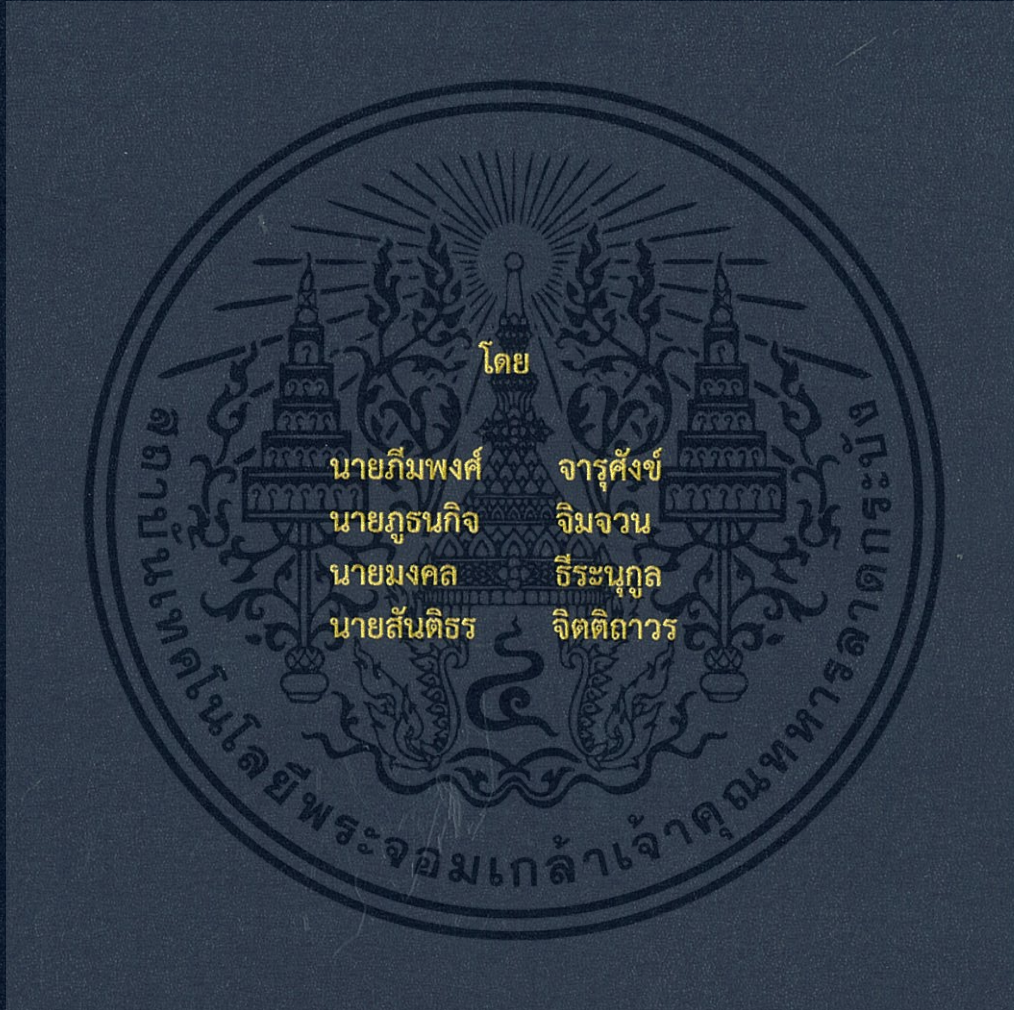


อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับการวัดกระแสอิมพัลส์
HIGH PERFORMANCE TRANSDUCER DEVICE FOR IMPULSE CURRENT
MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับการวัดกระแสอิมพัลส์
HIGH PERFORMANCE TRANSDUCER DEVICE FOR IMPULSE CURRENT
MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HIGH PERFORMANCE TRANSDUCER FOR IMPULSE CURRENT
MEASUREMENT



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 2017 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับการวัดกระแสอิมพัลส์
HIGH PERFORMANCE TRANSDUCER DEVICE FOR IMPULSE CURRENT
MEASUREMENT



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.พีรวิทย์ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์

ผู้จัดทำ

1. นายภิมพงศ์ จารุสังข์
2. นายภูธนกิจ จิมจวน
3. นายมงคล ธีระนุกูล
4. นายสันติธร จิตตถาวร



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับการวัดกระแสอิมพัลส์

นาย ภูมิพงศ์ จารุคงษ์

นาย ภูธนกิจ จิมจวน

นาย มงคล ชีระนุกูล

นาย สันติธร จิตติถาวร

ผศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบ การสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานเพื่อใช้วัดกระแสอิมพัลส์ วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานทำหน้าที่อินทิเกรตสัญญาณป้อนเข้าและไม่จำเป็นต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจร โดยรูปคลื่นที่อินทิเกรตจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางเวลาของวงจร (Time constant : T) ขดลวดโรกอฟสกีจะพันอยู่บนแกนกระดาษอัดซึ่งกระดาษอัดเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กจึงไม่ทำให้เกิดการอิ่มตัวที่สนามแม่เหล็กมีค่าสูง ส่วนวงจรอินทิเกรตจะประกอบด้วยวงจร RC ทำการขยายสัญญาณให้ได้รูปคลื่นที่มีค่าใกล้เคียงกับกระแสอิมพัลส์ ซึ่งไม่ถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนและสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป จากผลการทดลองพบว่าขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ประกอบสร้างขึ้นสามารถวัดกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน (Steep impulse current) รูปคลื่น $1/20 \mu s$ กระแสอิมพัลส์สูง (High impulse current) รูปคลื่น $4/10 \mu s$ และกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse current) รูปคลื่น $8/20 \mu s$ ได้ค่อนข้างแม่นยำตามมาตรฐานสากลและเป็นที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HIGH PERFORMANCE TRANSDUCER DEVICE FOR IMPULSE CURRENT MEASUREMENT

Peampong

Charusankha

Phutanakit

Jimjuan

Mongkol

Theeranukul

Santithorn

Jittithaworn

Assist.Prof.Dr. Peerawut Yutthagowith Advisor

Year 2017

ABSTRACT

This thesis presents the design and construction of a Rogowski Coil and a passive RC integrator to measure impulse currents. The passive RC integrator performs to integrate input signal and doesn't need to use electronic circuit. The integrated signals depend on the time constant of the circuit (Time constant: τ). The Rogowski Coil is wrapped around hardboard core. The material is not magnetic material that cause of high saturation magnetic field. The output waveforms from the integrator are close to an impulse current that not disturbed by noises and can be measured by digital oscilloscope. The results showed that the Rogowski Coil and the passive RC integrator can precisely measure steep impulse current (waveform of $1/20 \mu\text{s}$), high impulse current (waveform of $4/10 \mu\text{s}$) and lightning impulse current (waveform of $8/20 \mu\text{s}$).

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขอขอบคุณ ผศ.ดร.พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณบุญยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย สมบูรณ์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณอติศ เลหาวัฒนเสรี คุณวรารกร ชลปฐมพิกุลเลิศ คุณภัทริน กิจเจริญ และคุณ ณัฐพล มฤคทัต พี่ปริญญาโทที่คอยให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำอย่างใกล้ชิด ช่วยเหลือในการสร้างชิ้นงาน และการทดลองผลมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน ที่ร่วมฝ่าฟันและช่วยเหลือกันมา

ขอขอบคุณทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้บสนับสนุนในการทำชิ้นงานเพื่อประกอบการใช้งานในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายทางคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุน ด้านทุนทรัพย์และให้กำลังใจ ในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ||| และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน	5
2.2 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี	6
2.2.1 การพันขดลวดโรกอฟสกี	6
2.3 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator)	8
2.4 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	10
2.5 การป้องกันแรงดันเกินเสิร์จด้วยกับดักเสิร์จ	12
2.5.1 กับดักเสิร์จชนิด SiC	12
2.5.2 กับดักเสิร์จชนิด MO (ZnO)	13
2.5.3 ลักษณะเส้นแรงดัน-กระแส (U-I) ของกับดักเสิร์จ	14
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	16
3.1 การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกี	16
3.1.1 แถบกว้างความถี่และอัตราขยายของระบบ	16
3.1.2 แกนขดลวด	17
3.1.3 ขดลวด	18
3.1.4 ซีลด์	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 การออกแบบและสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	21
3.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบวัดกระแสอิมพัลส์	22
3.4 ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ทำการประกอบสร้าง	23
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	25
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	25
4.2 ตารางการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง	26
4.3 การทดสอบวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ โดยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	28
4.3.1 วงจรทดสอบจริง	28
4.3.1.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μs	28
4.3.1.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs	28
4.3.1.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs	29
4.3.2 วิธีการทดสอบ	30
4.3.3 ผลการทดสอบ	30
4.3.3.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μs	30
4.3.3.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs	32
4.3.3.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs	34
4.4 การทดสอบกับดักฟ้าผ่า โดยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	36
4.4.1 วงจรทดสอบจริง	36
4.4.1.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μs	36
4.4.1.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs	37
4.4.1.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs	38
4.4.2 วิธีการทดสอบ	38
4.4.3 ผลการทดสอบ	39
4.4.3.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μs	39
4.4.3.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs	41
4.4.3.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	46
5.1 สรุปผลการทดลอง	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	46
5.3 ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก	49
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	50
ภาคผนวก ข เอกสารประกอบ Metal Oxide Varistors 7D220K	56
ประวัติผู้เขียน	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา vj จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 62475	5
2.2	ขดลวดโรกอฟสกีคล้องตัวนำในอากาศ	7
2.3	วงจรมุมของวงจรรวมอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator)	9
2.4	ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรวมอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator)	10
2.5	วงจรมุมของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรวมอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	10
2.6	ผลตอบสนองความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรวมอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	12
2.7	แรงดันสปาร์กผ่านและแรงดันที่เหลือของกัปดักเสิร์จเทียบกับแรงดันเกินเสิร์จและการฉนวน	13
2.8	ตัวอย่างกัปดักเสิร์จชนิด SiC	13
2.9	โครงสร้างของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO	14
2.10	ตัวอย่างกัปดักเสิร์จชนิด ZnO	14
2.11	ความสัมพันธ์ของ U-I ของกัปดักชนิด SiC เปรียบเทียบกับ ZnO	15
3.1	องค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน	16
3.2	Transfer Impedance ของวงจรวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรวมอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ชนิด RC	16
3.3	รัศมีวงในและวงนอกของแกนขดลวด	17
3.4	ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงแกนขดลวดวงในและวงนอก	18
3.5	การพันขดลวด	18
3.6	โครงสร้างซีลด์ของขดลวดโรกอฟสกี	19
3.7	โครงสร้างซีลด์ฝั่งซ้ายของขดลวดโรกอฟสกี	19
3.8	โครงสร้างซีลด์ฝั่งขวาของขดลวดโรกอฟสกี	20
3.9	Top view ซีลด์ของขดลวดโรกอฟสกี	20
3.10	Side view ซีลด์ของขดลวดโรกอฟสกี	21
3.11	วงจรถดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรวมอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ชนิด RC	21
3.12	แกนพันขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการประกอบสร้าง	23
3.13	ขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการประกอบสร้าง	23
3.14	วงจรรวมอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ทำการประกอบสร้าง	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.1	วงจรถอดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s	28
4.2	วงจรถอดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μ s	29
4.3	วงจรถอดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s	29
4.4	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	30
4.5	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	31
4.6	ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	31
4.7	เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s จากผลการจำลอง โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	32
4.8	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μ s โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	32
4.9	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μ s โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	33
4.10	ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μ s โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	33
4.11	เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μ s จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μ s จากผลการจำลอง โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	34
4.12	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	34
4.13	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	35
4.14	ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	35
4.15	เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s จากผลการจำลอง โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	36
4.16	วงจรถอดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s	37
4.17	วงจรถอดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μ s	37
4.18	วงจรถอดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s	38
4.19	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	39
4.20	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	40
4.21	ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	40
4.22	เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s จากผลการจำลอง โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	41
4.23	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μ s โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.24	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ 4/10 μ s โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	42
4.25	ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ 4/10 μ s โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	42
4.26	เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ 4/10 μ s จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ 4/10 μ s จากผลการจำลอง โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	43
4.27	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ 8/20 μ s โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	43
4.28	ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ 8/20 μ s โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	44
4.29	ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ 8/20 μ s โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	44
4.30	เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ 8/20 μ s จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ 8/20 μ s จากผลการจำลอง โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)	45



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	แผนการดำเนินงาน	3
2.1	ค่ากำหนดความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสมัลส์	6
4.1	รูปคลื่นกระแสมัลส์ 1/20 μ s กรณีไม่ติดตั้ง Arrester	26
4.2	รูปคลื่นกระแสมัลส์ 8/20 μ s กรณีไม่ติดตั้ง Arrester	26
4.3	รูปคลื่นกระแสมัลส์ 4/10 μ s กรณีไม่ติดตั้ง Arrester	26
4.4	รูปคลื่นกระแสมัลส์ 1/20 μ s กรณีติดตั้ง Arrester	27
4.5	รูปคลื่นกระแสมัลส์ 8/20 μ s กรณีติดตั้ง Arrester	27
4.6	รูปคลื่นกระแสมัลส์ 4/10 μ s กรณีติดตั้ง Arrester	27
4.7	ผลของการวัดกระแสมัลส์ กรณีไม่ได้ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	45
4.8	ผลของการวัดกระแสมัลส์ กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	45



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นอยู่อย่างเสมอ เมื่อเกิดฟ้าผ่าจะเกิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากๆ เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่สั้นและเร็วมากๆ โดยในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงนั้นเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ว่า กระแสอิมพัลส์ ซึ่งกระแสอิมพัลส์ที่มีใช้งานในทางปฏิบัติเป็นกระแสที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ โดยจะสร้างกระแสที่มีขนาดและรูปลักษณ์เสมือนกระแสฟ้าผ่า ประโยชน์เพื่อใช้ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่าและการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดจากผลของปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ซึ่งโดยทั่วไปอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงส่วนใหญ่จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า คือ กับดักฟ้าผ่า เพื่อป้องกันความเสียหายและอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการเกิดฟ้าผ่าลงบนตัวอุปกรณ์ แต่ก่อนที่จะนำกัสดักฟ้าผ่ามาติดตั้งใช้งานจริง จะต้องมีการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60099-4 เพื่อตรวจสอบความคงทนต่อกระแสฟ้าผ่าและแรงดันคงเหลือ ซึ่งการทดสอบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จะต้องมีการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 62475 โดยทำการจ่ายกระแสอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์เพื่อทำการตรวจสอบ

การวัดกระแสอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์นั้นมีหลายวิธี โดยทั่วไปจะนิยมวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ ซึ่งการวัดด้วยความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำนั้นจะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้วัดมีขนาดใหญ่ตามขนาดกระแสใช้งาน ยิ่งขนาดกระแสสูง ราคาจะยิ่งสูงมากขึ้น มีความไม่สะดวกในการใช้งานหลายประการและเป็นโหลดของวงจรวัด ดังนั้นจึงมีอีกวิธีหนึ่งที่สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าสูง มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลารวดเร็ว และสามารถออกแบบและสร้างเองได้ไม่ยาก โดยการใช้หลักการของหม้อแปลงกระแสแบบพิเศษ คือ การวัดด้วยขดลวดโรกอฟสกี แต่การวัดด้วยขดลวดโรกอฟสกีเพียงอย่างเดียวนั้นแถบกว้างความถี่ไม่เพียงพอในการวัดกระแสอิมพัลส์ จึงต้องมีการต่อยอดกับวงจรรีโมท เพื่อให้มีแถบกว้างความถี่เพียงพอในการวัดกระแสอิมพัลส์ จึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรีโมท ซึ่งเป็นวงจรรีโมทแบบเนื้องานขึ้นมา เพื่อใช้ในการวัดกระแสอิมพัลส์ที่สร้างจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงาน

1. เพื่อศึกษาการสร้างและการวัดกระแสอิมพัลส์
2. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน เพื่อใช้วัดกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 62475 และ IEC 60099-4
3. เพื่อออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน
4. เพื่อนำขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่สร้างขึ้น มาใช้วัดกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

1. ศึกษาการสร้างและการวัดกระแสอิมพัลส์
2. ศึกษาหลักการทำงานของขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน
3. ศึกษาวิธีการสร้างขดลวดโรกอฟสกี วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และการวัดกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 62475 และ IEC 60099-4
4. ออกแบบขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน
5. สร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน
6. ทดสอบวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย การสร้างและการวัดกระแสอิมพัลส์ หลักการทำงาน วิธีการสร้าง และวิธีการออกแบบขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และการวัดกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 62475 และ IEC 60099-4
2. ทำการออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน
3. ทำการทดสอบวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน บันทึกค่าที่วัดได้
4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ
5. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	พ.ศ.2560					พ.ศ.2561			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	←---→								
2. ออกแบบขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน		←---→							
3. สร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	←---→								
4. ทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ						←---→			
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ						←---→			
6. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์								←---→	

←---→ การวางแผน

←→ การดำเนินงานจริง

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการสร้างและการวัดกระแสอิมพัลส์ หลักการทำงาน วิธีการสร้างและวิธีการออกแบบขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และการวัดกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 62475 และ IEC 60099-4
2. สามารถสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สามารถใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับประกอบการเรียนการสอน และทดสอบกระแสมัลล์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการจากเครื่องกำเนิดกระแสมัลล์ได้
4. ได้ฝึกทักษะการทำงานเป็นทีมและการทำงานร่วมกับผู้อื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

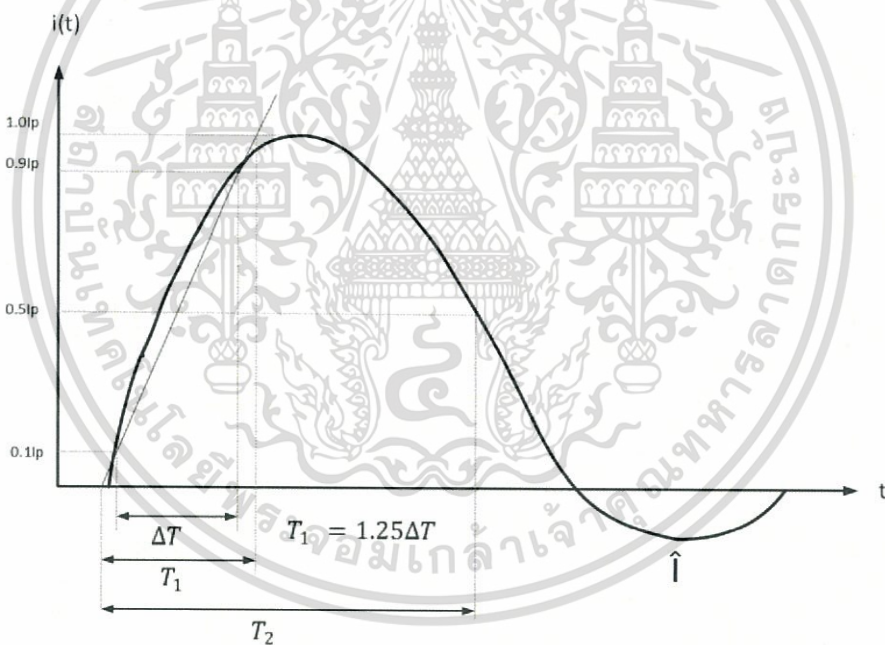
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กระแสอิมพัลส์เป็นกระแสที่สภาวะชั่วคราว (Transient state) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า กระแสอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากการทำงานของสวิตช์หรือเซอกิตเบรกเกอร์เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่า กระแสอิมพัลส์แบบสวิตชิง

การวัดกระแสอิมพัลส์โดยทั่วไปจะนิยมใช้วิธีวัดด้วยชั้นท์ความต้านทานต่ำและวัดด้วยขดลวดโรกอฟสกี ในที่นี้จะกล่าวถึงการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี

2.1 กระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน [1]

มาตรฐาน IEC 62475 ได้กำหนดลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 62475

ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ในรูปที่ 2.1 กำหนดไว้ดังนี้

1) เวลาหน้าคลื่น (T_1) เวลาหน้าคลื่นจะคำนวณจาก 1.25 เท่าของเวลาในช่วงที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มค่าจาก 10% จนถึง 90% ของค่ายอด ซึ่งจุดเริ่มต้นของกระแสอิมพัลส์ คือ จุดตัดระหว่างแกนนอนกับเส้นตรงที่ลากผ่านจุด 10% และ 90% ของค่ายอดที่ด้านหน้าคลื่น

2) เวลาหลังคลื่น (T_2) เวลาหลังคลื่นจะคำนวณเวลาจากจุดเริ่มต้นของกระแสอิมพัลส์จนถึงเมื่อกระแสอิมพัลส์ลดค่าลงสู่ค่า 50% ของค่ายอดเป็นครั้งแรก

เอกสารนี้เป็น 3) ค่ายอดกระแสชั่วตรงข้าม (\hat{I}) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสอิมพัลส์จะใช้ในการทดสอบความสามารถกับดักฟ้าผ่าในการจำกัดแรงดันเกินและการทนกระแส มาตรฐานจะกำหนดรูปคลื่นเรียกตามเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่น ($T1/T2$) ได้แก่

- 1) กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน (Steep impulse current) หรือรูปคลื่น 1/20 μs
- 2) กระแสอิมพัลส์สูง (High impulse current) หรือรูปคลื่น 4/10 μs
- 3) กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse current) หรือรูปคลื่น 8/20 μs
- 4) กระแสอิมพัลส์สวิตชิง (Switching impulse current) หรือรูปคลื่น 30/80 μs

โดยกำหนดค่าองค์ประกอบทางเวลา (Time parameters) และความคลาดเคลื่อนไว้ดังตารางที่ 2.1

กระแสอิมพัลส์นอกจากจะใช้ทดสอบกับกับดักฟ้าผ่าแรงสูงแล้วยังมีรูปคลื่นอื่นที่ใช้ในการทดสอบระบบและอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ได้แก่ กระแสฟ้าผ่าแรกช่วงคลื่นสั้น (First short stroke lightning current) มีรูปคลื่นเป็น 10/350 μs และกระแสฟ้าผ่าซ้ำ (Subsequence stroke lightning current) มีรูปคลื่นเป็น 0.25/100 μs ซึ่งนอกขอบเขตที่จะกล่าวถึงในที่นี้

ตารางที่ 2.1 ค่ากำหนดความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

องค์ประกอบรูปคลื่น	ความคลาดเคลื่อน
เวลาหน้าคลื่น ($T1$)	$\pm 10\%$
เวลาหลังคลื่น ($T2$)	$\pm 10\%$ (รูปคลื่นกระแส 1/20 μs $T2 \leq 20 \mu\text{s}$)
ค่ายอดกระแส (I_p)	$\pm 10\%$
ค่ายอดกระแสกลับหัว (\hat{I})	ไม่เกิน 20% ของค่ายอดกระแส

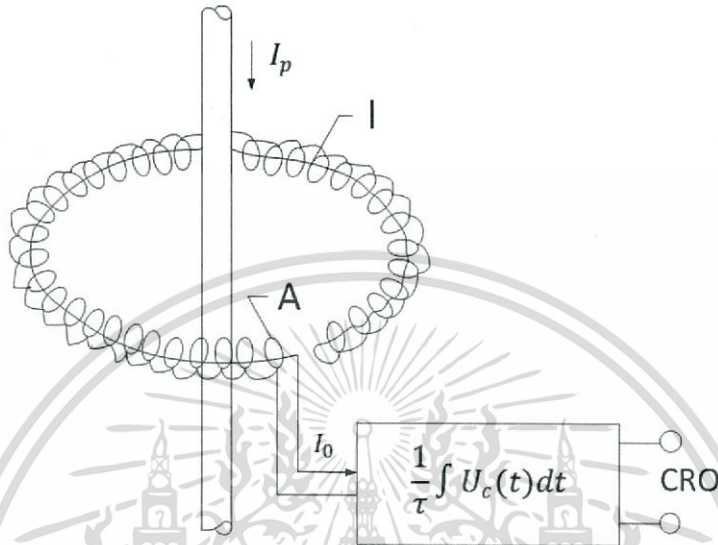
2.2 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี [2]

การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี เป็นการวัดกระแสโดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแส (Current transformer) แบบพิเศษ กล่าวคือ ขดลวดโรกอฟสกีเป็นอุปกรณ์วัดกระแส โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแส ซึ่งทำให้เกิดการสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กนี้ไปคล้องขดลวดที่พันรอบแกนที่ไม่เป็นแม่เหล็กที่วางอยู่รอบตัวนำที่มีกระแสที่ต้องการวัดไหลผ่านอยู่ จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายขดลวด ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของกระแส ค่าแรงดันที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนกับรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวนำนั้น ถ้านำแรงดันเหนี่ยวนำนี้ไปผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสม ก็จะได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดอย่างถูกต้อง

2.2.1 การพันขดลวดโรกอฟสกี

การวัดกระแสอิมพัลส์ที่อาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก จะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อพื้นที่หน้าตัดและความถี่ของจำนวนรอบสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาวแกน และอีกประการหนึ่ง

สนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดต้องมาจากแหล่งกำเนิดที่เกิดจากกระแสที่ต้องการวัดเพียงอย่างเดียว ไม่มีผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีการพันขดลวดโรกอฟสกีที่มีลักษณะพิเศษ คือ ต้องมีการพันย้อนกลับเข้าไปภายในขดลวดอีกหนึ่งรอบ ดังรูปที่ 2.2 ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน



รูปที่ 2.2 ขดลวดโรกอฟสกีคล้องตัวนำในอากาศ

ในรูปที่ 2.2 ขดลวดโรกอฟสกีคล้องตัวนำที่มีกระแสไหล I_p โดยอาศัยกฎของแอมแปร์จะให้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวด ซึ่งอยู่ห่างจากตัวนำในแนวรัศมีเท่ากับ x ตามสมการที่ 2.1

$$H_x = \frac{I_p}{l} \quad (2.1)$$

ขดลวดวางอยู่ในอากาศ จะให้ความหนาแน่นเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก ณ จุดนั้น ตามสมการที่ 2.2

$$B_x = \mu_0 H_x = \mu_0 \frac{I_p}{l} \quad (2.2)$$

ถ้าขดลวดมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A มีจำนวนรอบทั้งหมด N รอบและมีความยาว l จะสามารถหาค่าฟลักซ์ที่วิ่งผ่านคัลล์งขดลวดได้ ตามสมการที่ 2.3

$$\phi = \frac{\mu_0 A I_p}{l} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎของฟาราเดย์ จะสามารถหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดจำนวน N รอบได้ตามสมการที่ 2.4

$$U_c(t) = M \frac{dI_p}{dt} \quad (2.4)$$

โดยที่ M คือ ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดโรกอฟสกีกับตัวนำที่มีกระแส I_p ไหลผ่านตามสมการที่ 2.5

$$M = \frac{N\mu_0 A}{l} \quad (2.5)$$

และสามารถหากระแส I_p ที่ไหลผ่านตัวนำได้ ตามสมการที่ 2.6

$$I_p = \frac{1}{M} \int U_c(t) dt \quad (2.6)$$

จะเห็นได้ว่าการวัดกระแสฮิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีนั้นจะต้องทำการอินทิเกรตแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด โดยขนาดแรงดันเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางเวลา (τ) ตามสมการที่ 2.7

$$V_m = \frac{1}{\tau} \int U_c(t) dt \quad (2.7)$$

โดยที่มี H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) (A/m)

B คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Magnetic field density) (Wb/m²)

μ_0 คือ เปรอริมิตติวิตีสัมพัทธ์ของอากาศ (Permittivity) (F/m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m²)

N คือ จำนวนรอบขดลวดทั้งหมด (turn)

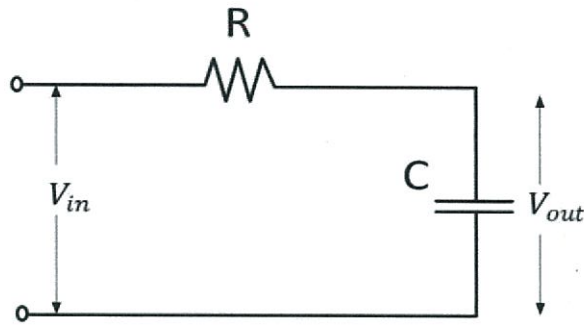
l คือ ความยาวของขดลวด (m)

M คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดโรกอฟสกีกับตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน (H)

2.3 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator) [3]

ทำหน้าที่อินทิเกรตสัญญาณป้อนเข้า โดยรูปคลื่นที่อินทิเกรตจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางเวลาของวงจร (Time constant : τ) โดยมีวงจรสมมูลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator)

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.8

$$V_{out}(t) = V_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt \quad (2.8)$$

เมื่อทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ จะได้ตามสมการที่ 2.9

$$V_{out}(s) = \frac{I_c(s)}{sC} \quad (2.9)$$

จากความสัมพันธ์ ตามสมการที่ 2.10

$$V_{in}(t) = Ri_c(t) + V_c(t) \quad (2.10)$$

เมื่อทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่จะได้ตามสมการที่ 2.11

$$V_{in}(s) = RI_c(s) + \frac{I_c(s)}{sC} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.9 และ 2.11 สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามสมการที่ 2.12

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{sRC + 1} \quad (2.12)$$

และเมื่อคำนวณหาค่าความถี่ตัด (Cut-off frequency : f_c) ของวงจรสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันถ่ายโอนของขดลวดโรกอฟสกีเป็นไปตามสมการที่ 2.14

$$\frac{V_{out1}(s)}{V_{in1}(s)} = \frac{R_m}{sL + R_m} \quad (2.14)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรินทเกรตเป็นไปตามสมการที่ 2.15

$$\frac{V_{out2}(s)}{V_{in2}(s)} = \frac{1}{1 + sRC} \quad (2.15)$$

เนื่องจาก $V_{out1}(s)$ มีค่าเท่ากับ $V_{in2}(s)$ ดังนั้นจะได้สมการที่ 2.16

$$\frac{V_{out2}(s)}{V_{in1}(s)} = \frac{\left(\frac{R_m}{LRC}\right)}{\left(s + \frac{R_m}{L}\right)\left(s + \frac{1}{RC}\right)} \quad (2.16)$$

แต่เนื่องจาก $V_{in1}(t) = M \frac{di_{in1}(t)}{dt}$ เมื่อทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่จะได้สมการที่ 2.17

$$V_{in1}(s) = sMI_{in1}(s) \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.16 และ 2.17 จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.18

$$\frac{V_{out2}(s)}{I_{in1}(s)} = \frac{\left(\frac{sMR_m}{LRC}\right)}{\left(s + \frac{R_m}{L}\right)\left(s + \frac{1}{RC}\right)} \quad (2.18)$$

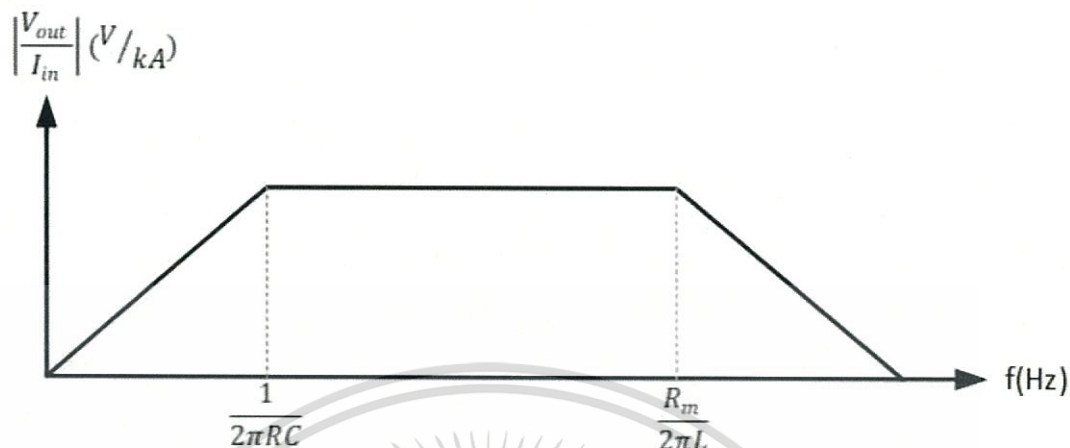
โดยอัตราขยาย (Gain) ของระบบวัดกระแสฮอลล์สามารถหาได้จากสมการ

$$Gain = \frac{L}{nRC} \quad (2.19)$$

เมื่อ n คือ จำนวนรอบของขดลวด (turn)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ได้ดังรูปที่ 2.6



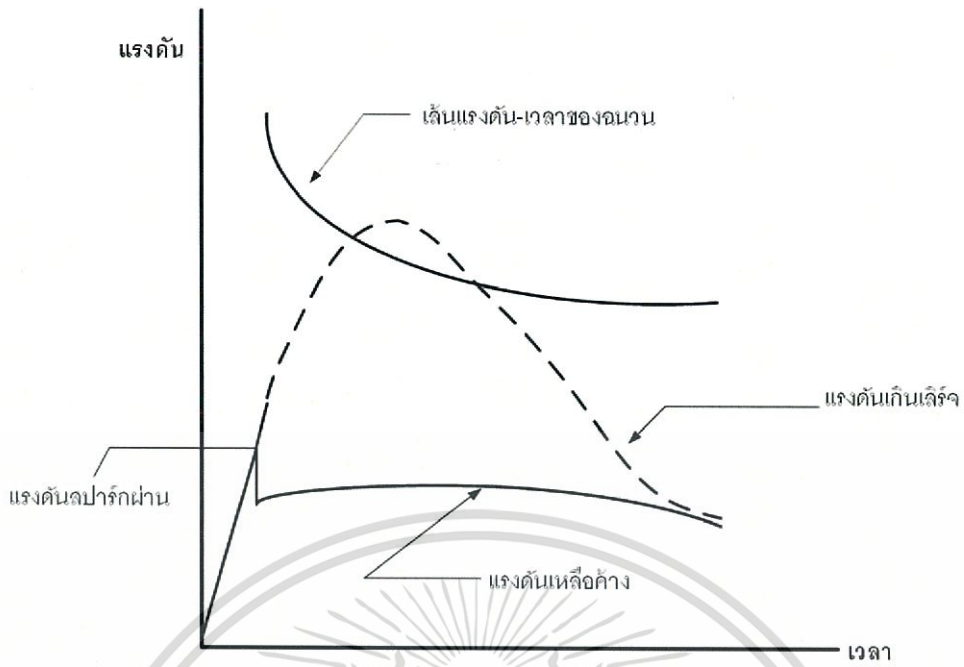
รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

2.5 การป้องกันแรงดันเกินเสิร์จด้วยกัปเดตักเสิร์จ [2]

กัปเดตักเสิร์จหรือกัปเดตักฟ้าผ่า (Lightning arrester) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ ฟ้าผ่ากับแรงดันเกินเสิร์จสวิตชิง ใช้ป้องกันอุปกรณ์สำคัญและราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อย กัปเดตักเสิร์จจะต่อคร่อมอยู่กับอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน คือ ต่ออยู่ระหว่างเฟสกับดิน กัปเดตักเสิร์จจะประกอบด้วยตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น R_{non} (Nonlinear resistors) มี 2 ชนิด คือ SiC และ ZnO มีลักษณะเป็นแผ่นกลมทรงกลมกระบอก ประกอบตั้งอยู่ในกระบอกฉนวน

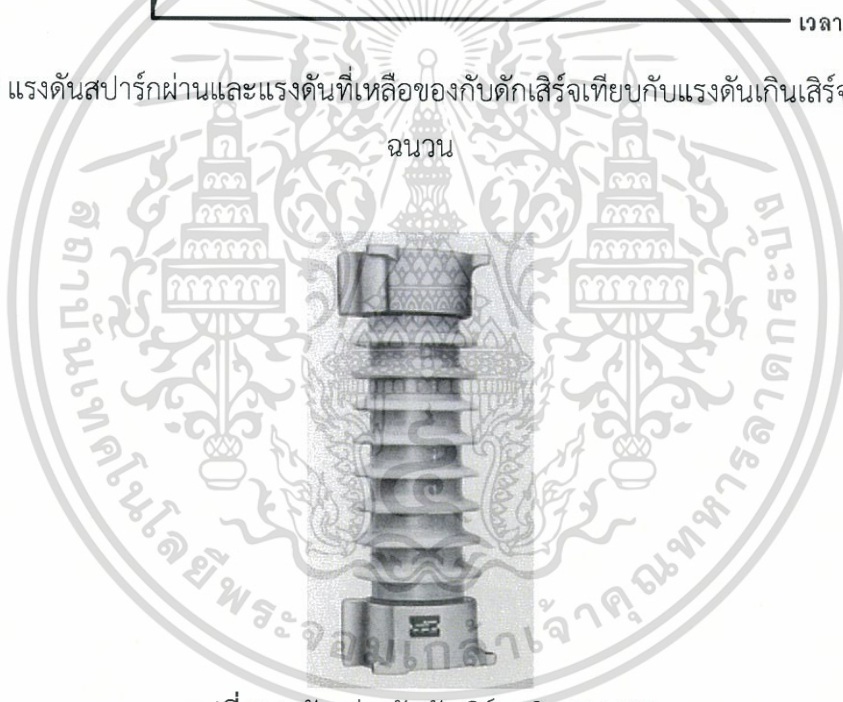
2.5.1 กัปเดตักเสิร์จชนิด SiC

กัปเดตักเสิร์จชนิด SiC จะมีสปาร์กแกปต่ออนุกรมกับความต้านทาน R_{non} สปาร์กแกปเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันพิกัดของกัปเดตักเสิร์จ ทำหน้าที่เป็นฉนวนไม่ให้กระแสไหลผ่านลงดินในขณะใช้งานที่แรงดันปกติ ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ โดยเมื่อได้รับแรงดันเกินเสิร์จ สปาร์กแกปจะต้องเบรกดาวนโดยเร็วที่สุด แรงดันที่กัปเดตักเสิร์จเกิดเบรกดาวน เรียกว่าแรงดันสปาร์กผ่าน (Sparkover voltage) ดังรูปที่ 2.7 เมื่อเกิดสปาร์กผ่านแล้ว แรงดันที่คร่อมกัปเดตักเสิร์จจะลดลง จะเป็นแรงดันที่เหลือคร่อมความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นของกัปเดตักเสิร์จ เรียกว่าแรงดันที่เหลือ (Residual voltage) ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนอยู่ได้ของการฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบ



รูปที่ 2.7 แรงดันสปาร์กผ่านและแรงดันที่เหลือของกั๊บดักเล็ร์จเทียบกับแรงดันเกินเล็ร์จและการ

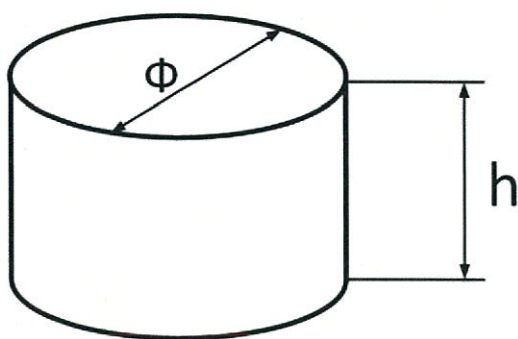
ฉนวน



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกั๊บดักเล็ร์จชนิด SiC [4]

2.5.2 กั๊บดักเล็ร์จชนิด MO (ZnO)

กั๊บดักเล็ร์จชนิดออกไซด์โลหะ (Metal oxide arresters) จะใช้ความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น R_{non} ทำด้วย ZnO มีลักษณะเป็นแท่งกลมทรงกระบอกวางซ้อนกัน บรรจุในกระบอกฉนวนดังรูปที่ 7.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ϕ ของแท่ง ZnO เป็นตัวกำหนดขนาดกระแส หรือพลังงานเล็ร์จที่ยอมให้ผ่าน ส่วนความสูง h เป็นตัวกำหนดแรงดัน



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของกั๊บดักเสิร์จชนิด ZnO



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกั๊บดักเสิร์จชนิด ZnO [5]

2.5.3 ลักษณะเส้นแรงดัน-กระแส (U-I) ของกั๊บดักเสิร์จ

ความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทาน R_{non} ทั้งชนิด SiC และ ZnO ทำให้กระแสไหลผ่านและแรงดันคร่อมความต้านทาน R_{non} มีลักษณะที่อาจเขียนแทนได้ด้วยความสัมพันธ์ ตามสมการที่ 2.20

$$I = kU^\alpha \quad (2.20)$$

โดยที่มี α คือ ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุของ R_{non}

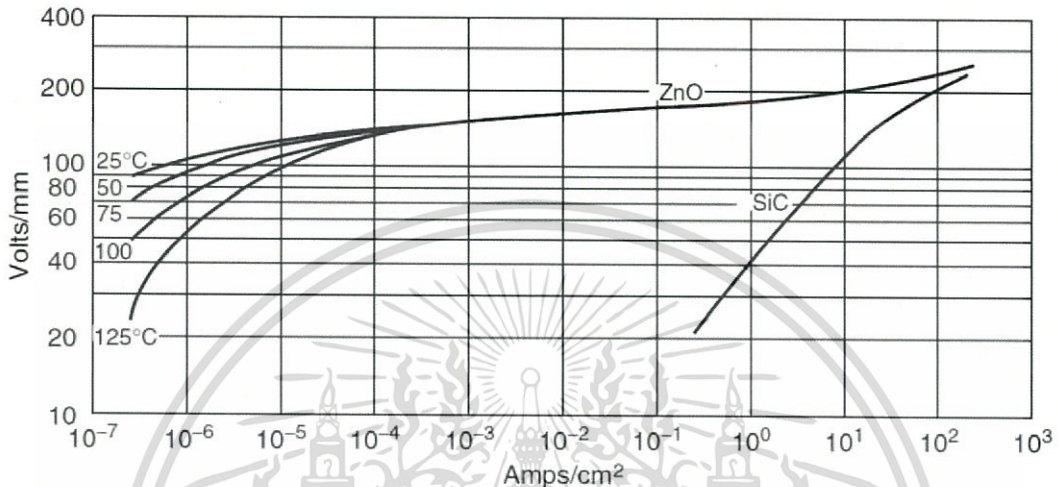
$\alpha = 4-6$ สำหรับ SiC

$\alpha = 20-30$ สำหรับ ZnO

k = ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับวัสดุและขนาดของเกรน R_{non} ถ้าเกรนยิ่งเล็ก ความคงทนต่อแรงดันยิ่งสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดันใช้งาน กระแสรั่วไหลผ่าน R_{non} ของกั๊บดั๊กชนิด ZnO มีค่าต่ำ คือ น้อยกว่า 1 mA จึงไม่ต้องมีแกปอนุกรมกับ R_{non} เรียกว่า กั๊บดั๊กไร้แกป (Gapless arrester) ส่วนชนิด SiC จะมีกระแสไหลผ่านในช่วง 100-500 A จึงต้องใส่แกปอนุกรมกับความต้านทาน R_{non} ลักษณะ U-I ของกั๊บดั๊กทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของ U-I ของกั๊บดั๊กชนิด SiC เปรียบเทียบกับ ZnO [6]

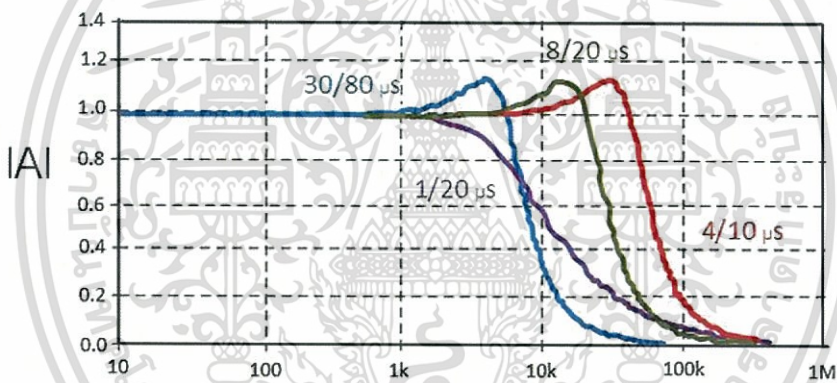
บทที่ 3

การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

3.1 การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกี

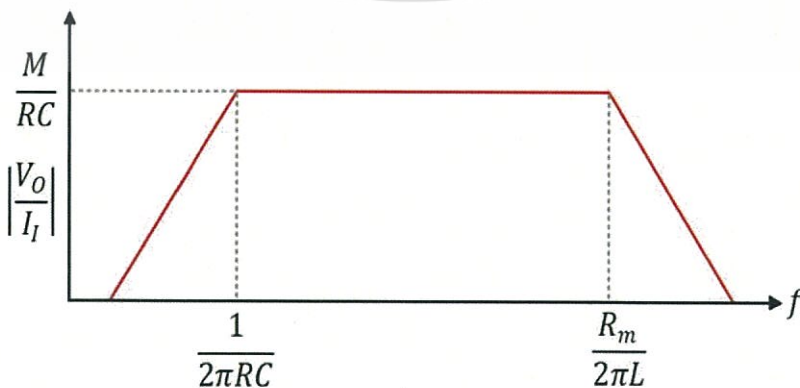
3.1.1 แถบกว้างความถี่และอัตราขยายของระบบ

การออกแบบขดลวดโรกอฟสกีเพื่อทำการวัดกระแสอิมพัลส์ จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะองค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ในแต่ละแบบ ซึ่งหาได้จากการหาค่าการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐานได้ผลดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานแบบ $1/20 \mu\text{s}$ $4/10 \mu\text{s}$ $8/20 \mu\text{s}$ และ $30/80 \mu\text{s}$ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการออกแบบกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของขดลวดโรกอฟสกีและระบบวัด โดยระบบวัดที่ออกแบบจะต้องมีแถบกว้างความถี่ครอบคลุมองค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัดทั้งหมด เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำ



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

จากวงจรวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ชนิด RC ทำการหาค่า Transfer Impedance ของระบบได้ผลดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Transfer Impedance ของวงจรวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ: อินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ชนิด RC อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 ความถี่ขอบบนของแถบกว้างความถี่ควรมีค่า ≥ 1 MHz ออกแบบโดยกำหนดให้ค่าความถี่ขอบบนมีค่าเท่ากับ 2.02 MHz และกำหนดให้ค่าความต้านทานแมชชิงมีค่าเท่ากับ 75 Ω ซึ่งจะได้สมการตามเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

$$f_H = \frac{R_m}{2\pi L} \quad (3.1)$$

$$2.02 \times 10^6 = \frac{75}{2\pi L}$$

$$L = 5.9 \mu H$$

และออกแบบอัตรายบายโดยกำหนดให้แรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 1 V เมื่อกระแสอิมพัลส์ขาเข้ามีค่าเท่ากับ 10 kA เนื่องจากออสซิลโลสโคปห้ามให้มีแรงดันที่วัดเกิน 50 V เพราะจะทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายและส่งผลกระทบต่อวงจรได้ แสดงดังสมการต่อไปนี้

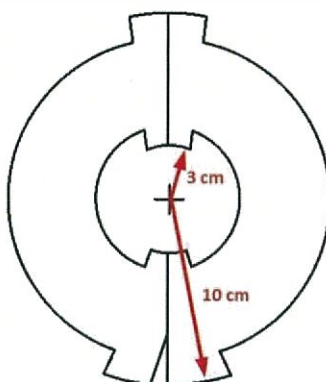
$$G = \frac{V_o}{I_r} \quad (3.2)$$

$$G = \frac{1}{10^4}$$

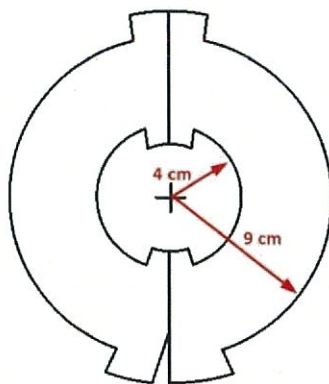
3.1.2 แกนขดลวด

ออกแบบโดยใช้กระดาษอัดเป็นแกนเพื่อพันขดลวด เนื่องจากกระดาษอัดมีความแข็งแรง ราคาถูก และเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก คือ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ใกล้เคียงกับอากาศ ทำให้แกนขดลวดไม่เกิดการอิ่มตัวเมื่อนำไปวัดกระแสอิมพัลส์ ซึ่งเป็นกระแสที่มีขนาดสูงและมีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาอย่างรวดเร็ว

แกนขดลวดได้จากการตัดกระดาษอัดเป็นรูปทอรอยด์ ออกแบบโดยกำหนดให้รัศมีวงในมีระยะเท่ากับ 3 cm รัศมีวงนอกมีระยะเท่ากับ 10 cm ความยาวของระยะจากจุดศูนย์กลางถึงแกนพันขดลวดวงในมีระยะเท่ากับ 4 cm ความยาวของระยะจากจุดศูนย์กลางถึงแกนพันขดลวดวงนอกมีระยะเท่ากับ 9 cm และความหนาของแกนเท่ากับ 2 cm ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.3 รัศมีวงในและวงนอกของแกนขดลวดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

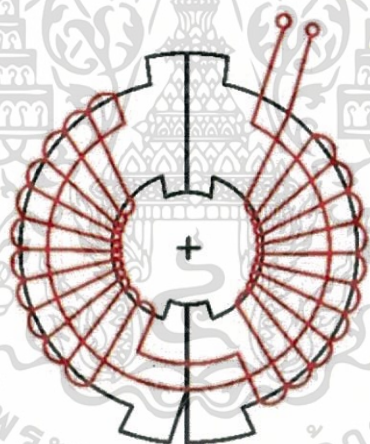


รูปที่ 3.4 ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงแกนขดลวดวงในและวงนอก

3.1.3 ขดลวด

การพันขดลวดโรกอฟสกีมีลักษณะพิเศษ คือ ต้องมีการพันขดลวดย้อนกลับเข้าภายในขดลวดอีกหนึ่งรอบ เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน

ออกแบบโดยให้จำนวนรอบของขดลวดที่พันรอบแกนมีค่าเท่ากับ 26 รอบ เพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 คือ $5.9 \mu\text{H}$ แสดงดังรูปที่ 3.5

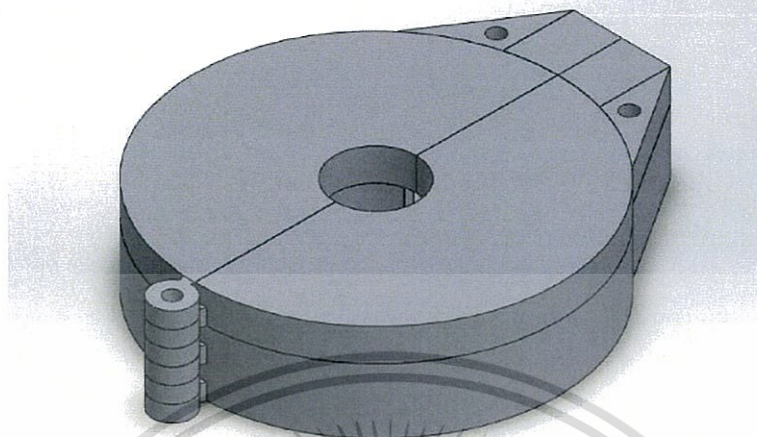


รูปที่ 3.5 การพันขดลวด

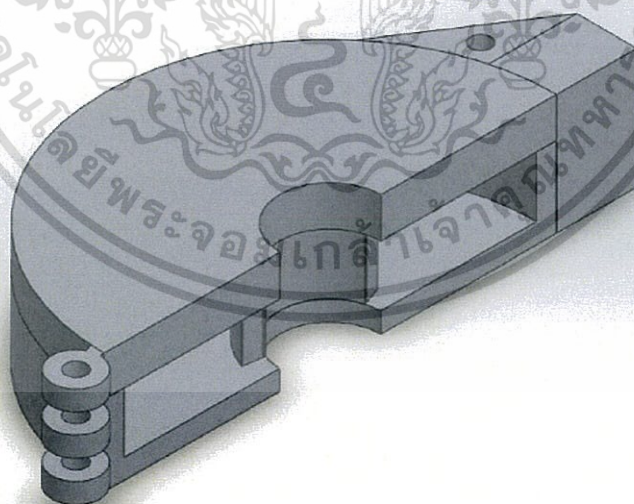
3.1.4 ซิลด์

ออกแบบซิลด์โดยให้ขดลวดโรกอฟสกีสามารถแค้มป์ได้ เพื่อความสะดวกในการติดตั้ง อุปกรณ์ในวงจรวัดกระแสฮอลล์ วัสดุที่ใช้ในการสร้างซิลด์ คือ พลาสวูด (Plaswood) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีลักษณะเบา มีความคงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดี มีความคงทนต่อการถูกร่อนและไม่ดูดซึมความชื้น จึงไม่บวมหรือพองเมื่อแช่น้ำ และยังมีคุณสมบัติป้องกันไฟฟ้าสถิต ป้องกันประกายไฟ หรือเชื้อราที่ จะมากัดกินให้ถูกร่อน มีความคงทนต่อสารเคมี กรดแก่ และเบสแก่ มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนและเสียง ไม่เป็นเชื้อไฟ ไม่ลามไฟ สามารถทำงานได้ด้วยเครื่องมือช่างทุกชนิด เช่น ตอกตะปู ยิงสกรู ตัดด้วยเลื่อยตัดไม้ต่างๆ โดยไม่มีการแตกหัก แสดงดังรูปที่ 3.6 ถึง 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

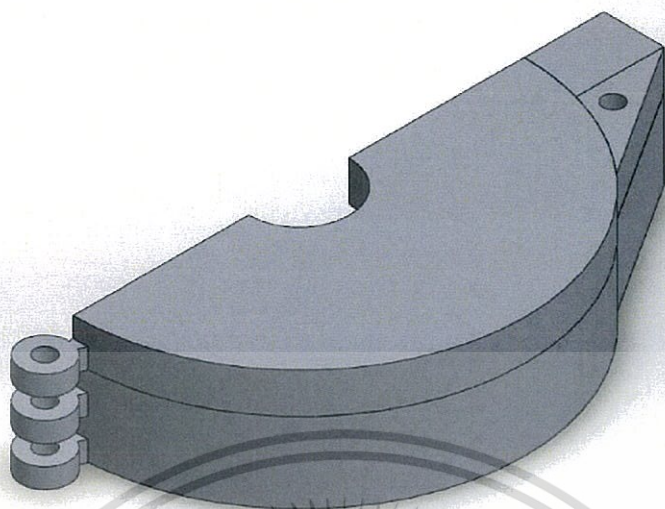


รูปที่ 3.6 โครงสร้างซีลด์ของขดลวดโรกอฟสกี



รูปที่ 3.7 โครงสร้างซีลด์ฝั่งซ้ายของขดลวดโรกอฟสกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

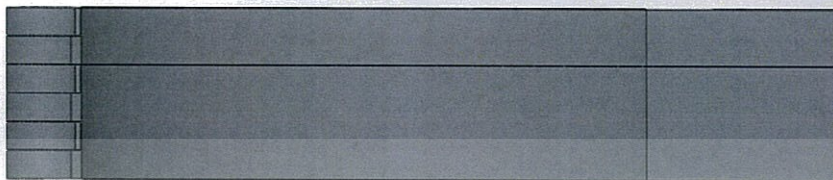


รูปที่ 3.8 โครงสร้างซีลด์ฝั่งขวาของขดลวดโรกออฟสกี



รูปที่ 3.9 Top view ซีลด์ของขดลวดโรกออฟสกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

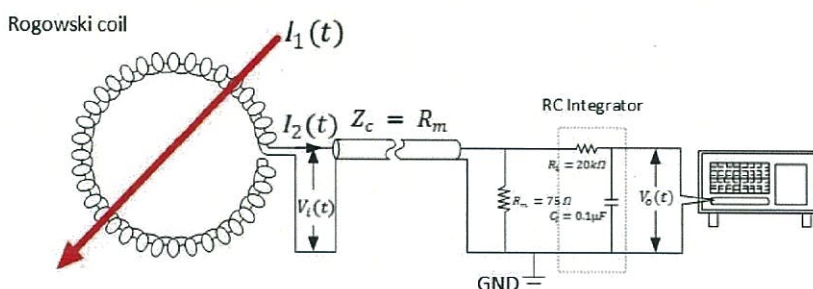


รูปที่ 3.10 Side view ซีลด์ของขดลวดโรกอฟสกี

3.2 การออกแบบและสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

การออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานเพื่อทำการวัดกระแสอิมพัลส์พัลส์ จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะองค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ในแต่ละแบบ ซึ่งหาได้จากการหาค่าการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐานได้ผลดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานแบบ $1/20 \mu\text{s}$ $4/10 \mu\text{s}$ $8/20 \mu\text{s}$ และ $30/80 \mu\text{s}$ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการออกแบบ กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและระบบวัด โดยระบบวัดที่ออกแบบจะต้องมีแถบกว้างความถี่ครอบคลุมองค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัดทั้งหมด เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำ

ออกแบบโดยใช้วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ชนิด RC เนื่องจากมีข้อดีคือสามารถตอบสนองต่อความถี่สูงได้ดีและสามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องแหล่งพลังงานใดๆ เมื่อนำมาต่อร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีจะได้วงจรแสดงดังรูปที่ 3.11



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 3.11 วงจรขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ชนิด RC โดยขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 ความถี่ขบล่างของแถบกว้างความถี่ควรมีค่า ≤ 750 Hz ออกแบบ โดยกำหนดให้ค่าความถี่ขบล่างมีค่าเท่ากับ 80 Hz ด้วยเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นนี้ สามารถนำไปหาค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุได้ ซึ่งจะได้สมการตามเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} f_L &= \frac{1}{2\pi RC} & (3.3) \\ 80 &= \frac{1}{2\pi RC} \\ RC &= 1.989 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

จากสมการที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าค่าผลคูณของค่าความต้านทานของตัวต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่จะต้องนำมาออกแบบและสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ชนิด RC นั้น จะต้องมีความเท่ากับ 1.989×10^{-3}

ออกแบบโดยกำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 20 k Ω และตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 0.1 μ F ซึ่งตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ออกแบบนั้นจะต้องสามารถหาซื้อได้จากท้องตลาดได้

3.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบวัดกระแสอิมพัลส์

จากหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 สามารถนำมาสรุปเป็นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบวัดกระแสอิมพัลส์ได้ดังนี้

ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดโรกอฟสกี

- $L = 5.9 \mu$ H

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ชนิด RC

- $R_1 = 20$ k Ω

- $C_1 = 0.1$ μ F

ค่าพารามิเตอร์ของสายโคแอกซ์เซียล

- $R_m = 75$ Ω

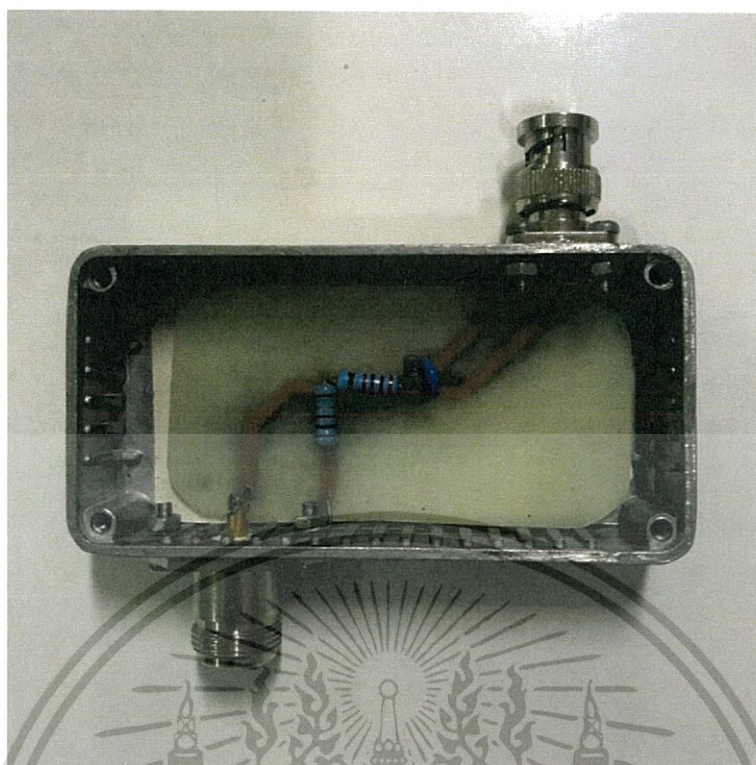
3.4 ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ทำการประกอบสร้าง



รูปที่ 3.12 แกนพันขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการประกอบสร้าง

รูปที่ 3.13 ขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ทำการประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

การทดสอบและประเมินผล จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบ การทดสอบแรก คือ การทดสอบวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ ซึ่งประกอบด้วยรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ $4/10 \mu\text{s}$ และ $8/20 \mu\text{s}$ ที่สร้างจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ร่วมกับวงจรวัด ซึ่งประกอบด้วยขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้น โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC 62475 เพื่อดูประสิทธิภาพในการวัดของวงจรวัด และการทดสอบที่สอง คือ การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า คือ กับดักฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้น

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- | | |
|--|-----------|
| 1) ขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการออกแบบและประกอบสร้าง | 1 ชุด |
| 2) วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ทำการออกแบบและประกอบสร้าง | 1 ชุด |
| 3) เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ | 1 เครื่อง |
| 4) ตัวเก็บประจุ (C) | 1 ชุด |
| 5) ตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ (L) | 1 ชุด |
| 6) ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (R) | 1 ชุด |
| 7) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป | 1 เครื่อง |
| 8) มัลติมิเตอร์ | 1 เครื่อง |
| 9) หม้อแปลงแบบแยกชุด | 1 ลูก |
| 10) สายเคเบิล RG11 | 1 เส้น |
| 11) กับดักฟ้าผ่า พิกัด 5 kA | 1 ตัว |

4.2 ตารางการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

Impulse Current Setting

ตารางการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสอิมพัลส์กรณีไม่ติดตั้ง Arrester

ตารางที่ 4.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μ s กรณีไม่ติดตั้ง Arrester

C	0.5 μ F
L	6.4 μ H
R	37.8 ohms

ตารางที่ 4.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s กรณีไม่ติดตั้ง Arrester

C	1 μ F	4 μ F
L	47.6 μ H	14.7 μ H
R	7.8 ohms	1.95 ohms

ตารางที่ 4.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μ s กรณีไม่ติดตั้ง Arrester

C	0.5 μ F	1 μ F
L	22.2 μ H (min)	8.6 μ H
R	-	3.9 ohms

ตารางการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสลิมพัลส์กรณีติดตั้ง Arrester

ตารางที่ 4.4 รูปคลื่นกระแสลิมพัลส์ 1/20 μ s กรณีติดตั้ง Arrester

C	0.5 μ F
L	6.4 μ H
R	37.8 ohms

ตารางที่ 4.5 รูปคลื่นกระแสลิมพัลส์ 8/20 μ s กรณีติดตั้ง Arrester

C	1 μ F	4 μ F
L	50.2 μ H	10.6 μ H
R	7.8 ohms	1 ohm

ตารางที่ 4.6 รูปคลื่นกระแสลิมพัลส์ 4/10 μ s กรณีติดตั้ง Arrester

C	1 μ F
L	8.6 μ H
R	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

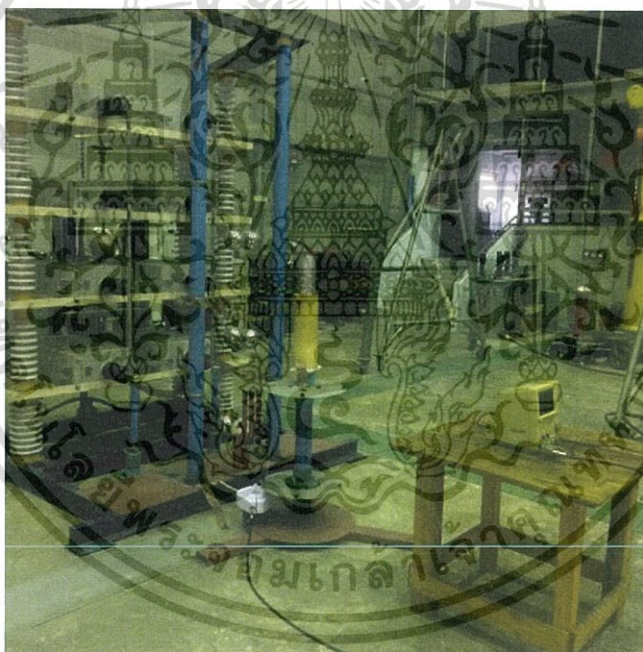
4.3 การทดสอบวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ โดยชดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

การทดสอบวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ที่สร้างจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยชดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ทำการทดสอบทั้งหมด 3 รูปคลื่น ได้แก่ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ $4/10 \mu\text{s}$ และ $8/20 \mu\text{s}$

4.3.1 วงจรทดสอบจริง

4.3.1.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$

การสร้างกระแสอิมพัลส์ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ตามตารางการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสอิมพัลส์กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดย C มีค่าเท่ากับ $0.5 \mu\text{F}$ L มีค่าเท่ากับ $6.4 \mu\text{H}$ และ R มีค่าเท่ากับ 37.8Ω



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$

4.3.1.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $4/10 \mu\text{s}$

การสร้างกระแสอิมพัลส์ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $4/10 \mu\text{s}$ จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ตามตารางการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสอิมพัลส์กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดย C มีค่าเท่ากับ $1 \mu\text{F}$ L มีค่าเท่ากับ $8.6 \mu\text{H}$ และ R มีค่าเท่ากับ 3.9Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs

4.3.1.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs

การสร้างกระแสอิมพัลส์ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ตามตารางการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสอิมพัลส์กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดย C มีค่าเท่ากับ 1 μF L มีค่าเท่ากับ 47.6 μH และ R มีค่าเท่ากับ 7.8 Ω



รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ในวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ประกอบด้วย

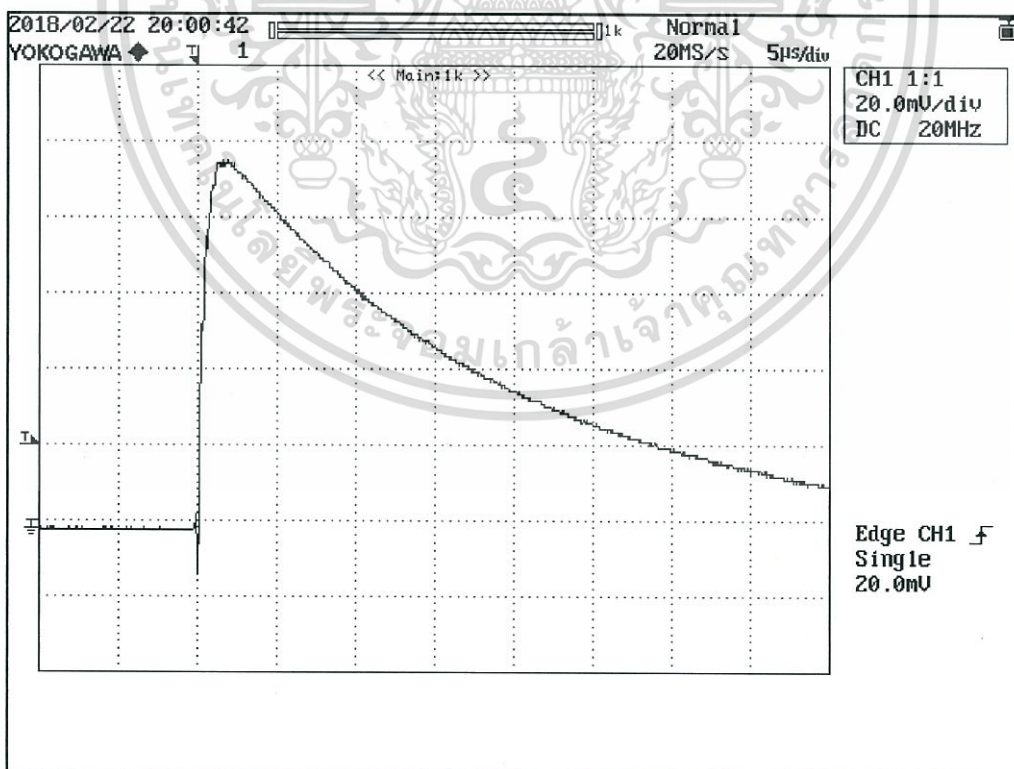
- 1) เครื่องกำเนิดกระแสสลับพัลส์
- 2) ตัวเก็บประจุ (C)
- 3) ตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ (L)
- 4) ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (R)
- 5) ขดลวดโรกอฟสกี
- 6) วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน
- 7) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป

4.3.2 วิธีการทดสอบ

- 1) ต่อยังจรทดสอบตามรูปคลื่นกระแสสลับพัลส์ที่ต้องการทดสอบ ดังรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3
- 2) ป้อนแรงดันให้เครื่องกำเนิดกระแสสลับพัลส์ จากนั้นจ่ายกระแสสลับพัลส์ที่ต้องการทดสอบ
- 3) บันทึกค่าผลการทดลอง

4.3.3 ผลการทดสอบ

4.3.3.1 รูปคลื่นกระแสสลับพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$



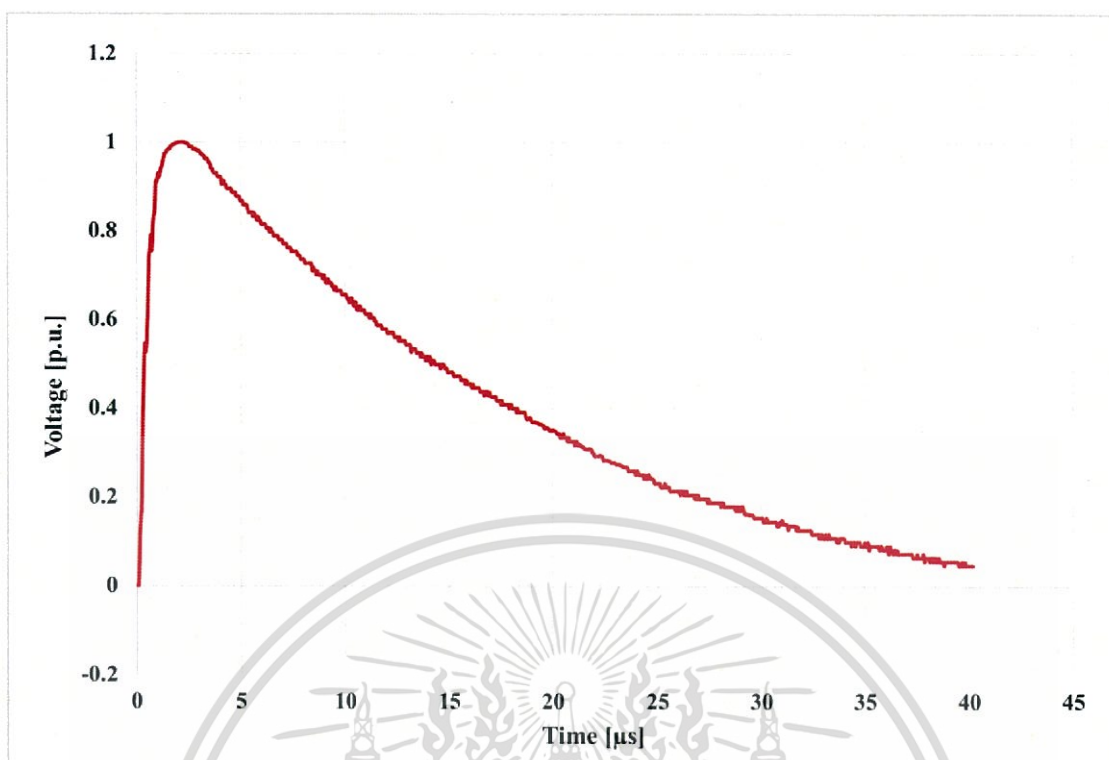
รูปที่ 4.4 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสสลับพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

$$I_p = 950 \text{ A}$$

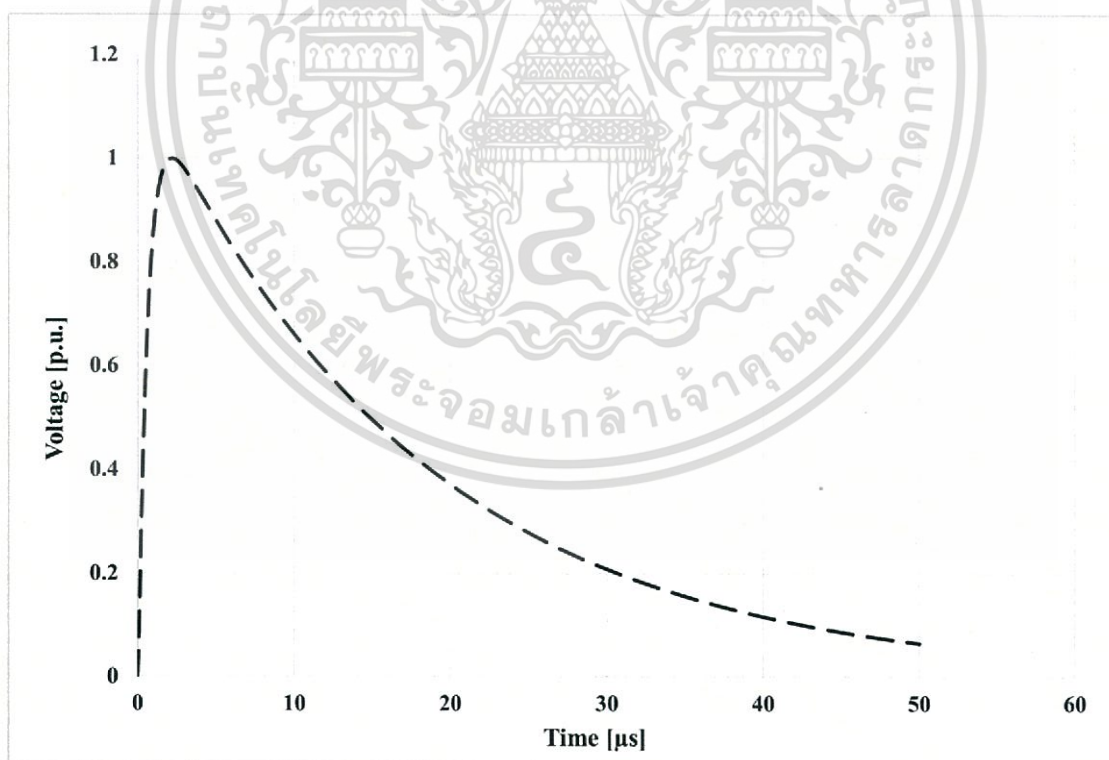
$$T_1 = 1.10 \mu\text{s}$$

$$T_2 = 14.8 \mu\text{s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

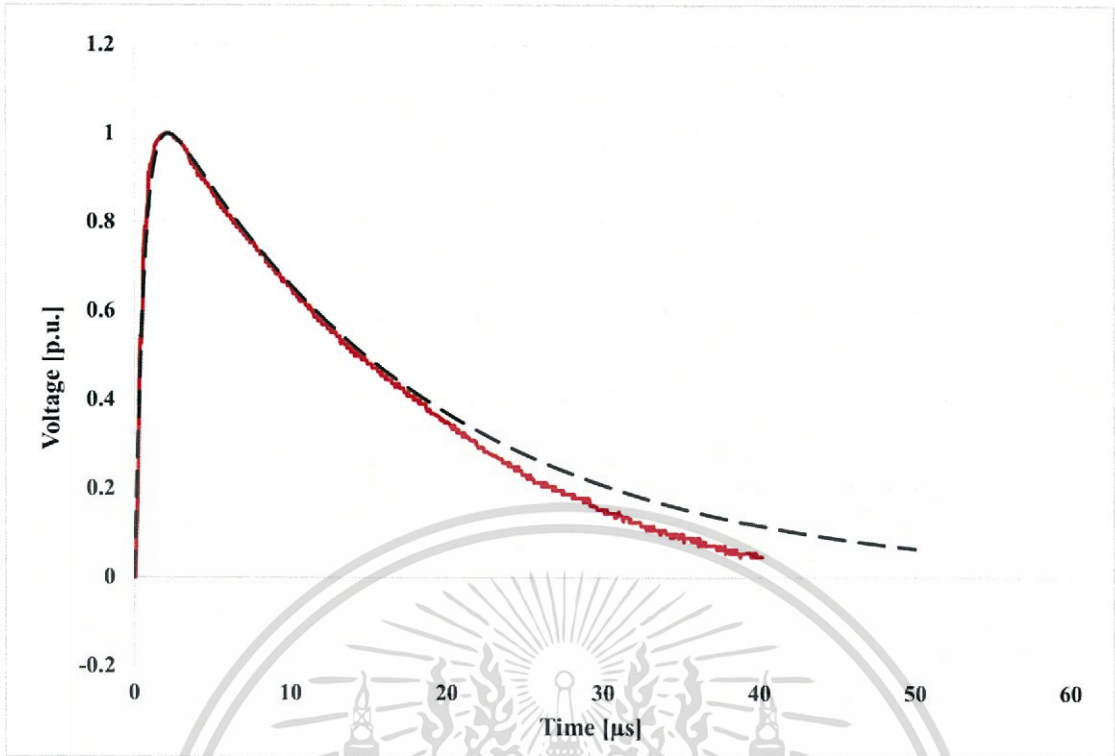


รูปที่ 4.5 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)



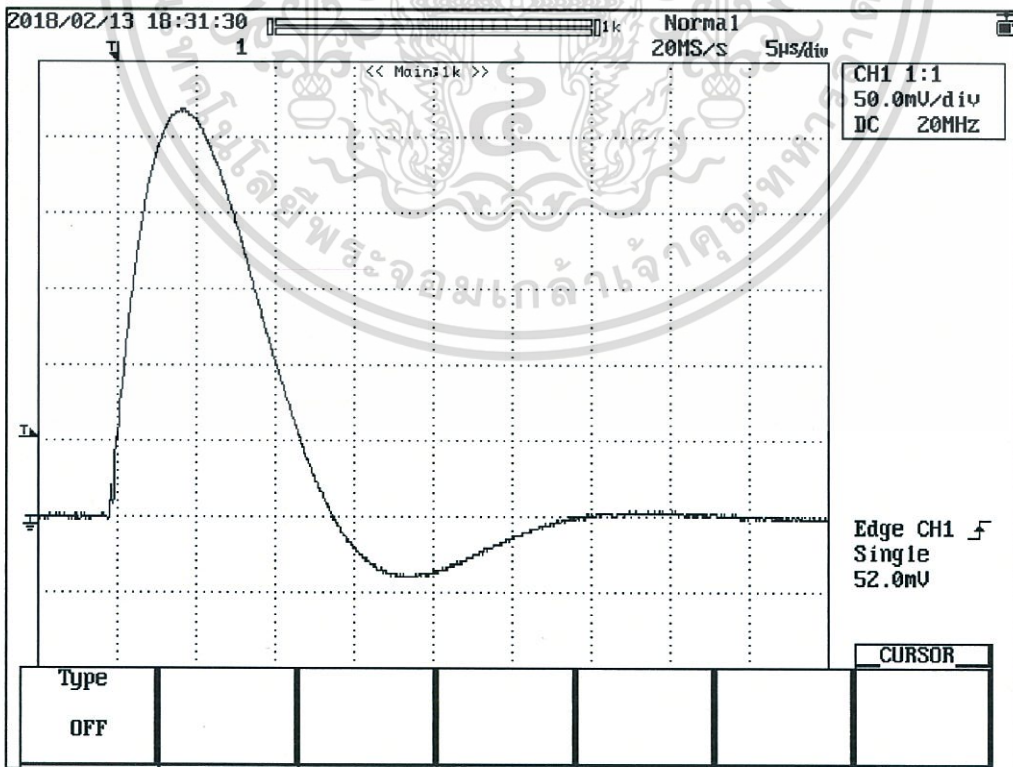
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



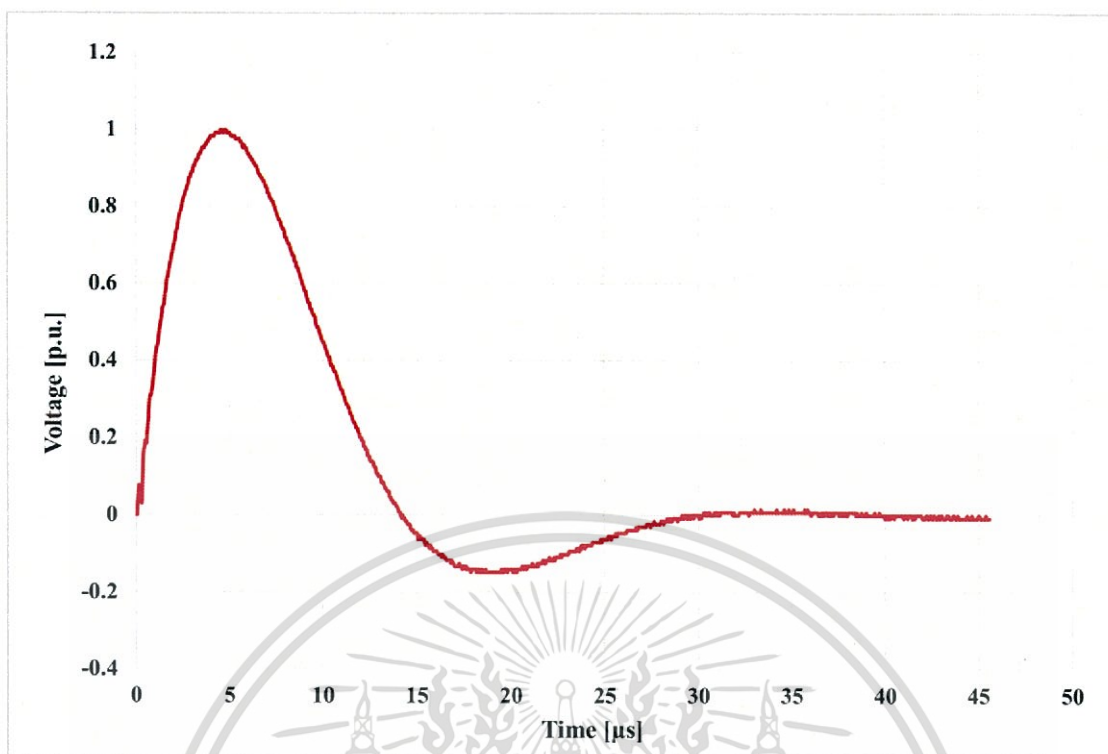
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ จากผลการจำลอง โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

4.3.3.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $4/10 \mu\text{s}$

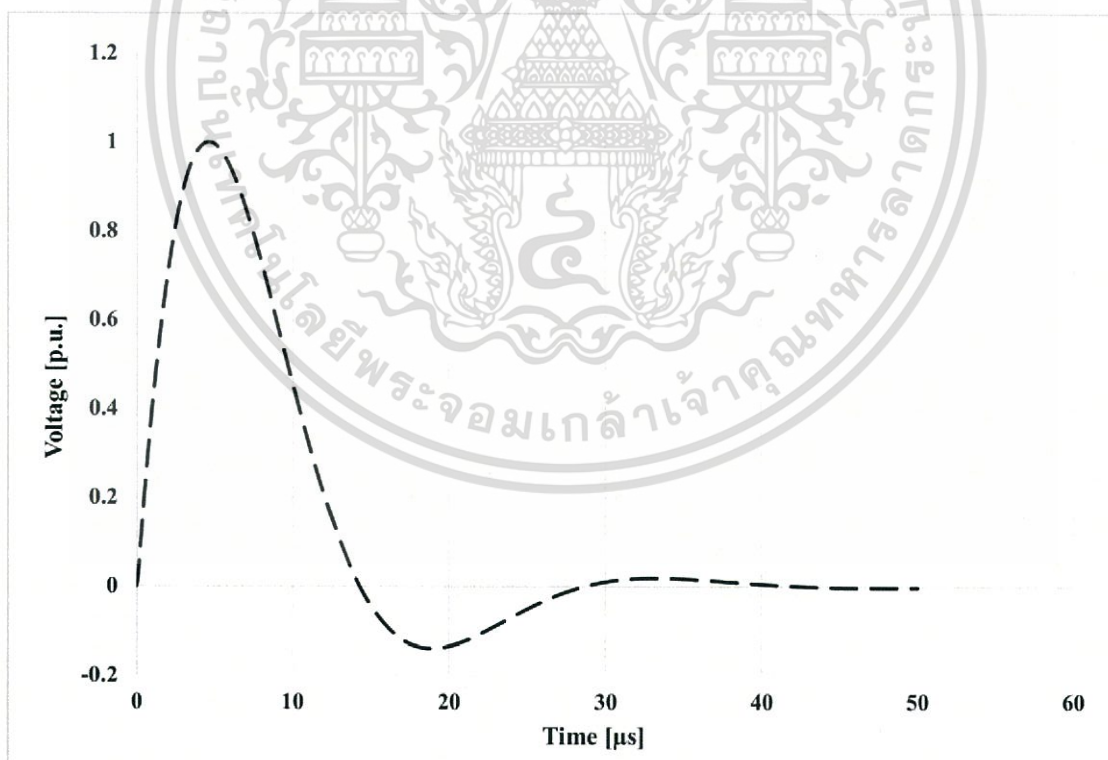


รูปที่ 4.8 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $4/10 \mu\text{s}$ โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ $I_p=2.96 \text{ kA}$ รับการใช้งานที่ $t_1=3.6875 \mu\text{s}$ นั้น ไม่นอนุ $t_2=9.65 \mu\text{s}$ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

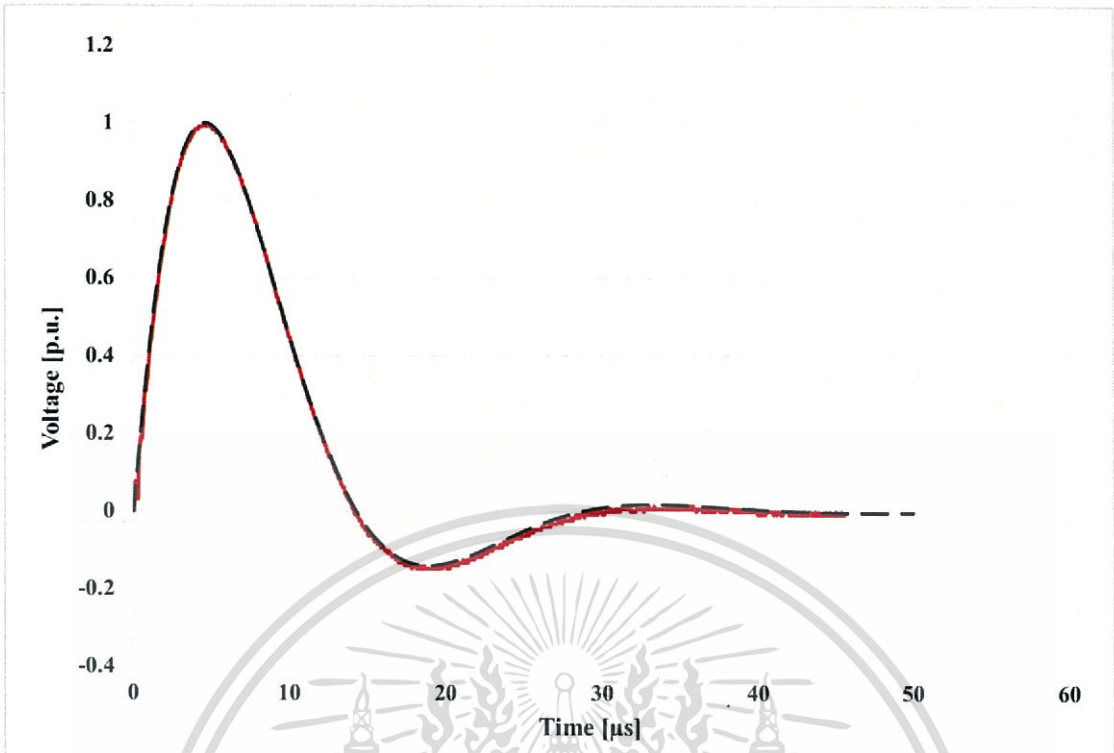


รูปที่ 4.9 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)



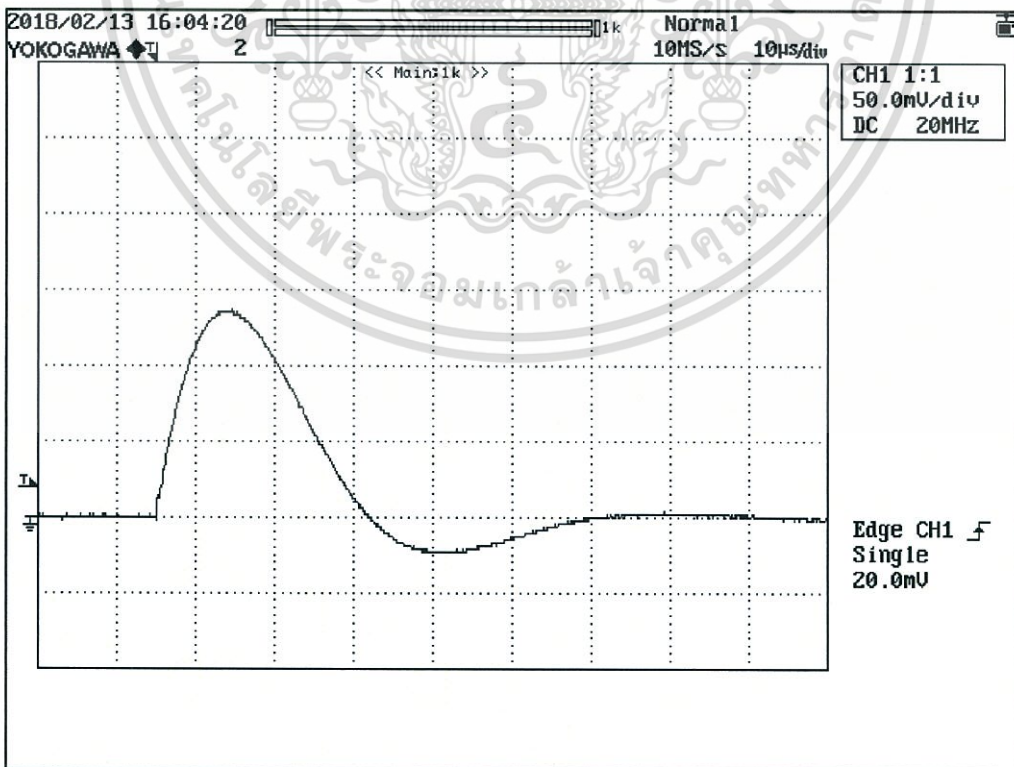
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



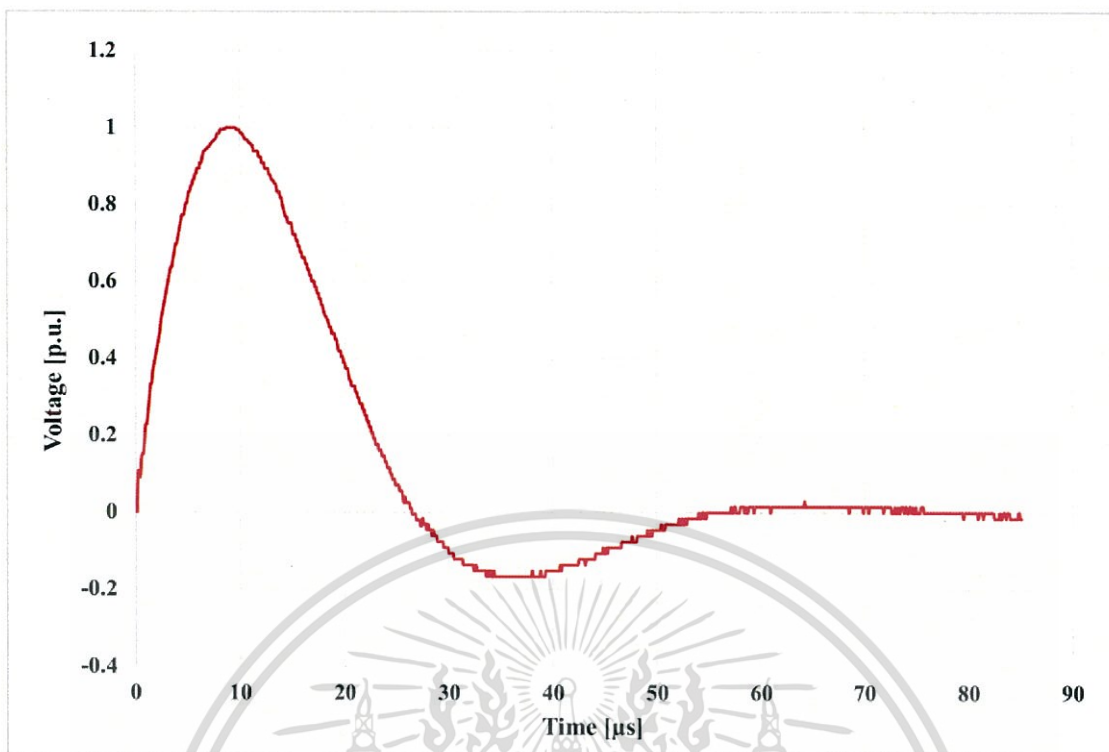
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs จากผลการจำลอง โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

4.3.3.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs

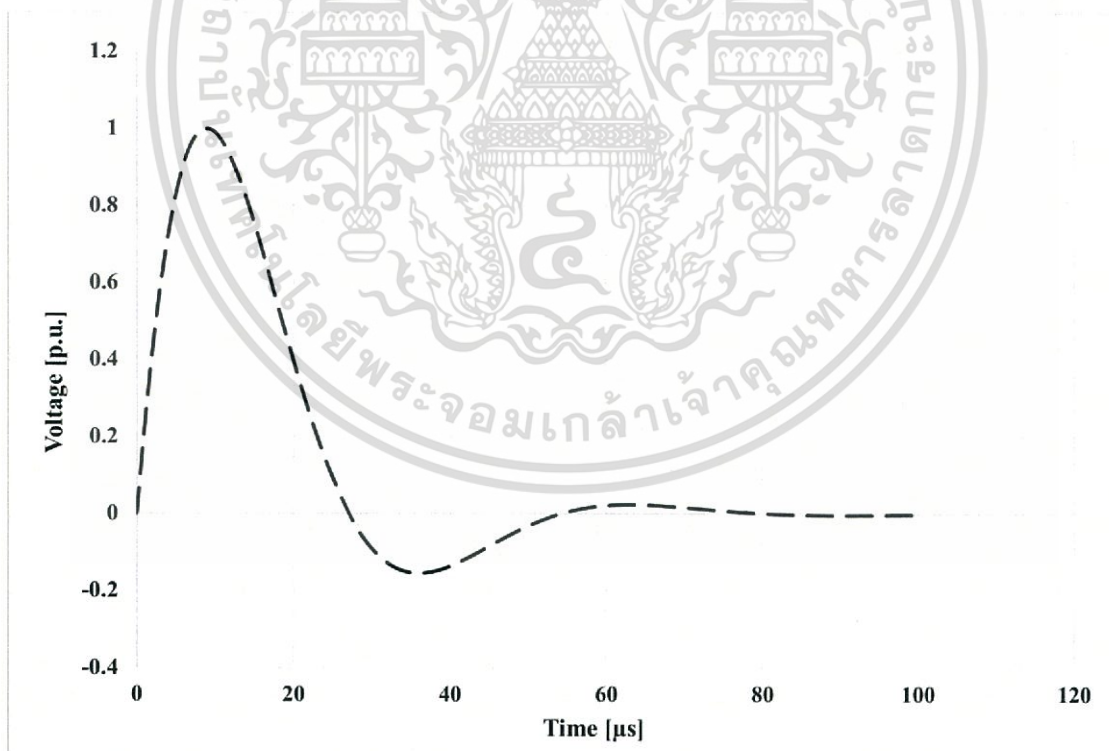


รูปที่ 4.12 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ $I_p = 1.38 \text{ kA}$ ใช้งานที่ $T_1 = 7.5 \mu\text{s}$ เท่านั้น ไม่อนุ $T_2 = 18.8 \mu\text{s}$ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

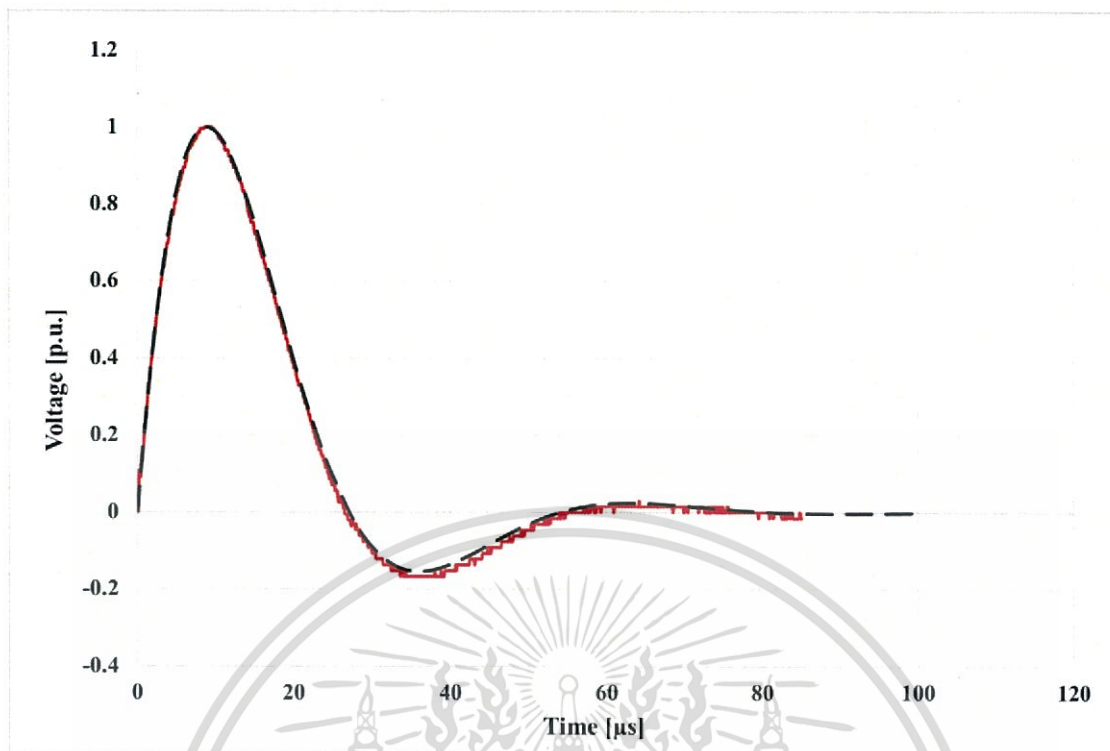


รูปที่ 4.13 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสมิพัลส์ 8/20 μs โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสมิพัลส์ 8/20 μs โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสมิพัลส์ 8/20 μs จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสมิพัลส์ 8/20 μs จากผลการจำลอง โดยไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

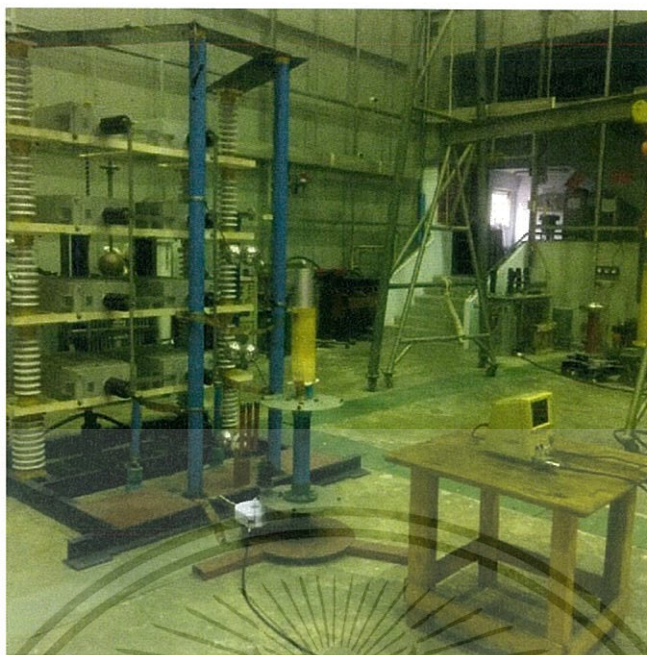
4.4 การทดสอบกับดักฟ้าผ่า โดยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

การทดสอบกับดักฟ้าผ่า โดยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ทำการทดสอบทั้งหมด 3 รูปคลื่น ได้แก่ รูปคลื่นกระแสมิพัลส์ 1/20 μs 4/10 μs และ 8/20 μs

4.4.1 วงจรทดสอบจริง

4.4.1.1 รูปคลื่นกระแสมิพัลส์ 1/20 μs

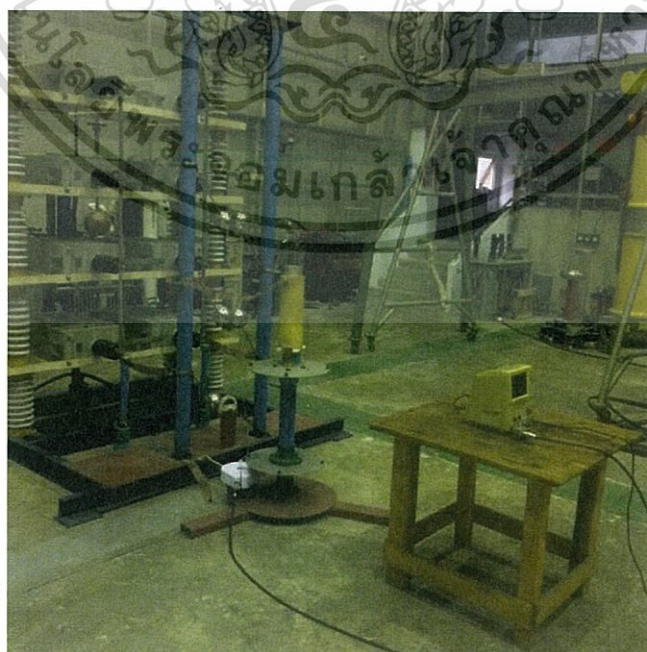
การสร้างกระแสมิพัลส์ รูปคลื่นกระแสมิพัลส์ 1/20 μs จากเครื่องกำเนิดกระแสมิพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดกระแสมิพัลส์ตามตารางการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสมิพัลส์กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดย C มีค่าเท่ากับ 0.5 μF L มีค่าเท่ากับ 6.4 μH และ R มีค่าเท่ากับ 37.8 Ω



รูปที่ 4.16 วงจรการทดสอบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μs

4.4.1.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs

การสร้างกระแสอิมพัลส์ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ตามตารางการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสอิมพัลส์กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดย C มีค่าเท่ากับ 1 μF และ L มีค่าเท่ากับ 8.6 μH

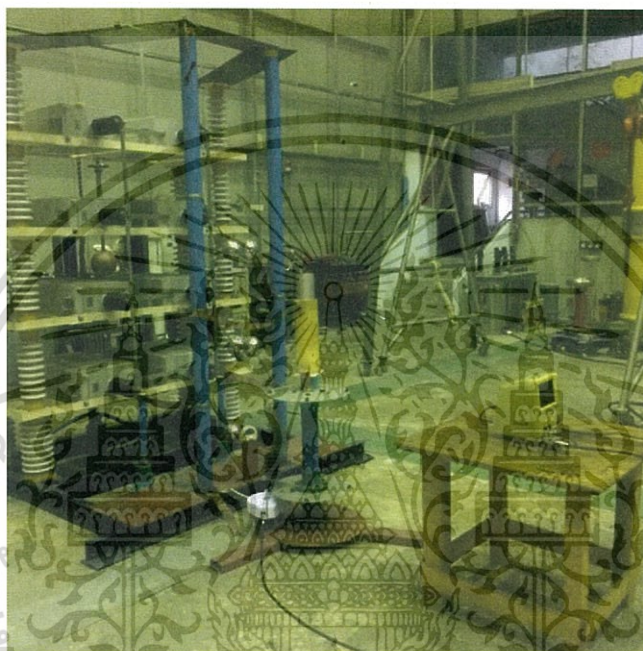


รูปที่ 4.17 วงจรการทดสอบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s

การสร้างกระแสอิมพัลส์ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ตามตารางการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสอิมพัลส์กรณีไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดย C มีค่าเท่ากับ 1 μ F L มีค่าเท่ากับ 50.2 μ H และ R มีค่าเท่ากับ 7.8 Ω



รูปที่ 4.18 วงจรการทดสอบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s

อุปกรณ์ในวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.16 4.17 และ 4.18 ประกอบด้วย

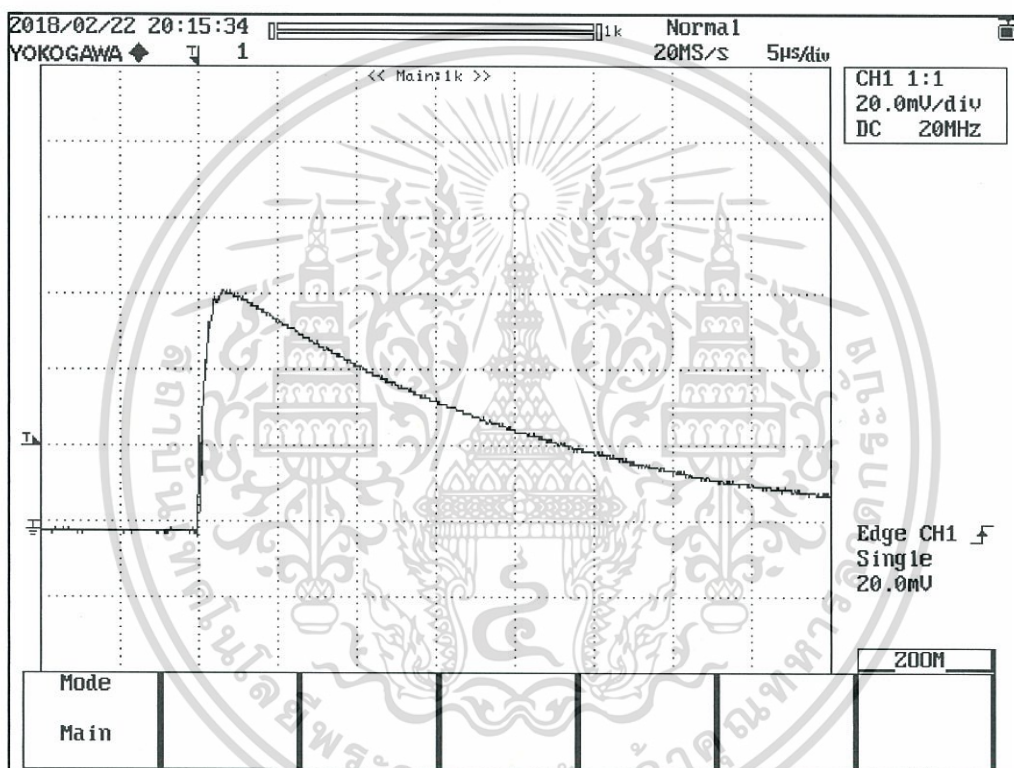
- 1) เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์
- 2) ตัวเก็บประจุ (C)
- 3) ตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ (L)
- 4) ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (R)
- 5) ขดลวดโรกอฟสกี
- 6) วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน
- 7) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป
- 8) กับดักฟ้าผ่า พิกัด 5 kA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 วิธีการทดสอบ

- 1) ต้องวงจรทดสอบตามรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการทดสอบ ดังรูปที่ 4.16 4.17 และ 4.18
- 2) ป้อนแรงดันให้เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ จากนั้นจ่ายกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการทดสอบ
- 3) บันทึกค่าผลการทดลอง

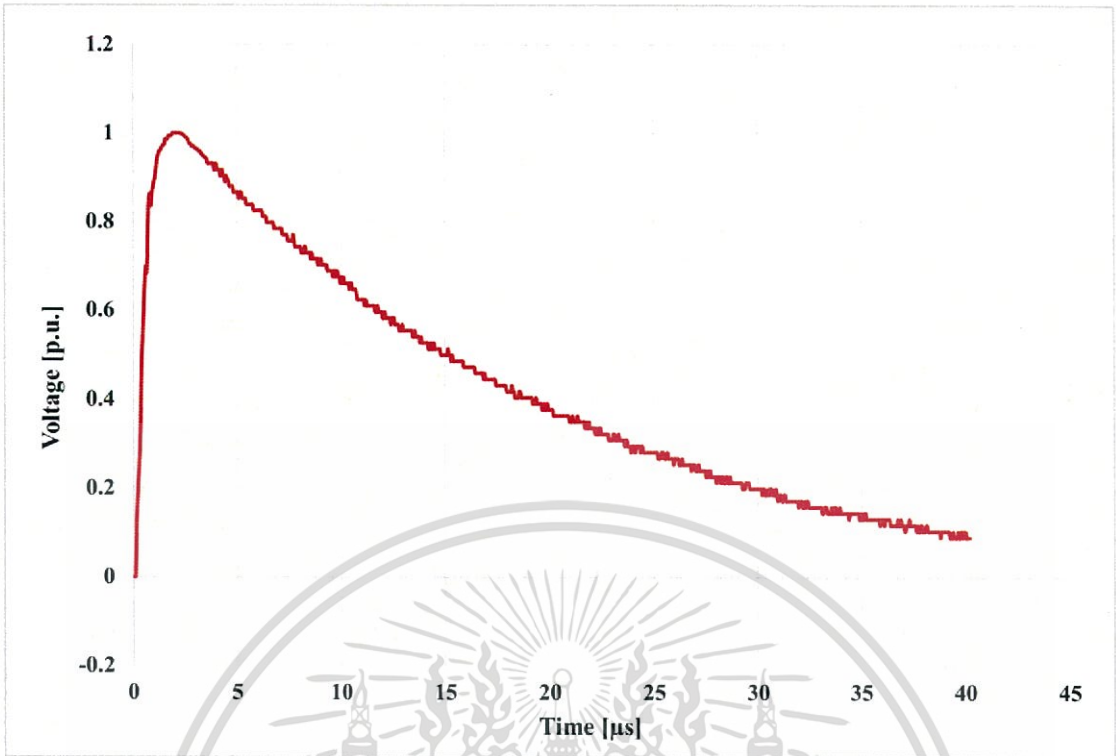
4.4.3 ผลการทดสอบ

4.4.3.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ รูปที่ 4.19 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

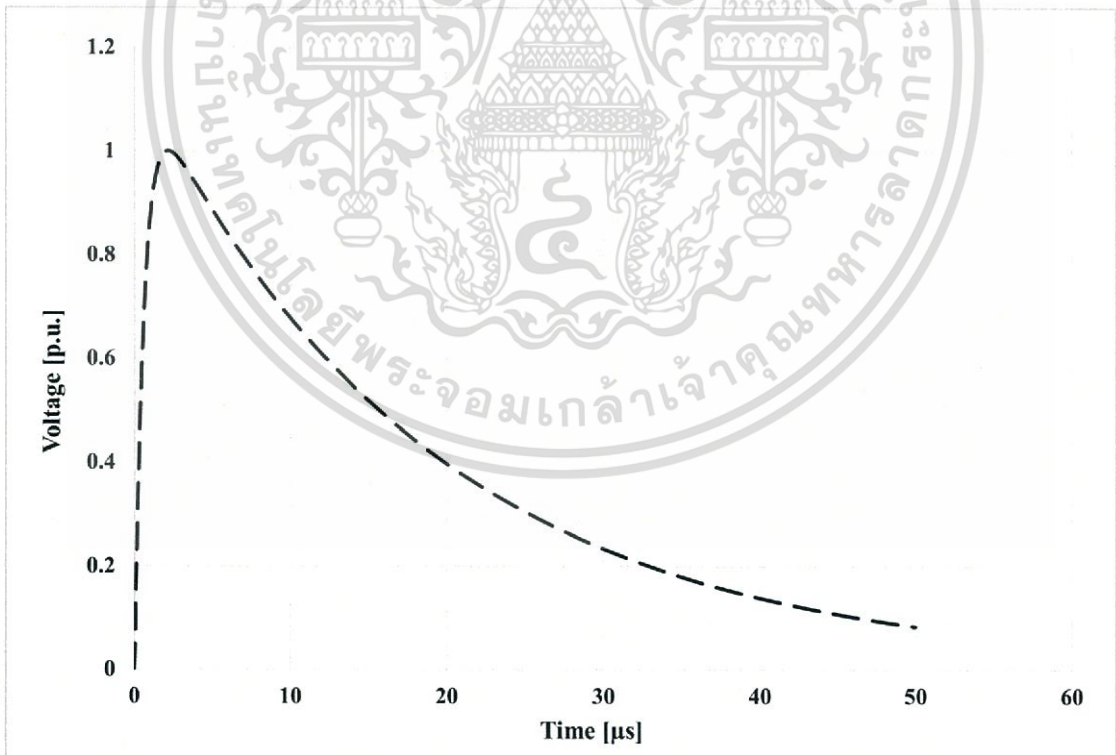
$$I_p = 608 \text{ A}$$

$$T_1 = 1.10 \mu\text{s}$$

$$T_2 = 15.6 \mu\text{s}$$

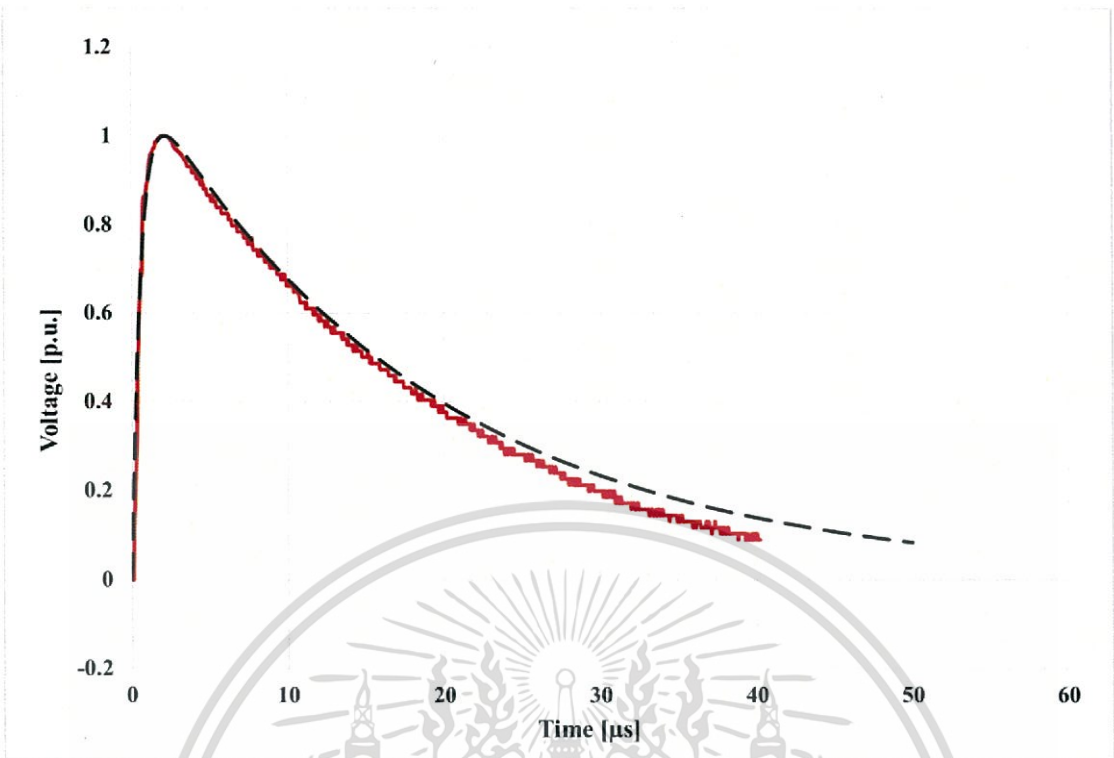


รูปที่ 4.20 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)



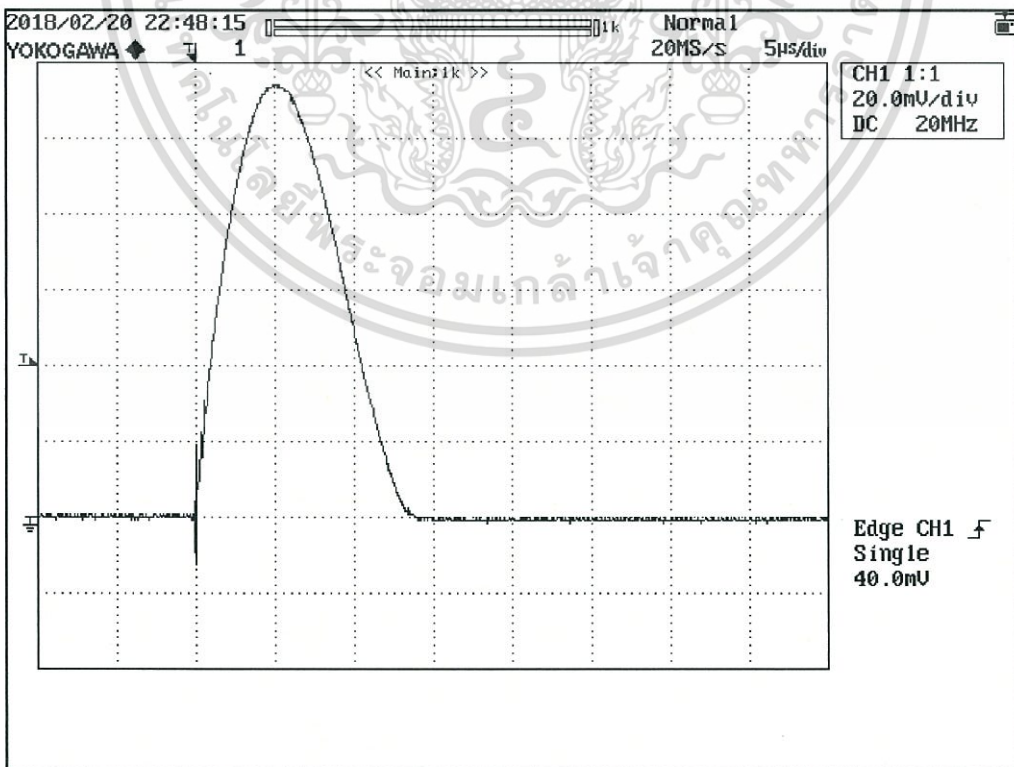
รูปที่ 4.21 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $1/20 \mu\text{s}$ โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



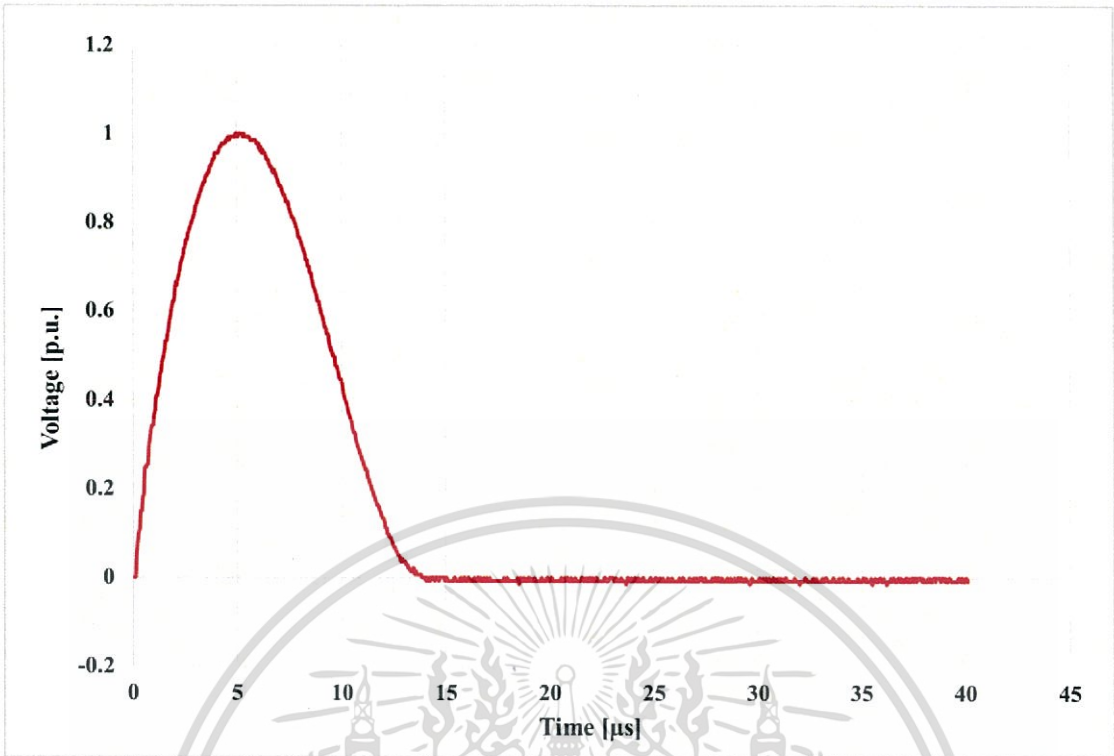
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μs จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 1/20 μs จากผลการจำลอง โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

4.4.3.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs

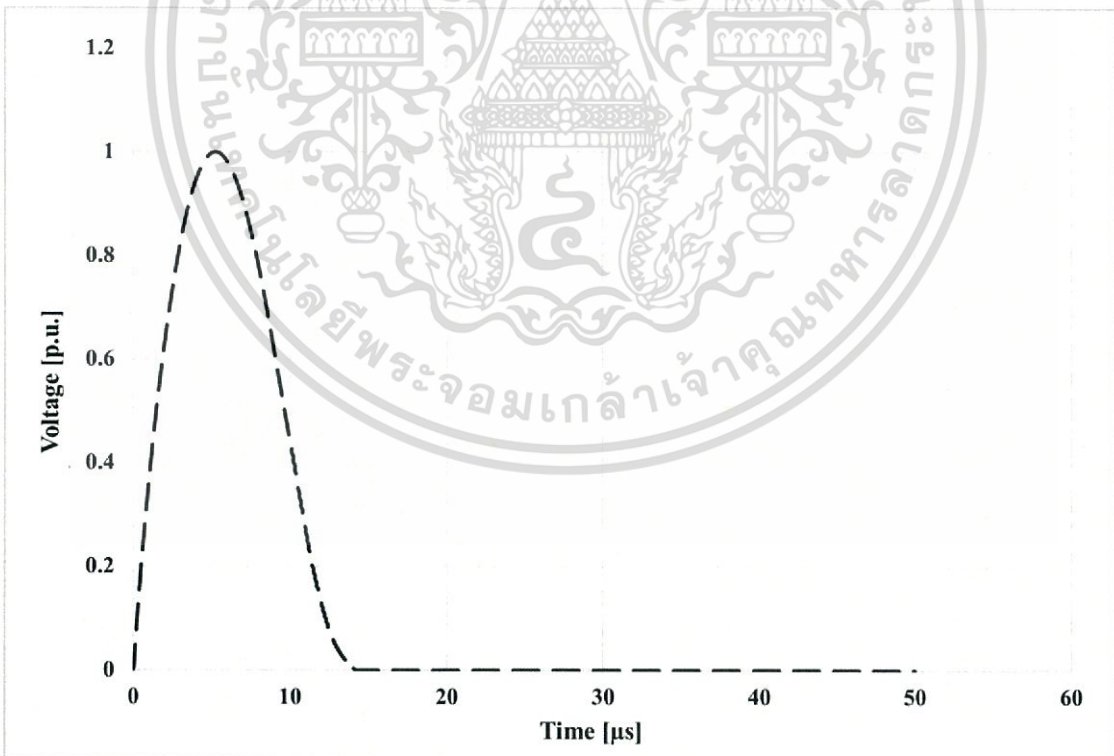


รูปที่ 4.23 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $I_p = 1.14 \text{ kA}$ $T_1 = 4.0625 \mu\text{s}$ $T_2 = 9.65 \mu\text{s}$
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

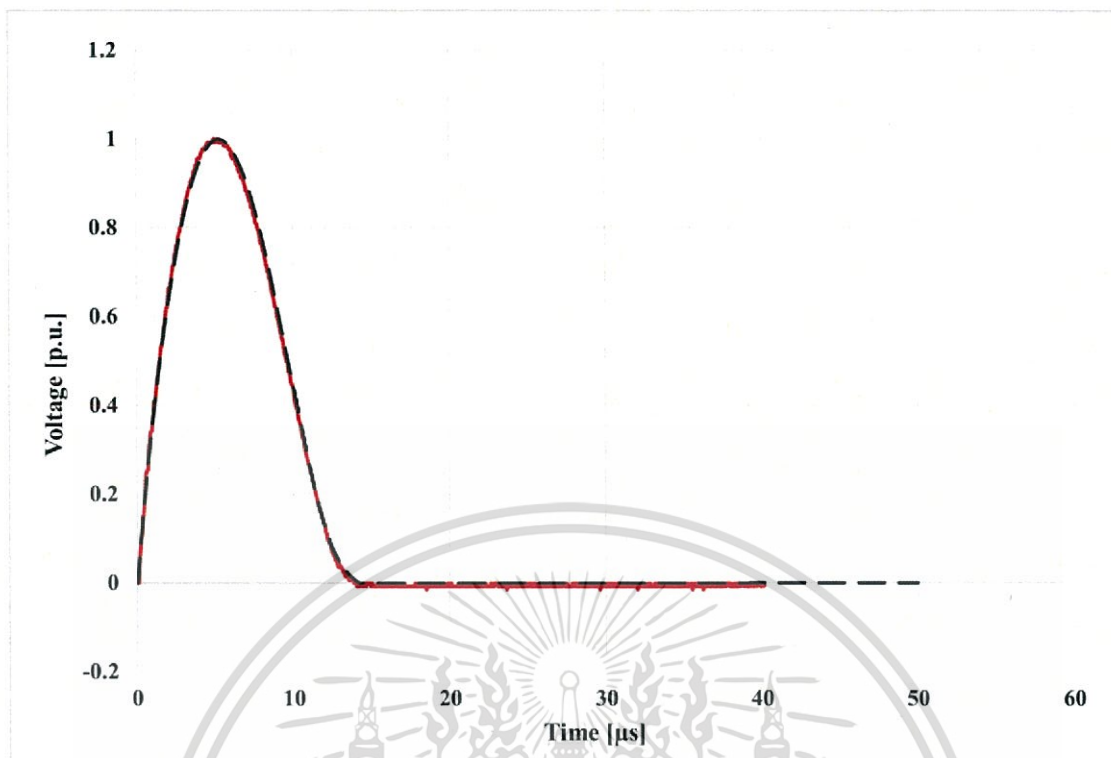


รูปที่ 4.24 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสมพัลส์ 4/10 μs โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)



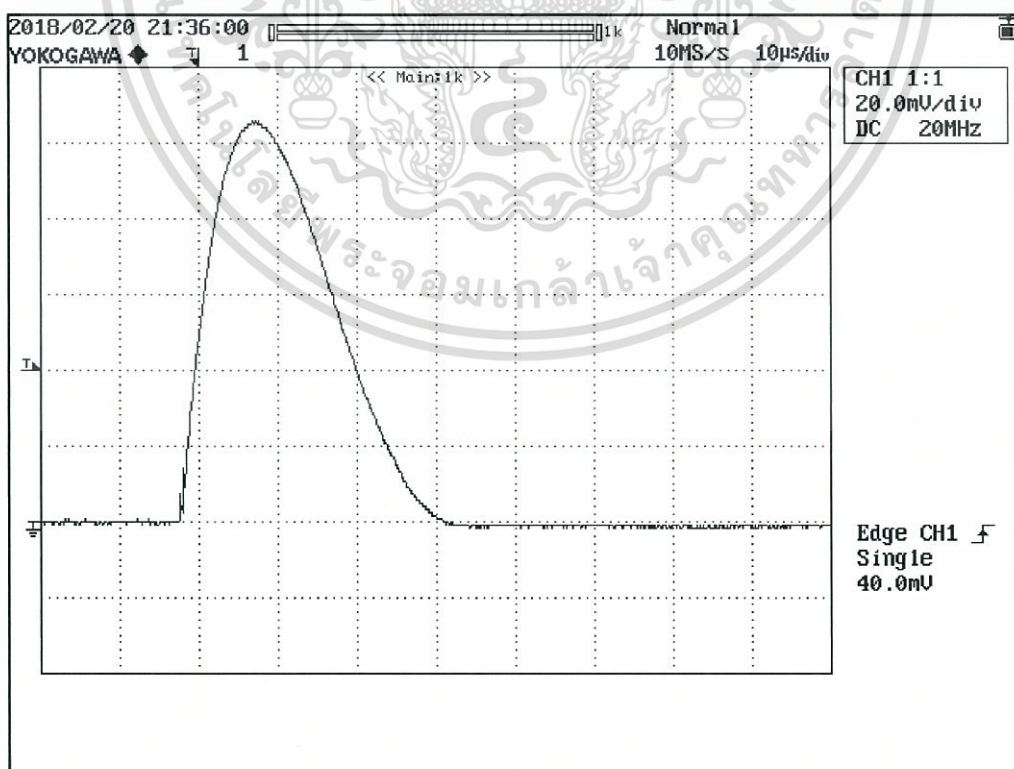
รูปที่ 4.25 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสมพัลส์ 4/10 μs โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



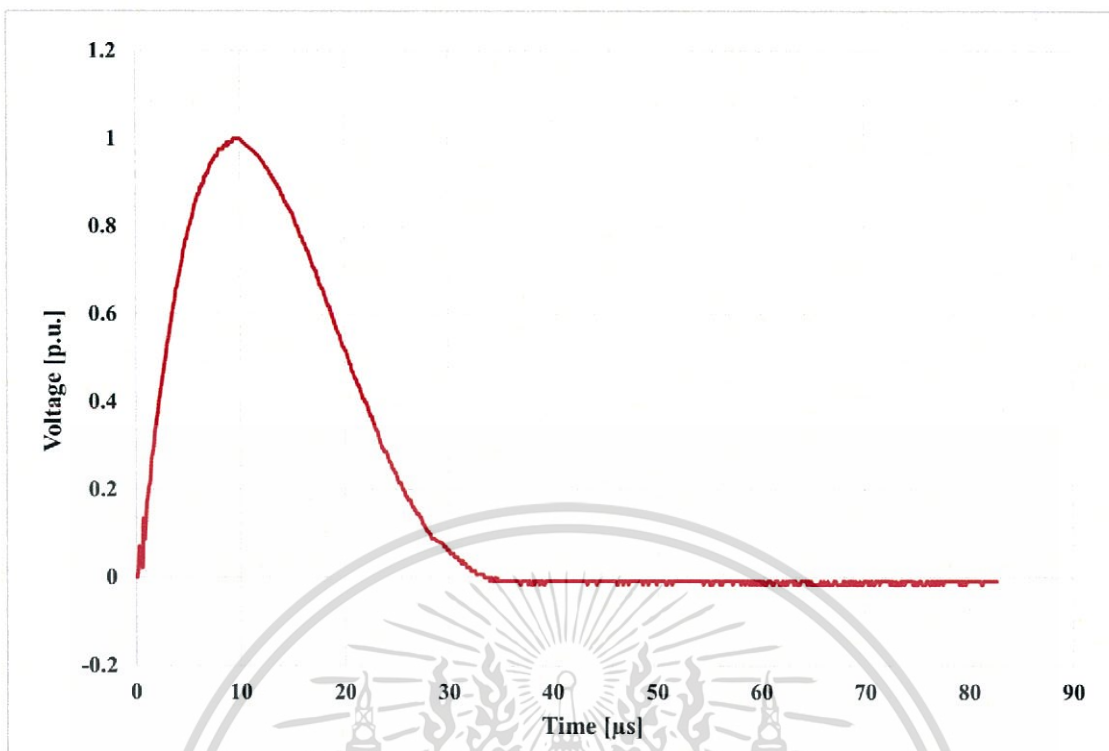
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 4/10 μs จากผลการจำลอง โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

4.4.3.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs

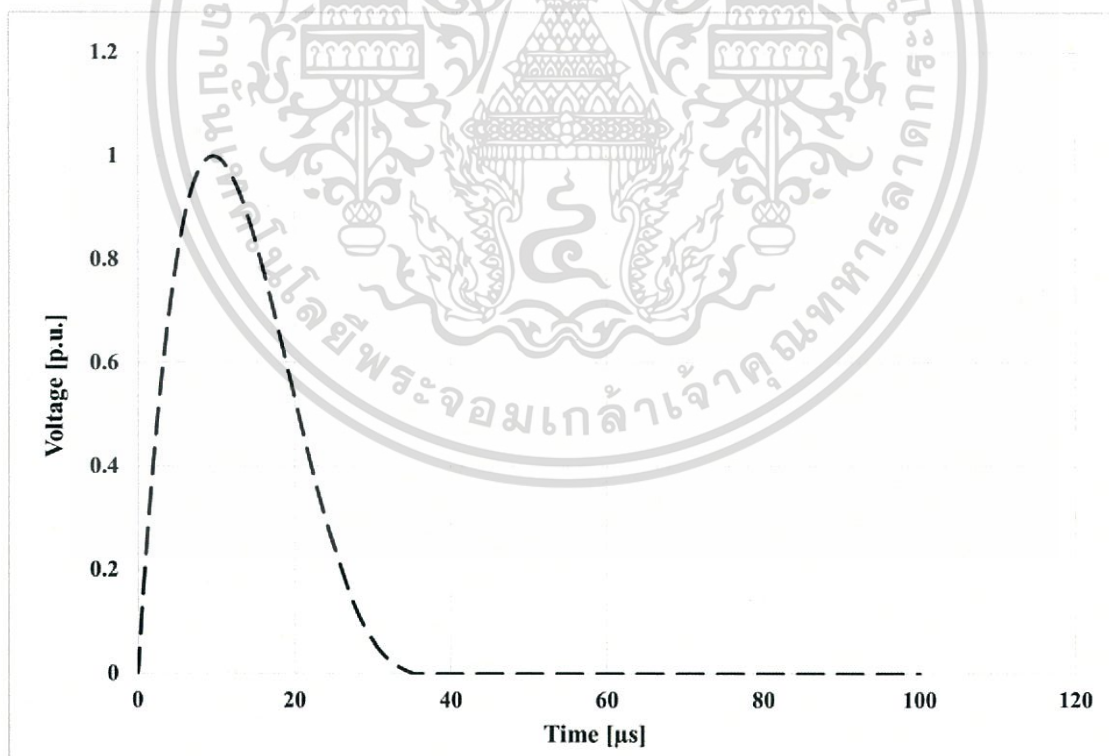


รูปที่ 4.27 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ถูกระบุเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $I_p = 1.06 \text{ kA}$ $T_1 = 7.875 \mu\text{s}$ $T_2 = 20.4 \mu\text{s}$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

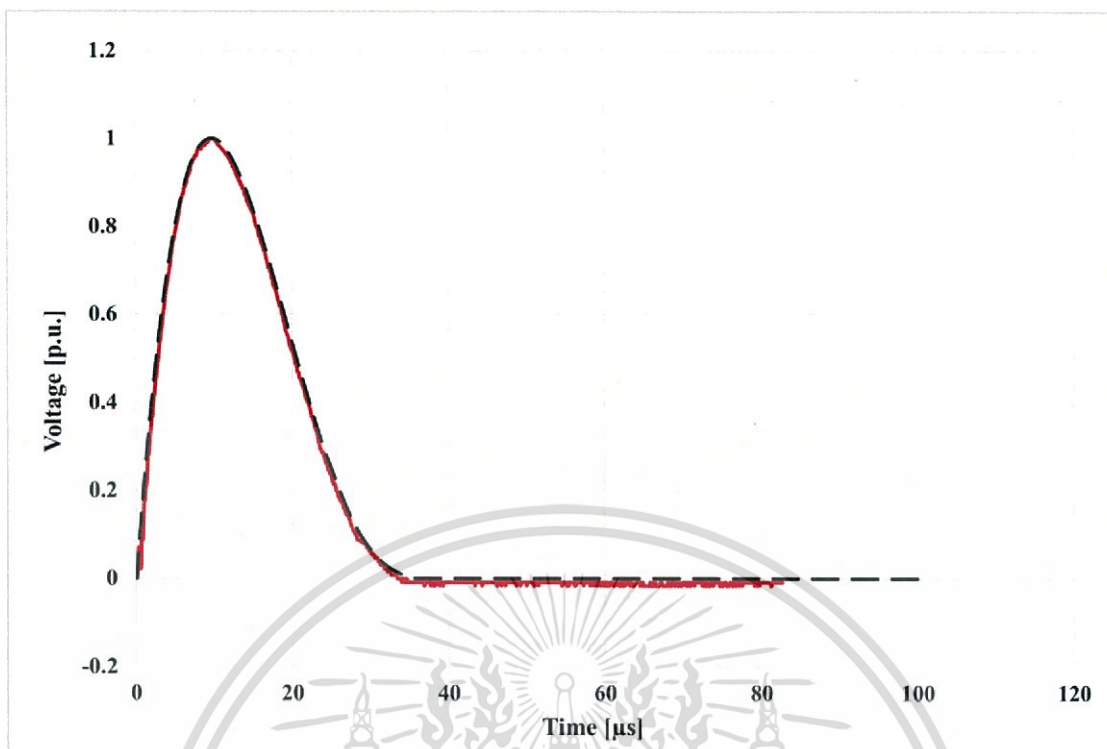


รูปที่ 4.28 ผลการทดลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)



รูปที่ 4.29 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า 8/20 μs จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า 8/20 μs จากผลการจำลอง โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (p.u.)

ตารางที่ 4.7 ผลของการวัดกระแสไฟฟ้า กรณีไม่ได้ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า	เวลานำคลื่น ($T1$) (μs)	เวลาหลังคลื่น ($T2$) (μs)
กระแสไฟฟ้าหน้าคลื่นชัน (1/20 μs)	1.10 (7.37%)	14.8 (1.37%)
กระแสไฟฟ้าสูง (4/10 μs)	3.6875 (1.72%)	9.65 (0.52%)
กระแสไฟฟ้าผ่า (8/20 μs)	7.5 (7.14%)	18.8 (1.07%)

ตารางที่ 4.8 ผลของการวัดกระแสไฟฟ้า กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า	เวลานำคลื่น ($T1$) (μs)	เวลาหลังคลื่น ($T2$) (μs)
กระแสไฟฟ้าหน้าคลื่นชัน (1/20 μs)	1.10 (8.33%)	15.6 (0.65%)
กระแสไฟฟ้าสูง (4/10 μs)	4.0625 (2.98%)	9.65 (0%)
กระแสไฟฟ้าผ่า (8/20 μs)	7.875 (8.62%)	20.4 (0.49%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในโครงการนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน เพื่อใช้วัดกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 62475 จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง พบว่าที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ($1/20 \mu\text{s}$) ค่าเวลาหน้าคลื่น ($T1$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 7.37% และเวลาหลังคลื่น ($T2$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 1.37% ที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สูง ($4/10 \mu\text{s}$) ค่าเวลาหน้าคลื่น ($T1$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 1.72% และเวลาหลังคลื่น ($T2$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 0.52% ที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า ($8/20 \mu\text{s}$) ค่าเวลาหน้าคลื่น ($T1$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 7.14% และเวลาหลังคลื่น ($T2$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 1.07% ซึ่งค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นล้วนแล้วอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

และในกรณีที่มีการทดสอบกับกับดักฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60099-4 โดยกับดักฟ้าผ่าที่นำมาใช้ทดสอบนั้นเป็นชนิด MO มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 9 kV มีพิกัดแรงดันต่อเนื่องสูงสุดที่ความถี่กำลัง (Maximum Continuous Operating Voltage : MCOV) เท่ากับ 7.65 kV มีพิกัดกระแสเท่ากับ 5 kA พบว่าที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ($1/20 \mu\text{s}$) ค่าเวลาหน้าคลื่น ($T1$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 8.33% และเวลาหลังคลื่น ($T2$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 0.65% ที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สูง ($4/10 \mu\text{s}$) ค่าเวลาหน้าคลื่น ($T1$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 2.98% และเวลาหลังคลื่น ($T2$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 0% ที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า ($8/20 \mu\text{s}$) ค่าเวลาหน้าคลื่น ($T1$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 8.62% และเวลาหลังคลื่น ($T2$) ผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 0.49% ซึ่งค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นล้วนแล้วอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้อีกเช่นกัน

ทั้งนี้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงานยังมีปัญหาการผิพื้อนที่ช่วงเวลาเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ แต่อย่างไรก็ตามขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างนี้สามารถใช้ได้ดีในช่วงที่มีความถี่จำกัดล่างที่ต่ำและความถี่จำกัดบนที่สูง กล่าวคือ สามารถใช้งานได้ดีในช่วงความถี่ที่กว้าง (Wide bandwidth) คือ 80 Hz ถึง 2.02 MHz

5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบ

1. โครงสร้างของแกนและซีลด์ของขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการประกอบสร้างขึ้น ค่าพารามิเตอร์มีความคลาดเคลื่อนจากที่ทำการออกแบบ เนื่องจากการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ไม่แม่นยำในการประกอบสร้าง
2. เกิดปัญหาสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ เนื่องจากการพันของขดลวดโรกอฟสกีไม่ได้สมมาตรตลอดช่วงความยาวแกน ทำให้รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่วัดได้มีค่าผิดเพี้ยน
3. การเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จากผลการทดลองกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จากการจำลอง มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น เนื่องจากรูปคลื่นจากการทดลอง ไม่ใช่รูปคลื่นในอุดมคติเหมือนรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการที่ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ไม่แม่นยำในการประกอบสร้างแกนและซีลด์ของขดลวดโรกอฟสกี ในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้น ควรเลือกใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงในการประกอบสร้าง และอีกประการหนึ่งเนื่องจากยังมีผลของการผิดเพี้ยนและสัญญาณรบกวนที่ช่วงเวลาเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน สามารถแก้ปัญหาโดยการเพิ่มวงจรกรองสัญญาณรบกวนเพิ่มเข้าไปในวงจรอินทิเกรตได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] พิรุณี ยุทธโกวิท, “เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, 2559.
- [2] สำรวัย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2549.
- [3] บัญญัติ สีสัจจริยกุล, “การพัฒนาวงจรอินทิเกรเตอร์แบบเฉื่อยงานและแบบไวงานเพื่อใช้ร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [4] Silicon Carbide Porcelain Housed Arrester Identification Guide. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.nemaarresters.org/wp-content/uploads/2012/08/SiC-Arrester-Identification.pdf>
- [5] Surge Arresters. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.victoryelectricals.com/surgearresters.html>
- [6] E.Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel., “High Voltage Engineering: Fundamentals.”, 2nd edition, 2000, p.501.
- [7] “Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for AC systems”, IEC 60099-4, Edition 3.0 -2014
- [8] “High-current test techniques - Definitions and requirements for test currents and measuring systems”, IEC 62475, Edition 1.0 -2010



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับการวัดกระแสอิมพัลส์

High Performance Transducer Device for Impulse Current Measurement

กิมพงษ์ จารุสังข์, ภูธนกิจ จิมจวน, มงคล วีระนุกูล, สันติธร จิตติถาวร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย จลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: santithorn11@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบ การสร้าง ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานเพื่อใช้วัดกระแสอิมพัลส์ วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานทำหน้าที่อินทิเกรตสัญญาณป้อนเข้า และไม่จำเป็นต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจร โดยรูปคลื่นที่อินทิเกรตจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางเวลาของวงจร (Time constant : τ) ขดลวดโรกอฟสกีจะพันอยู่บนแกนกระดาษอัดซึ่งกระดาษอัดเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กจึงไม่ทำให้เกิดการอิ่มตัวที่สนามแม่เหล็กมีค่าสูง ส่วนวงจรอินทิเกรตจะประกอบด้วยวงจร RC ทำการขยายสัญญาณให้ได้รูปคลื่นที่มีค่าใกล้เคียงกับกระแสอิมพัลส์ ซึ่งไม่ถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนและสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดสัญญาณออสซิลโลสโคป จากผลการทดลองพบว่าขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ประกอบสร้างขึ้น สามารถใช้วัดกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน (Steep impulse current) รูปคลื่น 1/20 μs กระแสอิมพัลส์สูง (High impulse current) รูปคลื่น 4/10 μs และกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse current) รูปคลื่น 8/20 μs ได้ค่อนข้างแม่นยำตามมาตรฐานสากลและเป็นที่ยอมรับได้

คำสำคัญ: กระแสอิมพัลส์, ค่าคงที่ทางเวลา, วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

Abstract

This thesis presents the design and construction of a Rogowski Coil and a passive RC integrator to measure impulse currents. The passive RC integrator performs to integrate input signal and doesn't need to use electronic circuit. The integrated signals depend on the time constant of the circuit (Time constant: τ). The Rogowski Coil is wrapped around hardboard core. The material is not magnetic material that cause of high saturation magnetic field. The output waveforms from the integrator are close to an impulse current that not disturbed by noises and can be measured by digital oscilloscope. The results showed that the Rogowski Coil and the passive RC integrator can precisely measure steep

impulse current (waveform of 1/20 μs), high impulse current (waveform of 4/10 μs) and lightning impulse current (waveform of 8/20 μs).

Keyword: impulse current, time constant, passive integrator

1. บทนำ

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นอยู่อย่างเสมอ เมื่อเกิดฟ้าผ่าจะเกิดแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงมาก ๆ เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่สั้นและเร็วมาก ๆ โดยในทางวิศวกรรม ไฟฟ้าแรงสูงนั้นเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ว่า กระแสอิมพัลส์ ซึ่งกระแสอิมพัลส์ที่มีใช้งานในทางปฏิบัติเป็นกระแสที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ โดยจะสร้างกระแสที่มีขนาดและรูปคลื่นเสมือนกระแสฟ้าผ่า ประโยชน์เพื่อใช้ในการทดสอบกับฉักฟ้าผ่าและการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดจากผลของปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

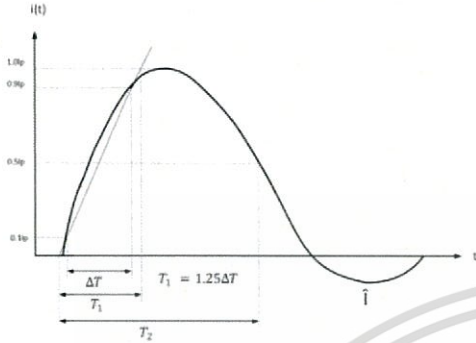
การวัดกระแสอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์นั้น มีหลายวิธี โดยทั่วไปจะนิยมวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทาน ไร้ความเหนี่ยวนำ ซึ่งการวัดด้วยความต้านทาน ไร้ความเหนี่ยวนำนั้นจะทำให้ อุปกรณ์ที่ใช้วัดมีขนาดใหญ่ตามขนาดกระแสใช้งาน ยิ่งขนาดกระแสสูงราคาจะยิ่งสูงมากขึ้น มีความไม่สะดวกในการใช้งานหลายประการและเป็นโทษของวงจรวัด ดังนั้นจึงมีอีกวิธีหนึ่งที่สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าสูง มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลารวดเร็ว และสามารถออกแบบและสร้างเองได้ไม่ยาก โดยการนำหลักการของหม้อแปลงกระแสแบบพิเศษ คือ การวัดด้วยขดลวดโรกอฟสกี แต่การวัดด้วยขดลวดโรกอฟสกีเพียงอย่างเดียว นั้นแถบกว้างความถี่ยังไม่เพียงพอในการวัดกระแสอิมพัลส์ จึงต้องมีการต่อยอดกับวงจรอินทิเกรต เพื่อให้มีแถบกว้างความถี่เพียงพอในการวัดกระแสอิมพัลส์ จึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรต ซึ่งเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานขึ้นมา เพื่อใช้ในการวัดกระแสอิมพัลส์ที่สร้างจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน [1]

มาตรฐาน IEC 62475 ได้กำหนดลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 62475

ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ในรูปที่ 2.1 กำหนดไว้ดังนี้

1) เวลาหน้าคลื่น ($T1$) เวลาหน้าคลื่นจะคำนวณจาก 1.25 เท่าของเวลาในช่วงที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มค่าจาก 10% จนถึง 90% ของค่ายอด ซึ่งจุดเริ่มต้นของกระแสอิมพัลส์คือ จุดตัดระหว่างแกนนอนกับเส้นตรงที่ลากผ่านจุด 10% และ 90% ของค่ายอดที่ด้านหน้าคลื่น

2) เวลาหลังคลื่น ($T2$) เวลาหลังคลื่นจะคำนวณเวลาจากจุดเริ่มต้นของกระแสอิมพัลส์จนถึงเมื่อกระแสอิมพัลส์ลดค่าลงสู่ค่า 50% ของค่ายอดเป็นครั้งแรก

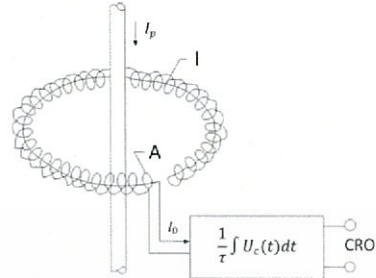
3) ค่ายอดกระแสชั่วครั้งข้าม (\hat{I})
กระแสอิมพัลส์จะใช้ในการทดสอบความสามารถกับดักฟ้าผ่าในการจำกัดแรงดันเกินและการทนกระแส มาตรฐานจะกำหนดรูปคลื่นเรียกตามเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่น ($T1 / T2$) ได้แก่

- 1) กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน (Steep impulse current) หรือรูปคลื่น 1/20 μs
- 2) กระแสอิมพัลส์สูง (High impulse current) หรือรูปคลื่น 4/10 μs
- 3) กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse current) หรือรูปคลื่น 8/20 μs
- 4) กระแสอิมพัลส์สวิดจิง (Switching impulse current) หรือรูปคลื่น 30/80 μs

2.2 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี [2]

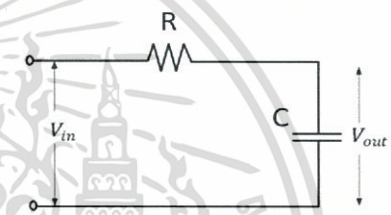
ขดลวด โรกอฟสกีมีหลักการคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแส ซึ่งทำให้เกิดการสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กนี้ไปคล้องขดลวดที่พันรอบแกนที่ไม่เป็นแม่เหล็กที่วางอยู่รอบตัวนำที่มีกระแสที่ต้องการวัดไหลผ่านอยู่ จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายขดลวด ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับการเอกสทรานเป็นเอกสทรานที่สวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นอญูตเห็นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เปลี่ยนแปลงของกระแส ค่าแรงดันที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนกับรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวนำนั้น ถ้านำแรงดันเหนี่ยวนำนี้ไปผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสม ก็จะได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดอย่างถูกต้อง



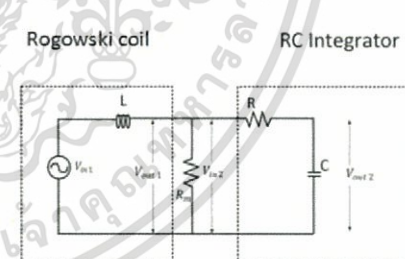
รูปที่ 2.2 ขดลวดโรกอฟสกีคล้องตัวนำในอากาศ

2.3 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator) [3]



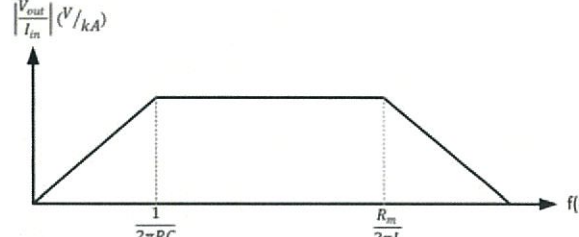
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

2.4 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของขดลวด โรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

ซึ่งสามารถแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

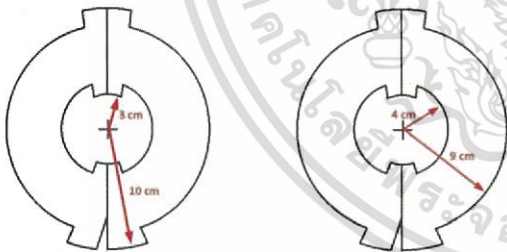
3.1 การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกี

3.1.1 แถบกว้างความถี่และอัตราขยายของระบบ

การออกแบบขดลวดโรกอฟสกีเพื่อทำการวัดกระแสแอมแปร์ จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะองค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสแอมแปร์ในแต่ละแบบ ซึ่งหาได้จากกราฟค่าการแปลงฟูเรียร์ โดยระบบวัดที่ออกแบบจะต้องมีแถบกว้างความถี่ครอบคลุมองค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสแอมแปร์ที่ต้องการวัดทั้งหมด เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำ โดยกำหนดให้ค่าความถี่ขอบบนมีค่าเท่ากับ 2.02 MHz และกำหนดให้ค่าความต้านทานแมกซ์มีค่าเท่ากับ 75Ω จะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด 5.9 μH และออกแบบอัตราขยายโดยกำหนดให้แรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 1 V เมื่อกระแสแอมแปร์เข้ามีค่าเท่ากับ 10 kA เนื่องจากออสซิลโลสโคปห้ามให้มีแรงดันที่วัดเกิน 50 V เพราะจะทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายและส่งผลกระทบต่อวงจรได้

3.1.2 แถบขดลวด

แถบขดลวดได้จากการตัดกระดาษอัดเป็นรูปทอรอยด์ ออกแบบโดยกำหนดให้รัศมีวงในมีระยะเท่ากับ 3 cm รัศมีวงนอกมีระยะเท่ากับ 10 cm ความยาวของระยะจากจุดศูนย์กลางถึงแกนพื้นขดลวดวงในมีระยะเท่ากับ 4 cm ความยาวของระยะจากจุดศูนย์กลางถึงแกนพื้นขดลวดวงนอกมีระยะเท่ากับ 9 cm และความหนาของแกนเท่ากับ 2 cm



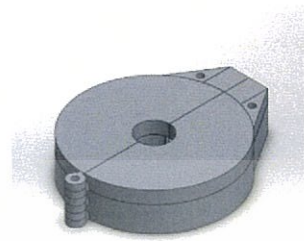
รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของแกนขดลวด

3.1.3 ขดลวด

การพันขดลวดโรกอฟสกีมีลักษณะพิเศษ คือ ต้องมีการพันขดลวดย้อนกลับเข้าภายในขดลวดอีกหนึ่งรอบ เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน ออกแบบโดยให้จำนวนรอบของขดลวดที่พันรอบแกนมีค่าเท่ากับ 26 รอบ เพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามที่คำนวณได้ คือ 5.9 μH

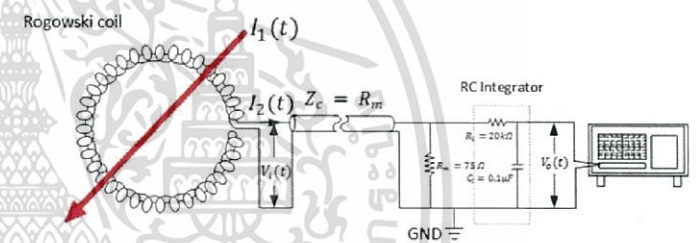
3.1.4 ซิลด์

ออกแบบซิลด์โดยให้ขดลวดโรกอฟสกีสามารถคล้องตัวนำได้ วัสดุที่ใช้ในการสร้างซิลด์ คือ แผ่นพลาสติก (Plastwood sheet) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีลักษณะเบา มีความคงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดี



รูปที่ 3.2 โครงสร้างซิลด์ของขดลวดโรกอฟสกี

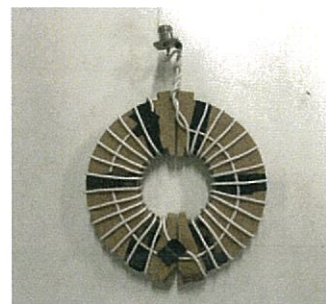
3.2 การออกแบบและสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน



รูปที่ 3.3 วงจรขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชนิด RC

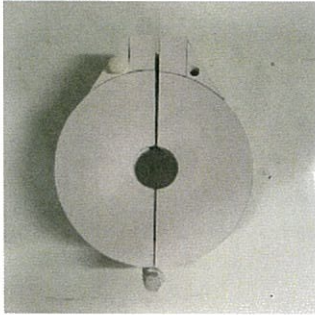
การออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานเพื่อทำการวัดกระแสแอมแปร์พัลส์ จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะองค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสแอมแปร์ในแต่ละแบบ ซึ่งหาได้จากกราฟค่าการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของรูปคลื่นกระแสแอมแปร์ตามมาตรฐาน โดยกำหนดให้ค่าความถี่ขอบล่างมีค่าเท่ากับ 80 Hz ด้วยเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นนี้ สามารถนำไปหาค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุได้ โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 20 k Ω และ 0.1 μF ตามลำดับ

3.3 ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ทำการประกอบสร้าง



รูปที่ 3.4 แกนพื้นขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์มีการอัปเดตเนื้อหาใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



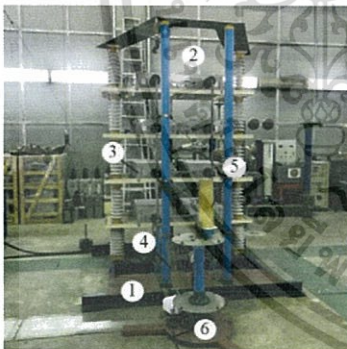
รูปที่ 3.5 ซิลส์ของขดลวดโรกอฟสกีที่ทำกรประกอบสร้าง



รูปที่ 3.6 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ทำกรประกอบสร้าง

4. การทดสอบและประเมินผล

4.1 การทดสอบ



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบรูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณีไม่ติดตั้งกับคักไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบรูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณีติดตั้งกับคักไฟฟ้า

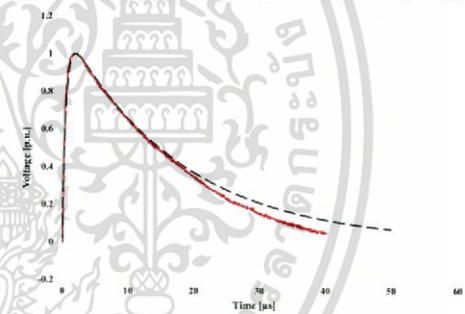


รูปที่ 4.3 ออสซิลโลสโคปและห้องควบคุม

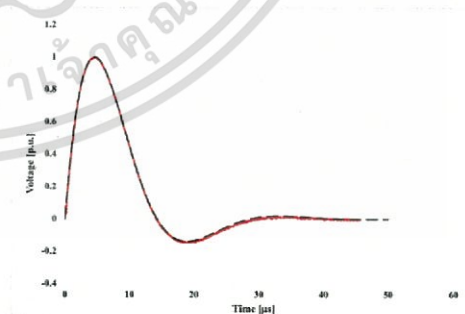
- 1.ขดลวดโรกอฟสกี 2. เครื่องสร้างกระแสไฟฟ้า 3. ตัวเก็บประจุ 4. ตัวต้านทานไว้ความเหนียวน่า 5.ตัวเหนียวน่าปรับค่าได้ 6.Coaxial cable (RG11) 7.ออสซิลโลสโคป 8.มัลติมิเตอร์ 9. วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชนิด RC 10.กักคักไฟฟ้า

4.2 ผลการทดสอบ

4.2.1 กรณี ไม่ติดตั้งกับคักไฟฟ้า

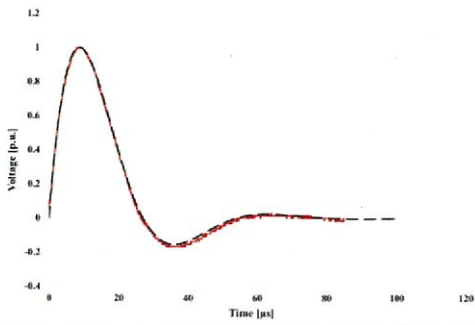


รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบรูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณี 1/20 μ s



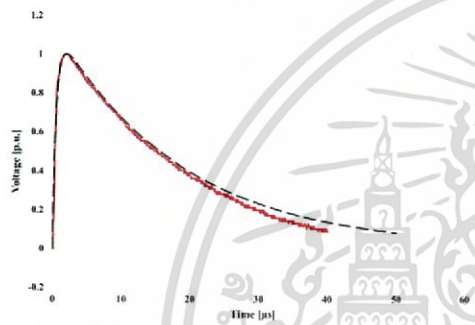
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบรูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากรณี 4/10 μ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

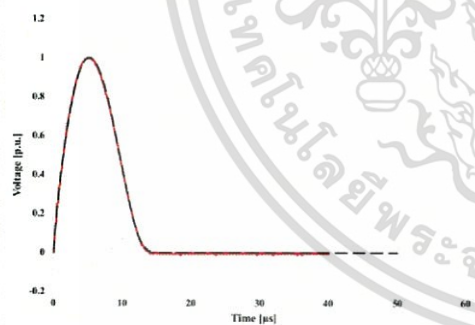


รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า 8/20 µs

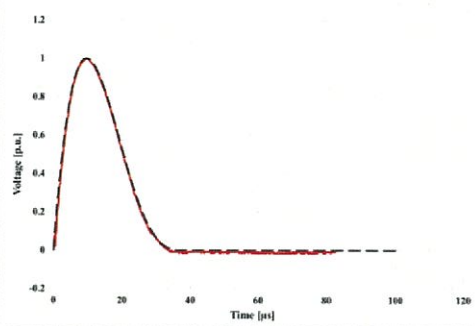
4.2.2 กรณีติดตั้งกับค้ำฟ้าผ่า



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า 1/20 µs



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า 4/10 µs



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า 8/20 µs

5. สรุปผลการทดสอบ

ในโครงการนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน เพื่อให้วัดกระแสไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 62475 จากเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง พบว่าสามารถวัดได้อย่างถูกต้องและอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ทั้งนี้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานยังมีปัญหาการผิดเพี้ยนในช่วงเวลาเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างนี้สามารถใช้ได้ดีในช่วงที่มีความถี่จำกัดที่ต่ำและความถี่จำกัดบนที่สูง คือสามารถวัดได้ในช่วงความถี่ 80 Hz – 2.02 MHz

6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณ ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา และคุณปณชวีร์ ฉายศิริ ที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์เป็นอย่างดี ขอขอบคุณที่ปรึกษาโทและปริญญาเอกที่คอยให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำอย่างใกล้ชิดช่วยเหลือในการสร้างชิ้นงานและการทดลองผลมาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน ที่ร่วมฝ่าฟันและช่วยเหลือกันมา ขอขอบคุณทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้งบประมาณสนับสนุนในการทำชิ้นงานเพื่อประกอบการใช้งานในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายทางคณะผู้จัดทำขอกราบขอพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนด้านทุนทรัพย์และให้กำลังใจ ในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, “เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, 2559.
- [2] ส้ารววย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2549.
- [3] บัญญัติ ลีลาจรรย์กุล, “การพัฒนาวงจรอินทิเกรเตอร์แบบเฉื่อยงานและแบบไวงานเพื่อใช้ร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

METAL OXIDE VARISTORS

Features

- Our Metal Oxide Varistors have UL, CSA and VDE approvals. VDE approvals are in conjunction with IEC61051-2. Plus specific types comply with Accelerated Aging Test Requirements per ANSI/IEEE C62.11. The factory is ISO and TS16949 certified. Taped Parts conform to EIA standards. All electrical specifications are to industry standards with definitions conforming to IEEE specifications. Solderability to MIL STD. Epoxy flammability rating of 94V0.
- RoHS Compliance - Metal Oxide Varistors utilizing suffix (-N) denoting RoHS compliant types for disk sizes 05, 07, 10, 14, 18, 20, 25, 32, 34, 40, and 53 purchased from World Products, LLC comply with RoHS Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. Our metal oxide varistors contain a maximum concentration value of 0.1% by weight in homogeneous materials for lead, mercury, hexavalent chromium, polybrominated biphenyls (PBB) and polybrominated diphenyl ethers (PBDE) and of 0.01% weight in homogeneous materials for cadmium. See Part Number System for more details.
- Product consistency is maintained through extremely stringent quality and statistical control. On-line automatic test equipment provides 100% inspection.
- Extensive selection of equivalents to essentially all metal oxide varistor types. All specifications available for proper accurate design-in purposes.
- Extremely low leakage current levels achieved and exceptional surge handling capability through proprietary formulations.
- Epoxy conformity and control providing for consistent physical dimensions and improved solderability.
- Varistor product design flexibility and quick design cycles in order to assist our customers with their most stringent varistor applications.



Definition of Terms (according to IEEE specifications C62.33)

Average Power Dissipation: Tested using two consecutive pulses at rated peak current using a 10/1000 μ s test waveform with a minimum pulse period of 60 seconds between pulses (IEC 61000-4-5).

Rated RMS Voltage, Rated DC Voltage: The maximum designated values of power system voltage that may be applied continuously between the terminals of a device.

Varistor Voltage: Test characteristic that is used to classify varistors by type. A test current of 1mA DC is typically used to determine varistor voltage classification type. Varistor voltage clamping characteristics can be defined at various test levels.

Rated Peak Single Pulse Transient Current: Maximum surge current, 8/20 μ s waveform which a varistor is rated to withstand for a single surge.

Rated Single Pulse Transient Energy: Maximum allowable energy for a single impulse (see specified waveforms).

Maximum Clamping Voltage: Measured peak voltage across the device terminals when a current impulse of specified amplitude and waveform is conducted through the varistor.

Typical Capacitance: Typical capacitance values are measured at a test frequency of 1KHZ.

Power Dissipation Ratings

Disk Size	Pm-watts
5mm (< 50 VAC)	0.01
5mm (\geq 50 VAC)	0.20
7mm (< 50 VAC)	0.02
7mm (\geq 50 VAC)	0.25
10mm (< 50 VAC)	0.05
10mm (\geq 50 VAC)	0.40
14mm (< 50 VAC)	0.10
14mm (\geq 50 VAC)	0.60

Disk Size	Pm-watts
20mm (< 50 VAC)	0.20
20mm (\geq 50 VAC)	1.00
25mm	1.20
32mm	1.60
34mm (Single)	2.10
34mm (Dual)	2.73
40mm	2.10
53mm	2.50

METAL OXIDE VARISTORS

General Characteristics

Storage Temperature	- 55° C to + 125° C
Operating Surface Temperature	125° C
Operating Ambient Temperature	- 55° C to + 85° C (without derating)
Maximum Voltage-Temperature Coefficient	< -0.01 % / °C
Insulation Resistance	1000 Megohm min.
Hi POT (Leads to Case, 1 min.)	2500 VDC (Phenolic coating 500 VDC and 2000 VDC ratings)
Typical Response Time	< 15 nsec.
Epoxy Rating	94 V-0
Current/Energy Derating (>85° C)	- 2.5 % / °C
DC Leakage Current	200µA Max (at rated DC working voltage)
Solderability	MIL STD 202G, Method 208H
Failure Criteria	Voltage change \pm 10% from initially measured Varistor Voltage. When determining if varistor is within aforementioned criteria the same temperature must be observed as was used for initial Varistor Voltage measurements.

Part Marking

Example: 20E241K-VB

$\frac{20}{(1)} \quad \frac{E}{(2)} \quad \frac{241}{(3)} \quad \frac{K}{(4)} \quad - \quad \frac{N}{(5)} \quad \frac{B}{(6)}$

(1) Disk Diameter

5 = 5mm, 7 = 7mm, 10 = 10mm,
14 = 14mm, 18 = 18mm, 20 = 20mm,
25 = 25mm, 32 = 32mm, 34 = 34mm,
40 = 40mm, 53 = 53mm

5mm – 32mm (Wire Lead)

32mm – 53mm

(2) Type

D = Standard
E = High Energy
R = (applicable only for 34mm Types)

(3) Varistor Voltage

241 = $24 \times 10^1 = 240$

(4) Tolerance

J = $\pm 5\%$, K = $\pm 10\%$, M = $\pm 20\%$

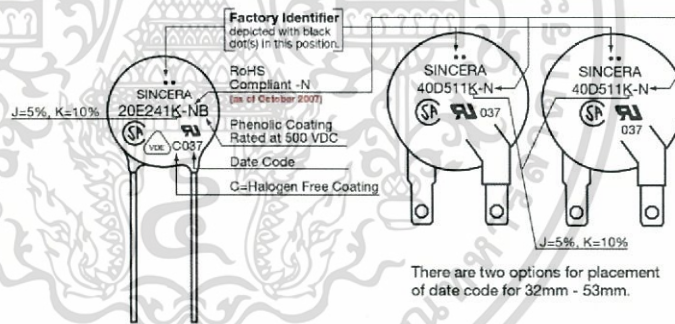
(5) N = RoHs Compliant Series (as of October 2007 forward, per Date Code)

(6) B = Phenolic coating rated at 500 VDC. Phenolic coating rated at 2000 VDC requires no marking.

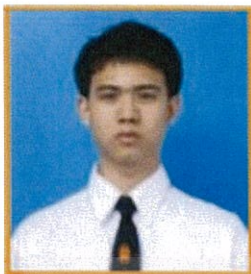
Date Code

037 = First digit represents year (0 = 2010). Second and third digits represent the week of the year. This new date code system was implemented from 9/15/05.

NOTE: Parts will be marked **SINCERA**. (This is the brand name.)



ประวัติผู้เขียน



นาย ภิมพงศ์ จารุสังข์ รหัสนักศึกษา 57010988

วันเกิด 3 กรกฎาคม พ.ศ.2539

ที่อยู่ 186/41 หมู่บ้านอากาศร ม.5 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม
73170

มัธยมศึกษา โรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัย นครปฐม

E-mail peampeampong@gmail.com



นาย ภูธนกิจ จิมจวน รหัสนักศึกษา 57010992

วันเกิด 9 กรกฎาคม พ.ศ.2539

ที่อยู่ 95/34 ม.10 ซ.กาญจนวนิช 55 ถ.กาญจนวนิช ต.เขารูปช้าง อ.เมือง จ.
สงขลา 90000

มัธยมศึกษา โรงเรียนมหาวชิราวุธ สงขลา

E-mail j.phutanakit@gmail.com



นาย มงคล ธีระนุกูล รหัสนักศึกษา 57011008

วันเกิด 12 พฤศจิกายน พ.ศ.2537

ที่อยู่ 22/74 ม.5 ต.ท่าช้าง อ.เมือง จ.จันทบุรี 22000

มัธยมศึกษา โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา

E-mail Mongkol.thee@hotmail.com



นาย สันติธร จิตติถาวร รหัสนักศึกษา 57011336

วันเกิด 11 สิงหาคม พ.ศ.2538

ที่อยู่ 220 ม.1 ต.มะกอกเหนือ อ.ควนขนุน จ.พัทลุง 93150

มัธยมศึกษา โรงเรียนพัทลุง

E-mail santithorn11@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้