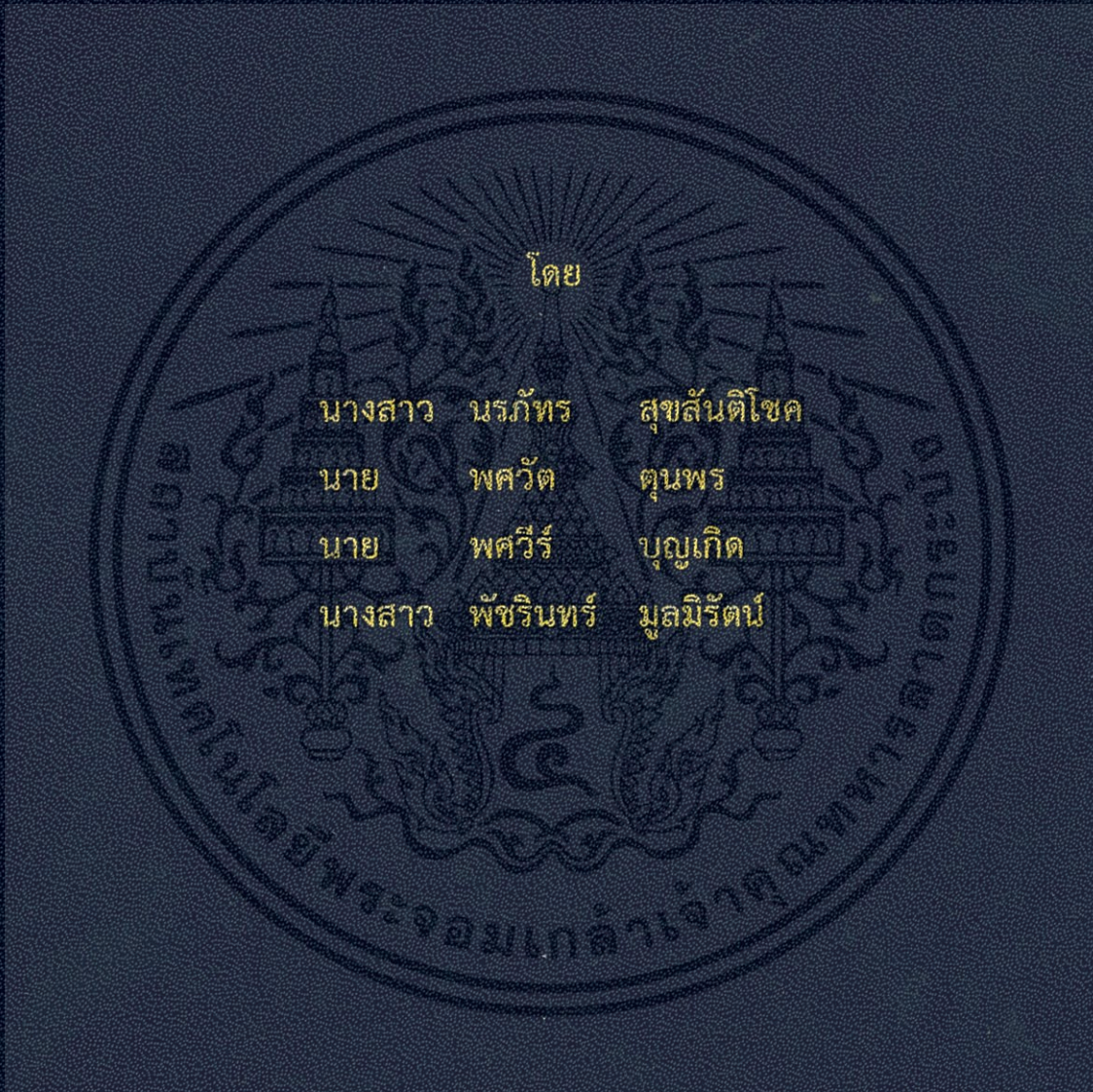


ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์
ROGOWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR IMPULSE CURRENT
MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์
ROGOWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR IMPULSE CURRENT
MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ROGOWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR
IMPULSECURRENT MEASUREMENT



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHÉLOR OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2555

ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์
ROGOWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR IMPULSE CURRENT
MEASUREMENT



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อนันท์วัฒน์ คุณากร
ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์

ผู้จัดทำ

1. นางสาว นรภัทร สุขสันติโชค รหัส 52010568
2. นาย พศวัต ตุนพร รหัส 52010803
3. นาย พศวีร์ บุญเกิด รหัส 52010804
4. นางสาว พัชรินทร์ มุลมรัตน์ รหัส 52010813




..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.อานันทวัฒน์ คุณากร)


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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์

นางสาว นรภัทร	สุขสันติโชค	
นาย พศวัต	ตุนพร	
นาย พศวีร์	บุญเกิด	
นางสาว พัชรินทร์	มูลมรัตน์	
รศ.ดร. อานันท์วัฒน์	คุณากร	อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร. พีรุฒิ	ยุทธโกวิท	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2555		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงานสำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ วงจรอินทิเกรตแบบไวงานมี्यानความถี่ในการวัดกระแสอิมพัลส์ที่กว้างกว่าและครอบคลุมความถี่ที่ต่ำกว่าวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานเดิม ขดลวดโรกอฟสกีจะพันอยู่บนแกนพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กจึงไม่ทำให้เกิดการอิ่มตัวที่สนามแม่เหล็กค่าสูง ส่วนวงจรอินทิเกรตประกอบด้วยออปแอมป์ 2 ตัวต่อกัน ออปแอมป์ตัวแรกทำหน้าที่เป็นวงจรอินทิเกรตแปลงรูปคลื่นแรงดันที่เหนี่ยวนำได้ให้กลายเป็นรูปคลื่นกระแส ออปแอมป์ตัวที่สองทำหน้าที่เป็นวงจรกลับขั้วสัญญาณและขยายขนาดสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณที่มีขนาดใหญ่พอที่จะไม่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนและสามารถวัดได้โดยดิจิตอลออสซิลโลสโคป จากผลการทดลองขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดกระแสอิมพัลส์ได้แม่นยำทั้งรูปคลื่นและขนาดอย่างน่าพอใจ

ROGOWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR IMPULSE CURRENT MEASUREMENT

Narapat	Suksantichok
Potsawat	Toonporn
Possawee	Boonkerd
Patcharin	Moonmirat
Assoc.Prof.Dr.Anantawat	Kunakorn Supervisor
Dr.Peerawut	Yutthagowith Supervisor
Year 2012	

ABSTRACT

This senior project presents design and construction of a Rogowski coil with an active integrator for measurement of impulse currents. The active integrator can measure an impulse current in the wide frequency range and can cover lower frequencies than the conventional passive integrator. The Rogowski coil was wound on a plastic core made of a non-magnetic material without magnetic saturation. The integrator is composed of two operational amplifiers. The first one is employed for integrating an induced voltage waveform to obtain an impulse current waveform. The second one is employed for inverting and amplifying the signal to the level being enough for measurement of a digital oscilloscope and not disturbed by noise signals. From experimental results, the developed Rogowski coil with an active integrator provides a satisfactory accuracy of waveform and magnitude.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้องขอขอบคุณ รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร และ ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึง คุณบุญยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดี ตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณนวมคุณ ไตรรัตนศิริรักษ์ คุณบัญญัติ สีสลาจริยกุล และคุณปิยะพล ถือทอง พี่ๆ ป.โท ที่ให้ความช่วยเหลือในการประกอบสร้างและทดสอบมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้ เครื่องมือ ตลอดจน คุณกมลวรรณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของ โครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนใน ด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน	
2.2 หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี	5
2.3 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	8
2.3.1 คุณสมบัติของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	8
2.3.2 ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	9
2.4 วงจรอินทิเกรตแบบไวงาน	9
2.4.1 วงจรขยายกลับเฟส (inverting amplifier)	9
2.4.2 วงจรอินทิเกรต	10
2.4.3 ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน	12
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน	15
3.1 การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกี	
3.1.1 แกนขดลวด	15
3.1.2 ขดลวด	16
3.1.3 อัตราขยายของระบบวัดและแถบความถี่	16
3.1.4 ความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม (Optimal Damping Resistance)	18
3.2 การออกแบบและสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน	19
3.2.1 การประยุกต์จากวงจรอินทิเกรตเฉื่อยงานแบบ RC	19
3.2.2 แนวคิดการออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน	20
3.3 ผลการคำนวณแถบความถี่ (Bandwidth)	21
3.4 การจำลองแบบใน PSpice จากขดลวดโรกอฟสกีและ วงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ออกแบบ	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5 ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรีเลย์เทรตแบบไวงานที่ประกอบสร้าง	24
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	26
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรีเลย์เทรตแบบไวงาน	
4.2 การทดสอบวงจรรีเลย์เทรตแบบไวงาน	26
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรีเลย์เทรตแบบไวงานร่วมกับ ขดลวดโรกอฟสกีเปรียบเทียบกับการวัดแบบอื่นๆ	28
4.4 การทดสอบวงจรรีเลย์เทรตแบบไวงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี เปรียบเทียบกับการวัดแบบอื่นๆ	28
4.4.1 วงจรทดสอบจริง	28
4.4.2 วิธีการทดสอบ	29
4.4.3 ผลการทดลอง	29
4.4.3.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s	29
4.4.3.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 30/80 μ s	30
4.4.3.3 รูปคลื่นกระแส Long duration	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	33
5.1 สรุปผลการทดลอง	
5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบ	34
5.3 แนวทางการพัฒนา	34
เอกสารอ้างอิง	35
ภาคผนวก	36
ประวัติผู้เขียน	41

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1	4
2.2 หลักการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี	5
2.3 วงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกี	7
2.4 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	8
2.5 ผลตอบสนองความถี่วงจรมินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	8
2.6 ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรมินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	9
2.7 ผลตอบสนองความถี่ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรมินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	9
2.8 วงจรขยายกลับเฟส	10
2.9 วงจรมินทิเกรตแบบไวงาน	10
2.10 ผลตอบสนองความถี่วงจรมินทิเกรตแบบไวงาน	11
2.11 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรมินทิเกรต	12
2.12 วงจรขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรมินทิเกรตแบบไวงาน	12
2.13 ผลตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรกอฟสกี	13
2.14 ผลตอบสนองความถี่ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรมินทิเกรตแบบไวงาน	14
3.1 มิติของแกนขดลวด	15
3.2 การพันขดลวด	16
3.3 สเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน	17
3.4 วงจรขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรมินทิเกรตเฉื่อยงานแบบ RC	19
3.5 กราฟเปรียบเทียบขนาดระหว่างขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบไวงาน และอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	22
3.6 จำลองแบบการสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรมินทิเกรตแบบไวงาน	23
3.7 รูปคลื่นขาเข้าจากการจำลองแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์	24
3.8 รูปคลื่นขาออกจากการจำลองแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์	24
3.9 ขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการออกแบบประกอบสร้าง	24
3.10 วงจรมินทิเกรตแบบไวงานที่ทำการออกแบบประกอบสร้าง	25
4.1 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรมินทิเกรตจากการจำลองใน PSpice ที่ความถี่ 1 kHz	26
4.2 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรมินทิเกรตที่สร้าง ที่ความถี่ 1 kHz	26
4.3 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรมินทิเกรตและวงจรมินทิเกรตขยายที่สร้าง ที่ความถี่ 25 kHz	27
4.4 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรมินทิเกรตและวงจรมินทิเกรตขยายที่สร้าง ที่ความถี่ 50 kHz	27
4.5 ต่อวงจรทดสอบจริง	28
4.6 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $8/20 \mu s$ ที่ถูกทำให้เป็นหนึ่งหน่วย ของอินทิเกรตทั้ง 3 แบบกับระบบวัดอ้างอิง	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 30/80 μs ที่ถูกทำให้เป็นหนึ่งหน่วยของอินทิเกรตทั้ง 3 แบบกับระบบวัดอ้างอิง	30
4.8 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว (Long duration Impulse current) ที่ถูกทำให้เป็นหนึ่งหน่วยของอินทิเกรตทั้ง 3 แบบกับระบบวัดอ้างอิง	31



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการดำเนินงาน	3
2.1 ค่าเวลาที่กำหนดและความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์	4
3.1 ข้อกำหนดทางไฟฟ้าของขดลวดโรกอฟสกีที่ใช้ตัวอินทิเกรตต่างกัน	21
4.1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s ที่วัดได้จากวงจรอินทิเกรตทั้ง 3 แบบและระบบวัดอ้างอิง	30
4.2 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 30/80 μ s ที่วัดได้จากวงจรอินทิเกรตทั้ง 3 แบบและระบบวัดอ้างอิง	31



บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงส่วนใหญ่จะเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งใช้งานในที่โล่งแจ้ง ซึ่งมีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดฟ้าผ่าลงบนตัวอุปกรณ์ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในระบบไฟฟ้าแรงสูงจึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ได้แก่ กับดีกแรงดันเกิน (Surge Arrester) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดินอย่างรวดเร็วและเกิดแรงดันเกินน้อยที่สุด แต่ก่อนที่จะนำกับดีกแรงดันเกินไปติดตั้งใช้งานจริง จะต้องมีการทดสอบความสามารถของกับดีกแรงดันเกินโดยการจ่ายกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 เพื่อตรวจสอบความคงทนต่อกระแสฟ้าผ่าและแรงดันคงเหลือ (Residual Voltage) โดยการจ่ายกระแสจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่มีขนาดและรูปคลื่นเหมือนกระแสฟ้าผ่า

การวัดกระแสจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์มีหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้จะมีเพียง 2 วิธี คือ วัดด้วยความต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำและวัดด้วยขดลวดโรกอฟสกี ซึ่งการวัดด้วยความต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำนั้นจะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้วัดมีขนาดใหญ่ตามกระแสใช้งานและยังกลายเป็นโหลดของวงจรอีกด้วย แต่ขดลวดโรกอฟสกีจะสามารถวัดกระแสอิมพัลส์สูงๆ ได้โดยรูปคลื่นไม่เกิดการบิดเบี้ยวจากการอิมพัลส์ของแกนเนื่องจากเป็นแกนอากาศและการวัดเป็นการคล้องจากภายนอกจึงทำให้อุปกรณ์ที่ใช้วัดไม่กลายเป็นโหลดของวงจร

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องในปีการศึกษา 2554 ได้มีการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ขึ้นใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [1] และเครื่องมือวัดกระแสที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่ ความต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ (Shunt resistor) และ ขดลวดโรกอฟสกี (Rogowski coil) ร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive integrator) แต่เครื่องมือวัดกระแสดังกล่าว ยังมีข้อจำกัดเรื่องการวัดที่ความถี่ต่ำและปัญหาด้านอัตราขยาย ดังนั้น ในปีการศึกษา 2555 จึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานขึ้นมาเพื่อใช้วัดกระแสอิมพัลส์

การวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีคล้องตัวนำ กระแสที่ไหลในตัวนำจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กคล้องผ่านขดลวดที่พันรอบแกน ซึ่งผลจากฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายทั้งสองของขดลวด จึงต้องมีการอินทิเกรตค่าดังกล่าวเพื่อเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัด ซึ่งวงจรที่ใช้อินทิเกรตส่วนใหญ่จะเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน แต่วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถวัดที่ย่านความถี่ต่ำได้และมีอัตราขยายต่ำ เพื่อให้สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ที่ย่านความถี่ต่ำได้และอัตราขยายสูงขึ้น จึงทำการออกแบบสร้างขดลวดโรกอฟสกีที่มีวงจรด้านขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาหลักการทำงานและวิธีการสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน เพื่อใช้วัดกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1
- 2) เพื่อออกแบบประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน ในราคาที่ถูกกว่าการสั่งซื้อจากต่างประเทศ
- 3) เพื่อนำขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิกเรตแบบไวงานที่สร้างขึ้นมาใช้วัดกระแสอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

- 1) ศึกษาหลักการทำงานของขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน
- 2) ศึกษาวิธีการสร้างขดลวดโรกอฟสกี วงจรรินทิกเรตแบบไวงาน และการวัดกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1
- 3) ออกแบบขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน
- 4) สร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน
- 5) ทดสอบและปรับปรุงขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน
- 6) สรุปและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

- 1) ศึกษาหลักการทำงานและวิธีการสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน เพื่อใช้วัดกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1
- 2) ทำการออกแบบประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน
- 3) ทดสอบโดยการวัดกระแสอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ ซึ่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 แล้วบันทึกผลค่าที่วัดได้
- 4) วิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	พ.ศ. 2555							พ.ศ. 2556	
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1) ศึกษาหลักการทำงานของขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน	←→								
2) ศึกษาวิธีการสร้างขดลวดโรกอฟสกี วงจรอินทิเกรตแบบไวงาน และการวัดกระแสฮัมพล์สตามมาตรฐาน IEC 60060-1	←→								
3) ออกแบบขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน	←→								
4) สร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน		←→							
5) ทดสอบและปรับปรุงขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน				←→					
6) สรุปและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์							←→		

←→ การวางแผน ◆.....◆ การดำเนินงานจริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1) มีความเข้าใจในหลักการทำงานและวิธีการสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบต่างๆ
- 2) สามารถสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงานในราคาที่ถูกกว่าการสั่งซื้อจากต่างประเทศไว้ใช้งานเองในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กระแสอิมพัลส์ เป็นกระแสที่สภาวะชั่วครู่มีค่าความชันสูงและเกิดขึ้นในทันทีทันใด มีสาเหตุจากการเกิดฟ้าผ่าซึ่งอาจเกิดได้โดยตรงหรือเกิดในบริเวณใกล้เคียง มีผลทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายจากแรงดันไฟฟ้าเกิน

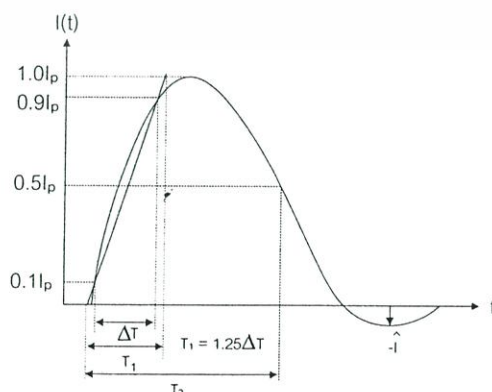
2.1 กระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน [3]

รูปคลื่นของกระแสอิมพัลส์นั้น สามารถเกิดได้หลากหลายรูปแบบ แต่ตาม IEC 60060-1 ได้มีการกำหนดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานไว้ ซึ่งรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานนี้จะแบ่งชนิดตามเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าเวลาที่กำหนดและความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

ลักษณะรูปคลื่น	รูปคลื่นกระแส 1/20 μ s	รูปคลื่นกระแส 4/10 μ s	รูปคลื่นกระแส 8/20 μ s	รูปคลื่นกระแส 30/80 μ s
เวลาหน้าคลื่น $T_1(\mu$ s)	1 μ s \pm 10%	4 μ s \pm 10%	8 μ s \pm 10%	30 μ s \pm 10%
เวลาหางคลื่น $T_2(\mu$ s)	20 μ s \pm 10%	10 μ s \pm 10%	20 μ s \pm 10%	80 μ s \pm 10%
%คลาดเคลื่อน ของค่ายอด	\pm 10%	\pm 10%	\pm 10%	\pm 10%
ค่ายอดกระแส ชั่วตรงข้าม	ไม่เกิน 20%/ p	ไม่เกิน 20%/ p	ไม่เกิน 20%/ p	ไม่เกิน 20%/ p

ซึ่งรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้ จะต้องมิลักษณะของรูปคลื่นเป็นไปตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1

โดยที่ I_p คือ ค่ายอดกระแสอิมพัลส์

T_1 คือ เวลาหน้าคลื่น เป็นช่วงเวลา 1.25 เท่าของเวลาในช่วงที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มค่าจาก 10% ไปจนถึง 90% ของค่ายอด

T_2 คือ เวลาหางคลื่น เป็นช่วงเวลาตั้งแต่กระแสอิมพัลส์เริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

ในการวัดกระแสอิมพัลส์จะต้องมีค่าต่างๆอยู่ในขอบเขตที่ IEC 60060-1 ยอมรับ ดังนี้

- 1) การวัดค่าเวลาหน้าคลื่น (T_1) ให้คำนวณจาก 1.25 เท่าของเวลาในช่วงที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มค่าจาก 10% ไปจนถึง 90% ของค่ายอด
- 2) การวัดค่าเวลาหางคลื่น (T_2) ให้คำนวณจากเวลาตั้งแต่กระแสอิมพัลส์เริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

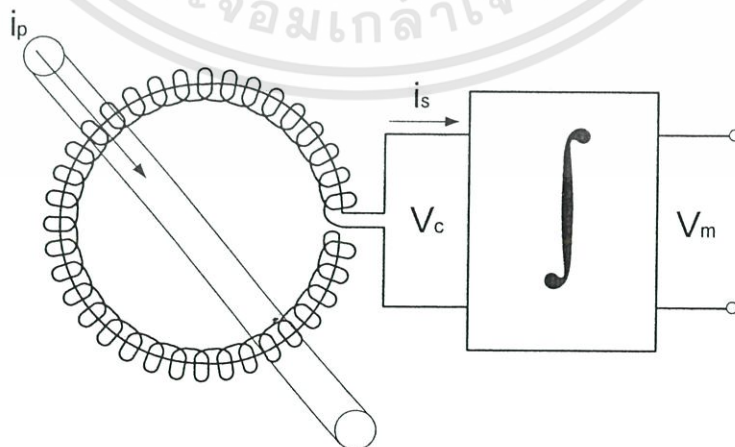
ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 ได้กำหนดคุณสมบัติของระบบวัดกระแสอิมพัลส์ดังนี้

- 1) ความผิดพลาดในการวัดค่ายอดกระแสไม่เกิน $\pm 3\%$
- 2) ความผิดพลาดในการวัดค่าทางเวลาซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปคลื่นกระแสไม่เกิน $\pm 10\%$

2.2 หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี [7]

ขดลวดโรกอฟสกีเป็นอุปกรณ์วัดกระแสซึ่งสามารถออกแบบให้วัดกระแสที่มีแถบ (Bandwidth) กว้างและมีค่ากระแสหลายๆ เช่น กระแสฟ้าผ่า

เมื่อนำขดลวดโรกอฟสกีไปล้อมรอบแท่งตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กล้อมรอบแท่งตัวนำไปคาบเกี่ยวกับขดลวดโรกอฟสกีที่พันรอบแกนวัสดุที่มีค่าอิมิตีวของสนามแม่เหล็กสูง เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย ผลจากฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลานี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายทั้งสองของขดลวด ถ้านำแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ไปผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสม จะได้รูปคลื่นของกระแสที่ต้องการวัดปรากฏผลออกมาในรูปของแรงดันขาออกของวงจร ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี

จากกฎของแอมแปร์ ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะมีความสัมพันธ์

$$\oint H \cdot dl = i_p \quad (2.1)$$

ถ้าขดลวดมีจำนวนรอบ n turn/m พื้นที่หน้าตัด A วางอยู่ล้อมรอบตัวนำที่มีกระแส i_p ไหลผ่าน เมื่อพิจารณาในช่วงความยาว dl จะได้จำนวนรอบ $n \cdot dl$ และจะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่ค้ำล้อมในช่วงความยาว dl เป็น $d\phi$ ซึ่งจะมีค่า

$$d\phi = \mu_0 AnH \cdot dl \quad (2.2)$$

เมื่ออินทิเกรตความยาวครบรอบของขดลวด จะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่ค้ำล้อมผ่านขดลวดทั้งหมด

$$\phi = \mu_0 An \int H \cdot dl = \mu_0 An i_p \quad (2.3)$$

จากกฎของฟาราเดย์ จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ปลายของขดลวด

$$V_c = \frac{d\phi}{dt} = -\mu_0 An \frac{di_p}{dt} \quad (2.4)$$

กำหนดให้ $M = \mu_0 An$ กระแส i_p ที่ต้องการวัดจะมีค่าเท่ากับ

$$i_p(t) = -M \int_0^t V_c(\tau) d\tau \quad (2.5)$$

จะเห็นว่า การวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี ต้องทำการอินทิเกรตแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด เพื่อให้ได้เป็นกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัด จึงต้องมีวงจรอินทิเกรตด้วยเสมอ

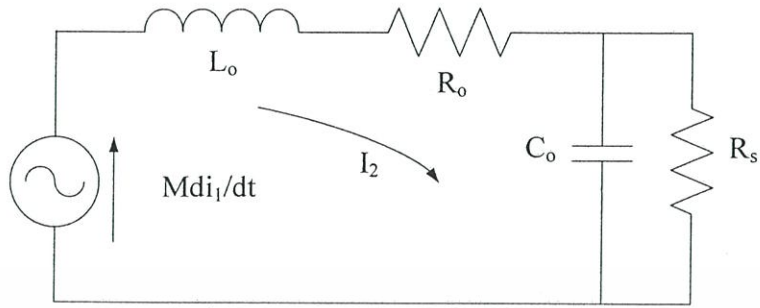
ขนาดแรงดันที่ทำการอินทิเกรต จะขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงตัว (τ) ของวงจรอินทิเกรต

$$V_m = \frac{1}{\tau} \int V_c dt \quad (2.6)$$

โดยอัตราขยายของระบบวัดจะอยู่ในเทอมของอัตราส่วนแรงดันขาออกต่อกระแสที่วัด (V/I) เป็นดังสมการ 2.7

$$s = \frac{V_m}{i_p} = \frac{M}{\tau} \quad (2.7)$$

ขดลวดโรกอฟสกีสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกี

สามารถหาค่า L_o , C_o และค่า R_o ได้ดังนี้

$$L_o = \mu_o A n^2 l = MN \quad (2.8)$$

$$C_o = \frac{16 \epsilon_o \epsilon_r l}{\pi \ln\left(\frac{A}{a}\right)} \quad (2.9)$$

$$R_o = \frac{\rho_w \cdot l_w}{A_w} \quad (2.10)$$

โดยที่ $M \frac{di_1}{dt}$ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V)

R_o คือ ความต้านทานของขดลวดโรกอฟสกี (Ω)

L_o คือ ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกี (H)

C_o คือ ความจุไฟฟ้าของขดลวดโรกอฟสกี (F)

a คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m^2)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนขดลวด (m^2)

N คือ จำนวนรอบขดลวดทั้งหมด (turn)

n คือ จำนวนรอบต่อความยาวแกน (turn/m)

ϵ_r คือ เปรอริมิตติวิตีสัมพัทธ์ของแกนที่ใช้พันขดลวด (Relative permittivity) (F/m)

ϵ_o คือ เปรอริมิตติวิตีสัมพัทธ์ของอากาศ (permittivity) (F/m)

ρ_w คือ ความต้านทานจำเพาะของลวด (Ωm)

A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของลวด (m^2)

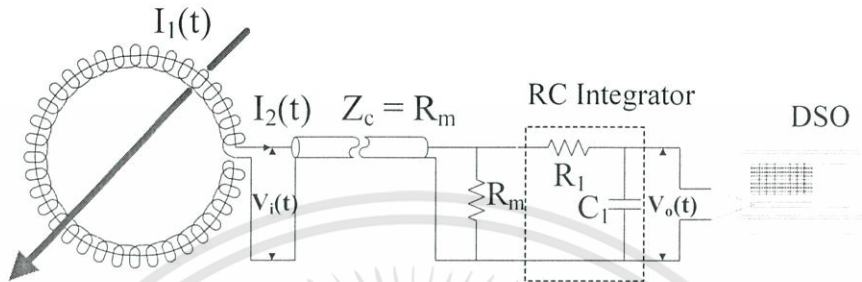
l_w คือ ความยาวของลวด (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน [2]

2.3.1 คุณสมบัติของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

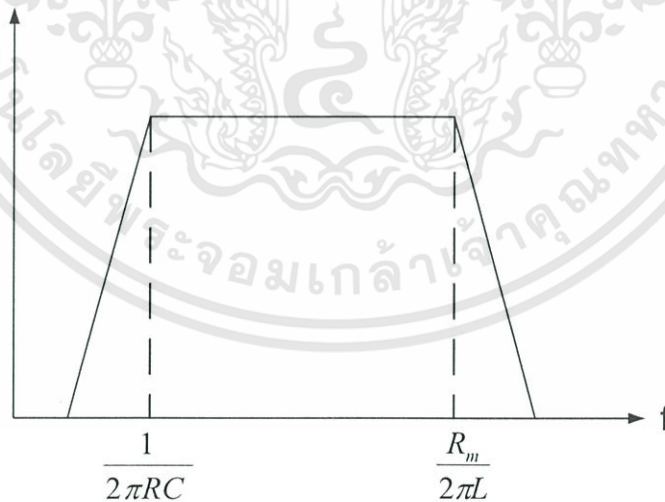
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานเป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานนี้จะทำให้รูปคลื่นขาออกเป็นรูปคลื่นที่ได้จากการอินทิเกรตรูปคลื่นขาเข้า โดยรูปคลื่นที่อินทิเกรตได้จะมีรูปร่างแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงที่ของวงจร จากวงจรรูปที่ 2.4 สามารถคำนวณอัตราขยายได้ตั้งสมการ 2.11 และเขียนผลตอบสนองในวัฏจักรความถี่ (Frequency domain) ดังรูปที่ 2.5

$$A(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I}{(sCR + I)} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองความถี่วงจรงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

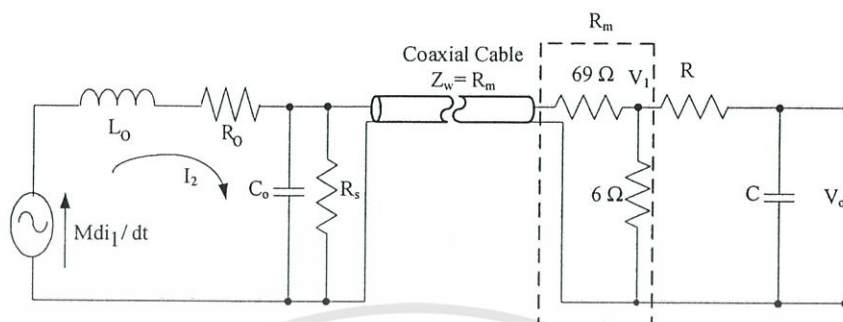
ความถี่คัตออฟด้านความถี่ต่ำ (f_c) ถูกกำหนดโดยค่าตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ของวงจร แสดงดังสมการที่ 2.12

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรรีทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

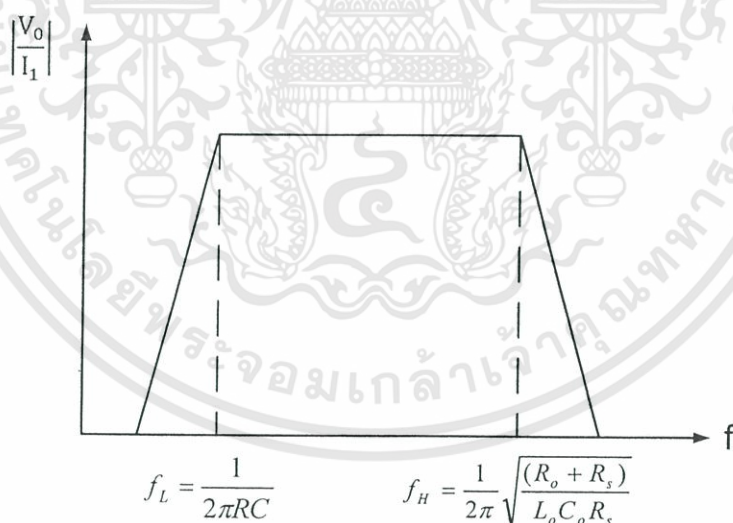
เมื่อนำขดลวดโรกอฟสกีมาต่อร่วมกับวงจรรีทิเกรตแบบเฉื่อยงาน จะได้วงจรดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรรีทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

โดยอัตราขยายของขดลวดโรกอฟสกีที่ต่อร่วมกับวงจรรีทิเกรตแบบเฉื่อยงาน จะแสดงดังสมการที่ 2.13 และเขียนผลตอบสองในวัฏจักรความถี่ (Frequency domain) ดังรูปที่ 2.7

$$G(s) = \left[\frac{\frac{sMR_s}{R_o + R_s}}{\left(\frac{s^2 C_o L_o R_s}{R_o + R_s} \right) + \left(\frac{L_o + C_o R_o R_s}{R_o + R_s} \right) + 1} \right] \cdot \left[\frac{1}{(sCR + 1)} \right] \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.7 ผลตอบสองความถี่ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรรีทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

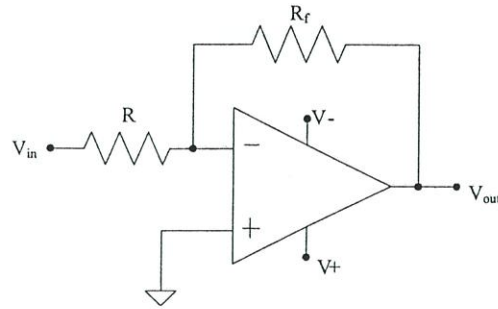
2.4 วงจรรีทิเกรตแบบไวงาน [12]

2.4.1 วงจรขยายกลับเฟส (inverting amplifier)

เป็นวงจรที่เปลี่ยนสัญญาณขาเข้าน้อยๆ ให้เป็นสัญญาณขาออกที่มีขนาดสูงกว่าเดิม มีลักษณะของการขยายเป็นเส้นตรง นั่นคือ อัตราส่วนขาออกต่อขาเข้าจะคงที่เสมอในทางอุดมคติ

วงจรรขยายกลับเฟสจะมีสัญญาณขาเข้าไปทางขั้วลบของออปแอมป์ ดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 วงจรขยายกลับเฟส

ในวงจรขยายแบบนี้ สัญญาณขาออกอยู่ต่างเฟส 180° หรือกลับเฟสเมื่อเทียบกับสัญญาณขาเข้า โดยตัวต้านทาน R เป็นองค์ประกอบขาเข้าและตัวต้านทาน R_f เป็นองค์ประกอบป้อนกลับ แรงดันขาออกของวงจรขยายแบบกลับเฟส เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R}\right) V_{in} \quad (2.14)$$

2.4.2 วงจรอินทิเกรต

เป็นวงจรคงตัวเวลาช่วงยาวที่สร้างขึ้นด้วยการให้ตัวต้านทานเป็นองค์ประกอบขาเข้าและตัวเก็บประจุเป็นองค์ประกอบป้อนกลับ

แรงดันขาออกของวงจรอินทิเกรตเป็นฟังก์ชันเวลา แสดงเป็นสมการดังนี้

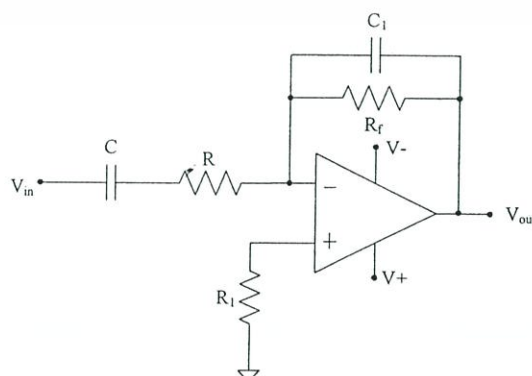
$$V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{in} dt \quad (2.15)$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันขาเข้าค่ายอด

V_{out} คือ แรงดันขาออกที่อินทิเกรตได้

ทำค่าคงตัวเวลา RC ให้เท่ากันโดยประมาณกับคาบเวลาของสัญญาณขาเข้าที่จะนำมารวมกัน

วงจรอินทิเกรตในทางปฏิบัติจะจัดให้ตัวต้านทาน R_f ขนานกับตัวเก็บประจุ C_1 ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

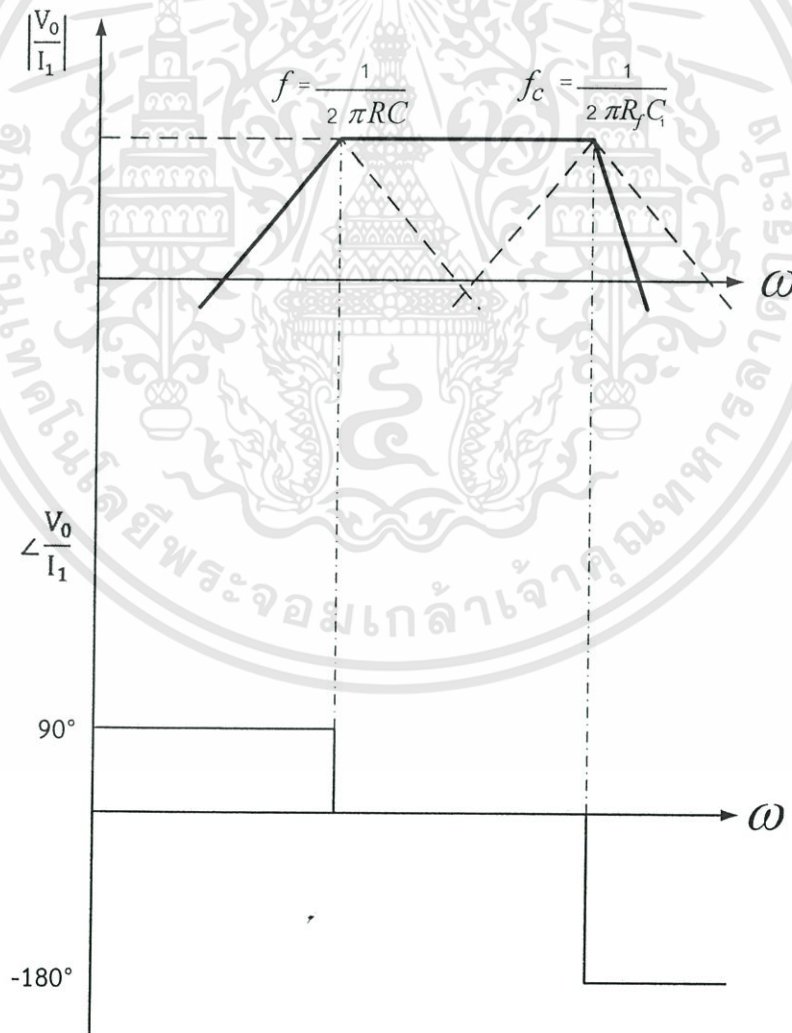
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปจะตั้งค่า R_f (ตัวต้านทานขนาน) เป็นสิบเท่าของ R โดยประมาณ ตัวต้านทานขนานจำกัดอัตราขยายความถี่ต่ำของวงจรเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอินทิเกรตแรงดันออฟเซตกระแสตรง ในคาบเวลาอินทิเกรต ตัวต้านทาน R_f ใช้สำหรับชดเชยแรงดันออฟเซตกระแสตรงที่เกิดจากกระแสไบแอสขาเข้า ค่าสำหรับ R_f คือ

$$R_f = \frac{RR_f}{R+R_f} \quad (2.16)$$

จากวงจรในรูปที่ 2.9 สามารถคำนวณอัตราขยายได้ดังสมการ 2.17 และเขียนผลตอบสนองในวัฏจักรความถี่ (Frequency domain) ดังรูปที่ 2.10

$$B(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{sCR_f}{(sC_1R_f+1)(sCR+1)} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองความถี่วงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

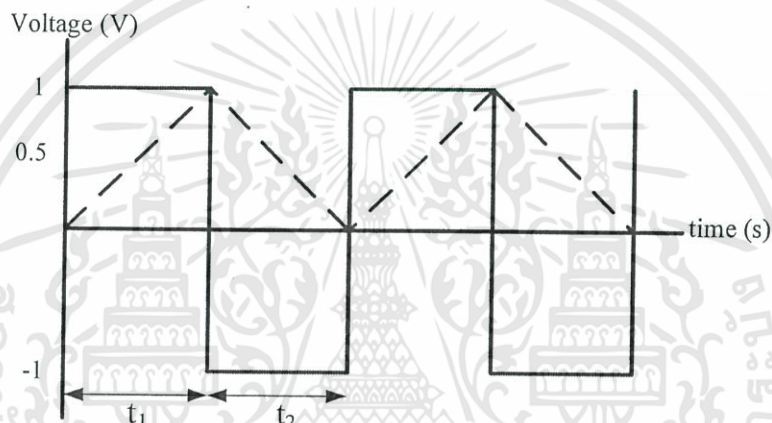
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 ความถี่คutoffด้านความถี่ต่ำ f และ f_c ทั้งสองค่านี้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากเงื่อนไขของวงจรรีโตนิกเรตแบบไวงานที่ได้ออกแบบให้ $CR \gg R_f C_1$ ทำให้ความถี่คutoffด้านความถี่ต่ำของ f มีค่าต่ำกว่า f_c

การลดอัตราขยายสำหรับวัฏกระแสดำ จะทำให้ความถี่คutoffด้านความถี่ต่ำ (f_c) มีค่าสูงเมื่อพิจารณาตามสมการ 2.18

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_1} \quad (2.18)$$

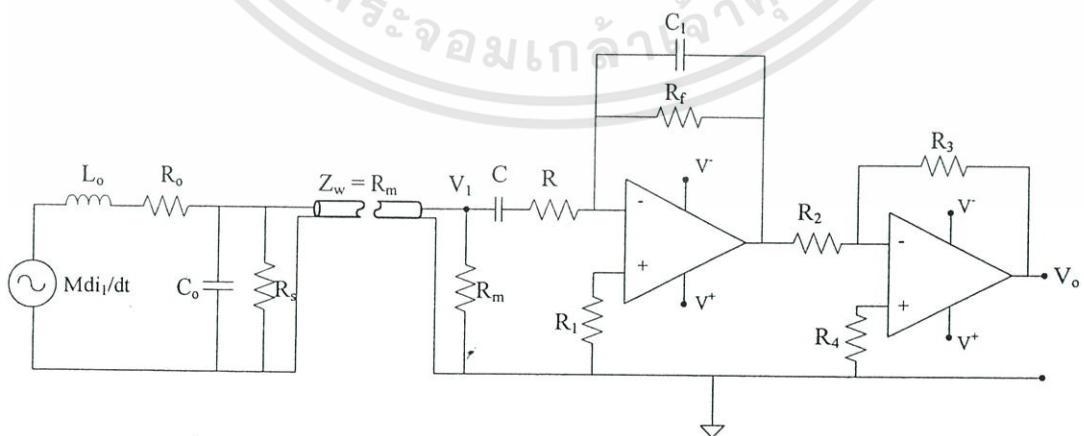
รูปคลื่นขาเข้าเทียบกับรูปคลื่นขาออกเมื่อผ่านวงจรรีโตนิกเรต แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีโตนิกเรต

2.4.3 ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรรีโตนิกเรตแบบไวงาน

เมื่อนำขดลวดโรกอฟสกีมาต่อร่วมกับวงจรรีโตนิกเรตแบบไวงาน จะได้วงจรดังรูปที่ 2.12



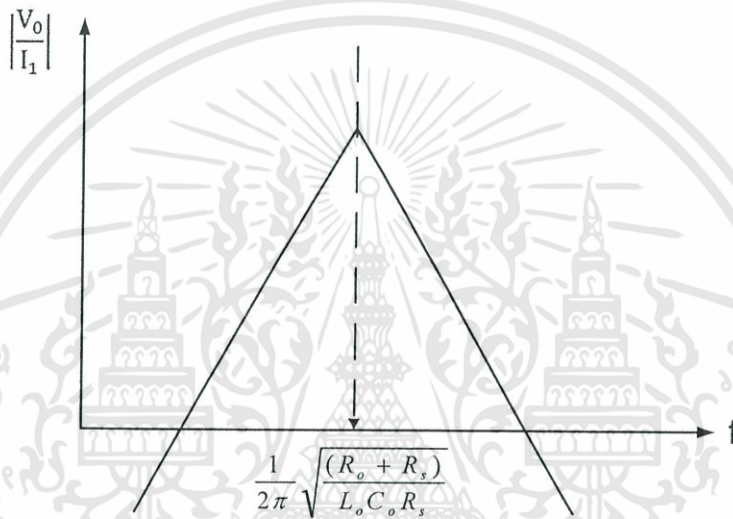
รูปที่ 2.12 วงจรขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรรีโตนิกเรตแบบไวงาน

จากวงจรรูปที่ 2.12 อัตราขยายของขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน สามารถแยกคิดแต่ละวงจรแล้วนำมาหาอัตราขยายรวมภายหลังได้ ดังนี้

อัตราขยายของขดลวดโรกอฟสกี

$$G_1(s) = \frac{V_1}{I_1} = \frac{sM}{[s^2 C_o L_o + (\frac{L_o}{R_s} + R_o C_o)s + (\frac{R_o}{R_s} + 1)]} \quad (2.19)$$

กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรกอฟสกี

จากรูปที่ 2.13 เปรียบเทียบกับสมการที่ 2.19 ที่ช่วงความถี่ต่ำ กราฟจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ตามค่า $sM/(R_o/R_s+1)$ จนถึงที่ความถี่คutoffซึ่งมีค่าเท่ากับ $(1/2\pi)\sqrt{(R_o+R_s)/L_o C_o R_s}$ ที่ความถี่คutoffนี้เป็นจุดเปลี่ยนผลตอบสนองความถี่ ซึ่งในช่วงความถี่สูงกราฟจะมีค่าลดลงอย่างคงที่ตาม $M/(sC_o L_o + (L_o/R_s) + R_o C_o)$

อัตราขยายของวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

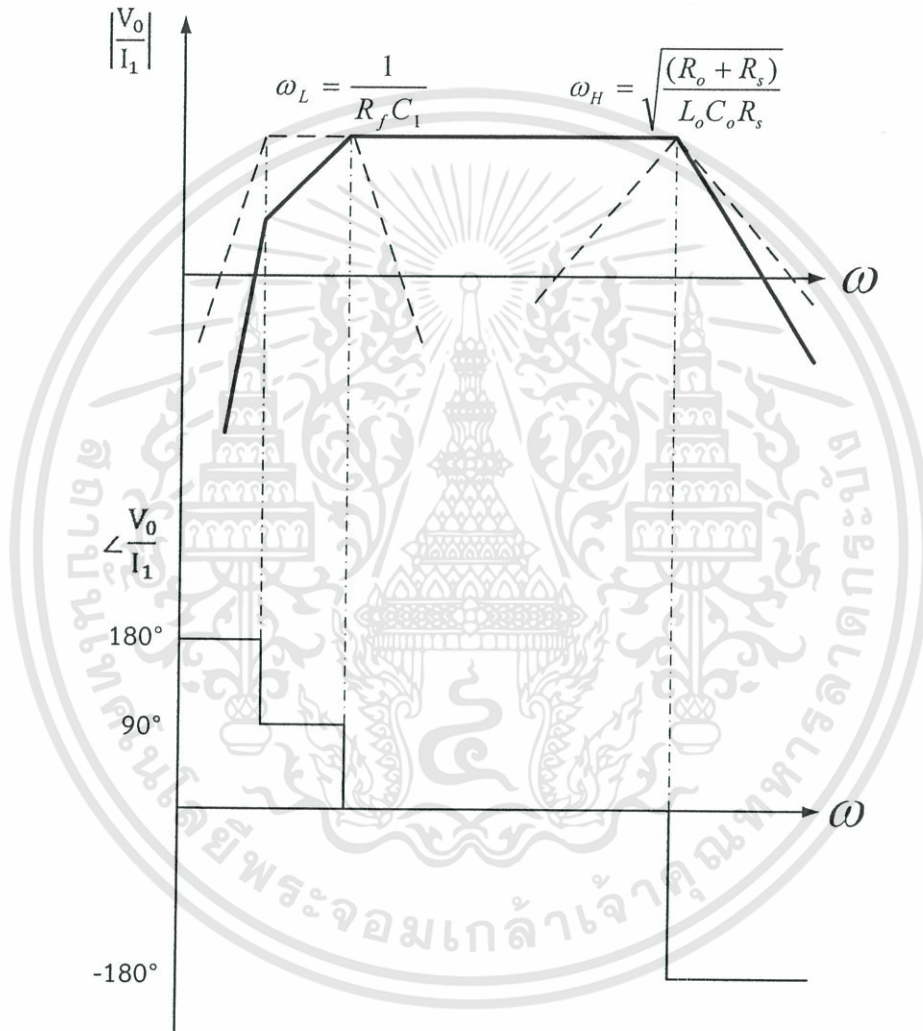
$$G_2(s) = \frac{V_o}{V_1} = \left(\frac{R_3}{R_2}\right) \left(\frac{sCR_f}{(sC_1R_f + 1)(sCR + 1)}\right) \quad (2.20)$$

อัตราขยายรวมของขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) \quad (2.21)$$

$$G(s) = \left[\frac{\frac{sMR_sR_3}{[(R_o+R_s)R_2]}}{\frac{s^2C_oL_oR_s + (L_o+R_oR_sC_o)s}{(R_o+R_s)} + 1} \right] \cdot \left[\frac{sCR_f}{(sC_1R_f+1)(sCR+1)} \right] \quad (2.22)$$

กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน แสดงในรูปขนาดและเฟส ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งหาได้จากรูปที่ 2.10 และ 2.13



รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองความถี่ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอล์ฟและวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน

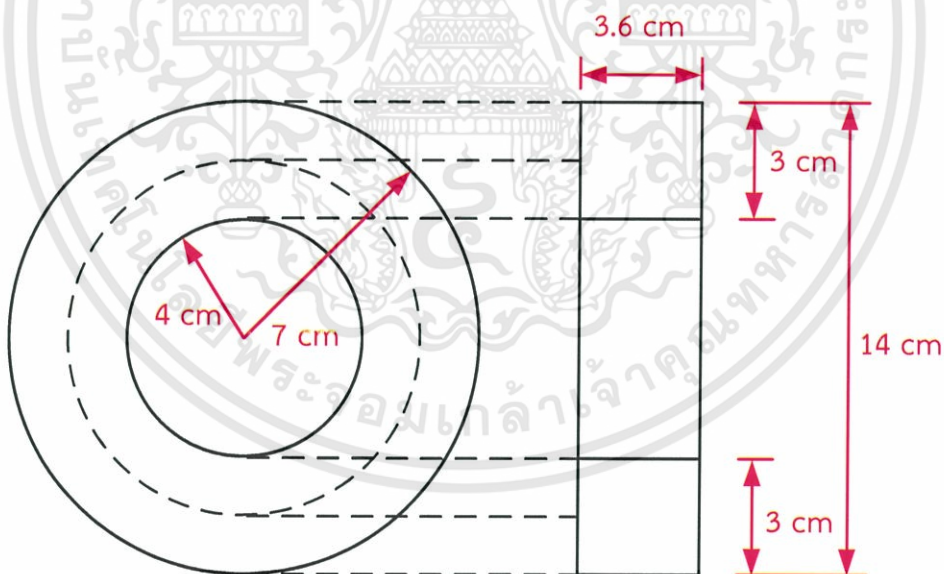
ในขั้นตอนของการออกแบบและสร้างขดลวดโรกอล์ฟและวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน จะเริ่มจากการออกแบบตัวแกนขดลวดให้มีขนาดเหมาะสมในการคล้องวัตกระแสสำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จากนั้นจึงทำการเลือกขนาดขดลวดและคำนวณจำนวนรอบของขดลวดที่จะพัน แล้วจึงทำการออกแบบวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน

3.1 การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอล์ฟ

3.1.1 แกนขดลวด

ออกแบบโดยใช้พลาสติกทำเป็นแกนขดลวด เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก คือ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) เท่ากับอากาศ ทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัวของแกนขดลวดเมื่อนำไปวัตกระแสที่มีขนาดสูงๆและมีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลารวดเร็ว เช่น กระแสมพัลส์ จะได้รูปคลื่นกระแสที่มีความเป็นเชิงเส้นและถูกต้อง

แกนขดลวดนี้จะได้จากการกลึงพลาสติกเป็นรูปทอรอยด์ โดยออกแบบให้รัศมีนอกของแกนเท่ากับ 7 cm รัศมีในของแกนเท่ากับ 4 cm และให้มีขนาดของพื้นที่หน้าตัดแกนเท่ากับ 10.8 cm^2 ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 มิติของแกนขดลวด

จากการออกแบบตามรูปที่ 3.1 จะคำนวณหาความยาวเฉลี่ยของแกนขดลวด (l) ได้จาก

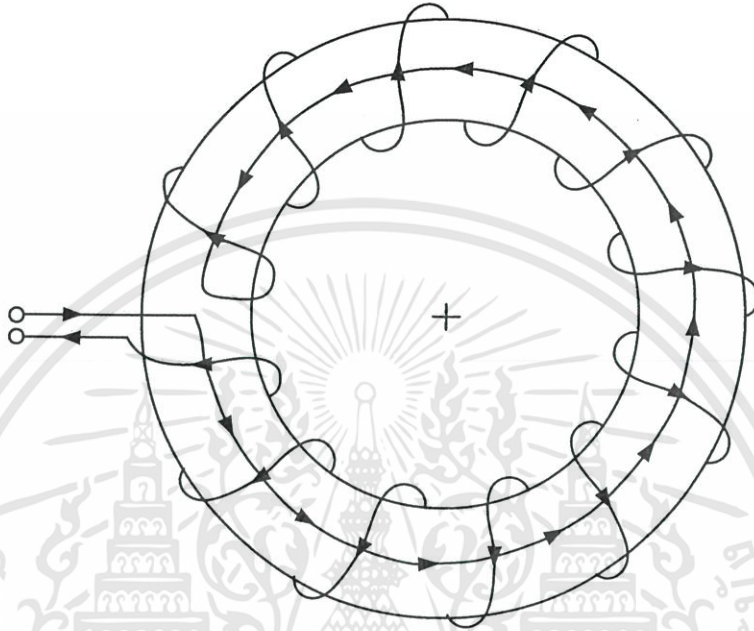
$$l = 2\pi\left(\frac{R+r}{2}\right) \quad (3.1)$$

$$= 2\pi\left(\frac{7+4}{2}\right) = 34.56 \text{ cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ขดลวด

การพันขดลวดโรกอฟสกีจะมีความพิเศษกว่าการพันขดลวดปกติ คือ จะต้องพันย้อนกลับเข้าไปในแกนของขดลวด แล้วพันขดลวดแบบปกติครบรอบ เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การพันขดลวด

เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน สนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันในขดลวดจึงมาจากแหล่งกำเนิดที่ต้องการวัดเพียงอย่างเดียว ซึ่งรูปคลื่นกระแสที่วัดได้จะมีความถูกต้องแม่นยำ การวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กตามกฎของแอมแปร์ ซึ่งการวัดจะมีความถูกต้องเมื่อพื้นที่หน้าตัดและความหนาแน่นของรอบขดลวดคงที่ตลอดช่วงความยาวแกน ดังนั้น การพันขดลวดจึงต้องคำนึงถึงความสม่ำเสมอของพื้นที่หน้าตัดและรอบด้วย

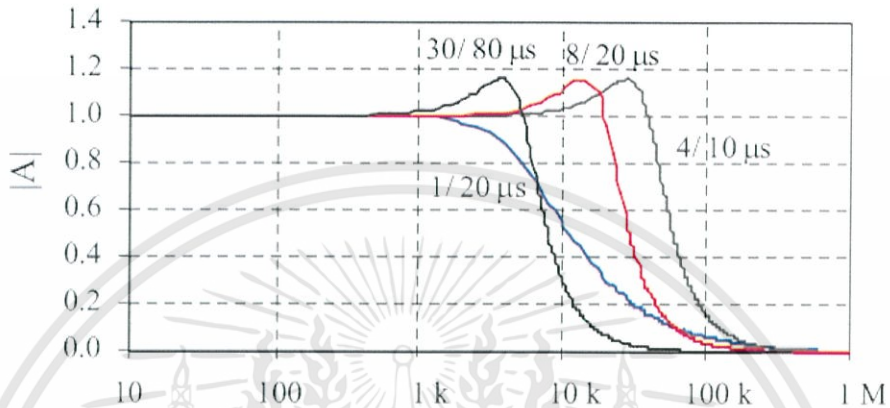
3.1.3 อัตราขยายของระบบวัดและแถบความถี่

เนื่องจากค่ายอดของกระแสที่ต้องการวัดคือ 40 kA ในการออกแบบจะเผื่อพิกัดขึ้นอีก 20 % ของพิกัดที่กำหนด ดังนั้นพิกัดกระแสที่ออกแบบคือ $i_p = 48 \text{ kA}$ โดยกำหนดให้แรงดันขาออกที่ต้องการ (V_{out}) เท่ากับ 16 V

จากการพิสูจน์ในบททฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จะได้ว่าอัตราขยายของขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน สามารถแยกคิดแต่ละวงจรแล้วนำมาหาอัตราขยายรวมภายหลังได้ ซึ่งอัตราขยายของขดลวดโรกอฟสกีที่คิดแยกได้นี้ จะคิดเหมือนกับการคิดขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตเฉื่อยงานแบบ RC โดยจะหาอัตราขยายได้จาก

$$G = \frac{M}{RC} = \frac{V_{out}}{i_p} = \frac{16}{48 \times 10^3} \quad (3.2)$$

ในการออกแบบสร้างระบบวัดกระแสอิมพัลส์จำเป็นต้องทราบลักษณะสเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ เพื่อที่จะนำมาเป็นข้อมูลในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ให้มีความสอดคล้องกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัด ระบบวัดกระแสที่มีความแม่นยำในการวัดต้องมีแถบความถี่ที่ครอบคลุมแถบความถี่ของรูปคลื่นที่ต้องการวัด จากการหาค่าการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐานได้ผลดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

จากรูปที่ 3.3 พบว่าความถี่จำกัดล่างควรจะมีค่า ≤ 338.8 Hz เพื่อให้ครอบคลุมแถบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน ด้วยเงื่อนไขนี้จะสามารถหาค่า M ได้จาก

$$\frac{1}{2\pi RC} \leq f_L \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{2\pi RC} \leq 338.8$$

$$\frac{1}{RC} \leq 2128.74$$

นำค่า $\frac{1}{RC}$ ไปแทนลงในสมการอัตราขยายจะได้

$$M = G \times RC \quad (3.4)$$

$$= \frac{16}{48 \times 10^3 \times 2128.74} = 0.157 \mu H$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาจำนวนรอบขดลวดต่อเมตร

$$n = \frac{M}{\mu_0 A} \quad (3.5)$$

$$= \frac{0.157 \times 10^{-6}}{(4\pi \times 10^{-7}) \times (10.8 \times 10^{-4})} = 115.6 \text{ turn/m}$$

หาจำนวนรอบขดลวดทั้งหมดที่ต้องพัน

$$N = nl \quad (3.6)$$

$$= 115.68 \times 34.56 \times 10^{-2} = 40 \text{ turn}$$

จะได้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า

$$L = MN \quad (3.7)$$

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

กำหนดให้ค่าความต้านทานแมชซึ่งมีค่าเท่ากับ 75 Ω หาค่าความถี่จกัดบนได้จาก

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_o + R_s}{C_o L_o R_s}} \quad (3.8)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3+92}{(0.375 \times 10^{-9})(6.28 \times 10^{-6})(92)}} = 3.3 \text{ MHz}$$

3.1.4 ความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม (Optimal Damping Resistance)

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของขดลวดโรกอฟสกี ตามสมการ (2.19)

$$G_I(s) = \frac{V_I}{I_I} = \frac{sM}{[s^2 C_o L_o + (\frac{L_o}{R_s} + R_o C_o)s + (\frac{R_o}{R_s} + 1)]} = \frac{sM}{[C_o L_o (s-s_1)(s-s_2)]} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $s_{1,2} = -\omega_1 \pm \sqrt{\omega_1^2 - \omega_2^2}$ คือ รากทั้งสองของสมการ
จะได้ว่า

$$\omega_1 = \frac{L_o + R_o C_o R_s}{2C_o L_o R_s} \quad (3.10)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{R_o + R_s}{R_s C_o L_o}} \quad (3.11)$$

หาขนาดของอัตราขยายได้จาก

$$|G_1(j\omega)| = \frac{\frac{MR_s\omega}{R_o + R_s}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right]^2 + 4\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}} \quad (3.12)$$

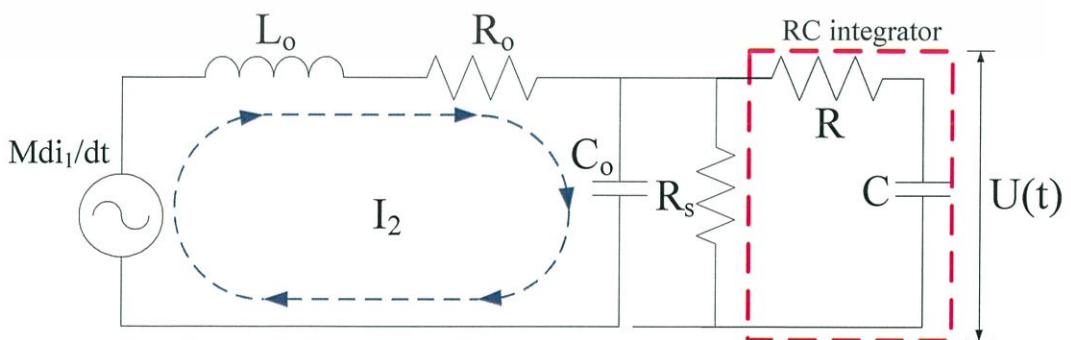
สามารถเลือกค่าความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม เมื่อเส้นโค้งระหว่างขนาดและความถี่ไม่มี
สไปก์ (spike) คือ ต้องการให้มี Maximum overshoot ไม่เกิน 3% ซึ่งจะได้ค่า $(\omega_1/\omega_2) = (1/\sqrt{2})$
ดังนั้น ค่า R_s ที่เหมาะสมคือ

$$R_{so} = \frac{L_o}{\sqrt{2C_o L_o - R_o^2 C_o^2}} \quad (3.13)$$

$$= 92 \Omega$$

3.2 การออกแบบและสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

3.2.1 การประยุกต์จากวงจรอินทิเกรตเฉื่อยงานแบบ RC



รูปที่ 3.4 วงจรขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตเฉื่อยงานแบบ RC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.4 ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตเฉื่อยงานแบบ RC มีฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการที่ 2.13

ความถี่ที่ใช้งานได้มีค่าในช่วง f_L ถึง f_H โดย f_H แทนความถี่จำกัดบน f_L แทนความถี่จำกัดล่าง ซึ่งค่าของทั้ง f_L และ f_H จะอยู่ที่ตำแหน่งที่มีอัตราขยายแรงดันเป็น 0.707 เท่าของค่าสูงสุด (โดยอยู่คนละด้านของกราฟ) หรือถ้าคิดในหน่วยของเดซิเบลคือตำแหน่งที่อัตราขยายมีค่าลดลง 3 เดซิเบล จากค่าสูงสุด สามารถหาค่า f_L และ f_H ได้ตามสมการที่ 2.14 และ 3.8 ตามลำดับ ซึ่งความถี่จำกัดบนจะขึ้นอยู่กับค่า R_o , L_o , C_o และ R_s ส่วนความถี่จำกัดล่างจะขึ้นอยู่กับ R และ C

สามารถหาอัตราขยาย (Gain) ของระบบวัด ได้จาก

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{MR_s}{(R_o + R_s)RC} \quad (3.14)$$

ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตเฉื่อยงานแบบ RC สามารถเพิ่มความถี่จำกัดบนโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างของขดลวดโรกอฟสกี และยังสามารถลดความถี่จำกัดล่างโดยการเพิ่มค่าคงตัวอินทิเกรต (RC) แต่ในการเพิ่มค่าคงตัวอินทิเกรต (RC) นี้ จะทำให้อัตราขยายของระบบวัดลดลงไปด้วย

3.2.2 แนวคิดการออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานสามารถแยกคำนวณได้ เมื่อต่อความต้านทานค่าสูง R อนุกรมกับขั้วขาเข้าลบของอินทิเกรตแบบไวงาน ซึ่งค่าแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดที่ได้จากสมการ $V_L(t) = M di/dt$ จะต้องนำไปทำการอินทิเกรตต่อเพื่อให้ได้กระแสสัมผัสที่ต้องการ

ในการออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน เพื่อให้มีแถบความถี่ที่กว้าง ครอบคลุมทุกความถี่ที่ต้องการวัด จะใช้ตัวต้านทานป้อนกลับแบบลบ (R_f) ขนานกับตัวเก็บประจุ (C_1) ซึ่งจะลดความถี่จำกัดล่าง (f_L) ลง

จากรูปที่ 2.12 วงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ออกแบบจะมีความต้านทานขนาน (R_f) ขนาดระดับเมกะโอห์มเพื่อรักษาวงจรให้เสถียรและจำกัดอัตราความถี่ต่ำของวงจรเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอินทิเกรตแรงดันออฟเซตกระแสดร่งในเวลาอินทิเกรต

ที่ขั้วขาเข้าลบจะต่อตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ (C) อนุกรมกับตัวต้านทาน R เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่ำ

สำหรับตัวต้านทาน R_1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ R/R_f และ R_4 มีค่าเท่ากับ R_2/R_3 ตัวต้านทานทั้งสองจะต่อที่ขั้วขาเข้าบวกเพื่อลดแรงดันออฟเซตกระแสดร่งที่เกิดจากกระแสไบแอส และยังสามารถเพิ่มอัตราขยายที่ออกจากขั้วขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานได้ โดยการต่อวงจรขยายแบบกลับเฟส อนุกรมกับขั้วขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน ซึ่งสามารถปรับอัตราขยายได้โดยการปรับค่า R_2 และ R_3 ตามที่ต้องการ

โดยทั่วไปจะกำหนดให้ $R_f \gg R$ และ $C \gg C_1$

ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบไวงานมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ 2.22 ซึ่งความถี่จำกัดบนจะขึ้นอยู่กับค่า R_o , L_o , C_o และ R_s ส่วนความถี่จำกัดล่างจะขึ้นอยู่กับ R_f และ C_1 สามารถหาอัตราขยาย (Gain) ของระบบวัดได้จาก

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{MR_s R_3}{(R_o + R_s) R_2 R C_1} \quad (3.15)$$

ความถี่จำกัดล่างจะขึ้นอยู่กับตัวต้านทาน R_f และตัวเก็บประจุ C_1 ซึ่งสามารถลดความถี่จำกัดล่างดังกล่าวลงได้โดยการเพิ่มค่าความต้านทาน R_f เข้าไป นอกจากนี้การเพิ่มค่าความต้านทาน R_f ยังมีผลทำให้แถบความถี่มากขึ้นอีกด้วย

ส่วนอัตราขยายของระบบวัดจะขึ้นอยู่กับค่า C_1 , R , R_2 และ R_3 แต่ไม่ขึ้นกับค่าของ R_f ดังนั้นอัตราขยายของระบบวัดจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อลดความถี่จำกัดล่างโดยการปรับค่า R_f

3.3 ผลการคำนวณแถบความถี่ (Bandwidth)

จากทฤษฎีที่กล่าวมาทำให้เชื่อได้ว่าวงจรอินทิเกรตแบบไวงานมีย่านความถี่ในการวัดกระแสอิมพัลส์ที่กว้างกว่าและครอบคลุมความถี่ที่ต่ำกว่าวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ดังนั้นก่อนที่จะสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อใช้แทนแบบเฉื่อยงานเดิม จึงต้องพิสูจน์ว่าวงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่จะสร้างมีย่านความถี่ในการวัดกระแสอิมพัลส์ที่กว้างกว่าและครอบคลุมความถี่ที่ต่ำกว่า โดยการหาแถบความถี่เปรียบเทียบกัน

ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดทางไฟฟ้าของขดลวดโรกอฟสกีที่ใช้ตัวอินทิเกรตต่างกัน

พารามิเตอร์	ขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	ขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบไวงาน
ความถี่จำกัดล่าง (LCF)	$\frac{1}{2\pi RC}$	$\frac{1}{2\pi R_f C_1}$
ความถี่จำกัดบน (HF)	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_o + R_s}{C_o L_o R_s}}$	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_o + R_s}{C_o L_o R_s}}$
อัตราขยายของระบบวัด sensitivity	$\frac{MR_s}{(R_o + R_s) RC}$	$\frac{MR_s R_3}{(R_o + R_s) R_2 R C}$

ในการหาแถบความถี่นี้จะใช้โปรแกรม MATLAB แสดงผลเปรียบเทียบขนาดและมุมเฟสของขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (G_1) กับแบบไวงาน (G_3) โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดโรกอฟสกี

- $R_o = 3 \Omega$
- $R_s = 92 \Omega$
- $L_o = 6.28 \mu\text{H}$
- $C_o = 0.375 \text{ nF}$

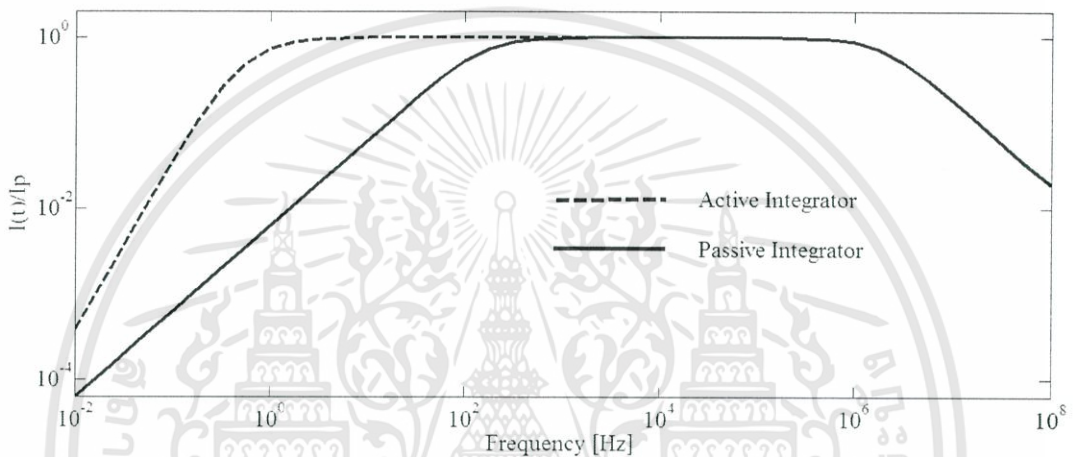
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรวมอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

- $R = 10 \text{ k}\Omega$
- $C = 47 \text{ nF}$

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรวมอินทิเกรตแบบไวงาน

- $R = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_3 = 1 \text{ และ } 10 \text{ k}\Omega$
- $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_f = 2.2 \text{ M}\Omega$
- $C = 47 \text{ }\mu\text{F}$
- $C_1 = 94 \text{ nF}$



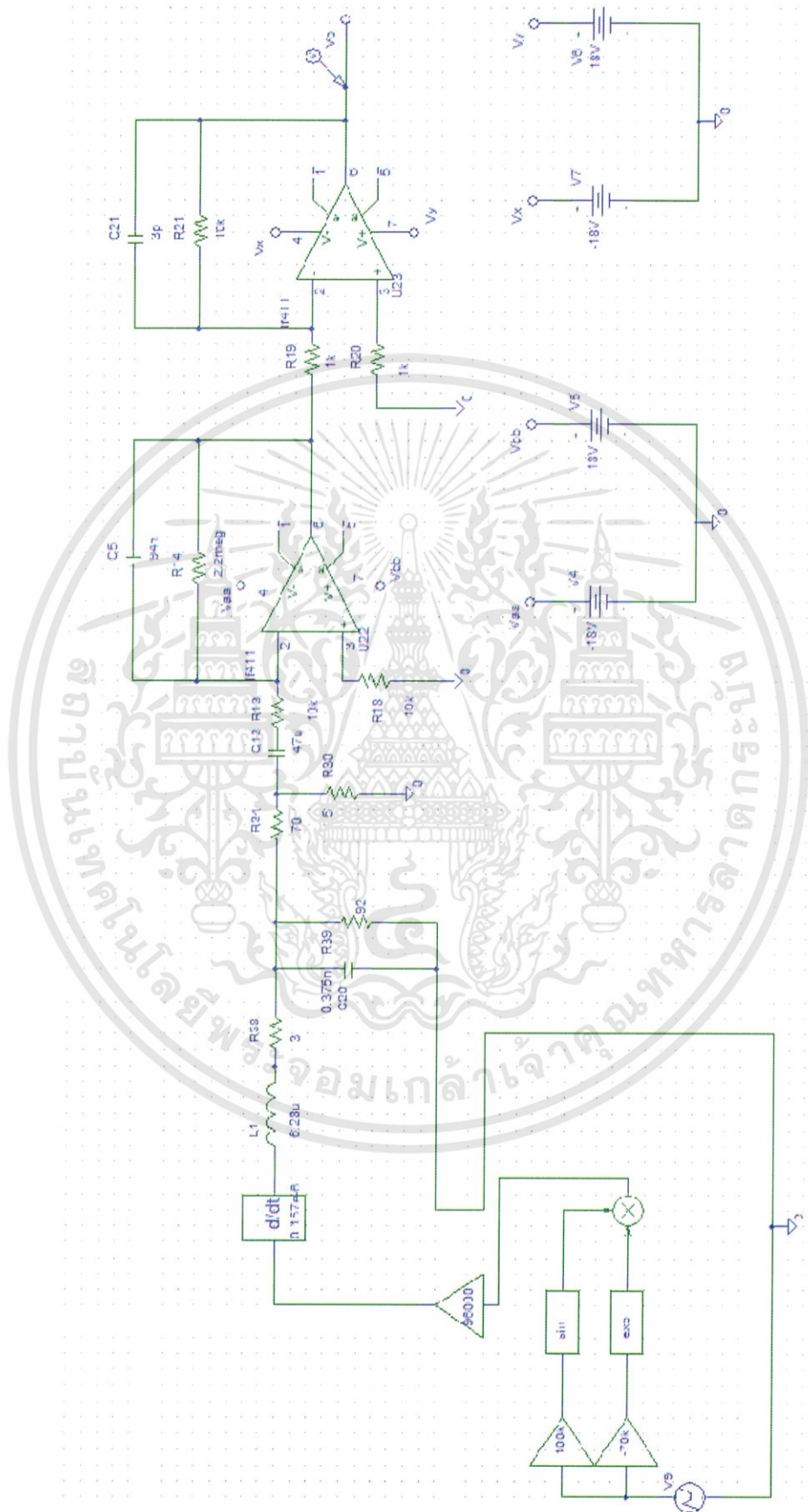
รูปที่ 3.5 กราฟเปรียบเทียบขนาดระหว่างขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบไวงานและอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

รูปที่ 3.5 แสดงโพลไดอะแกรมของเครื่องมือวัดกระแสจากโปรแกรม MATLAB จะเห็นว่าขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและอินทิเกรตแบบไวงานจะมีความถี่จำกัดบนเท่ากัน แต่ขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบไวงานจะมีความถี่จำกัดล่างที่ต่ำกว่าขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ทำให้ขดลวดโรกอฟสกีแบบไวงานมีแถบความถี่ที่กว้างกว่าอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน นอกจากนี้ขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบไวงานยังสามารถเพิ่มอัตราขยายของขาออกได้โดยการปรับค่า R_3 จากวงจรรขยายแบบกลับเฟส

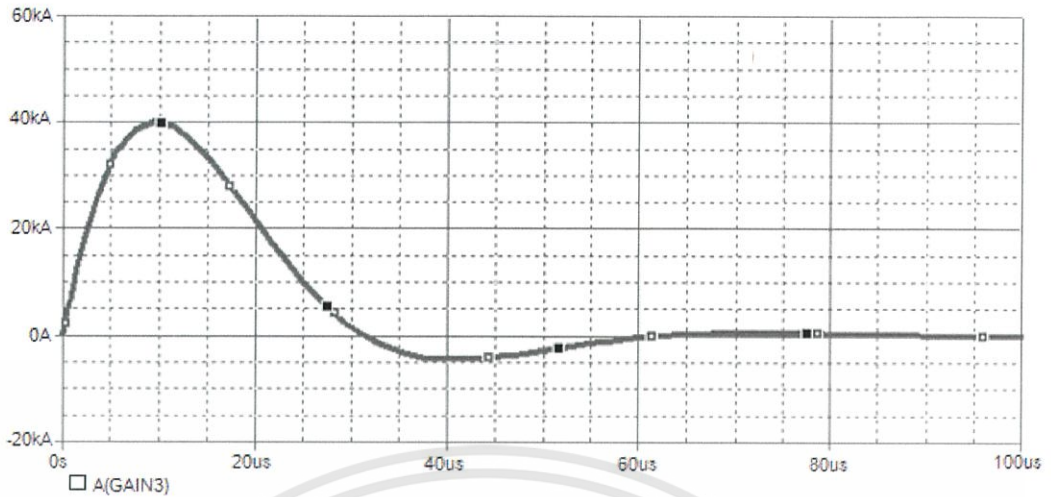
3.4 การจำลองแบบใน PSpice จากขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรวมอินทิเกรตแบบไวงานที่ออกแบบ

การออกแบบจะใช้ค่าพารามิเตอร์ตามหัวข้อที่ 3.3 โดยใช้ค่า $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ เพื่อให้อัตราขยายของขาออกที่ออกจากวงจรรวมอินทิเกรตมีค่าเพิ่มขึ้น

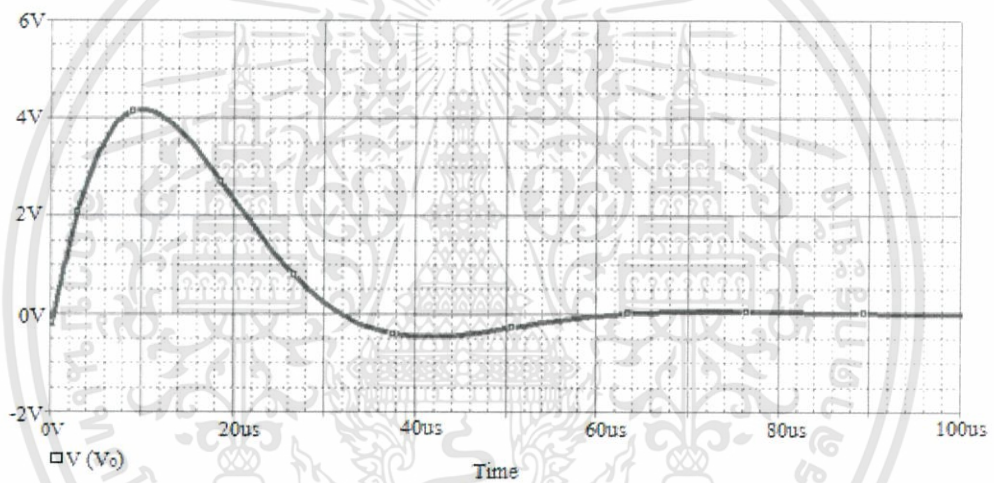
รูปคลื่นกระแสฮอลล์ที่วัดได้จากขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรวมอินทิเกรตแบบไวงาน สามารถจำลองได้โดยใช้โปรแกรม PSpice โดยสร้างจากการประมาณเชิงเส้นของรูปคลื่นกระแสฮอลล์ 8/20 μs ขนาด 40 kA ผ่านดิฟเฟอเรนเชียลที่มีอัตราขยาย 0.157×10^6 ดังรูปที่ 3.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.6 จำลองแบบการสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรมอนิเตอร์แบบวงจรรณด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

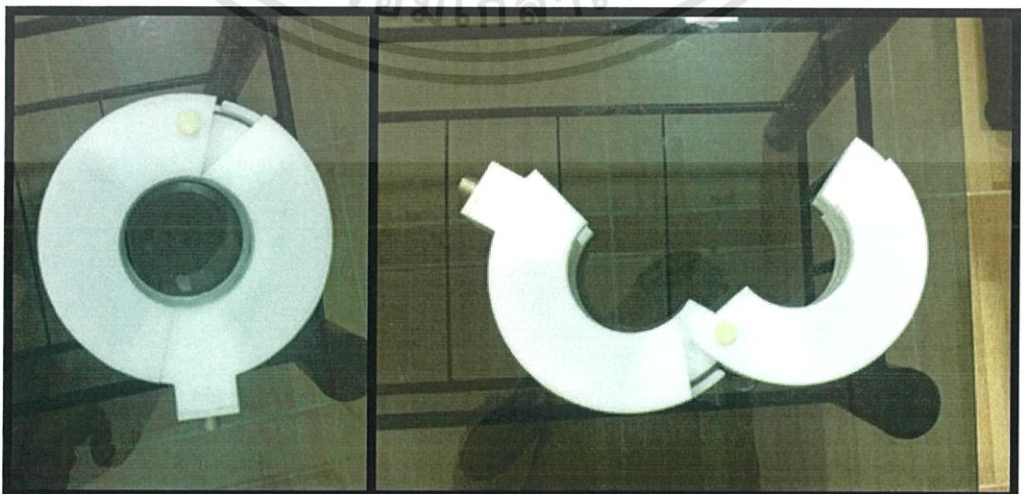


รูปที่ 3.7 รูปคลื่นขาเข้าจากการจำลองแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นขาออกจากการจำลองแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.5 ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรีเลย์แบบไวงานที่ประกอบสร้าง



รูปที่ 3.9 ขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการออกแบบประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ทำการออกแบบประกอบสร้าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล

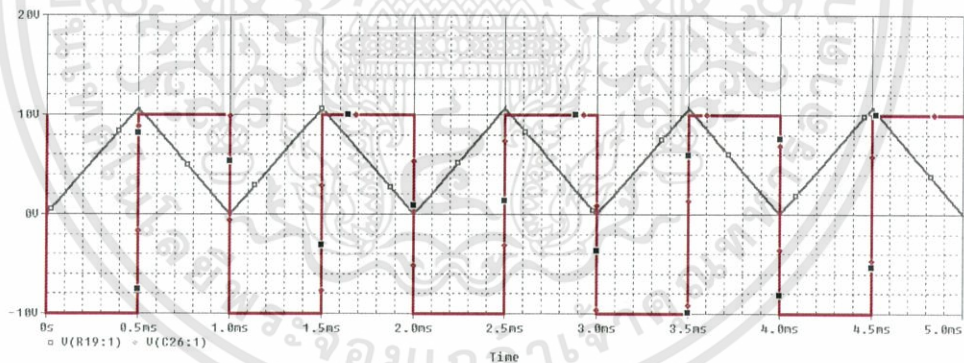
การทดสอบและประเมินผล จะทำการทดสอบในส่วนของวงจรอินทิเกรตแยกต่างหากก่อน เพื่อดูว่าวงจรอินทิเกรตใช้งานได้ตามที่ออกแบบ หลังจากนั้นจึงจะทดสอบขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเทียบกับวงจรอินทิเกรตแบบต่างๆ เพื่อดูประสิทธิภาพในการวัด

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

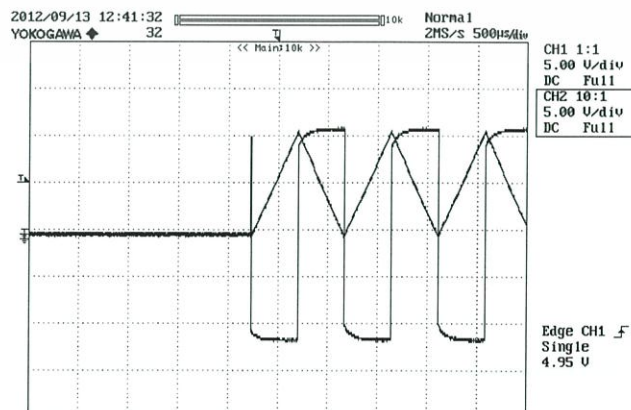
- | | |
|---|-----------|
| 1) วงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ทำการออกแบบประกอบสร้าง | 1 ชุด |
| 2) เครื่องกำเนิดรูปคลื่น (Function generator) | 1 เครื่อง |
| 3) แบตเตอรี่ 9V | 4 ก้อน |
| 4) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป | 1 เครื่อง |

4.2 การทดสอบวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

เมื่อออกแบบประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะนำมาใช้ต่อเป็นวงจรขาออกของขดลวดโรกอฟสกีเพื่อใช้วัดกระแสลิมิตส์นั้น จะต้องทำการทดสอบวงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ออกแบบประกอบสร้างเพื่อดูว่าสามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบ โดยทดสอบกับเครื่องกำเนิดรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีขนาดแรงดัน $\pm 10V$



รูปที่ 4.1 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตจากการจำลองใน PSpice ที่ความถี่ 1 kHz

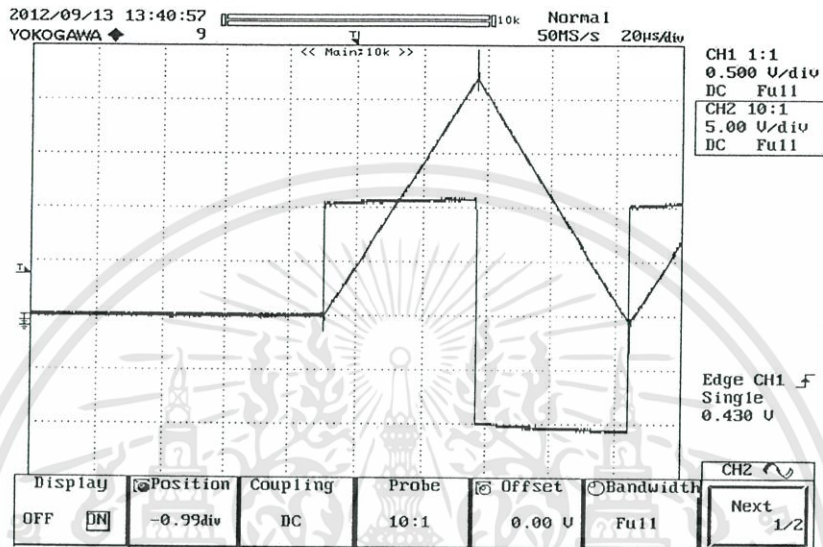


รูปที่ 4.2 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตที่สร้าง ที่ความถี่ 1 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบ พบว่ารูปคลื่นที่ได้จากวงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่สร้างมีค่าตรงกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ทำการออกแบบและจำลองในโปรแกรม PSpice

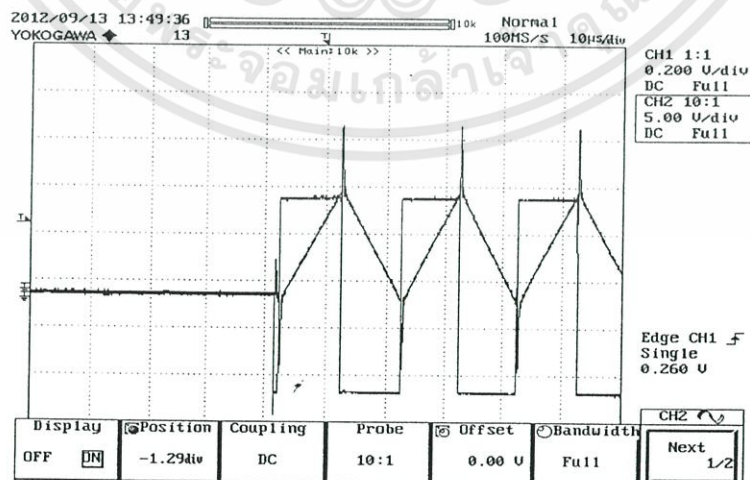
จากรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงสเปกตรัมความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานนั้น พบว่าขนาดของรูปคลื่น $8/20 \mu\text{s}$ จะแสดงค่าความถี่ประมาณ 25 kHz จึงต้องทำการทดสอบว่าวงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่สร้างขึ้นมานั้น สามารถวัดรูปคลื่นที่มีช่วงความถี่ 25 kHz ได้



รูปที่ 4.3 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตและวงจรอัตราขยายที่สร้างที่ความถี่ 25 kHz

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าวงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ออกแบบสร้างขึ้นมานั้นสามารถวัดรูปคลื่นที่มีความถี่ 25 kHz ได้

นอกจากนี้ จะมีการเผื่อค่าความผิดพลาดของความถี่ โดยจะทำการเผื่อความถี่จากเดิมขึ้นเป็นสองเท่า (50 kHz)



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตและวงจรอัตราขยายที่สร้างที่ความถี่ 50 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าวงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ออกแบบสร้างขึ้นมานั้นสามารถวัดรูปคลื่นที่มีความถี่ 50 kHz ได้

จากการทดสอบวงจรอินทิเกรตแบบไวงานข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าวงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ออกแบบสร้างนี้สามารถวัดรูปคลื่นที่มีความถี่ได้ 50 kHz เป็นอย่างน้อย ซึ่งเพียงพอต่อการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน

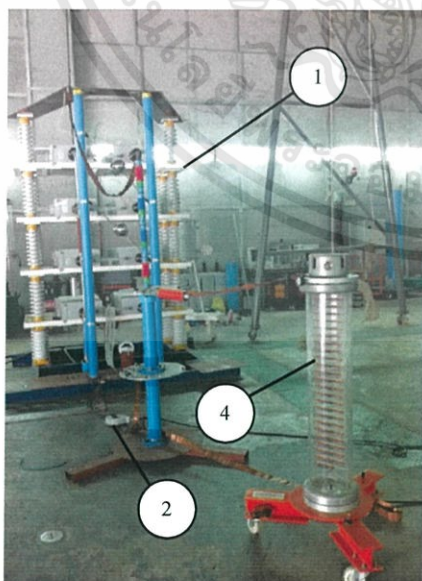
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรอินทิเกรตแบบไวงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีเปรียบเทียบกับ การวัดแบบอื่นๆ

1) วงจรอินทิเกรตแบบไวงาน	1 ชุด
2) วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า	1 ชุด
3) วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	1 ชุด
4) ขดลวดโรกอฟสกี	1 ชุด
5) ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (Shunt resistor)	1 ชุด
6) เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์	1 เครื่อง
7) สายเคเบิล RG 11	1 เส้น
8) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป	1 เครื่อง

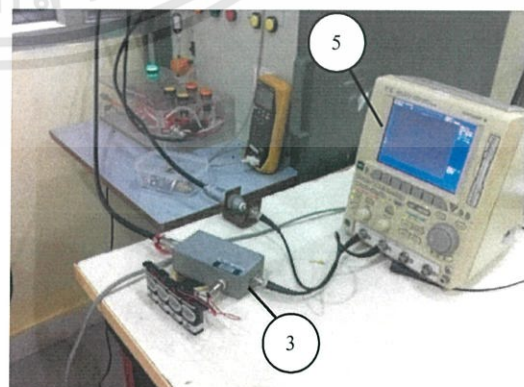
4.4 การทดสอบวงจรอินทิเกรตแบบไวงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีเปรียบเทียบกับ การวัดแบบอื่นๆ

การทดสอบหาคุณสมบัติของขดลวดโรกอฟสกีที่ออกแบบ จะทำการทดสอบเปรียบเทียบกับขดลวดโรกอฟสกีอ้างอิง

4.4.1 วงจรทดสอบจริง



ก)



ข)

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ในวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.5 ประกอบด้วย

- 1) เครื่องกำเนิดกระแสแอมป์
- 2) ขดลวดโรกอฟสกี
- 3) วงจรอินทิเกรตแบบไวงาน
- 4) ความต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ (Shunt resistor)
- 5) ออสซิลโลสโคป

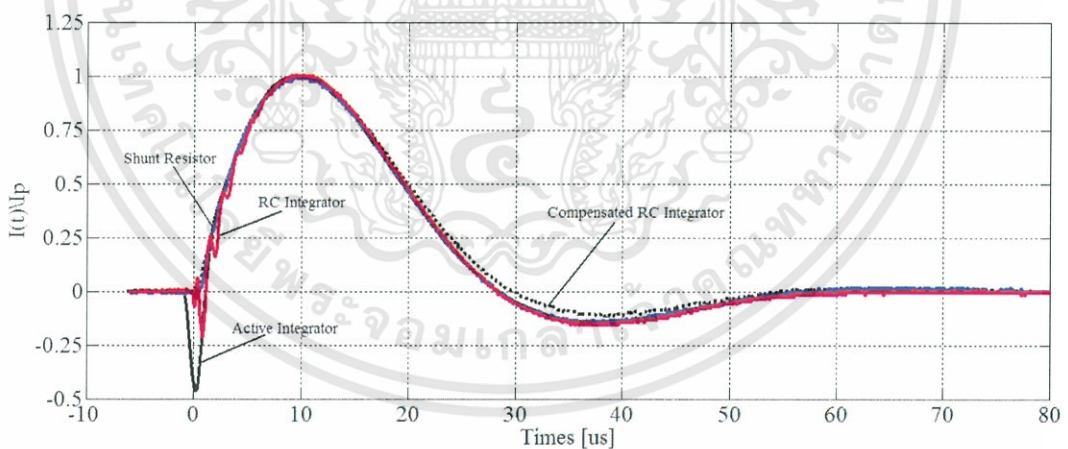
4.4.2 วิธีการทดสอบ

- 1) ต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 4.5
- 2) ทดสอบวงจรลัดวงจรโดยใช้แรงดันอัดประจุ 40 kV ให้กับวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน, วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า และ วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง
- 3) บันทึกผลการทดลอง

4.4.3 ผลการทดลอง

นำค่าที่ได้จากการทดลองกับอินทิเกรตทั้ง 3 แบบ มาเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง โดยทำให้เป็นหนึ่งหน่วยในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบค่าของอินทิเกรตทั้ง 3 แบบ กับระบบวัดอ้างอิง

4.4.3.1 รูปคลื่นกระแสแอมป์ 8/20 μ s



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสแอมป์ 8/20 μ s ที่ถูกทำให้เป็นหนึ่งหน่วยของอินทิเกรตทั้ง 3 แบบกับระบบวัดอ้างอิง

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสแอมป์ที่ได้จากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (RC Integrator) ช่วงเวลาเริ่มแรกก่อนถึงเวลานำคลื่น รูปคลื่นกระแสแอมป์จะแกว่ง แต่พอเวลาผ่านไป รูปคลื่นจะดีขึ้น ซึ่งช่วงเวลาทางคลื่นจะทับกับรูปคลื่นของระบบวัดอ้างอิง (Shunt Resistor)

ส่วนรูปคลื่นกระแสแอมป์จากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า (Compensated RC Integrator) จะเห็นว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นจะดี ส่วนเวลาทางคลื่นจะยาวกว่าระบบวัดอ้างอิง

สำหรับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงาน (Active Integrator) ช่วงเวลาเริ่มต้นจะเกิดการผิดเพี้ยนเริ่มต้นแต่จะไม่ส่งผลต่อการวัดของเวลาหน้าคลื่น ซึ่งเวลาหน้าคลื่นและเวลาหางคลื่นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จะซ้อนทับกับระบบวัดอ้างอิง

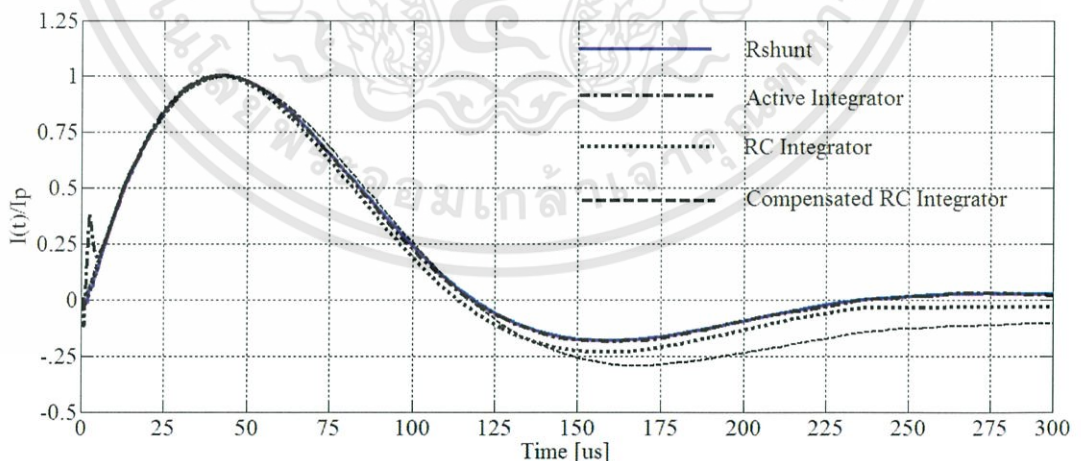
ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสที่ต้องพิจารณา ประกอบด้วย เวลาหน้าคลื่น (T_1) เวลาหางคลื่น (T_2) และค่ายอดกระแสกลับขั้ว ($-i_p$)

ค่าพารามิเตอร์เวลาหน้าคลื่น เวลาหลังคลื่นและค่ายอดกลับขั้วของอินทิเกรตแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งค่าที่อยู่ในวงเล็บคือค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ได้จากการวัดของอินทิเกรตเปรียบเทียบกับตัวต้านทานอนุกรม

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs ที่วัดได้จากวงจรรีจิสเตอร์ทั้ง 3 แบบและระบบวัดอ้างอิง

อุปกรณ์ที่ใช้วัด	เวลาหน้าคลื่น $T_1(\mu\text{s})$	เวลาหางคลื่น $T_2(\mu\text{s})$	ค่ายอดกระแสกลับขั้ว $-i_p$ (%)
ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (R_{shunt})	7.25 (0%)	19.5 (0%)	15.3 (0%)
วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน	7.25 (0%)	19.6 (0.5%)	15.86 (+3.7%)
วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า	7.25 (0%)	20 (+2.6%)	11.46 (-25.1%)
วงจรรีจิสเตอร์แบบไวงาน	7.25 (0%)	19.5 (0%)	14.75 (+3.6%)

4.4.3.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 30/80 μs



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 30/80 μs ที่ถูกทำให้เป็นหนึ่งหน่วยของอินทิเกรตทั้ง 3 แบบกับระบบวัดอ้างอิง

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากวงจรรีจิสเตอร์ทั้งสามแบบเมื่อเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงแล้วมีค่าใกล้เคียงกัน

แต่ที่เวลาเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากวงจรอินทิเกรตแบบไวงานจะเกิดปัญหาการผิดเพี้ยนเริ่มต้น แต่ว่าการผิดเพี้ยนเริ่มต้นนี้ไม่ส่งผลต่อเวลาหน้าคลื่นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

เวลาหางคลื่นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานจะสั้นกว่าระบบวัดอ้างอิง

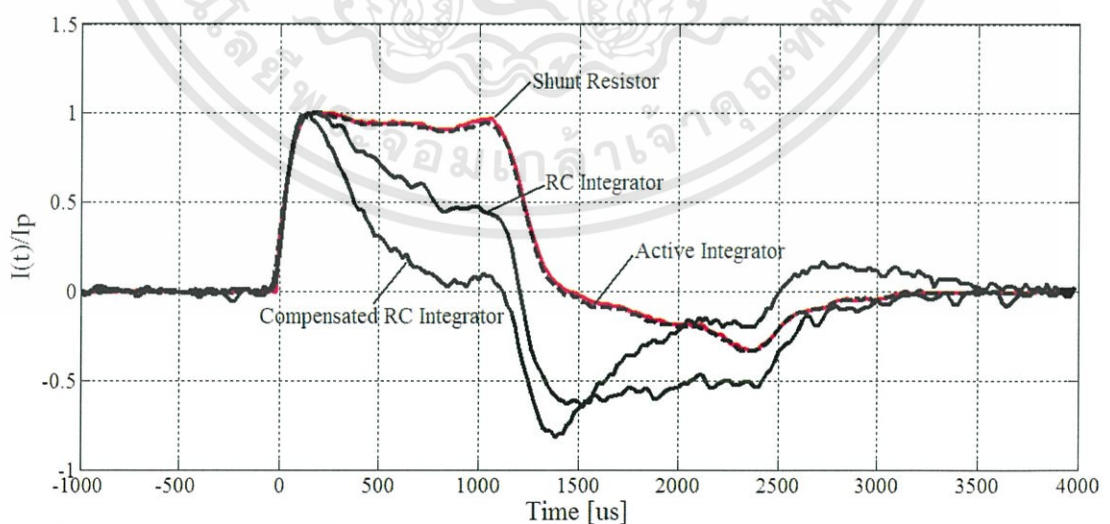
ส่วนเวลาหลังคลื่นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากวงจรอินทิเกรตแบบชดเชยค่าจะยาวกว่าระบบวัดอ้างอิง

ค่าพารามิเตอร์เวลาหน้าคลื่น เวลาหลังคลื่นและค่ายอดกลับหัวของอินทิเกรตแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งค่าที่อยู่ในวงเล็บคือค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ได้จากการวัดของอินทิเกรตเปรียบเทียบกับตัวต้านทานอนุกรม

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 30/80 μs ที่วัดได้จากวงจรอินทิเกรตทั้ง 3 แบบและระบบวัดอ้างอิง

อุปกรณ์ที่ใช้วัด	เวลาหน้าคลื่น $T_1 (\mu\text{s})$	เวลาหางคลื่น $T_2 (\mu\text{s})$	ค่ายอดกระแสกลับหัว $-i_p$ (%)
ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (R_{shunt})	31.5 (0%)	83.6 (0%)	18.3 (0%)
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	31.5 (0%)	81.1 (-3.0%)	23.4 (+27.9%)
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า	31.5 (0%)	84.5 (+1.3%)	29.4 (+60.7%)
วงจรอินทิเกรตแบบไวงาน	31.5 (0%)	83.5 (-0.1%)	18.5 (+1.1%)

4.4.3.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว (Long duration Impulse current)



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว (Long duration Impulse current) ที่ถูกทำให้เป็นหนึ่งหน่วยของอินทิเกรตทั้ง 3 แบบกับระบบวัดอ้างอิง

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าวงจรรินทิกเรตแบบไวงาน สามารถวัดความถี่ในช่วงที่ต่ำกว่าวงจรรินทิกเรตแบบชดเชยค่าและวงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงาน เพราะสามารถวัดช่วงความถี่ต่ำได้ โดยทางของรูปคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรรินทิกเรตแบบไวงานจะมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นกระแสที่ได้จากระบบวัดอ้างอิง ส่วนทางของรูปคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรรินทิกเรตแบบชดเชยค่าจะสั้นมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในขั้นตอนการสรุปผลการทดลองจะทำการสรุปผลการทดลองที่ได้จากการวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบวงงานที่ทำการออกแบบประกอบสร้างเปรียบเทียบกับขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและความต้านทานไว้ความเหนี่ยวนำ โดยทดสอบกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $8/20 \mu\text{s}$ $30/80 \mu\text{s}$ และอิมพัลส์ช่วงยาว

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาตลอดจนทดสอบ พบว่ากระแสอิมพัลส์ที่วัดได้โดยการใช้ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบวงงานที่ทำการออกแบบประกอบสร้างขึ้นนั้น มีค่าเวลาหน้าคลื่น (T_1) เวลาหลังคลื่น (T_2) รวมถึงค่ายอดของกระแส อยู่ในระดับใกล้เคียงกับค่าจริง มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และมีค่ากระแสกลับชั่ว ($-i_p$) ไม่เกินค่าที่กำหนดในมาตรฐาน กล่าวคือ ที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $8/20 \mu\text{s}$ ค่าเวลาหน้าคลื่น (T_1) และเวลาหลังคลื่น (T_2) จะไม่มีความผิดพลาดเลย ส่วนค่ากระแสกลับชั่ว ($-i_p$) จะมีค่าผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 3.6 % ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $30/80 \mu\text{s}$ ค่าเวลาหน้าคลื่น (T_1) จะไม่มีความผิดพลาดเลย เวลาหลังคลื่น (T_2) จะมีค่าผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 0.1 % ส่วนค่ากระแสกลับชั่ว ($-i_p$) จะมีค่าผิดพลาดไปจากค่าอ้างอิง 1.1 % ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ทั้งนี้ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบวงงานยังมีปัญหาการผิดเพี้ยนเริ่มต้นที่เวลาเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ แต่อย่างไรก็ตาม วงจรอินทิเกรตแบบวงงานที่ทำการออกแบบประกอบสร้างนี้สามารถใช้ได้ดีกับรูปคลื่นกระแสที่มีเวลาทางคลื่นยาวและสามารถใช้ได้ดีกับช่วงความถี่ที่กว้าง (Wide Bandwidth)

เมื่อเปรียบเทียบกับกรวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน พบว่าค่ากระแสอิมพัลส์ที่วัดได้จากวงจรอินทิเกรตแบบวงงานจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่า กล่าวคือ ที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $8/20 \mu\text{s}$ เวลาหลังคลื่น (T_2) ของแบบเฉื่อยงานจะมีค่าผิดพลาดมากกว่าแบบวงงานอยู่ 0.5 % ค่ากระแสกลับชั่ว ($-i_p$) ของแบบเฉื่อยงานจะมีค่าผิดพลาดมากกว่าแบบวงงานอยู่ 0.1 % ที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ $30/80 \mu\text{s}$ เวลาหลังคลื่น (T_2) ของแบบเฉื่อยงานจะมีค่าผิดพลาดมากกว่าแบบวงงานอยู่ 2.9 % ค่ากระแสกลับชั่ว ($-i_p$) ของแบบเฉื่อยงานจะมีค่าผิดพลาดมากกว่าแบบวงงานอยู่ 26.8 % และการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานนั้น ไม่สามารถเพิ่มอัตราขยายเข้าไปในวงจรได้ ทำให้การวัดกระแสอิมพัลส์ที่ขนาดไม่สูง ได้รูปคลื่นที่มีขนาดเล็ก การอ่านค่าที่วัดต้องประมาณค่า ซึ่งต่างจากการวัดค่ากระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบวงงาน ที่สามารถเพิ่มอัตราขยายที่ตัววงจรได้เลย ทำให้สามารถขยายสเกลของกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าไม่สูง เพื่ออ่านค่าที่วัดได้อย่างละเอียด

นอกจากนี้การวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบวงงานยังสามารถวัดรูปคลื่นในช่วงความถี่ที่ต่ำได้มากกว่าการวัดโดยใช้วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานอีกด้วย

ส่วนการวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ขดเคี้ยวค่า ใช้ได้ดีกับรูปคลื่น $8/20 \mu\text{s}$ ซึ่งเป็นรูปคลื่นที่ไวและเวลาสั้น

5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบ

ปัญหาและอุปสรรคที่พบในโครงการขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน มีดังนี้

- 1) มีปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนมาปะปนกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่วัดได้
- 2) รูปคลื่นที่ได้จากการจำลองแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นรูปคลื่นในอุดมคติ ซึ่งค่าที่ทดลองได้จริงจะมีความคลาดเคลื่อนจากผลของสัญญาณรบกวนต่างๆ

5.3 แนวทางการพัฒนา

จะเห็นได้ว่าขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ทำการออกแบบประกอบสร้างขึ้นนั้น สามารถใช้วัดกระแสอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ได้จริง แต่จะมีปัญหาการผิดเพี้ยนเริ่มต้นที่เวลาเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแส ซึ่งไม่สามารถวัดได้อย่างสมบูรณ์ในทุกๆ รูปคลื่นมาตรฐาน การวัดรูปคลื่นมาตรฐานที่มีเวลาหน้าคลื่นน้อย (หน้าคลื่นชัน) ยังมีปัญหาของสัญญาณรบกวนเกิดอยู่ในการพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นนั้น ควรพัฒนาให้ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน สามารถวัดกระแสอิมพัลส์มาตรฐานที่มีเวลาหน้าคลื่นสั้น (หน้าคลื่นชัน) โดยไม่มีผลของการผิดเพี้ยนเริ่มต้นและสัญญาณรบกวน โดยการเพิ่มวงจรกรองสัญญาณรบกวนหรือเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีค่าความต้านทานภายในขาออก (R_o) ค่าต่ำ



เอกสารอ้างอิง

- [1] นวคุณ ไตรรัตน์ภักษ์ และ คณะ, เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์, **ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [2] พีรภูมิ ยุทธโกวิท และ คณะ, อุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดขดลวดโรกอฟสกี, **โครงการวิจัย**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [3] IEC Standard Publication 60060-1, **High-voltage test techniques**, 1989.
- [4] IEC Standard Publication 60099-4, **Surge arresters**, 2006.
- [5] A. Kushnerov, **Design of Rogowski coil with integrator**, Ben-Gurion University of the Negev, 2006.
- [6] พรชัย บุตรเชื้อ, การออกแบบสร้างโรกอฟสกีคอยล์ขนาด 10 kA, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
- [7] พงศ์พันธุ์ ปรียวงศ์ และ สำรวัย สังข์สะอาด, การออกแบบสร้างโรกอฟสกีคอยล์วัดกระแสอิมพัลส์ขนาดพิกัด 100 กิโลแอมป์, **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา**, ปีที่ 13, ฉบับที่ 4, 2545, หน้า 40-46.
- [8] สุขสันต์ หวังสถิตย์วงษ์ และ ดำรง จินขาวขำ, โพรบวัดกระแสสลับแบบตัดโค้งได้ขนาด 500 แอมป์, **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**, ปีที่ 11, ฉบับที่ 3, 2544, หน้า 29-34.
- [9] P. Yutthagowith, N. Pattanadech, A. Kunakorn and M. Leelajindakraierk, Design and Construction of a Rogowski's Coil with Co-sensated C-Integrators for Measuring Impulse Current, **International Power Engineering Conference**, 2007, pp. 189-192.
- [10] Mario Chiampi, Gabriella Crotti, and Andrea Morando, Evaluation of the Rogowski Coil Performances in Power Frequency Applications, **IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT**, Vol. 60, No.3, 2011, pp. 854-862.
- [11] Yi Liu, Fuchang Lin, Qin Zhang, and Heqing Zhong, Design and Construction of a Rogowski Coil for Measuring Wide Pulsed Current, **IEEE SENSORS JOURNAL**, Vol. 11, No.1, 2011, pp. 123-130.
- [12] Frank R.Dungan, **ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซีสำหรับช่างเทคนิค**, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2545.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์

ROGOWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR IMPULSE CURRENT MEASUREMENT

นรภัทร สุขสันติโชค พงษ์วัต คุนพร พศวีร์ บุญเกิด พัทธรินทร์ มูลมณีรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย คลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงานสำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ ประโยชน์ของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่มีย่านความถี่ในการวัดกระแสอิมพัลส์ที่กว้างกว่าและครอบคลุมความถี่ที่ต่ำกว่าวงจรอินทิเกรตแบบเชิงขงานเดิม ขดลวดโรกอฟสกีจะพันอยู่บนแกนพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กจึงไม่ทำให้เกิดการอิ่มตัวที่สนามแม่เหล็กค่าสูง ส่วนวงจรอินทิเกรตแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกทำหน้าที่เป็นวงจรอินทิเกรตแปลงรูปคลื่นแรงดันที่เหนี่ยวนำได้ให้กลายเป็นรูปคลื่นกระแสกลับขั้ว ส่วนตัวที่สองทำหน้าที่เป็นวงจรกลับขั้วสัญญาณและขยายขนาดสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณที่มีขนาดใหญ่พอที่จะไม่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนและสามารถวัดได้โดยดิจิตอลออสซิลโลสโคป จากผลการทดสอบขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดกระแสอิมพัลส์ได้แม่นยำทั้งรูปคลื่นและขนาดอย่างน่าพอใจ

คำสำคัญ : ขดลวดโรกอฟสกี, อินทิเกรตแบบไวงาน, วัดกระแสอิมพัลส์

Abstract

This paper presents design and construction of a Rogowski coil with an active integrator for measuring impulse currents. The advantage of active integrator is that it can measure an impulse current in the wide frequency range and can cover lower frequencies than the conventional passive integrator. The Rogowski coil was wound on a plastic core made of a non-magnetic material without magnetic saturation. The circuit of the integrator is composed of two parts. The first one is employed for integrating an induced voltage waveform to obtain an inverting impulse current waveform. The second one is employed for inverting and amplifying the signal to the level being enough for measurement of a digital oscilloscope and not disturbed by noise signals. From experimental results, the developed Rogowski coil with an active integrator provides a satisfactory accuracy in measurement of waveform and magnitude.

Key : Rogowski coil, Active integrator, impulse current measurement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

เพื่อความปลอดภัยในระบบไฟฟ้าแรงสูงจึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ได้แก่ ถักดักแรงดันเกิน (Surge Arrester) แต่ก่อนที่จะนำถักดักแรงดันเกิน ไปติดตั้งใช้งานจริง จะต้องมีการทดสอบความสามารถของถักดักแรงดันเกิน โดยการจ่ายกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 [1] จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ [2]

ในการทดสอบด้วยกระแสอิมพัลส์นั้นจำเป็นต้องมีระบบที่วัดกระแสอิมพัลส์ได้อย่างแม่นยำ ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตเป็นวิธีหนึ่งที่วัดกระแสอิมพัลส์ได้อย่างแม่นยำ ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อใช้วัดกระแสจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ เนื่องจากขดลวดโรกอฟสกีสามารถวัดกระแสอิมพัลส์สูงได้โดยรูปคลื่นไม่เกิดการบิดเบี้ยว จากการอิ่มตัวของแกนเนื่องจากเป็นแกนอากาศและการวัดเป็นการคล่องจากภายนอกจึงทำให้อุปกรณ์ที่ใช้วัดไม่กลายเป็นโหนดของวงจร ส่วนวงจรอินทิเกรตแบบไวงานสามารถวัดกระแสได้มีย่านความถี่ที่กว้างกว่าและครอบคลุมความถี่ที่ต่ำกว่าวงจรอินทิเกรตแบบเชิงขงาน

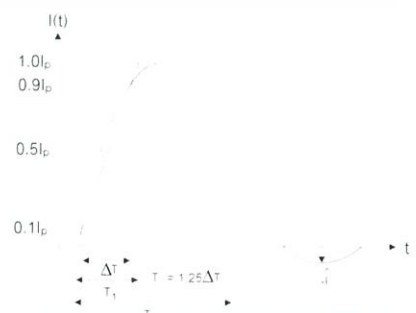
2. หลักการสร้างขดลวดโรกอฟสกีและอินทิเกรตแบบไวงาน

2.1 กระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน [3]

รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มีพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) แสดงดังรูปที่ 1

$$T_1 = 1.25(t_{90} - t_{10}) \quad (1)$$

$$T_2 = t_{90} - 0.125(9t_{10} - t_{90}) \quad (2)$$



รูปที่ 1 ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1

ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 [4] ได้กำหนดคุณสมบัติของระบบวัดกระแสแม่เหล็กดังนี้

- 1) ความผิดพลาดในการวัดค่ากระแสแม่เหล็กไม่เกิน ±3%
- 2) ความผิดพลาดในการวัดค่าทางเวลาซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปคลื่นกระแสแม่เหล็กไม่เกิน ±10%

2.2 หลักการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี [5]

เมื่อนำขดลวด โรกอฟสกีไปล้อมรอบแท่งตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กล้อมรอบแท่งตัวนำไปตามกับขดลวด โรกอฟสกีที่พันรอบแกนวัสดุที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของสนามแม่เหล็กสูง เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ปลายทั้งสองของขดลวด ถ้านำแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ไปผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสมจะได้รูปคลื่นของกระแสที่ต้องการ วัดปรากฏผลออกมาในรูปของแรงดันขาออกของวงจรดังสมการที่ 3

$$V_c = \frac{d\phi}{dt} = -\mu_0 An \frac{di_p}{dt} \tag{3}$$

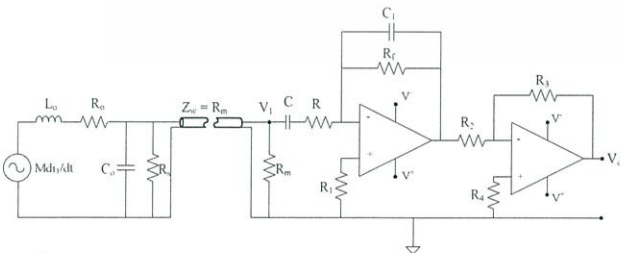
กำหนดให้ $M = \mu_0 An$ คือความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดโรกอฟสกีกับตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน i_p ที่ต้องการวัดจะมีค่าเท่ากับ

$$i_p(t) = -\frac{1}{M} \int_0^t V_c(\tau) d\tau \tag{4}$$

- เมื่อ V_c คือ แรงดันเหนี่ยวนำ (V)
- i_p คือ กระแสปฐมภูมิ (A)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนขดลวด m^2
- N คือ จำนวนรอบต่อความยาวแกน (turn/m)
- ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)
- μ_0 คือ สภาพให้ซึมได้ของสุญญากาศ

2.3 ขดลวดโรกอฟสกีต่อวงจรขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบโวลงาน

วงจรสมมูลของขดลวด โรกอฟสกีและตัวอินทิเกรตแสดงดังรูปที่ 2 โดยอัตราขยายของขดลวด โรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบโวลงานสามารถแยกคิดแต่ละวงจรแล้วนำมาหาอัตราขยายรวมภายหลัง



รูปที่ 2 วงจรขดลวด โรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบโวลงาน

จากวงจรรูปที่ 2 จะได้อัตราขยายของขดลวด โรกอฟสกี ดังนี้

$$G_1(s) = \frac{V_1}{I_1} = \frac{sM}{[s^2 C_0 L_0 R_0 + (L_0 + R_0 C_0) s + (\frac{R_0}{R_1} + 1)]} \tag{5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายของวงจรอินทิเกรตแบบโวลงาน

$$G_2(s) = \frac{V_o}{V_1} = (\frac{R_1}{R_2}) (\frac{sCR_f}{(sC_1 R_f + 1)(sCR + 1)}) \tag{6}$$

อัตราขยายรวม

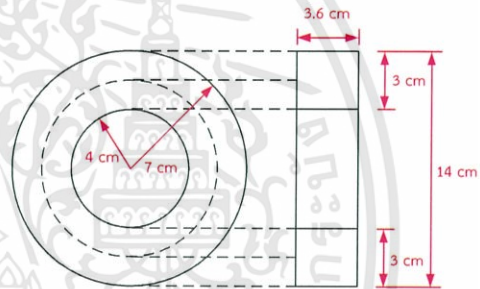
$$G(s) = G_1(s)G_2(s) \tag{7}$$

$$G(s) = \left[\frac{\frac{sMR_s R_3}{[(R_0 + R_s)R_2]}}{\frac{s^2 C_0 L_0 R_s}{R_0 + R_s} + \frac{(L_0 + R_0 R_s C_0) s}{R_0 + R_s} + 1} \right] \cdot \left[\frac{sCR_f}{(sC_1 R_f + 1)(sCR + 1)} \right] \tag{8}$$

3. ออกแบบสร้างขดลวดโรกอฟสกีและอินทิเกรตแบบโวลงาน

3.1 ออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกี

แกนขดลวดที่ออกแบบจะใช้พลาสติกที่ถูกขึ้นรูปเป็นรูปท่อ-รอยดที่มีรัศมีนอกของแกนเท่ากับ 7 cm รัศมีในของแกนเท่ากับ 4 cm และให้มีความหนาของพื้นที่หน้าตัดแกนเท่ากับ 10.8 cm² ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 มิติของแกนขดลวด

จากการออกแบบได้ค่า $M = 0.157 \mu H$, $L = 6.28 \mu H$, $R_0 = 3 \Omega$, $R_{so} = 92 \Omega$, $C_0 = 0.375 nF$ และพื้นที่ขดลวด 40 รอบบนแกนพลาสติก

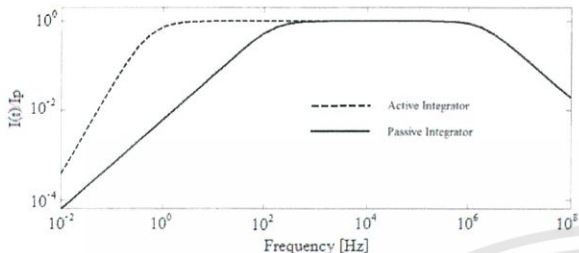
3.2 ออกแบบและสร้างวงจรอินทิเกรตแบบโวลงาน

จากทฤษฎีที่กล่าวมาทำให้เชื่อได้ว่าวงจรอินทิเกรตแบบโวลงานมีย่านความถี่ในการวัดกระแสแม่เหล็กที่กว้างกว่าและครอบคลุมความถี่ที่ต่ำกว่าวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ดังนั้นก่อนที่จะสร้างวงจรอินทิเกรตแบบโวลงานเพื่อใช้แทนแบบเฉื่อยงานเดิม จึงต้องพิสูจน์ว่าวงจรอินทิเกรตแบบโวลงานที่จะสร้างมีย่านความถี่ในการวัดกระแสแม่เหล็กที่กว้างกว่าและครอบคลุมความถี่ที่ต่ำกว่า โดยการหาแถบความถี่เปรียบเทียบกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดของขดลวด โรกอฟสกีที่ใช้ตัวอินทิเกรตต่างกัน

พารามิเตอร์	ขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	ขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบโวลงาน
ความถี่จำกัดล่าง (LCF)	$\frac{1}{2\pi RC}$	$\frac{1}{2\pi RC_1}$
ความถี่จำกัดบน (HCF)	$\frac{1}{2\pi \sqrt{C_0 L_0 R_0}}$	$\frac{1}{2\pi \sqrt{C_0 L_0 R_s}}$
อัตราขยายของระบบวัด sensitivity	$\frac{MR_s}{(R_0 + R_s)RC}$	$\frac{MR_s R_3}{(R_0 + R_s)R_2 RC_1}$

ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบไวงานที่ ออกแบบ มีดังนี้ $R = 10\text{ k}\Omega$, $R_s = 10\text{ k}\Omega$, $R_p = 1\text{ k}\Omega$, $R_f = 2.2\text{ M}\Omega$, $C = 47\text{ nF}$, $R_i = 1\text{ k}\Omega$, $C_i = 94\text{ nF}$ แทนค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบในสมการที่ 8 แล้วนำไปจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับขดลวดโรกอฟ สกีกับอินทิเกรตแบบเลื่อนงาน [6] แสดงผลในรูปกราฟไบเบค ดังรูปที่ 4

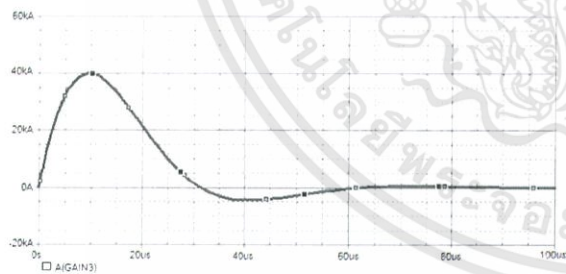


รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบขนาดระหว่างขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบไวงานและอินทิเกรตแบบเลื่อนงาน

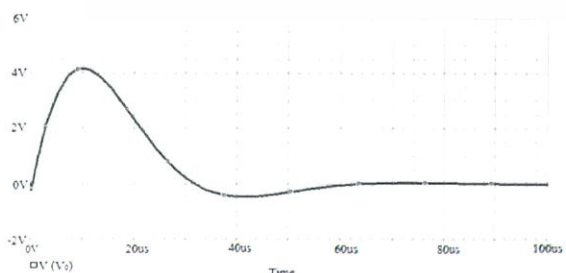
จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบเลื่อนงานและอินทิเกรตแบบไวงานจะมีความถี่จำกัดบนเท่ากัน แต่แบบไวงานจะมีความถี่จำกัดล่างที่ต่ำกว่าแบบเลื่อนงาน นอกจากนี้ขดลวดโรกอฟสกีกับอินทิเกรตแบบไวงานยังสามารถเพิ่มอัตราขยายของขาออกได้โดยการปรับค่า R_f จากวงจรขยายแบบกลับเฟส

3.3 การจำลองแบบจากขดลวดโรกอฟสกีและวงจรมินทิเกรตแบบไวงานที่ออกแบบ

รูปคลื่นกระแสที่วัดได้จากขดลวดโรกอฟสกีและวงจรมินทิเกรตแบบไวงาน สามารถจำลองได้โดยใช้โปรแกรม PSpice ดังรูปที่ 5 ซึ่งผลการจำลองการวัดที่ได้ แสดงดังรูปที่ 6



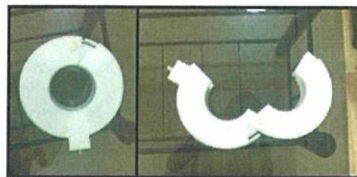
รูปที่ 5 รูปคลื่นขาเข้าจากการจำลองแบบใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์



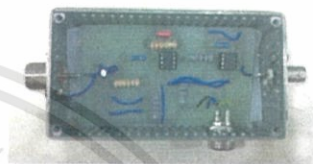
รูปที่ 6 รูปคลื่นขาออกจากการจำลองแบบใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.4 ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรมินทิเกรตแบบไวงานที่ประกอบสร้าง

ขดลวดโรกอฟสกีที่ออกแบบและประกอบสร้างแสดงดังรูปที่ 7 ส่วนวงจรมินทิเกรตที่ออกแบบและประกอบสร้างแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการออกแบบประกอบสร้าง



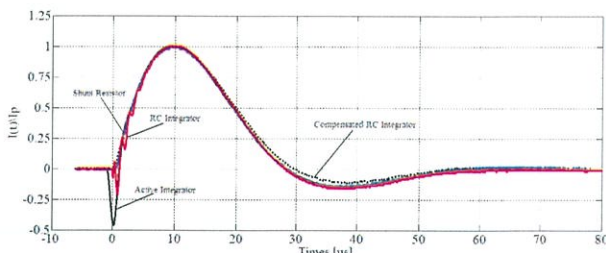
รูปที่ 8 วงจรมินทิเกรตแบบไวงานที่ทำการออกแบบประกอบสร้าง

4. การทดสอบและประเมินผล

ในการทดสอบจะทำการทดสอบขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับอินทิเกรตแบบไวงานเทียบกับความต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ (shunt resistor) อินทิเกรตแบบเลื่อนงาน และอินทิเกรตแบบเลื่อนงานชดเชยค่า เพื่อเปรียบเทียบดูความสามารถและประสิทธิภาพในการวัดของอินทิเกรตแต่ละชนิด โดยป้อนกระแสสี่รูปคลื่นต่างๆ ได้แก่ รูปคลื่นกระแสสี่เหลี่ยม 8/20 μs , รูปคลื่นกระแสสี่เหลี่ยม 30/80 μs และรูปคลื่นกระแสสี่เหลี่ยมช่วงยาว นำค่าที่ได้จากการทดลองอินทิเกรตทั้ง 3 แบบ มาเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง โดยทำให้เป็นหนึ่งในหน่วยในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบค่า

4.1 รูปคลื่นกระแสสี่เหลี่ยม 8/20 μs

จากรูปที่ 9 รูปคลื่นที่ได้จากอินทิเกรตแบบเลื่อนงาน ช่วงเวลาเริ่มแรกก่อนถึงเวลาน้ำคลื่นจะแกว่ง แต่พอเวลาผ่านไปรูปคลื่นจะดีขึ้น โดยช่วงเวลาทางคลื่นจะทับกับรูปคลื่นของระบบวัดอ้างอิง(ความต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ) พอดี ส่วนรูปคลื่นจากแบบเลื่อนงานชดเชยค่า ช่วงเวลาหน้าคลื่นจะดี ส่วนเวลาทางคลื่นจะยาวกว่าระบบวัดอ้างอิง สำหรับรูปคลื่นจากแบบไวงาน ช่วงเวลาเริ่มต้นจะเกิดการผิดเพี้ยนเริ่มต้น แต่จะไม่ส่งผลต่อการวัดของเวลาหน้าคลื่น ซึ่งเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นที่ได้จะซ้อนทับกับระบบวัดอ้างอิง



รูปที่ 9 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสสี่เหลี่ยม 8/20 μs ที่ทำให้เป็นหนึ่งหน่วยของอินทิเกรตทั้ง 3 แบบกับระบบวัดอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์เวลาหน้าคลื่น เวลาหลังคลื่นและค่ายอดกลับหัวของอินทิเกรตแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งค่าที่อยู่ในวงเล็บคือค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ได้จากการวัดของอินทิเกรตเปรียบเทียบกันตัวด้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ

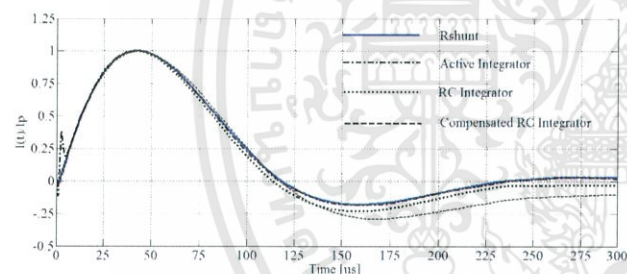
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสสมิพัลส์ 8/20 μ s ที่วัดได้จากวงจรอินทิเกรตทั้ง 3 แบบกับระบบวัดอ้างอิง

อุปกรณ์ที่ใช้วัด	$T_1(\mu s)$	$T_2(\mu s)$	$-I_p$ (%)
ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (R_{shunt})	7.25 (0%)	19.5 (0%)	15.3 (0%)
อินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	7.25 (0%)	19.6 (0.5%)	15.86 (+3.7%)
อินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชย	7.25 (0%)	20 (+2.6%)	11.46 (-25.1%)
อินทิเกรตแบบไวงาน	7.25 (0%)	19.5 (0%)	14.75 (+3.6%)

4.2 รูปคลื่นกระแสสมิพัลส์ 30/80 μ s

จากรูปที่ 10 และตารางที่ 3 ช่วงเวลาหน้าคลื่นของรูปคลื่นที่ได้จากวงจรอินทิเกรตทั้งสามแบบเมื่อเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงแล้วมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่เวลาเริ่มต้นของรูปคลื่นแบบไวงานจะเกิดเหตุการณ์ผิดเพี้ยนเริ่มต้น แต่ว่าไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาหน้าคลื่นของรูปคลื่น

โดยเวลาหลังคลื่นของรูปคลื่นแบบเฉื่อยงานจะช้ากว่าระบบวัดอ้างอิง แบบชดเชยค่าจะไวกว่าระบบวัดอ้างอิง ส่วนแบบไวงานจะทับกันพอดีกับระบบวัดอ้างอิง



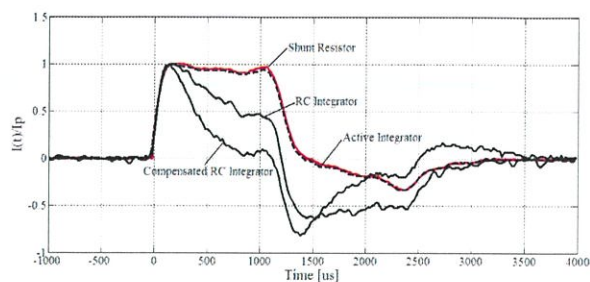
รูปที่ 10 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสสมิพัลส์ 30/80 μ s ที่ทำให้เป็นหนึ่งหน่วยของอินทิเกรตทั้ง 3 แบบกับระบบวัดอ้างอิง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสสมิพัลส์ 30/80 μ s ที่วัดได้จากวงจรอินทิเกรตทั้ง 3 แบบกับระบบวัดอ้างอิง

อุปกรณ์ที่ใช้วัด	$T_1(\mu s)$	$T_2(\mu s)$	$-I_p$ (%)
ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (R_{shunt})	31.5 (0%)	83.6 (0%)	18.3 (0%)
อินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	31.5 (0%)	81.1 (-3.0%)	23.4 (+27.9%)
อินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชย	31.5 (0%)	84.5 (+1.3%)	29.4 (+60.7%)
อินทิเกรตแบบไวงาน	31.5 (0%)	83.5(-0.1%)	18.5 (+1.1%)

4.3 รูปคลื่นกระแสสมิพัลส์ช่วงยาว

จากการทดสอบ สรุปได้ว่าอินทิเกรตแบบไวงานสามารถวัดความถี่ในช่วงที่ต่ำกว่าอินทิเกรตแบบชดเชยค่าและอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน โดยหากคลื่นที่ได้จากอินทิเกรตแบบไวงานจะมีค่าใกล้เคียงกับระบบวัดอ้างอิง ส่วนหางของรูปคลื่นที่ได้จากอินทิเกรตแบบชดเชยค่าจะตกไวมากที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสสมิพัลส์ช่วงยาวที่ทำให้เป็นหนึ่งหน่วยของอินทิเกรตทั้ง 3 แบบกับระบบวัดอ้างอิง

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองจนทดสอบ พบว่ากระแสสมิพัลส์ที่วัดได้โดยการใช้อุปกรณ์วัดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรรูปอินทิเกรตแบบไวงานที่ทำการออกแบบประกอบสร้างขึ้นนั้น มีค่าเวลาหน้าคลื่น (T_1) เวลาหลังคลื่น (T_2) อยู่ในระดับใกล้เคียงกับค่าจริง มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และมีค่ากระแสกลับหัว ($-I_p$) ไม่เกินค่าที่กำหนดในมาตรฐาน แต่ยังมีเหตุการณ์ผิดเพี้ยนเริ่มต้นที่เวลาเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสสมิพัลส์ แต่อย่างไรก็ตาม วงจรรูปอินทิเกรตแบบไวงานที่ทำการออกแบบประกอบสร้างนี้สามารถใช้ได้ดีกับรูปคลื่นกระแสที่มีเวลาหลังคลื่นยาวและสามารถใช้ได้ดีกับช่วงความถี่ที่กว้าง (Wide Bandwidth) นอกจากนี้การวัดกระแสสมิพัลส์โดยใช้อุปกรณ์วัดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรูปอินทิเกรตแบบไวงาน ยังสามารถวัดรูปคลื่นในช่วงความถี่ที่ต่ำได้มากกว่าการวัดโดยใช้วงจรรูปอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานอีกด้วย

ส่วนการวัดกระแสสมิพัลส์โดยใช้อุปกรณ์วัดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรูปอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า ใช้ได้ดีกับรูปคลื่นกระแสสมิพัลส์ 8/20 μ s ซึ่งเป็นรูปคลื่นที่ไวและเวลาสั้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Standard Publication 60099-4, Surge arresters, 2006.
- [2] นวคุณ ไตรรัตน์ภักดิ์ และ คณะ, “เครื่องกำเนิดกระแสสมิพัลส์,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [3] IEC Publication 60060-1, “High Voltage Test Techniques, Part 1: General definition and test requirement”, Geneva, 1989.
- [4] IEC Publication 60060-2, “High Voltage Test Techniques, Part 2: Measuring system”, Geneva, 1994.
- [5] พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์ และ สำราญ สังข์สะอาด, “การออกแบบสร้างโรกอฟสกีคอยล์วัดกระแสสมิพัลส์ขนาดพิคัด 100 กิโลแอมป์,” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 13, ฉบับที่ 4, 2545.
- [6] พิรุณวิทย์ ยูทโกวิท และ คณะ, “อุปกรณ์วัดกระแสสมิพัลส์ชนิดชดเชยโรกอฟสกี,” โครงการวิจัย, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นางสาว นรภัทร สุขสันติโชค รหัส 52010568
 วันเกิด 27 พฤษภาคม พ.ศ.2534
 ที่อยู่ 132/6 ซ.ชัยณรงค์ ถ.ประชาราษฎร์บำเพ็ญ เขตห้วยขวาง จ.กรุงเทพฯ
 มัธยมศึกษา โรงเรียนจุฬารามราชวิทยาลัย ปทุมธานี
 E-mail kabanukmitl@gmail.com



นาย พศวัต ตุนพร รหัส 52010803
 วันเกิด 29 มิถุนายน พ.ศ.2534
 ที่อยู่ 50/641 หมู่บ้านเมืองทองธานี ถ.แจ้งวัฒนะ ต.บ้านใหม่ อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี
 มัธยมศึกษา โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย นนทบุรี
 E-mail sodiumz23@hotmail.com



นาย พศวีร์ บุญเกิด รหัส 52010804
 วันเกิด 12 มกราคม พ.ศ.2534
 ที่อยู่ 594/1 ต.บางปลาสร้อย อ.เมือง จ.ชลบุรี
 มัธยมศึกษา โรงเรียนช่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
 E-mail mazomii@hotmail.com



นางสาว พัชรินทร์ มุลมิตร์ รหัส 52010813
 วันเกิด 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2534
 ที่อยู่ 230 หมู่ 11 ต.นามะเขือ อ.สหัสขันธ์ จ.กาฬสินธุ์
 มัธยมศึกษา โรงเรียนสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี
 E-mail sajue_wan@hotmail.com