต้องใช้สายเคเบิลวัด โดยทั่วไปจะใช้เป็นแบบไม่วาร์ณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนร่วม (Coaxial Cable) เคเบิลแกนร่วมที่ใช้ต้องมีการชิลด์อย่างน้อยสองชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในชิลด์ อันเป็นส่วนหนึ่งของวงจรวัตต์แรงดันอันเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นรบกวนไปบนสัญญาณที่วัดได้

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

เวลาช่วงเดินทาง τ ของสัญญาณอาจหาได้จากความเร็วแผ่กระจาย (Propagation) ของคลื่นคือ

$$\tau = \frac{l}{v} \quad (2.10)$$

เมื่อ l คือ ความยาวของสายเคเบิล และความเร็วที่แผ่กระจายคลื่นหาได้จากความสัมพันธ์

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (2.11)$$

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

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

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.12)$$

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

เอกรินทร์เป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการแก่สังคมโดยไม่หวังกำไร
ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวของเคเบิลยังมีผลต่อการวัดแรงดัน คือ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม การวัดแรงดันเฉพาะที่มีการตัดช่วงหน้าหน้าคลื่นจะต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ เพราะจะทำให้ค่ายอดที่วัดได้ผิดพลาด โดยทั่วไปสายเคเบิลแกนร่วมยาวไม่เกิน 10 เมตร อาจทิ้งผลกระทบแรงดันตกคร่อมได้ ถ้าต้องใช้สายเคเบิลยาวๆ จึงควรเลือกสายเคเบิลที่มีค่าความต้านทานและอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำๆ

ความต้านทานแมชซิ่ง ในกรณีวัดสัญญาณแรงดันด้วยออสซิลโลสโคป โดยส่งสัญญาณที่วัดจากความต้านทานต่ำไปยังออสซิลโลสโคปโดยผ่านสัญญาณด้วยสายเคเบิลแกนร่วม เพื่อไม่ให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับอันจะทำให้เกิดความผิดพลาดของค่าแรงดันที่วัดได้ จึงต้องใส่ตัวต้านทานแมชซิ่งระหว่างสายเคเบิลวัดกับชุดอินทิเกรเตอร์ โดยจะต่อตัวต้านทาน แมชซิ่ง $R_m = Z_w$ (ความต้านทานคลื่นจร) ไว้ปลายสายเคเบิลที่ต่อเข้ากับชุดอินทิเกรเตอร์ก่อนที่จะต่อกับออสซิลโลสโคป



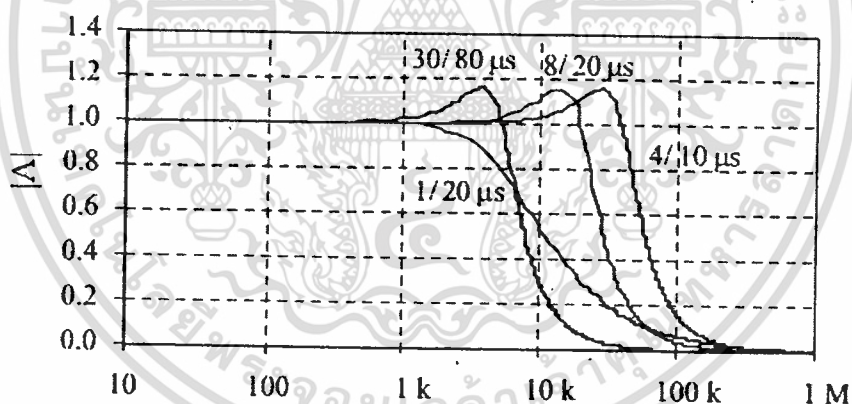
บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้างระบบวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี

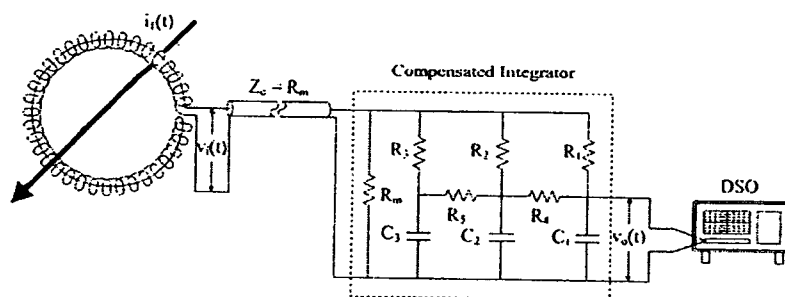
ระบบวัดกระแสอิมพัลส์ที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้นประกอบไปด้วย ขดลวดโรกอฟสกี และอินทิเกรเตอร์แบบตัวต้านและตัวเก็บประจุ ซึ่งระบบวัดกระแสอิมพัลส์ที่ทำการออกแบบสร้างมีลักษณะคุณสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC

3.1 การออกแบบสร้างระบบวัดกระแสอิมพัลส์

ในการออกแบบสร้างระบบวัดกระแสอิมพัลส์ก่อนอื่นจำเป็นต้องทราบลักษณะสเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ ดังแสดงรูปที่ 3.1 เพื่อที่จะนำมาเป็นข้อมูลในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ให้มีความสอดคล้องกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัด ระบบวัดกระแสที่มีความแม่นยำในการวัดจะต้องมีแบนวิดท์ที่ครอบคลุมแบนวิดท์ของรูปคลื่นที่ต้องการวัด จากการหาค่าการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐานได้ผลตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์



เอก **รูปที่ 3.2** ระบบวัดกระแสอิมพัลส์ที่ประกอบด้วยขดลวดโรกอฟสกีและอินทิเกรเตอร์แบบ 3 ชั้น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การออกแบบสร้างขดลวดโรกอล์ฟก็ เนื่องจากค่ายอดของกระแสที่ต้องการวัด คือ 50 kA ในการออกแบบได้เผื่อพิกต์ขึ้นอีก 20 % ของพิกต์ที่กำหนด ดังนั้นพิกต์กระแสที่ ออกแบบคือ $i(p) = 60\text{kA}$,กำหนดให้แรงดัน output ที่ต้องการ $U_m = 20\text{ V}$
การคำนวณ

$$\text{จาก } |A| = \frac{M}{RC} = \frac{V}{I} = \frac{20}{60 \times 10^3} = \frac{10}{30 \times 10^3}$$

โดยที่ M คือ ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดโรกอล์ฟก็กับตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน กำหนดให้ความถี่จำกัดล่างมีค่าเท่ากับ 338.8 Hz (โดยพิจารณาได้จากสเปกตรัมความถี่ของ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์)

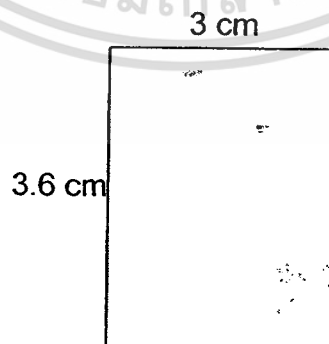
$$\text{จาก } \frac{1}{2\pi RC} \leq f_l$$

$$\text{จะได้ } \frac{1}{2\pi RC} \leq 338.8\text{ Hz}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{1}{RC} \leq 2\pi \times 338.8 = 2127.664$$

$$\text{จาก Gain จะทำให้ได้ค่า } M = |A| \times RC = \frac{10}{30 \times 10^3 \times 2127.664} = 0.157\ \mu\text{H}$$

โดยกำหนดให้ รัศมีนอกของโรกอล์ฟก็เท่ากับ 14 cm และ รัศมีในเท่ากับ 8 cm และ กำหนดให้มีขนาดของพื้นที่หน้าตัดของแกนอะคิลิกมีค่าเท่ากับ 12 cm^2 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 พื้นที่หน้าตัดของแกนอะคิลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน
จาก $M = \frac{NA\mu_0}{l}$ โดยที่ l คือ ความยาวเฉลี่ยของโรกอล์ฟก็มีค่าเท่ากับ 34.54 cm
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าลงในสูตรเพื่อหาจำนวนรอบในการพัน

$$N = \frac{0.157 \times 10^{-6} \times 34.54 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 10.8 \times 10^{-4}} = 40 \text{ รอบ}$$

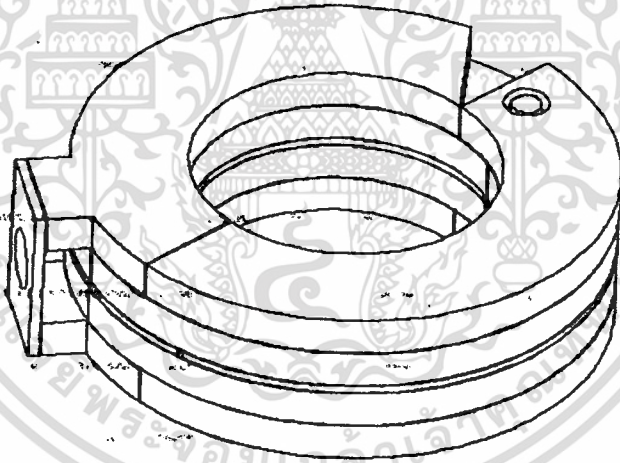
จำนวนรอบในการพันโรกอฟสกีเท่ากับ 40 รอบ โดยที่มีค่า $L = \frac{N^2 A \mu_0}{l}$

จะได้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า $L = MN = 0.157 \times 10^{-6} \times 40 = 6.28 \mu\text{H}$

กำหนดให้ค่าความต้านทานแมชซึ่งมีค่า = 50 Ω

แทนค่าในสมการ $f_2 = \frac{Rm}{2\pi L}$

ดังนั้นจะได้ค่าความถี่จำกัดบน $f_2 = \frac{50}{2\pi \times 6.28 \times 10^{-6}} = 1.26 \text{ MHz}$



รูปที่ 3.4 โรกอฟสกีคอยล์ที่ทำการออกแบบ

3.1.2 การออกแบบอินทิเกรเตอร์

จาก $\frac{1}{RC} = 2127.664$

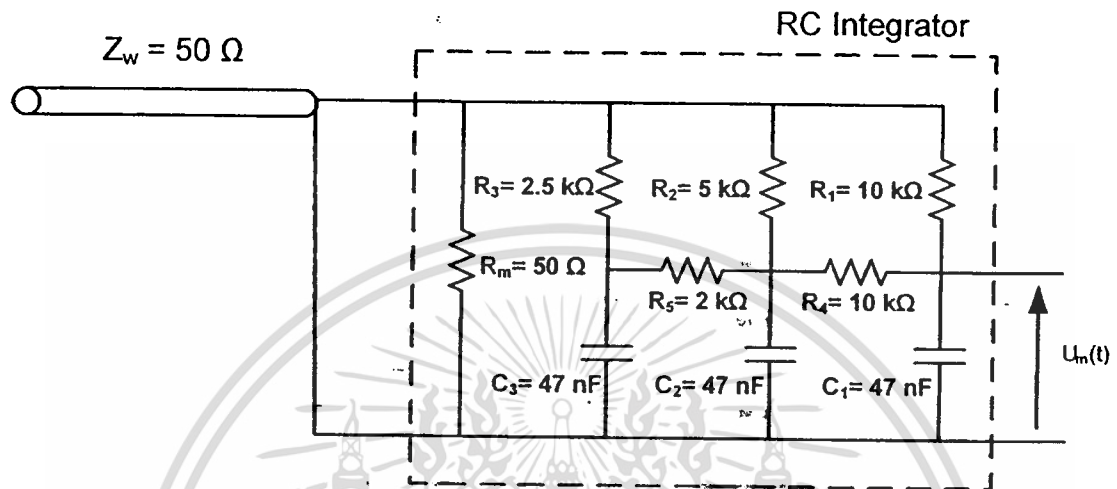
จะสามารถคำนวณหาค่าของ R ได้ โดยกำหนดให้ค่า C = 47 nF

$$R = \frac{1}{2127.664 \times 47 \times 10^{-9}} = 10 \text{ k}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดในการเลือกค่าพารามิเตอร์แบบซดเซยชนิดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ 3
 ชั้น [8]

- $C_1 = C_2 = C_3$ และ $R_1 = 2R_2 = 4R_3$, $R_4 = R_1$, $R_5 = 0.4R_2$



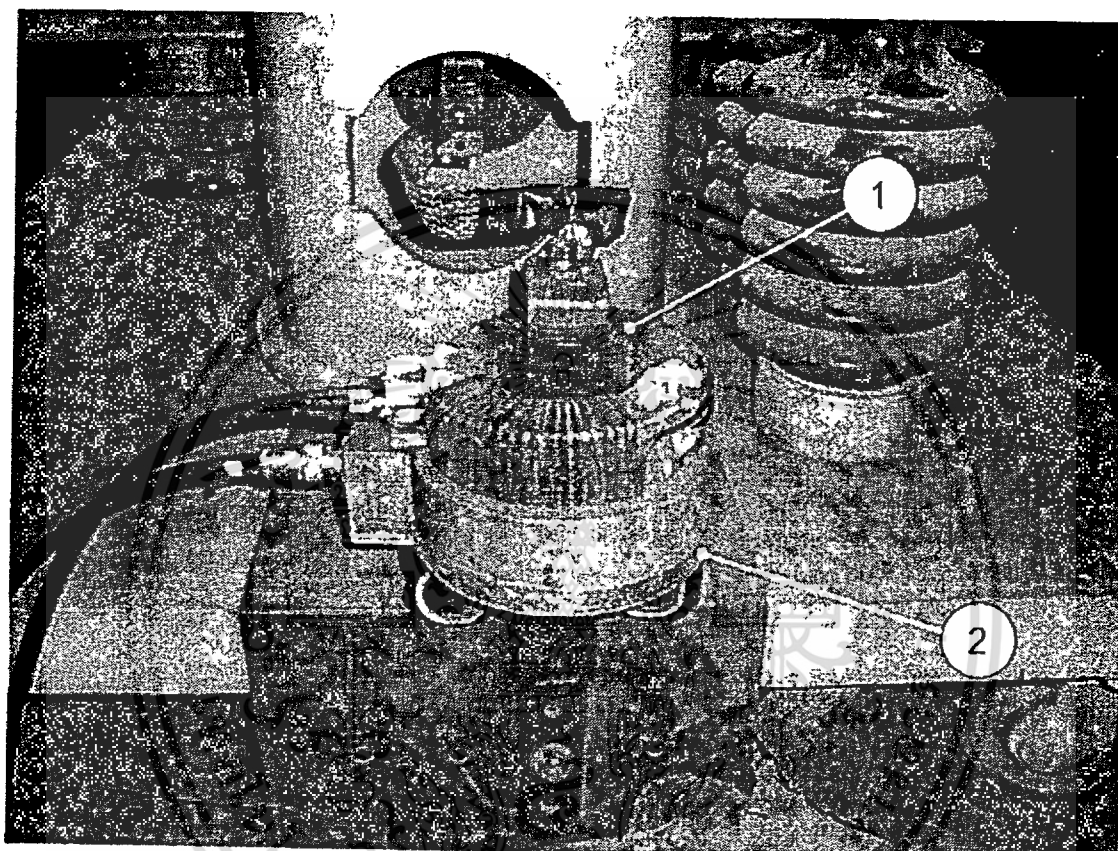
รูปที่ 3.5 RC อินทิเกรเตอร์แบบ 3 ชั้น

84546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์

เป็นการทดสอบโดยการปรับเทียบกับระบบวัดอ้างอิง โดยระบบวัดอ้างอิงมีสเกลแฟกเตอร์เท่ากับ 15.51 kA/1V การทดสอบทำขึ้นที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



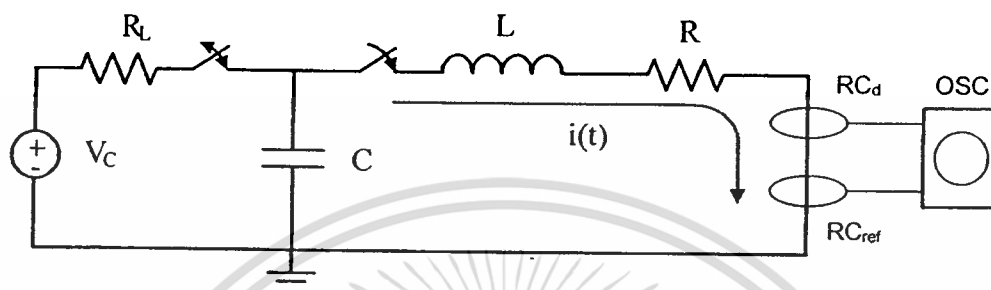
รูปที่ 4.1 โรกอพลสกีคอยล์ที่ใช้ในการปรับเทียบ

โดยที่ หมายเลข 1 คือ โรกอพลสกีคอยล์ที่ทำการออกแบบ
 หมายเลข 2 คือ โรกอพลสกีคอยล์อ้างอิง

4.2.1 การต่อวงจรทดสอบ

1) วงจรทดสอบ

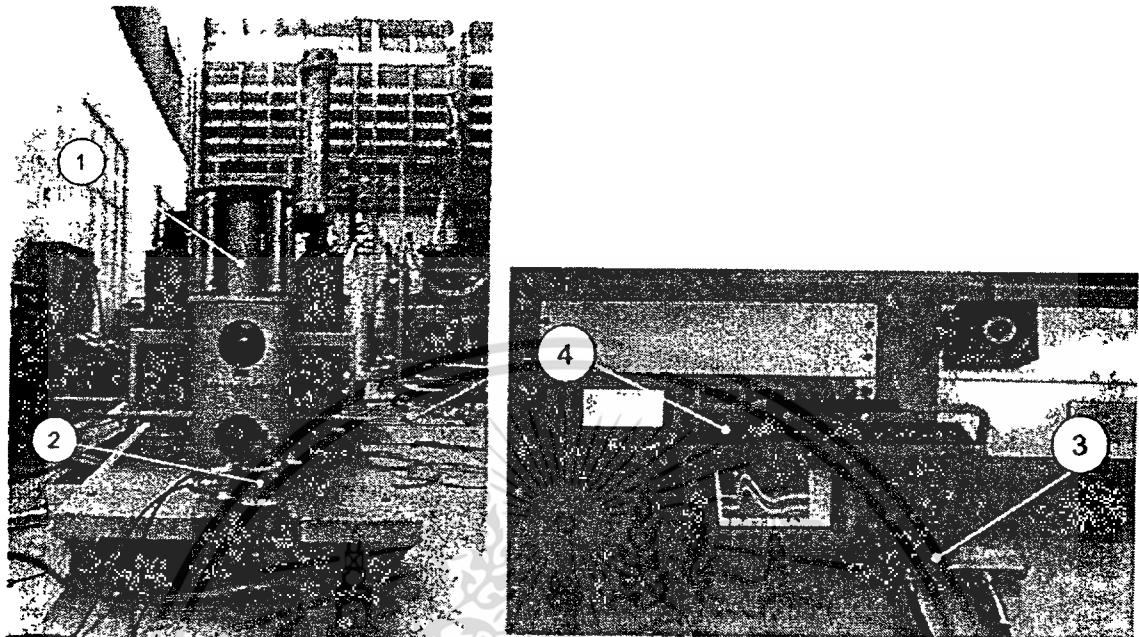
การทดสอบหาคุณสมบัติของโรกอฟสกีคอยล์ที่ออกแบบ (RC_d) จะทำการทดสอบเปรียบเทียบกับโรกอฟสกีคอยล์อ้างอิง (RC_{ref}) โดยใช้วงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลของการทดสอบ

V_c	คือ	แรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุ
R_L	คือ	ตัวต้านทานจำกัดกระแส
C	คือ	ตัวเก็บประจุในวงจร
L	คือ	ตัวเหนี่ยวนำในวงจร
R	คือ	ตัวต้านทานในวงจร
RC_d	คือ	โรกอฟสกีคอยล์ที่ออกแบบ
RC_{ref}	คือ	โรกอฟสกีคอยล์อ้างอิง
$i(t)$	คือ	กระแสอิมพัลส์
OSC	คือ	ออสซิลโลสโคป

2) วงจรทดสอบจริง



ก)

ข)

รูปที่ 4.3 การต่อวงจรทดสอบจริง

อุปกรณ์ในวงจรทดสอบประกอบไปด้วย

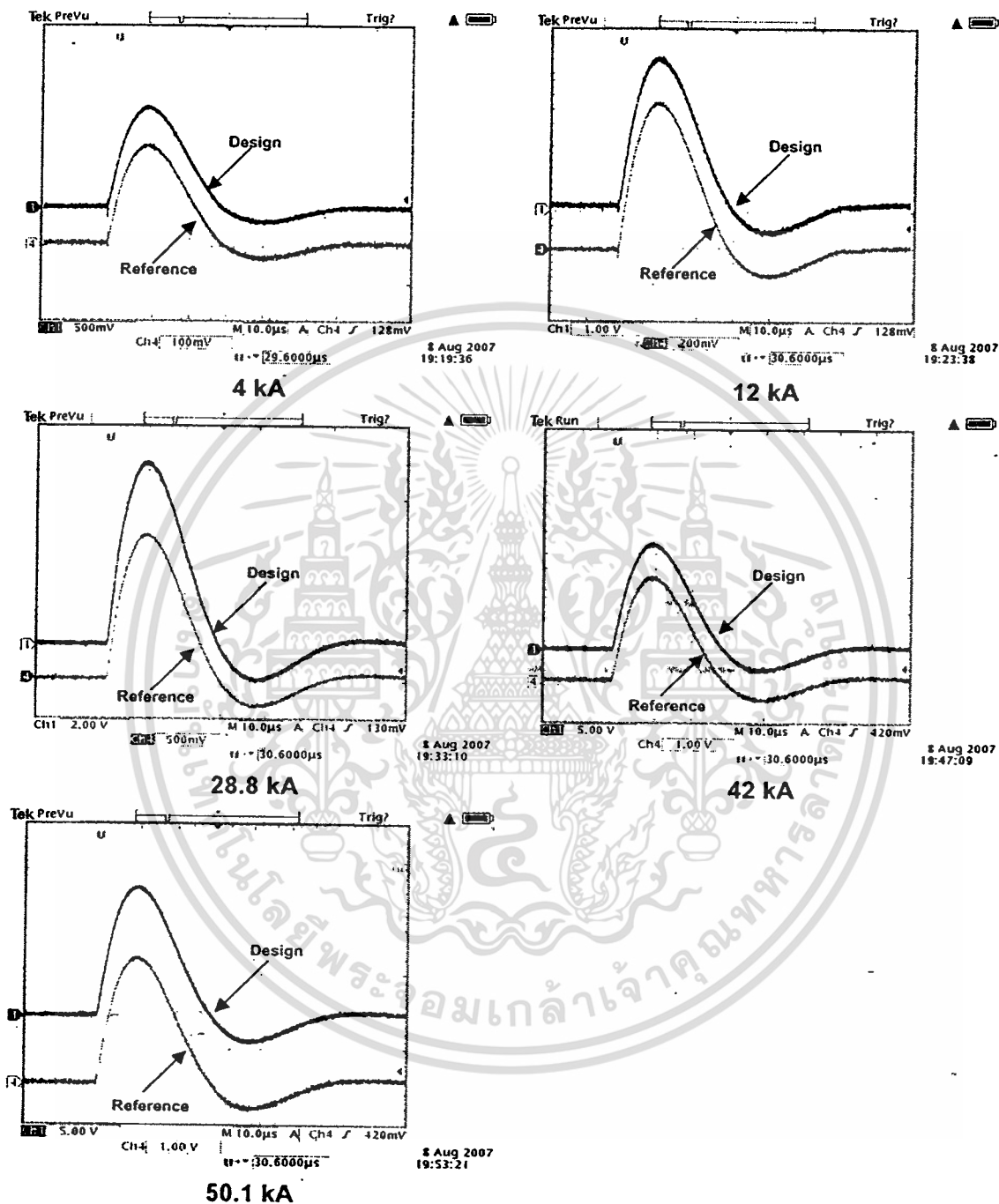
- 1) เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์
- 2) โรกอฟสกีคอยล์
- 3) อินทิเกรเตอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุหลาย 3 ชั้น
- 4) ออสซิลโลสโคป

4.2.2 วิธีการทดสอบ

- 1) ต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 4.2 และ 4.3
- 2) ทดสอบด้วยค่ากระแสอิมพัลส์ 5 ค่า คือ 4 kA, 12 kA, 28.8 kA, 42 kA และ 50.1 kA เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง
- 3) บันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

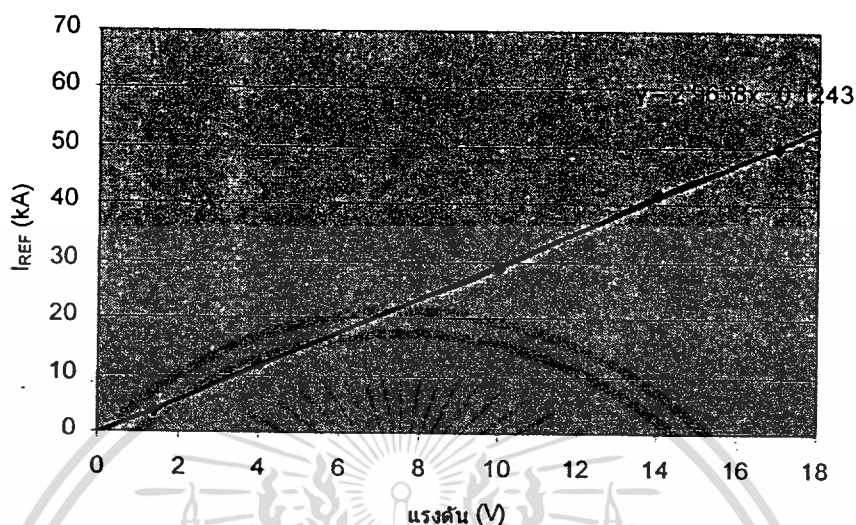
4.2.3 ผลการทดลอง



รูปที่ 4.4 ผลการทดลองการปรับเทียบสเกลแฟกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเกลแพกเตอร์ของระบบวัดกระแสอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้าง



รูปที่ 4.5 สเกลแพกเตอร์ของระบบวัดกระแสอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้าง

4.3 การทดสอบหาองค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

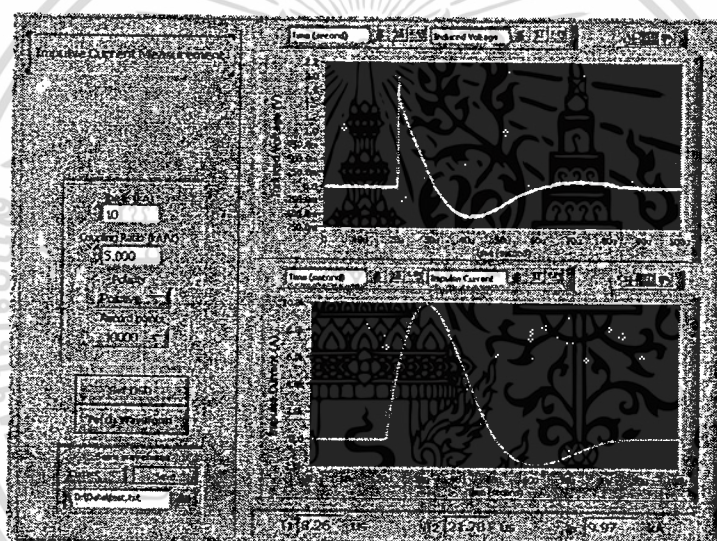
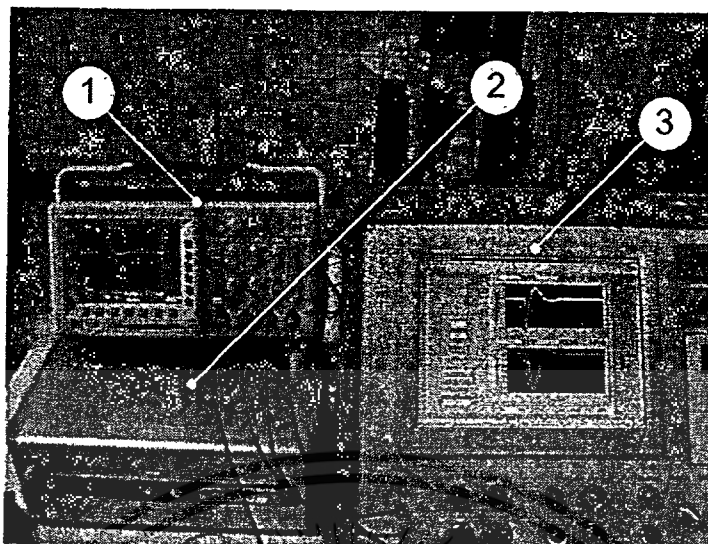
ระบบวัดกระแสที่ออกแบบสร้างขึ้นได้นำไปเปรียบเทียบกับระบบวัดกระแสอ้างอิงเพื่อหาองค์ประกอบเฉลี่ยของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ โดยใช้วงจรทดสอบดังรูปที่ 4.2 – 4.3 โดยทำการทดลองป้อนกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน 8/20 μ s จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ ทำการทดสอบที่ขั้วบวก จะได้ผลตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 8/20 μ s ขั้วบวกที่วัดด้วยระบบวัดอ้างอิง และระบบวัดที่ออกแบบสร้างขึ้น

ค่าองค์ประกอบ	ระบบวัดอ้างอิง	ระบบวัดที่ออกแบบสร้าง	ความคลาดเคลื่อน
T ₁	7.8	7.8	0%
T ₂	21	20.8	0.952%
กระแสกลับขั้ว	18%	18%	0%

โดยที่การวิเคราะห์องค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ได้วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาโดย อ. พิรุณี ยุทธโกวิท และคณะ จอภาพแสดงรายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



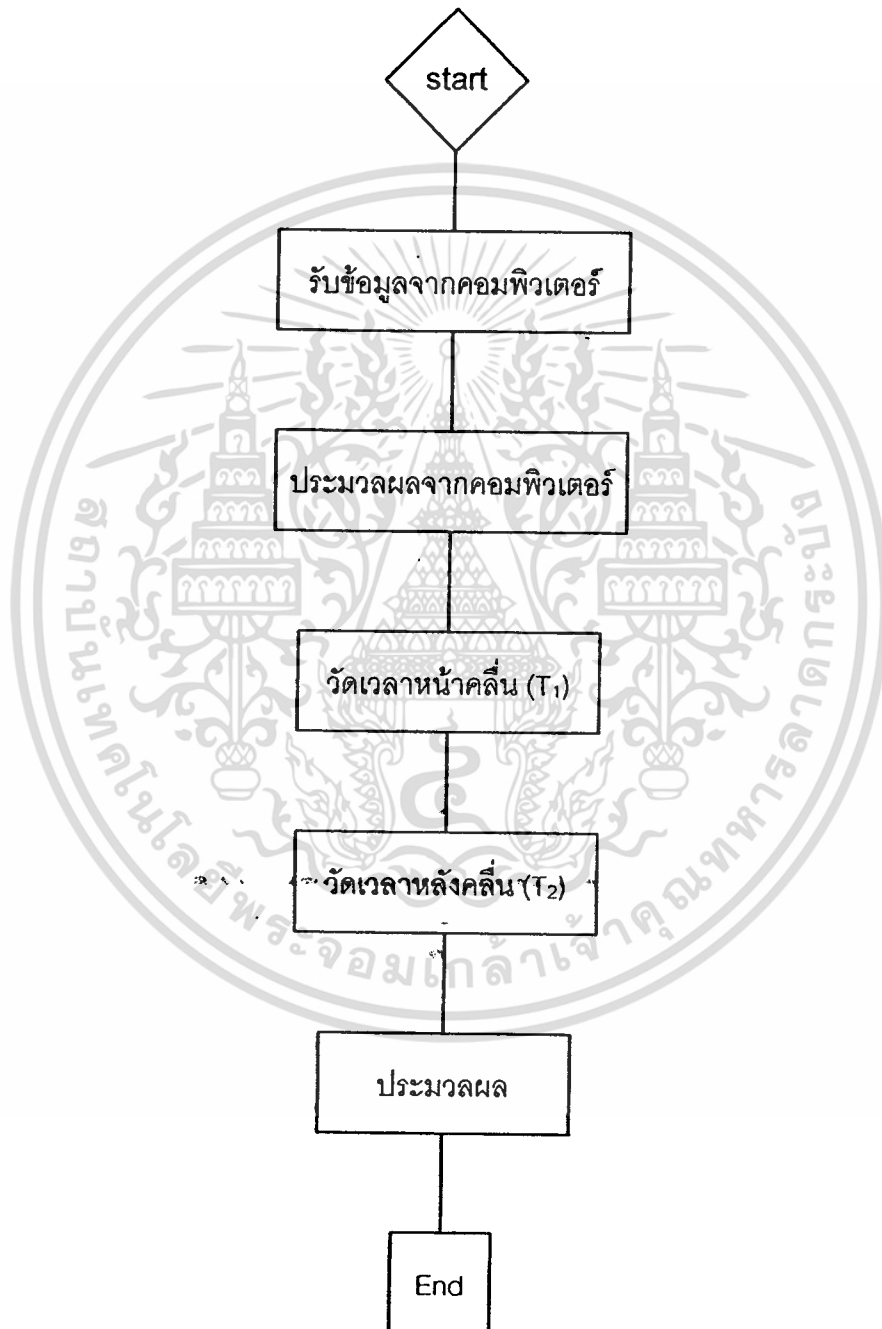
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์กระแสอิมพัลส์

- โดยที่
- 1) ดิจิตอลออสซิลอสโคป
 - 2) เครื่องคอมพิวเตอร์
 - 3) จอภาพแสดงผลโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

อนึ่งการใช้งานโปรแกรมดังกล่าวนี้จะต้องทำการติดตั้ง Labview ก่อน

4.4 โปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสมัลส์

โปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสมัลส์จะใช้การดึงค่าจากออสซิลโลสโคปมาวิเคราะห์ค่ายอด และองค์ประกอบทางเวลาของรูปคลื่นกระแสมัลส์มาตรฐาน ได้พัฒนาขึ้นมาบน Labview ดังมีรายละเอียดแสดงใน โฟลชาร์ทดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โฟลชาร์ทแสดงการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกวนนำไปใช้

บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุป

จากการทดสอบความสามารถในการวัดของระบบวัดกระแสิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้นเทียบกับระบบวัดกระแสอ้างอิง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนขององค์ประกอบทางเวลามีค่าน้อยกว่า 5 % และค่าความคลาดเคลื่อนของค่ายอดกระแสกลับขั้วน้อยกว่า 1 % ระบบวัดกระแสิมพัลส์ที่ออกแบบสร้าง มีแบนด์วิธกว้างพอที่สามารถตรวจจับรูปคลื่นกระแสิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1/20 us, 8/20 us, 4/10 us, 30/80 us โดยระบบวัดที่ทำการออกแบบสร้าง มีสเกลแฟกเตอร์ 2.9638 kA / V

5.2 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณนายณัฐพงษ์ ดรละคร, นายณพนธ์ ดีจริง, นายอาณัติ เล็กเกาะทวด, นายสุรัชย์ แสงสุรียนต์, นายอภิชาติ ศรีพานิชกิจ และนายรัฐพงษ์ ธรรมเจริญ ซึ่งได้ช่วยในการจัดสร้างและทดสอบตัววัดกระแสิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความสะดวกในการทดสอบหาคุณสมบัติของขดลวดโรกอฟสกี และสุดท้ายขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย รวมทั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้จัดสรรงบประมาณสำหรับกรทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย 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 พงกษานูบาล 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 อธิวิเศษชัย, เจษฎา มณีวงศ์ และ ชัยณรงค์ ธรรมจินดารักษ์, “การศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่ากับโครงสร้างอาคาร”, ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [7] P.Yutthagowith, N. Pattanadech, A. Kunakorn and M. Leelajindakraiererk, “**Design and Construction of a Rogowski's Coil with Compensated RC Integrator for Measuring Impulse Current**” 8th International Power Engineering Conference – IPEC, Singapore, 2007.
- [8] C. Chen, X. Jin, C. Wang and T.C. Cheng, “**An Over-Compensated Integrator Used for Measuring Impulse High-Voltage**”, 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Quebec, Canada, pp. 375-378, 1997.



หนังสือเป็นสมบัติของท่าน

โปรดช่วยกันรักษา

www.lib.kmitl.ac.th

สำนักหอสมุดกลาง โทร. 0 2739 2221

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้