

การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสร่วมกับอินทิเกรเตอร์  
แบบชดเชยสำหรับการวัดกระแสอิมพัลส์

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A CURRENT TRANSDUCER WITH A  
COMPENSATING INTEGRATOR FOR IMPULSE CURRENT  
MEASUREMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2561  
KMITL-2018-EN-M-020-087

การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสร่วมกับอินทิเกรเตอร์  
แบบชดเชยสำหรับการวัดกระแสอิมพัลส์

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A CURRENT TRANSDUCER WITH A  
COMPENSATING INTEGRATOR FOR IMPULSE CURRENT  
MEASUREMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-020-087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A CURRENT TRANSDUCER WITH A  
COMPENSATING INTEGRATOR FOR IMPULSE CURRENT  
MEASUREMENT



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

2018

KMITL-2018-EN-M-020-087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสร่วมกับอินทิเกรเตอร์แบบชดเชย  
สำหรับการวัดกระแสอิมพัลส์

**Thesis Title** Design and Construction of a Current Transducer with a Compensating  
Integrator for Impulse Current Measurement

**นักศึกษา** นายอริศ เลหาวัฒน์เสรี

**รหัสประจำตัว** 59601165

**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม** ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

**หมายเลขวิทยานิพนธ์** KMITL-2018-EN-M-020-087

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ศุภกิตต์	โชติโก	
ผศ.ดร.เชาว์	ชมภูอินไหว	
รศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	
ผศ.ดร.พีรวุฒิ	ยุทธโกวิท	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-305 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสร่วมกับอินทิเกรเตอร์แบบชดเชยส สำหรับอาร์คกระแสอิมพัลส์
นักศึกษา	นายอริศ เลหาวัฒนเสรี
รหัสประจำตัว	59601165
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อานันท์วัฒน คุณากร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร. พิรุณภูมิ ยุทธโกวิท

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสหรือขดลวดโรกอฟสกีที่ทำงานร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าเพื่อनावัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน ซึ่งระบบวัดได้การกำหนดอัตราขยายของวงจรเท่ากับ 1 kV/1 V ดังนั้นแล้วขดลวดโรกอฟสกีถูกออกแบบและประกอบสร้างโดยมีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 5.5  $\mu\text{H}$  วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานซึ่งประกอบไปด้วย ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ โดยมีค่าดังนี้ 2 k $\Omega$  และ 0.1  $\mu\text{F}$  ทำให้ช่วงผลตอบสนองต่อความถี่ของระบบเท่ากับ 750 Hz ถึง 2 MHz แต่ทว่าเมื่อนำไปวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แล้วทำให้ได้ผลเป็นดังนี้ ช่วงกราฟบริเวณหลังคลื่น ( $T_2$ ) จะตกเร็วกว่าปกติจึงทำให้ไม่สามารถวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ได้ตรงตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้นแล้วจึงได้ทำการปรับปรุงและพัฒนาวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานให้เป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า โดยได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ 3 ชั้น 4 ชั้น และ 5 ชั้น เพื่อช่วยให้บริเวณหางคลื่นนั้นตกช้าลงจึงเป็นผลให้สามารถวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ได้อย่างถูกต้องตามมาตรฐาน โดยภายในวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ชั้นต่างๆ นั้นประกอบไปด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุหลายตัวประกอบเข้าด้วยกัน ในการออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่านั้นจำเป็นต้องเลือกค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุนั้นให้เหมาะสม สามารถทำได้โดยการป้อนรูปคลื่นขึ้นเพื่อดูการตอบสนองต่อเวลาของระบบวัดที่ใช้ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าชั้นต่างๆ เมื่อเลือกค่าตัวต้านทานที่เหมาะสมสำหรับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ชั้นต่างๆ จากนั้นจึงทำการประกอบสร้างเพื่อนำมาวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ โดยการพิสูจน์ประสิทธิภาพของระบบวัดทำได้โดยการเปรียบเทียบผลจ สองและผลจากรทดสอบ ซึ่งพบว่าผลการทดสอบสามารถวัดกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ได้ตรงการผลจาลองทางคอมพิวเตอร์ และเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นเป็นไปตามมาตรฐานที่ได้กำหนด

<i>Thesis</i>	Design and Construction of a Current Transducer with a Compensating Integrator for Impulse Current Measurement
นักศึกษา	Atit Laowhawatanaseree
Student ID.	59601165
Degree	Master of Engineering
Department	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Anantawat Kunakorn
Co-Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Peerawut Yutthagowith

### ABSTRACT

This thesis presents design and construction of a current transducer (or Rogowski coil) which employs with a passive integrator and a compensating passive integrator for measuring the impulse current waveforms. The gain (the ratio of input current and output voltage) is set as 1kA/V. The Rogowski coil was designed and constructed to have an inductance of 5.5  $\mu$ H. The passive integrator consists of a resistor and a capacitor, of which values are 2 k $\Omega$  and 0.1  $\mu$ F, respectively.

The measuring system has a frequency bandwidth of 750 Hz to 2 MHz. However, when using the passive integrator in impulse current waveform measurement, the time to half value of the impulse current waveform is always shorter than the actual waveforms, this leads to developed compensating passive integrators to overcome this problem. The compensating passive integrator are designed and constructed to be 3, 4 and 5 states, and consist of resistors and capacitors. For the design of the compensating passive integrators, it is necessary to determine to the proper resistance and capacitance. The current step signal is employed to investigate response time. The combination of the Rogowski coil with the compensating passive integrators, then, are used in measuring the impulse current waveforms. The result shows that the developed measuring system can measure the impulse current waveforms precisely when being compared with simulation results with wavefront and wavetail times in accordance with specification in standards

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จักเกิดขึ้นไม่ได้เลยถ้าขาดอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร ผู้ที่คอยแนะแนวทางการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ อีกทั้งแนะแนวทางการหาคู่ประกอบ ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ รวมทั้งจุดประกายด้านการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรม ไฟฟ้าแรงสูง และผศ.ดร. พิรุณี ยุทธโกวิท ผู้ที่คอยชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานทางการศึกษา รวมทั้งสร้างเป้าหมายและความมุ่งมั่นในการศึกษานี้ อีกทั้งการถ่ายทอดองค์ประกอบความรู้ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ตลอดจนช่วยวิเคราะห์วิธีแก้ปัญหาที่ถูกต้องในระหว่างการทำ วิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ คุณบุญยวีร์ ฉายศรี ผู้ดูแลห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงแห่งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและเจ้าหน้าที่วิศวกรประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์เพื่อทำการทดสอบวัตถุอุปกรณ์กระแสอิมพัลส์ และน้ำใจไมตรีที่มีให้แก่ ข้าพเจ้าตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณปิยะพล ถือทอง คุณบุษยพล เพาพาน คุณบัญญัติ สีสัจจกุล และคุณนวคุณ ไตรรัตนภักดิ์ ผู้กำลังศึกษาในปริญญาเอกทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาในการออกแบบ และประกอบสร้างอุปกรณ์วัด รวมทั้งการช่วยวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ตลอดจนคำปรึกษาและกำลังใจที่ดีจึงทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ปีการศึกษา 2560 ทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือในการทดสอบ กระแสอิมพัลส์ และช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

คุณประโยชน์ใดๆ ทั้งสิ้นที่เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้อุทิศให้แก่บิดามารดา ผู้มีพระคุณรวมทั้งครูบาอาจารย์ที่เคารพทั้งหลายที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้อันมีประโยชน์ทั้งทางด้าน วิศวกรรมไฟฟ้าและการดำรงชีวิตให้แก่ข้าพเจ้า

อติศ เลหาวัฒน์เสรี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.6 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน.....	5
2.2 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี.....	7
2.2.1 การพันขดลวดโรกอฟสกี.....	7
2.3 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator).....	10
2.4 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า (Compensated Passive RC integrator).....	11
2.5 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน.....	13
2.6 กั๊บดักแรงดันเกิน (Lightning arrester).....	16
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง.....	18
3.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แบบต่างๆ ตามมาตรฐาน.....	18
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกี.....	20
3.2.1 การพันขดลวด.....	21
3.2.2 กล่องครอบ (Case).....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน.....	25
3.4 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า.....	27
บทที่ 4 การทดสอบและเปรียบเทียบ.....	35
4.1 ผลการเปรียบเทียบจากผลจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	35
4.1.1 ผลการตอบสนององค์ประกอบความถี่ของวงจรอินทิเกรต.....	35
4.1.2 ผลการตอบสนองต่อรูปคลื่นขั้น.....	36
4.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจำลองและผลทดสอบ โดยวัดกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน.....	38
4.2.1 ผลการเปรียบเทียบของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	39
4.2.2 ผลการเปรียบเทียบของกระแสอิมพัลส์สูง.....	43
4.2.3 ผลการเปรียบเทียบของกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น.....	47
4.3 การทดสอบวีดิทัศน์คลื่นกระแสอิมพัลส์สำหรับหัวข้อทดสอบ แรงดันคงเหลือกับดับแรงดันเกินพิกัด 5kA.....	50
4.3.1 ผลการทดสอบกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าของกับดับแรงดันเกิน.....	51
4.3.2 ผลการทดสอบกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นของกับดับแรงดันเกิน.....	54
4.3.3 ผลการทดสอบกระแสอิมพัลส์สูงของกับดับแรงดันเกิน.....	58
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผล.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก การออกแบบกล่องครอบชดเชยโรกอฟสกีด้วย Solid work.....	66
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่ากำหนดความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน..... 6
4.1	เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....43
4.2	เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสอิมพัลส์สูง.....46
4.3	เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น.....50
4.4	เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าในการทดสอบแรงดันคงเหลือ.....54
4.5	เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นในการทดสอบแรงดันคงเหลือ.57
4.6	เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสอิมพัลส์สูงในการทดสอบกับดักแรงดันเกิน.....61



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 62475.....	5
2.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์.....	7
2.3 ขดลวดโรกอฟสกีคล้องตัวนำในอากาศ.....	8
2.4 วงจรสมมูลของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator).....	10
2.5 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน.....	11
2.6 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น.....	12
2.7 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น.....	12
2.8 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น.....	12
2.9 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า.....	13
2.10 การติดตั้งขดลวดโรกอฟและวงจรอินทิเกรต.....	14
2.11 วงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน.....	14
2.12 ผลตอบสนองความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน.....	16
2.13 กั๊บดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA.....	16
3.1 วงจรสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จากโปรแกรม ATP draw.....	18
3.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน.....	19
3.3 องค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน.....	19
3.4 แถบกว้างความถี่ของระบบวัดที่ประกอบไปด้วยขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรต.....	20
3.5 แกนขดลวดที่ได้ทำการออกแบบ.....	21
3.6 ระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางถึงวงกลมวงในและวงนอก.....	21
3.7 การพันขดลวด.....	22
3.8 ขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการประกอบสร้างขึ้น.....	23
3.9 การวัดค่าเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกี.....	23
3.10 กล้องคลอบของขดลวดโรกอฟสกี.....	24
3.11 กล้องคลอบของขดลวดโรกอฟสกีที่ประกอบสร้าง.....	24
3.12 วงจรขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ชนิด RC.....	25
3.13 ผลการจำลองของระบบวัดโดยใช้อินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน.....	26
3.14 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ประกอบสร้างขึ้น.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.15	วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น.....	28
3.16	วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น.....	28
3.17	วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น.....	28
3.18	วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้นที่ถูกรวบรวม.....	29
3.19	แผนผังการเลือกค่าวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น.....	30
3.20	ผลการจำลองของระบบวัดโดยใช้รีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น.....	31
3.21	ผลการจำลองของระบบวัดโดยใช้รีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น.....	31
3.22	ผลการจำลองของระบบวัดโดยใช้รีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น.....	32
3.23	วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้นที่ถูกรวบรวม.....	34
3.24	วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้นที่ถูกรวบรวม.....	34
3.24	วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้นที่ถูกรวบรวม.....	34
4.1	องค์ประกอบความถี่ของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานและวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า.....	35
4.2	องค์ประกอบความถี่ของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน และวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่าช่วงความถี่ 0.1 ถึง 100 kHz.....	36
4.3	ผลการเปรียบเทียบวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานและแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า.....	37
4.4	ผลการเปรียบเทียบโดยเลือกเวลาช่วงที่ 0 ถึง 0.5 ms.....	37
4.5	การวัดกระแสด้วยอุปกรณ์วัดที่สร้างขึ้น.....	39
4.6	ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ชุดสวิตช์วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (8/20 $\mu$ s).....	40
4.7	ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ชุดสวิตช์วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (8/20 $\mu$ s).....	40
4.8	ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ชุดสวิตช์วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (8/20 $\mu$ s).....	41
4.9	ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ชุดสวิตช์วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (8/20 $\mu$ s).....	41
4.10	ผลการเปรียบเทียบกราฟการทดสอบทั้งหมดของกระแสไฟฟ้า.....	42
4.11	ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ชุดสวิตช์วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูง (4/10 $\mu$ s).....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงาน ขดเคย์ค่า 3 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สูง (4/10 $\mu$ s).....	44
4.13 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงาน ขดเคย์ค่า 4 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สูง (4/10 $\mu$ s).....	44
4.14 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงาน ขดเคย์ค่า 5 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สูง (4/10 $\mu$ s).....	45
4.15 ผลการเปรียบเทียบกราฟการทดสอบทั้งหมดของกระแสอิมพัลส์สูง.....	46
4.16 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงาน วัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20 $\mu$ s).....	47
4.17 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงาน ขดเคย์ค่า 3 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20 $\mu$ s).....	47
4.18 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงาน ขดเคย์ค่า 4 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20 $\mu$ s).....	48
4.19 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงาน ขดเคย์ค่า 5 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20 $\mu$ s).....	48
4.20 ผลการเปรียบเทียบกราฟการทดสอบทั้งหมดกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น.....	49
4.21 วงจรการทดสอบกับดักแรงดันเกิน.....	51
4.22 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรต แบบเฉื่อยงาน วัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20 $\mu$ s).....	51
4.23 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรต แบบเฉื่อยงานขดเคย์ค่า 3 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20 $\mu$ s).....	52
4.24 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรต แบบเฉื่อยงานขดเคย์ค่า 4 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20 $\mu$ s).....	52
4.25 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรต แบบเฉื่อยงานขดเคย์ค่า 5 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20 $\mu$ s).....	53
4.26 ผลการเปรียบเทียบการจำลองและการทดสอบทั้งหมดของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า ในการทดสอบแรงดันคงเหลือ.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรวมกับ แบบเฉื่อยงานวัตรูปคลื่นกระแสिमพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20 $\mu$ s).....	54
4.28 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับ วงจรรวมกับแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้นวัตรูปคลื่น กระแสिमพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20 $\mu$ s).....	55
4.29 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับ วงจรรวมกับแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้นวัตรูปคลื่น กระแสिमพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20 $\mu$ s).....	55
4.30 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับ วงจรรวมกับแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้นวัตรูปคลื่น กระแสिमพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20 $\mu$ s).....	56
4.31 ผลการเปรียบเทียบการจำลองและการทดสอบทั้งหมดของกระแสिमพัลส์หน้าคลื่นชั้น ในการทดสอบแรงดันคงเหลือ.....	57
4.32 ผลการทดสอบและผลจำลองของกระแสिमพัลส์สูง (4/10 $\mu$ s) ที่ใช้ทดสอบกับดัก แรงดันเกินโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรวมกับแบบเฉื่อยงาน.....	58
4.33 ผลการทดสอบและผลจำลองของกระแสिमพัลส์สูง (4/10 $\mu$ s) ที่ใช้ทดสอบกับดัก แรงดันเกินโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรวมกับแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น.....	58
4.34 ผลการทดสอบและผลจำลองของกระแสिमพัลส์สูง (4/10 $\mu$ s) ที่ใช้ทดสอบกับดัก แรงดันเกินโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรวมกับแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น.....	59
4.35 ผลการทดสอบและผลจำลองของกระแสिमพัลส์สูง (4/10 $\mu$ s) ที่ใช้ทดสอบกับดัก แรงดันเกินโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรวมกับแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น.....	59
4.36 ผลจำลองและการทดสอบทั้งหมดของกระแสिमพัลส์สูง (4/10 $\mu$ s) ที่ใช้ทดสอบกับดัก แรงดันเกิน.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการสร้างรูปคลื่นของกระแสอิมพัลส์แบบต่างๆ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 62475 ภายในห้องทดสอบปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังซึ่งได้ทำการใช้ตัวต้านทานแบบไร้ค่าเหนี่ยวนา (Shunt Resistor) ในการวัดรูปคลื่นของกระแสอิมพัลส์แบบต่างๆ สำหรับการใช้ตัวต้านทานแบบไร้ค่าเหนี่ยวนาในการวัดกระแสอิมพัลส์ต้องทำการต่อแบบอนุกรมกับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ ทำให้เมื่อทำการทดลองหรือทดสอบอาจเกิดข้อผิดพลาดได้เมื่อทำการป้อนแรงดันที่มีค่าสูง โดยเกิดการเปิดวงจรจึงนำไปสู่การเกิดแรงดันเกินที่ขั้วซึ่งส่งผลกระทบต่อความเสียหายหรือช็อตได้ ดังนั้นแล้วจึงมีการใช้ขดลวดโรกอฟสกี (Rogowski coil) มาวัดกระแสอิมพัลส์เนื่องจากหลักการวัดของขดลวดโรกอฟสกีทำให้ไม่จำเป็นต้องต่ออนุกรมกับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์จึงทำให้ไม่เกิดข้อผิดพลาดขึ้นขณะทำการทดสอบ แต่ในการใช้ขดลวดโรกอฟสกีวัดนั้นจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตัวอินทิเกรเตอร์ (Integrator device) มาร่วมทำงานเพื่อที่ ทำให้สามารถวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แบบต่างๆ โดยการออกแบบและประกอบสร้างอุปกรณ์ตัวอินทิเกรตนั้นเป็นแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator) ซึ่งโดยปกติทั่วไปแล้ววงจรประกอบไปด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเนื่องจากการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวได้ดี เมื่อนามาทำงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีแล้วทำให้เกิดช่วงแถบความถี่ (Frequency Bandwidth) ที่ครอบคลุมองค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แบบต่างๆ แต่ปัญหาที่พบสำหรับการใช้ตัวอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานทำให้ทราบได้ว่าเวลาทางคลื่นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์นั้นไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 62475 โดยมีลักษณะที่ทางคลื่นจะตกลงเร็วกว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบจากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ดังนั้นแล้วจึงได้ทำการปรับปรุงเพิ่มเติมเกี่ยวกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานให้กลายเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า (Passive Compensated RC Integrator) เพื่อที่นำมาแก้ปัญหาเวลาหลังคลื่นที่ไม่ได้ตามมาตรฐาน โดยวิธีการเป็นการเพิ่มตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจรทำให้เมื่อทำการทดสอบเพื่อดูผลการตอบสนองต่อเวลาแล้วนั้นจะเห็นว่ามีส่วนพุ่งขึ้น แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องเลือกค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุให้เหมาะสม จากนั้นจึงนำระบบวัดที่ได้ทำการปรับปรุงและพัฒนาขึ้นนั้น มาทำการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ตามมาตรฐานกำหนดเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพและทำการทดสอบกับกักดับแรงดันเกิน (Surge Arrester) ที่พิกัด 5 kA เนื่องจากที่ห้องทดสอบปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้มีงานวิจัยในการหาค่าตัวแปรของกักดับแรงดันเกินที่พิกัด 5 kA จึงทำให้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบและผลจำลองโดยทำการวัดกระแสอิมพัลส์ของการทดสอบตามหัวข้อแรงดันคงเหลือโดยอ้างอิงมาจากมาตรฐาน IEC 60099-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาและปรับปรุงระบบวัดกระแสอิมพัลส์
2. เพื่อศึกษาหลักการและการท างานของระบบวัด
3. สามารถนาระบบวัดที่ได้ทำการปรับปรุงและพัฒนาไปทำการวัดรูปคลื่นที่ทดสอบโดยเป็นไปตามมาตรฐาน ก าหนด IEC 62475
4. สามารถนาระบบวัดที่ได้ทำการปรับปรุงและพัฒนาไปทำการทดสอบกับดักแรงดันเกินพิกัด 5kA โดยเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60099-4
5. ระบบวัดมีประสิทธิภาพที่ดีโดย ท ากการเปรียบเทียบกับผลจ าวงและผลทดสอบ

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การใช้วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีทำให้การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ชนิดต่างๆ ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 62475 ดังนั้นจึง ท ากการปรับปรุงวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานให้เป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าทำให้เกิดช่วงหน่วงขึ้นของแถบความถี่ซึ่งทำให้สามารถวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ชนิดต่างๆ ได้อย่างอิงตามมาตรฐาน IEC 62475 อีกทั้งนำมาใช้วัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบกับดักแรงดันเกินพิกัด 5 kA เป็นไปตามมาตรฐานของ IEC 60099-4 ก าหนด

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ท ากการออกแบบและประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกี วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าโดยมีอัตราส่วนระหว่างกระแสที่เข้าและแรงดันขาออกเท่ากับ 1 kA/V และท ากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจ าวงและผลการทดสอบ โดยเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 62475 และ IEC 60099-4 โดยทดสอบกับดักแรงดันเกินพิกัด 5 kA

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ท ากการศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับกระแสอิมพัลส์พ ้าผ่านรูปแบบต่างๆ ตามบทความวิชาการภายในประเทศและนอกประเทศเพื่อที่น มาท ากการวิเคราะห์และจ าวงผลเพื่อสร้างขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับการใช้วัดกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นแบบต่างๆ โดยท ากการเปรียบเทียบกับผลจ าวงและผลทดสอบเพื่อยืนยันผลการออกแบบและประกอบสร้างว่ามีประสิทธิภาพในการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

วิทยานิพนธ์นี้สรุปลง าคัญได้เป็น 5 บทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวที่มาและความสำคัญของงานวิจัยนี้ อีกทั้งจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐานของการศึกษา ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการวิจัยและการศึกษา และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย ทฤษฎีบทของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 62475 ศึกษาการออกแบบของระบบวัดมีดังนี้ ขดลวดโรกอฟสกี วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าโดยให้ทราบถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่สำคัญ อีกทั้งศึกษาการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับกับดักแรงดันเกินรวมทั้งศึกษามาตรฐาน IEC 60099-4 ในเรื่องแรงดันคงเหลือที่ ทาการทดสอบ

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการสร้างผลจำลองกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ที่จะนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบ อีกทั้งได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกี วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ขึ้นต่างๆ โดยได้กล่าวถึงรายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ออกแบบและประกอบสร้างอุปกรณ์วัดทั้งหมดนี้

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบของอุปกรณ์วัดที่ประกอบไปด้วยขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ได้ประกอบสร้างขึ้นมา จากนั้นทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 62475 และรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ในหัวข้อเรื่องแรงดันคงเหลือที่ใช้ทดสอบกับดักแรงดันเกินพิกัด 5 kA ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 โดยนำผลจำลองและผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกันเพื่อเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์วัดที่ปรับปรุงและพัฒนาขึ้น

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบของอุปกรณ์วัดที่ได้ประกอบสร้างขึ้นมา รวมทั้งขอเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยนี้

## 1.6 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปีการศึกษา 2554 มีการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ [1] โดยคุณนพคุณ ไตรรัตน์ นารีรักษ์ และคณะ โดยสามารถสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ได้ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 และสามารถนำไปใช้สำหรับการทดสอบแรงดันคงเหลือของกับดักแรงดันเกิน (Surge Arrester)

ในปีการศึกษา 2557 ได้มีการพัฒนางจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่นำมาใช้กับขดลวดโรกอฟสกี [2] โดย คุณบัญญัติ สีลาจริยกุล โดยได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานท างานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี โดยน าไปวัดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าซึ่งพบปัญหาในผลของการวัดหลังคลื่นที่ผิดเพี้ยน

ในปีการศึกษา 2557 ได้มีการวิเคราะห์และพัฒนาหาตัวแปรของตัวกับดักแรงดันเกินเนื่องจากค่าตัวต้านทานภายในของกับดักแรงดันเกินนั้นมีค่าไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดโดยมีการยืนยันผลจากการทดสอบด้วยกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าทดสอบกับกับดักแรงดันเกินพิกัด 5 kA [3] โดย คุณนพคุณ ไตรรัตน์ นารีรักษ์ จากงานวิจัยทำให้สามารถหาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความแม่นยำและเสถียรภาพสูงของกับดักแรงดันเกิน จึงทำให้การจำลองผลกระทบแอสีมพัลส์ต่างๆ ที่ได้ตามมาตรฐาน 60099-4 มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นไปด้วย

ในปี พ.ศ. 2558 ได้มีวารสารวิชาการจาก IEEE SENSORS, VOL. 15, NO.2 หน้าที่ 651 ถึง 658 ได้มีการเผยแพร่ในหัวข้อเรื่อง “The Rogowski coil Principles and Applications: A Review” [4] โดย Mohammad Hamed Samimi และ คณะ ได้มีการอธิบายเชิงหลักการใช้ของขดลวดโรกอฟสกีและกล่าวถึงคุณสมบัติของขดลวดโรกอฟสกีต่างๆ อาทิเช่น การที่ไม่จำเป็นต้องต่ออนุกรมกับวงจร การออกแบบและประกอบสร้างที่มีราคาต้นทุนต่ำและองค์ประกอบความถี่ที่กว้าง อีกทั้งยังแสดงถึงวงจรสมมูลเป็นผลให้สามารถนำมาให้เกิดการประยุกต์ใช้กับสิ่งต่างๆ ดังนั้นจึงเล็งเห็นว่าสามารถออกแบบขดลวดโรกอฟสกีที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการวัดกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ตามมาตรฐานที่กำหนดได้

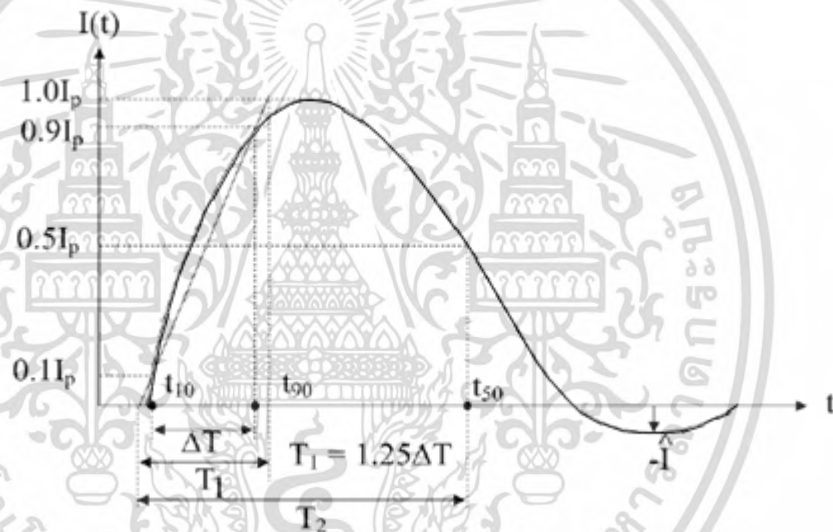
### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การสร้างอุปกรณ์วัดที่สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ต่างๆ ได้ตามมาตรฐาน IEC 62475 และสามารถนำมาวัดกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบกับกับดักแรงดันเกินที่พิกัด 5 kA ได้เองภายในประเทศ อีกทั้งในการสร้างอุปกรณ์นี้ใช้ต้นทุนต่ำ และมีความคงทนต่อการใช้งานในระยะยาว การออกแบบและการประกอบสร้างของอุปกรณ์วัดที่ได้แสดงขึ้นมา นั้น สามารถนำไปปรับและประยุกต์ใช้เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้วัดรูปคลื่นกระแสแบบอื่นๆ

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กระแสิมพัลส์คือกระแสที่เกิดขึ้นในช่วงสภาวะชั่วคราว (Transient State) โดยทั่วไปในทางธรรมชาติสามารถเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า โดยปรากฏการณ์ฟ้าผ่านี้สามารถทำการจลของเป็นรูปคลื่นขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 62475 และรูปคลื่นกระแสิมพัลส์นี้ได้ถูกใช้เพื่อเป็นการทดสอบระดับการป้องกันของกักดับฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60099-4 โดยอุปกรณ์ที่นำมาวัดรูปคลื่นกระแสิมพัลส์นั้นมีหลากหลายวิธีด้วยกัน ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำขดลวดโรกอฟสกีมาใช้พร้อมด้วยกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า

### 2.1 กระแสิมพัลส์ตามมาตรฐาน



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นกระแสิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 62475

จากรูปที่ 2.1 รูปคลื่นกระแสิมพัลส์ตามมาตรฐานจักเรียกว่า รูปคลื่นกระแสิมพัลส์แบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential impulse current waveform) ซึ่งมีลักษณะดังนี้กล่าวคือมีกระแสที่เพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึงค่าสูงสุดในช่วงเวลาอันสั้นและหลังจากนั้นลดลงเป็นศูนย์แบบเอ็กโปเนนเชียลหรือในอีกความหมายคือการแบบไซน์นูไซด์แบบเกิดการแตมบ้อย่างหนัก ซึ่งในมาตรฐานได้กำหนดค่าตัวแปรที่สำคัญเพื่อทำการวัดให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้มีดังนี้ คือหน้าคลื่น ( $T_1$ ) และหลังคลื่น ( $T_2$ ) โดยแสดงสมการไว้ดังนี้ [5]

$$T_1 = 1.25(t_{90\%} - t_{10\%}) \quad (2.1)$$

$$T_2 = t_{50\%} \quad (2.2)$$

ความหมายของสมการ 2.1 และ 2.2 มีดังต่อไปนี้ เวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ ) จากสมการที่ 2.1 เวลาหน้าคลื่นคำนวณจาก 1.25 เท่าของผลต่างของเวลาตำแหน่งที่กระแสอิมพัลส์มีค่า 10% และ 90% ของค่ายอดในช่วงที่รูปคลื่นกำลังขึ้นจากศูนย์ถึงค่ายอด

เวลาหลังคลื่น ( $T_2$ ) จากสมการที่ 2.2 เวลาหลังคลื่นหาได้จากการคำนวณค่ายอดที่ 50% ในช่วงหลังรูปคลื่นจากค่ายอดลงศูนย์

ตามมาตรฐานได้กำหนดรูปแบบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ไว้ทั้งหมด 4 รูปแบบดังต่อไปนี้

1) กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน (Steep impulse current) หรือมีค่าเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นเท่ากับ  $1/20 \mu\text{s}$

2) กระแสอิมพัลส์สูง (High impulse current) หรือมีค่าเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นเท่ากับ  $4/10 \mu\text{s}$

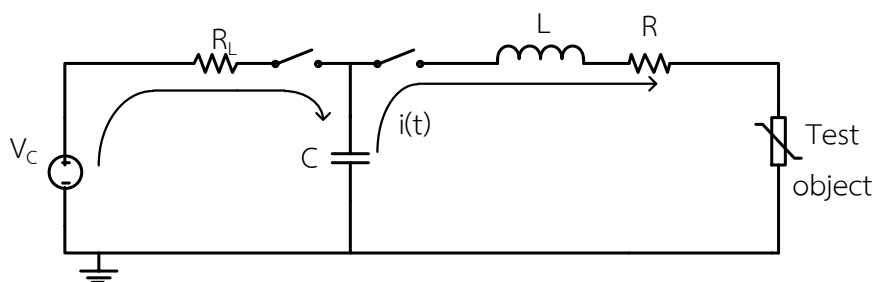
3) กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse current) หรือมีค่าเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นเท่ากับ  $8/20 \mu\text{s}$

รวมทั้งมาตรฐานได้กำหนดความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ค่ากำหนดความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน

องค์ประกอบรูปคลื่น	ความคลาดเคลื่อน
เวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ )	$\pm 10\%$
เวลาหลังคลื่น ( $T_2$ )	$\pm 10\%$ (ยกเว้นรูปคลื่นกระแส $1/20 \mu\text{s} < 20 \mu\text{s}$ )
ค่ายอดกระแส ( $I_p$ )	$\pm 10\%$
ค่ายอดกระแสกลับชั่ว ( $\hat{I}$ )	ไม่เกิน 20% ของค่ายอดกระแส

โดยทั่วไปแล้วกระแสอิมพัลส์สามารถถูกจำลองจากวงจรทางไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน ค่าเก็บประจุและค่าเหนี่ยวนำ (RLC circuit) และถูกใช้วัดด้วยตัวต้านทานไร้ค่าเหนี่ยวนำ ดังรูปวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.2 [6]



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

โดยตัวแปรต่างๆ มีความหมายดังนี้

$V_c$  = แรงดันที่ถูกขาร์จอยู่ในเก็บประจุ

$R_L$  = ตัวต้านทานก าจัดกระแส

$C$  = ตัวเก็บประจุ

$L$  = ตัวเหนี่ยวน า

$i(t)$  = กระแสอิมพัลส์

Test object = อุปกรณ์ที่ท ากการทดสอบ

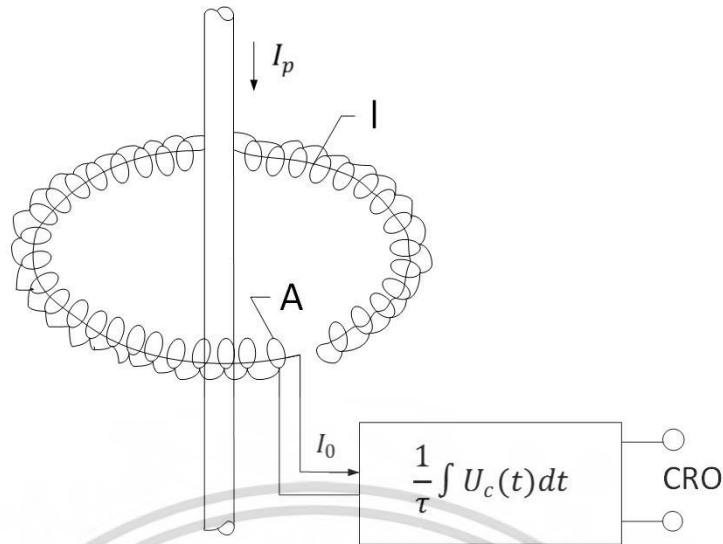
## 2.2 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี

การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี เป็นการวัดกระแสโดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแส (Current transformer) แบบพิเศษ กล่าวคือ ขดลวดโรกอฟสกีเป็นอุปกรณ์วัดกระแส โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสทำให้เกิดการสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กนี้ไปคล้องขดลวดที่พันรอบแกนที่ไม่เป็นแม่เหล็กที่วางอยู่รอบตัววนที่มีกระแสที่ต้องการวัดไหลผ่านอยู่ จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนาขึ้นที่ปลายขดลวด ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของกระแส ค่าแรงดันที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนกับรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัววน นั้น ถ้านาแรงดันเหนี่ยวนานี้ไปผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสม จึงจะได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดอย่างถูกต้อง [5]

### 2.2.1 การพันขดลวดโรกอฟสกี

การวัดกระแสอิมพัลส์ที่อาศัยการเหนี่ยวนาของสนามแม่เหล็ก จะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อพื้นที่หน้าตัดและความถี่ของงานวนรอบสม่ำเสมอตลอดช่วงแถบความยาวแกน และอีกประการหนึ่งสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนาในขดลวดต้องมาจากแหล่งกำเนิดที่เกิดจากกระแสที่ต้องการวัดเพียงอย่างเดียว ไม่มีผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีการพันขดลวดโรกอฟสกีที่มีลักษณะพิเศษ คือ ต้องมีการพันย้อนกลับเข้าไปภายในขดลวดอีกหนึ่งรอบ ดังรูปที่ 2.3 ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนาที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกันเองจึงทำให้ไม่มีสัญญาณภายนอกมารบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ขดลวดโรกอฟสกีคล้องตัวนำในอากาศ

ในรูปที่ 2.3 ขดลวดโรกอฟสกีคล้องตัวนำที่มีกระแสไหล  $I_p$  โดยอาศัยกฎของแอมแปร์จะได้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวด ซึ่งอยู่ห่างจากตัวนำในแนวรัศมีเท่ากับ  $x$  ตามสมการที่ 2.3

$$H_x = \frac{I_p}{l} \quad (2.3)$$

ขดลวดวางอยู่ในอากาศ จะได้ความหนาแน่นเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก ณ จุดนั้น ตามสมการที่ 2.4

$$B_x = \mu_0 H_x = \mu_0 \frac{I_p}{l} \quad (2.4)$$

ถ้าขดลวดมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $A$  มีจำนวนรอบทั้งหมด  $N$  รอบและมีความยาว  $l$  จะสามารถหาค่าฟลักซ์ที่วิ่งผ่านคล้องขดลวดได้ ตามสมการที่ 2.5

$$\phi = \frac{\mu_0 A I_p}{l} \quad (2.5)$$

จากกฎของฟาราเดย์ จะสามารถหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดจำนวน  $N$  รอบได้ตามสมการที่ 2.6

$$U_c(t) = M \frac{dI_p}{dt} \quad (2.6)$$

โดยที่  $M$  คือ ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดโรกอล์ฟกับตัวนำ ที่มีกระแส  $I_p$  ไหลผ่านตามสมการที่ 2.7

$$M = \frac{N\mu_0 A}{l} \quad (2.7)$$

และสามารถหากระแส  $I_p$  ที่ไหลผ่านตัวนำ ได้ตามสมการที่ 2.8

$$I_p = \frac{1}{M} \int U_c(t) dt \quad (2.8)$$

จะเห็นได้ว่าการวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอล์ฟนั้นจะต้องทำการอินทิเกรตแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด โดยขนาดแรงดันเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางเวลา ( $\tau$ ) ตามสมการที่ 2.9

$$V_m = \frac{1}{\tau} \int U_c(t) dt \quad (2.9)$$

โดย  $H$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) (A/m)

$B$  คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Magnetic field density) (Wb/m<sup>2</sup>)

$\mu_0$  คือ เปรอิมิตติวิตีสัมพัทธ์ของอากาศ (Permittivity) (F/m)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m<sup>2</sup>)

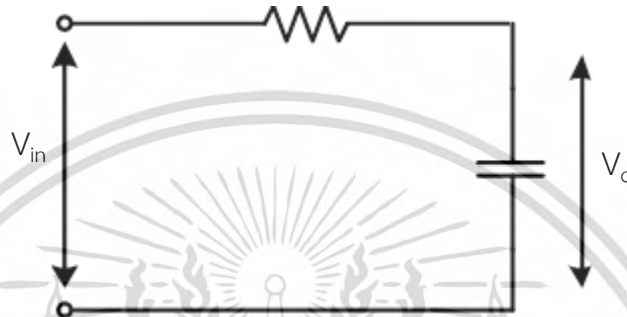
$N$  คือ จำนวนรอบขดลวดทั้งหมด (turn)

$l$  คือ ความยาวของขดลวด (m)

$M$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดโรกอล์ฟกับตัวนำ ที่มีกระแสไหลผ่าน (H)

### 2.3 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator)

วงจรอินทิเกรตนี้ได้ถูกนำมาใช้งานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี เพื่อนำมาวัดรูปคลื่นกระแส อิมพัลส์ โดยเมื่อมาทำงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีแล้วทำให้เกิดแถบความถี่ขึ้น ซึ่งวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานนี้จะถูกออกแบบเพื่อหาฟังก์ชันประกอบความถี่ด้านต่ำ โดยค่าความถี่ที่ตัดฝั่งด้านต่ำมีค่าเท่ากับค่าคงที่ทางเวลาของวงจร (Time constant :  $\tau$ ) โดยมีวงจรสมมูลดังนี้ [2]



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator)

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.10

$$V_{out}(t) = V_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt \quad (2.10)$$

เมื่อทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ จะได้ตามสมการที่ 2.11

$$V_{out}(s) = \frac{I_c(s)}{sC} \quad (2.11)$$

จากความสัมพันธ์ ตามสมการที่ 2.12

$$V_{in}(t) = Ri_c(t) + V_c(t) \quad (2.12)$$

เมื่อทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่จะได้ตามสมการที่ 2.13

$$V_{in}(s) = RI_c(s) + \frac{I_c(s)}{sC} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

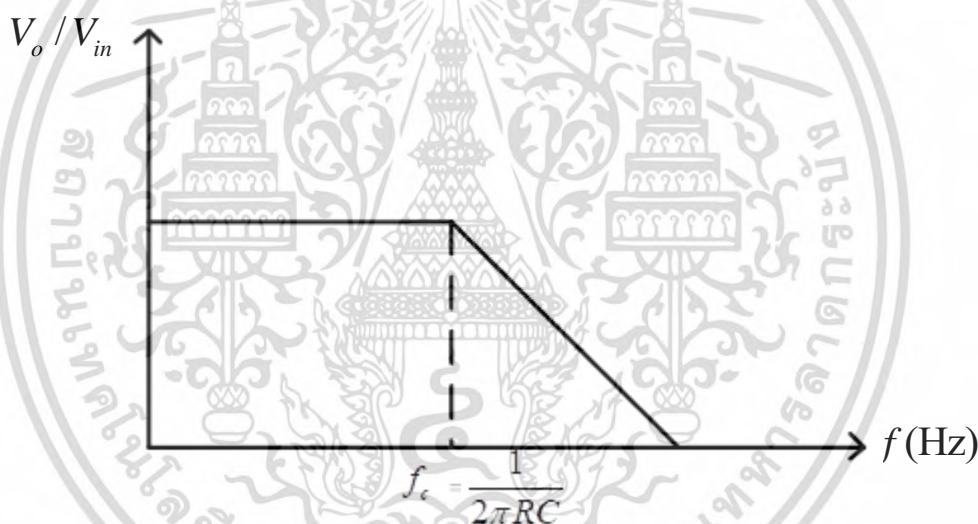
จากสมการที่ 2.11 และ 2.13 สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามสมการที่ 2.14

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{sRC+1} \quad (2.14)$$

และเมื่อคำนวณหาค่าความถี่ตัด (Cut-off frequency :  $f_c$ ) ของวงจรสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.15

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.15 สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive RC integrator)

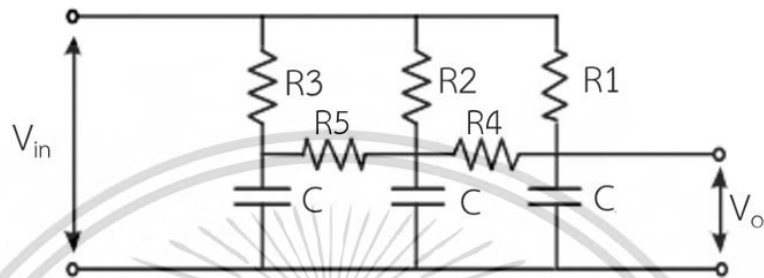
#### 2.4 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า (Compensated Passive RC integrator)

จากปัญหาที่กล่าวมาในบทที่ 1 นั้นว่า ขดลวดโรกอฟสกีที่ทำงานร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานมีข้อบกพร่องจากการที่เมื่อนำมาใช้วัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แล้วทำให้เกิดการวัดที่ผิดและไม่แม่นยำในช่วงของหางคลื่น ดังนั้นแล้วจึงได้ทำการปรับปรุงวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานให้กลายเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เพื่อปรับปรุงในการวัดช่วงเวลาหางคลื่นที่แม่นยำและถูกต้องมากขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์ได้ทำการออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่ามี 3 แบบดังต่อไปนี้

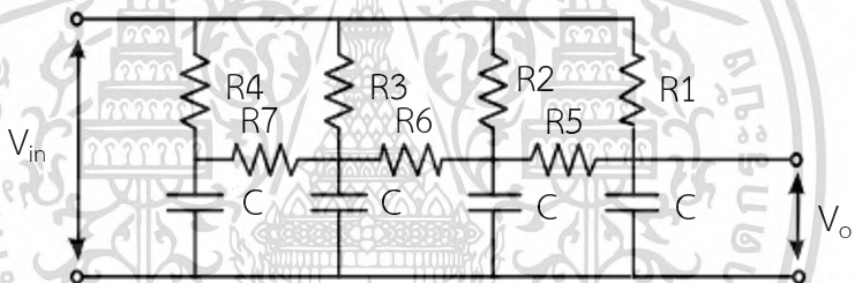
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น
2. วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น
3. วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น

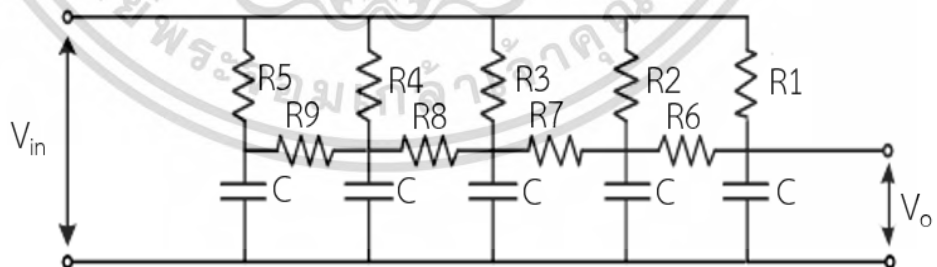
โดยวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ชั้นต่างๆ ได้แสดงรูปที่ 2.6 ถึง 2.8



รูปที่ 2.6 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น



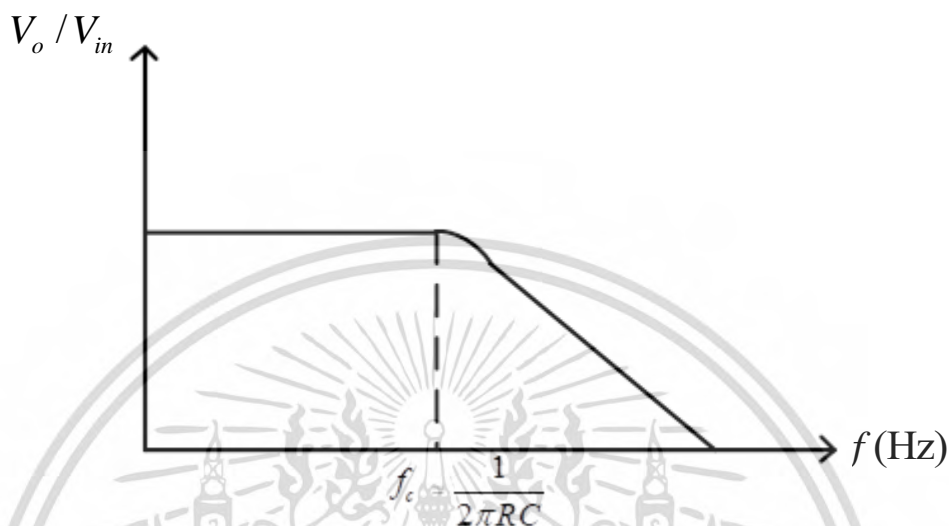
รูปที่ 2.7 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น



รูปที่ 2.8 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

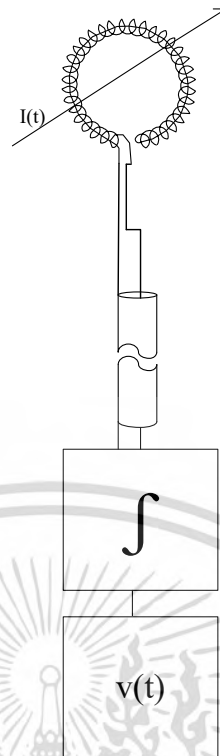
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าแบบขั้นต่างๆ จะมีผลตอบสนองต่อความถี่ตามรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นการช่วยให้สามารถตอบสนองต่อการวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าได้ดีขึ้น ทำให้สามารถวัดทางคลื่นของกระแสไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากมีส่วนที่เกิดการหน่วงเกินขึ้นมาทำให้เพิ่มช่วงองค์ประกอบความถี่



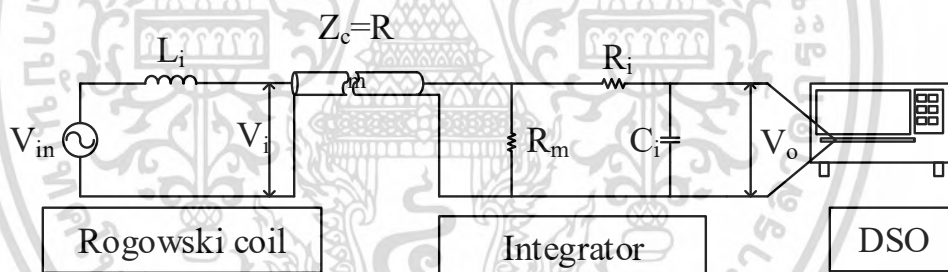
รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า

## 2.5 การวัดกระแสไฟฟ้าด้วยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

การวัดกระแสไฟฟ้าด้วยขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตมาใช้งานร่วมกันนั้น สามารถทำการต่อวงจรดังรูปที่ 2.10 ซึ่งได้ถูกแสดงมาจากมาตรฐาน IEC 62475 และในการวัดรูปคลื่นวัดกระแสไฟฟ้าจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบความถี่ของอุปกรณ์เพื่อทำการออกแบบให้องค์ประกอบของอุปกรณ์วัดนั้น ครอบคลุมองค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่จะทำการวัด ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์วัดนั้นสามารถหาองค์ประกอบความถี่จากฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer impedance) โดยทำการหาวงจรมูลของอุปกรณ์วัด แล้วทำการวิเคราะห์ในทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวัดโดยวงจรมูลแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 การติดตั้งขดลวดโรกอฟและวงจรรวมอินทิเกรต



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรวมอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

ฟังก์ชันถ่ายโอนของขดลวดโรกอฟสกีเป็นไปตามสมการที่ 2.16

$$\frac{V_{out1}(s)}{V_{in1}(s)} = \frac{R_m}{sL + R_m} \quad (2.16)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรวมอินทิเกรตเป็นไปตามสมการที่ 2.17

$$\frac{V_{out2}(s)}{V_{in2}(s)} = \frac{1}{1 + sRC} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก  $V_{out1}(s)$  มีค่าเท่ากับ  $V_{in2}(s)$  ดังนั้นจะได้สมการที่ 2.18

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

แต่เนื่องจาก  $V_{in1}(t) = M \frac{di_{in1}(t)}{dt}$  เมื่อทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่จะได้สมการที่ 2.19

$$V_{in1}(s) = sMI_{in1}(s) \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.18) และ (2.19) จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.20

$$\frac{V_{out2}(s)}{I_{in1}(s)} = \frac{\left(\frac{sMR_m}{LRC}\right)}{\left(s + \frac{R_m}{L}\right)\left(s + \frac{1}{RC}\right)} \quad (2.19)$$

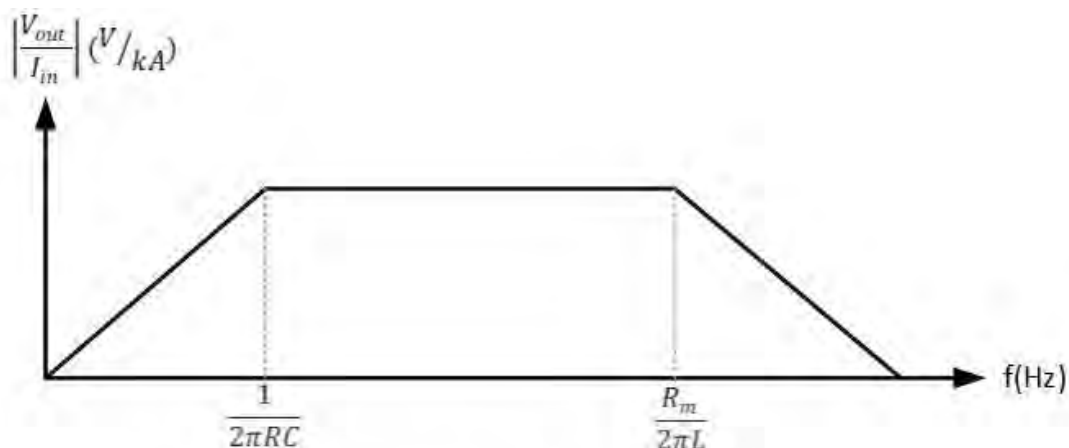
โดยอัตราขยาย (Gain) ของระบบวัดกระแสฮอลล์สามารถหาได้จากสมการ (2.20)

$$Gain = \frac{L}{nRC} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $L/n$  มีเท่ากับ  $M$  ดังนั้นแล้วและ  $n$  คือ จำนวนรอบของขดลวด (turn) แสดงในสมการ (2.21)

$$Gain = \frac{M}{RC} \quad (2.21)$$

ซึ่งสามารถแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

## 2.6 กัปเดตักแรงดันเกิน (Lightning arrester)

กัปเดตักเสิร์จหรือกัปเดตักฟ้าผ่าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกิน โดยใช้ป้องกันอุปกรณ์สำคัญ และราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า กัปเดตักเสิร์จจะต่อक्रमอยู่กัปเดตักอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน กัปเดตักเสิร์จจะประกอบด้วยตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น  $R_{non}$  (Nonlinear resistors) ซึ่งมีฉนวนเป็นสารออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide) มีลักษณะเป็นแผ่นกลมทรงกลมกระบอก ประกอบตั้งอยู่ในกระบอกฉนวนซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กัปเดตักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมาตรฐานที่ใช้ในการอ้างอิงสำหรับกับดักเสิร์จหรือกับดักฟ้าผ่า คือ IEC 60099-4 โดยมีหัวข้อในการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับกระแสอิมพัลส์คือการทดสอบแรงดันคงเหลือ (Residual voltage test) ซึ่งในการทดสอบนี้จำเป็นต้องวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะขอกล่าวถึงเพียงการทดสอบแรงดันคงเหลือสำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าที่พิกัด 5 kA โดยมาตรฐานได้กำหนดการทดสอบในหัวข้อแรงดันคงเหลือไว้ดังนี้ [7]

1. ทดสอบด้วยกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20  $\mu$ s)
2. ทดสอบด้วยกระแสอิมพัลส์สูง (4/10  $\mu$ s)
3. ทดสอบด้วยกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน (1/20  $\mu$ s)

โดยมาตรฐานได้กำหนดให้หน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสอิมพัลส์ที่นำมาทำการทดสอบมีค่าดังต่อไปนี้

กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20  $\mu$ s) หน้าคลื่นอยู่ในช่วงเวลาเท่ากับ 7  $\mu$ s ถึง 9  $\mu$ s และหลังคลื่น 18  $\mu$ s ถึง 22  $\mu$ s

กระแสอิมพัลส์สูง (4/10  $\mu$ s) หน้าคลื่นอยู่ในช่วงเวลาเท่ากับ 3.6  $\mu$ s ถึง 4.4  $\mu$ s และหลังคลื่น 9  $\mu$ s ถึง 11  $\mu$ s

กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน (1/20  $\mu$ s) หน้าคลื่นอยู่ในช่วงเวลาเท่ากับ 0.9  $\mu$ s ถึง 1.1  $\mu$ s และหลังคลื่นน้อยกว่า 20  $\mu$ s

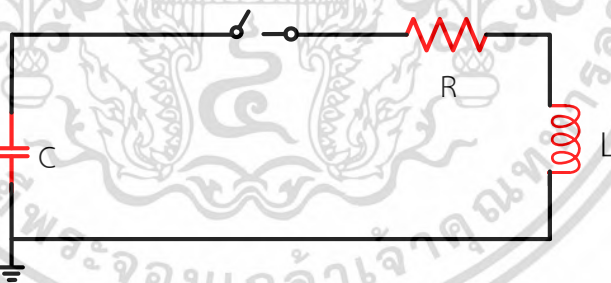
## บทที่ 3

### การออกแบบและประกอบสร้าง

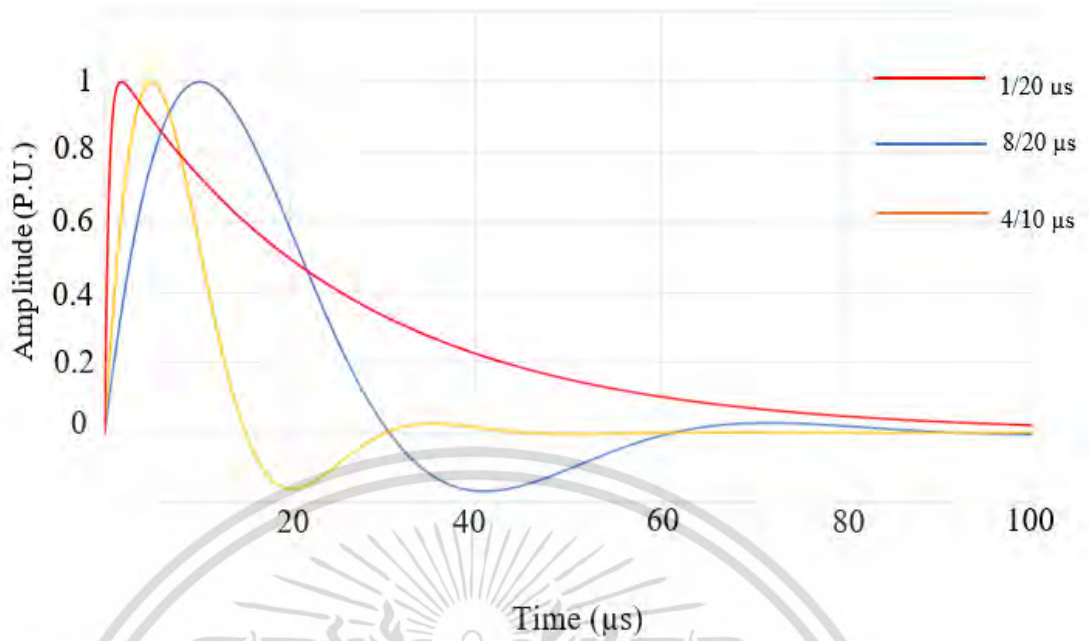
ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบและประกอบอุปกรณ์วัดที่นำไปใช้วัดกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ อุปกรณ์วัดซึ่งประกอบไปด้วยขดลวดโรกอฟสกี วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าและแสดงผลจากการจำลองผลตอบสนองต่อรูปคลื่นขึ้นเพื่อเป็นการตรวจสอบการตอบสนองต่อเวลา

#### 3.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์แบบต่างๆ ตามมาตรฐาน

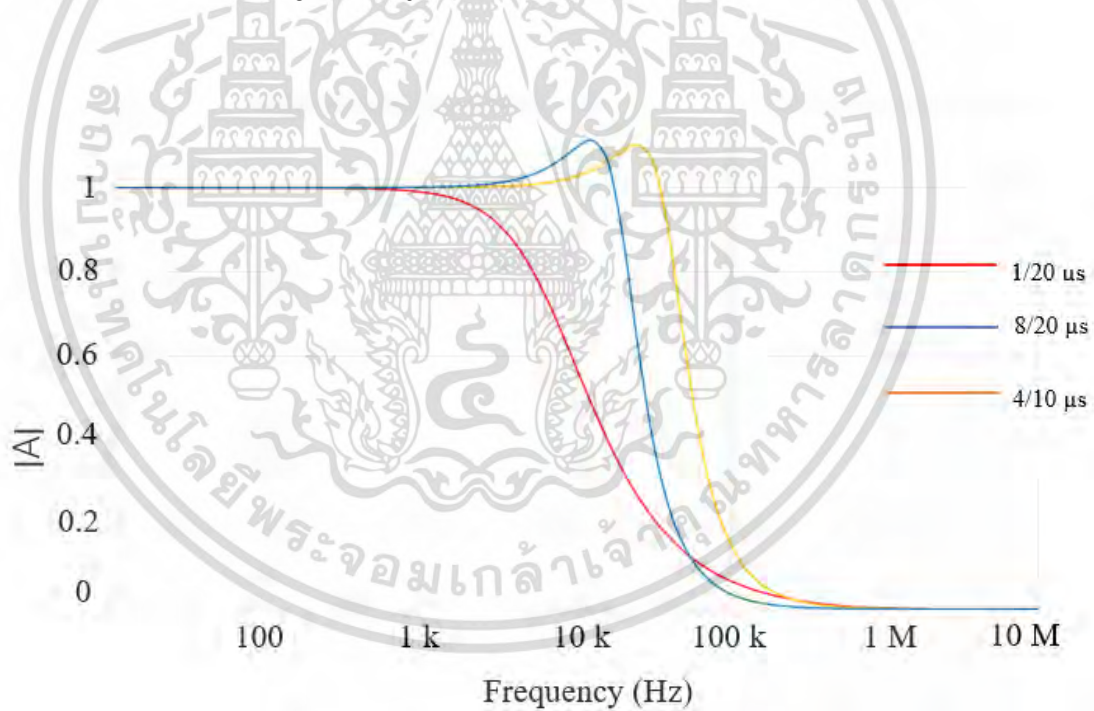
เนื่องจากระบบวัดที่ถูกสร้างขึ้นมาและพัฒนาขึ้นนั้นได้ถูกนำมาใช้วัดกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC ดังนั้นสิ่งสำคัญอันดับแรก คือจำเป็นต้องทราบถึงรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ซึ่งสามารถถูกจำลองด้วยวงจรทางไฟฟ้าตามรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนา (RLC Circuit) โดยมีการแสดงผลของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ดังนี้ กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น ( $1/20 \mu\text{s}$ ) กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า ( $8/20 \mu\text{s}$ ) และกระแสอิมพัลส์สูง ( $4/10 \mu\text{s}$ ) โดยองค์ประกอบที่แสดงผลขึ้นมานั้นมาจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ATP draw และ ORcad Program ดังนั้นจึงทำให้สร้างแบบจำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ตามรูปที่ 3.2 และองค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 วงจรสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จากโปรแกรม ATP draw



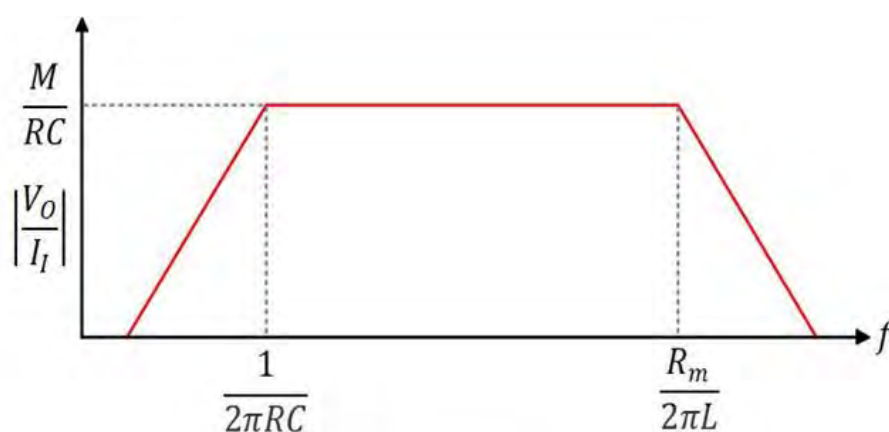
รูปที่ 3.2 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

โดยแถบกว้างความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีที่ทำงานร่วมกับตัวอินทิเกรตแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งเคยได้กล่าวไว้ในบทที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แถบกว้างความถี่ของระบบวัดที่ประกอบไปด้วยขดลวดโรกอฟสกีและวงจรรินทิเกรต

การออกแบบระบบวัดนั้นจากรูปที่ 3.4 สามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนกล่าวคือในส่วนที่หนึ่งเป็นการออกแบบด้านฝั่งความถี่สูงโดยเป็นการออกแบบขดลวดโรกอฟสกีและในส่วนที่สองเป็นการออกแบบทางด้านฝั่งความถี่ต่ำนั้นจักเกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ซึ่งในการออกแบบระบบวัดนี้นั้นจักขอเริ่มในการออกแบบความถี่ฝั่งสูงก่อน

### 3.2 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกี

จากองค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ทำให้ทราบได้ว่าความถี่สูงบนของระบบวัดนั้นควรมีแถบกว้างความถี่มีค่ามากกว่า 1 MHz เนื่องจากระบบวัดที่ใช้นั้นเป็นสายเคเบิลส่งสัญญาณแบบ RG 11 ดังนั้นจึงมีค่าความต้านทานสมคู่ (Matching Resistance) เท่ากับ 75 Ω ในการออกแบบและประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกีมีค่าเท่ากับ 5.5 μH จึงทำให้มีค่าแถบกว้างความถี่ฝั่งด้านสูงตัดที่ 2.63 MHz โดยสมการถูกแสดงในสมการที่ 3.1

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

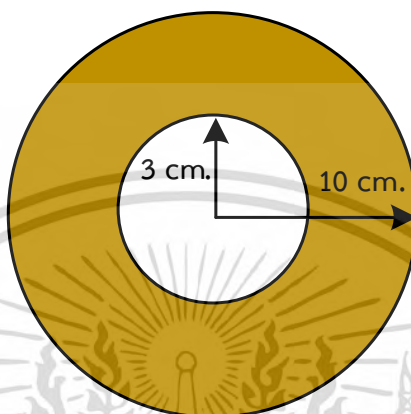
$$f_H = \frac{75}{2\pi(5.5 \times 10^{-6})}$$

$$f_H = 2.63 \times 10^6$$

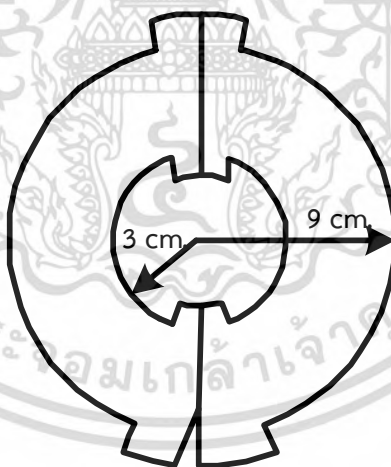
ในการออกแบบโดยขดลวดโรกอฟสกีใช้แกนอากาศหรือชิ้นส่วนที่ไม่เป็นแกนเหล็กหรือสารตัวนำแม่เหล็กเนื่องจากเมื่อใช้ส่วนที่เป็นแกนเหล็กหรือสารตัวนำแม่เหล็กนั้นเมื่อเกิดกระแสอิมพัลส์ที่มีขนาดสูงอีกทั้งมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วไหลผ่าน ทาให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนเหล็กเป็นเหตุให้เกิดการอิ่มตัวจึงทำให้ไม่สามารถวัดสัญญาณได้ ดังนั้นแล้ววัสดุหรือชิ้นส่วนที่เลือกน มาใช้เป็นแกนขดลวดเพื่อใช้ในการพันขดลวดนั้นคือกระดาษอัด โดยกระดาษอัดมีคุณสมบัติดังนี้ มีความแข็งแรง ทนทาน ราคาถูก หาได้ง่าย และเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบขดลวดโรกอฟสกีเป็นไปตามดังรูปที่ 3.5 โดยแกนขดลวดท จากกระดาษอัดตัดเป็นทรงเทอรอยด์ (Toroid) ออกแบบโดยกำหนดให้รัศมีวงในมีระยะเท่ากับ 3 cm. รัศมีวงนอกมีระยะเท่ากับ 10 cm. ทั้งนี้เพื่อสะดวกในการใช้งานจึงทำการออกแบบโดยสามารถขยับแกนเพื่อทำการคล้องสายไฟได้ ดังนั้นแล้วจึงทำการปรับปรุงและออกแบบแกนตามรูปที่ 3.6 จึงทำให้มีรัศมีถึงแกนตัวด้านในเท่ากับ 4 cm. และรัศมีถึงแกนด้านนอกเท่ากับ 9 cm.



รูปที่ 3.5 แกนขดลวดที่ได้ทำ การออกแบบ



รูปที่ 3.6 ระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางถึงวงกลมวงในและวงนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การพันขดลวด

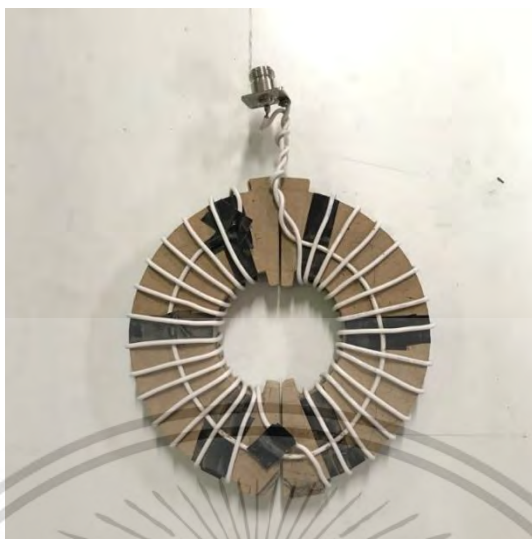
โดยการพันขดลวดของขดลวดโรกอฟสกีนั้นมีการพันแบบพิเศษดังนี้ กล่าวคือเมื่อพันครบรอบตามจำนวนรอบที่ต้องการแล้วจำเป็นต้องมีสายหนึ่งย้อนกลับเข้ามาในวงสายที่พันเนื่องมาจากเป็นการป้องกันสัญญาณรบกวนภายนอก ทำให้สัญญาณที่วัดได้ไม่มีการวัดอย่างผิดพลาด

ในการออกแบบโดยระบบวัดนี้กำหนดให้มีจำนวนรอบของขดลวดที่พันรอบแกนเท่ากับ 26 รอบ จึงทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามคือ  $5.5 \mu\text{H}$  แสดงดังรูปที่ 3.7

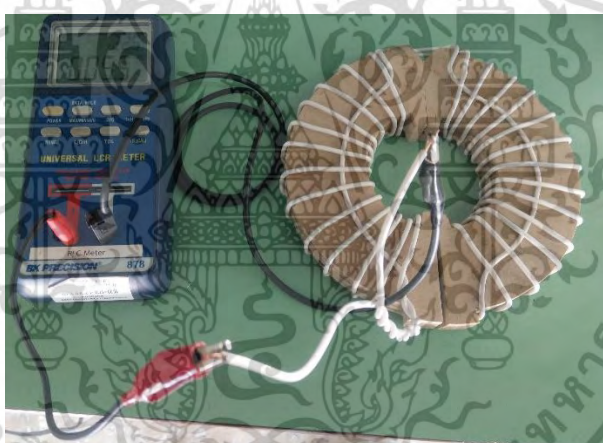


รูปที่ 3.7 การพันขดลวด

ในการประกอบสร้างโดยอ้างอิงตัวแปรต่างๆ จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นดังต่อไปนี้ กระดาษอัดและขดลวดเป็นสายไฟหุ้มฉนวนชนิดแข็งเนื่องจากมีความคงทนและดัดเข้ารูปตามแกนได้ จึงถูกนำมาใช้ในการประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกีนี้ แสดงในรูปที่ 3.8 และทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำ โดยใช้เครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำ (RLC meter) ตามรูปที่ 3.9 เพื่อเป็นการยืนยันผลของค่าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.8 ขดลวดโรกอฟสกีที่ทำการประกอบสร้างขึ้น

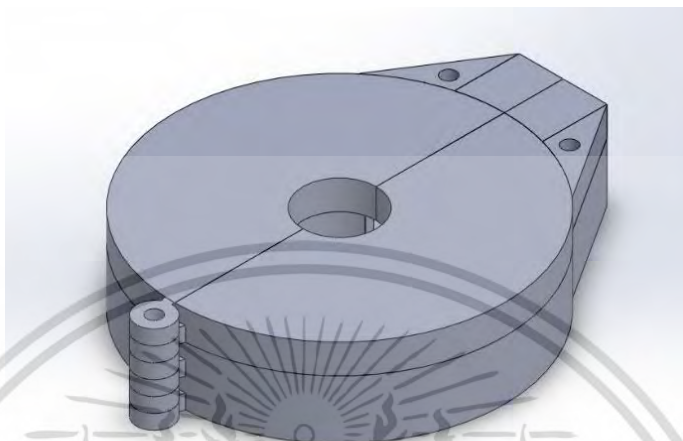


รูปที่ 3.9 การวัดค่าเหนี่ยวน ของขดลวดโรกอฟสกี

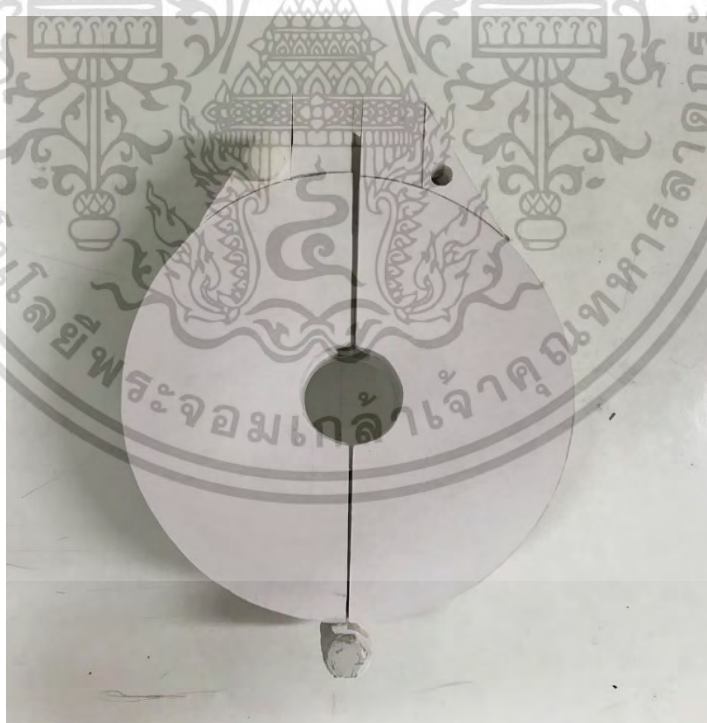
### 3.2.2 กล่องครอบ (Case)

สิ่งที่ช่วยเพิ่มความคงทนและความแข็งแรงของขดลวดโรกอฟสกีคือการเพิ่มซิลด์เข้าไป ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันความชื้นอันเนื่องมาจากกระดาษอัดไม่สามารถทนความชื้นได้อีกทั้งเมื่อมีการกระทบหรือกระแทกอย่างรุนแรงอาจเป็นเหตุให้เกิดความชำรุดและเสียหายอย่างหนักได้ ดังนั้นแล้วจึงจำเป็นต้องการออกแบบและประกอบสร้างซิลด์ขึ้นเพื่อเป็นการป้องกันสาเหตุข้างต้น โดยวัสดุที่ใช้ในการประกอบสร้างขึ้นมานั้นคือ แผ่นพลาสติก (Plaswood) ด้วยคุณสมบัติของแผ่นพลาสติกมีดังนี้ กล่าวคือ มีความคงทนต่อสภาพความชื้น ทนต่อการถูกร่อนซึ่งมีความคงทนต่อสารเคมีชนิดต่างๆ อาทิ เช่น กรดแก่และเบสแก่ รองรับการกระแทกได้ขนาดหนึ่ง ไม่มีปัญหาจากแมลงต่างๆ ที่เกิดการจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดหรือกิน และไม่เกิดเชื้อราได้ง่าย และวัสดุมีน้ำหนักที่เบา และสามารถทน ทากขีด ทาบ เลื่อยและ  
 ยิงสกรูด้วยเครื่องมือช่างได้อย่างง่าย และในส่วนสุดท้ายคือไม่เป็นวัสดุที่เป็นเชื้อไฟ แผ่นพลาสติกจึง  
 เป็นทางเลือกที่นำมาใช้ในการสร้างกล่องครอบแกนขดลวดโดยได้แสดงแบบจำลองประกอบสร้างใน  
 รูปที่ 3.10 และประกอบสร้างจริงที่ 3.11



รูปที่ 3.10 กล่องครอบของขดลวดโรกอฟสกี



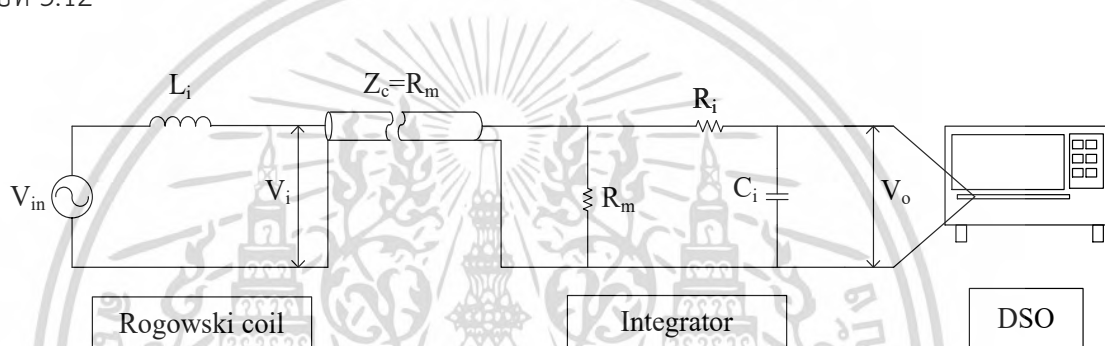
รูปที่ 3.11 กล่องครอบของขดลวดโรกอฟสกีที่ประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

จากวงจรระบบวัดที่นำมาใช้วัดนั้นได้ใช้ขดลวดโรกอฟสกีซึ่งทำงานร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน โดยขดลวดโรกอฟสกีได้ถูกออกแบบและประกอบสร้างขึ้นซึ่งถูกกล่าวไว้แล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานได้ถูกนำมาใช้ในระบบวัดนี้เนื่องจากคุณสมบัติที่มีการตอบสนองต่อสัญญาณชั่วคราวได้ดี อีกทั้งสามารถนำมาทำงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีแล้วทำให้ระบบวัดนี้เป็นระบบวัดที่มีแถบความถี่ที่กว้างโดยการออกแบบอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานนั้นจ เป็นต้องทราบถึงองค์ประกอบความถี่ต่ำของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC ซึ่งได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อ 3.1 ดังนั้นแล้วเมื่อ ขดลวดโรกอฟสกีและวงจรมาท างนด้วยกันโดยแสดงไว้ในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ชนิด RC

ในการออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

ในระบบวัดนี้ได้กำหนดให้อัตราส่วนขยายระหว่างกระแสที่มีขนาด 1 kA ในฝั่งขาเข้าท ให้ในฝั่งขาออกมีแรงดันขนาดเท่ากับ 1 V ได้ถูกแสดงไว้ในสมการที่ 3.2

$$G = \frac{V_o}{I_i} = \frac{M}{RC} \quad (3.2)$$

$$G = \frac{1}{10^3}$$

เนื่องจาก  $M = \frac{L}{n}$  โดย  $L = 5.5 \mu\text{H}$  และ  $n = 26$  รอบ ท ให้  $M = 0.2115 \mu\text{H}$

$$\frac{M}{RC} = \frac{1}{10^3}$$

$$RC = (0.2115 \times 10^{-6}) \times 10^3$$

$$RC = 0.2115 \times 10^{-3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบของแถบความถี่ของระบบวัดได้ถูกแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1 ทำให้สามารถกำหนดค่าความถี่ตัดฝั่งด้านต่ำตามสมการที่ 3.3

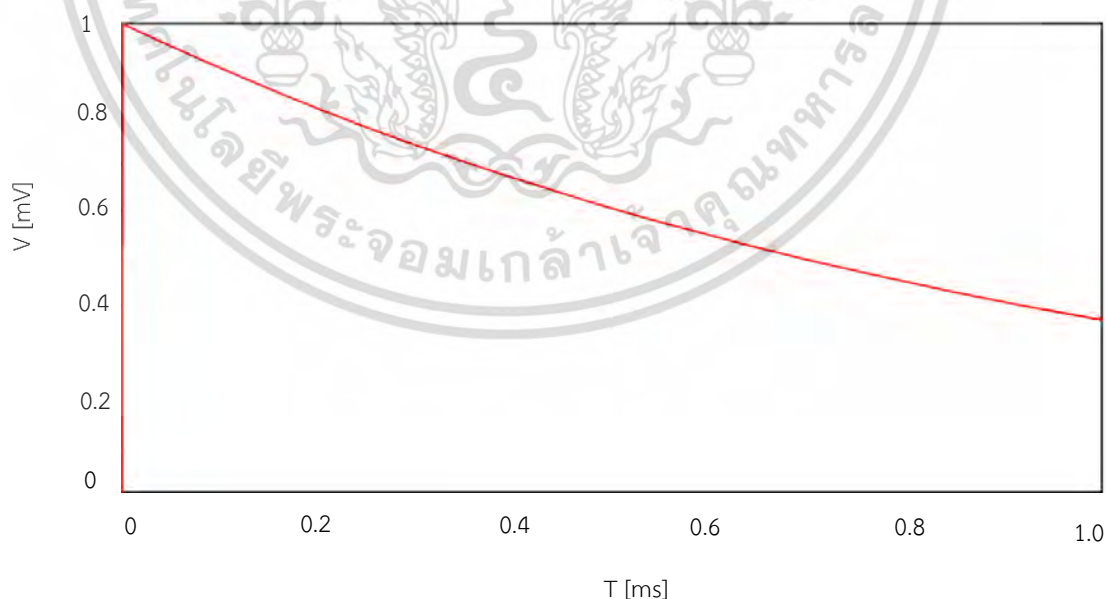
$$f_L = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.3)$$

ค่าความต้านทานและค่าเก็บประจุถูกกำหนดด้วยอัตราส่วนขยายตามสมการที่ 3.2

$$f_L = \frac{1}{2\pi(0.2115 \times 10^{-3})}$$

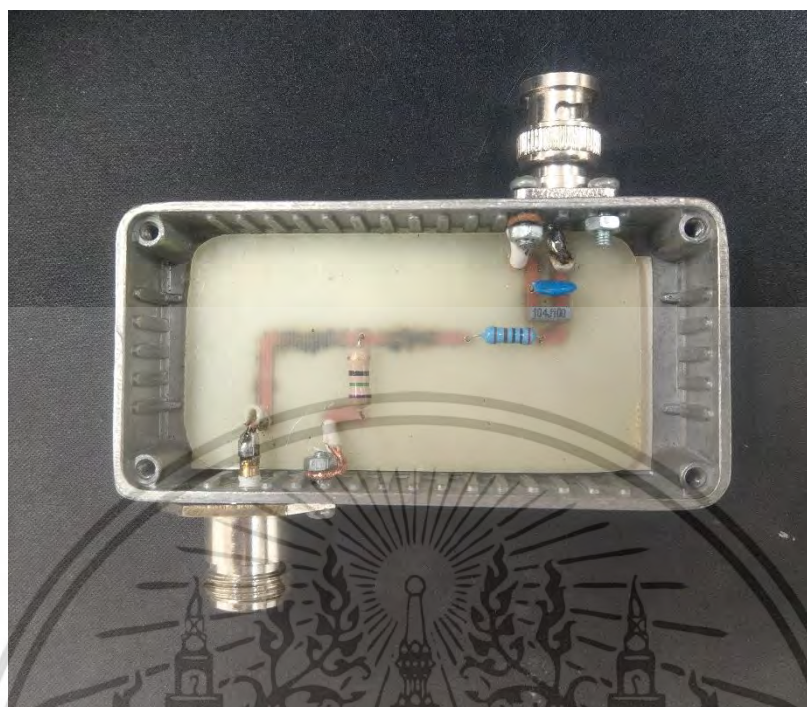
$$f_L = 752.505$$

จากสมการที่ 3.3 ทำให้ทราบดังนี้ กล่าวคือที่ฝั่งความถี่ต่ำตัดในด้านล่างของระบบวัดนั้นมีค่าเท่ากับ 752.505 Hz ดังนั้นแล้วในการออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานได้กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 2 k $\Omega$  และตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 0.1  $\mu$ F หลังจากนั้นได้ทำการตรวจสอบผลตอบสนองต่อเวลาของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ได้ออกแบบขึ้น ผลได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.13 ผลการตอบสนองเห็นได้ชัดว่าเมื่อจ่ายกระแสที่เป็นรูปคลื่นขั้นเข้าไปในวงจร วงจรวัดไม่สามารถวัดรูปคลื่นขั้นได้โดยกราฟนั้นตกลงเรื่อยๆ ไม่เป็นรูปคลื่นขั้น แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการเปรียบเทียบจึงได้ทำการออกแบบและประกอบสร้าง ได้แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองของระบบวัดโดยใช้อินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

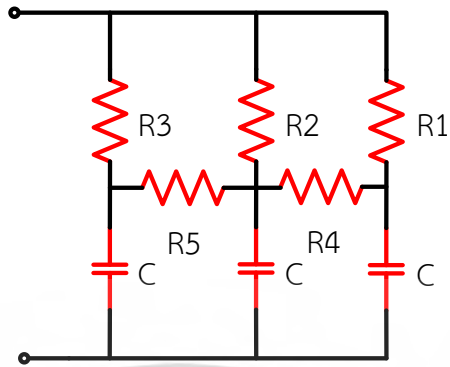
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



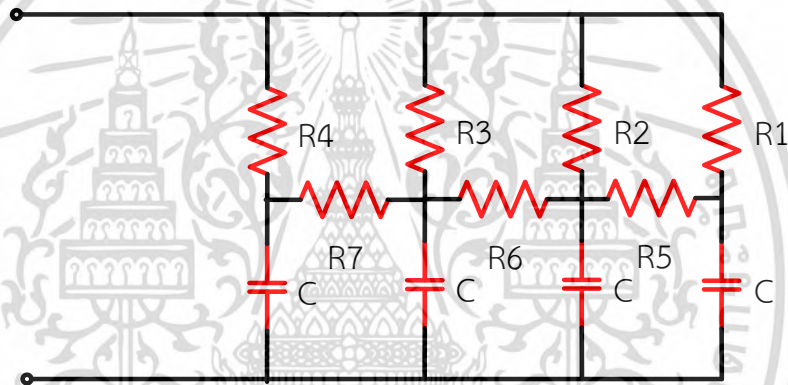
รูปที่ 3.14 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ประกอบสร้างขึ้น

### 3.4 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า

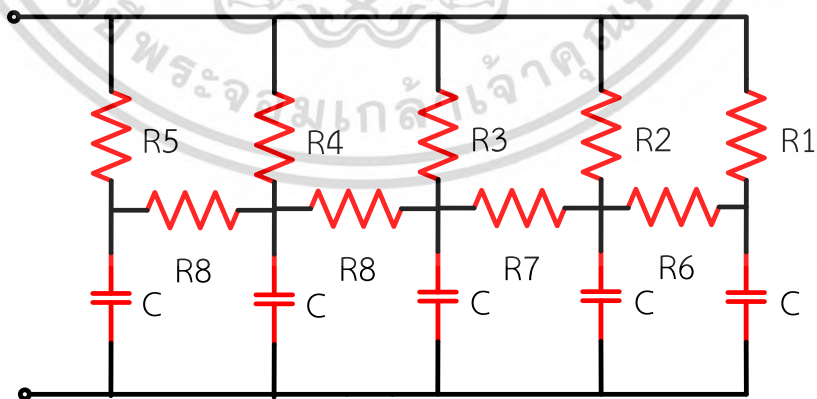
จากหัวข้อ 3.3 ในการออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตขึ้นมานั้นเมื่อนามาจำลองด้วยโปรแกรม ATP draw จึงทำให้ทราบว่าทางคลื่นของระบบวัดไม่สามารถวัดได้ตามมาตรฐานดังนั้นจึงมีการปรับปรุงวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานให้เป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า กล่าวคือเป็นการเพิ่มขึ้นของวงจรโดยใส่ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจร เพื่อเป็นการเพิ่มแถบความกว้างของความถี่ฝั่งด้านต่ำของระบบวัดให้มากขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นในวงจรส่งผลให้เกิดส่วนพุ่งเกิน (Over shoot) ดังนั้นจึงทำการกำหนดไมท์ ให้อัตราขยายของระบบวัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.5% เนื่องจากส่งผลให้รูปคลื่นที่วัดได้นั้นผิดเพี้ยนไป โดยมีวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ออกแบบได้แสดงในรูปที่ 3.15 ถึง 3.17



รูปที่ 3.15 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น



รูปที่ 3.16 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น



รูปที่ 3.17 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบเลือกค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมจำเป็นต้องใช้โปรแกรม ATP draw เพื่อการตอบสนองของรูปคลื่นแบบลักษณะที่เป็นชั่วคราว โดยหลักการที่ใช้คือการปรับค่าตัวต้านทานที่อยู่ในกิ่งกลางระหว่างกิ่งของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ รูปที่ 3.18 แสดงวงจรการป้อนกระแสรูปแบบขั้น

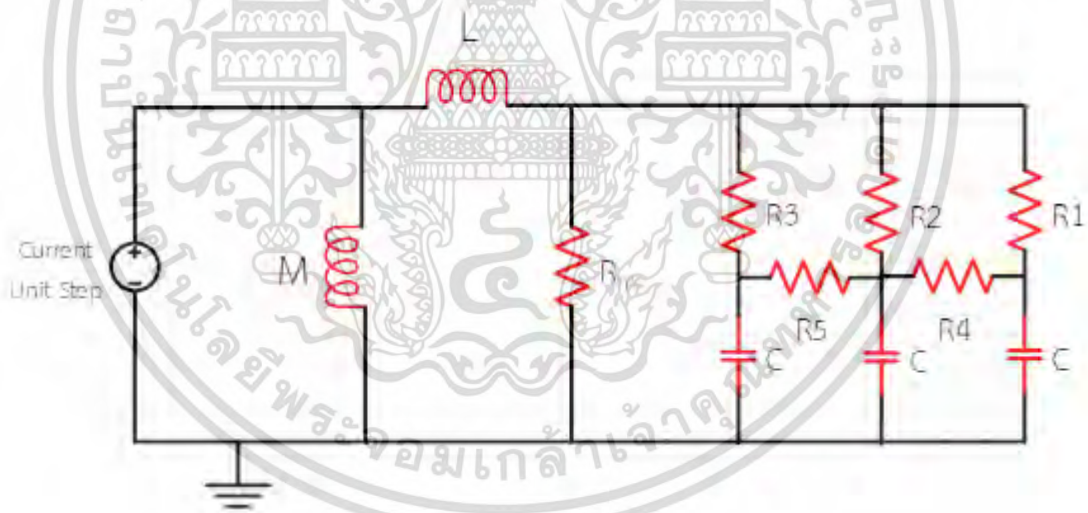
ซึ่งในการหาค่าตัวต้านทานที่เหมาะสมของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าแต่ละขั้นนั้นมีเงื่อนไขดังนี้

1. กำหนดให้ค่าตัวต้านทานแต่ละกิ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของกิ่งที่อยู่ฝั่งถัดไป (เริ่มจากกิ่งฝั่งขาออกให้เป็น 100%)

2. กำหนดให้ค่าเก็บประจุแต่ละกิ่งมีค่าเท่ากันหมด

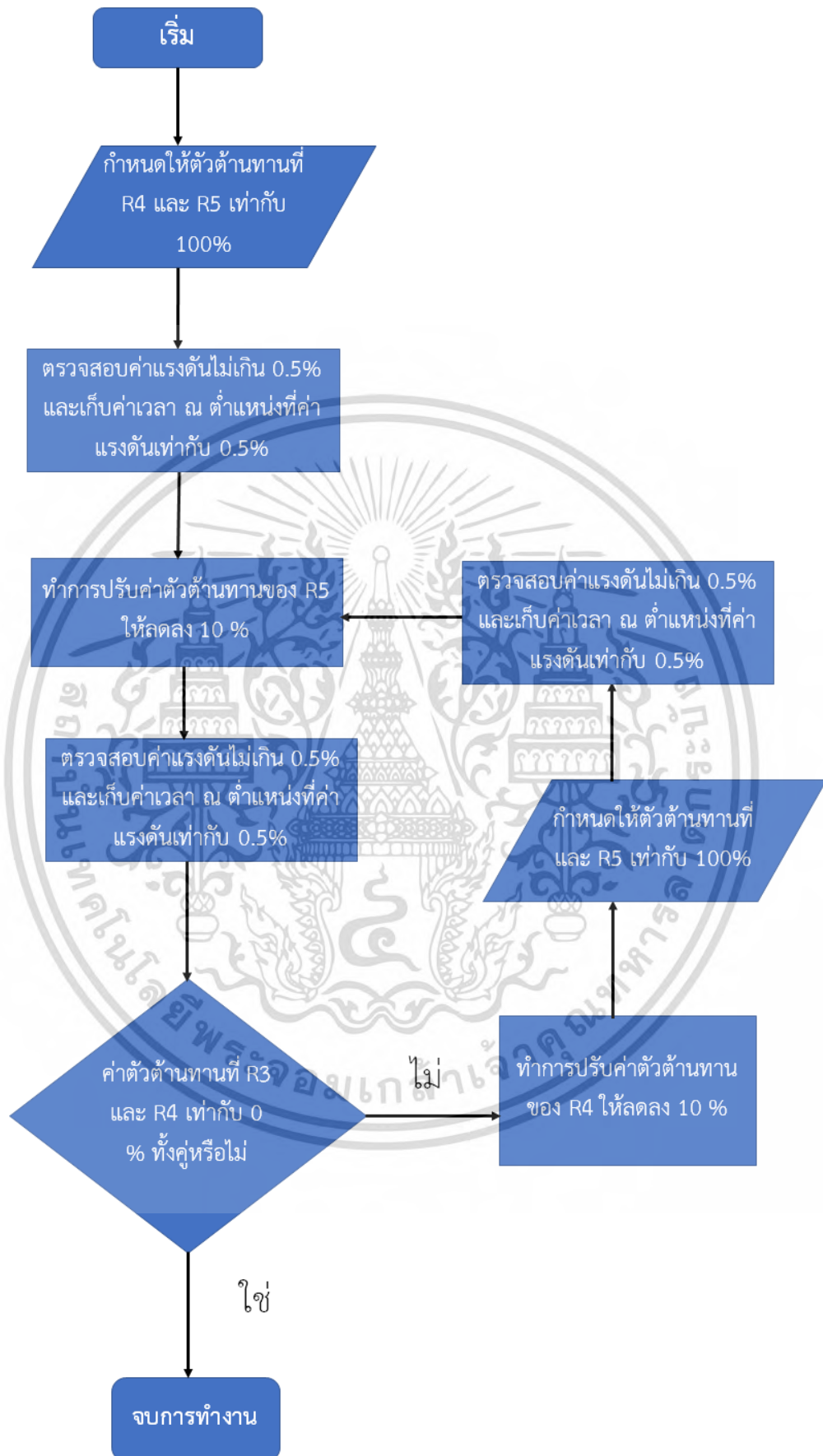
3. กำหนดให้ค่าตัวต้านทานที่อยู่ระหว่างกิ่งมีค่าอยู่ในระหว่างของแต่ละกิ่ง

เมื่อมีเงื่อนไขดังนี้แล้วจึงทำการหาค่าที่ดีที่สุดของค่าตัวต้านทานที่อยู่ระหว่างกิ่งโดยมีการแสดงผังตามรูปที่ 3.19 โดยตัวชี้วัดค่าตัวต้านทานที่เหมาะสมที่สุดนั้นมีดังต่อไปนี้คือ เวลา ณ ช่วงแรงดันที่มีค่าเท่ากับ 99.5% ( $t_{99.5\%}$ ) ที่ค่าเวลาที่ยาวที่สุด



รูปที่ 3.18 วงจรการจ่ายกระแสรูปแบบขั้นป้อนเข้าอุปกรณ์วัด

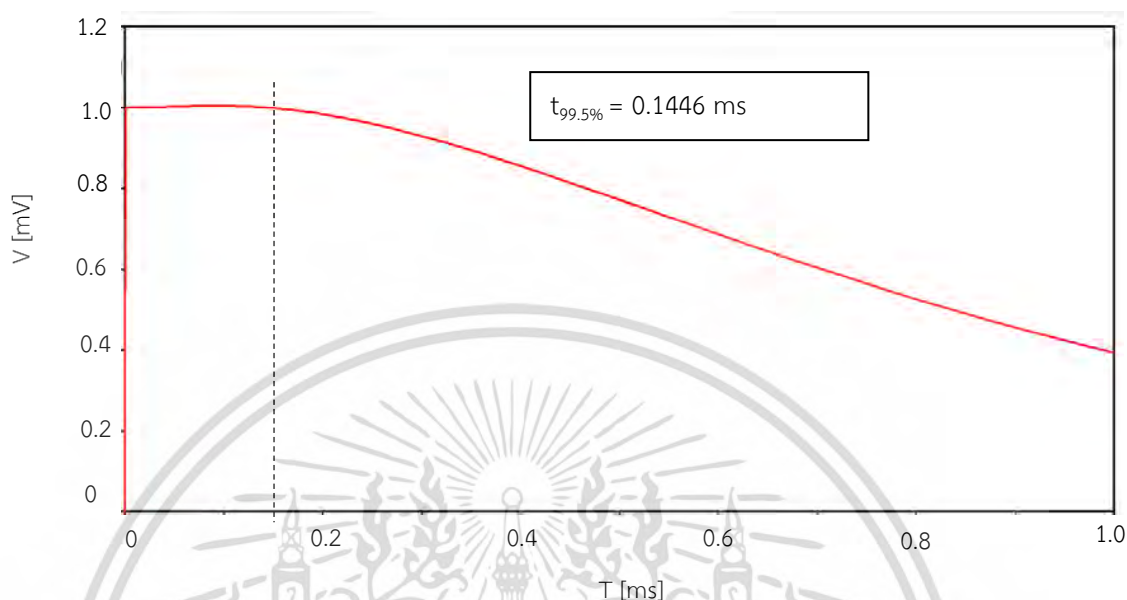
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แผนผังการเลือกค่าวงจรรอนทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น

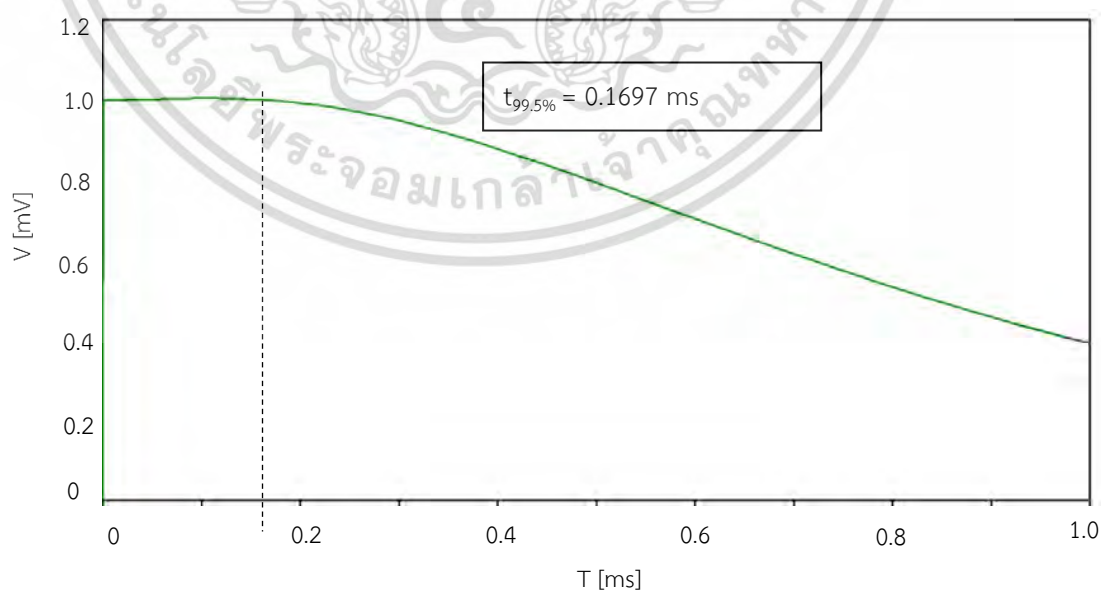
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.20 ได้แสดงผลการจำลองของระบบวัดโดยใช้อินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้นโดยมีการการตอบสนองต่อรูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นชั้วครู่ดังนี้ ซึ่งมีเวลาที่แรงดันเท่ากับ 99.5 % คือ 0.1446 ms.



รูปที่ 3.20 ผลการจำลองของระบบวัดโดยใช้อินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น

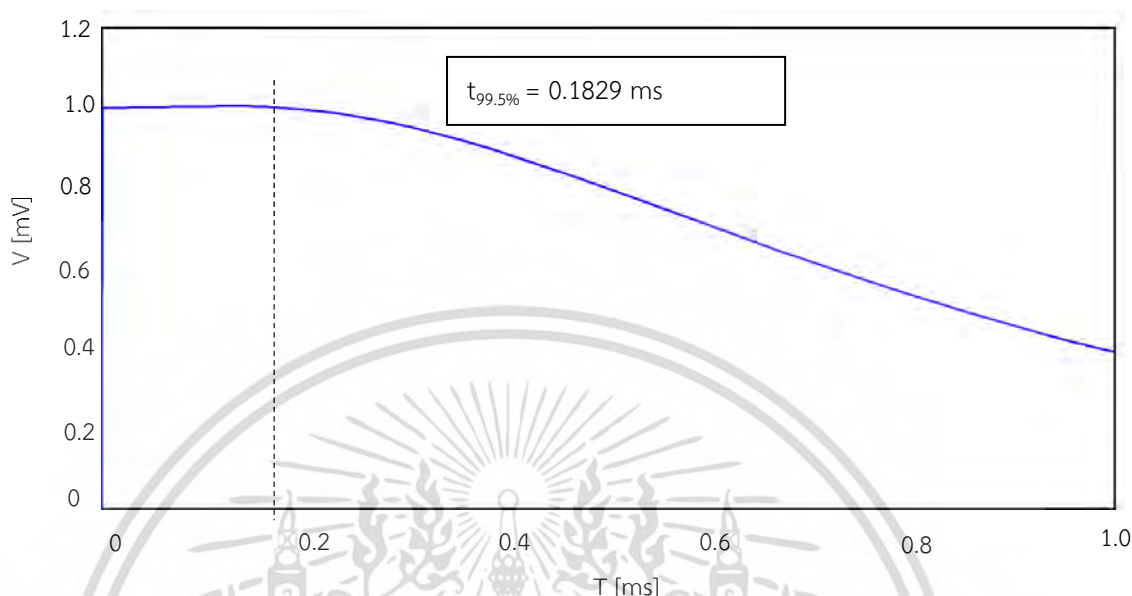
ทำการหาค่าความต้านทานที่เหมาะสมตามเงื่อนไขของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า โดยเมื่อทำตามแผนผังเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ 4 ชั้นโดยการจำลองทั้งหมด 6000 ค่าเพื่อหาค่าเวลาที่ตีดีที่สุดและแรงดันไม่เกิน 0.5 % ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.21 โดยมีเวลาที่แรงดันเท่ากับ 99.5 % คือ 0.1697ms



รูปที่ 3.21 ผลการจำลองของระบบวัดโดยใช้อินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อหาตามแผนผังเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ 5 ชั้นโดยการจำลองทั้งหมด 10000 ค่าเพื่อหาค่าเวลาที่ตีที่ตีที่สุดและแรงดันไม่เกิน 0.5 % ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.22 ซึ่งมีเวลาที่แรงดันเท่ากับ 99.5 % คือ 0.1829 ms



รูปที่ 3.22 ผลการจำลองของระบบวัดโดยใช้อินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น

โดยได้แสดงอัตราส่วนของตัวต้านทานภายในวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าดังต่อไปนี้

วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ 3 ชั้น

$$R_3 = 0.5R_2, R_2 = 0.5R_1$$

$$R_4 = R_1, R_5 = 0.4R_2$$

$$C_1 = C_2 = C_3$$

วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ 4 ชั้น

$$R_4 = 0.5R_3, R_3 = 0.5R_2, R_2 = 0.5R_1$$

$$R_5 = R_1, R_6 = 0.3R_1, R_7 = R_4$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4$$

วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ 5 ชั้น

$$R_5 = 0.5R_4, R_4 = 0.5R_3, R_3 = 0.5R_2, R_2 = 0.5R_1$$

$$R_6 = R_1, R_7 = 0.3R_1, R_8 = 0.2R_1, R_9 = R_5$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการหาค่าตัวต้านทานที่เหมาะสมสำหรับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าได้แล้ว จึงกำหนดให้ตาม  $R_1 = 2k\Omega$  และตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ  $0.1 \mu F$  ดังนั้นแล้วจึงทำให้วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ชั้นต่างๆ มีค่าดังต่อไปนี้

วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ 3 ชั้น

R1	R2	R3	R4	R5
2000	1000	500	2000	400

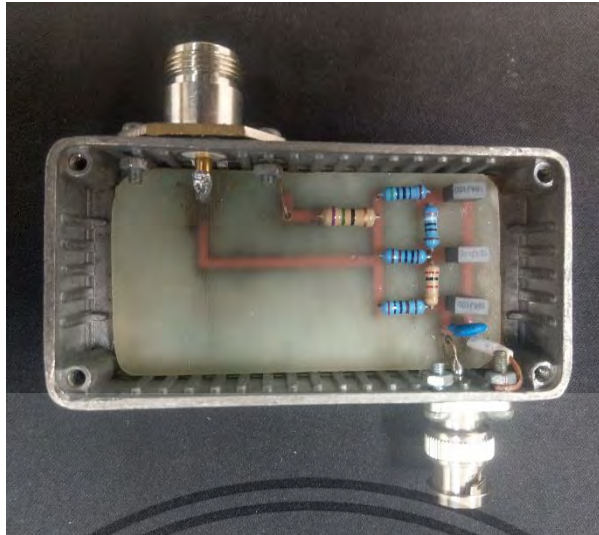
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ 4 ชั้น

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
2000	1000	500	250	2000	600	250

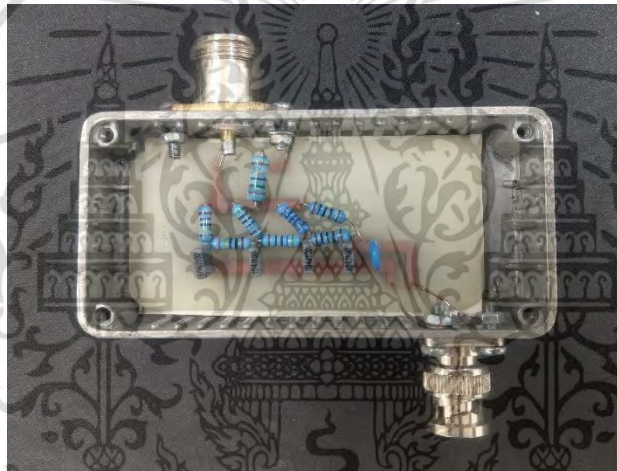
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ 5 ชั้น

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
2000	1000	500	250	125	2000	600
R8	R9					
400	125					

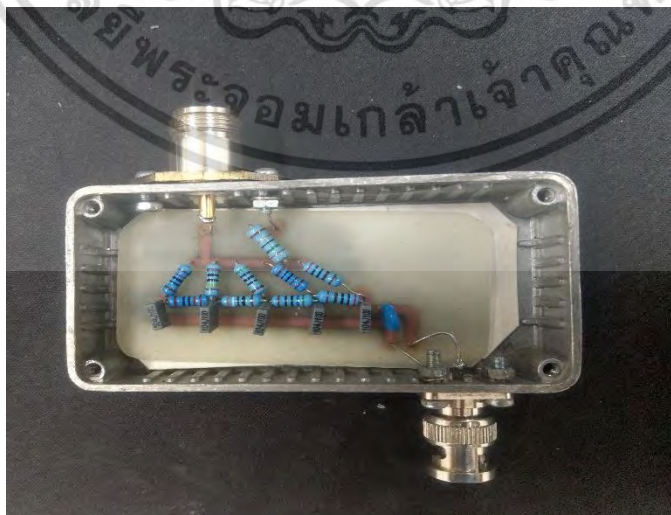
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ชั้นต่างๆ ได้ถูกประกอบสร้างขึ้น โดยมีค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุตามที่กำหนดไว้ในข้างต้น ในรูปที่แสดงที่ 3.23 ถึง 3.25 ได้แสดงการประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ชั้นต่างๆ ที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 3.23 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้นที่ถูกประกอบสร้าง



รูปที่ 3.24 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้นที่ถูกประกอบสร้าง



รูปที่ 3.25 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้นที่ถูกประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดสอบและเปรียบเทียบ

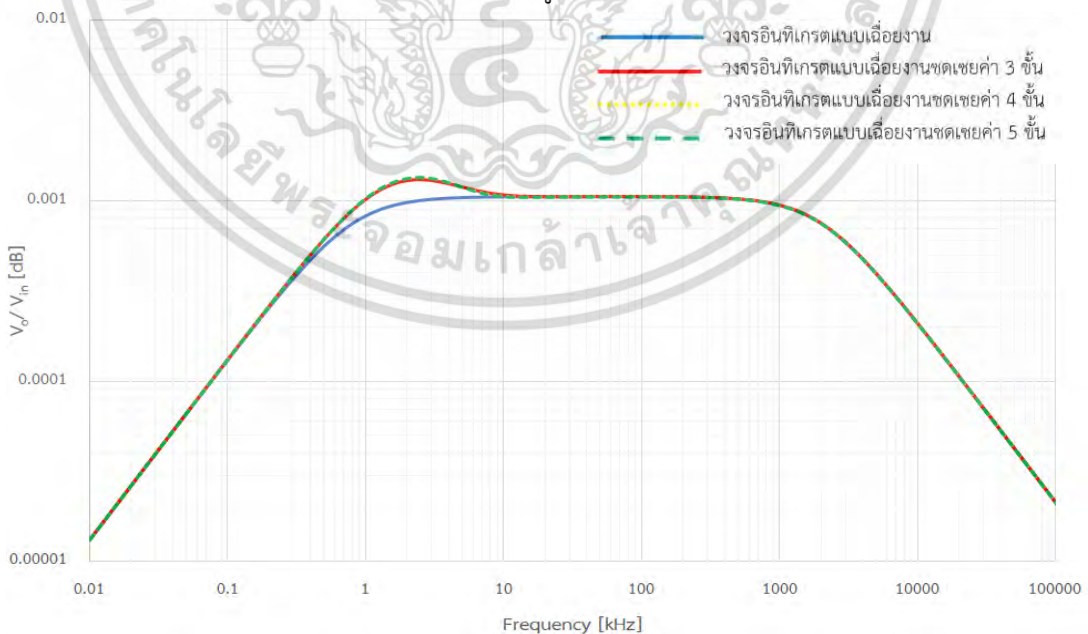
จากการออกแบบและประกอบสร้างของขดลวดโรกอฟสกี วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าในบทที่กล่าวมาแล้วนั้น ในบทนี้จะเป็นการนาอุปกรณ์วัดที่ถูกสร้างขึ้นมานั้นทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองรูปคลื่นและแถบกว้างความถี่ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าแต่ละชั้น อีกทั้งทำการเปรียบเทียบผลการจาสงและผลการทดสอบจากการวัดกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นตามมาตรฐานที่กำหนด และรวมถึงได้ทำการวัดกระแสอิมพัลส์ที่นำมาทดสอบกับดักแรงดันเกินในพิกัด 5 kA ในหัวข้อการทดสอบแรงดันคงเหลือตามมาตรฐาน IEC 60099-4

#### 4.1 ผลการเปรียบเทียบจากผลจำลองทางคอมพิวเตอร์

การจำลองทางคอมพิวเตอร์ประกอบไปด้วยการจำลองผลตอบสนองต่อความถี่และการตอบสนองต่อรูปคลื่นขึ้น ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ชั้นต่างๆ

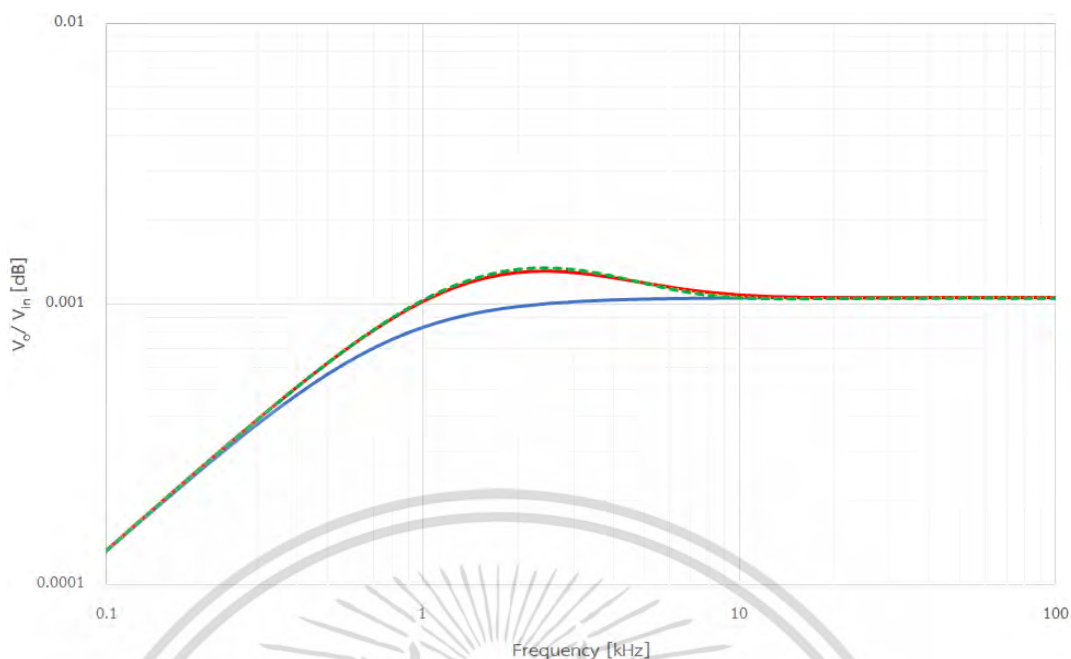
##### 4.1.1 ผลการตอบสนององค์ประกอบความถี่ของวงจรอินทิเกรต

อีกประการหนึ่งเพื่อเป็นการยืนยันผลวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ได้ทำการจำลองผลเปรียบเทียบเพื่อองค์ประกอบความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น 4 ชั้น และ 5 ชั้น โดยแสดงไว้รูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

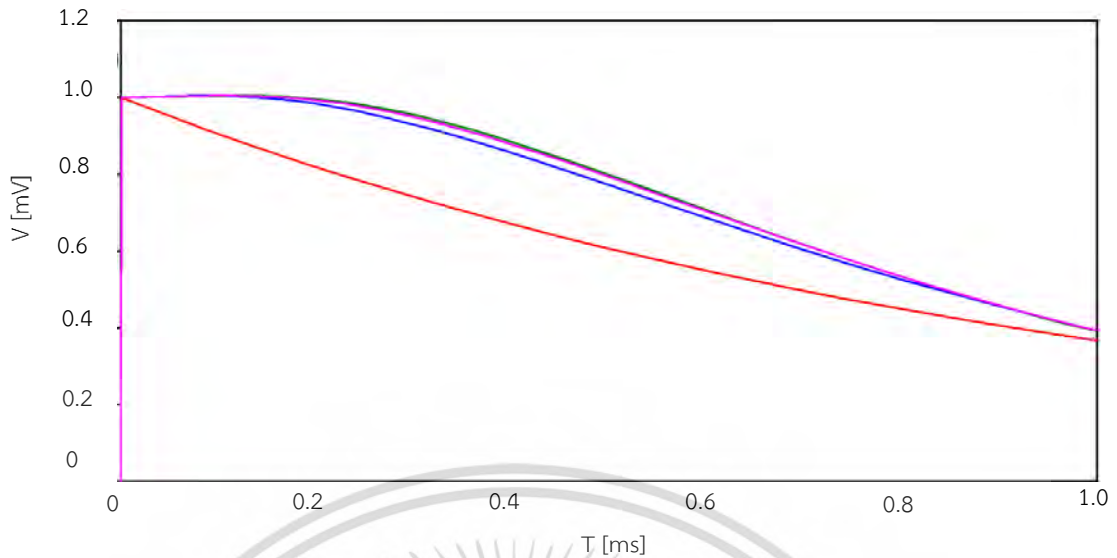


**รูปที่ 4.2** องค์ประกอบความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าช่วงความถี่ที่ 0.1 ถึง 100 kHz

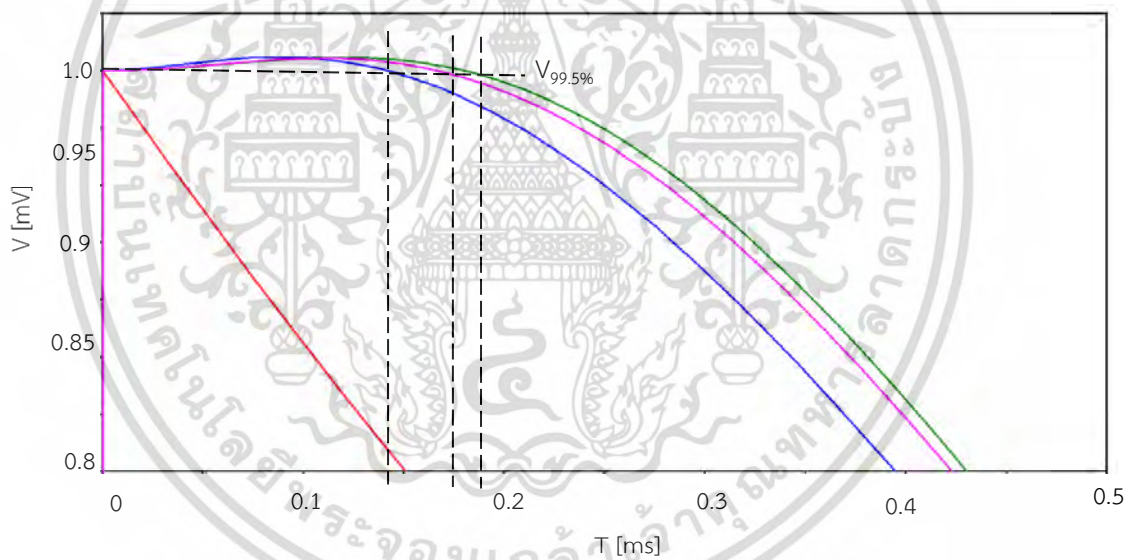
จากรูปที่ที่ 4.2 ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของผลการตอบสนองความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ขึ้นต่างๆ โดยส่วนที่แตกต่างคือเกิดการหน่วงขึ้น (Over damped) ซึ่งในวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานนั้นไม่มี โดยสามารถสังเกตได้จากกราฟสีน้ำเงิน และเมื่อเปรียบเทียบส่วนที่หน่วงขึ้นมานั้นวงจรอินทิเกรตแบบชดเชยค่า 4 และ 5 ชั้นที่มีสีเหลืองและสีเขียวจะมีช่วงหน่วงขึ้นมากที่สุดและผลจากการหน่วงขึ้นนี้ทำให้การออกแบบเพียงอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าเพียง 5 ชั้นเนื่องจากผลตอบสนองต่อความถี่ทำให้ทราบการเพิ่มขึ้นมากไปกว่านี้มันไม่ช่วยให้องค์ประกอบความถี่นั้นเพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตได้จากกราฟสีเหลืองและสีเขียวมันเส้นกราฟเหมือนกัน ดังนั้นแล้วเมื่อได้ทราบถึงผล จาองค์ประกอบความถี่ จากนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยการป้อนรูปคลื่นขั้นเข้าไปในวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น 4 ชั้น และ 5 ชั้น ร่วมกับชดลวดโรกอพอสกี

#### 4.1.2 ผลการตอบสนองต่อรูปคลื่นขั้น

เพื่อเป็นการตรวจสอบผลการตอบสนองของเวลา ดังนั้นจึงทำการป้อนกระแสที่มีลักษณะเป็นรูปขั้นเพื่อดูผลตอบสนองต่อรูปคลื่น โดยได้แสดงผลการจำลองและเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.3 และในรูปที่ 4.4 ได้ทำการขยายเพื่อให้เห็นในช่วงเวลา 0 ถึง 0.5 ms เพื่อแสดงให้เห็นผลตอบสนองต่อรูปคลื่นขั้นของวงจรอินทิเกรตที่ได้ทำการออกแบบขึ้น โดยได้ทำการเปรียบเทียบเวลาของแต่ละวงจรที่แรงดันเท่ากับ 99.5%



รูปที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า (สีแดงวงจรอินทิเกรต สีนํ้าเงินวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น สีชมพูวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น และสีเขียววงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น)

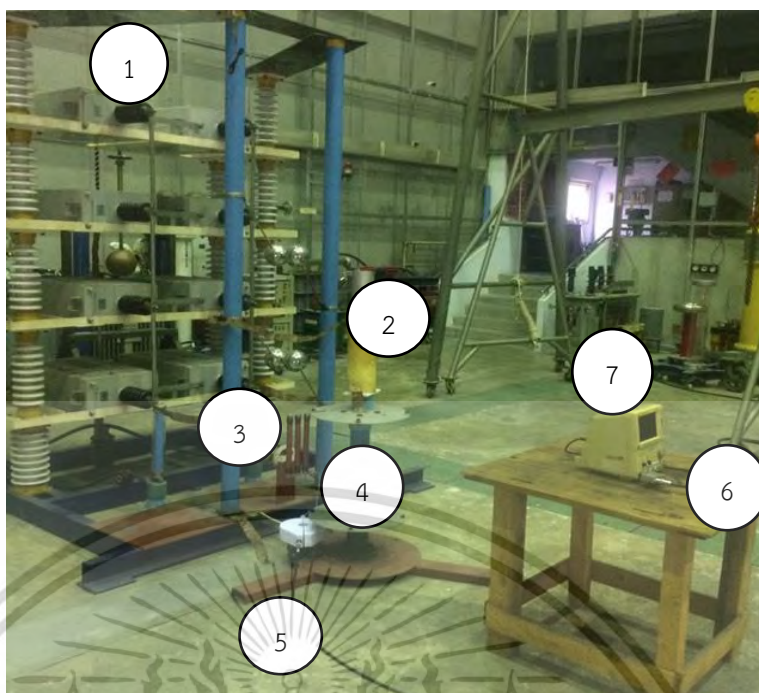


รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบโดยเลือกเวลาช่วงที่ 0 ถึง 0.5 ms วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า (สีแดงวงจรอินทิเกรต สีนํ้าเงินวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น สีชมพูวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น และสีเขียววงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น)

จากผลการเปรียบเทียบผลการจำลองการตอบสนองต่อรูปคลื่นขึ้น ทำให้ทราบถึงผลตอบสนองต่อรูปคลื่นขึ้นโดยผลวิเคราะห์เป็นดังนี้ โดยการเลือกตัวต้านทานที่เหมาะสมที่สุดและการเพิ่มขึ้นของวงจรนั้น สามารถทำให้ผลตอบสนองต่อรูปคลื่นขึ้นนั้นดียิ่งขึ้น กล่าวคือจากรูปที่แสดงให้เห็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานไม่สามารถตอบสนองต่อรูปคลื่นขึ้นได้ จะเห็นว่ารูปคลื่นตกอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการปรับปรุงวงจรเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าในชั้นต่างๆ ทำให้มีผลตอบสนองที่มากขึ้น ทั้งนี้สามารถหาเวลาตอบสนองจากการวัดเวลา ณ ที่แรงดัน 99.5 % โดยเวลาของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น ณ ที่แรงดัน 99.5 % เท่ากับ 0.1446 ms เวลาของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น ณ ที่แรงดัน 99.5 % เท่ากับ 0.1697 ms และเวลาของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น ณ ที่แรงดัน 99.5 % เท่ากับ 0.1829 ms เมื่อทำการตรวจสอบผลการตอบสนองต่อรูปคลื่นขึ้นท ทำให้ทราบว่าเมื่อทำการเพิ่มขึ้นในวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าสามารถเพิ่มเวลาการตอบสนองรูปขึ้นได้จริง แต่เวลาที่เพิ่มขึ้นของแต่ละชั้นจะน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือเวลาที่ตอบสนองจากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น เพิ่มขึ้นจาก 3 ชั้นคิดเป็น 14.79 % และวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น เพิ่มขึ้นจาก 4 ชั้นคิดเป็น 7.22 % ซึ่งเป็นส่วนให้ค่า นิ่งถึงว่าการเพิ่มขึ้นของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่านั้นมีข้อจำกัด

#### 4.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจำลองและผลทดสอบโดยวัดกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน

ขดลวดโรกอฟสกี วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าชั้นต่างๆ ได้ถูกนำมาวัดกระแสอิมพัลส์ที่ถูกสร้างขึ้นตามมาตรฐานภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของ สจล. โดยนำผลที่มาจากทดสอบวัดนำมาทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลอง เพื่อเป็นการตรวจสอบ การปรับปรุงและพัฒนาวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าชั้นต่างๆ นั้นสามารถทำให้รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฝั่งทางคลื่นตกข้างลงและมีผลที่ได้จากการวัดเหมือนผลจำลอง อีกทั้งเป็นการยืนยันว่าขดลวดโรกอฟสกีที่ออกแบบและประกอบสร้างเหมาะสมสำหรับการใช้วัดกระแสอิมพัลส์ โดยผลเปรียบเทียบมีกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ดังนี้ กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า กระแสอิมพัลส์สูงและกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น โดยแสดงรูปการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกีไว้ในรูปที่ 4.5

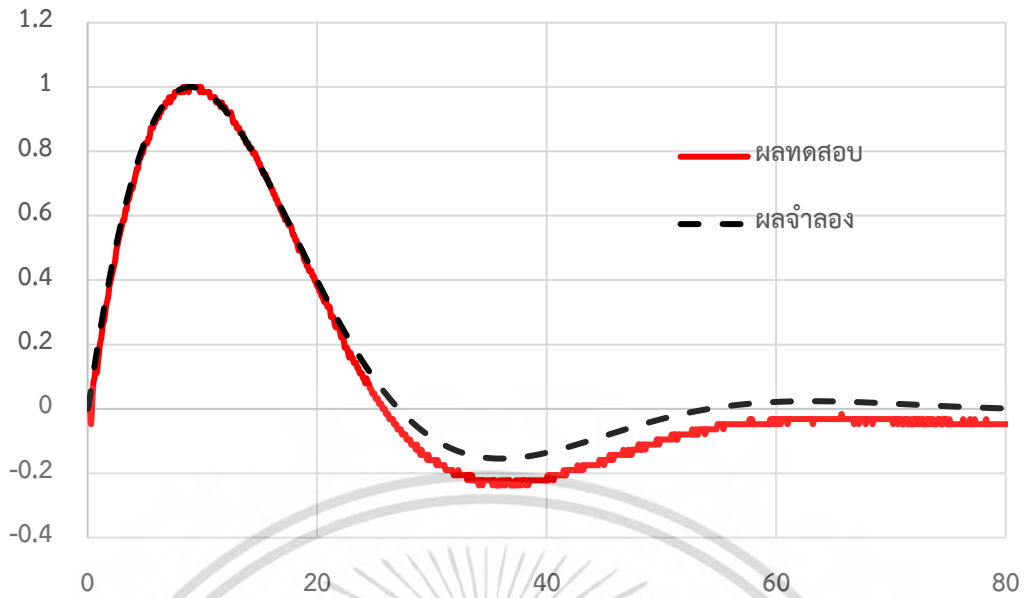


รูปที่ 4.5 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยอุปกรณ์วัดที่สร้างขึ้น

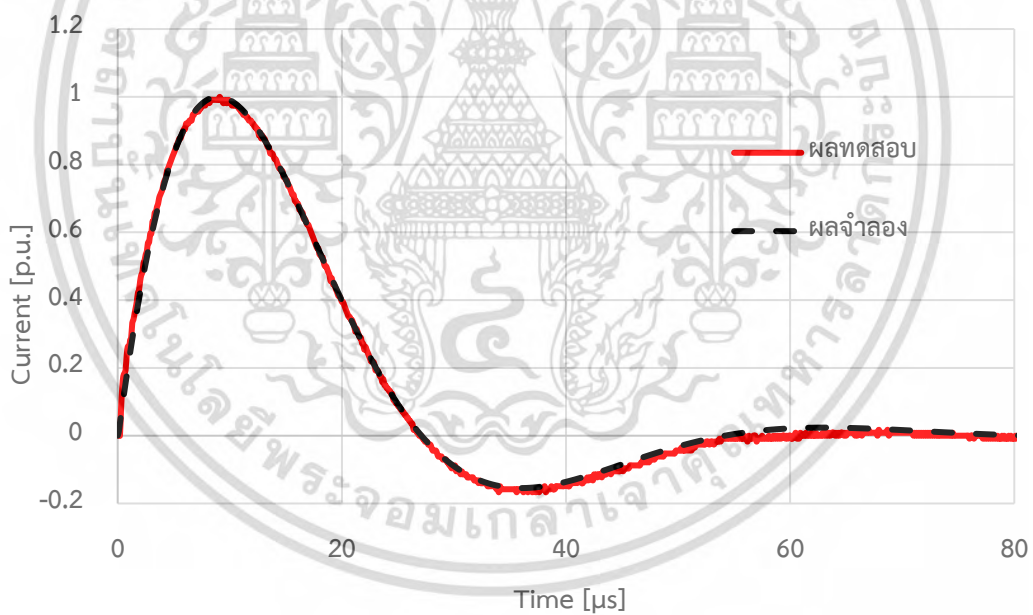
ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรที่ทำการทดลองมีดังต่อไปนี้ 1. ตัวเก็บประจุ 2. ตัวเหนี่ยวนา 3. ตัวต้านทาน 4. ขดลวดโรกอฟสกี 5. สายสัญญาณชนิด RG 11 6. อินทิเกรตเตอร์ และ 7. เครื่องวัดสัญญาณ ในส่วนของหลักการทางานขออธิบายไว้เพียงสังเขปดังนี้ เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ ประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนา และตัวต้านทาน ซึ่งในการสร้างนั้นจะทำการเลือกค่าความจุไฟฟ้า ค่าความเหนี่ยวนา และค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ จากนั้นขดลวดโรกอฟสกีจะถูกคล้องไว้กับสายเพื่อทำการวัดสัญญาณ โดยใช้สายสัญญาณชนิด RG 11 เป็นตัวส่งผ่านคลื่นสัญญาณ เมื่อมีสัญญาณผ่านขดลวดโรกอฟสกี สัญญาณผ่านสายสัญญาณชนิด RG 11 ไปยังตัวอินทิเกรตก่อนเข้าเครื่องวัดสัญญาณ

#### 4.2.1 ผลการเปรียบเทียบของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจำลองและผลทดสอบของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีที่ทางานร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น 4 ชั้น และ 5 ชั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 ถึง 4.9 ตามลำดับ

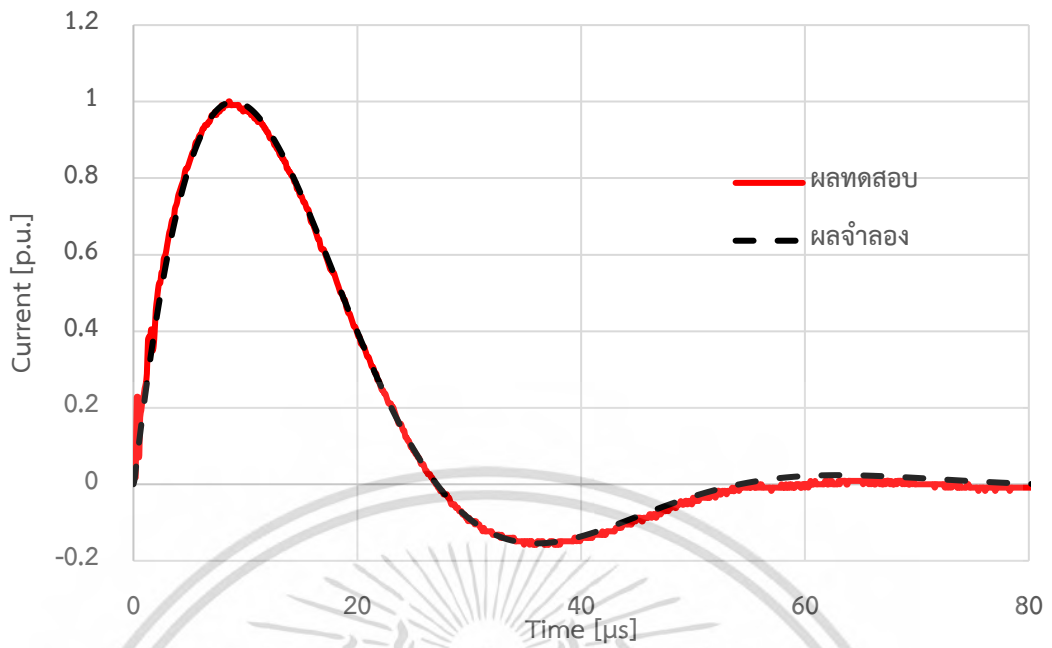


รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ชุดลวดโรกอฟสกีวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน  
วัดรูปคลื่นกระแสไอพัสฟ้าผ่า (8/20  $\mu$ s)

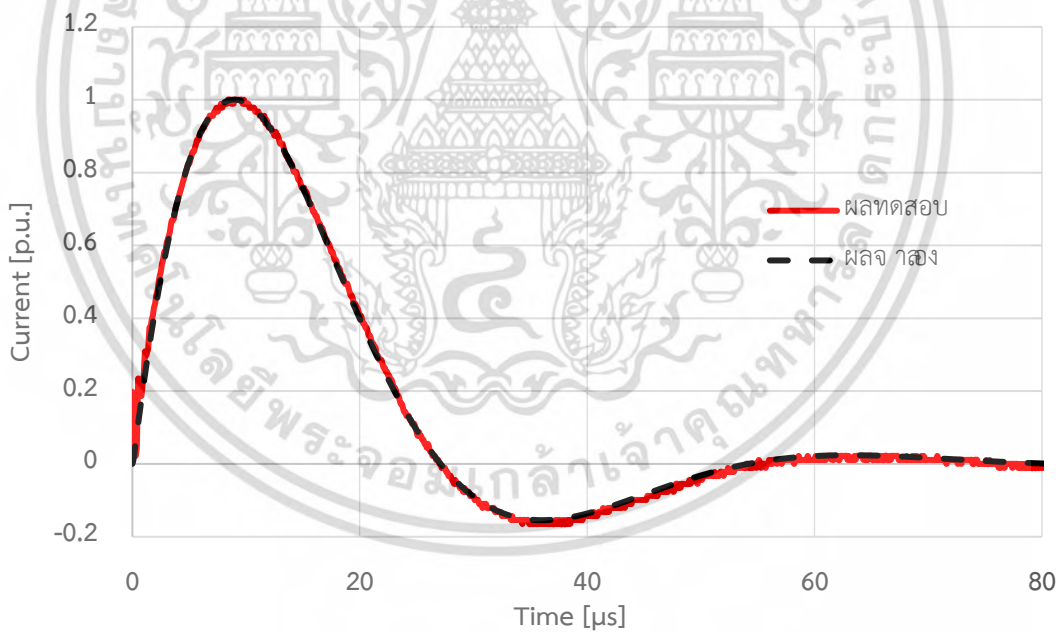


รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ชุดลวดโรกอฟสกีวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน  
ชดเชยค่า 3 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสไอพัสฟ้าผ่า (8/20  $\mu$ s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



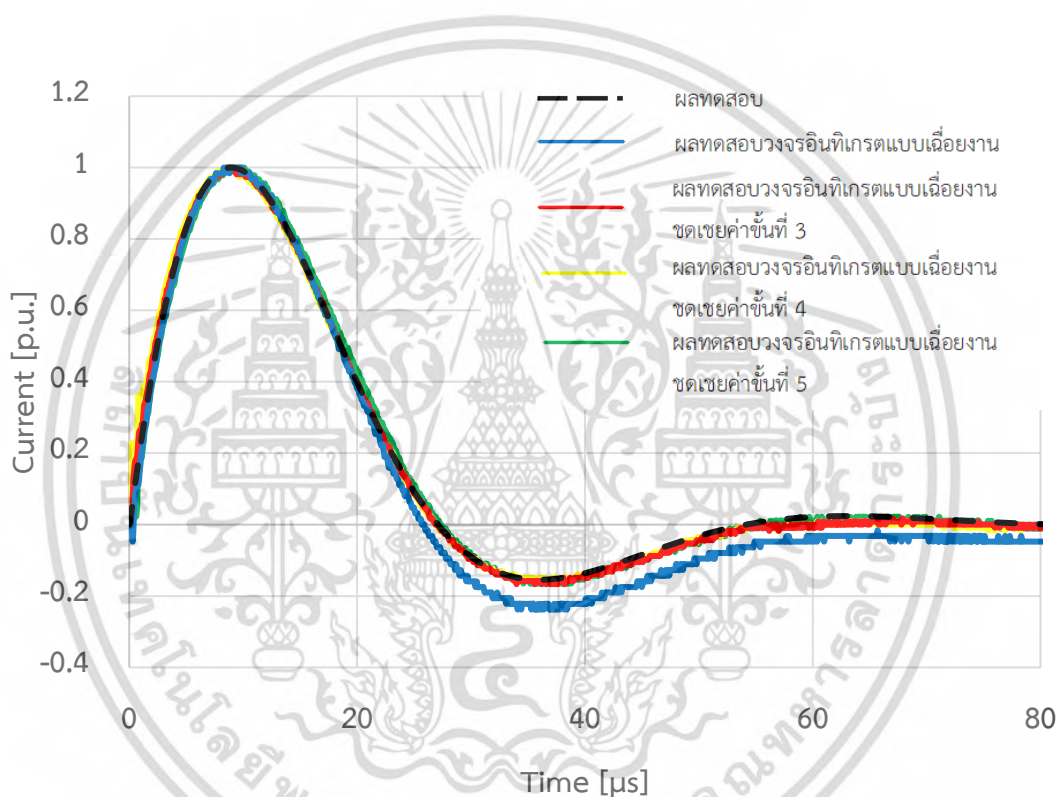
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ชุดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน  
ชดเชยค่า 4 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ฟ้าผ่า (8/20  $\mu\text{s}$ )



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ชุดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน  
ชดเชยค่า 5 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ฟ้าผ่า (8/20  $\mu\text{s}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบผลระหว่างผลทดสอบและผลจำลองทำให้ได้ผลวิเคราะห์ได้ดังนี้จากผลการทดสอบด้วยการใช้วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี แสดงให้เห็นว่าช่วงกราฟที่บริเวณทางคลื่นนั้นตกว่าผลจ สอง ดังนั้นแล้วจากผลการทดสอบด้วยการใช้วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ชั้นต่างๆ นั้นทำให้ช่วงบริเวณทางคลื่นนั้นตกว่าผลจ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง จึงสรุปได้ดังนี้ว่า การเพิ่มขึ้นจากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่านั้นช่วยทำให้ช่วงเวลาทางคลื่นนั้นตกว่าผลจและทำให้มีกราฟเหมือนที่จำลอง ในรูปที่ 4.10 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบทั้งหมด



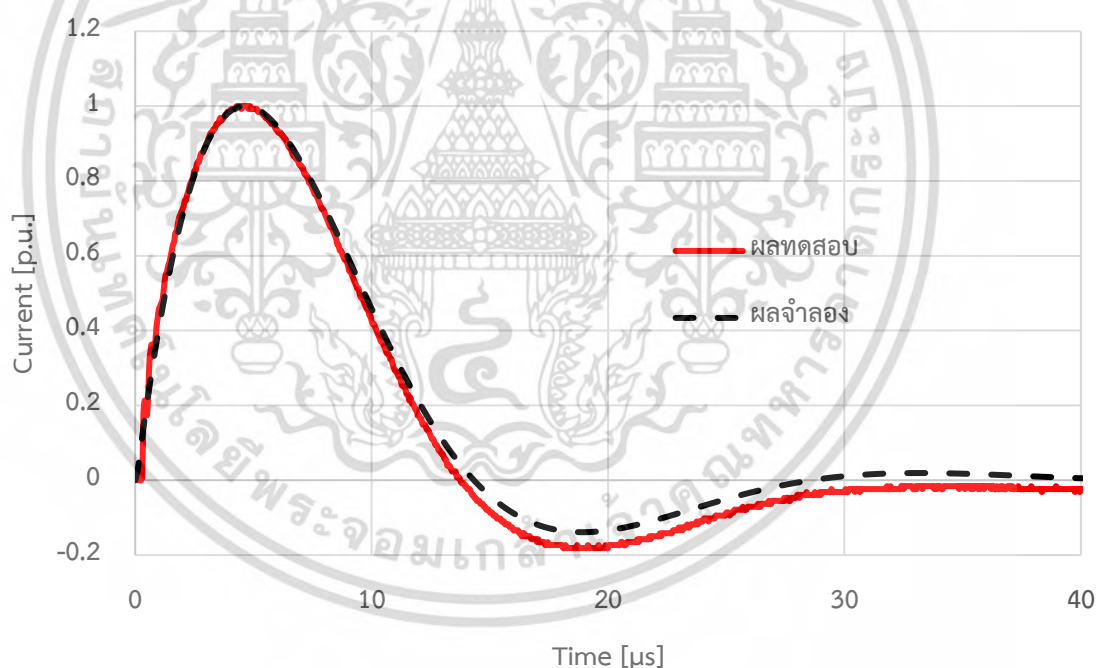
รูปที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบกราฟการทดสอบทั้งหมดของกระแสิมพัลส์พม่า ผลของเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของรูปคลื่นกระแสิมพัลส์พม่าที่ถูกวัดโดยขดลวดโรกอฟสกีที่ใช้งานร่วมกับอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าชั้นต่างๆ ได้ถูกแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า

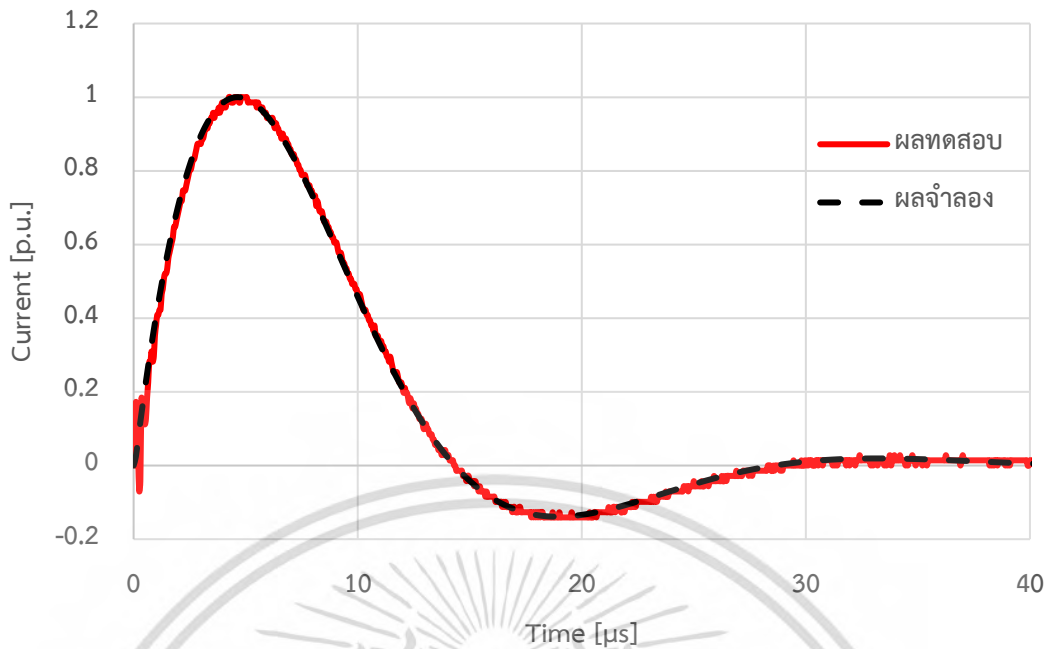
ชนิดวงจรมีอินทิเกรต	เวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ )	เวลาหลังคลื่น ( $T_2$ )
วงจรมีอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	7.25 $\mu$ s	18.3 $\mu$ s
วงจรมีอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น	7.25 $\mu$ s	18.5 $\mu$ s
วงจรมีอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น	7.25 $\mu$ s	18.5 $\mu$ s
วงจรมีอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น	7.25 $\mu$ s	18.5 $\mu$ s

#### 4.2.2 ผลการเปรียบเทียบของกระแสอิมพัลส์สูง

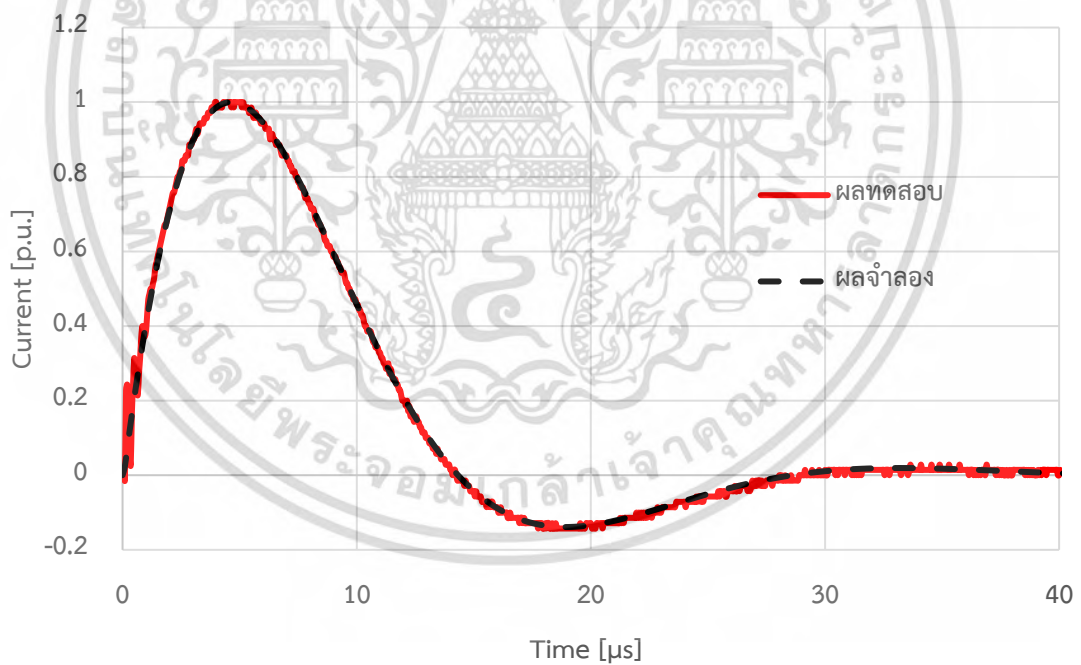
ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจำลองและผลทดสอบของกระแสอิมพัลส์สูง โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีที่ทำงานร่วมกับวงจรมีอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรมีอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น 4 ชั้น และ 5 ชั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 ถึง 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรมีอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน  
วัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สูง (4/10  $\mu$ s)

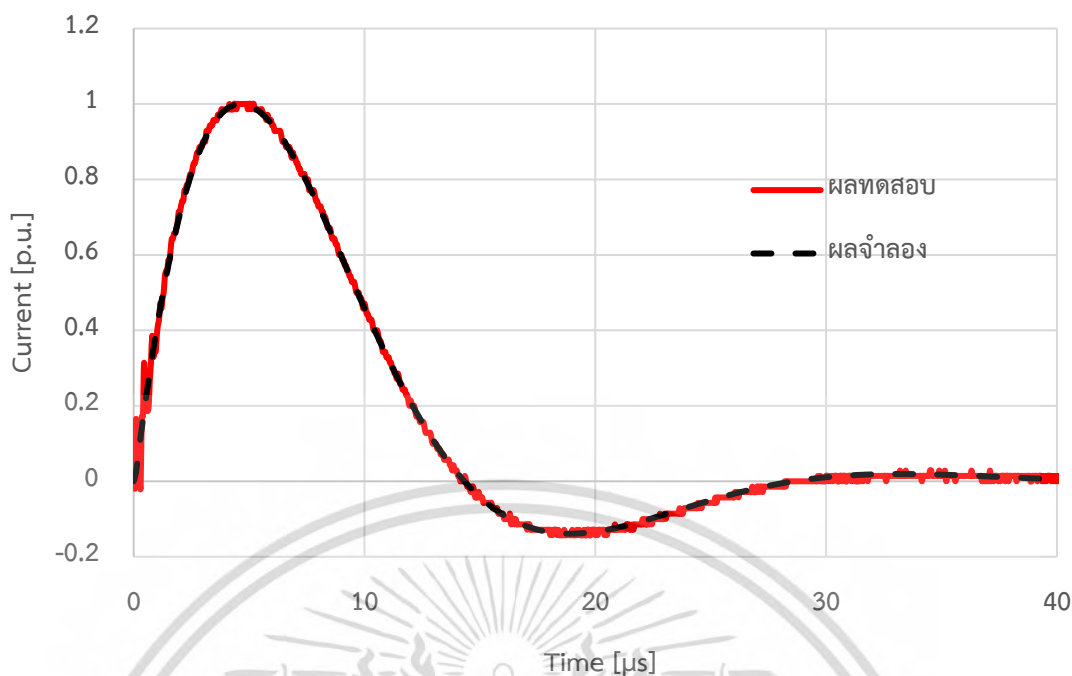


รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบและผลจำลอง โดยใช้ชุดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน  
ชดเชยค่า 3 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สูง (4/10  $\mu\text{s}$ )



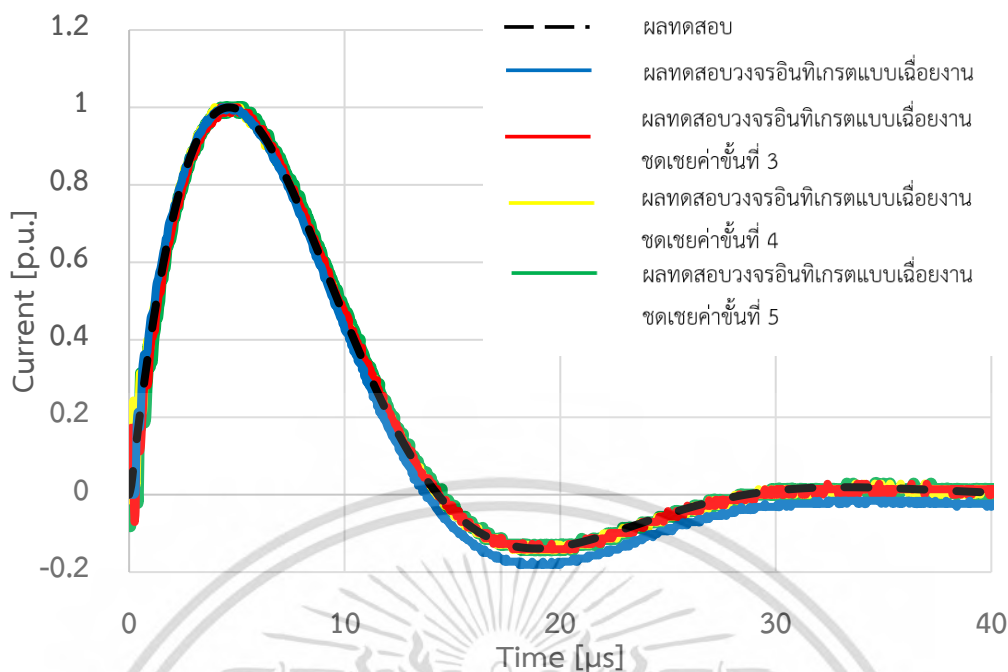
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบและผลจำลอง โดยใช้ชุดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน  
ชดเชยค่า 4 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สูง (4/10  $\mu\text{s}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบและผลจำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน  
ชดเชยค่า 5 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์สูง (4/10  $\mu\text{s}$ )

จากการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบผลระหว่างผลทดสอบและผลจำลองทำให้ได้ผลวิเคราะห์ได้ดังนี้ จากผลการทดสอบด้วยการใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี แสดงให้เห็นว่าช่วงกราฟที่บริเวณหางคลื่นนั้นตกเร็วกว่าผลจำลอง ดังนั้นแล้วจากการทดสอบด้วยการใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ขึ้นต่างๆ นั้นทำให้ช่วงบริเวณหางคลื่นนั้นตกช้าลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง จึงสรุปได้ดังนี้ว่า การเพิ่มขึ้นจากขดลวดโรกอฟสกีวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่านั้นช่วยทำให้ช่วงเวลาหางคลื่นนั้นตกช้าลงและทำให้มีกราฟเหมือนผลจำลอง ในรูปที่ 4.15 แสดงผลการเปรียบเทียบกราฟทั้งหมด



รูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบกราฟการทดสอบทั้งหมดของกระแสมัลส์สูง

ผลของเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของรูปคลื่นกระแสมัลส์สูงที่ถูกวัดโดยขดลวดโรกอฟสกี ที่ใช้งานร่วมกับอินทิกเรตแบบเฉื่อยงานและอินทิกเรตแบบเฉื่อยงานขดเคเยค่าชั้นต่างๆ ได้ถูกแสดง ใน ตารางที่ 4.2

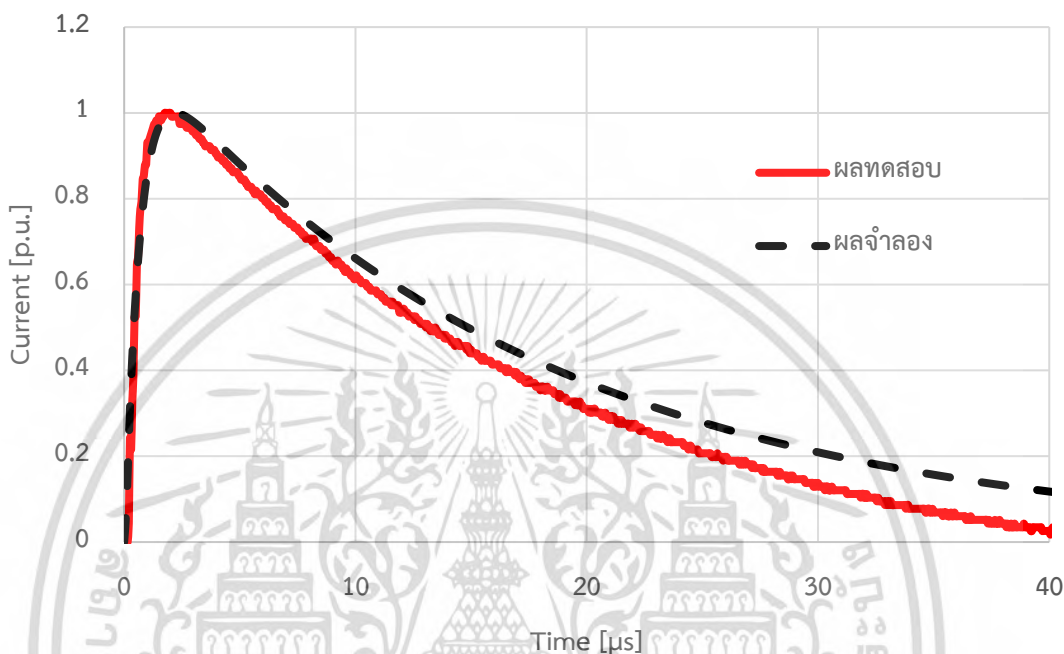
ตารางที่ 4.2 เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสมัลส์สูง

ชนิดวงจรรินทิกเรต	เวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ )	เวลาหลังคลื่น ( $T_2$ )
วงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงาน	3.8 $\mu$ s	9.1 $\mu$ s
วงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงานขดเคเยค่า 3 ชั้น	3.8 $\mu$ s	9.6 $\mu$ s
วงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงานขดเคเยค่า 4 ชั้น	3.8 $\mu$ s	9.6 $\mu$ s
วงจรรินทิกเรตแบบเฉื่อยงานขดเคเยค่า 5 ชั้น	3.8 $\mu$ s	9.6 $\mu$ s

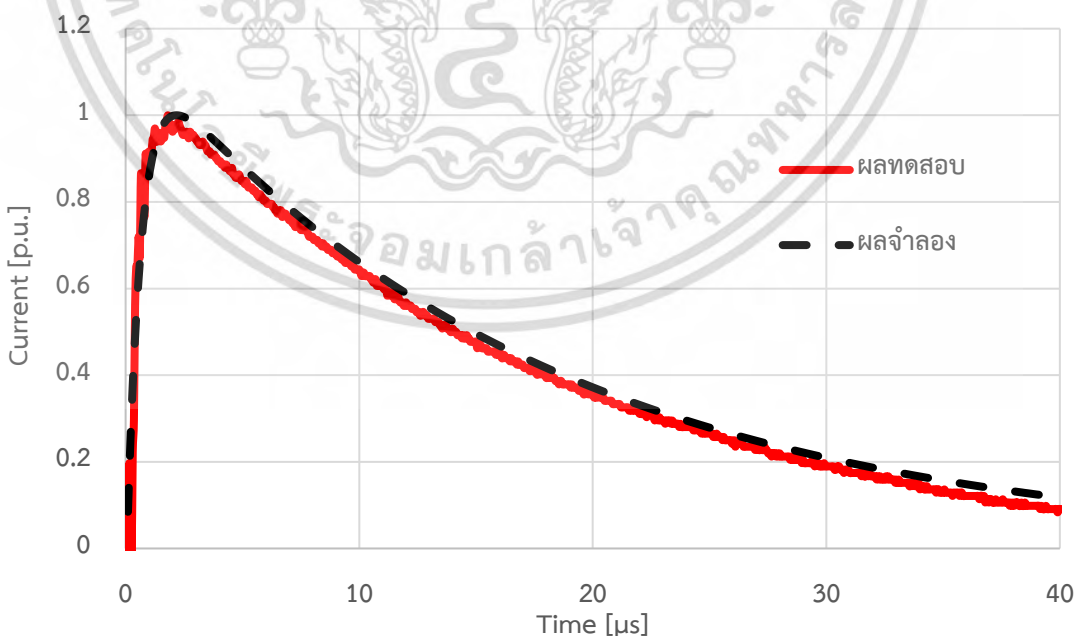
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ผลการเปรียบเทียบของกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจำลองและผลทดสอบของกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีที่ทำงานร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น 4 ชั้น และ 5 ชั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 ถึง 4.19 ตามล าดับ

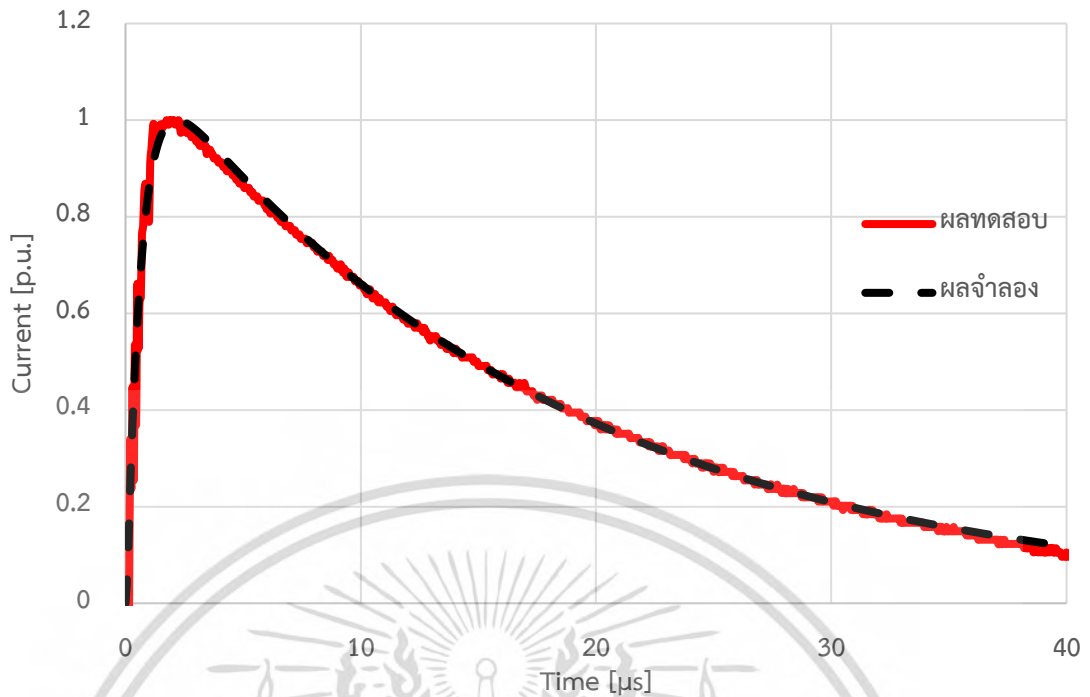


รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบและผล จำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน วัตรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20  $\mu\text{s}$ )

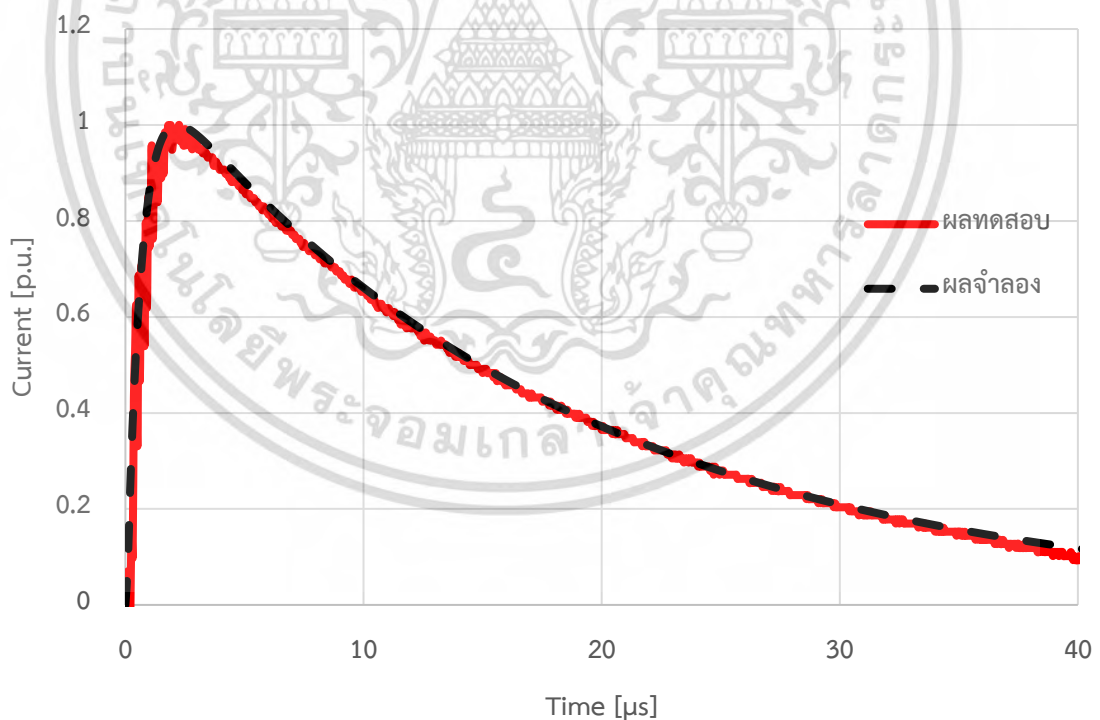


รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบและผล จำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ชดเชยค่า 3 ชั้นวัตรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20  $\mu\text{s}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



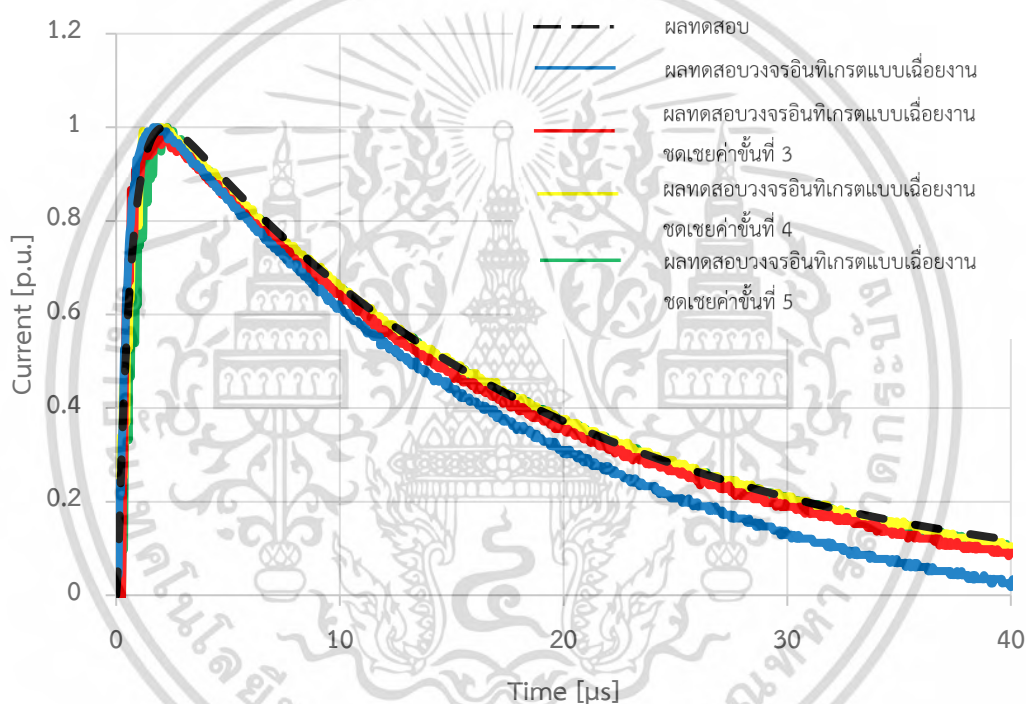
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบและผล จำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน  
ขดเคียวค่า 4 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20  $\mu\text{s}$ )



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบและผล จำลองโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน  
ขดเคียวค่า 5 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20  $\mu\text{s}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบผลระหว่างผลทดสอบและผลจำลองทำให้ได้ผลวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้จากผลการทดสอบด้วยการใช้วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีแสดงให้เห็นว่าช่วงกราฟที่บริเวณทางคลื่นนั้นตกเร็วกว่าผลจล สอง ดังนั้นแล้วจากผลการทดสอบด้วยการใช้วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ขึ้นต่างๆ นั้นทำให้ช่วงบริเวณทางคลื่นนั้นตกช้าลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง จึงสรุปได้ดังนี้ว่า การเพิ่มขึ้นจากวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่านั้นช่วยทำให้ช่วงเวลาทางคลื่นนั้นตกช้าลง ซึ่งในผลการทดสอบว่า การเพิ่มขึ้นจากวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่าที่ขึ้น 3 นั้นทางคลื่นตกลงเร็วกว่าผลจำลอง ส่วนในผลทดสอบจากวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ขึ้น และ 5 ขึ้น มีผลเหมือนที่จำลอง ในรูปที่ 4.20 แสดงผลการเปรียบเทียบกราฟทั้งหมด



รูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบกราฟการทดสอบทั้งหมดกระแสิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น

ผลของเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของรูปคลื่นกระแสิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นที่ถูกวัดโดยขดลวดโรกอฟสกีที่ใช้งานร่วมกับอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าชั้นต่างๆ ได้ถูกแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น

ชนิดวงจรอินทิเกรตที่ใช้กับขดลวดโรกอฟสกี	เวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ )	เวลาหลังคลื่น ( $T_2$ )
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	0.975 $\mu$ s	14.9 $\mu$ s
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น	0.975 $\mu$ s	15.2 $\mu$ s
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น	0.975 $\mu$ s	15.7 $\mu$ s
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น	0.975 $\mu$ s	15.7 $\mu$ s

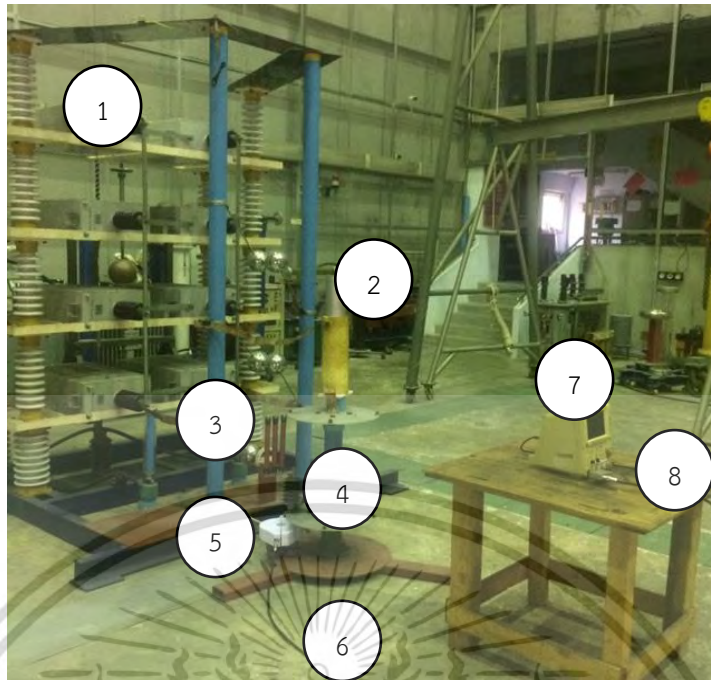
ผลการทดสอบโดยการใช้ขดลวดโรกอฟสกีทำงานร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าชั้นต่างๆ วัตถุประสงค์อิมพัลส์ พบว่า ทุกกราฟที่วัดจากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานนั้นมีความผิดเพี้ยนไปจากผล สองตรงบริเวณหางคลื่น ส่วนกราฟอื่นๆ ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าชั้นต่างๆ นั้นสามารถช่วยให้วัดบริเวณหางคลื่นเป็นไปผลจาสงได้

#### 4.3 การทดสอบวัตถุประสงค์กระแสอิมพัลส์สำหรับหัวข้อทดสอบแรงดันคงเหลือกับดักแรงดันเกินพิกัด 5kA

การทดสอบกับดักแรงดันเกินประเภทโลหะออกไซด์นั้นถูกกำหนดไว้ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 โดยมีการวัตถุประสงค์กระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ซึ่งอยู่ในหัวข้อการทดสอบแรงดันคงเหลือ ดังนั้นแล้ว ในการทดสอบกับดักแรงดันเกินที่พิกัด 5 kA นั้นได้ทำการวัตถุประสงค์กระแสอิมพัลส์สำหรับทดสอบกับดักแรงดันเกินที่พิกัด 5 kA โดยมีรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ 3 แบบดังนี้

1. กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า
2. กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น
3. กระแสอิมพัลส์สูง

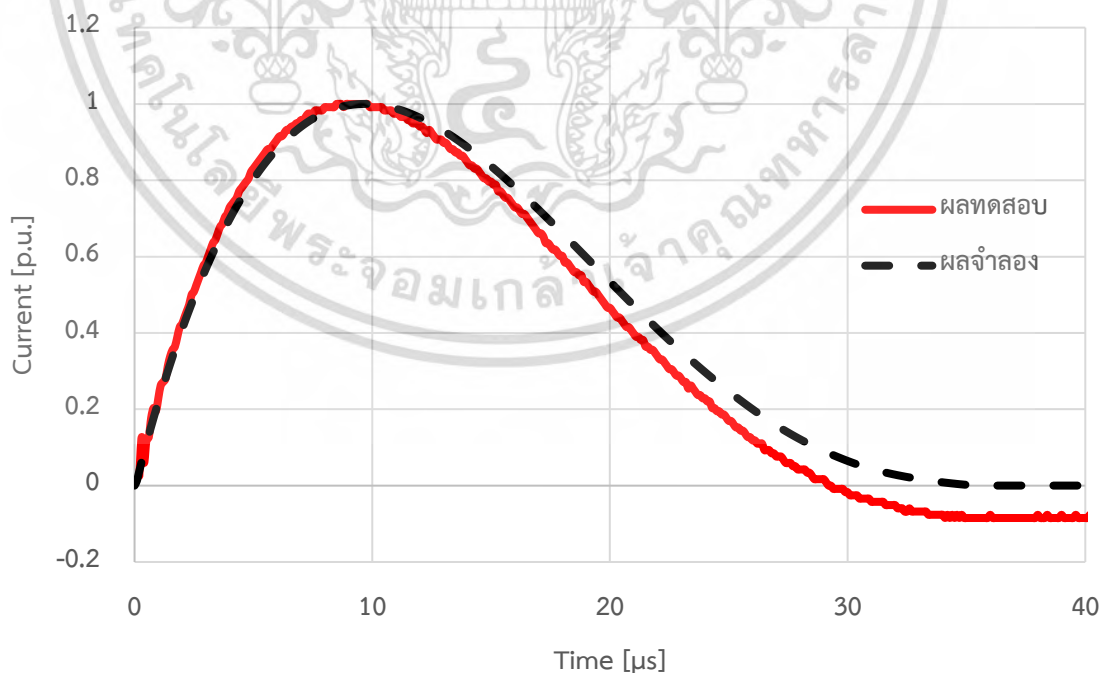
การติดตั้งวงจรการทดสอบได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้ 1. ตัวเก็บประจุ 2. ตัวเหนี่ยวนำ 3. ตัวต้านทาน 4. กับดักแรงดันเกิน 5.ขดลวดโรกอฟสกี 6. สายสัญญาณชนิด RG 11 7. อินทิเกรตเตอร์ และ 8. เครื่องวัดสัญญาณ



รูปที่ 4.21 วงจรการทดสอบกับดักแรงดันเกิน

#### 4.3.1 ผลการทดสอบกระแสพัลส์ฟ้าผ่าของกับดักแรงดันเกิน

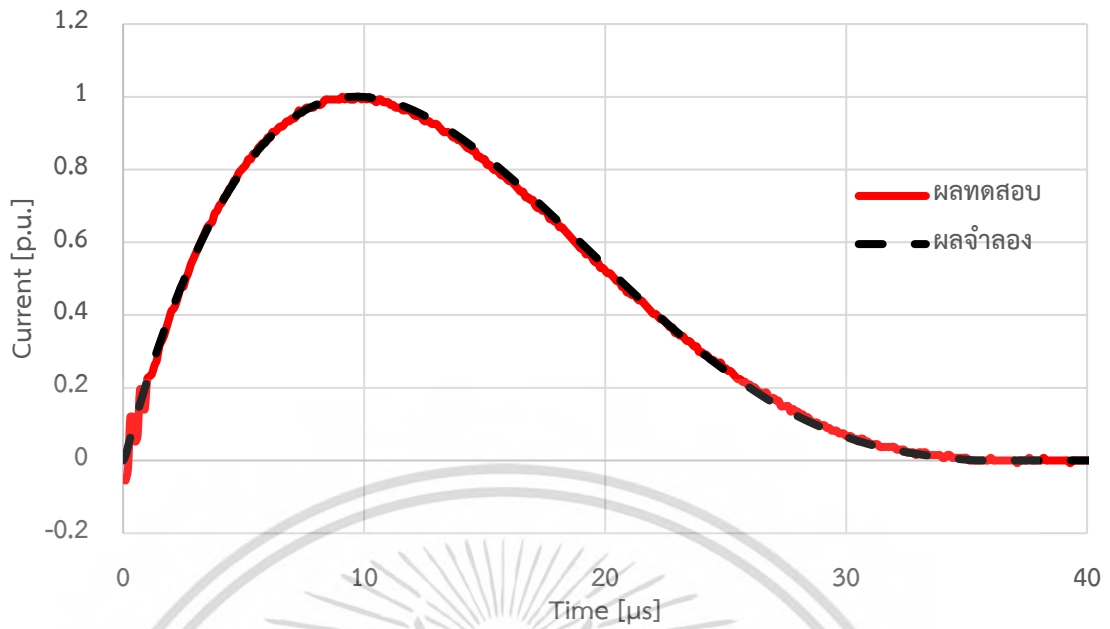
การทดสอบแรงดันคงเหลือในกับดักแรงดันเกินขนาดพิกัด 5 kA นั้นจำเป็นต้องทำการทดสอบด้วยกระแสพัลส์ฟ้าผ่า ดังนั้นแล้วจึงได้ทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบผลทดสอบกับผลจำลอง โดยได้แสดงในรูปที่ 4.22 ถึง 4.25



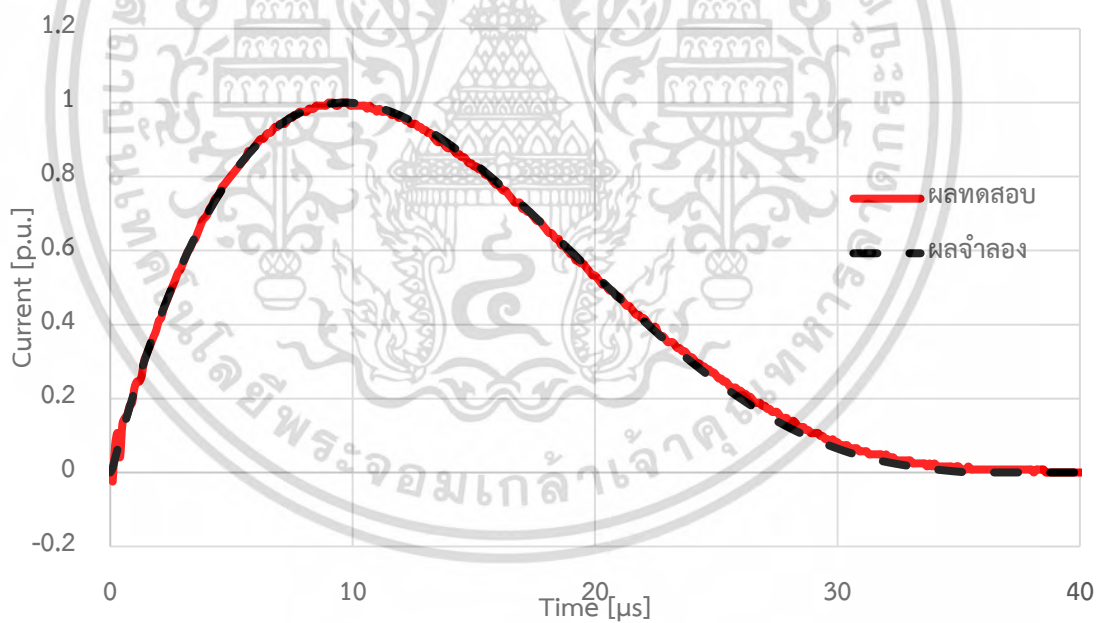
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิกเรต

แบบเฉื่อยงาน วัดรูปคลื่นกระแสพัลส์ฟ้าผ่า (8/20 μs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

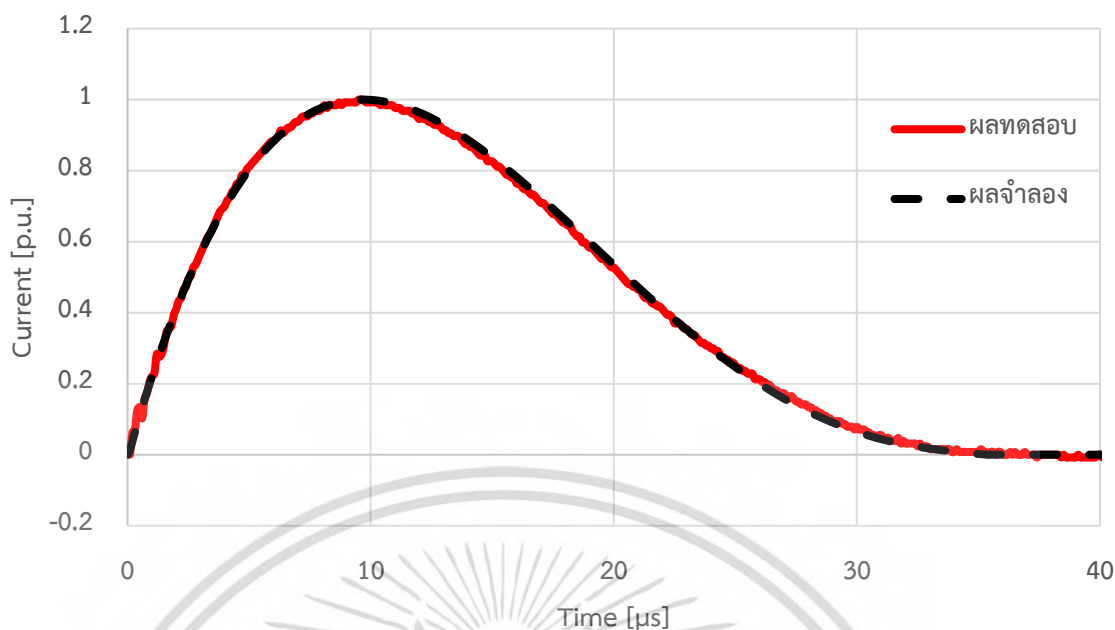


รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ชดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20  $\mu$ s)



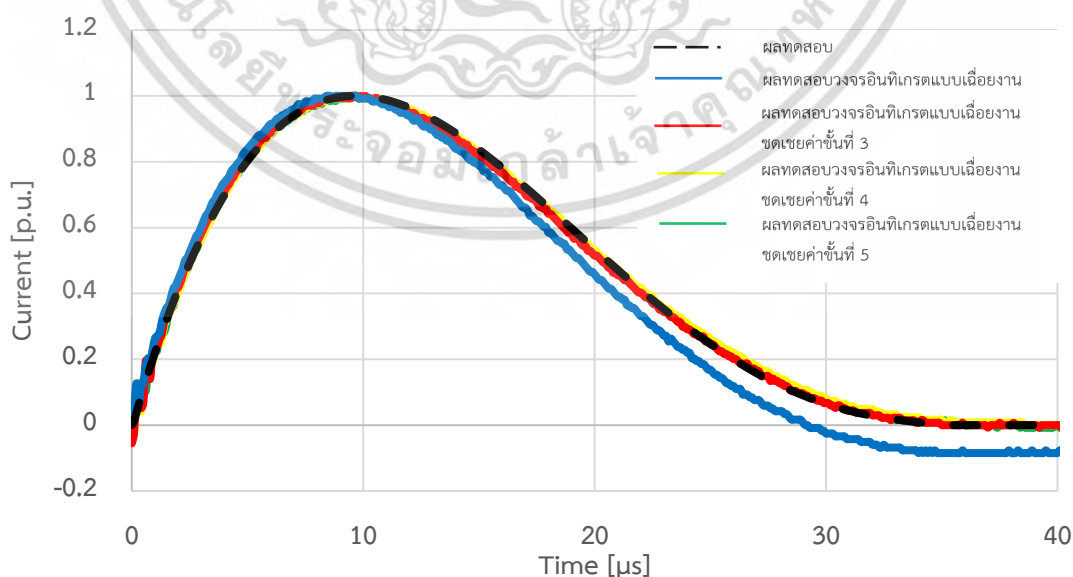
รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ชดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า (8/20  $\mu$ s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ชุดลวดโรกอฟสกีวงจรรองอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ฟ้าผ่า (8/20  $\mu\text{s}$ )

จากการทดสอบแรงดันคงเหลือโดยทดสอบวัดกระแสिमพัลส์ฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นสรุปได้ตั้งนี้กล่าวคือ วงจรรองอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ใช้วัดร่วมกับชุดลวดโรกอฟสกีนั้น ดังที่แสดงแล้วในรูปจะเห็นว่าช่วงหางคลื่นนั้นตกเร็วกว่าปกติเมื่อเปรียบเทียบกับผลจำลอง ดังนั้นทำให้เห็นถึงความผิดพลาด เมื่อใช้วงจรรองอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าชั้นต่างๆ นั้นสามารถช่วยให้หางคลื่นตกช้าลงและมีผลที่ตรงกันกับผลจำลองซึ่งสามารถดูได้จากเส้นแนวกราฟที่ตรงกัน ในรูปที่ 4.26 ได้แสดงการเปรียบเทียบกระแสिमพัลส์ฟ้าผ่าที่ทดสอบในหัวข้อแรงดันคงเหลือระหว่างผลจำลองและผลการทดสอบทั้งหมด



รูปที่ 4.26 ผลการเปรียบเทียบการจำลองและการทดสอบทั้งหมดของกระแสिमพัลส์ฟ้าผ่าในการ

ทดสอบแรงดันคงเหลือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

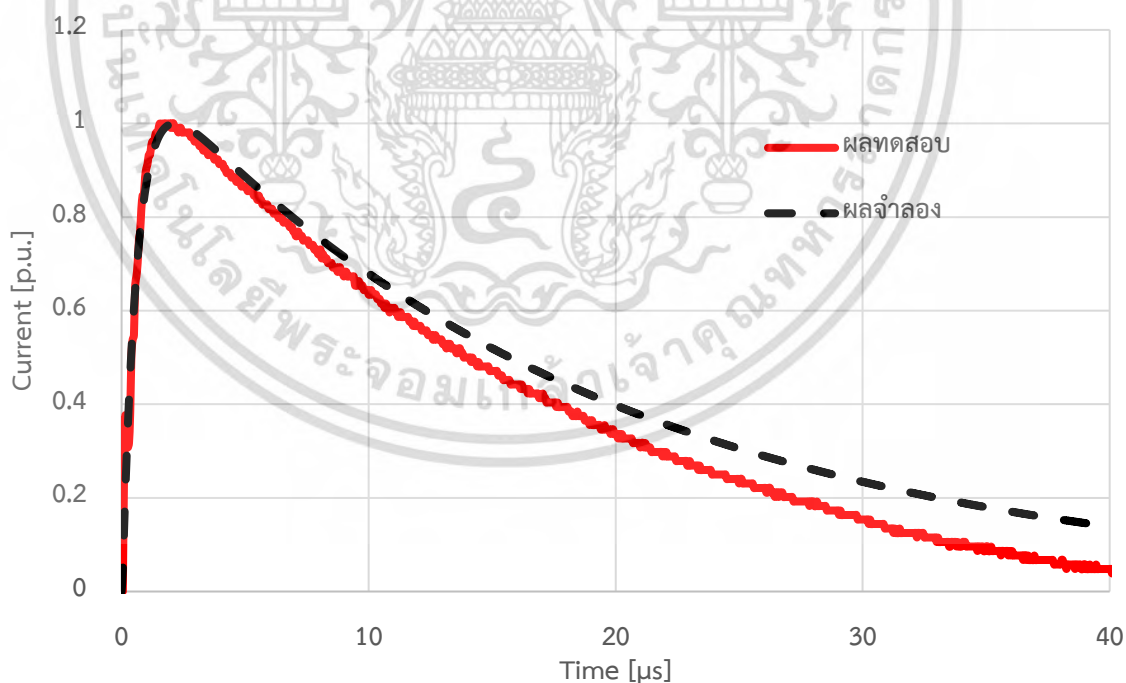
ค่าของเวลาน้ำคลื่นและหลังคลื่นที่วัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์พม่าในการทดสอบกับดักพม่าจากผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เวล่าน้ำคลื่นและหลังคลื่นของกระแสिमพัลส์พม่าในการทดสอบแรงดันคงเหลือ

ชนิดวงจรมีเทรตที่ใช้กับขดลวดโรกอฟสกี	เวลาน้ำคลื่น ( $T_1$ )	เวลาหลังคลื่น ( $T_2$ )
วงจรมีเทรตแบบเนื่องงาน	7.375 $\mu$ s	18.3 $\mu$ s
วงจรมีเทรตแบบเนื่องงานชดเชยค่า 3 ชั้น	7.375 $\mu$ s	20.3 $\mu$ s
วงจรมีเทรตแบบเนื่องงานชดเชยค่า 4 ชั้น	7.375 $\mu$ s	20.4 $\mu$ s
วงจรมีเทรตแบบเนื่องงานชดเชยค่า 5 ชั้น	7.375 $\mu$ s	20.4 $\mu$ s

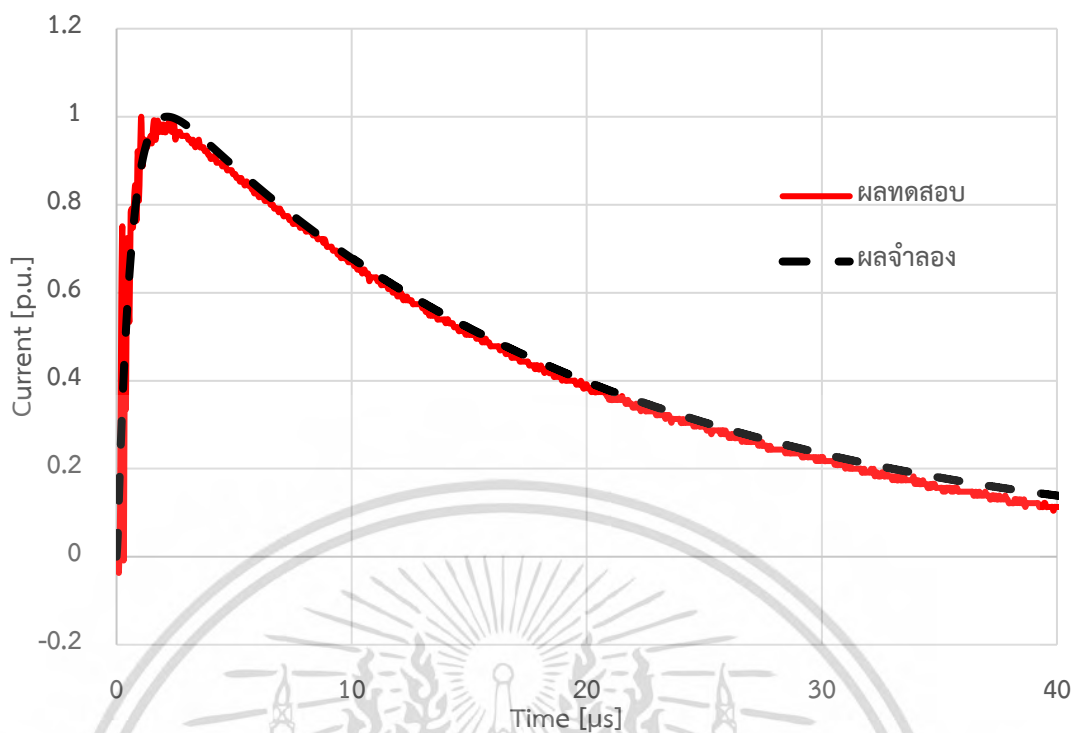
#### 4.3.2 ผลการทดสอบกระแสिमพัลส์หน้าคลื่นชั้นของกับดักแรงดันเกิน

การทดสอบแรงดันคงเหลือในกับดักแรงดันเกินขนาดพิกัด 5 kA นั้นจำเป็นต้องทำการทดสอบด้วยกระแสिमพัลส์พม่า ดังนั้นแล้วจึงได้ทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบผลทดสอบกับผลจ าสอง โดยได้แสดงในรูปที่ 4.27 ถึง 4.30

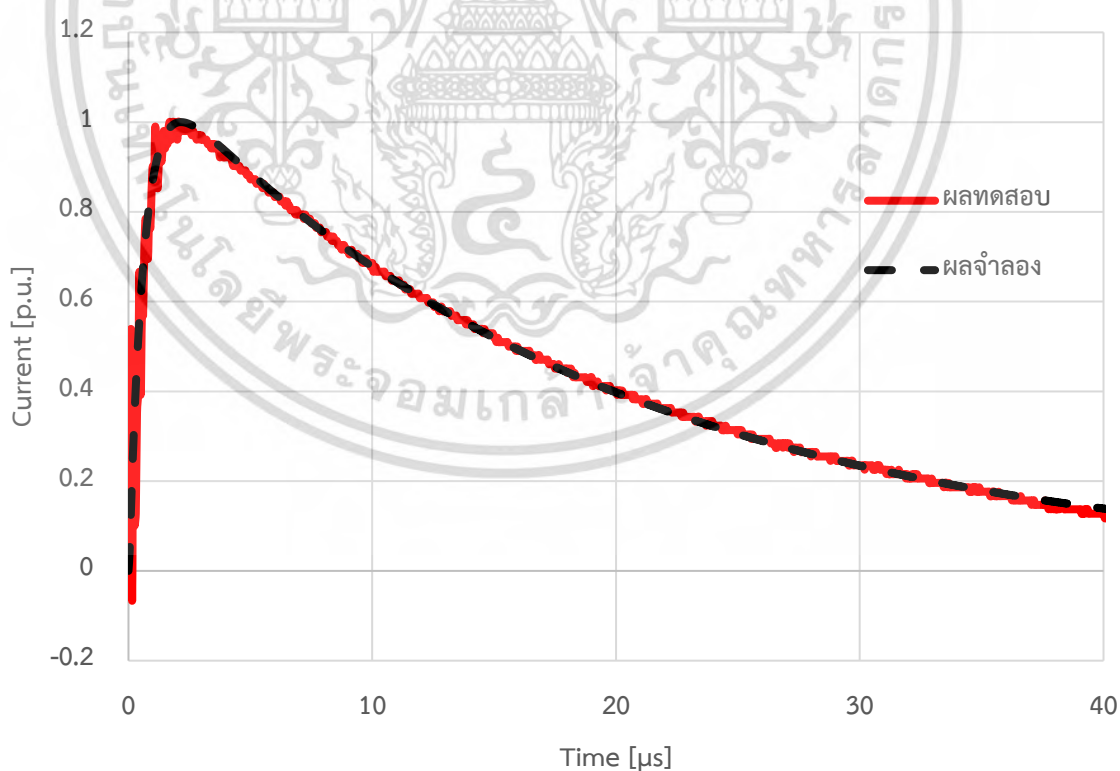


รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบและผลจ าสองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรมีเทรตแบบเนื่องงาน วัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์หน้าคลื่นชั้น ( $1/20 \mu$ s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

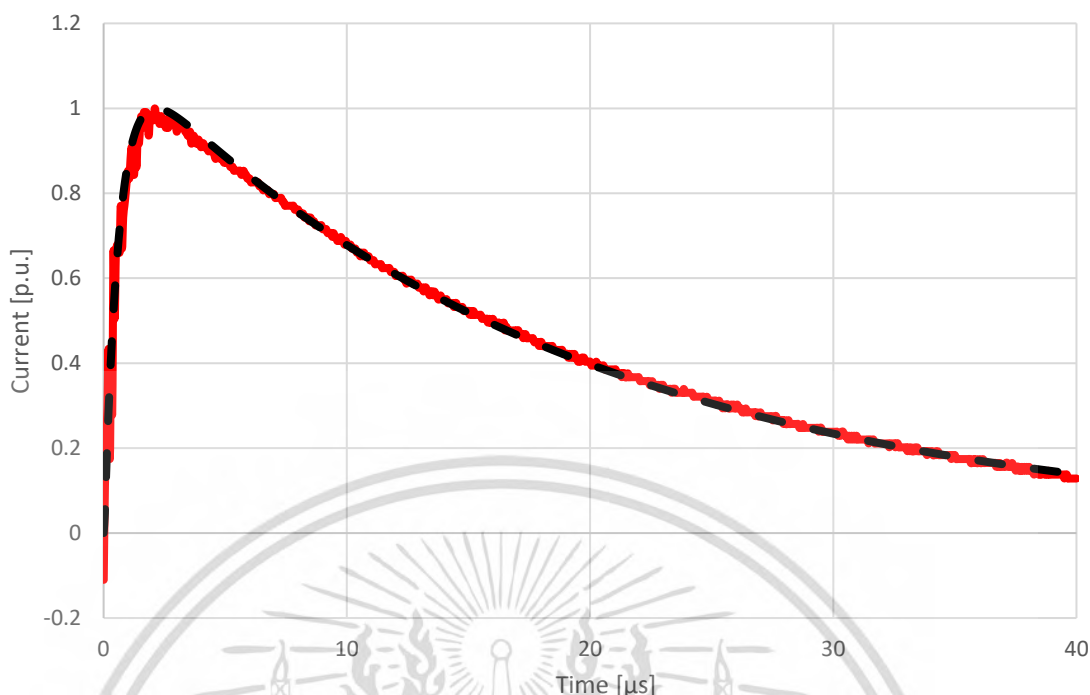


รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20  $\mu\text{s}$ )



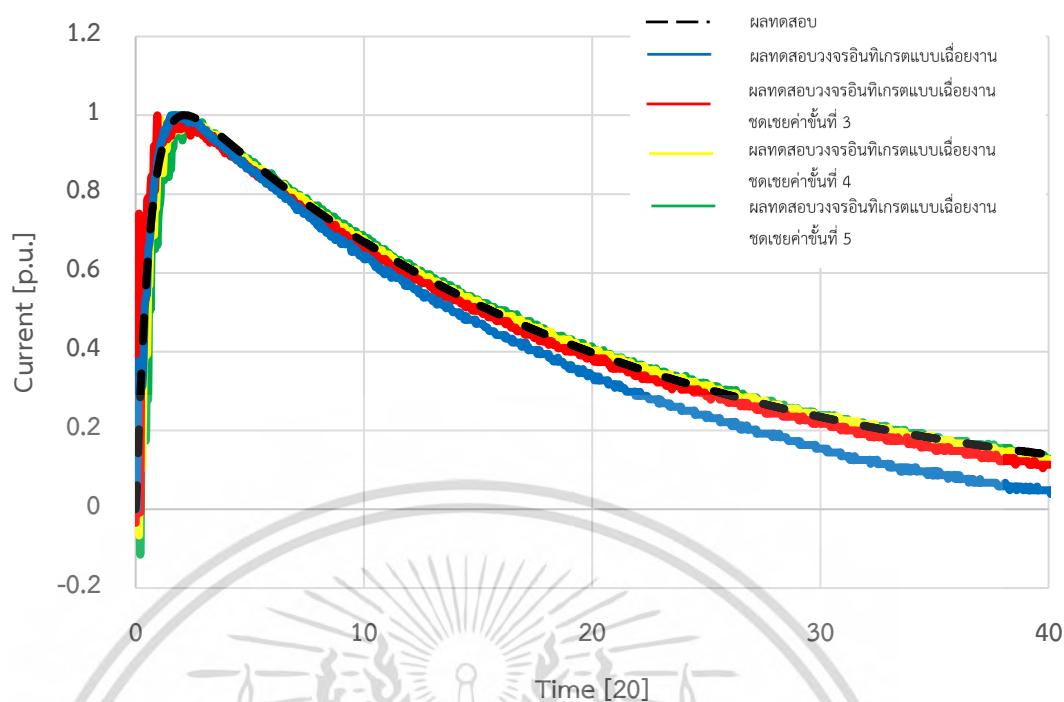
รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีวงจรรวมอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20  $\mu\text{s}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบและผลจำลองของแรงดันคงเหลือโดยใช้ชุดลวดโรกอฟสกีวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้นวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น (1/20  $\mu\text{s}$ )

จากการทดสอบแรงดันคงเหลือโดยทดสอบวัดกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นนั้นสรุปได้ดังนี้ กล่าวคือ วงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงานที่ใช้วัดร่วมกับชุดลวดโรกอฟสกีนั้น ดังที่แสดงแล้วในรูปจะเห็นว่าช่วงหางคลื่นนั้นตกเร็วกว่าปกติเมื่อเปรียบเทียบกับผลจำลองดังนั้นทำให้ไม่สามารถวัดได้จริง เมื่อใช้วงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าชั้นต่างๆ นั้นสามารถช่วยให้หางคลื่นตกช้าลง และมีผลที่ตรงกันกับผลจำลอง แต่ผลการทดสอบที่ใช้วงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้นนั้นจะเห็นได้ว่าหางคลื่นมีผลต่างจากผลจำลองคือช่วงหางคลื่นที่ตกลงเร็วกว่าของผลจำลอง ส่วนวงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น และ 5 ชั้น ให้ผลที่เหมือนกับผลจำลอง ในรูปที่ 4.31 ได้แสดงการเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ทดสอบในหัวข้อแรงดันคงเหลือระหว่างผลจำลองและผลการทดสอบทั้งหมด



รูปที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบการจำลองและการทดสอบทั้งหมดของกระแสล้มฟัลส์หน้าคลื่นชั้นในการทดสอบแรงดันคงเหลือ

ค่าของเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นที่วัดรูปคลื่นกระแสล้มฟัลส์หน้าคลื่นชั้นในการทดสอบกับดักแรงดันเกินได้แสดงในตารางที่ 4.5

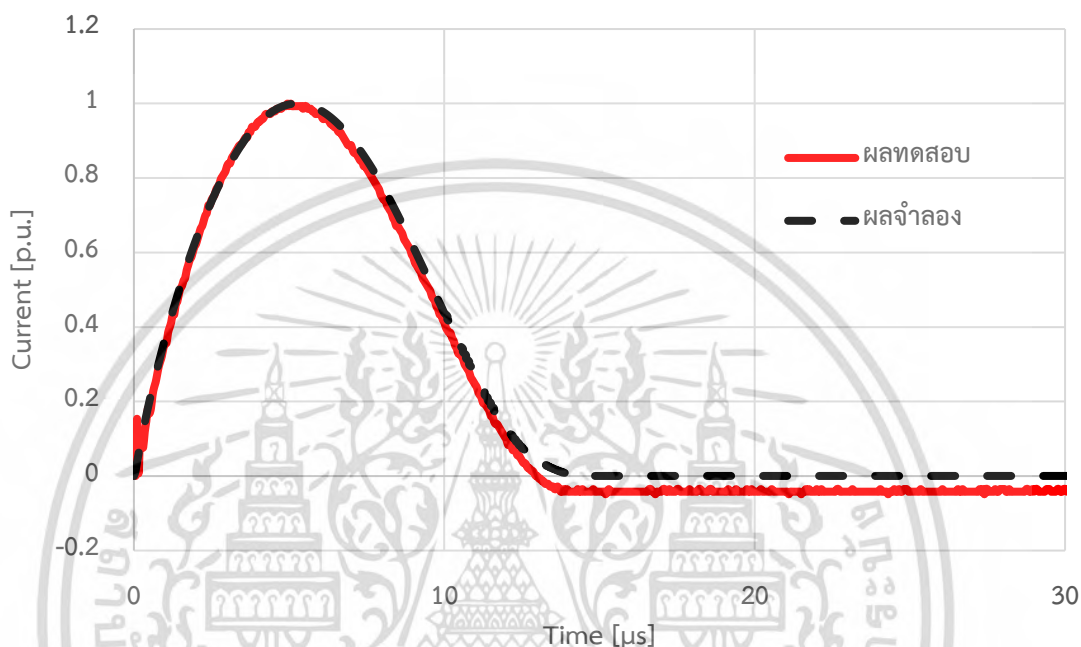
ตารางที่ 4.5 เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสล้มฟัลส์หน้าคลื่นชั้นในการทดสอบแรงดันคงเหลือ

ชนิดวงจรอินทิเกรตที่ใช้กับขดลวดโรกอฟสกี	เวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ )	เวลาหลังคลื่น ( $T_2$ )
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	1.075 $\mu$ s	15.2 $\mu$ s
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น	1.075 $\mu$ s	15.9 $\mu$ s
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น	1.075 $\mu$ s	16.8 $\mu$ s
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น	1.075 $\mu$ s	16.8 $\mu$ s

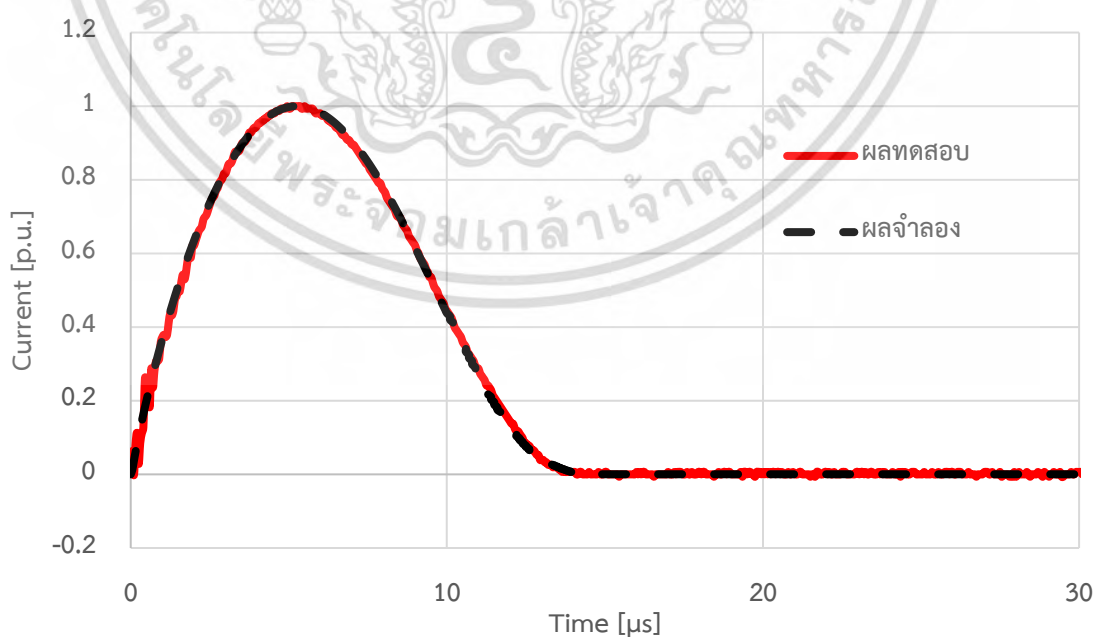
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3 ผลการทดสอบกระแสพัลส์สูงของกัปดักแรงดันเกิน

ในการทดสอบกระแสพัลส์สูงนั้นมิใช่เพื่อเป็นการทดสอบเพื่อดูอุณหภูมิของกัปดักแรงดันเกินโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ดังนั้นแล้วในส่วนของการแสดงผลเปรียบเทียบนั้นเพื่อเป็นการพิสูจน์ความแม่นยำ าชอุปกรณ์วัด ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.32 ถึง 4.35

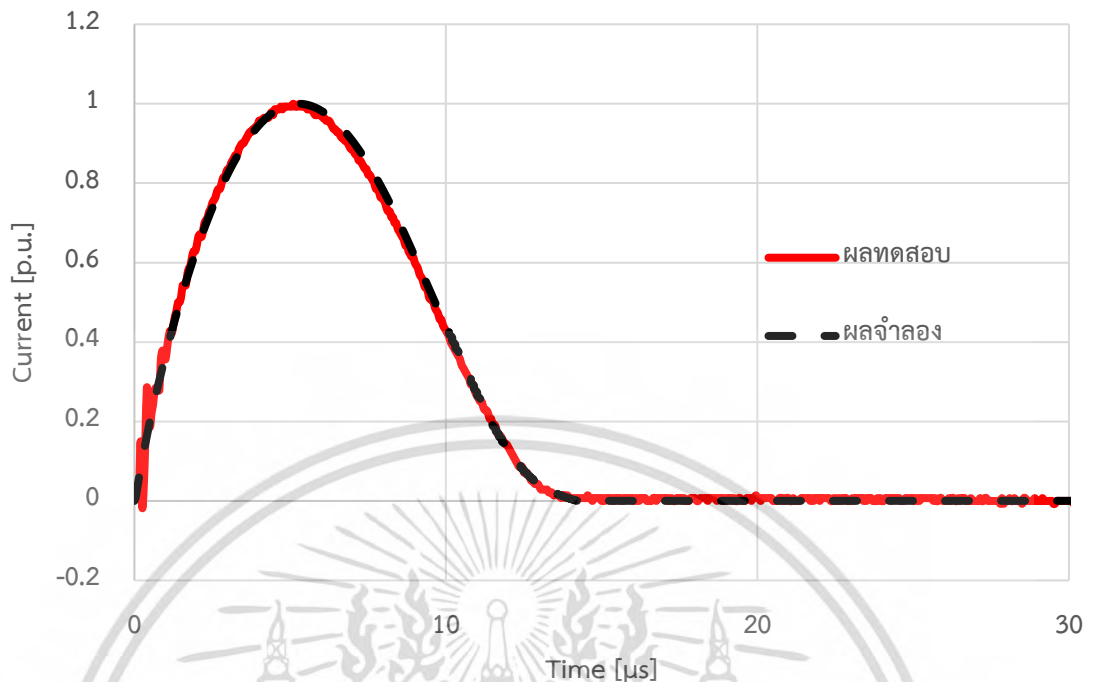


รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบและผลจำลองของกระแสพัลส์สูง (4/10  $\mu\text{s}$ ) ที่ใช้ทดสอบกัปดักแรงดันเกินโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

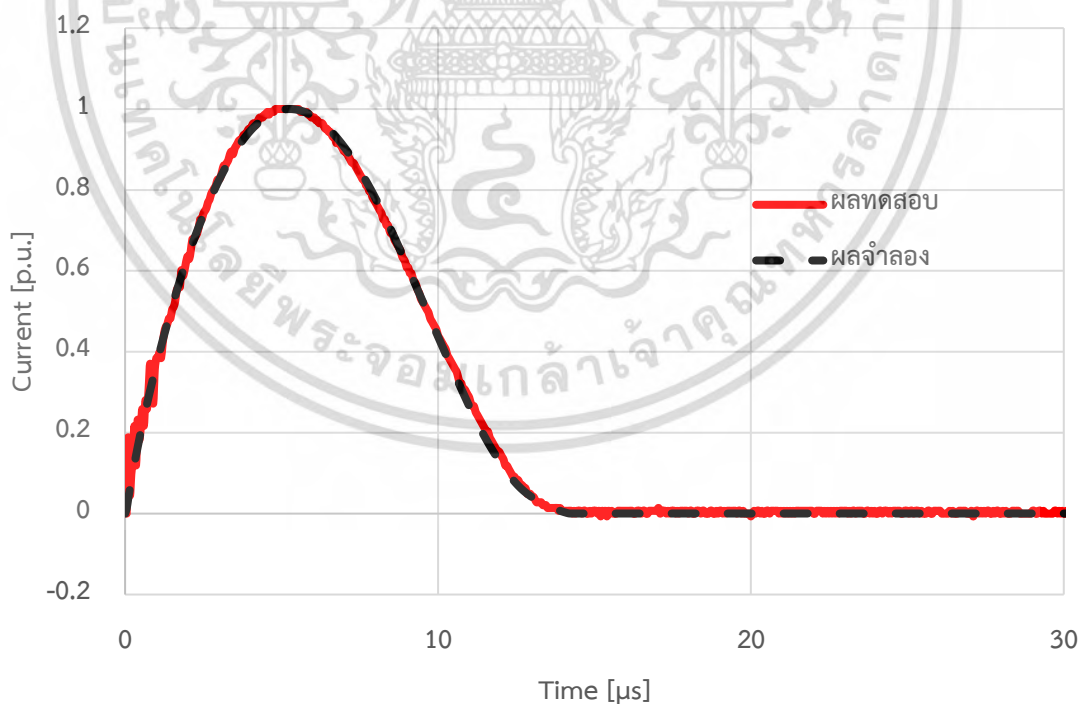


รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบและผลจำลองของกระแสพัลส์สูง (4/10  $\mu\text{s}$ ) ที่ใช้ทดสอบกัปดักแรงดันเกินโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



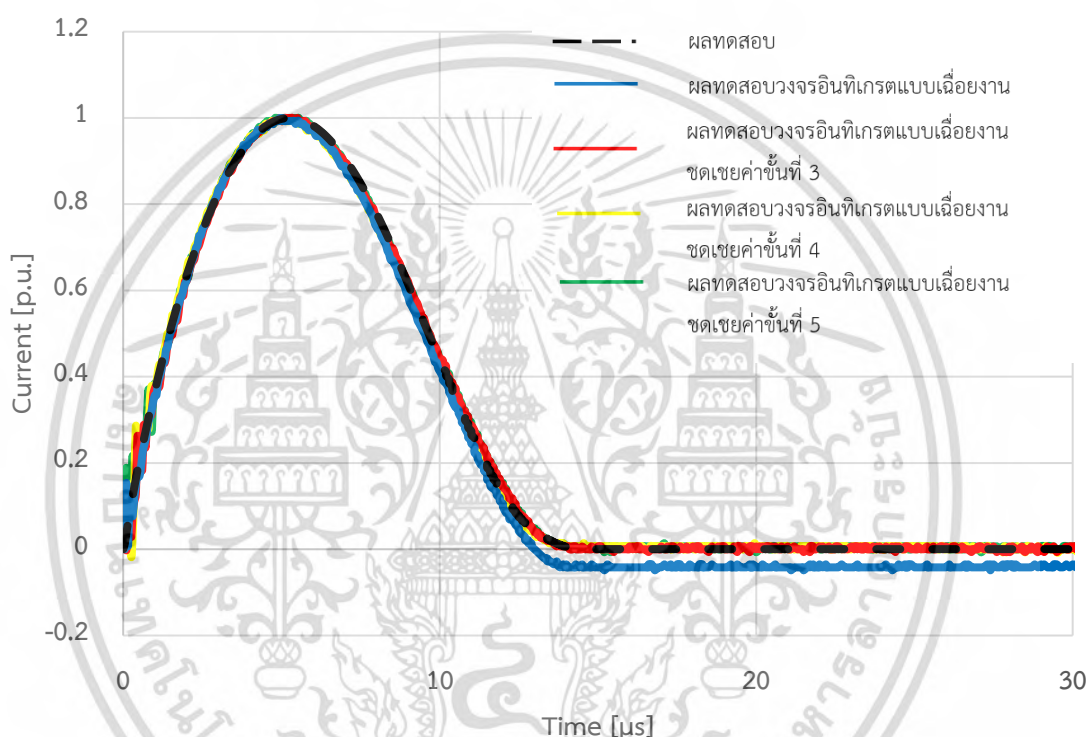
รูปที่ 4.34 ผลการทดสอบและผลจำลองของกระแสิมพัลส์สูง (4/10  $\mu\text{s}$ ) ที่ใช้ทดสอบกับดักแรงดันเกินโดยใช้ชุดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรอนทีเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น



รูปที่ 4.35 ผลการทดสอบและผลจำลองของกระแสิมพัลส์สูง (4/10  $\mu\text{s}$ ) ที่ใช้ทดสอบกับดักแรงดันเกินโดยใช้ชุดลวดโรกอฟสกีวงจรรอนทีเกรตแบบเฉื่อยงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบวัดกระแสอิมพัลส์สูงที่ผ่านกับดักแรงดันเกินแล้วแสดงให้เห็นว่าวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานนั้น ไม่สามารถวัดทางคลื่นได้ถูกต้องจะเห็นว่าทางคลื่นนั้นตกลงเร็ว เมื่อเทียบจากผลจำลอง ซึ่งผลจากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าต่างๆ นั้นสามารถวัดกระแสอิมพัลส์สูงได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นแล้วรูปที่ 4.36 ได้แสดงผลของการจำลองและการทดสอบทั้งหมดของกระแสอิมพัลส์สูงที่ทดสอบผ่านกับดักแรงดันเกินพิกัด 5 kA



รูปที่ 4.36 ผลจำลองและผลการทดสอบทั้งหมดของกระแสอิมพัลส์สูง (4/10  $\mu$ s) ที่ใช้ทดสอบกับดักแรงดันเกิน

ค่าของเวลาหน่วงคลื่นและหลังคลื่นที่วัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สูงในการทดสอบกับดักแรงดันเกินได้แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสอิมพัลส์สูงในการทดสอบกับดักแรงดันเกิน

ชนิดวงจรอินทิเกรตที่ใช้กับขดลวดโรกอฟสกี	เวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ )	เวลาหลังคลื่น ( $T_2$ )
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	4.375 $\mu$ s	8.8 $\mu$ s
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น	4.375 $\mu$ s	9.6 $\mu$ s
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น	4.375 $\mu$ s	9.6 $\mu$ s
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้น	4.375 $\mu$ s	9.6 $\mu$ s

จากผลการทดสอบทำให้เห็นได้ว่าการใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานนั้นไม่สามารถนำมากระแสอิมพัลส์รูปคลื่นต่างๆ ได้เลย ดังนั้นแล้วการปรับปรุงวงจรให้เป็นวงจรอินทิเกรตแบบชดเชยค่านั้น สามารถที่จะนำมาวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ในรูปแบบต่างๆ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และอีกทั้งการเพิ่มขึ้นของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่านั้นสามารถทำให้มีผลตอบสนองต่อกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น จากการเปรียบเทียบระหว่างผลทดสอบและผลจำลองทั้งหมดนั้น จะเห็นได้ว่าที่รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นนั้น วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้น ไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากผลการตอบสนองต่อเวลาของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้นนั้นไม่เพียงพอต่อการวัดกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น ดังนั้นแล้วสรุปได้ว่าการใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้น และ 5 ชั้น นั้นเหมาะสมสำหรับการวัดกระแสอิมพัลส์และสามารถนำมาวัดกระแสอิมพัลส์ในหัวข้อทดสอบแรงดันคงเหลือของกับดักแรงดันเกินที่พิกัด 5 kA ได้เป็นอย่างดีถูกต้องแม่นยำ

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้มีการออกแบบและประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกี วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานขดเซยค่าที่ขึ้นต่างๆ นั้นเพื่อให้นำไปวัดกระแสอิมพัลส์ในรูปแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 62475 ซึ่งประกอบไปด้วยกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นและกระแสอิมพัลส์สูง ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์จากห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยคุณลักษณะของขดลวดโรกอฟสกีเป็นไปตามดังนี้ มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 5.5  $\mu\text{H}$  ถูกประกอบสร้างโดยการใช้แผ่นกระดาษอัดเป็นแกนพันขดลวด และใช้พลาสติกเป็นการกลองเคลือบเพื่อเสริมความคงทนและความแข็งแรงอีกทั้งสามารถทำการหนีบสายไฟได้สะดวก อุปกรณ์วัดที่ได้จัดทำขึ้นมานั้นมีอัตราขยายอยู่ที่ 1 kA/V และมีแถบกว้างความถี่ 750 Hz ถึง 2 MHz

การปรับปรุงและพัฒนาจากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานขดเซยค่าที่ขึ้นต่างๆ ได้มีการออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานขดเซยค่าที่ 3 ชั้น 4 ชั้น และ 5 ชั้น จากผลการเปรียบเทียบจะสังเกตได้ดังนี้ ผลการตอบสนองต่อรูปคลื่นชั้นที่ป้อนเข้าไปในระบบวัดที่ได้ทำการจำลองจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของเวลา ณ ที่แรงดันเท่ากับ 99.5% นั้น น้อยลงเมื่อทำการเพิ่มขึ้นของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานขดเซยค่า กล่าวคือเวลาที่ตอบสนองจากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานขดเซยค่า 4 ชั้น เพิ่มขึ้นจาก 3 ชั้นคิดเป็น 14.79 % และวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานขดเซยค่า 5 ชั้น เพิ่มขึ้นจาก 4 ชั้นคิดเป็น 7.22 %

จากผลการทดสอบเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ดังนี้ ได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ให้เป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานขดเซยค่าต่างๆ ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงและพัฒนาวงจรมานั้นสามารถทำให้ตอบสนองต่อการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์รูปแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้ 1. กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า 2. กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น 3. กระแสอิมพัลส์สูง ได้เป็นอย่างดี ผลจากการทดสอบจากขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานนั้นไม่สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นได้อย่างถูกต้องอย่างแม่นยำ เมื่อสังเกตที่เวลาหลังคลื่นซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟหลังคลื่นจะตกเร็วกว่าผลจำลอง เมื่อพิจารณาผลจากการทดสอบของขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานขดเซยค่าต่างๆ นั้นมีข้อสังเกตได้ดังนี้กล่าวคือทุกรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้ทำการทดสอบนั้นช่วงกราฟเวลาทางคลื่นตกข้างลงเมื่อเทียบกับผลของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน โดยมีกราฟที่ใกล้เคียงกับผลจำลองสามารถดูได้จากเส้นกราฟที่เหมือนกัน อีกทั้งเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกราฟนั้นเป็นไป

ตามมาตรฐาน IEC 62475 ก กำหนด และในส่วนเพิ่มเติมคือการทดสอบกระแสอิมพัลส์ในกับดักแรงดันเกินที่พิกัด 5 kA ซึ่งเป็นตามมาตรฐาน IEC 60099-4 เห็นได้ว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบผลจำลองและผลการทดสอบวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานไม่สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ได้อย่างถูกต้อง แต่วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าสามารถวัดกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบในกับดักแรงดันเกินพิกัด 5 kA เป็นไปตามมาตรฐานก กำหนด

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 4 ชั้นโดยมีการใช้งานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีที่ประกอบสร้างขึ้น นั้นเหมาะสมที่สุดสำหรับการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ เนื่องจากเมื่อทำการวัดกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นนั้นแสดงให้เห็นว่าวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 3 ชั้นนั้น มีส่วนที่หางคลื่นนั้นไม่ทับกับกราฟจากผลการจำลองสันทิ และวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานดังนั้นแล้ววงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า 5 ชั้นนั้นออกแบบและประกอบสร้างที่ง่ายกว่าและสามารถนำมาวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ได้ตามมาตรฐานเช่นกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ถูกจำลองขึ้นตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งมีผลการทดสอบที่สามารถวัดได้จริงตรงตามมาตรฐานและสามารถวัดกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบกับดักแรงดันเกิน 5 kA ได้อย่างแม่นยำ จากการพัฒนาและปรับปรุงของระบบวัดกระแสที่ได้เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่สามารถวัดกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจริงจากธรรมชาติได้ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับนักวิจัยทางด้านปรากฏการณ์ฟ้าผ่าจากธรรมชาติ ซึ่งนำไปสู่การออกแบบและประกอบสร้างระบบป้องกันที่เหมาะสมภายในประเทศมากที่สุด อย่างไรก็ตามตัวอินทิเกรเตอร์แบบชดเชยค่าที่ขึ้นต่างๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีนั้นยังไม่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์วิศวกรรมไฟฟ้าในเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งอาจนำไปสู่การวิจัยพัฒนาในอีกต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นวคุณ ไตรรัตน์ภริรักษ์ และคณะ “ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์” **ปริญญาพันธวิวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต** สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2554
- [2] บัญญัติ สีสลาจรัญกุล “การพัฒนางจรอินทิเกรเตอร์แบบเฉื่อยงานและแบบไวงานเพื่อใช้ร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต** สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2557
- [3] นวคุณ ไตรรัตน์ภริรักษ์ “การสร้างกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับการทดสอบหาแรงดันคงเหลือของกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่าและแบบจำลองทางไฟฟ้า” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต** สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2557.
- [4] Mohammad Hamed Samimi, Arash Mahari, Mohammad Ali Farahnakian, and Hossein Mohseni, Member, IEEE “The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review” **IEEE SENSORS JOURNAL**, VOL. 15, NO. 2, FEBRUARY 2015 Pages 651 – 658.
- [5] IEC standard Publication 62475, “High-current test technique” 2010
- [6] ผศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” **หนังสือวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง** สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 1 2561
- [7] IEC standard Publication 60099-4 “Surge Arresters” 2006

## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
การออกแบบกล่องครอบขวดลาวดโรกอฟสกีด้วย Solid work

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กล่องครอบขวดหลอดโรกอฟสกี

กล่องครอบขวดหลอดโรกอฟสกีด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภายในกล่องครอบขวดพลาสติกด้านซ้าย

ภายในกล่องครอบขวดพลาสติกด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข  
ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1. Atit Laowhawatanaseree, Anantawat Kunakorn, Peerawut Yutthagowith, Monthon Leelajindakraierk “Rogowski coil for impulse current measurement in residual voltage test of lightning arresters” 19<sup>th</sup> 2017 International Conference on Lightning & Static Electricity (ICOLSE2017), Nagoya, Aichi, Japan, Sep. 13-15, 2017

# ICOLSE 2017

International Conference on Lightning & Static Electricity



Organized by

**ICOLSE 2017**  
International Conference on Lightning & Static Electricity  
ICOLSE 2017 organizing committee

**電気設備学会**  
The Institute of Electrical Installation Engineers of Japan

Supported by

 **国土交通省**  
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Rogowski Coil for Lightning Impulse Current Measurement in Residual Voltage Test of Lightning Arresters

A. Laowhawatanaseree, A. Kunakorn and P. Yutthagowith

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang  
1 Soi Chalongsung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand  
Atimhao@gmail.com

**Keywords:** Impulse current measurement, Residual voltage test, Rogowski coil.

## Abstract

This paper presents the design and construction of a Rogowski coil for lightning impulse current measuring system in residual voltage test of lightning arresters according to IEC: 60099-4 standard. The characteristics of the Rogowski coil shall have wide bandwidth, fast transient response, unsaturation, and safety. In particular the Rogowski coil is used to measure the high impulse current value ( $>100\text{A}$ ) in the residual voltage tests of lightning arresters, therefore it should operate with an appropriate integrator. The transfer admittance was set to be  $10\text{kA/V}$ . To validate the developed measuring system, the experimental results are compared with the simulated results by a circuit simulator. The promising results from the simulation and experiments according to IEC 62475 standard, IEC 60099-4 standard, and IEC 60060-1 standard have been observed in all cases. From the simulation and experiments on the developed system, it has confirmed that the developed system has the accuracy and reliability in impulse current measurement and residual voltage test.

## 1 Introduction

In general, low inductive resistor is employed for lightning impulse current measurement. The resistor is connected in series with the impulse current generation circuit. This resistor must have high current capacity because lightning impulse current has high value of current, then the failure of the resistor sometimes makes the generation circuit open, leads the over-voltage occurrence on the measuring instruments, and possible makes damage on the instruments. Due to the Rogowski can be a measurement device which measure impulse current without any damages to the system. The Rogowski coil has some significant features, which are very attractive in recent years. Some of the main advantages are as follows [1]:

- Enduring high current without damage;
- Measuring currents in an extensive range, without saturation;
- Easy to use, due to the flexibility and light weight;

- Low cost;
- Nonintrusive nature (drawing no power from the main circuit);
- Wide bandwidth
- Excellent transient response;
- Safety (isolated from the main circuit, electrically)

Therefore, the Rogowski coil is suitable for measurement of impulse current waveform. Actually, the waveforms of impulse current according to IEC 62475 standard have the steep impulse current ( $1/20\ \mu\text{s}$ ), the lightning impulse current ( $8/20\ \mu\text{s}$ ), the switching impulse current ( $30/80\ \mu\text{s}$ ). For the lightning arresters were tested in residual voltage test. The residual voltage test must have to measure the lightning impulse current, according to IEC 60099-4 standard. In addition, the developed system has a promising performance in measurement of other impulse current waveform, i.e. the steep impulse current and the switching impulse current as well. The performance of designed and constructed Rogowski coil is tested by comparing the experimental and simulation results with the various impulse current waveforms in residual voltage test of lightning arresters.

## 2 Impulse current waveform standard

The standard impulse current waveforms accord to the IEC standards [2]. The lightning impulse current standard is used as a simulation of current waveforms produced by lightning. These waveforms are in the forms of double exponential or damped oscillating functions [3]. For the residual voltage test on lightning arresters is tested by double exponential impulse current, therefore the simulation of impulse current could be used transient RLC circuit to analyze the equivalent circuit of the impulse current generation as shown in Fig 1. The impulse current waveforms standard was simulated.

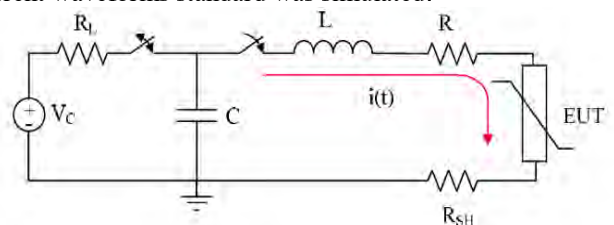


Fig. 1 Impulse current generator circuit [4].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Where,  $V_c$  = DC charging voltage  
 $R_L$  = current limiting resistor  
 $C$  = capacitor  
 $L$  = inductor  
 $R_{SH}$  = shunt resistor for current measurement  
 $i(t)$  = Impulse current  
 $EUT$  = equipment under test

The exponential impulse current waveform as shown in Fig. 2 is started from zero to the peak value in a short time, and thereafter decreases to zero either approximately exponentially or in the manner of a heavily-damped sinusoidal waveform. The waveform parameters of front time ( $T_1$ ) and the time to half-value ( $T_2$ ) generally is defined by eqs. (1) and (2).

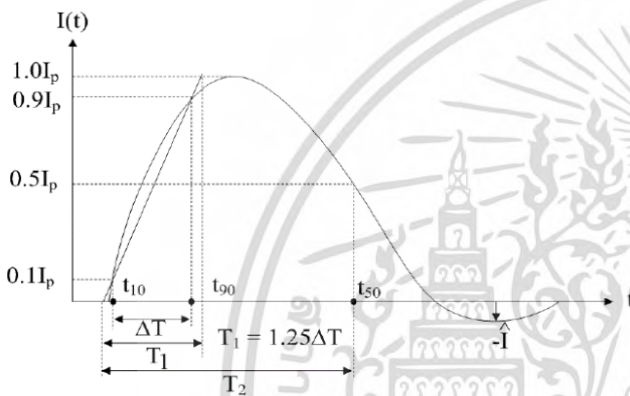


Fig. 2 Exponential impulse current [2].

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

$$T_2 = t_{50} \quad (2)$$

IEC 60060-1 standard have four types impulse current waveforms, 1/20  $\mu$ s, 4/10  $\mu$ s, 8/20  $\mu$ s, and 30/80  $\mu$ s. The acceptable value of time parameters has not to be more than  $\pm 10\%$  of front time and time to half-value and the reversal peak current value have not to be more than 20% of peak current value.

### 3 Design and Construction

In this paper, the impulse current waveforms, i.e. steep, high, and lightning currents were measured by the developed Rogowski coil. The Rogowski coil is suitable for measurement of the lightning impulse current and the other impulse current in residual voltage test of lightning arresters, because the Rogowski coil does not connect in series with the lightning impulse generation system and also it was good transient response. The Rogowski coil was made by coaxial cylindrical plastic tube as an air-core. Normally the Rogowski coil works with the passive integrator.

### 3.1 Design

In the design process and with the help of ORCAD, the Rogowski coil with the integrator was designed to cover all the frequency components of the impulse current waveforms. The equivalent circuit of Rogowski coil with the RC integrator is shown in Fig 4. The integrator has a function in integration of derivative current (induced voltage) and the output voltage has the same waveform as the measured current. The transfer impedance is set to be 10kA/V because the lightning current in the practical test is always higher than 1 kA. Therefore, the selected transfer impedance do not provide the high output voltage and the measuring recorder is avoided from over-voltage.

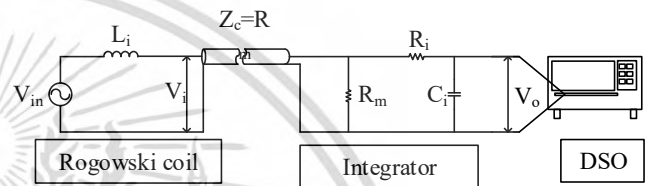


Fig. 4 Equivalent circuit of measuring system

Where,  $R_m$  is the matching resistance,  $L_i$  is the inductance of the Rogowski coil,  $R_i$  is the resistor of the integrator,  $C_i$  is the capacitor of the integrator. The equivalent circuit is used to determine the transfer function of the developed system, it can be derived [5]:

$$H_{coil} = \frac{V_{coil}}{i} = \frac{s.M}{L_1 C_1 s^2 + (R_1 C_1 + \frac{L_1}{Z})s + 1 + \frac{R_1}{Z}} \quad (3)$$

The resistance of the coil is very low and can be negligible. Therefore, the transfer function can be rewritten as follows:

$$H_{coil} = \frac{V_{coil}}{i} = \frac{s.M}{L_1 C_1 s^2 + \frac{L_1}{Z} s + 1} \quad (4)$$

From the transfer function (4), the frequency bandwidth of the measuring system can be calculated as given in Fig 5.

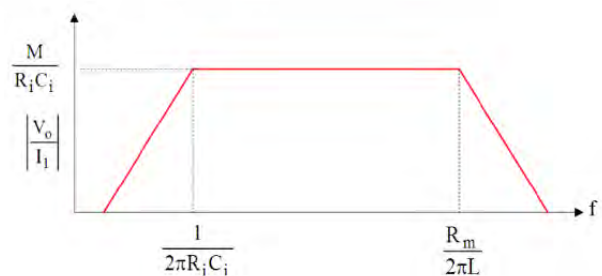


Fig. 5 The transfer impedance of the Rogowski coil with the passive integrator [5].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

All the frequency components of impulse current waveforms (1/20  $\mu$ s, 4/10  $\mu$ s, 8/20  $\mu$ s and 30/80  $\mu$ s) were shown in Fig. 6.

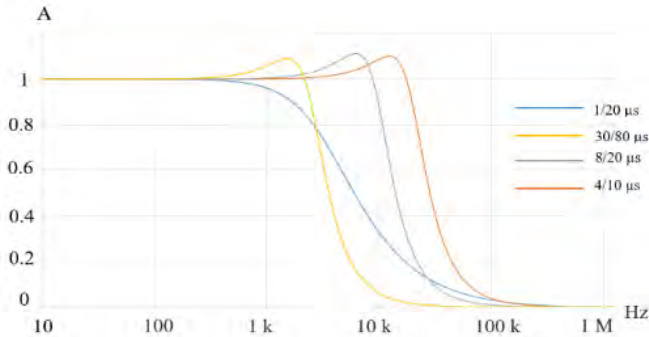


Fig. 6 The frequency components of impulse current wave forms.

From the impulse current frequency components as show Fig. 6, the Rogowski coil’s bandwidth must cover frequency 100 Hz to 1 MHz. The design of the measuring system of which parameters should be L is 5.65  $\mu$ H, M is 0.35  $\mu$ H, R is 36 k $\Omega$ , C is 0.1  $\mu$ F and  $R_m$  is 75  $\Omega$ . So, the frequency bandwidth of the designed Rogowski coil is 45 Hz to 2 MHz.

**3.2 Construction**

The Rogowski coil is used an air-core by coaxial cylindrical plastic tube and wiring with returning wire. The parameters of the Rogowski coil is shown in Table 1.

Characteristic	Value
Number of turns	16 turns
Height	8 cm.
Inner radius	1.5 cm.
Outer radius	5.5 cm.
Wire length	390 cm.

Table 1: Characteristic of the Rogowski coil.

The inductance of the Rogowski coil was measured by the RLC analyzer which is 6.13 $\mu$ H which agrees well with the design value. Figs. 7 and 8 are shown the top and front view of the Rogowski coil that was constructed according to the Table 1.



Fig. 8 The top view of the Rogowski coil.

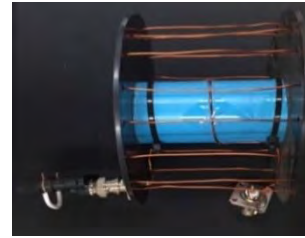


Fig. 9 The front view of the Rogowski coil.

**4 Test Results**

The performance of the Rogowski coil were verified by experiments and simulations to make sure the accuracy and reliability. Three impulse current waveforms, i.e. 1/20 $\mu$ s, 4/10  $\mu$ s, and 8/20  $\mu$ s, were considered.

The experiment results of measured impulse current in comparison with the simulated results were shown in Figs. 10, 11, and 12.

In the experiments on lightning arresters, the impulse current in residual voltage test on a lightning arrester have two waveforms, i.e. 8/20  $\mu$ s and 4/10  $\mu$ s according to IEC 60099-4 standard.

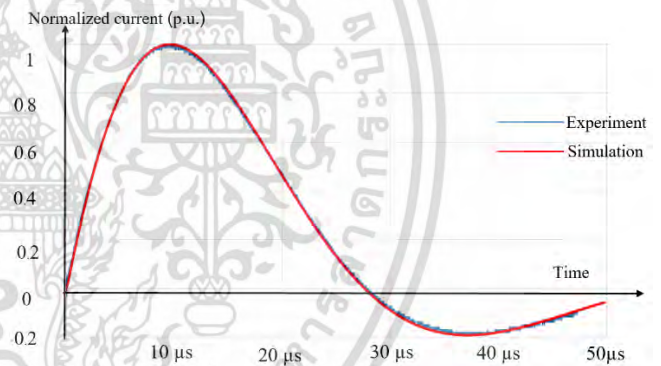


Fig. 10 The normalized 8/20  $\mu$ s impulse current waveform (blue line is result of experiment and red line is result of simulation).

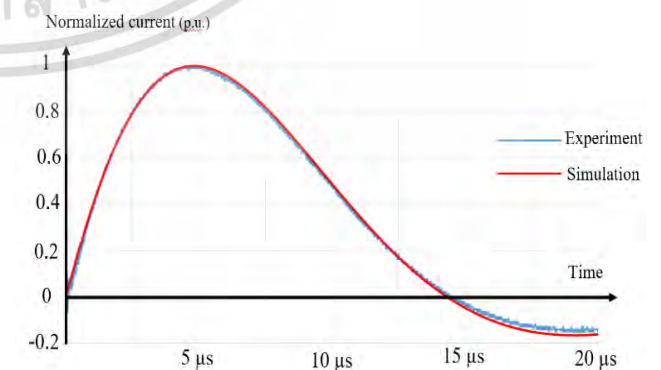


Fig. 11 The normalized 4/10  $\mu$ s impulse current waveform (blue line is result of experiment and red line is result of simulation).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

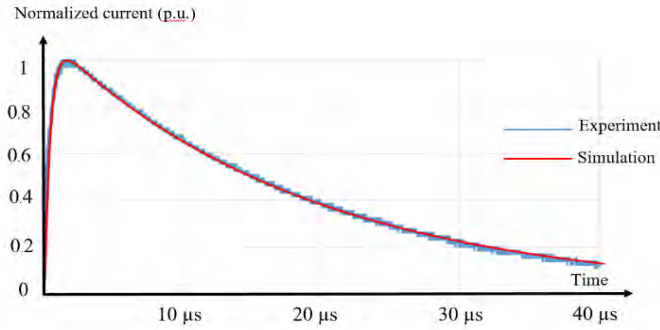


Fig. 12 The normalized 1/20 μs impulse current waveform (blue line is result of experiment and red line is result of simulation).

As the results are shown in Figs 10, 11, and 12. The time parameters of the experiment and simulated waveforms are agreed well and also acceptable according to the IEC standard.

Next, the lightning impulse current and high impulse current waveforms on residual voltage test on lightning arresters are shown in Figs 13, and 14.

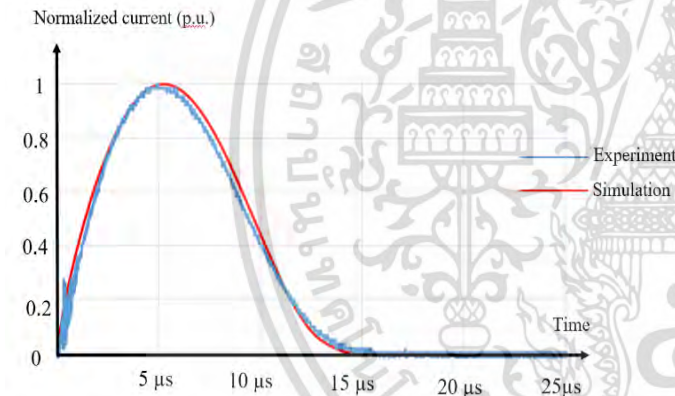


Fig. 13 The normalized 4/10 μs waveform on residual voltage test (blue line is result of experiment and red line is result of simulation).

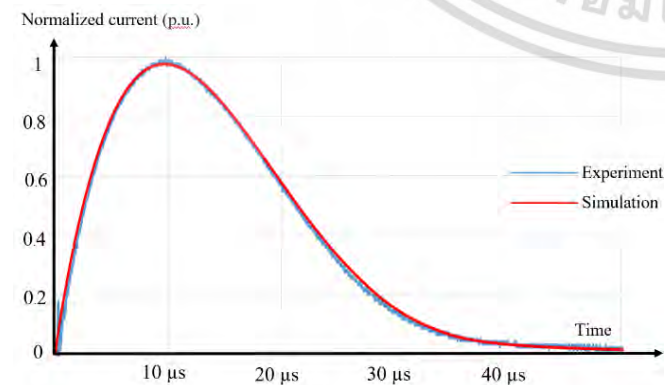


Fig. 14 The normalized of 8/20 μs waveform on residual voltage test (blue line is result of experiment and red line is result of simulation).

Waveform	Front time	Time of half-value
4/10 μs	3.9 μs	9.35 μs
8/20 μs	7.625 μs	21.20 μs

Table 2: The time parameters of the waveforms.

The values of front time and time to half-value are shown in Table 2. The lightning impulse current and high impulse current waveforms in residual voltage test of lightning arresters is passed, by the error of time is not more ±10% according to IEC-60099-4.

### 5 Conclusions

The designed and constructed Rogowski coil with the integrator has good performance as expectation and satisfaction. The Rogowski coil can measure the lightning impulse current and the other impulse current waveforms in residual voltage test as according to IEC 60099-4 standard. The time parameters of the waveforms have errors that are less than 6%. The experimental and simulation waveforms are agreed well. Good agreement has been observed in all cases. From the simulation and experiments on the developed system, it has confirmed that the developed system has the good accuracy and reliability in impulse current measurement in residual voltage test of lightning arresters according to IEC 60099-4 standard.

### References

- [1] I. Metwally, "Self-integrating Rogowski coil for high-impulse current measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 2, pp. 353–360, (2010).
- [2] High-current test techniques - Definitions and requirements for test currents and measuring systems IEC Standard 62475, (2010).
- [3] Surge arresters Part 2 Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. system IEC Standard 60099-4, (2001).
- [4] P. Yutthagowith, N.Pattanadech, A. Kunakorn and M. Leelajindakrairek "Design and Construction of the Rogowski coil with compensated integrator" IPEC 2007, Singapore, Pages: 189 – 192, (2007).
- [5] X. Minjiang, G. Houlei, Z. Baoguang, W. Chengzhang, and T. Chun, "Analysis on transfer characteristics of Rogowski coil transducer to travelling wave," in *Proc. Int. Conf. Adv. Power Syst. Autom. Protection(APAP)*, vol. 2, (2011).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายอติศ เลหาวัฒนเสรี

เกิดเมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2537

209/2 ม.7 ถนน สวนผัก แขวงฉิมพลี เขตตลิ่งชัน จังหวัด  
กรุงเทพมหานคร 101701

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนโพธิสารพิทยากร

จบปริญญาตรีคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อีเมล: A.laowha@gmail.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้