

การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูง
สำหรับการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH-FREQUENCY CURRENT
TRANSDUCER FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMITL-2018-EN-M-020-086

การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูง
สำหรับการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH-FREQUENCY CURRENT
TRANSDUCER FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-020-086

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH-FREQUENCY CURRENT
TRANSDUCER FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-EN-M-020-086



COPYRIGHT 2017

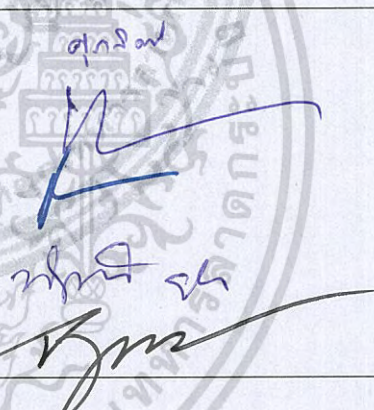
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงสำหรับการตรวจจับการเกิด
ดิซชาร์จบางส่วน
Thesis Title Design and Construction of a High-Frequency Current Transducer for Partial
Discharge Detection
นักศึกษา นายวรากร ชลปฐมพิกุลเลิศ
รหัสประจำตัว 59601164
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-020-086

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

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-304 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เอกสารที่เผยแพร่เชิงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอภัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงสำหรับการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
นักศึกษา	นายวรกร ชลปฐมพิกุลเลิศ
รหัสประจำตัว	59601164
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.พีรวิฑูมิ ยุทธโกวิท

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงสำหรับการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยตัวแปลงกระแสความถี่สูงประกอบสร้างมี 2 ประเภท คือ ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ และตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ โดยตัวแปลงกระแสความถี่สูงทั้งคู่ได้ผ่านประเมินประสิทธิภาพด้วยการทดสอบ 3 ประเภทได้แก่ การทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง การทดสอบความเข้มเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงและการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง จากการทดสอบพบว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ และเมื่อนำตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ไปทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิสชาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูงพบว่า รูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจจับวิธีตามมาตรฐานสากล (IEC 60270: 2015) และรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดจากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จบางส่วนจริง จากการทดสอบทั้งหมดตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ประกอบสร้างนี้ สามารถใช้ในการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ใกล้เคียงกับระบบตามมาตรฐาน โดยมีค่าระดับสัญญาณรบกวนต่ำกว่า 2 pC ทำให้สามารถใช้ในการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการได้

Thesis	Design and Construction of a High-Frequency Current Transducer for Partial Discharge Detection
Student	Mr. Warakorn Chonpathomphikunloed
Student ID	5960164
Degree	Master of Engineering
Program	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 high-frequency current transducer for partial discharge detection. There are two models of the current transducer in the consideration. The first one is the air core current transducer. The other one is the ferrite core current transducer. Both of current transducers are tested into three categories, i.e. frequency response test, signal linearity test and measurement of background noise. The tests are used in evaluating the performance of each current transducer. It is found that the ferrite core transducer has better performances than the air-core transducer. The measured patterns of partial discharges are compared by the developed ferrite core transducer and the conventional instrument system. In addition, the measured output voltages of the current transducer and those of non-inductive resistor are compared. From the experimental results, the patterns of partial discharge detection obtained from the conventional technique and from the developed transducer are similar, according to IEC 60270: 2015 standard. Also, the output voltages of the transducer are similar to the real current pulses of the partial discharges. From all experimental results, the developed partial discharge detection system has ability in measuring as the conventional system. The background noise is lower than 2 pC. The developed system, therefore, can use in detecting partial discharges in high voltage equipment for testing in a high voltage laboratory.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร และ ผศ.ดร.พีรวิทย์ ยุทธโกวิท ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือขณะประสบปัญหาในการทำงานวิจัย พร้อมทั้งให้ความรู้และประการที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ที่ให้คำแนะนำและความรู้อันทรงคุณค่าที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณปณณวีร์ ฉายศิริ และ คุณบุษยพล เพาพาน ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทดสอบ อีกทั้งให้คำปรึกษาที่ดีในการทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนจรรยาครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วรากร ชลปฐมพิกุลเลิศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
III
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.7 ทบทวนวรรณกรรม.....	3
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การเกิดดิสซาร์จบางส่วน.....	5
2.1.1 การเกิดดิสซาร์จแบบโคโรนา.....	5
2.1.2 การเกิดดิสซาร์จตามผิว.....	6
2.1.3 การเกิดดิสซาร์จภายใน.....	6
2.2 การตรวจจับการเกิดดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีการตามมาตรฐานสากล.....	7
2.3 การตรวจจับการเกิดดิสซาร์จบางส่วนด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	8
2.3.1 หลักการทำงานของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	9
2.3.2 วงจรสมมูลของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	11
2.3.3 การคำนวณความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	13
2.3.4 ข้อดีและข้อเสียของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	17
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง.....	19
3.1 การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ.....	19
3.1.1 การออกแบบตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ.....	19
3.1.2 การประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ.....	21
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.1 การออกแบบตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	23
3.2.2 การประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	25
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	34
4.1 การทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	34
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	34
4.1.2 การติดตั้งวงจรการทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	34
4.1.3 ผลการทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง ใช้แกนอากาศ.....	35
4.1.4 ผลการทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	36
4.2 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	37
4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	37
4.2.2 การติดตั้งวงจรการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	38
4.2.3 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง ใช้แกนอากาศ.....	38
4.2.4 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	42
4.3 การทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	45
4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวน ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	45
4.3.2 การติดตั้งวงจรการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวน ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	45
4.3.3 ผลการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของ ตัวแปลงกระแสความถี่สูงใช้แกนอากาศ.....	46
4.3.4 ผลการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของ ตัวแปลงกระแสความถี่สูงใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	47
4.4 การทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	48
4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	48
4.4.2 การติดตั้งวงจรการทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.3 ผลการทดสอบรูปแบบการเกิดดิซซาร์จบางส่วน.....	49
4.5 การทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิซซาร์จบางส่วน เป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	54
4.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแส การดิซซาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	54
4.5.2 การติดตั้งวงจรการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแส การดิซซาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	55
4.5.3 ผลการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิซซาร์จบางส่วน เป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	72

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อเสียของตัวแปลงกระแสความถี่สูงแต่ละประเภท.....	17
4.1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ.....	41
4.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	44
5.1 ผลการทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	61
5.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	61
5.3 ผลการทดสอบระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	62



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดดิสชาร์จแบบโคโรนา.....	5
2.2 การเกิดดิสชาร์จตามผิว.....	6
2.3 การเกิดดิสชาร์จภายใน.....	6
2.4 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่อุปกรณ์ตรวจจับการเกิด ดิสชาร์จบางส่วน (CD) ต่อกับอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_d).....	7
2.5 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่อุปกรณ์ตรวจจับการเกิด ดิสชาร์จบางส่วน (CD) ต่อกับอนุกรมกับอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบ (C_a).....	7
2.6 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบสมดุล.....	7
2.7 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่มีการแยกชั่วสัญญาณ.....	8
2.8 การทำงานของตัวแปลงกระแสความถี่สูงเมื่อมีกระแสไหลผ่าน.....	9
2.9 วงจรสมมูลของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	11
2.10 ผลตอบสนองต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	13
2.11 แบบจำลองตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ.....	14
2.12 การคำนวณความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูง ที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	14
2.13 วงจรพื้นฐานทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า.....	15
2.14 วงจรสมมูลทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่มีช่องว่างอากาศ.....	16
3.1 ขนาดแกนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงใช้แกนอากาศ.....	20
3.2 แกนด้ายพลาสติก.....	21
3.3 ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ.....	22
3.4 ขนาดแกนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	23
3.5 แกนเฟอร์ไรท์ที่ทำการแบ่งครึ่งเพื่อทำให้เกิดช่องว่างอากาศ.....	25
3.6 แบบจำลองการพันตามหลักการพันแบบขดลวดโรกอฟสกี.....	26
3.7 ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่เสร็จสมบูรณ์.....	26
3.8 เคลือบป้องกันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	27
3.9 รายละเอียดขนาดของเคลือบกันชั้นที่ 1 (ส่วนฐาน).....	27
3.10 รายละเอียดขนาดของเคลือบกันชั้นที่ 2 ชั้น 4 และชั้น 8.....	28
3.11 รายละเอียดขนาดของเคลือบกันชั้นที่ 3 และชั้น 7.....	28
3.12 รายละเอียดขนาดของเคลือบกันชั้นที่ 5.....	29
3.13 รายละเอียดขนาดของเคลือบกันชั้นที่ 6.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 รายละเอียดขนาดของเคสป้องกันชั้นที่ 9.....	30
3.15 รายละเอียดขนาดของเคสป้องกันบริเวณแกนกลางตั้งแต่ชั้นที่ 1 - 9.....	30
3.16 รายละเอียดขนาดของชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกับตัวต่อของสายโคแอกเชียล บริเวณชั้นที่ 5 และ 6 (ด้านซ้าย).....	31
3.17 เคสป้องกันของขดลวดโกฟฟสีที่ผ่านการติดแผ่นพอยลด์ลูมิเนียมแล้ว.....	31
3.18 การบรรจุตัวแปลงกระแสความถี่สูงเข้าไปในเคสป้องกัน.....	32
3.19 ตัวแปลงกระแสความถี่สูงพร้อมเคสป้องกัน.....	32
4.1 วงจรการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	35
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันกับความถี่ ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ.....	35
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับความถี่ ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ.....	36
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันกับความถี่ ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	36
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับความถี่ของ ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	37
4.6 วงจรการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	38
4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีดำ) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ที่ระดับประจุ 10 pC.....	38
4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีดำ) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ที่ระดับประจุ 20 pC.....	39
4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีดำ) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ที่ระดับประจุ 50 pC.....	39
4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีดำ) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ที่ระดับประจุ 100 pC.....	40
4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีดำ) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ที่ระดับประจุ 200 pC.....	40
4.12 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ.....	41
4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ที่ระดับประจุ 10 pC.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ที่ระดับประจุ 20 pC.....	42
4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ที่ระดับประจุ 50 pC.....	43
4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ที่ระดับประจุ 100 pC.....	43
4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ที่ระดับประจุ 200 pC.....	44
4.18 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	45
4.19 วงจรการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง.....	46
4.20 ระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ.....	46
4.21 ระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	47
4.22 วงจรการทดสอบเปรียบเทียบรูปแบบการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน (จำลอง).....	48
4.23 วงจรการทดสอบเปรียบเทียบรูปแบบการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน (จริง).....	49
4.24 รูปแบบการเกิดการดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงต่ำที่ตรวจจับด้วยวิธีตามมาตรฐานสากล.....	50
4.25 รูปแบบการเกิดการดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงต่ำที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	50
4.26 รูปแบบการเกิดการดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงสูงที่ตรวจจับด้วยวิธีตามมาตรฐานสากล.....	51
4.27 รูปแบบการเกิดการดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงสูงที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	51
4.28 รูปแบบการเกิดการดิสชาร์จตามผิวที่ตรวจจับด้วยวิธีตามมาตรฐานสากล.....	52
4.29 รูปแบบการเกิดการดิสชาร์จตามผิวที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	53
4.30 รูปแบบการเกิดการดิสชาร์จภายในที่ตรวจจับด้วยวิธีตามมาตรฐานสากล.....	53
4.31 รูปแบบการเกิดการดิสชาร์จภายในที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์.....	54
4.32 วงจรการทดสอบรูปคลื่นกระแสของการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน.....	55
4.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงต่ำที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ (กราฟสีแดง).....	56

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จแบบโคโรน่า ด้านแรงต่ำที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับ รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้ แกนเพอร์ไรท์ (กราฟสีแดง).....	56
4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จแบบโคโรน่า ด้านแรงสูงที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับ รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้ แกนเพอร์ไรท์ (กราฟสีแดง).....	57
4.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จแบบโคโรน่า ด้านแรงสูงที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับ รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้ แกนเพอร์ไรท์ (กราฟสีแดง).....	57
4.37 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จตามผิวที่ เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดัน เอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเพอร์ไรท์ (กราฟสีแดง).....	58
4.38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จตามผิวที่ เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดัน เอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเพอร์ไรท์ (กราฟสีแดง).....	59
4.39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จภายในที่ เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดัน เอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเพอร์ไรท์ (กราฟสีแดง).....	60
4.40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จภายในที่ เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดัน เอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเพอร์ไรท์ (กราฟสีแดง).....	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความผิดปกติของระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้นเกิดจากหลายสาเหตุด้วยกัน ซึ่งหนึ่งในสาเหตุหลักคือ การเบรกดาวน์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเกิดความเสียหายนั่นเอง ความเสียหายดังกล่าวอาจจะมีสาเหตุมาจากแรงดันเกินที่เข้ามาในระบบ การปนเปื้อนภายในเนื้องนวน ซึ่งจะก่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าขึ้นบริเวณจุดปนเปื้อนนั่นหรือสาเหตุมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลาช้านาน แต่อย่างไรก็ตามความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงดังกล่าวเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวน หากสามารถทำการวินิจฉัยอายุฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ จะช่วยลดความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งยังช่วยลดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าได้อีกด้วย

การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) เป็นการทดสอบที่สามารถวินิจฉัยอายุฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอย่างหนึ่ง โดยการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เป็นที่นิยมและได้รับการยอมรับ คือ การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากลหรือที่เรียกว่ามาตรฐาน IEC 60270 [1] ซึ่งเป็นการทดสอบที่มีความน่าเชื่อถือ และสามารถตรวจจับค่าประจุในการดิสชาร์จได้แม่นยำมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะมีความยุ่งยากในการติดตั้งวงจรทดสอบและการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ทดสอบเป็นสิ่งที่ทำได้ยากลำบากเช่นกัน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ตัวแปลงกระแสความถี่สูง ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์ชนิดนี้ได้รับความนิยมในการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ทั้งในส่วนของ การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และในการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ณ สถานที่ติดตั้งจริง เนื่องจากการติดตั้งใช้พื้นที่น้อยและมีความง่ายในการติดตั้ง อีกทั้งอุปกรณ์นี้จะไม่เข้าไปรบกวนระบบวัดของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงยังคงมีประสิทธิภาพดีต่อการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงสำหรับการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวิธีการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อออกแบบและประกอบสร้างอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
2. เพื่อศึกษาหลักการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงและหลักการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล
3. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของตัวแปลงกระแสความถี่สูงแต่ละประเภท (ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ และตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์)
4. เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนระหว่างวิธีการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงกับวิธีการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากลว่ามีความแตกต่างหรือเหมือนกันมากน้อยเพียงใด
5. เพื่อตรวจสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิสชาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูงว่ามีความแตกต่างหรือเหมือนกันมากน้อยเพียงใด

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ อีกทั้งการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล และสามารถนำตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ประกอบสร้างนี้ ไปตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้จริง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ตัวแปลงกระแสความถี่สูงจะถูกนำมาใช้ในการวัดกระแสพัลส์ความถี่สูงหรือกระแสการดิสชาร์จบางส่วนนั่นเอง ซึ่งหลักการทำงานของตัวแปลงกระแสความถี่สูงจะมีหลักการพื้นฐานจากกฎพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นคือ กฎของแอมแปร์และกฎของฟาราเดย์

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงสำหรับการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยจะทำการเปรียบเทียบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนระหว่างวิธีการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงกับวิธีการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล และตรวจสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิสชาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาหลักการทำงาน และทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้องกับตัวแปลงกระแสความถี่สูง
2. ศึกษาการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูง และการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล
3. ศึกษาความแตกต่างกันของรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนทั้ง 3 ประเภท
4. ออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงทั้งหมด 2 ประเภทนั่นคือตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศและตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์
5. ทำการประเมินประสิทธิภาพของตัวแปลงกระแสความถี่สูงทั้ง 2 ประเภท โดยจะประเมินประสิทธิภาพด้วยการทดสอบทั้งหมด 3 การทดสอบดังนี้ การทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง และการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง จากนั้นเลือกตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า สำหรับการทดสอบรูปแบบการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน และการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสดิสชาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ฉบับสมบูรณ์

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2005 บทความวิชาการเรื่อง “Implementation of a Rogowski Coil for the Measurement of Partial Discharge” [2] เขียนโดย Marta Argüeso¹ Guillermo Robles² และ Javier Sanz³ ได้เสนอการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จภายในโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี และได้เปรียบเทียบกระแสอินพุตของการดิสชาร์จบางส่วนกับแรงดันเอาต์พุตที่ปลายของขดลวดโรกอฟสกี

ในปี 2011 บทความวิชาการเรื่อง “Influence of High Frequency Current Transformers Bandwidth on Charge Evaluation in Partial Discharge” [3] เขียนโดย A. Rodrigo¹ P. Llovera² V. Fuster³ และ A. Quijano⁴ แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองต่อความถี่ของหม้อแปลงกระแสความถี่สูงนั้นเป็นสิ่งสำคัญในการวัดค่าประจุของการดิสชาร์จบางส่วน และใช้การปรับย่านความถี่ในการทำงานในการประมาณค่าประจุ

ในปี 2015 วรรณกรรมวิชาการเรื่อง “The Rogowski Coil Principles and Application : A Review” [4] เขียนโดย Mohammad Hamed Samimi¹ Arash Mahari² Mohammad Ali Farahnakian³ และ Hossein Mohseni⁴ กล่าวถึง พื้นฐานของขดลวดโรกอฟสกี โมเดลที่ใช้ในการอธิบายวงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกีทั้ง 2 โมเดลคือ Lumped model และ Distributed model นอกจากนี้ยังอธิบายวิธีในการประมาณค่าตัวแปรต่าง ๆ ของขดลวดโรกอฟสกีตาม Lumped model อีกด้วย

1.8 ประโยชน์ที่ได้คาดว่าจะได้รับ

ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จะมีอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนไว้ใช้งานเพิ่มเข้ามา ซึ่งอุปกรณ์นี้เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนในการประกอบสร้างพบว่า อุปกรณ์มีต้นทุนในการประกอบสร้างที่ถูกกว่าอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล อีกทั้งอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ประกอบสร้างขึ้นมานี้จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องมือวัด เมื่อเกิดการเบรกดาวนที่อุปกรณ์ทดสอบ และอุปกรณ์นี้อาจจะเป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยทางไฟฟ้าแรงสูงต่อไปในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเปรียบเสมือนความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งในระยะเริ่มเกิดของการดิสชาร์จบางส่วนอาจจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพียงเล็กน้อย แต่ในอนาคตการดิสชาร์จบางส่วนนี้อาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ หรือเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั่นเอง ดังนั้นการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก โดยในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และวิธีการสำหรับตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

2.1 การเกิดดิสชาร์จบางส่วน

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge ; PD) คือ การเสื่อมสภาพบางส่วนของฉนวนเนื่องจากการคายประจุภายในเนื้อฉนวน ซึ่งการคายประจุภายในฉนวนนี้จะเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนโดยรอบ อาทิเช่น โพรงอากาศ หรือสิ่งปนเปื้อนภายในเนื้อฉนวน โดยการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนี้อาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้ [5] - [6] โดยทั่วไปแล้วการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การเกิดดิสชาร์จแบบโคโรน่า การเกิดดิสชาร์จตามผิว และการเกิดดิสชาร์จภายใน

2.1.1 การเกิดดิสชาร์จแบบโคโรน่า

การเกิดดิสชาร์จแบบโคโรน่า จะเกิดขึ้นบริเวณตัวนำไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นปลายแหลมหรือมีขอบคมซึ่งบริเวณดังกล่าวจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงมาก จึงทำให้ฉนวนบริเวณโดยรอบของขอบคมหรือปลายแหลมเกิดการเสื่อมสภาพบางส่วน ดังนั้นสามารถจำลองการเกิดดิสชาร์จแบบโคโรน่าด้วยอิเล็กโทรดปลายแหลม ดังรูปที่ 2.1

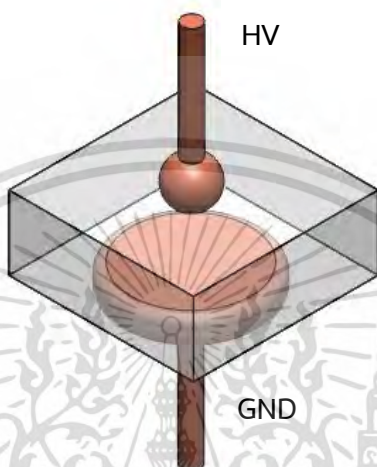


รูปที่ 2.1 การเกิดดิสชาร์จแบบโคโรน่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้จัดทำนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การเกิดดิสชาร์จตามผิว

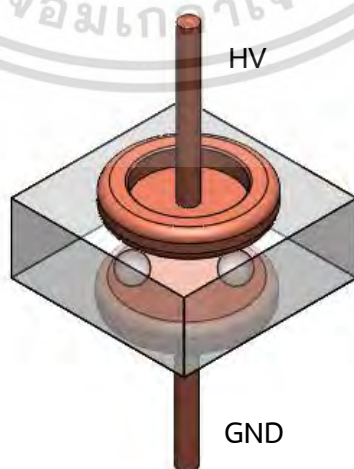
การเกิดดิสชาร์จตามผิวจะเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างฉนวน 2 ประเภท ได้แก่ ฉนวนแข็งกับก๊าซ หรือ ฉนวนแข็งกับฉนวนเหลว ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นกับฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity ; ϵ_r) ต่ำกว่า หรือความเครียดสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่ฉนวนเหลวหรือก๊าซซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ฉนวนดังกล่าวเสื่อมสภาพนั่นเอง ดังนั้นสามารถจำลองการเกิดดิสชาร์จตามผิวดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดดิสชาร์จตามผิว

2.1.3 การเกิดดิสชาร์จภายใน

การเกิดดิสชาร์จภายในจะเกิดขึ้นภายในฉนวนแข็งและฉนวนเหลวที่มีโพรงก๊าซหรือสิ่งแปลกปลอมอยู่ภายใน โดยที่โพรงก๊าซหรือสิ่งแปลกปลอมจะมีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าฉนวนโดยรอบ ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณโพรงก๊าซหรือสิ่งแปลกปลอมสูงกว่าฉนวนโดยรอบ ซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนขึ้น ดังนั้นสามารถจำลองการเกิดดิสชาร์จภายใน ดังรูปที่ 2.3

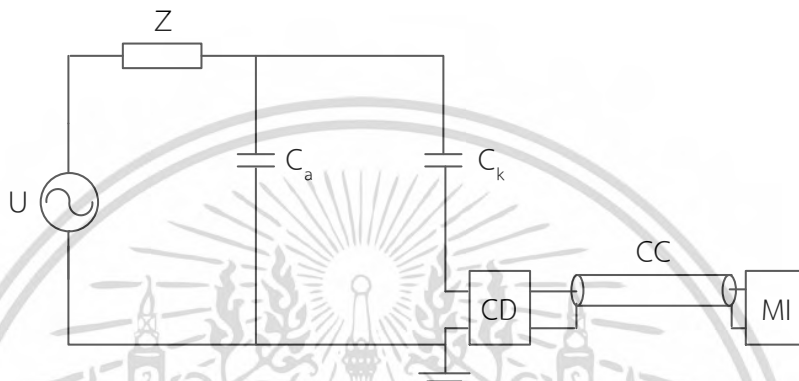


รูปที่ 2.3 การเกิดดิสชาร์จภายใน

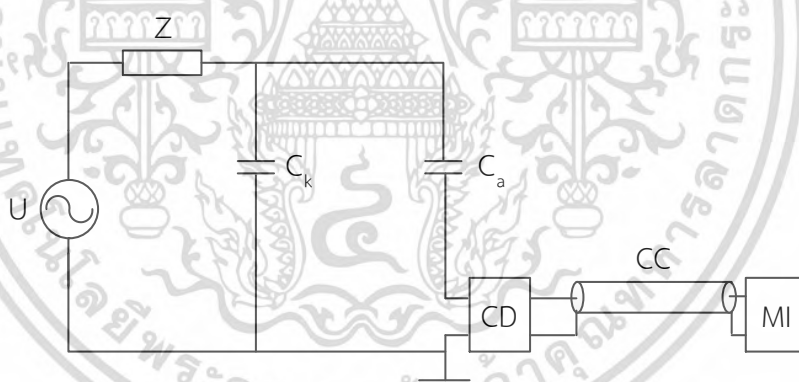
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้พูดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการตามมาตรฐานสากล [1]

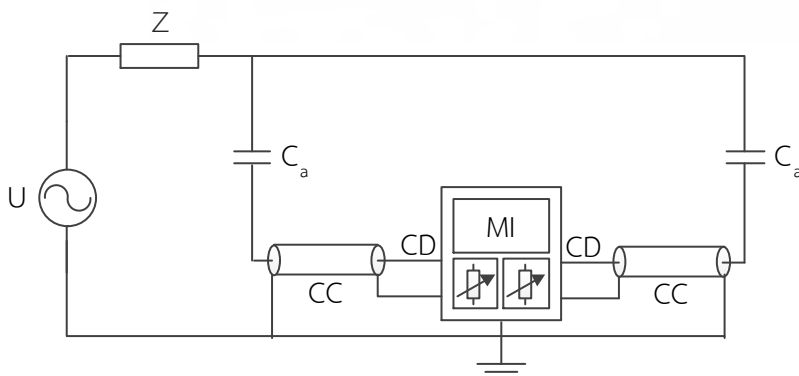
การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการตามมาตรฐานสากล หรือที่เรียกว่ามาตรฐาน IEC 60270 นั้นจะใช้อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (CD) ทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k) เพื่อใช้ในการตรวจจับค่าประจุ ในขณะที่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวนของอุปกรณ์ทดสอบ (C_a) อย่างไรก็ตามวิธีการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนี้จะไม่สามารถวัดค่าประจุจากการดิสชาร์จภายในเนื้อฉนวนจริงได้ ดังนั้นจึงทำการวัดค่าประจุที่ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวป้อนประจุให้กับอุปกรณ์ทดสอบแทน (Appearance charge)



รูปที่ 2.4 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (CD) ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k)

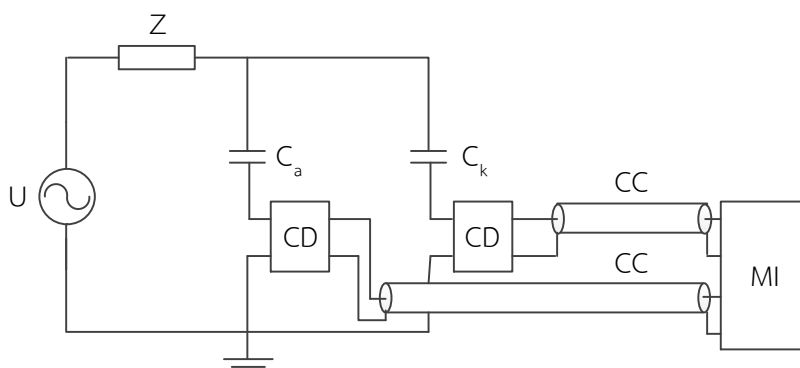


รูปที่ 2.5 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (CD) ต่ออนุกรมกับอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบ (C_a)



รูปที่ 2.6 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่มีการแยกข้อสัญญาณ

โดยที่ U คือ แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า

Z คือ อุปกรณ์กรองสัญญาณรบกวนในวงจร (Filter)

C_a คือ อุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบ (Test object)

C_k คือ ตัวเก็บประจุคัปเปิล (Coupling capacitor)

CD คือ อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Coupling device)

CC คือ สายโคแอกเซียล (Connecting cable)

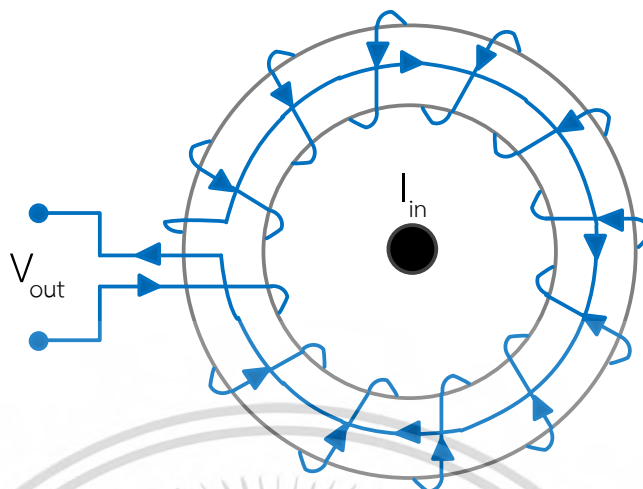
MI คือ เครื่องมือสำหรับวัดสัญญาณพัลส์การดิสชาร์จบางส่วน (Measuring instrument)

จากรูปที่ 2.4 – 2.7 แสดงวงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล ซึ่งแบ่งวงจรการทดสอบออกเป็น 4 วงจร โดยในรูปที่ 2.4 เป็นวงจรทดสอบที่อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุคัปเปิล ส่วนในรูปที่ 2.5 เป็นวงจรทดสอบที่อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่ออนุกรมกับอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบ ซึ่งวงจรในรูปที่ 2.5 จะมีความไวในการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้รวดเร็วกว่าวงจรในรูปที่ 2.4 เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและเครื่องมือวัดอยู่ใกล้กับอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบ แต่จะมีความเสี่ยงที่เครื่องมือวัดอาจเกิดความเสียหายถ้าเกิดการเบรกดาว์นของอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบ ส่วนในรูปที่ 2.6 และ 2.7 เป็นวงจรการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ได้เปรียบในด้านการลดระดับสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ แต่ทั้งสองวงจรมีความซับซ้อนในการติดตั้งวงจรทดสอบ

2.3 การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูง

ในปัจจุบันตัวแปลงกระแสความถี่สูงจะถูกนำมาใช้ในการวัดกระแสพัลส์ความถี่สูง โดยทั่วไปจะใช้ในการวัดกระแสอิมพัลส์ หรือตรวจจับกระแสการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งหลักการทำงานของตัวแปลงกระแสความถี่สูงจะมีหลักการพื้นฐานจากกฎพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้า คือ กฎของแอมแปร์ และกฎของฟาราเดย์

2.3.1 หลักการทำงานของตัวแปลงกระแสความถี่สูง



รูปที่ 2.8 การทำงานของตัวแปลงกระแสความถี่สูงเมื่อมีกระแสไหลผ่าน

จากกฎของแอมแปร์เมื่อมีกระแสที่ไหลในตัวนำไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบกระแสไฟฟ้านั้น [7] ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.1)

$$I_{in} = \int H \, dl = Hl_c \quad (2.1)$$

$$H = \frac{I_{in}}{l_c} \quad (2.2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) กับความเข้มสนามไฟฟ้า (H) แสดงดังสมการที่ (2.3) โดยที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก คือ ปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่ตกกระทบตั้งฉากบนพื้นที่ที่ฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่าน (A) แสดงสมการที่ (2.5)

$$B = \mu H \quad (2.3)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.4)$$

$$\phi = \int_A B \cdot dA = BA \quad (2.5)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.2) ในสมการที่ (2.3)

$$B = \mu H = \frac{\mu I_{in}}{l_c} \quad (2.6)$$

จากนั้นแทนสมการที่ (2.6) ในสมการที่ (2.5)

$$\phi = BA = \frac{\mu A I_{in}}{l_c} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎของฟาราเดย์กล่าวว่า เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในช่วงเวลาหนึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายของขดลวด แสดงดังสมการที่ (2.8)

ส่วนกฎของเลนซ์กล่าวว่า โดยธรรมชาติแล้วขดลวดจะพยายามไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กขึ้น ขดลวดจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามเพื่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กนั้น [7]

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.8)$$

และเมื่อแทนสมการที่ (2.7) ในสมการที่ (2.8)

$$V_{out} = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{\mu N A}{l_c} \cdot \frac{dI_{in}}{dt} \quad (2.9)$$

กำหนดให้ $M = \frac{\mu N A}{l_c}$ และแทนค่า ในสมการที่ (2.9)

$$V_{out} = -M \cdot \frac{dI_{in}}{dt} \quad (2.10)$$

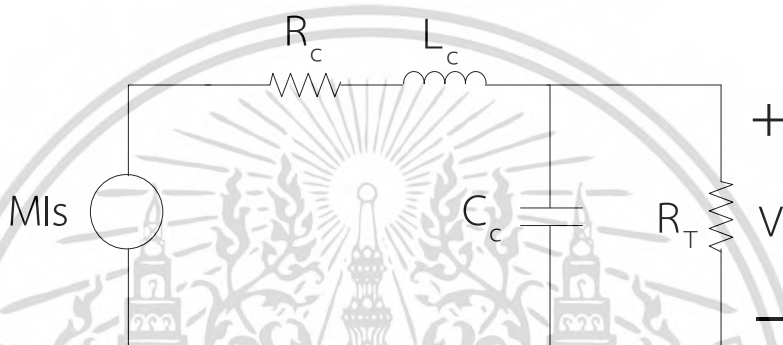
$$I_{in} = -\frac{1}{M} \int V_{out} \cdot dt \quad (2.11)$$

- เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (A)
 H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity; A-turns/m)
 l คือ ความยาวรอบพื้นที่วงปิดตามทิศของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (m)
 B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density; Wb/m² หรือ T)
 μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็ก (Absolute permeability; H/m)
 μ_0 คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ (Permeability of free space; H/m)
 μ_r คือ ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability)
 ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux ; Wb)
 A คือ พื้นที่ที่ฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่าน (m²)
 ε คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced voltage ; V)
 N คือ จำนวนรอบของขดลวด (Turns)
 l_c คือ ความยาวของแกนขดลวด
 M คือ ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual inductance)

ในสมการที่ (2.9) เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงพลาซแม่เหล็กตามเวลา ตัวแปลงกระแสความถี่สูงจะสร้างพลาซแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงพลาซแม่เหล็กนั้นตามกฎของฟาราเดย์และกฎของเลนซ์ จากนั้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดในทิศทางที่แสดงในรูปที่ (2.8)

จากสมการที่ (2.11) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต กล่าวคือ กระแสอินพุตหาได้จากกรณิการอินทิเกรตแรงดันเอาต์พุตนั้นเอง ดังนั้นถ้านำแรงดันเอาต์พุตจากตัวแปลงกระแสความถี่สูงมาผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสมจะได้กระแสอินพุต [8]

2.3.2 วงจรสมมูลของตัวแปลงกระแสความถี่สูง



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

จากรูปที่ 2.9 แสดงถึงวงจรสมมูลของตัวแปลงกระแสความถี่สูง ซึ่งจากวงจรสมมูลดังกล่าวสามารถหาทรานเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) หรือทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ (Transfer impedance ; Z) ได้ ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.12) โดยที่ทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับกระแสอินพุต

$$\begin{aligned}
 Z = \frac{V}{I} &= \left(\frac{\frac{R_T}{1 + R_T C_c s} - M_s}{R_c + L_c s + \frac{R_T}{1 + R_T C_c s}} \right) \\
 &= \frac{\frac{M}{L_c C_c} s}{s^2 + \left(\frac{R_c}{L_c} + \frac{1}{R_T C_c} \right) s + \frac{R_c + R_T}{R_T L_c C_c}} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

เนื่องจากพจน์ของ R_c/L_c มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับพจน์ $1/R_T L_c$ และพจน์ R_c มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับพจน์ R_T ดังนั้นในสมการที่ (2.12) ไม่จำเป็นต้องนำพจน์ R_c/L_c และ R_c มาคำนวณ และสามารถเขียนสมการทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ใหม่ดังสมการที่ (2.13)

$$Z = \frac{V}{I} \approx \frac{\frac{M}{L_c C_c} s}{s^2 + \left(\frac{1}{R_T C_c}\right)s + \frac{1}{L_c C_c}}$$

$$\approx \frac{\frac{M}{L_c C_c} s}{\left(s + \frac{1}{R_T C_c}\right)\left(s + \frac{R_T}{L_c}\right)} \quad (2.13)$$

$$(2.10)$$

ค่าโพล (Pole) ของสมการทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ในสมการที่ 2.13 คือ $\frac{R_T}{L_c}$ และ $\frac{1}{R_T C_c}$ ซึ่งจะแสดงถึงความถี่คัทออฟของตัวแปลงกระแสความถี่สูง (Cut off frequency) ซึ่งความถี่คัทออฟด้านต่ำ (Low cutoff frequency) มีค่าประมาณ $\frac{R_T}{2\pi L_c}$ และความถี่คัทออฟด้านสูง (High cutoff frequency) มีค่าประมาณ $\frac{1}{2\pi R_T C_c}$ และจากสมการที่ (2.13) สามารถหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับกระแสไฟฟ้าอินพุต (Gain) ดังสมการที่ (2.14)

$$\text{Gain} \approx \frac{R_T}{N} \quad (2.14)$$

เมื่อ Z คือ ทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ (Transfer impedance ; V/A)

V คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V)

I คือ กระแสไฟฟ้าอินพุต (A)

M คือ ความเหนี่ยวนำรวม (Mutual inductance)

R_c คือ ความต้านทานของตัวแปลงกระแสความถี่สูง (Ω)

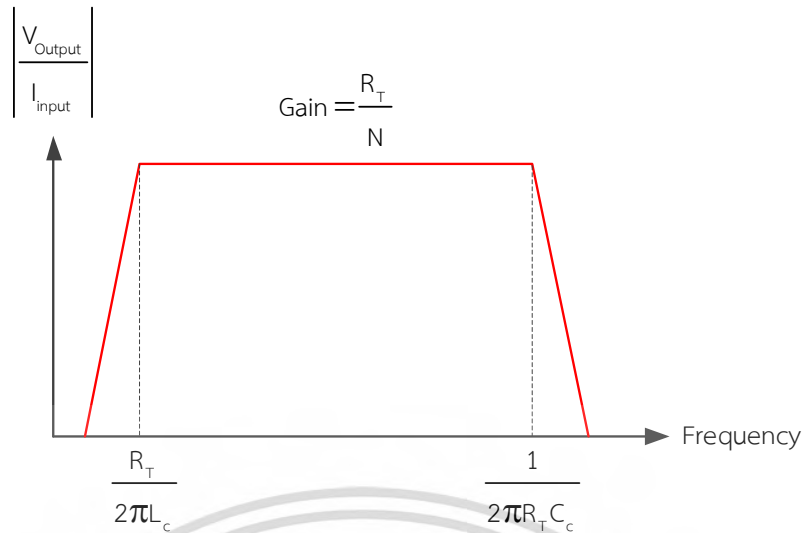
R_T คือ ตัวต้านทานแมทซิง (Ω)

L_c คือ ความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูง (H)

C_c คือ ความจุไฟฟ้าของตัวแปลงกระแสความถี่สูง (F)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด (Turns)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

จากรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่า ความถี่คutoff ด้านต่ำจะขึ้นอยู่กับค่า ตัวต้านทานแมทซิง (R_T) และ ความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูง (L_c) ส่วนความถี่คutoff ด้านสูงจะขึ้นอยู่กับค่า ตัวต้านทานแมทซิง (R_T) และ ความจุไฟฟ้าของตัวแปลงกระแสความถี่สูง (C_c) อย่างไรก็ตามความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวแปลงกระแสความถี่สูงในทางปฏิบัติยังสามารถวัดค่าได้ แต่การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวแปลงกระแสความถี่สูงในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเลือกใช้ความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงในการออกแบบความถี่คutoff ด้านต่ำเท่านั้น

2.3.3 การคำนวณความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

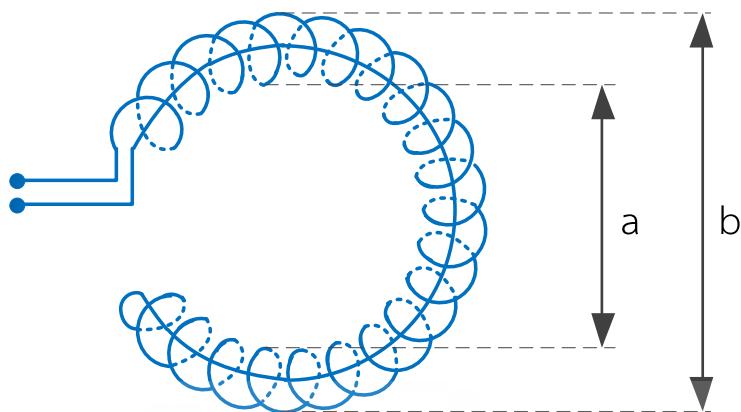
ความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงจะถูกใช้ในการออกแบบ ความถี่คutoff ด้านต่ำของตัวแปลงกระแสความถี่สูง ซึ่งในหัวข้อนี้แสดงวิธีการคำนวณความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงทั้ง 2 ประเภท คือ ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ และตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

1. ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

ความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ จะสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.15) [4]

$$L = \frac{\mu_0 N^2 h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แบบจำลองตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

เมื่อ μ_0 คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

N คือ จำนวนรอบขดลวดของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

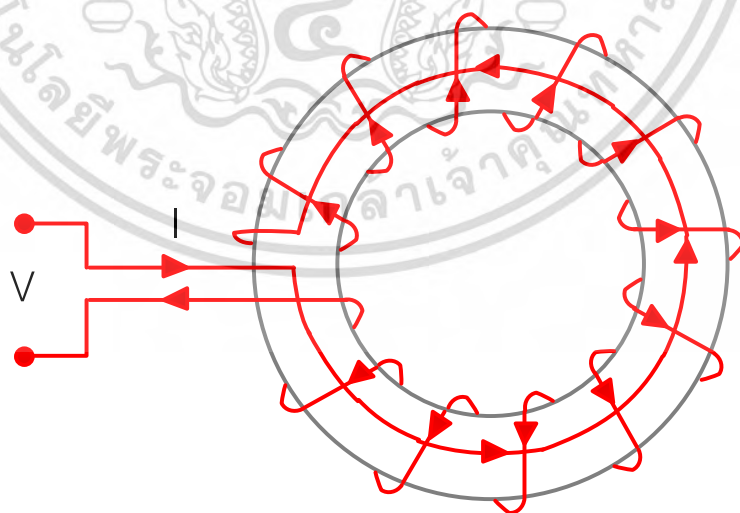
h คือ ความสูงของแกนอากาศ

b คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแกนตัวแปลงกระแสความถี่สูง

a คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแกนตัวแปลงกระแสความถี่สูง

2. ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

ในการคำนวณหาความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์จะใช้หลักการคำนวณตามหลักพื้นฐานจากกฎของแอมแปร์และกฎของฟาราเดย์



รูปที่ 2.12 การคำนวณความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

จากกฎของแอมแปร์

$$NI = Hl_c \quad (2.16)$$

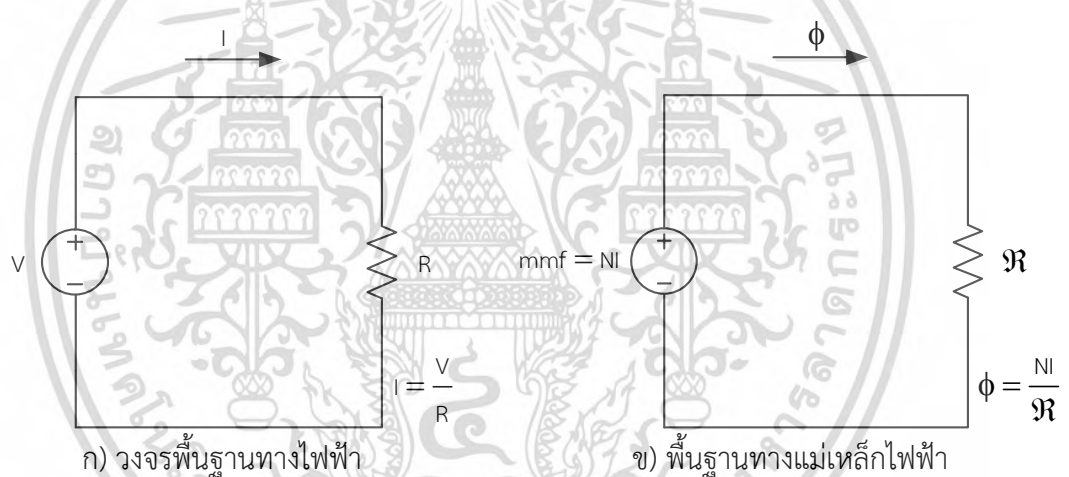
$$H = \frac{NI}{l_c} \quad (2.17)$$

แทนสมการที่ (2.17) ในสมการที่ (2.3)

$$B = \mu H = \frac{\mu NI}{l_c} \quad (2.18)$$

จากนั้นแทนสมการที่ (2.18) ในสมการที่ (2.5)

$$\phi = BA = \frac{\mu NIA}{l_c} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.13 วงจรพื้นฐานทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบวงจรพื้นฐานทางไฟฟ้าและวงจรพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในรูปที่ 2.13 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Magnetomotive force ; mmf) และความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance ; \mathcal{R}) จากนั้นนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาแทนในสมการที่ (2.19) ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.20)

$$\phi = \frac{NI}{\mathcal{R}} = \frac{\mu NIA}{l_c} \quad (2.20)$$

ดังนั้น

$$\mathcal{R} = \frac{l_c}{\mu A} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎของฟาราเดย์

$$v = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{\mu N^2 A}{l_c} \cdot \frac{dl}{dt} \quad (2.22)$$

$$v_L = L \frac{dl}{dt} \quad (2.23)$$

ในสมการที่ (2.22) แสดงสมการแรงดันไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองข้างของตัวแปลงกระแสความถี่สูง และสมการที่ (2.23) แสดงสมการแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ดังนั้นสามารถนำสมการที่ (2.22) เท่ากับสมการที่ (2.23) ได้ ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.24)

$$L \frac{dl}{dt} = \frac{\mu N^2 A}{l_c} \cdot \frac{dl}{dt} \quad (2.24)$$

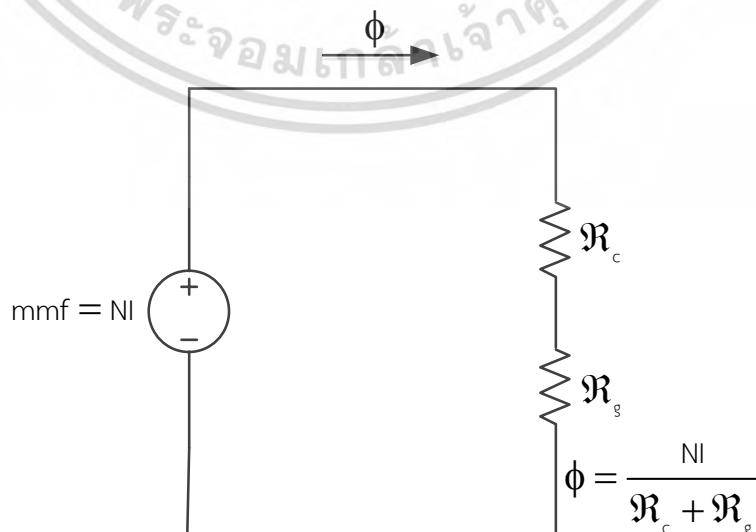
ดังนั้น

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l_c} \quad (2.25)$$

แทนสมการ (2.21) ในสมการที่ (2.25)

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (2.26)$$

ในกรณีที่ตัวแปลงกระแสความถี่สูงมีช่องว่างอากาศ (Air gap) ความต้านทานแม่เหล็กจะประกอบด้วย 2 ส่วน นั่นคือความต้านทานแม่เหล็กของแกนขดลวด (\mathcal{R}_c) และความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ (\mathcal{R}_g) ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่มีช่องว่างอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแทนค่า $\mathcal{R} = \mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g$ ในสมการที่ (2.26)

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g} \quad (2.28)$$

2.3.4 ข้อดีและข้อเสียของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ และ ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ซึ่งตารางนี้จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบตัวแปลงกระแสความถี่สูงต่อไป

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของตัวแปลงกระแสความถี่สูงแต่ละประเภท

ประเภทของตัวแปลงกระแสความถี่สูง	ข้อดี	ข้อเสีย
ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่เกิดการอิ่มตัวจากกระแสไฟฟ้าที่ความถี่พลังงาน 	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าอัตราส่วนระหว่างความเหนี่ยวนำกับขนาดของตัวแปลงกระแสความถี่สูง (L/V) มีค่าต่ำ กล่าวคือ ถ้าต้องการความเหนี่ยวนำที่สูงขนาดของตัวแปลงกระแสความถี่สูงต้องมีขนาดใหญ่ - ถ้าตัวแปลงกระแสความถี่สูงมีขนาดใหญ่ การติดตั้งใช้งานจริงในทางปฏิบัติทำได้ยาก - การออกแบบช่วงความถี่ในการทำงานทำได้ยาก เนื่องจากการเพิ่มจำนวนรอบขดลวดจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับกระแสอินพุต (V/I) มีค่าต่ำลง - อัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับกระแสอินพุต (V/I) มีค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของตัวแปลงกระแสความถี่สูงแต่ละประเภท(ต่อ)

ประเภทของ ตัวแปลงกระแส ความถี่สูง	ข้อดี	ข้อเสีย
ตัวแปลงกระแส ความถี่สูงที่ใช้ แกนเฟอร์ไรท์	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าอัตราส่วนระหว่างความเหนี่ยวนำกับขนาดของตัวแปลงกระแสความถี่สูง (L /A) มีค่าสูง กล่าวคือถ้าต้องการความเหนี่ยวนำที่สูงขนาดของตัวแปลงกระแสความถี่สูงไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่มากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ - อัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับกระแสอินพุต (V/I) มีค่าสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - มีโอกาสเกิดการอิมิตัวจากกระแสไฟฟ้าที่ความถี่พลังงาน ทำให้การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนมีความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูง 2 ประเภทด้วยกัน คือ ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ และตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ พบว่าค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability ; μ) ในตัวแปลงกระแสความถี่สูงแต่ละประเภทมีความแตกต่างกัน เนื่องจากการเลือกใช้แกนขดลวดของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่แตกต่างกัน อีกทั้งค่าความซึมซาบแม่เหล็กนี้จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงอีกด้วย

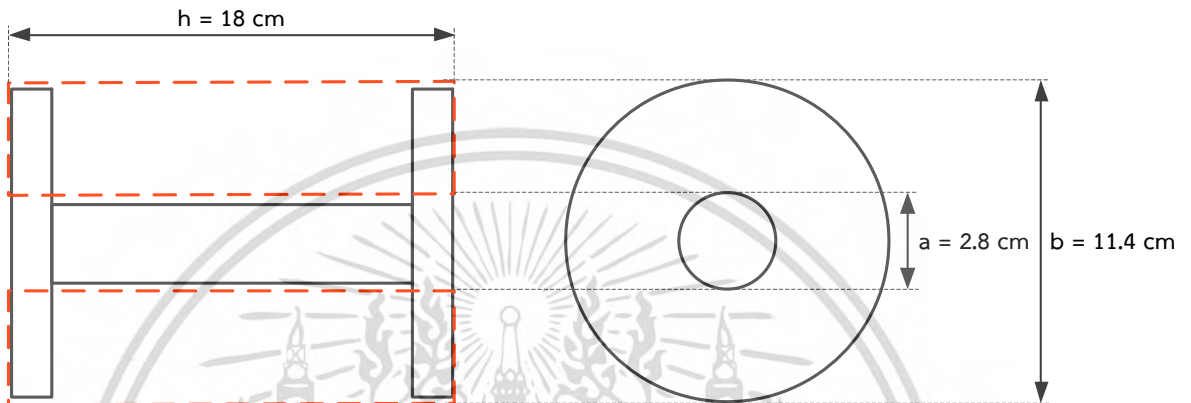
3.1 การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

3.1.1 การออกแบบตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

สำหรับการเลือกใช้แกนอากาศนั้นจะไม่ก่อให้เกิดการอิ่มตัวจากกระแสไฟฟ้าที่ความถี่พลังงาน เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการไหลของกระแสไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในอากาศ โดยถือได้ว่าเป็นข้อดีอย่างหนึ่งในการเลือกใช้แกนอากาศ แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนอากาศกับแกนเฟอร์ไรท์ พบว่าค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนอากาศ ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m) มีค่าน้อยกว่าแกนเฟอร์ไรท์หลายเท่า ส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศมีค่าต่ำกว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ นอกจากนี้ค่าความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อช่วงความถี่ในการทำงาน (Bandwidth) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2

ในการออกแบบตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยที่จะกำหนดให้ค่าความสูงของแกนอากาศ ค่าความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแกนตัวแปลงกระแสความถี่สูง ค่าความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแกนตัวแปลงกระแสความถี่สูง จำนวนรอบของขดลวด และตัวต้านทานแม่ทิง แสดงดังนี้

ความสูงของแกนอากาศ (h)	= 18 cm
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแกนตัวแปลงกระแสความถี่สูง (a)	= 2.8 cm
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแกนตัวแปลงกระแสความถี่สูง (b)	= 11.4 cm
จำนวนรอบของขดลวด (N)	= 16 รอบ
ตัวต้านทานแมทซิ่ง (R_T)	= 50 Ω



รูปที่ 3.1 ขนาดแกนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

สาเหตุที่เลือกใช้ตัวต้านทานแมทซิ่ง (R_T) มีขนาดเท่ากับ 50 Ω เนื่องจากสายโคแอกเซียล (Coaxial cable) ที่ใช้มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ (Surge impedance) เท่ากับ 50 Ω ซึ่งการเลือกความต้านทานที่มีขนาดเท่ากับค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเซียลจะไม่ทำให้เกิดคลื่นสะท้อน และยังทำให้การตรวจวัดไม่เกิดความผิดพลาดอีกด้วย

ค่าความเหนี่ยวนำจากการออกแบบสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{\mu_0 N^2 h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) & (3.1) \\
 &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 16^2 \times 18 \times 10^{-2}}{2\pi} \ln\left(\frac{11.4 \times 10^{-2}}{2.8 \times 10^{-2}}\right) \\
 &= 12.94 \mu\text{H}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ความถี่คัทออฟด้านต่ำจากการออกแบบมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Low cut off frequency} &\approx \frac{R_T}{2\pi L} & (3.2) \\ &\approx \frac{50}{2 \times \pi \times 12.94 \times 10^{-6}} \\ &\approx 614.97 \text{ KHZ} \end{aligned}$$

3.1.2 การประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

การประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศมีขั้นตอนในการประกอบสร้าง 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเลือกแกนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

ในการเลือกแกนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง จะเลือกใช้แกนด้ายพลาสติก เนื่องจากแกนด้ายพลาสติกมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กเท่ากับอากาศ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่สามารถรับแรงทางกลจากการพันขดลวดได้ดีอีกด้วย โดยรายละเอียดของแกนด้ายพลาสติกจะแสดงดังรูปที่ 3.2

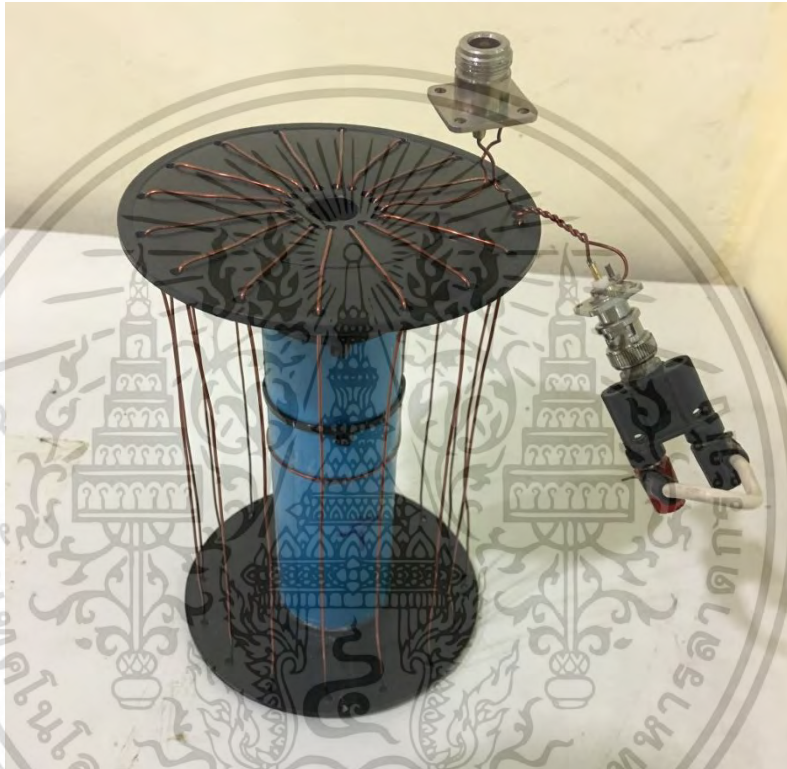


รูปที่ 3.2 แกนด้ายพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 การพันขดลวดของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

การพันขดลวดจะใช้หลักการพันตามแบบขดลวดโรกอฟสกี กล่าวคือ จะแบ่งการพันขดลวดออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน โดยที่ส่วนแรกจะเริ่มพันด้วยขดลวดทองแดงรอบแกนด้ายพลาสติกก่อน ซึ่งจะพันทั้งหมด 16 รอบ โดยที่ระยะห่างระหว่างรอบการพันจะต้องมีระยะที่สม่ำเสมอ และอีกส่วนหนึ่งจะพันย้อนกลับเข้ามาในขดลวดส่วนแรกที่พันไว้ โดยหลักการพันดังกล่าวมีข้อดี คือสามารถลดระดับสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

ค่าความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศเป็นแกนของขดลวด หลังจากประกอบสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วมีค่าเท่ากับ $15.2 \mu\text{H}$ ดังนั้นความถี่คัทออฟด้านต่ำมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Low cut off frequency} &\approx \frac{50}{2 \times \pi \times 15.2 \times 10^{-6}} \\ &\approx 523.54 \text{ kHz} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

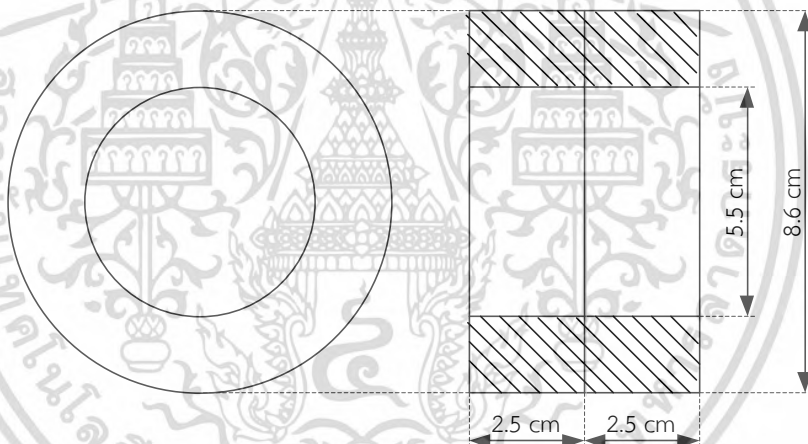
และอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันมีค่าดังนี้

$$\text{Gain} \approx \frac{R}{N} \approx \frac{50}{16} \approx 3.125 \text{ V / A}$$

3.2 การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

3.2.1 การออกแบบตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

ในการออกแบบแกนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงจะเลือกใช้แกนที่ทำมาจากสารเฟอร์โรแมกเนติกหรือที่เรียกว่า แกนเฟอร์ไรท์ (Ferrite core) เนื่องจากแกนเฟอร์ไรท์นี้มีค่าซึมซาบแม่เหล็กสูง ส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์มีค่ามากกว่าค่าความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ นอกจากนี้ยังมีการออกแบบให้แกนเฟอร์ไรท์มีช่องว่างอากาศเพื่อหลีกเลี่ยงการอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรท์ที่เกิดมาจากกระแสไฟฟ้าในช่วงความถี่พลังงาน โดยรายละเอียดขนาดของแกนเฟอร์ไรท์ แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขนาดแกนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

ในการออกแบบตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ จะกำหนดให้ค่าพื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์ จำนวนรอบขดลวด ช่องว่างอากาศ และตัวต้านทานแมทซิง แสดงดังนี้

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์ที่มีขนาด } (A_g) \text{ (1.55 cm x 5 cm)} = 7.75 \text{ cm}^2$$

$$\text{จำนวนรอบขดลวด (N)} = 5 \text{ รอบ}$$

$$\text{ช่องว่างอากาศ } (l_g) = 0.035 \text{ cm}$$

$$\text{ตัวต้านทานแอมป์ } (R_T) = 50 \ \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงจากการออกแบบสามารถหาได้จากสมการที่ (3.3)

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g} \quad (3.3)$$

$$L = \frac{N^2}{\frac{l_c}{\mu_c A_c} + \frac{l_g}{\mu_g A_g}} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.4) เมื่อเปรียบเทียบค่าความซึมซาบแม่เหล็กระหว่างแกนเฟอร์ไรท์กับช่องว่างอากาศ พบว่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์มีค่ามากกว่าค่าความซึมซาบแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ ($\mu_c \gg \mu_g$) ทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ ($\mathcal{R}_c \ll \mathcal{R}_g$) ดังนั้นในสมการที่ (3.3) ไม่จำเป็นต้องนำค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์มาคำนวณ

$$L \approx \frac{N^2}{\mathcal{R}_g} \approx \frac{N^2 \mu_0 A_g}{l_g} \quad (3.5)$$

$$\approx \frac{5^2 \times (4\pi \times 10^{-7}) \times (1.55 \times 10^{-2} \times 5 \times 10^{-2})}{0.035 \times 10^{-2}}$$

$$\approx 69.56 \mu\text{H}$$

ดังนั้น ความถี่คัทออฟด้านต่ำจากการออกแบบมีค่าดังนี้

$$\text{Low cut off frequency} \approx \frac{50}{2 \times \pi \times 69.56 \times 10^{-6}}$$

$$\approx 114.40 \text{ kHz}$$

3.2.2 การประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

การประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์มีขั้นตอนในการประกอบสร้าง 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การตัดแกนเฟอร์ไรท์เพื่อสร้างช่องว่างอากาศ

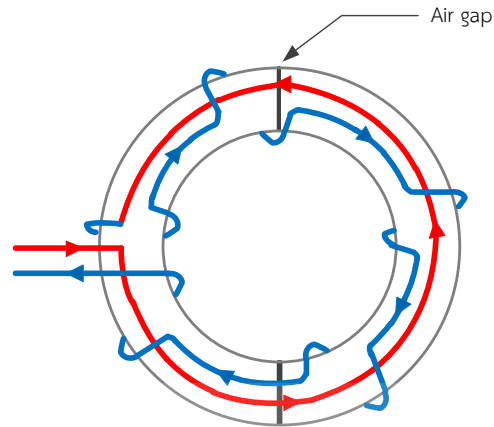
แกนเฟอร์ไรท์ที่เลือกใช้จะมีขนาดตามรูปที่ 3.4 ซึ่งเกิดจากแกนเฟอร์ไรท์ 2 ชิ้นประกอบเข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูง หลังจากนั้น ทำการตัดแบ่งครึ่งแกนเฟอร์ไรท์เพื่อสร้างช่องว่างอากาศเพื่อหลีกเลี่ยงการอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรท์ โดยที่ช่องอากาศจะมีความกว้างประมาณ 0.035 cm แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แกนเฟอร์ไรท์ที่ทำการแบ่งครึ่งเพื่อทำให้เกิดช่องว่างอากาศ

ขั้นตอนที่ 2 การพันขดลวดของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

การพันขดลวดของตัวแปลงกระแสความถี่สูงจะใช้หลักการพันตามแบบขดลวดโรกอฟสกี เหมือนกับตัวแปลงกระแสที่ใช้แกนอากาศ กล่าวคือจะแบ่งการพันขดลวดออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน โดยส่วนแรกจะพันรอบแกนขดลวด และอีกส่วนหนึ่งจะพันย้อนกลับเข้ามาในขดลวดส่วนแรก แต่การพันขดลวดของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์จะเริ่มพันขดลวดในส่วนที่พันย้อนกลับเข้ามาในขดลวดแรกก่อน (เส้นสีแดง) และต่อจากนั้นจึงพันขดลวดรอบแกนเฟอร์ไรท์ทั้งหมด 5 รอบ (เส้นสีน้ำเงิน) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.6 และ 3.7



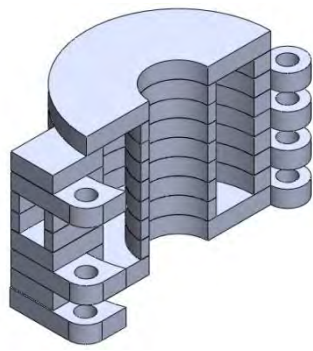
รูปที่ 3.6 แบบจำลองการพันตามหลักการพันแบบขดลวดโรกอฟสกี



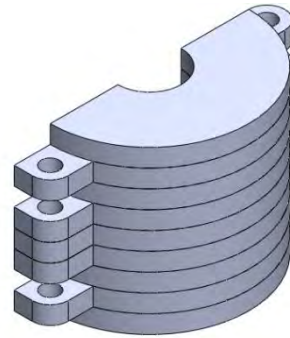
รูปที่ 3.7 ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

ขั้นตอนที่ 3 การประกอบสร้างเคสป้องกันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

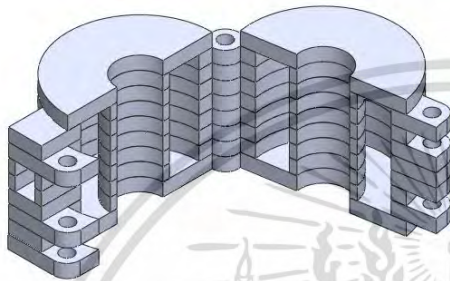
เคสป้องกันของตัวแปลงกระแสความถี่สูงจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เคสด้านซ้าย (รูปที่ 3.8 (ก)) และ เคสด้านขวา (รูปที่ 3.8 (ข)) โดยเคสป้องกันทั้งสองด้านจะทำด้วยแผ่นพลาสติก (Plastwood) หนา 10 mm ที่ทำการซ้อนทับกันทั้งหมด 9 ชั้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.8 โดยที่รายละเอียดขนาดเคสป้องกันของตัวแปลงกระแสความถี่สูงแต่ละชั้นจะแสดงดังรูปที่ 3.9-3.17



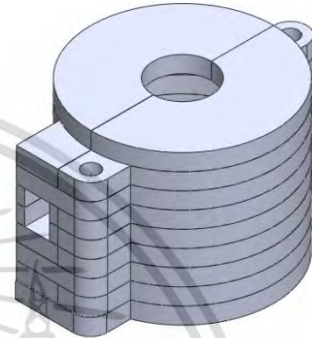
ก) เคสด้านซ้าย



ข) เคสด้านขวา

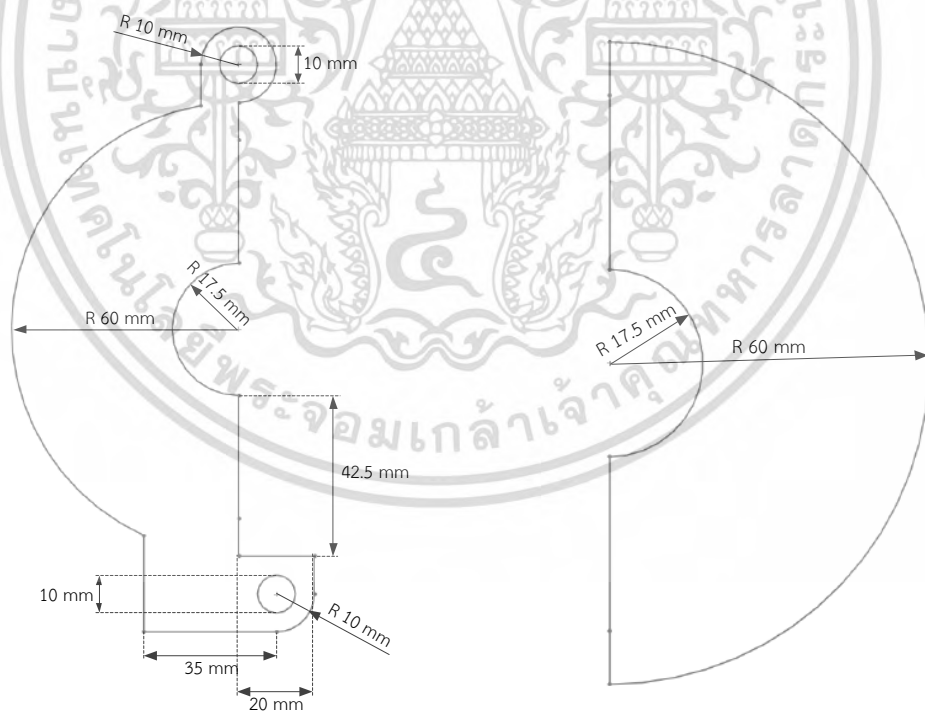


ค) การประกอบเคสทั้งสองด้านเข้าด้วยกัน



ง) เคสป้องกันที่สมบูรณ์แล้ว

รูปที่ 3.8 เคสป้องกันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

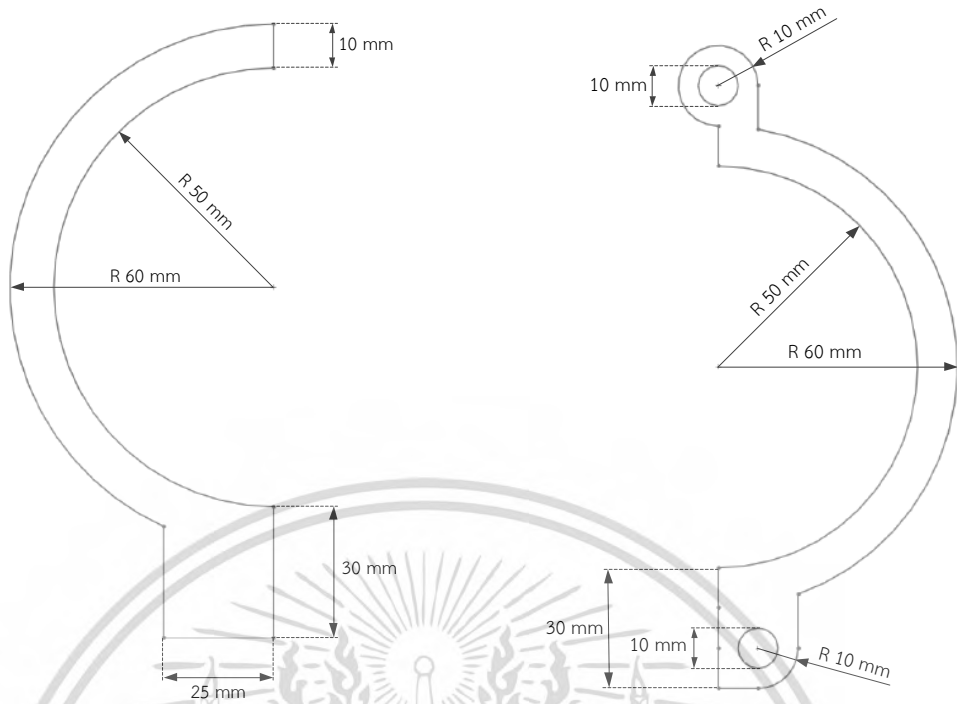


ก) รายละเอียดขนาดของเคสด้านซ้าย

ข) รายละเอียดขนาดของเคสด้านขวา

รูปที่ 3.9 รายละเอียดขนาดของเคสป้องกันชั้นที่ 1 (ส่วนฐาน)

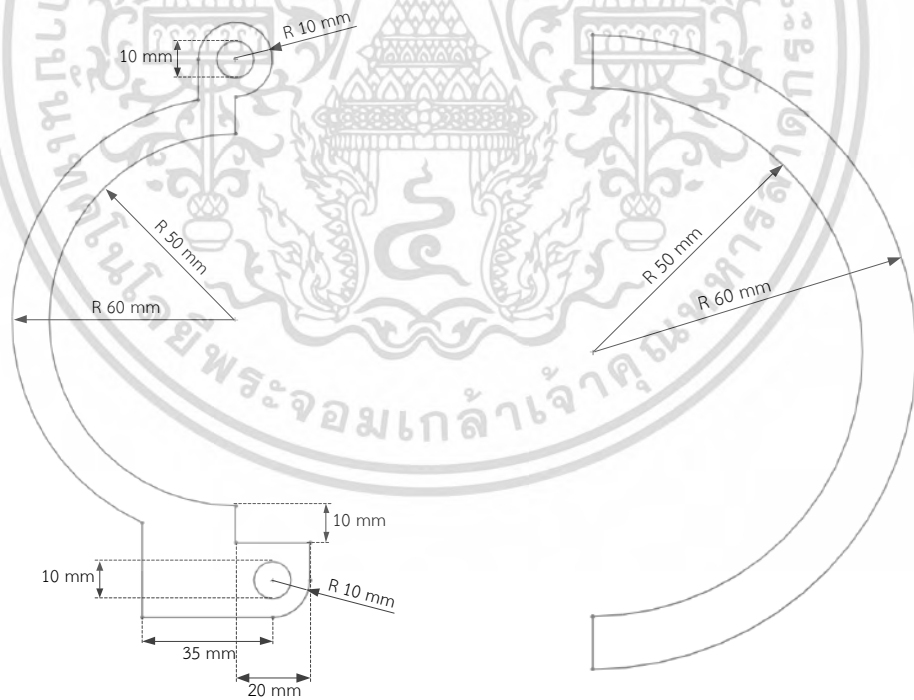
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) รายละเอียดขนาดของเคสด้านซ้าย

ข) รายละเอียดขนาดของเคสด้านขวา

รูปที่ 3.10 รายละเอียดขนาดของเคสป้องกันชั้นที่ 2 ชั้น 4 และชั้น 8

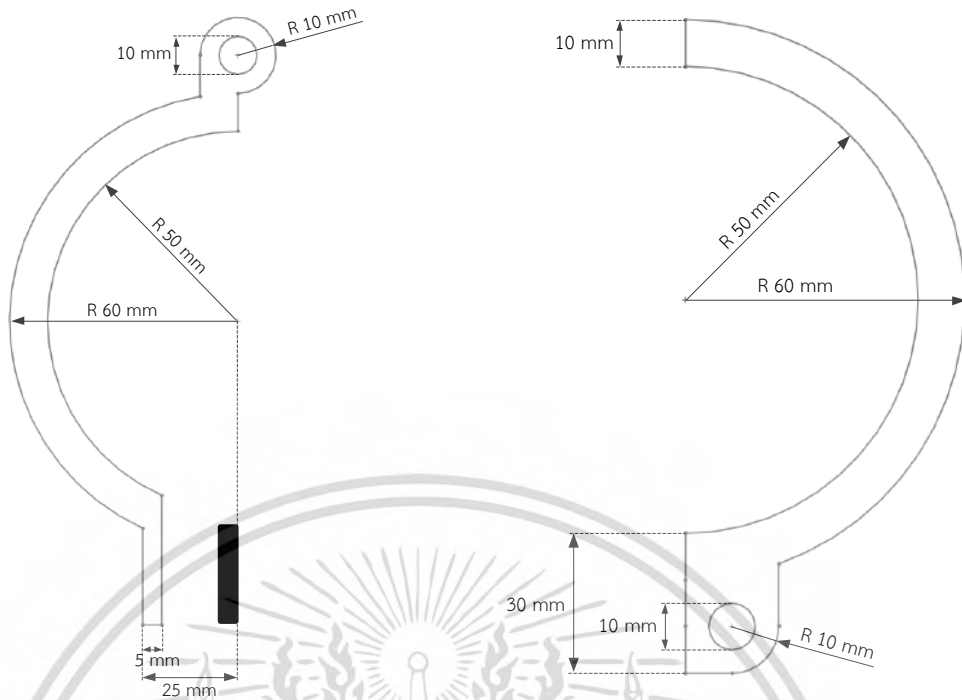


ก) รายละเอียดขนาดของเคสด้านซ้าย

ข) รายละเอียดขนาดของเคสด้านขวา

รูปที่ 3.11 รายละเอียดขนาดของเคสป้องกันชั้นที่ 3 และชั้น 7

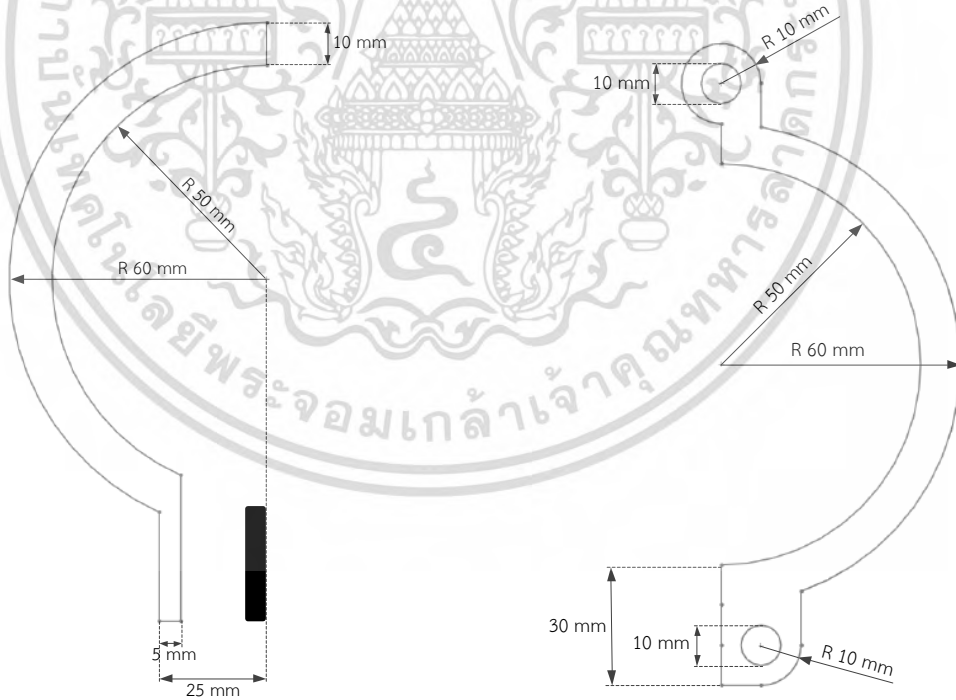
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) รายละเอียดขนาดของคีย์ด้านซ้าย

ข) รายละเอียดขนาดของคีย์ด้านขวา

รูปที่ 3.12 รายละเอียดขนาดของคีย์ป้องกันชั้นที่ 5

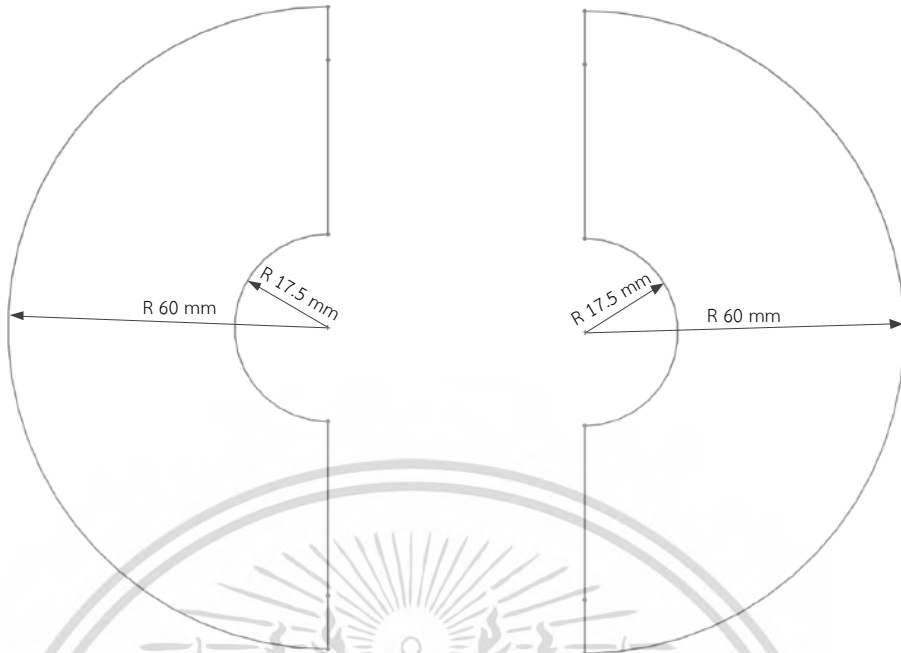


ก) รายละเอียดขนาดของคีย์ด้านซ้าย

ข) รายละเอียดขนาดของคีย์ด้านขวา

รูปที่ 3.13 รายละเอียดขนาดของคีย์ป้องกันชั้นที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) รายละเอียดขนาดของเคสด้านซ้าย

ข) รายละเอียดขนาดของเคสด้านซ้าย

รูปที่ 3.14 รายละเอียดขนาดของเคสป้องกันชั้นที่ 9



ก) รายละเอียดขนาดของเคสด้านซ้าย

ข) รายละเอียดขนาดของเคสด้านซ้าย

รูปที่ 3.15 รายละเอียดขนาดของเคสป้องกันบริเวณแกนกลางตั้งแต่ชั้นที่ 1 - 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 รายละเอียดขนาดของชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกับตัวต่อของสายโคแอกเซียลบริเวณ
ชั้นที่ 5 และ 6 (ด้านซ้าย)

หลังจากประกอบเคสป้องกันของตัวแปลงกระแสความถี่สูงเสร็จสมบูรณ์แล้ว จึงนำแผ่นฟอยล์อลูมิเนียม (Aluminium foil) มาติดภายในเคส ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นชิลด์ป้องกันสนามไฟฟ้าที่อาจจะเข้ามารบกวนระบบตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้ นอกจากนี้ชิลด์ดังกล่าวจะถูกนำมาเชื่อมต่อลงกราวด์ของระบบตรวจวัดอีกด้วย ซึ่งแสดงรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เคสป้องกันของขดลวดโกฟสกีที่ผ่านการติดแผ่นฟอยล์อลูมิเนียมแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำชิลด์ป้องกันสนามไฟฟ้าเสร็จสมบูรณ์แล้ว จากนั้นนำตัวแปลงกระแสความถี่สูงมาบรรจุใส่เข้าไปในเคสป้องกัน และนำแผ่นพลาสติกหนาประมาณ 0.035 cm มาติดบริเวณรอยต่อระหว่างแกนเฟอร์ไรท์เพื่อใช้เป็นช่องว่างอากาศ โดยที่ชั้นตอนนี้ถือว่าเป็นชั้นตอนที่สำคัญอย่างมาก เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงนั้นขึ้นอยู่กับช่องว่างอากาศของแกนเฟอร์ไรท์ แสดงรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การบรรจุตัวแปลงกระแสความถี่สูงเข้าไปในเคสป้องกัน



รูปที่ 3.19 ตัวแปลงกระแสความถี่สูงพร้อมเคสป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในรูปที่ 3.19 แสดงถึงตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์พร้อมเคสป้องกัน หลังจากนั้นนำตัวแปลงกระแสความถี่สูงดังกล่าวมาวัดค่าความเหนี่ยวนำด้วยเครื่อง Universal LCR meter ซึ่งความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์มีค่าเท่ากับ $64.68 \mu\text{H}$ ดังนั้นความถี่คutoff ด้านต่ำมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Low cut off frequency} &\approx \frac{50}{2 \times \pi \times 64.68 \times 10^{-6}} \\ &\approx 123.03 \text{ kHz} \end{aligned}$$

และอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันมีค่าดังนี้

$$\text{Gain} \approx \frac{R}{N} \approx \frac{50}{5} \approx 10 \text{ V / A}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแปลงกระแสความถี่สูงทั้ง 2 ประเภท ซึ่งจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยการทดสอบทั้งหมด 3 ประเภทได้แก่ การทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง และการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง จากนั้นเลือกตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ประสิทธิภาพสูงกว่า ไปทำการทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิสชาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

4.1 การทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

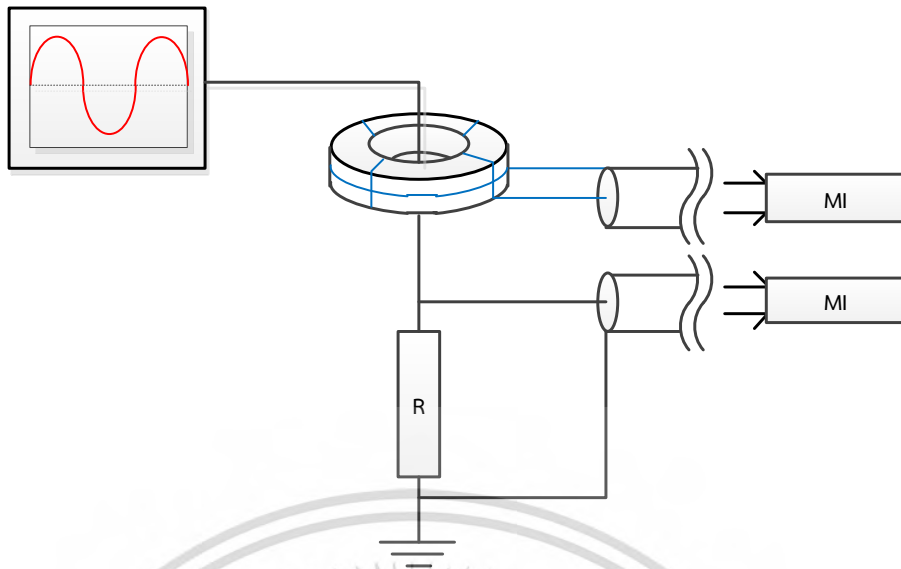
การทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงคือการทดสอบหาช่วงความถี่ในการทำงาน (Bandwidth) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงหรือช่วงความถี่ในการตรวจจับสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนนั่นเอง ดังนั้นช่วงความถี่ในการทำงานของตัวแปลงกระแสความถี่สูงต้องครอบคลุมส่วนประกอบความถี่ของสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมด ถึงจะสามารถตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้อย่างแม่นยำ

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

- | | |
|---|-----------|
| 1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับความถี่ได้ | 1 เครื่อง |
| 2. ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำขนาด 50Ω | 1 ตัว |
| 3. ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ | 1 ตัว |
| 4. ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ | 1 ตัว |
| 5. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Picoscope) | 1 เครื่อง |
| 6. สายโคแอกเชียล (Coaxial cable RG-58) | 2 เส้น |

4.1.2 การติดตั้งวงจรการทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

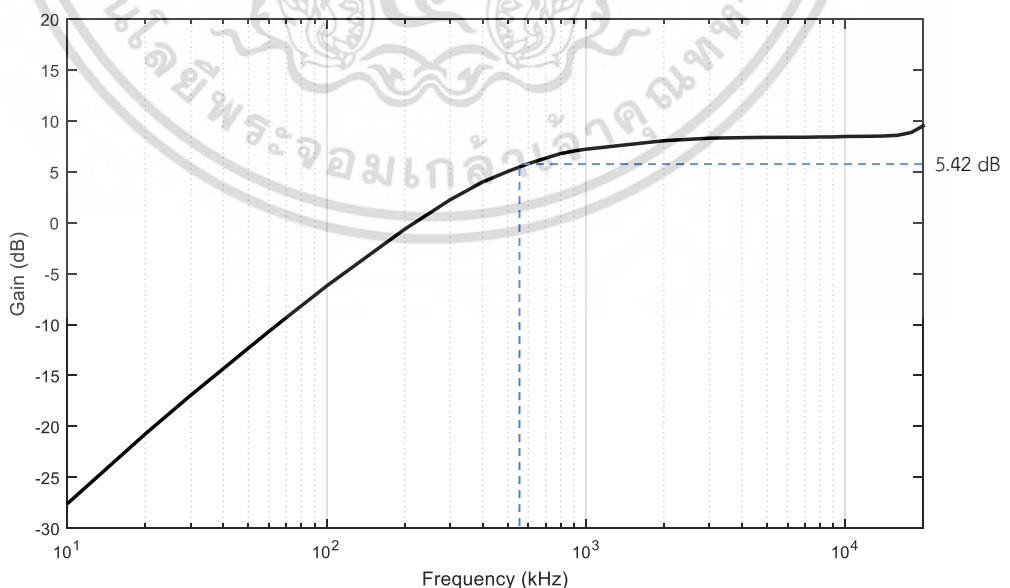
วงจรการทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยจะปรับความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 MHz ส่วนตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำขนาด 50Ω จะถูกนำมาต่อขนานกับแหล่งจ่าย และตัวแปลงกระแสความถี่สูงจะถูกนำมาคล้องเพื่อวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำดังกล่าว ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยที่การทดสอบนี้จะหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูง และกระแสอินพุตที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ ณ ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

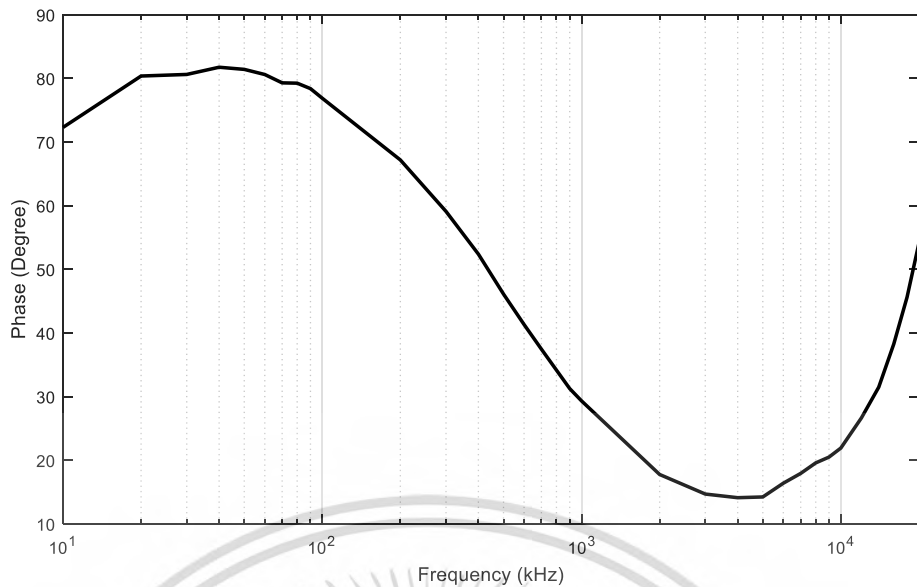
4.1.3 ผลการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดัน (Gain) ที่สภาวะคงตัวมีค่าเท่ากับ 2.64 V/A หรือ 8.42 dB ความถี่คัทออฟด้านต่ำมีค่าเท่ากับ 552.24 kHz และความถี่คัทออฟด้านสูงมีค่าสูงกว่า 20 MHz ส่วนในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่คัทออฟด้านต่ำมีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันต่อความถี่มีค่าประมาณ -21.38 dB/dec ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 และในรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟส (แรงดันเอาต์พุตกับกระแสอินพุต) กับความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันกับความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

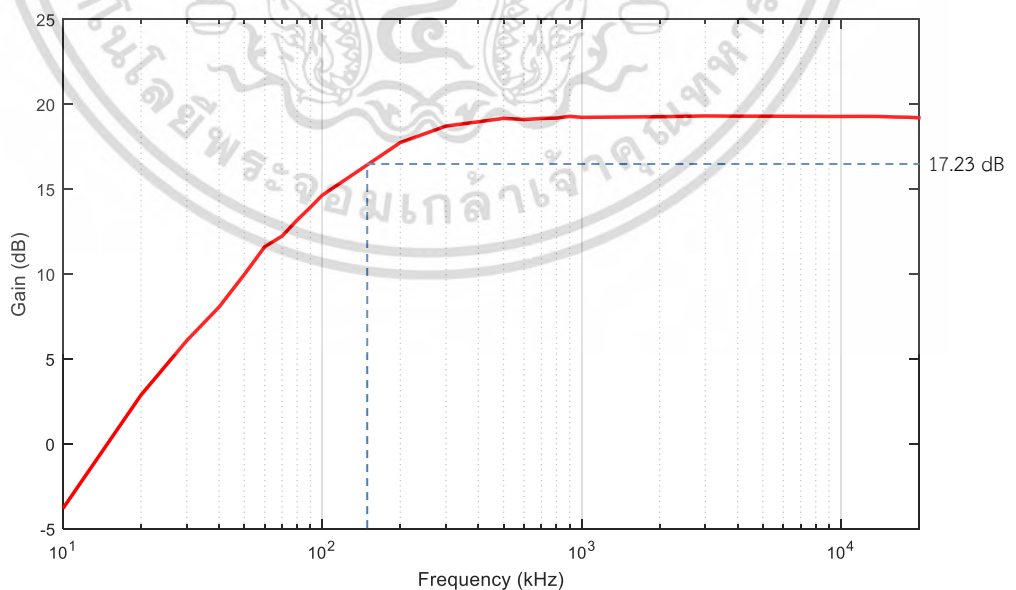
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

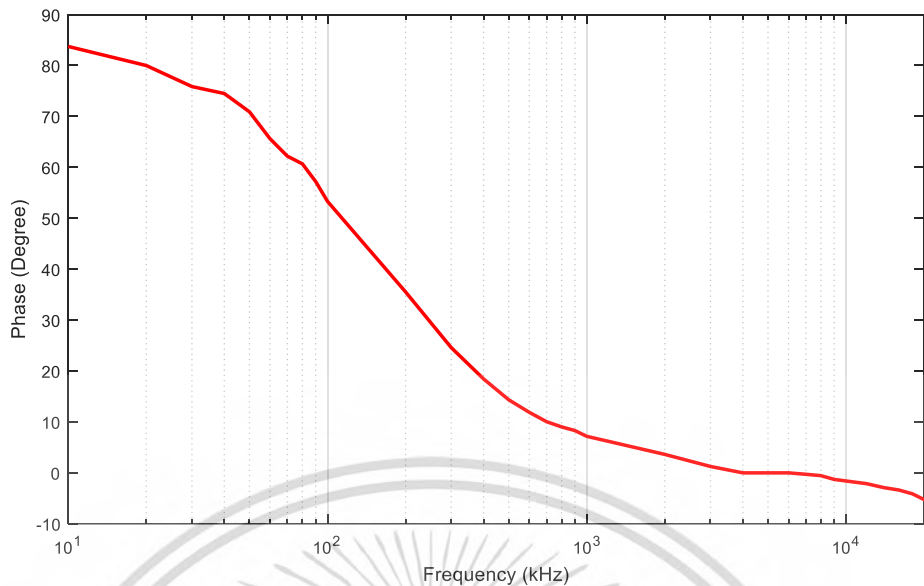
4.1.4 ผลการทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงใช้แกนเฟอร์ไรท์

จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดัน (Gain) ที่สภาวะคงตัวมีค่าเท่ากับ 9.16 V/A หรือ 19.23 dB ความถี่คัทออฟด้านต่ำมีค่าเท่ากับ 151.31 kHz และความถี่คัทออฟด้านสูงมีค่าสูงกว่า 20 MHz (Bandwidth = 151.31 kHz – มากกว่า 20MHz) ส่วนในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่คัทออฟด้านต่ำมีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันต่อความถี่มีค่าประมาณ -18.44 dB/dec ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันกับความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับความถี่ของ
ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

ในรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟส (แรงดันเอาต์พุตกับกระแสอินพุต) กับความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

4.2 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

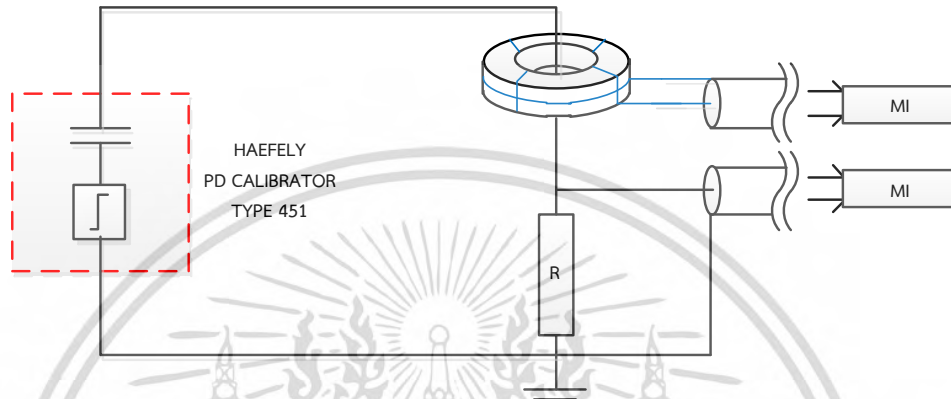
ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณที่วัดได้แสดงถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือวัด กล่าวคือ เครื่องมือวัดที่มีดีต้องมีความแม่นยำในการวัดและต้องมีความเสถียรภาพหรือมีความเป็นเชิงเส้นนั่นเอง ถึงจะถือได้ว่าเครื่องมือวัดนั้นมีความน่าเชื่อถือ

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

- | | |
|---|-----------|
| 1. เครื่องจำลองพัลส์การดิสชาร์จบางส่วน
(HAEFLY PD CALIBRATOR TYPE 451) | 1 เครื่อง |
| 2. ตัวต้านทานรั้ความเหนี่ยวนำขนาด 50 Ω | 1 ตัว |
| 3. ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ | 1 ตัว |
| 4. ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศเป็นแกนเฟอร์ไรท์ | 1 ตัว |
| 5. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Picoscope) | 1 เครื่อง |
| 6. สายโคแอกเซียล (Coaxial cable RG-8) | 2 เส้น |

4.2.2 การติดตั้งวงจรการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

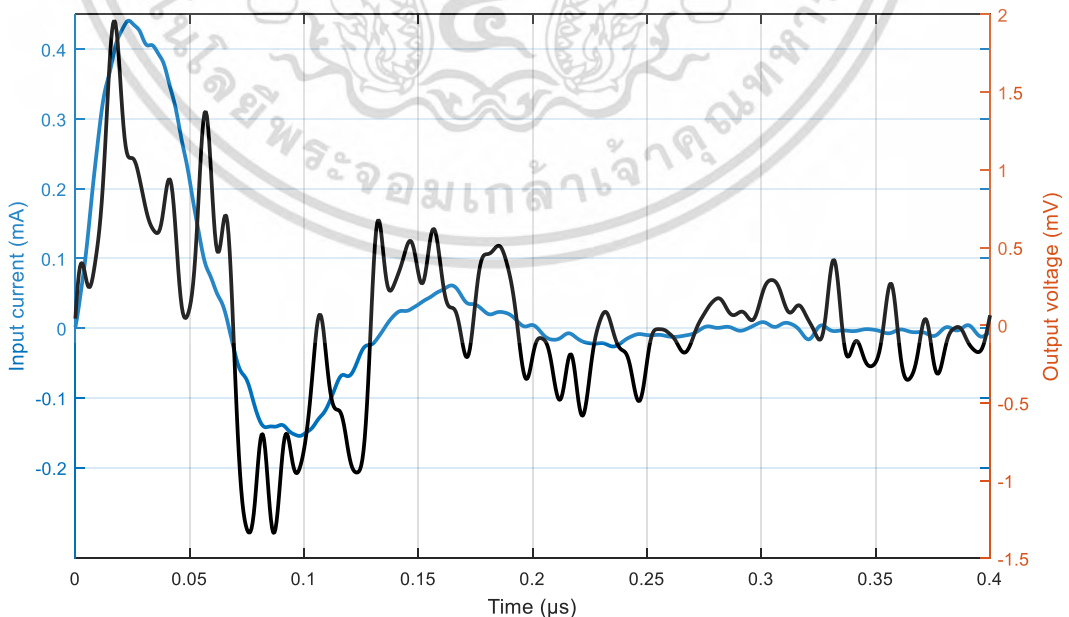
ในวงจรการทดสอบ เครื่องจำลองการดิซชาร์จบางส่วนถูกนำมาเป็นแหล่งจ่ายพัลส์การดิซชาร์จบางส่วน ซึ่งจะปรับระดับประจุตั้งแต่ 10 pC 20 pC 50 pC 100 pC และ 200 pC ตามลำดับ โดยที่แหล่งจ่ายพัลส์จะถูกนำมาต่อขนานกับมีตัวต้านทานไว้ความเหนี่ยวนำขนาด 50 Ω และจากนั้นนำตัวแปลงกระแสความถี่สูงมาคล้องเพื่อวัดกระแสพัลส์ที่ไหลผ่านตัวต้านทานดังกล่าว ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

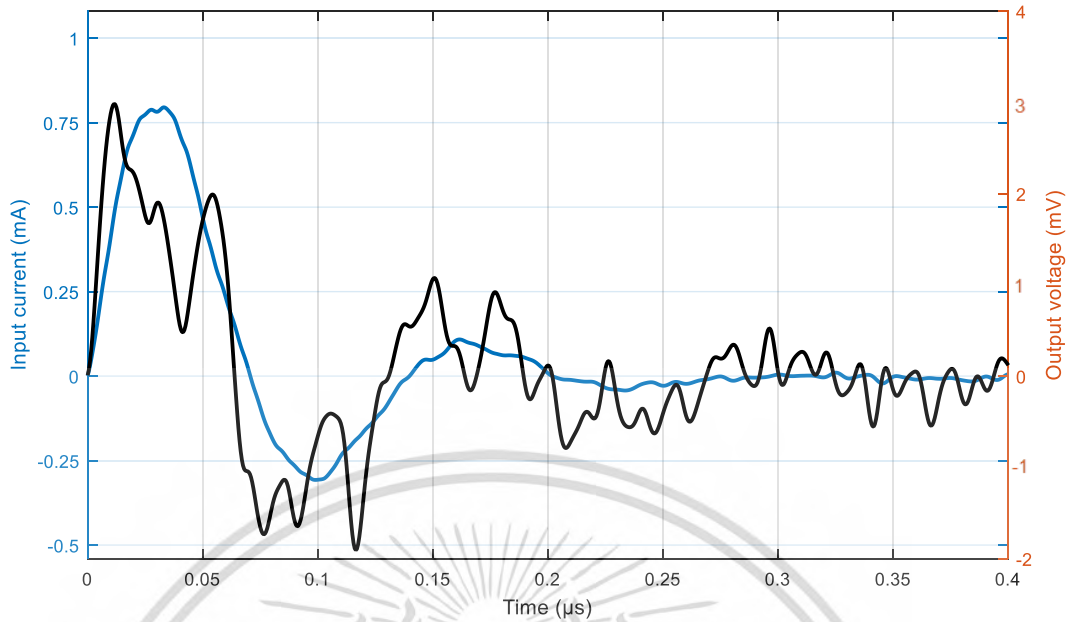
4.2.3 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

จากการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสอินพุตที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านทานไว้ความเหนี่ยวนำ (กราฟสีน้ำเงิน) และรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดจากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ (กราฟสีดำ) ที่ระดับประจุต่าง ๆ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.7 - 4.11

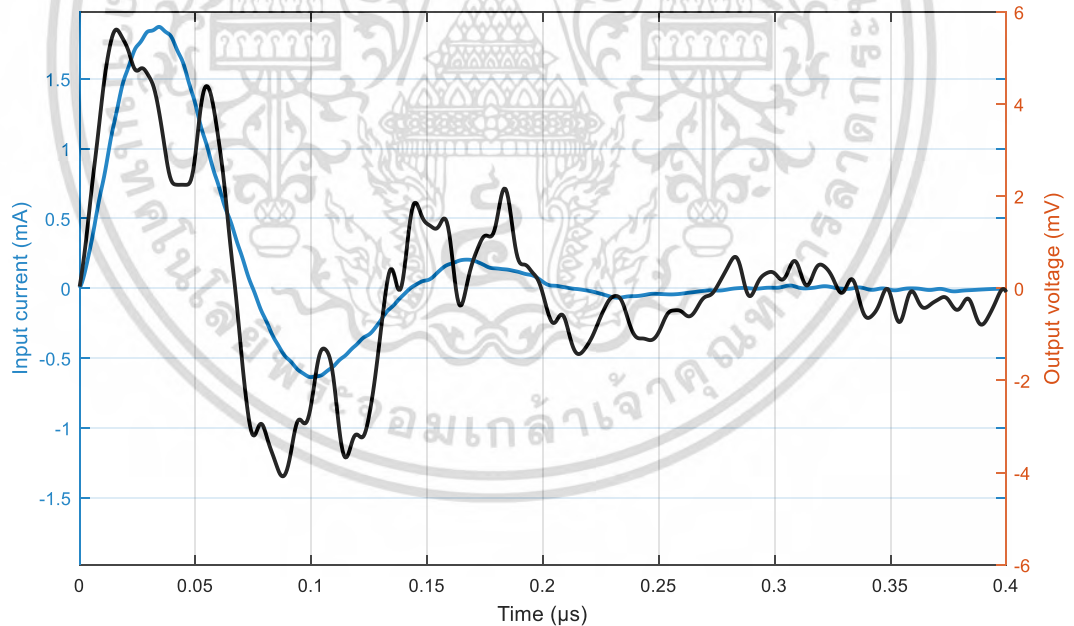


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีดำ)

ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ที่ระดับประจุ 10 pC เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

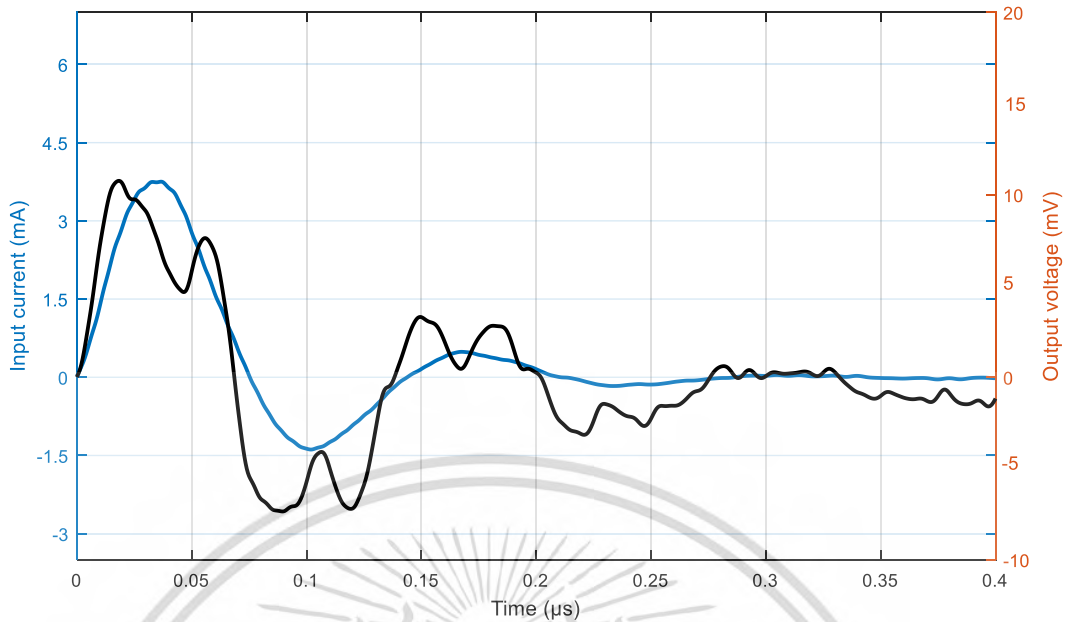


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีดำ) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ที่ระดับประจุ 20 pC

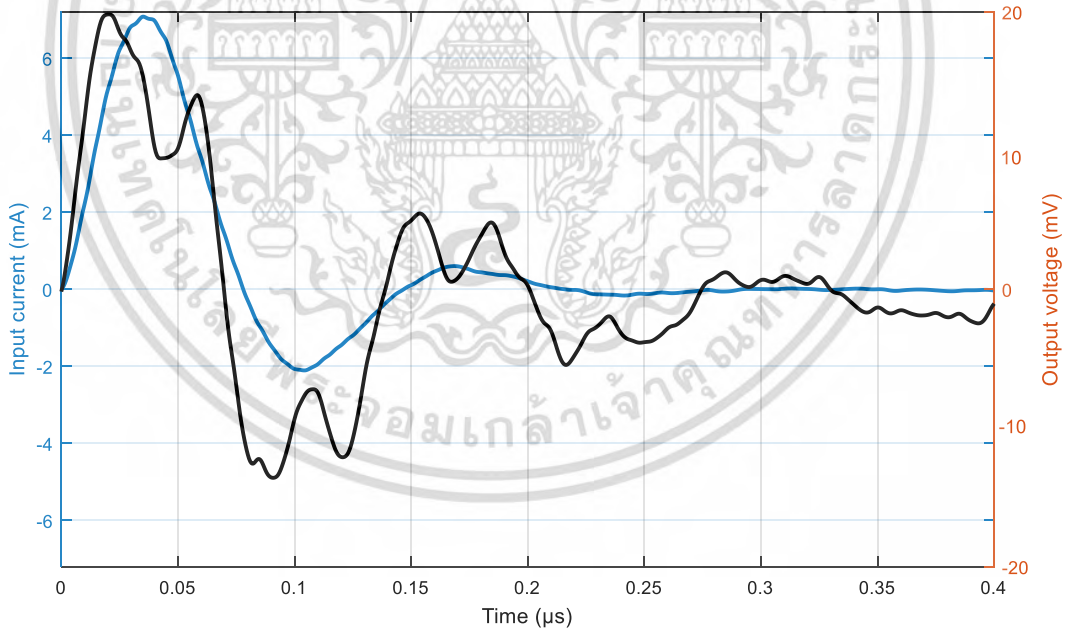


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีดำ) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ที่ระดับประจุ 50 pC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีดำ) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ที่ระดับประจุ 100 pC



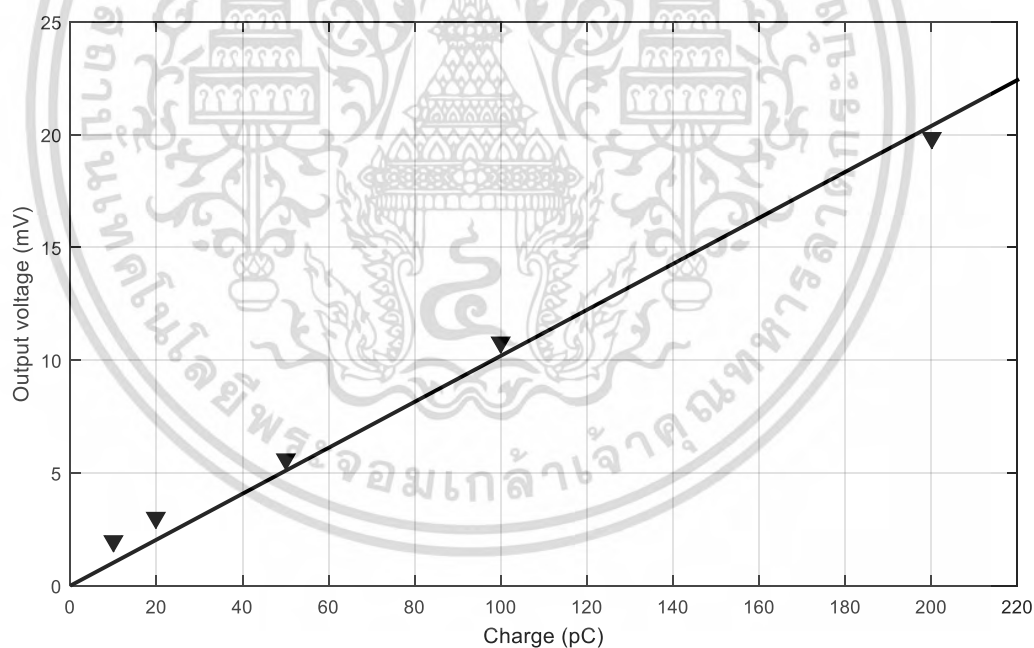
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีดำ) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ที่ระดับประจุ 200 pC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

ประจุที่ป้อน (pC)	ค่าสูงสุดของกระแสอินพุต (mA)	ค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุต (mV)
10	0.44	1.96
20	0.8	2.98
50	1.87	5.62
100	3.75	10.76
200	7.08	19.83

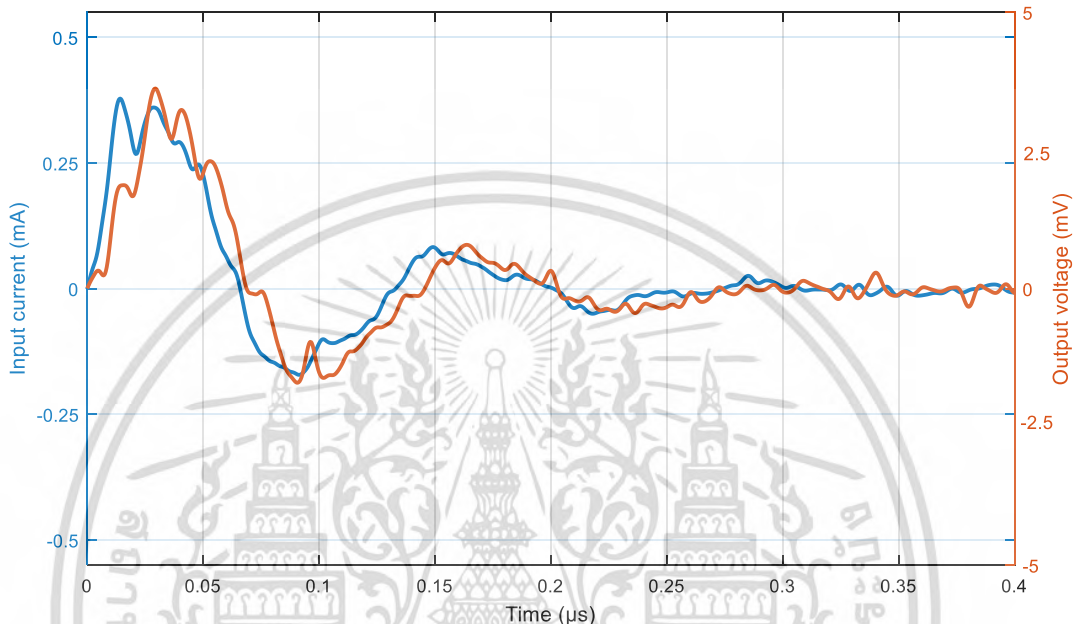
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสูงสุดของกระแสอินพุตที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ และ ค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ที่ระดับประจุต่าง ๆ นอกจากนี้เมื่อนำค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตกับระดับประจุที่ป้อนมาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.12 โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น



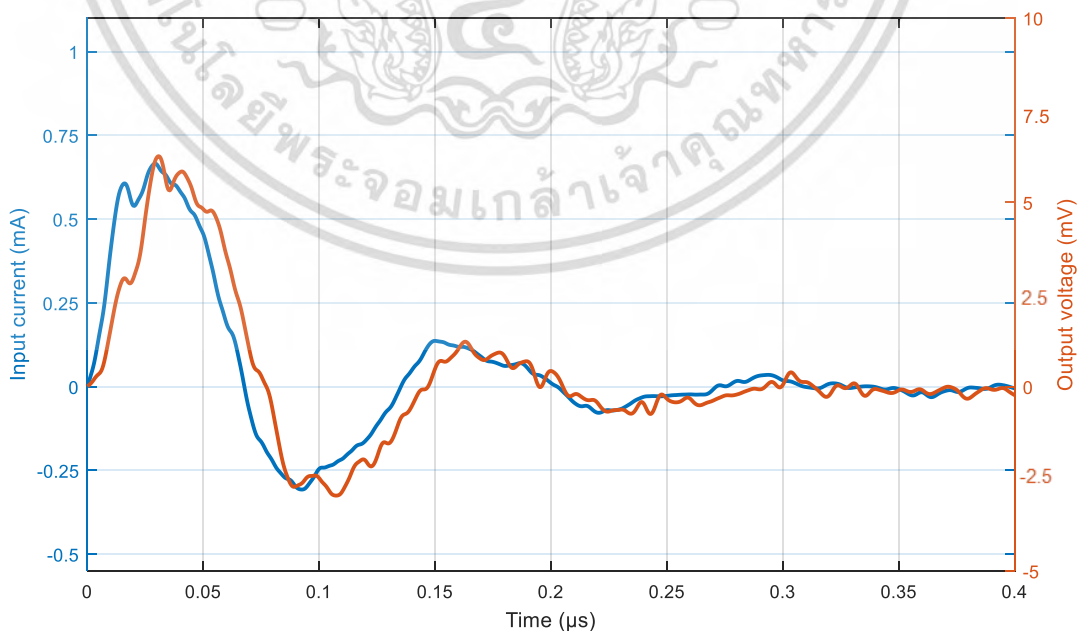
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

4.2.4 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

จากการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสอินพุตที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (กราฟสีน้ำเงิน) และรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดจากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ (กราฟสีแดง) ที่ระดับประจุต่าง 10 pC 20 pC 50 pC 100 pC 200 pC ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.13 – 4.17

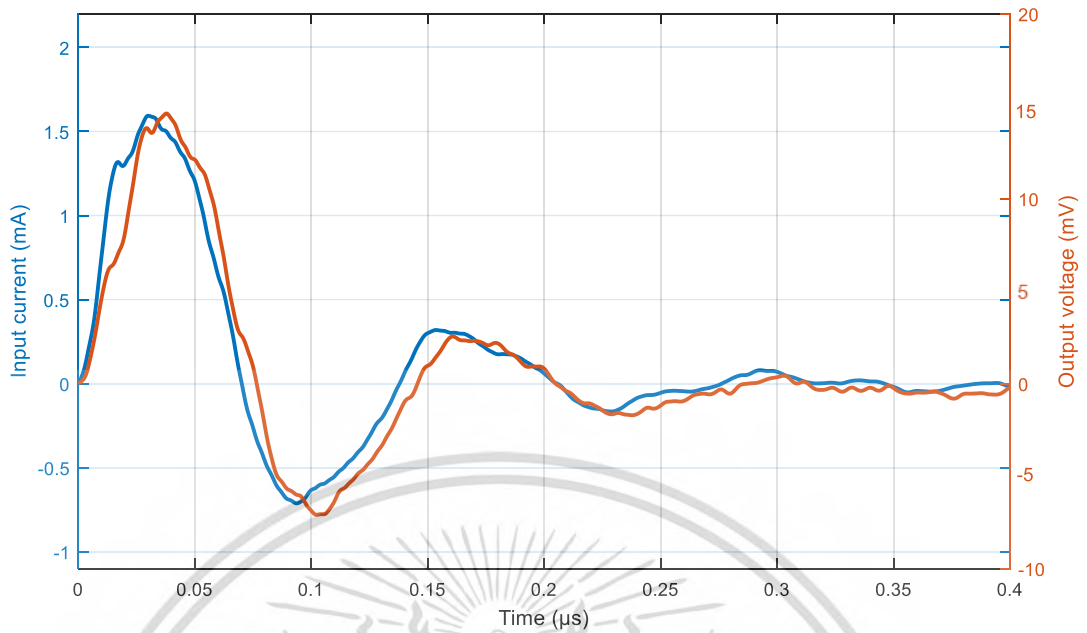


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ที่ระดับประจุ 10 pC

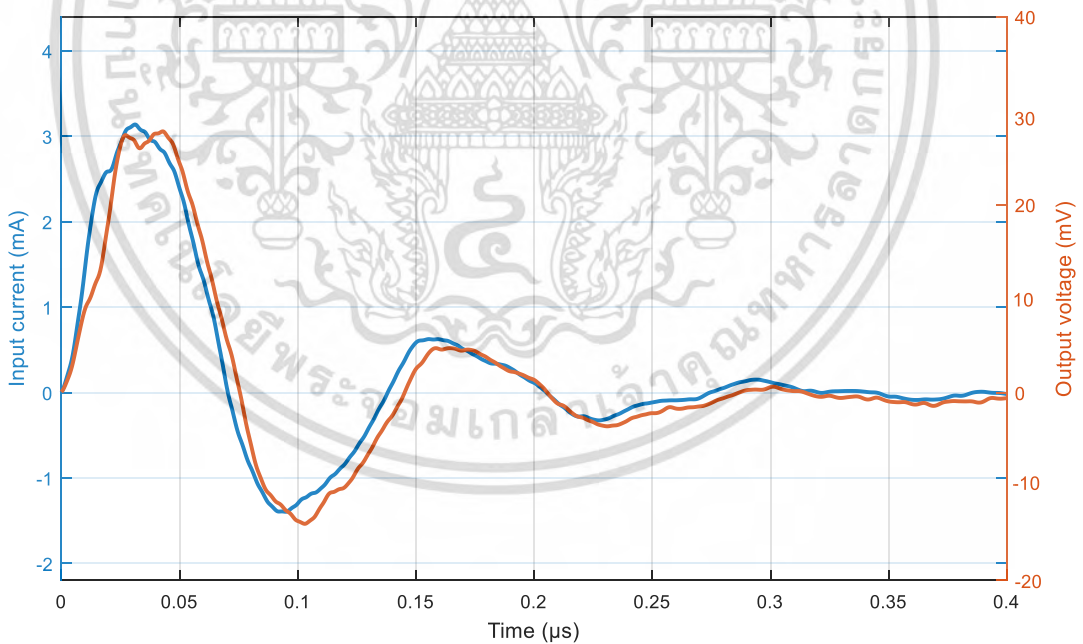


รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง)

ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ที่ระดับประจุ 20 pC

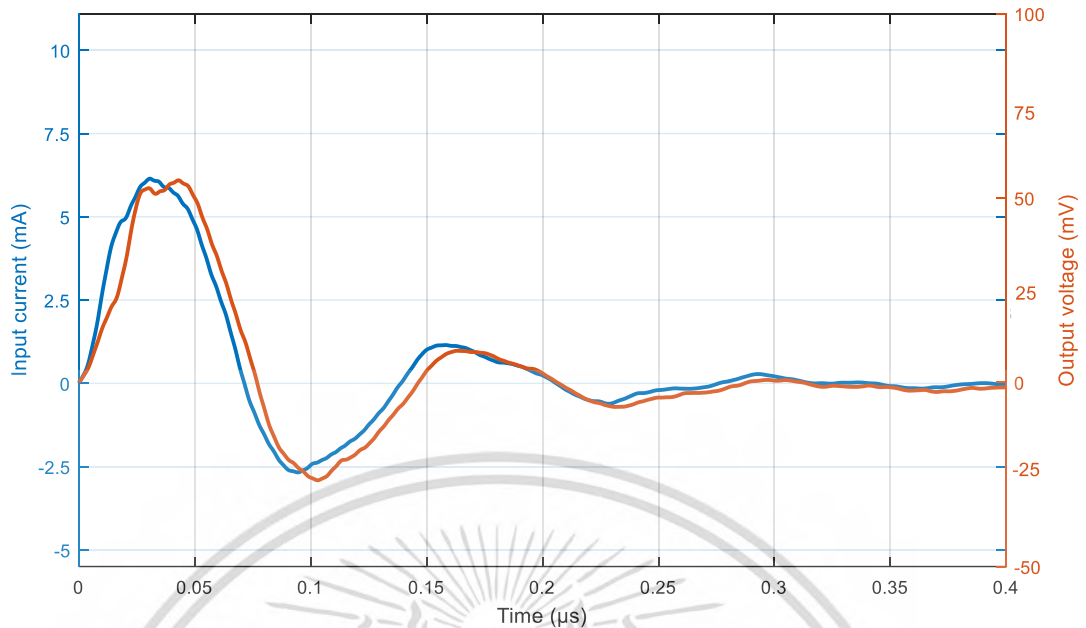


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ที่ระดับประจุ 50 pC



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ที่ระดับประจุ 100 pC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

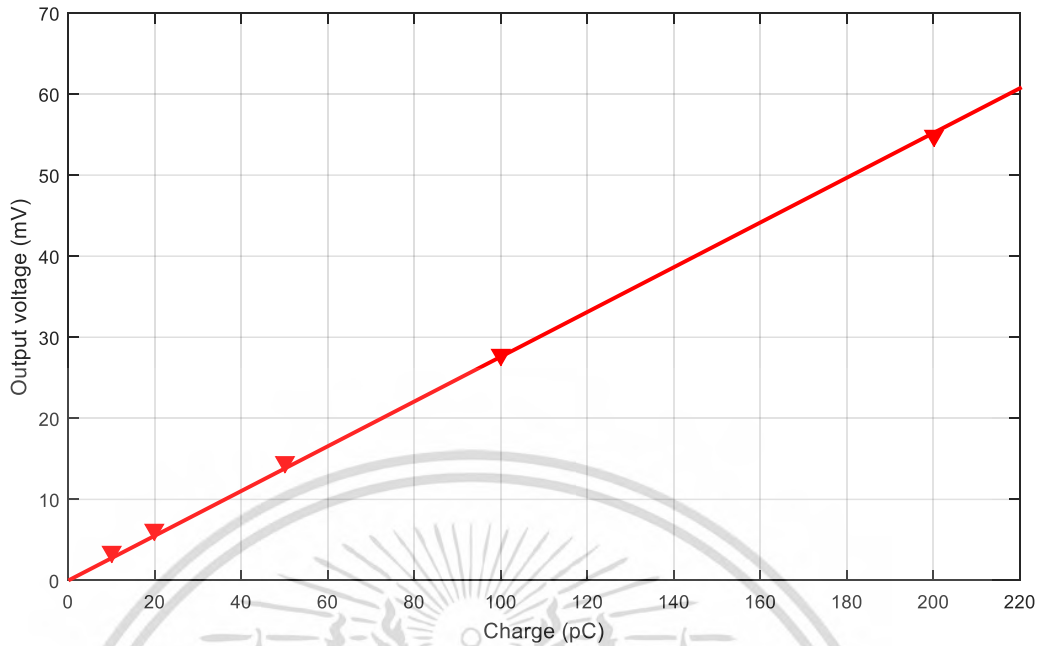


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ที่ระดับประจุ 200 pC

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

ประจุที่ป้อน (pC)	กระแสอินพุต (mA)	แรงดันเอาต์พุต (mV)
10	0.38	3.62
20	0.67	6.25
50	1.59	14.61
100	3.14	27.80
200	6.15	54.79

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสูงสุดของกระแสอินพุตที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ และ ค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ที่ระดับประจุต่าง ๆ นอกจากนี้เมื่อนำค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตกับระดับประจุที่ป้อนมาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.18 โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

4.3 การทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

ระดับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบวัดเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วน ซึ่งมาตรฐาน IEC 60270 ได้กำหนดให้ระดับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบต้องไม่สูงเกินกว่าครึ่งหนึ่งของระดับประจุการดิซชาร์จบางส่วนที่ตรวจพบ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อทำการทดสอบการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดิน พบว่า ระดับประจุการดิซชาร์จบางส่วนมีค่าเท่ากับ 10 pC ดังนั้นระดับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นต้องต่ำกว่า 5 pC ถึงจะถือว่าเครื่องมือวัดนั้นมีความน่าเชื่อถือ

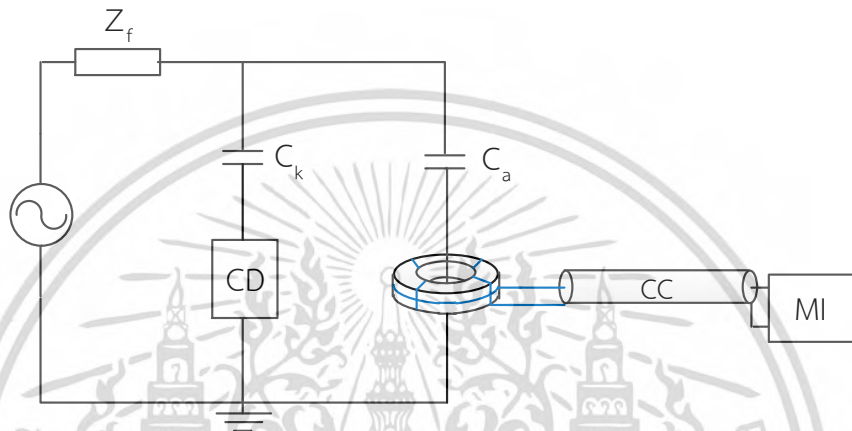
4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

1. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงพิกัด 75 kV 40kVA 1 ตัว
2. อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการดิซชาร์จบางส่วน (Coupling capacitor ; C_k)
ขนาด 1 nF พิกัด 100 kV 1 ตัว
3. ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ 1 ตัว
4. ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ 1 ตัว
5. อุปกรณ์จำลองการเกิดดิซชาร์จบางส่วน 1 ตัว

4.3.2 การติดตั้งวงจรการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

ในการติดตั้งวงจรการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนจะติดตั้งวงจรทดสอบเหมือนกับการทดสอบการเกิดดิซชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.19 โดยตัวแปลงกระแสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

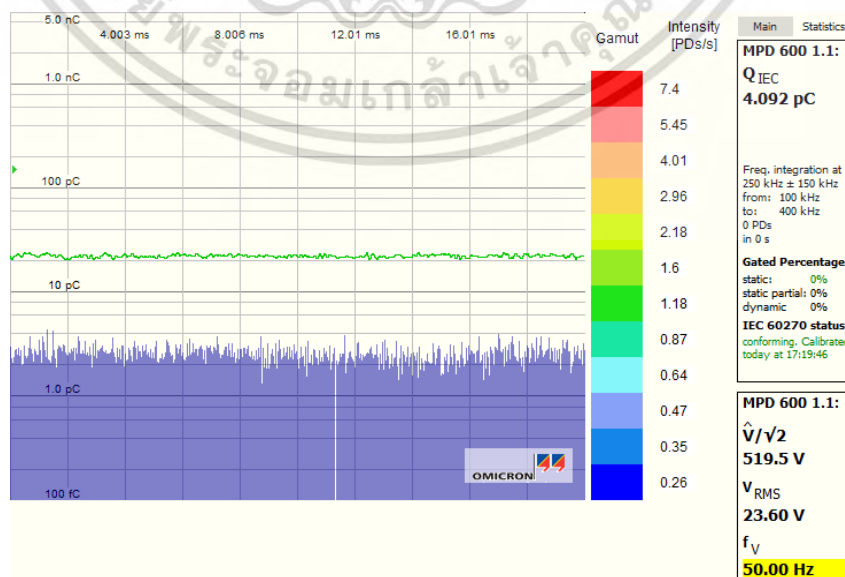
ความถี่สูงจะถูกนำมาคล่องบริเวณตัวนำไฟฟ้าที่ต่อลงกราวด์ ซึ่งตัวแปลงกระแสความถี่สูงนี้จะเชื่อมต่อกับตัวกรองสัญญาณ (Omicron mtronix technology MPD 600) และแสดงผลการทดสอบด้วยโปรแกรม OMICRON Software for MPD ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล นอกจากนี้ก่อนจะทำการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ จะต้องทำการปรับเทียบระบบวัดก่อนเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการตรวจวัด โดยทำการปรับเทียบด้วยพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนจำลองจากอุปกรณ์จำลองการดิสชาร์จบางส่วน (PD pulse calibrator) ที่ระดับประจุเท่ากับ 10 pC



รูปที่ 4.19 วงจรการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

4.3.3 ผลการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

จากการทดสอบพบว่า ระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศมีค่าต่ำกว่า 5 pC ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.20

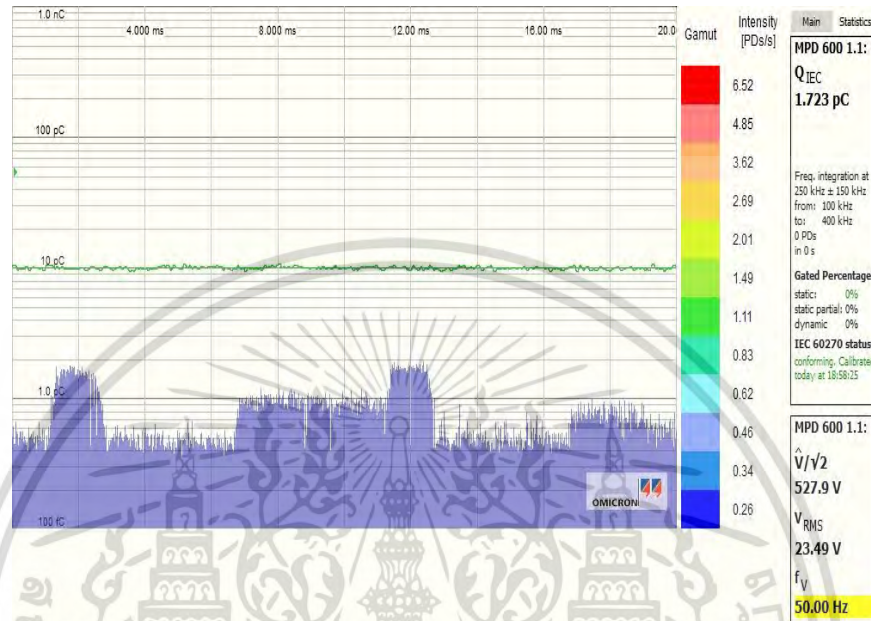


รูปที่ 4.20 ระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ เพื่อการใช้งานเฉพาะเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เข้าเว็บไซต์ของบริษัทฯ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

จากการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์พบว่า ระดับสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำกว่า 2 pC ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

จากการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ การทดสอบความเป็นเชิงเส้นและการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงทั้ง 2 ประเภทที่กล่าวมาในข้างต้นพบว่า ในการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศมีอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันต่ำกว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ และช่วงความถี่ในการทำงานของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศแคบกว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์อีกด้วย ส่วนในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นพบว่า ตัวแปลงกระแสความถี่สูงทั้ง 2 ประเภทมีความเป็นเชิงเส้น แต่รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตจากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศมีลักษณะแตกต่างจากรูปคลื่นกระแสอินพุต ซึ่งตรงกันข้ามกับจากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ กล่าวคือรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตจากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นกระแสอินพุต และจากการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนพบว่า ระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์มีค่าต่ำกว่าระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ในการทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิสชาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบรูปแบบการเกิดดิซาร์จบางส่วน

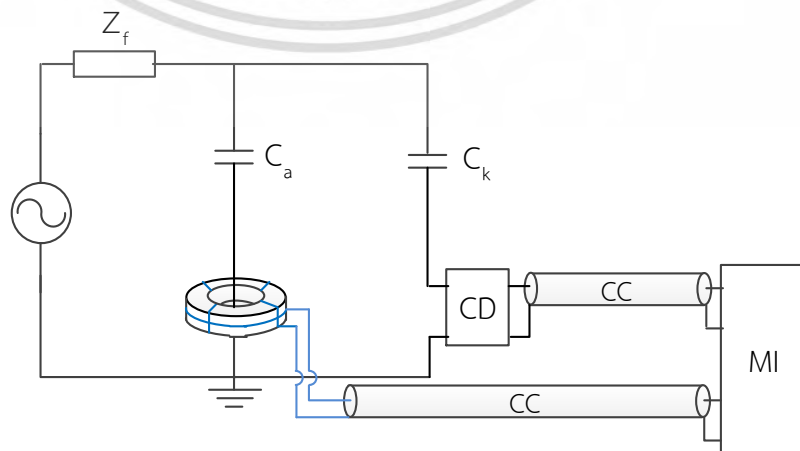
ในการทดสอบรูปแบบการเกิดดิซาร์จบางส่วน จะทำการเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบการเกิดดิซาร์จบางส่วนที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์กับรูปแบบการเกิดดิซาร์จบางส่วนที่ตรวจจับด้วยวิธีการตามมาตรฐานสากล

4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบรูปแบบการเกิดดิซาร์จบางส่วน

- | | |
|--|--------|
| 1. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงพิกัด 75 kV 40kVA | 1 ตัว |
| 2. ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor ; C_k)
ขนาด 1 nF พิกัด 100 kV | 1 ตัว |
| 3. อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการเกิดดิซาร์จบางส่วน (Coupling device ; CD) | |
| 4. ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ | 1 ตัว |
| 5. อุปกรณ์จำลองการเกิดดิซาร์จบางส่วน | 1 ตัว |
| 6. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Picoscope) | |
| 7. สายโคแอกเซียล (Coaxial cable RG-8) | 2 เส้น |

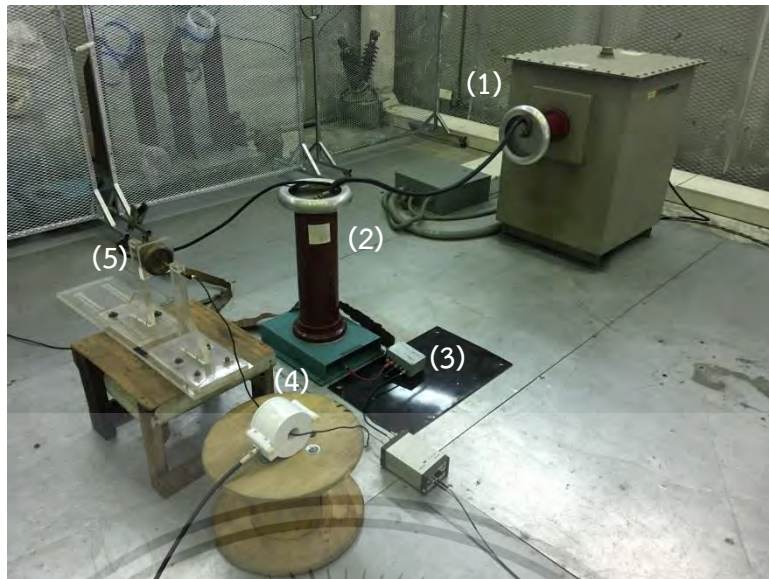
4.4.2 การติดตั้งวงจรการทดสอบรูปแบบการเกิดดิซาร์จบางส่วน

วงจรการทดสอบรูปแบบการเกิดดิซาร์จบางส่วนจะประกอบด้วยหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz ให้กับอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบ (C_a) ซึ่งในการทดสอบนี้จะแทนอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบด้วยอุปกรณ์จำลองการเกิดดิซาร์จบางส่วนแต่ละประเภท ซึ่งประกอบด้วย การจำลองการเกิดดิซาร์จแบบโคโรนาด้านแรงต่ำ การจำลองการเกิดดิซาร์จแบบโคโรนาด้านแรงสูง การจำลองการเกิดดิซาร์จตามผิว และการจำลองการเกิดดิซาร์จภายใน ส่วนตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k) และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการเกิดดิซาร์จบางส่วน (CD) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล และตัวแปลงกระแสความถี่สูงจะถูกนำมาคล้องบริเวณตัวนำที่ต่อลงกราวด์ของอุปกรณ์จำลองการเกิดดิซาร์จบางส่วนเพื่อวัดกระแสของการเกิดดิซาร์จบางส่วนจริง โดยแสดงดังรูปที่ 4.22 และ 4.23



รูปที่ 4.22 วงจรการทดสอบเปรียบเทียบรูปแบบการเกิดดิซาร์จบางส่วน (จำลอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 วงจรการทดสอบเปรียบเทียบรูปแบบการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน (จริง)

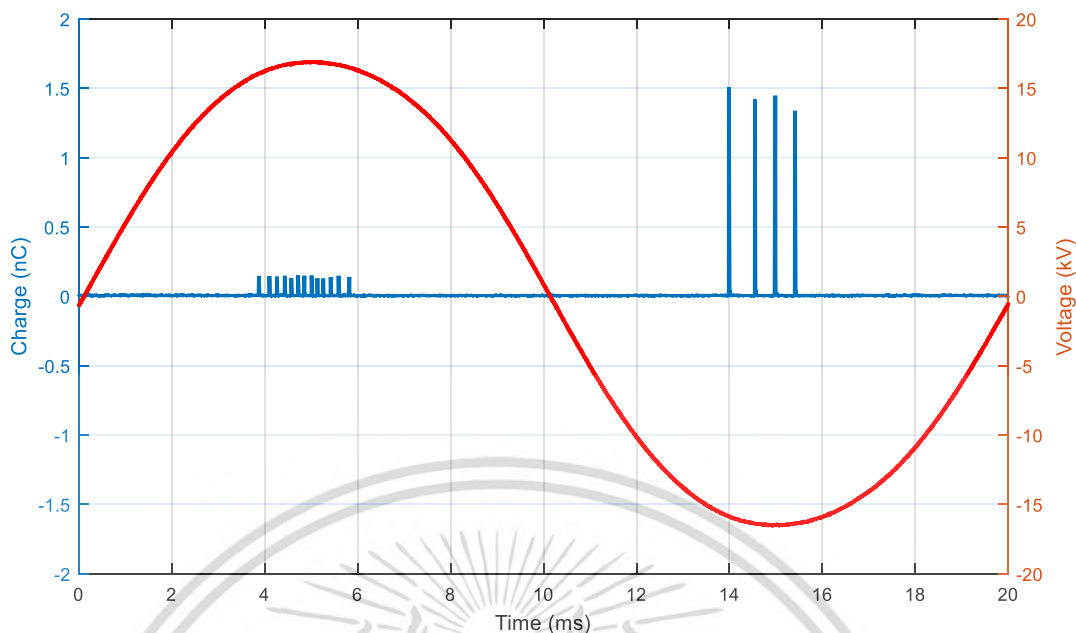
- 1) หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงพิกัด 75 kV 40kVA
- 2) ตัวเก็บประจุคัปเปิล (Coupling capacitor ; C_k)
- 3) อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Coupling device ; CD)
- 4) ตัวแปลงกระแสความถี่สูง
- 5) อุปกรณ์จำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

4.4.3 ผลการทดสอบรูปแบบการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

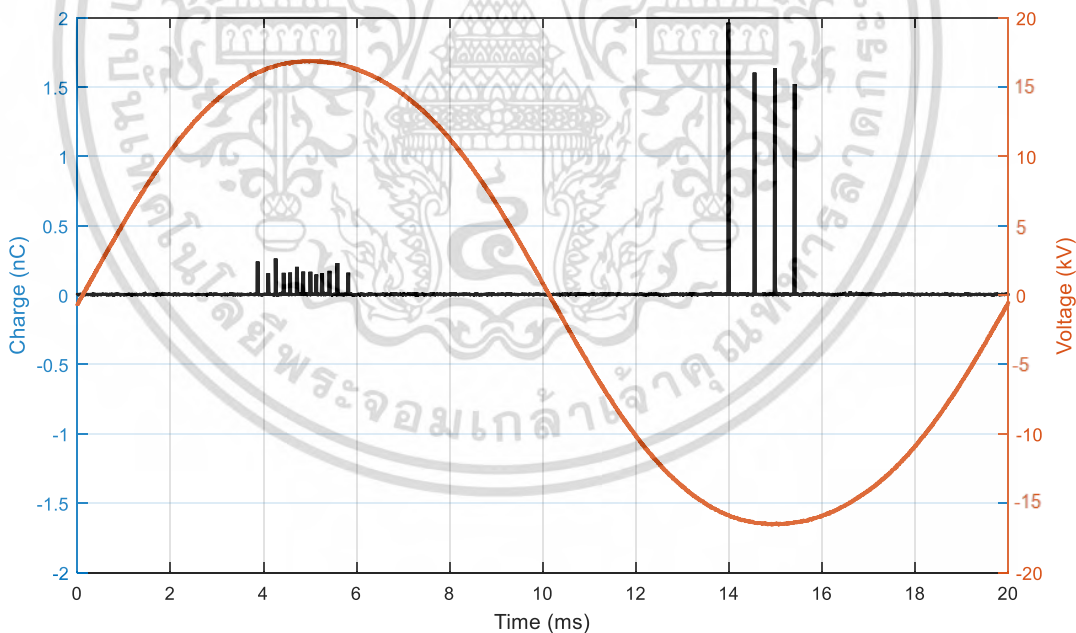
1) การเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาด้านแรงต่ำ

จากการทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงต่ำที่ตรวจจับด้วยวิธีตามมาตรฐานสากลพบว่า ที่ระดับแรงดัน 12 kV จะเกิดพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนบริเวณมุม 90° และ 270° ของรูปคลื่นไซน์ซึ่งขนาดของพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนบริเวณมุม 270° มีค่าสูงกว่ามุม 90° และขนาดพัลส์ของแต่ละมุมจะมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.24

ส่วนการทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาด้านแรงต่ำที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์พบว่า ที่ระดับแรงดัน 12 kV จะเกิดพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนบริเวณมุม 90° และ 270° ของรูปคลื่นไซน์ ซึ่งขนาดของพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนบริเวณมุม 90° จะมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่บริเวณมุม 270° มีพัลส์หนึ่งที่สูงกว่าพัลส์อื่น ๆ และขนาดพัลส์บริเวณมุม 270° มีค่าสูงกว่ามุม 90° ซึ่งมีรูปแบบเหมือนกับการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จแบบโคโรน่าด้านแรงต่ำ
ที่ตรวจจับด้วยวิธีตามมาตรฐานสากล

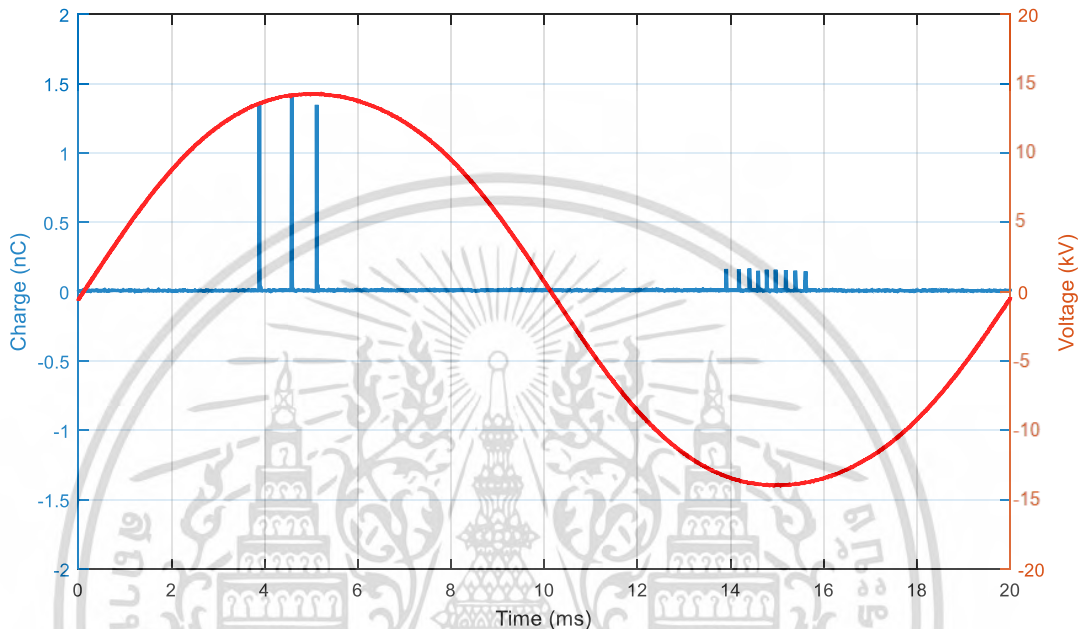


รูปที่ 4.25 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จแบบโคโรน่าด้านแรงต่ำ
ที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

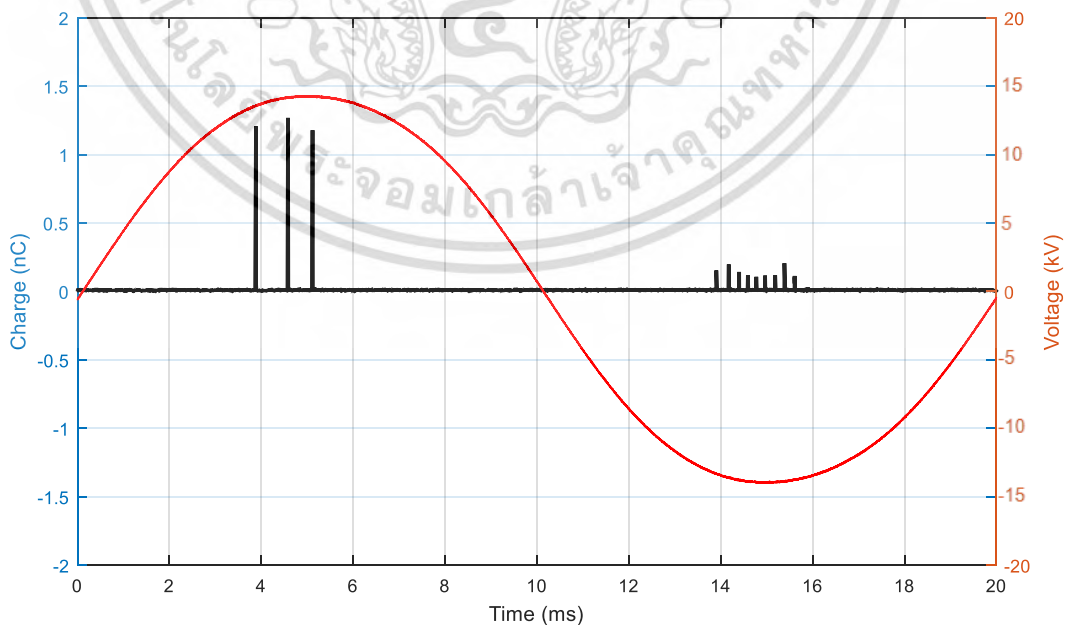
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาด้านแรงสูง

จากการทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาด้านแรงสูงที่ตรวจจับด้วยวิธีการตามมาตรฐานสากลพบว่า ที่ระดับแรงดัน 10.14 kV จะเกิดพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนบริเวณมุม 90° และ 270° ซึ่งขนาดของพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนบริเวณมุม 90° มีค่าสูงกว่ามุม 270° โดยที่ขนาดพัลส์ของแต่ละมุมจะมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงสูง
ที่ตรวจจับด้วยวิธีตามมาตรฐานสากล



รูปที่ 4.27 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงสูง

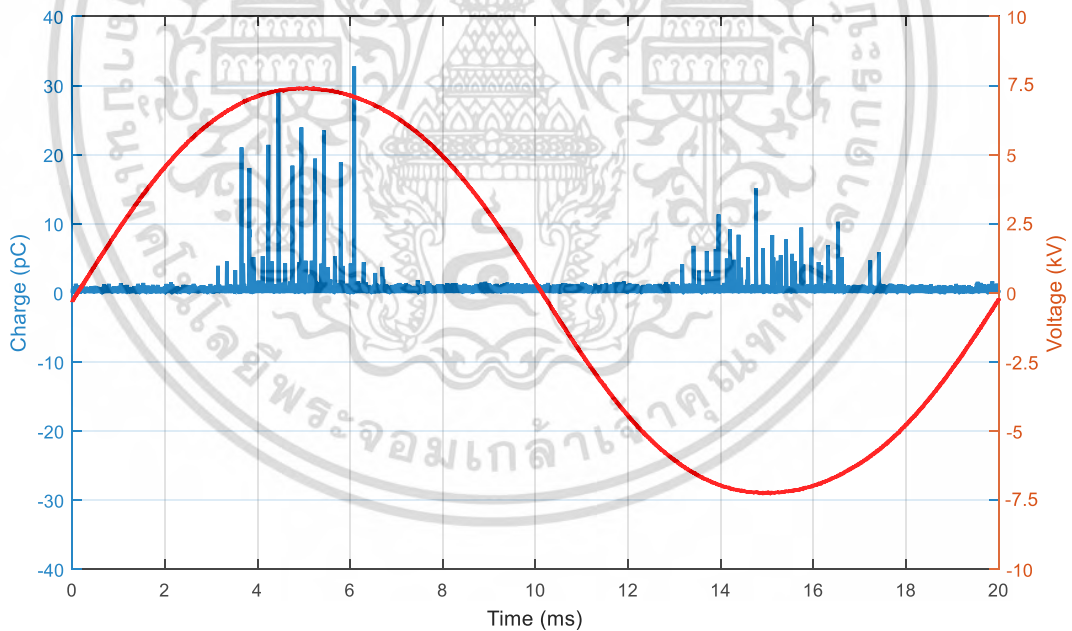
ที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกวีเชิงนิพจน์การศึกษาก็ให้ นามไม่มีผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์นโยบายด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในรูปที่ 4.27 แสดงรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาด้านแรงสูงที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ ซึ่งที่ระดับแรงดัน 10.14 kV จะเกิดพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนบริเวณมุม 90° และ 270° โดยที่ขนาดของพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนบริเวณมุม 90° มีค่าสูงกว่ามุม 270° และขนาดพัลส์ของแต่ละมุมจะมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งมีรูปแบบเหมือนกับการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล

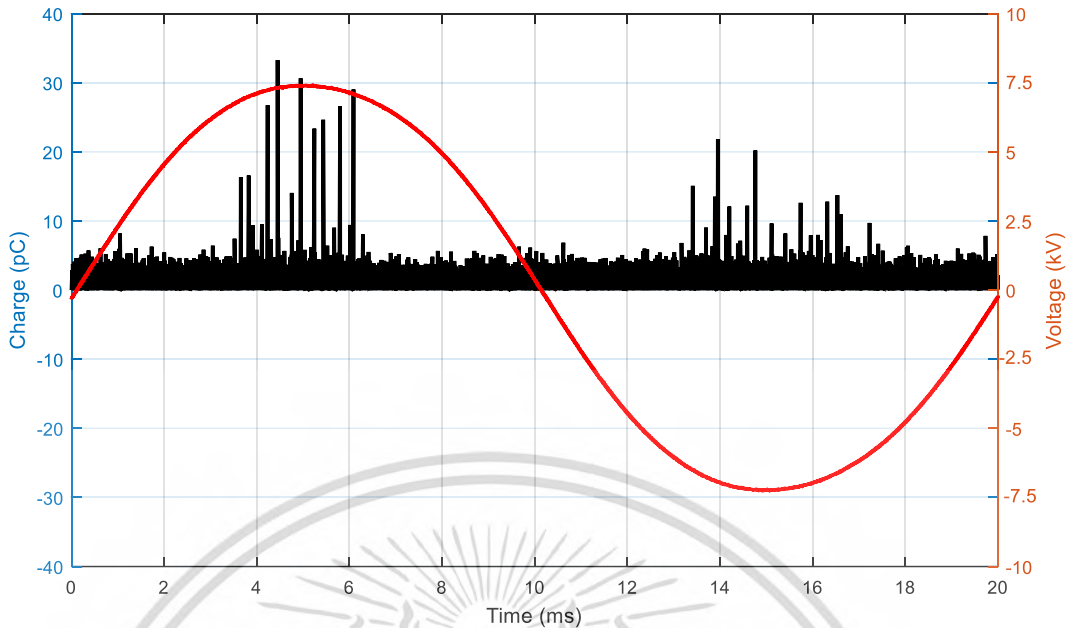
3) การเกิดดิสชาร์จตามผิว

จากการทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จตามผิวที่ตรวจจับด้วยวิธีการตามมาตรฐานสากลพบว่า ที่ระดับแรงดัน 5.26 kV จะเกิดพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนบริเวณมุม 90° และ 270° โดยที่ลักษณะพัลส์ของทั้ง 2 มุมจะมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างหนาแน่น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.28

ส่วนการทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จตามผิวที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์พบว่า ที่ระดับแรงดัน 5.26 kV จะเกิดพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนบริเวณมุม 90° และ 270° ซึ่งพัลส์ของทั้ง 2 มุมจะมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างหนาแน่นเหมือนกับการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.29



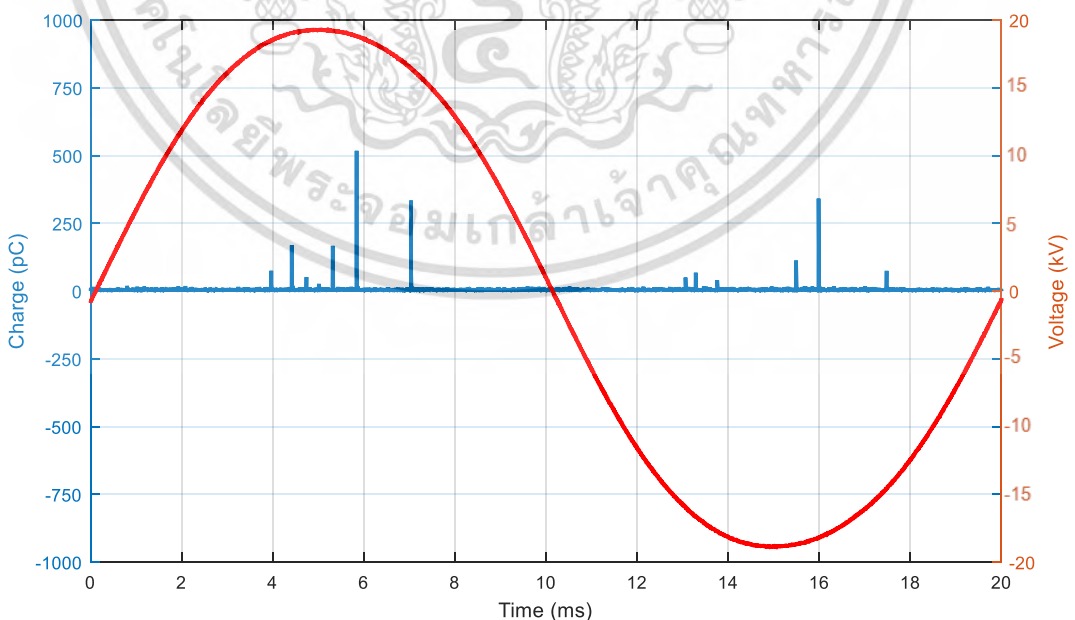
รูปที่ 4.28 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จตามผิวที่ตรวจจับด้วยวิธีตามมาตรฐานสากล



รูปที่ 4.29 รูปแบบการเกิดดิซาร์จตามผิวที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

4) การดิซาร์จภายใน

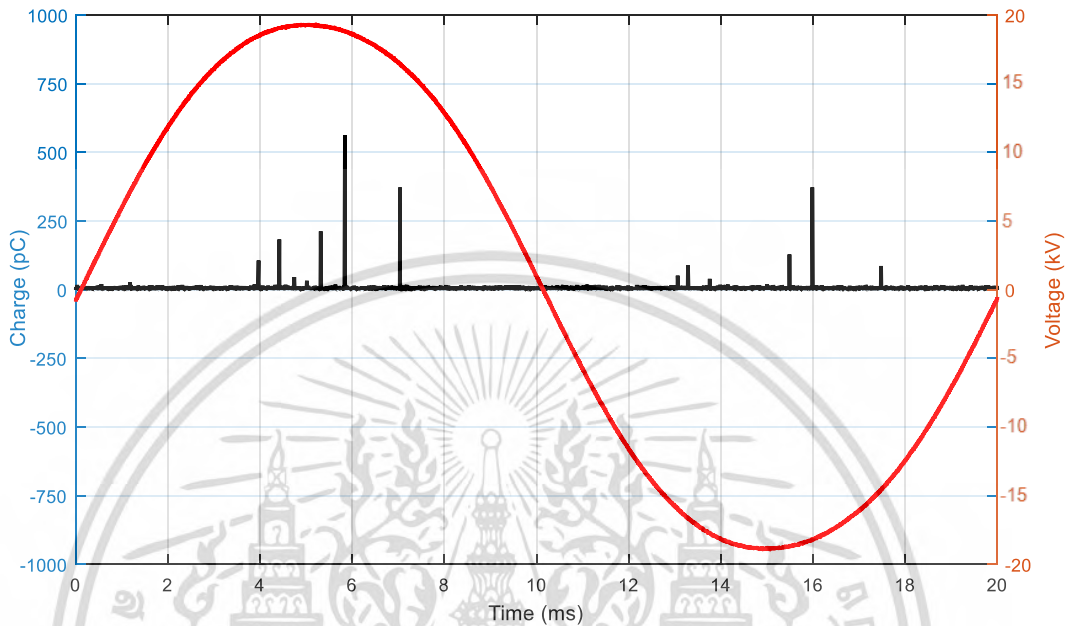
จากการทดสอบรูปแบบการเกิดดิซาร์จภายในที่ตรวจจับด้วยวิธีการตามมาตรฐานสากลพบว่า ที่ระดับแรงดัน 13.71 kV จะเกิดพัลส์การดิซาร์จบางส่วนบริเวณมุม 90° และ 270° ซึ่งพัลส์ของทั้ง 2 มุมจะมีการกระจายตัวที่ไม่หนาแน่น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 รูปแบบการเกิดดิซาร์จภายในที่ตรวจจับด้วยวิธีตามมาตรฐานสากล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนจากการทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จภายในที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์พบว่า ที่ระดับแรงดัน 13.71 kV จะเกิดพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนบริเวณมุม 90° และ 270° ซึ่งพัลส์ของทั้ง 2 มุมจะมีการกระจายตัวที่ไม่หนาแน่น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จภายในที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

4.5 การทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิสชาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

ในการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิสชาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง จะทำการเปรียบเทียบระหว่างกระแสการดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำกับแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์

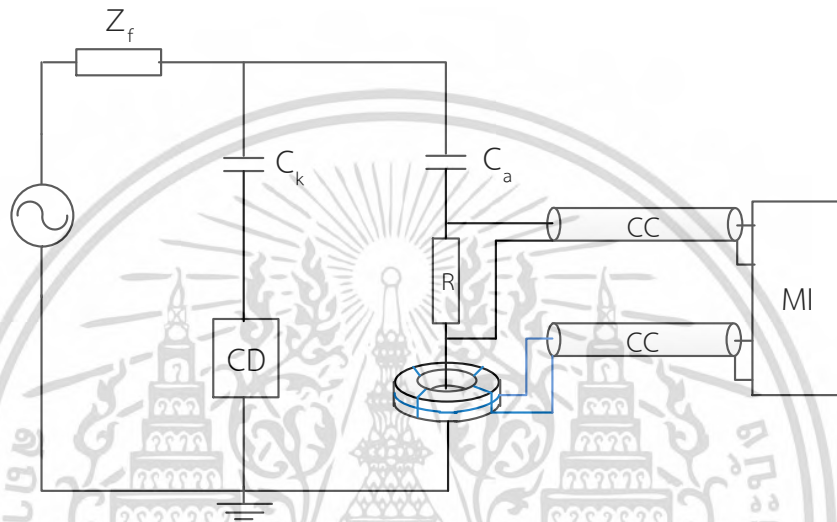
4.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิสชาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

- | | |
|--|--------|
| 1. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงพิกัด 75 kV 40kVA | 1 ตัว |
| 2. ตัวต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำขนาด 50Ω | 1 ตัว |
| 3. ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ | 1 ตัว |
| 4. อุปกรณ์จำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน | 1 ตัว |
| 5. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Picoscope) | |
| 6. สายโคแอกเซียล (Coaxial cable RG-8) | 2 เส้น |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การติดตั้งวงจรการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิซาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

ในวงจรการทดสอบ หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงถูกนำมาเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz ให้กับอุปกรณ์จำลองการเกิดดิซาร์จบางส่วน (C_a) ส่วนตัวต้านไร้ความเหนี่ยวนำจะต่ออนุกรมกับอุปกรณ์จำลองการเกิดดิซาร์จบางส่วน และตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์จะถูกนำมาคล้องตัวนำที่ต่อลงกราวด์ของตัวต้านไร้ความเหนี่ยวนำ โดยที่วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.17



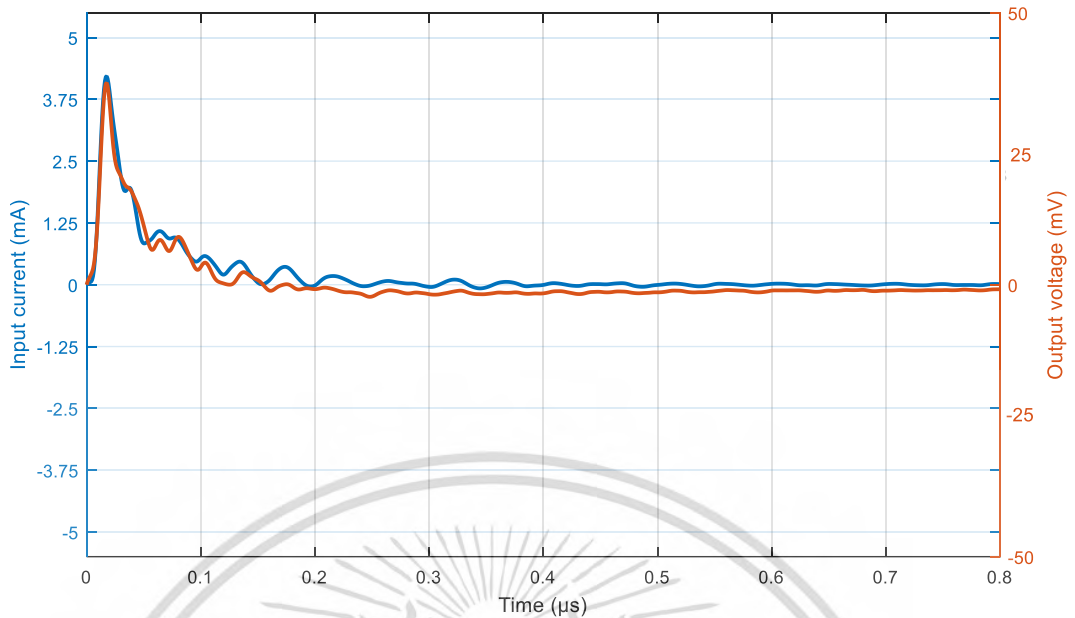
รูปที่ 4.32 วงจรการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิซาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

4.4.3 ผลการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิซาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

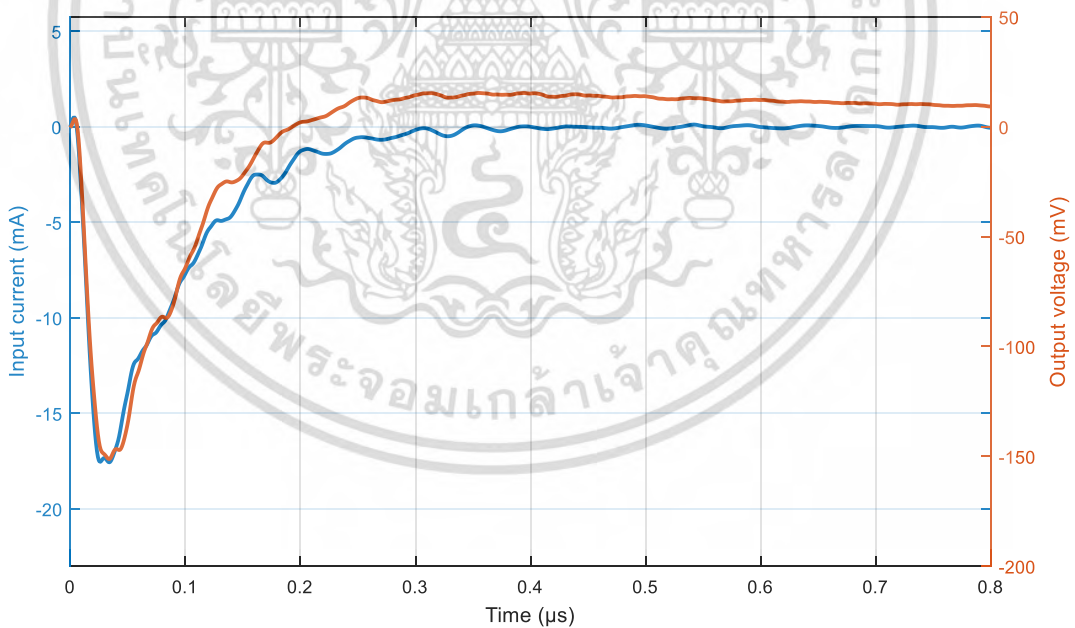
1) การเกิดดิซาร์จแบบโคโรนาด้านแรงต่ำ

จากการทดสอบพบว่า ค่าสูงสุดของรูปคลื่นกระแสการดิซาร์จแบบโคโรนาด้านแรงต่ำที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านไร้ความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์มีค่าเท่ากับ 4.22 mA และค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ มีค่าเท่ากับ 37.12 mV ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.33

ส่วนค่าต่ำสุดของกระแสการดิซาร์จแบบโคโรนาด้านแรงต่ำที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านไร้ความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์มีค่าเท่ากับ -17.57 mA และค่าต่ำสุดของแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ มีค่าเท่ากับ -151.26 mV ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิซชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงต่ำที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ (กราฟสีแดง)

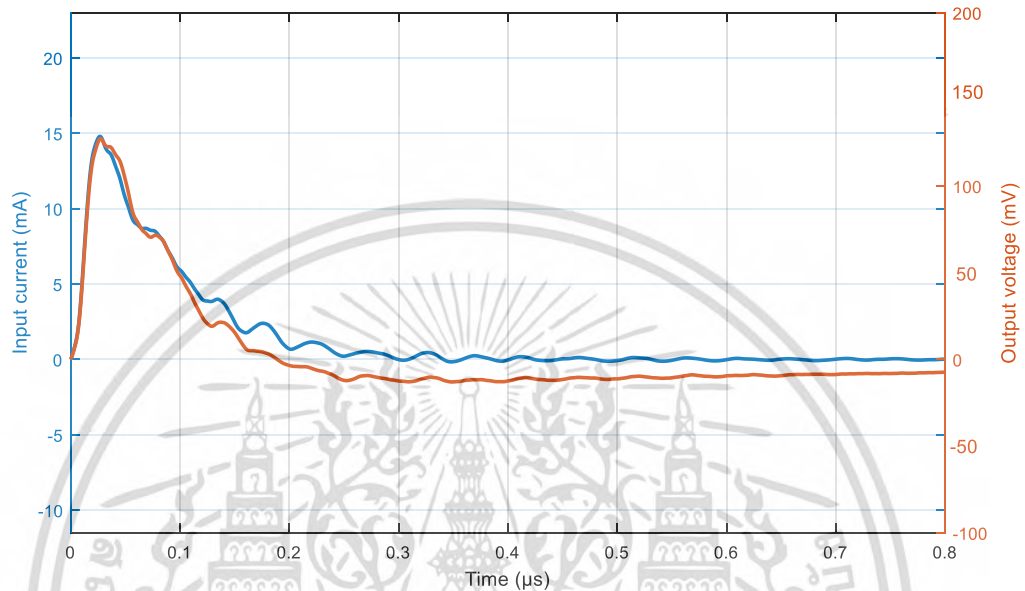


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิซชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงต่ำที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ (กราฟสีแดง)

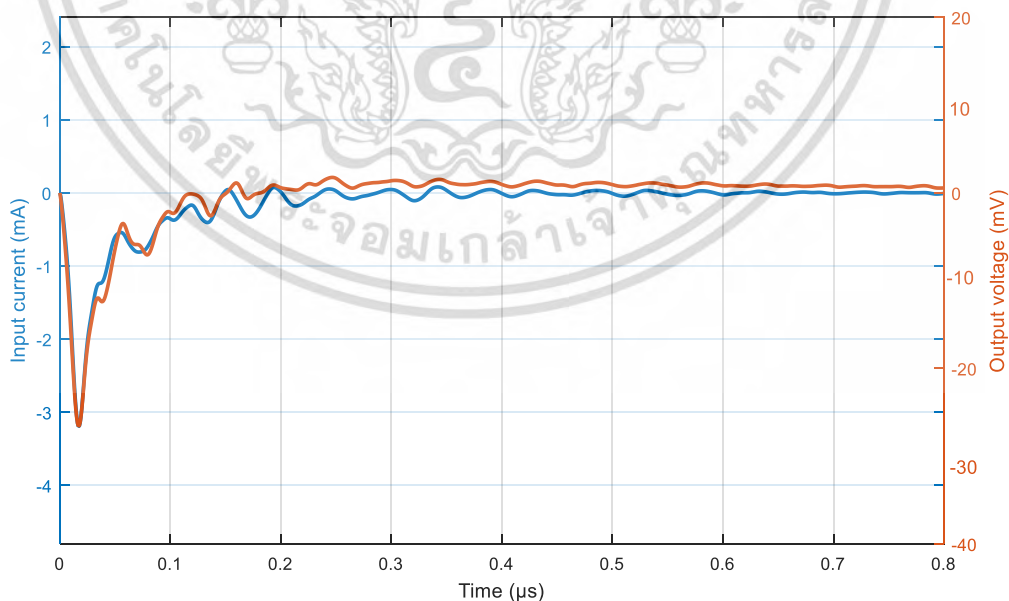
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การเกิดดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงสูง

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าสูงสุดของกระแสการดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงสูงที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านไว้ความเหนี่ยวนำ และแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ มีค่าเท่า 14.8 mA และ 127.33 mV ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงสูงที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ (กราฟสีแดง)



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงสูงที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ (กราฟสีแดง)

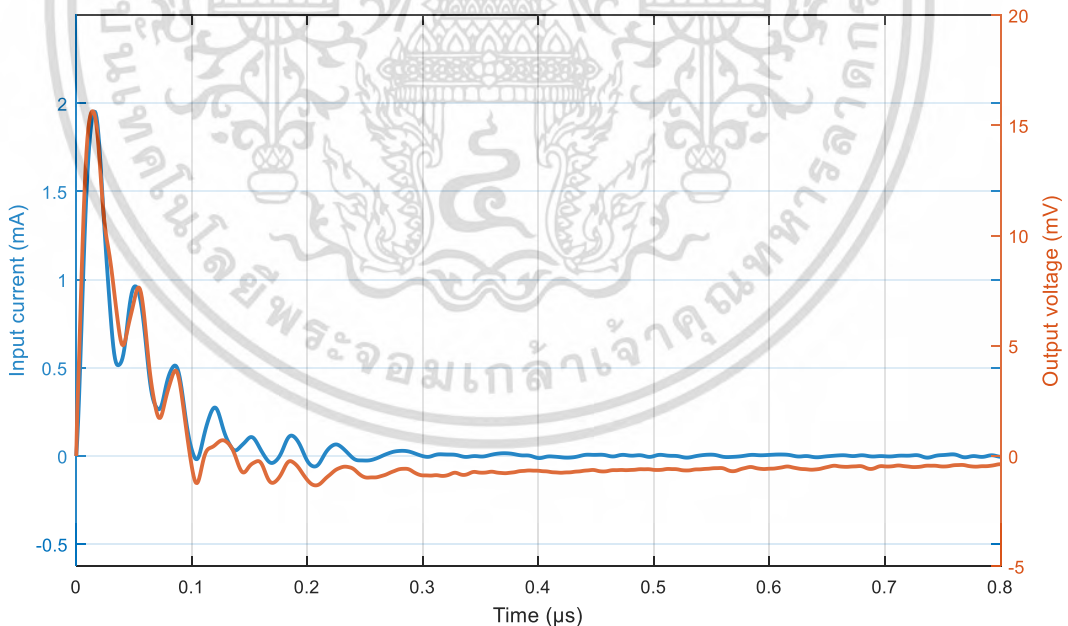
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.36 แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิซาร์จแบบโคโรน่า ด้านแรงสูงที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ กับรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ โดยที่ค่าต่ำสุดของกระแสการดิซาร์จแบบโคโรน่าด้านแรงสูงที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านไร้ความเหนี่ยวนำ และแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ มีค่าเท่ากับ -3.19 mA และ -26.57 mV ตามลำดับ

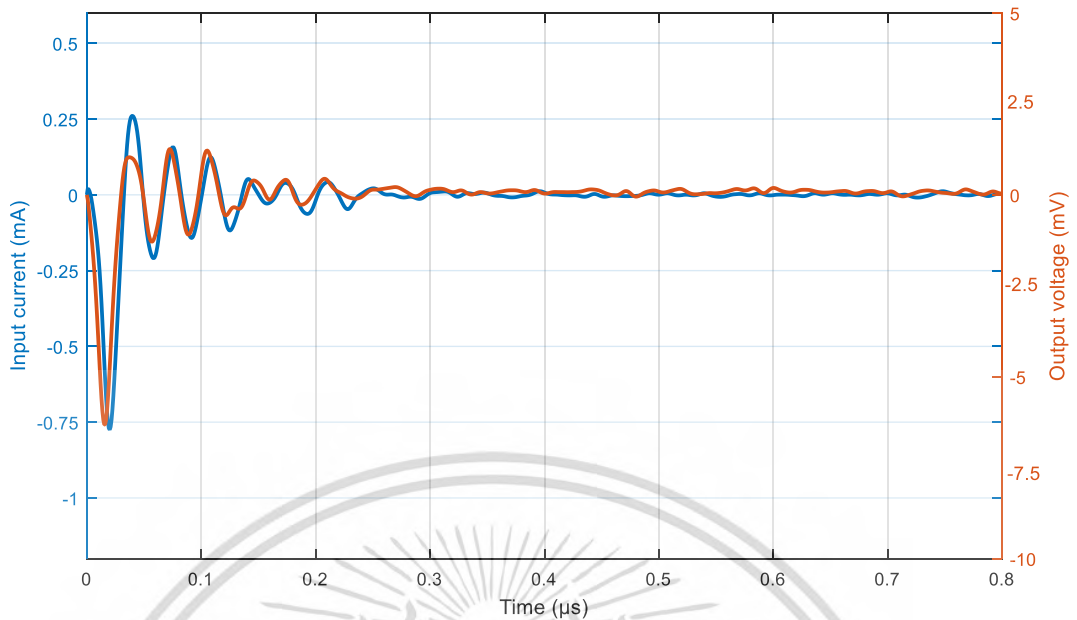
3) การเกิดดิซาร์จตามผิว

จากการทดสอบพบว่า ค่าสูงสุดของกระแสการดิซาร์จตามผิวที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านไร้ความเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 1.95 mA และค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ มีค่าเท่า 15.65 mV ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.37

ส่วนค่าต่ำสุดของกระแสการดิซาร์จตามผิวที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านไร้ความเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ -0.78 mA และค่าต่ำสุดของแรงดันเอาต์พุตที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ มีค่าเท่า -6.32 mV ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิซาร์จตามผิวที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ (กราฟสีแดง)

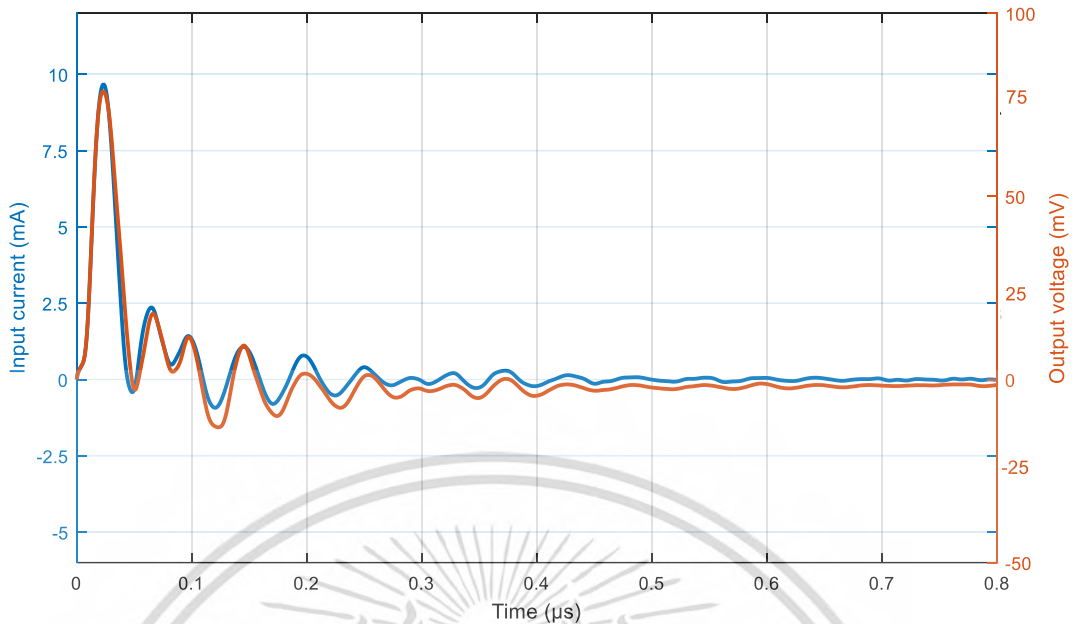


รูปที่ 4.38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จตามผิวที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ (กราฟสีแดง)

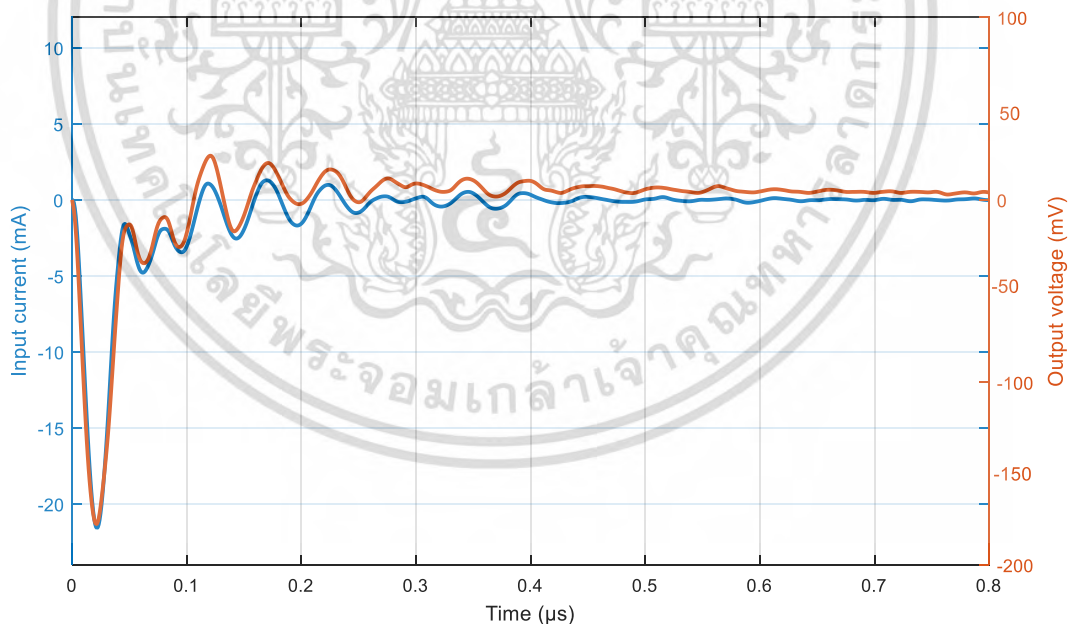
4) การเกิดดิสชาร์จภายใน

จากผลการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิสชาร์จภายในเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูงพบว่า ค่าสูงสุดของกระแสการดิสชาร์จภายในที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านรั้วความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ มีค่าเท่ากับ 9.68 mA และค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ มีค่าเท่า 78.71 mV ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.39

ส่วนค่าต่ำสุดของกระแสการดิสชาร์จภายในที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านรั้วความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ มีค่าเท่ากับ -21.59 mA และค่าต่ำสุดของแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ มีค่าเท่า -177.71 mV ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จภายในที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 90° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ (กราฟสีแดง)



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสการดิสชาร์จภายในที่เกิดขึ้นบริเวณมุม 270° ของรูปคลื่นไซน์ (กราฟสีน้ำเงิน) กับรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ (กราฟสีแดง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอตัวแปลงกระแสความถี่สูงสำหรับการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่การออกแบบและประกอบสร้างมี 2 ประเภท คือ ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศและตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ โดยที่ความถี่คัทออฟด้านต่ำและอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันในการออกแบบของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศมีค่าเท่ากับ 523.54 kHz และ 3.125 V/A ตามลำดับ ส่วนความถี่คัทออฟด้านต่ำและอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันในการออกแบบของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์มีค่าเท่ากับ 123.03 kHz และ 10 V/A ตามลำดับ ซึ่งตัวแปลงกระแสความถี่สูงทั้ง 2 ได้ผ่านการประเมินประสิทธิภาพด้วยการทดสอบ 3 ประเภทดังนี้ การทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง และการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง จากการทดสอบดังกล่าวแสดงดังตารางที่

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

ผลการทดสอบ	ตัวแปลงกระแสความถี่สูง	
	แกนอากาศ	แกนเฟอร์ไรท์
อัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดัน (Gain)	2.64 V/A	9.16 V/A
ความถี่คัทออฟด้านต่ำ	552.24 kHz	151.31 kHz
ความถี่คัทออฟด้านสูง	มากกว่า 20 MHz	มากกว่า 20 MHz

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

ประจุที่ป้อน (pC)	ค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตจากตัวแปลงกระแสความถี่สูง (mV)	
	แกนอากาศ	แกนเฟอร์ไรท์
10	1.96	3.62
20	2.98	6.25
50	5.62	14.61
100	10.76	27.80
200	19.83	54.79

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

ระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูง	
แกนอากาศ	แกนเฟอร์ไรท์
ต่ำกว่า 5 pC	ต่ำกว่า 2 pC

จากตารางที่ 5.1 สามารถสรุปได้ว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศมีอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันต่ำกว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ และช่วงความถี่ในการทำงานของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศแคบกว่าช่วงความถี่ในการทำงานของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์อีกด้วย ส่วนตารางที่ 5.2 สามารถสรุปได้ว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงทั้ง 2 ประเภทมีความเป็นเชิงเส้น แต่รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตจากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศมีลักษณะแตกต่างจากรูปคลื่นกระแสอินพุต แต่รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตจากตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์เป็นแกนของขดลวดมีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นกระแสอินพุตซึ่งกล่าวมาแล้วในบทที่ 4 และในตารางที่ 5.3 สามารถสรุปได้ว่า ระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์เป็นแกนขดลวดมีค่าต่ำกว่าระดับสัญญาณรบกวนของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ จึงเลือกใช้ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ในการทดสอบรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิสชาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

ในการทดสอบรูปแบบการดิสชาร์จบางส่วนจะทำการเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบการดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์กับรูปแบบการดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจจับด้วยวิธีการตามมาตรฐานสากล จากผลการทดสอบพบว่ารูปแบบการดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจจับด้วยตัวแปลงกระแสความถี่สูงมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปแบบการดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจจับด้วยวิธีการตามมาตรฐานสากล และจากการทดสอบความสามารถในการแปลงกระแสการดิสชาร์จบางส่วนเป็นแรงดันของตัวแปลงกระแสความถี่สูงพบว่า รูปคลื่นแรงดันที่ตรวจวัดได้จากตัวแปลงกระแสความถี่สูงมีลักษณะใกล้เคียงกระแสการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจริง

จากการทดสอบทั้งหมดพบว่าตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่ประกอบสร้างนี้สามารถใช้ในการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ใกล้เคียงกับระบบตามมาตรฐาน โดยมีค่าระดับสัญญาณรบกวนต่ำกว่า 2 pC ทำให้สามารถใช้ในการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ตัวแปลงกระแสความถี่สูงเป็นอุปกรณ์เหมาะสำหรับการตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนที่ต้องการพื้นที่ในการทดสอบน้อย อีกทั้งในการติดตั้งวงจรทดสอบทำได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ การตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล อาทิเช่น การตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงพิกำลัง ๓ สถานะที่ติดตั้งจริง ที่มีพื้นที่ในการทดสอบน้อยและยากในการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบไฟฟ้าแรงสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60270, “High-voltage test techniques – Partial discharge measurements”, 2015.
- [2] Marta Argüeso¹ Guillermo Robles² และ Javier Sanz³ “Implementation of a Rogowski Coil for the Measurement of Partial Discharge”, Review of Scientific Instruments, Vol. 76, pp. 65107-65113, 2005
- [3] A. Rodrigo¹ P. Llovera² V. Fuster³ และ A. Quijano⁴ “Influence of High Frequency Current Transformers Bandwidth on Charge Evaluation in Partial Discharge”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, Issue 5, pp. 1798-1802, 2011.
- [4] Mohammad Hamed Samimi¹ Arash Mahari² Mohammad Ali Farahnakian³ และ Hossein Mohseni⁴ “The Rogowski Coil Principles and Application : A Review”, IEEE Sensors Journal, Vol. 15, Issue 2, pp. 651-658, 2014.
- [5] N. H. Ahmed และ N. N. Srinivas “On-line partial discharge detection in cables”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 2, pp. 181-188, 1998.
- [6] J. Veen, “On-line signal analysis of partial discharges in medium voltage power cables”, doctoral dissertation, Netherland, 2012.
- [7] Stephen และ J. Chapman, “Electric machinery fundamentals 4th edition”, New York, 2005.
- [8] สำรวย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มีนาคม 2549.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. W. Chonpathomphikunloed, B. Paophan, A. Kunakorn , P. Yutthagowith and M. Leelachindakrairerk, “Analyses of Rogowski Coil for Partial Discharge Measurement”, 8th International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2017), Toyohashi Chamber of Commerce & Industry, Toyohashi City, Japan, Sep 12-15, 2017

Proceedings of 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2017)

September 11-15, 2017

Toyohashi Chamber of Commerce & Industry,
Toyohashi City, Japan

Vol.2

Sponsored by:

IEEJ Technical Committee on Dielectrics and Electrical Insulation

Technically co-sponsored by:

IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society

IEEE DEIS Japan Chapter

Supported by:

The Obayashi Foundation

Support Center for Advanced Telecommunications Technology Research, Foundation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analyses of Rogowski Coils for Partial Discharge Measurement

W. Chonpathomphikunloed, B. Paophan, A. Kunakorn, P. Yutthagowith and M. Leelachindakrairerk

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalongkung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
E-mail: warakorn_ch@outlook.com

Abstract – This paper presents analyses of toroidal air core Rogowski coils (RCs) with self-integrator for partial discharge (PD) measurement. The RC is the electromagnetic transfer device for measuring fast current pulse. The RC has linear characteristic and no saturation due to the air core. There are four configurations of the RCs in the consideration in this paper. From each designed RC, inductance and turn of each RC was determined almost the same values but different configurations. To analyses of the developed RCs, those RCs were employed to measure partial discharge current with various artificial charge levels from 10 pC to 50 pC. Also, comparison of the PD signals measured by the developed RCs and low inductive shunt resistor was carried out. From the experimental results, the best developed RC has the highest sensitivity or lowest background noise. It composes of two copper winding wound in the different directions. The first winding is wound around the toroidal air core and the other winding is wound with the opposite direction of the first winding. The both winding are crossed at the inner of the toroidal core. This RC also has wide frequency bandwidth for PD detection. The developed RC is an attractive sensor in partial discharge measurement.

Keywords: background noise, partial discharge, Rogowski coil, sensitivity

I. INTRODUCTION

Partial discharge (PD) is the partial derogation from electrical discharge within the insulation. The insulation must be considered carefully in design of high voltage equipment. The insulation of high voltage equipment is deteriorated in normal aging due to electric field stress. However, the defects, i.e. voids and impurity within the insulation is a weak spot and probably leads to severe damage. This weak spot is often located in high electric field stress area. In the event of discharge across the weak spots which is the cause of PD and eventually probably lead to dielectric breakdown [1], [2]. Therefore, PD inception diagnosis is necessary for prediction the derogation within insulation in the electrical system.

Normally, PD can be divided into 3 types. One is corona discharge. The second is surface discharge. The last one is internal discharge [3]. The PD frequency spectrum covers up to 100MHz or above [4]-[6]. For PD detection, The PD measurements are categorized as conventional and non-conventional methods. The conventional PD measurement uses the coupling capacitor with the measuring impedance to detect the PD charge but this paper focuses on non-conventional PD measurement. For PD measurement in the non-conventional method, the Rogowski coil (RC) is used to detect the PD current pulse.

In this paper, The RC is considered four configurations. To analyses of the RCs, those measured signal were compared with low inductive shunt resistor by various

artificial charge levels from 10 pC to 50 pC and the background noise signal of each RC was compared.

II. THEORY OF ROGOWSKI COIL WITH SELF-INTEGRATOR

As shown in TABLE I, the circuit parameters of the RC compose of resistance (R_c), inductance (L_c) and capacitance (C_c) which is able to be measured by an RLC meter. In addition, the terminating resistor (R_T) connected at the output terminal of RC. The equivalent circuit of the RCs are based on lumped parameter model as shown in Figure 1.

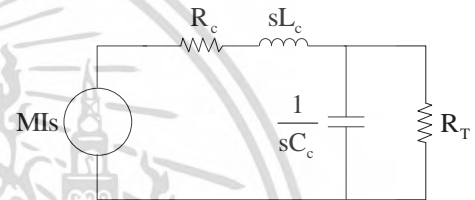


Figure 1. The equivalent circuit of the Rogowski coil based on lumped parameter model.

The transferred impedance (the ratio of measured current and voltage across R_T) can be derived as equation (1);

$$Z = \frac{V}{i} = \left(\frac{\frac{R_T}{1 + R_T C_c s} M s}{R + L_c s + \frac{R_T}{1 + R_T C_c s}} \right) = \frac{\frac{M}{L_c C_c} s}{s^2 + \left(\frac{R_c}{L_c} + \frac{1}{R_T C_c} \right) s + \frac{R_c + R_T}{R_T L_c C_c}} \quad (1)$$

Where Z is the transfer impedance and M is the mutual inductance. For self-integrator, the resistance of coil can be neglected because it is very small value. Therefore, the simplified transfer impedance is rewritten in equation (2)

$$Z = \frac{V}{i} = \frac{\frac{M}{L_c C_c} s}{s^2 + \left(\frac{1}{R_T C_c} \right) s + \frac{1}{L_c C_c}} = \frac{\frac{M}{L_c C_c} s}{\left(s + \frac{1}{R_T C_c} \right) \left(s + \frac{1}{L_c} \right)} \quad (2)$$

The result of poles in equation (2) expresses two cut off frequency composing of the lower cutoff frequency and the higher cutoff frequency. The cutoff frequency of RC is

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\frac{R_T}{2\pi L_c}$ and $\frac{1}{2\pi R_T C_c}$ respectively as shown in Figure 2.

From equation (2), the gain of transfer impedance can be estimated as shown in equation (3).

$$\text{Gain} = \frac{R_T}{N} \quad (3)$$

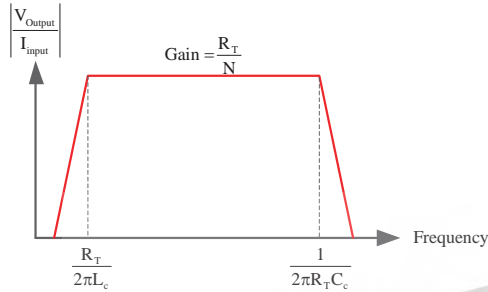


Figure 2. The transfer impedance of Rogowski coil with self-integrator.

III. THE DEVELOPED ROGOWSKI COILS

Those parameters of each RC, i.e. inductance, terminating resistor, and turn, are defined almost the same value. However, the resistance and capacitance depended on the characteristic of each RC as shown in TABLE I.

All of the RCs compose of two copper winding and the both winding is connected together to avoid magnetic interference. In the first RC, the first winding is wound around the toroidal air core and the other winding is returned into the first winding. The second one has the same configuration with the first one but the return winding is replaced by the copper sheet. The third one also has the same one, but the return winding is wound with the opposite direction of the first winding and the both winding are crossed at the outer of the toroidal core. The last one is the same as the third one but the both winding are crossed at the inner of the toroidal core. The developed RCs are shown in Figure 3.

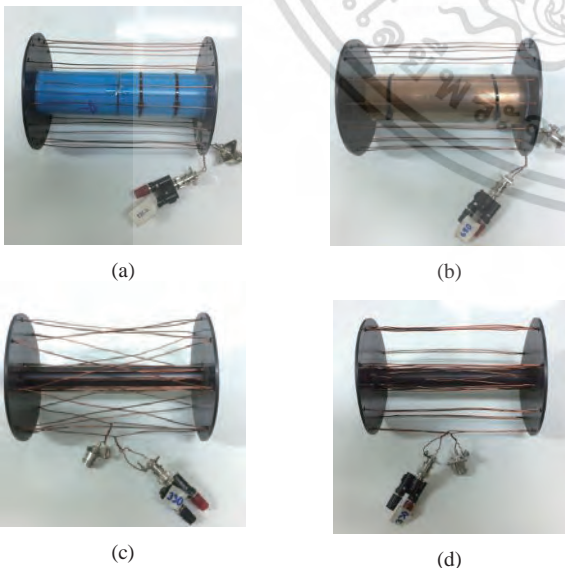


Figure 3. (a) The model of the first developed Rogowski coil. (b) The model of the second developed Rogowski coil. (c) The model of the third developed Rogowski coil. (d) The model of the last developed Rogowski coil.

TABLE I. SPECIFICATION OF ROGOWSKI COIL

The parameters	First RC	Second RC	Third RC	Last RC
Turn (turn)	16	16	16	16
Height (cm)	18	18.2	18	17.9
Inside diameter (cm)	2.8	2.8	2.8	2.8
Outer diameter (cm)	11.4	11.4	11.4	11.4
Resistance R_c (Ω)	0.5	0.5	0.6	0.5
Inductance L_c (μH)	15.2	17.2	15.7	14.9
Capacitance C_c (pF)	20	46.9	135.7	163.2
Terminating resistor R_t (Ω)	50	50	50	50

IV. EXPERIMENTAL RESULT

For the excellent measuring device, the measured signal must be linearity and it has high sensitivity. In this paper, the RCs were employed to measure PD current pulse. There are four configurations of RCs and their performances were compared.

A. Linearity Signal of Partial Discharge Measurement

In linearity signal of each coil, the partial discharge calibrator (HAEFELY PD CALIBRATOR TYPE 451) is employed to generate the PD pulse and recorded by an oscilloscope (PicoScope 5444B). The low inductive shunt resistor was connected in series with the circuit as shown in Figure 4.

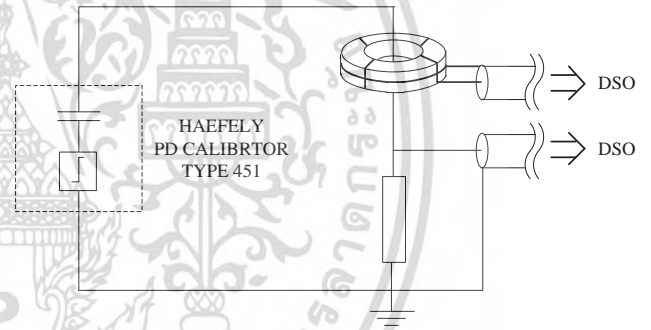


Figure 4. The circuit of linearity measurement.

Each RC was used to detect PD pulse current from the pulse calibrator varied artificial charge from 10 pC to 50 pC in order to compare linearity of the signal and background noise. Figure 5 to 16 show the PD current pulse measured by the developed RCs and the low inductive shunt resistor (R_{shunt}). The red line indicates the pulse measured by RC and the black line represents the pulse measured by the low inductive shunt resistor.

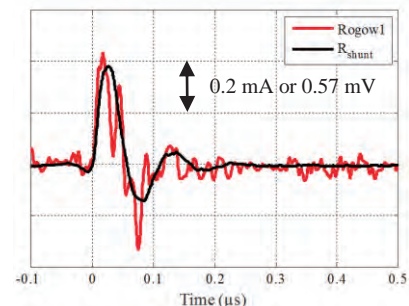


Figure 5. The measured current by R_{shunt} and the output voltage from the 1st RC at the PD level of 10 pC.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นานุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

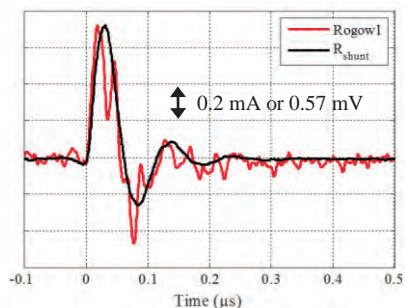


Figure 6. The measured current by R_{shunt} and the output volatge from the 1st RC at the PD level of 20 pC.

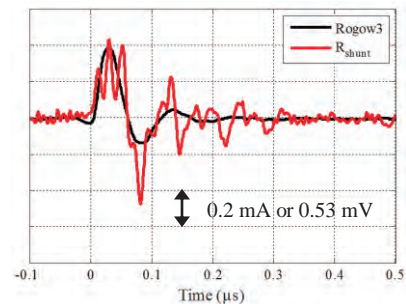


Figure 11. The measured current by R_{shunt} and the output volatge from the 3rd RC at the PD level of 10 pC.

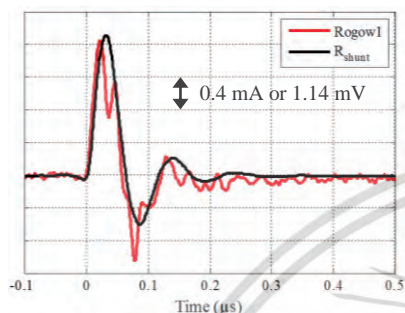


Figure 7. The measured current by R_{shunt} and the output volatge from the 1st RC at the PD level of 50 pC.

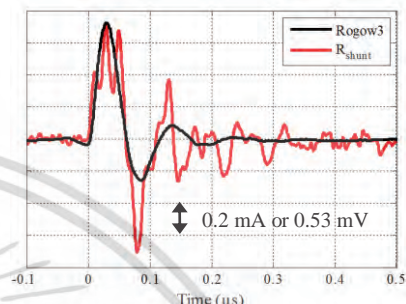


Figure 12. The measured current by R_{shunt} and the output volatge from the 3rd RC at the PD level of 20 pC.

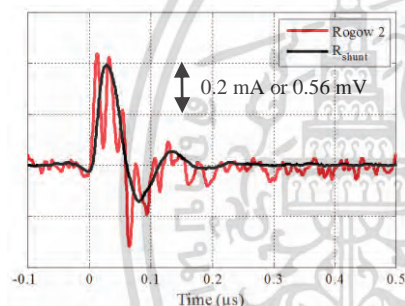


Figure 8. The measured current by R_{shunt} and the output volatge from the 2nd RC at the PD level of 10 pC.

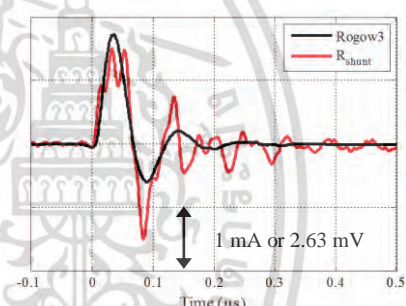


Figure 13. The measured current by R_{shunt} and the output volatge from the 3rd RC at the PD level of 50 pC.

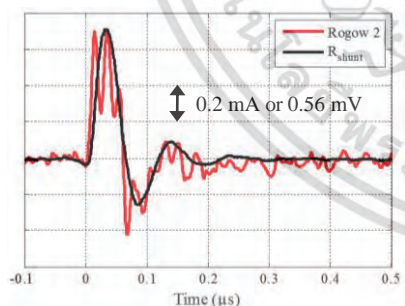


Figure 9. The measured current by R_{shunt} and the output volatge from the 2nd RC at the PD level of 20 pC.

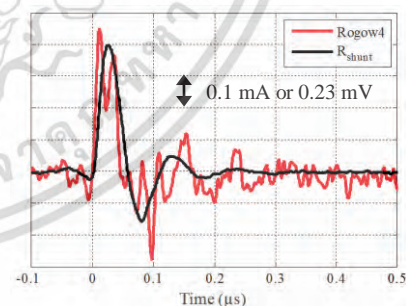


Figure 14. The measured current by R_{shunt} and the output volatge from the 4th RC at the PD level of 10 pC.

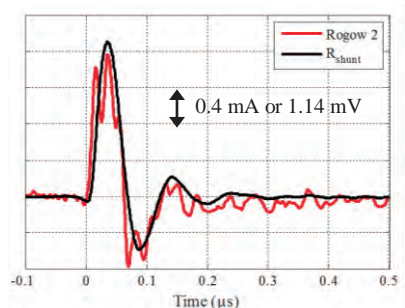


Figure 10. The measured current by R_{shunt} and the output volatge from the 2nd RC at the PD level of 50 pC.

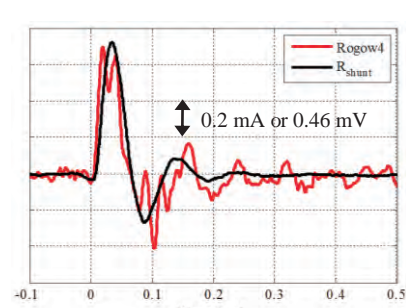


Figure 15. The measured current by R_{shunt} and the output volatge from the 4th RC at the PD level of 20 pC.

เอกสารนี้เป็นการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่เอารูปไปทำสื่อโฆษณา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

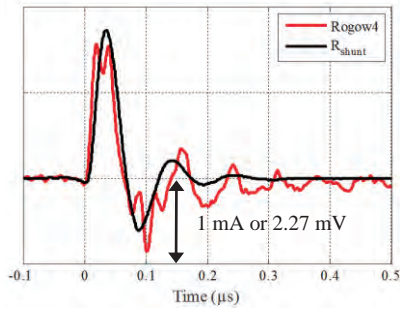


Figure 16. The measured current by R_{shunt} and the output voltage from the 4th RC at the PD level of 50 pC.

According to the results in Figures 5 to 16, the first RC provides the peak output voltage of 1.2 mV, 2.06 mV, and 4.69 mV at the PD level of 10 pC, 20 pC, and 50 pC, respectively. At the same PD levels, the second one provides the peak voltage of 1.22 mV, 1.94 mV, and 4.33 mV. The third one provides the peak voltage of 1.16 mV, 1.89 mV, and 3.95 mV. In the last one, provides the peak voltage of 1 mV, 1.59 mV, and 3.55 mV. The linearity performances of RCs are shown in Figure 17.

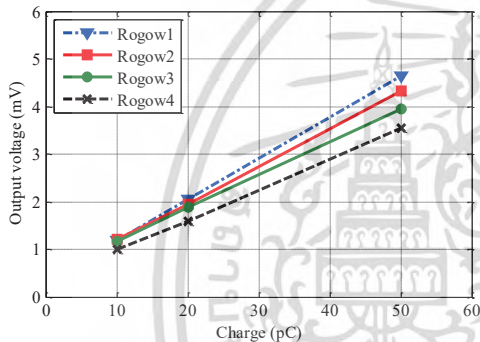


Figure 17. Input PD level and output voltage.

B. Sensitivity Signal of Rogowski Coil

The high sensitivity signal indicated the low background noise signal. In comparison of background noises on the RCs, the PD current with PD level of 10 pC was injected to the measuring system. The low pass filter (Omicron mtronix technology MPD 600) used in the conventional PD measuring system with fiber optic link was connected to the developed RCs. The results of background noise with calibration at PD level of 10 pC are shown in Figures 18 to 21. The background noise signals of the developed RCs are 4.092 pC, 3.880 pC, 4.317, and 3.705 pC, respectively.

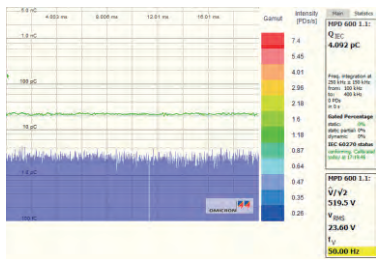


Figure 18. Background noise of the first RC.



Figure 19. Background noise of the second RC.

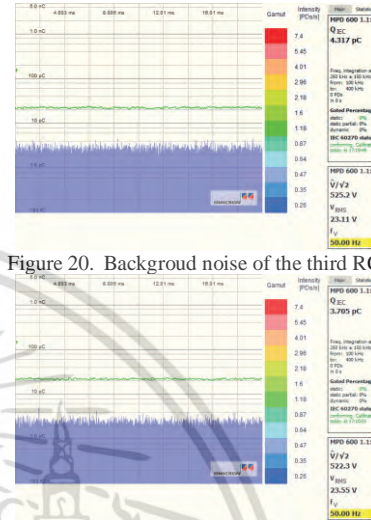


Figure 20. Background noise of the third RC.

Figure 21. Background noise of the last RC.

V. CONCLUSION

This paper focuses on the RC with self-integrator. The RC was employed to measure PD current pulse from PD calibrator. The performance of RC depends on linearity and sensitivity of measured signal. The results in Figure 17 indicate that all of the RCs have linearity characteristic. In addition, the developed RCs have the promising sensitivities or low background noise signal as shown in Figures 18 to 21. Also, the RC with last configuration provides the highest sensitivity followed by the second RC, the first RC, and the third RC respectively. However, all of RCs also have high sensitivity enough to detect PD in power cable.

REFERENCE

- [1] N. H. Ahmed and N. N. Srinivas, "On-line partial discharge detection in cables", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 2, pp.181-188, 1998.
- [2] J. Veen, "On-line signal analysis of partial discharges in medium voltage power cables", doctoral dissertation, Netherland, 2012.
- [3] Edward Gulski, "Computer - Aided Recognition of Partial Discharge Using Statistical Tools" Ph.D.thesis, Delft University, 1991.
- [4] Bailey, C.A., "A Study of internal Discharge in Cable Insulation", IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-31 (9), pp. 360-366, 1996.
- [5] Boggs, S.A., Stone, G.C., "Fundamental Limitations in the Measurement of Corona and Partial Discharge". IEEE Transactions on Electrical Insulation EI-17 (2), pp. 1143-1150, 1982.
- [6] Ramachandra, B., "Characterization of Partial Discharge Pulses in Artificial Voids in Thin Polypropylenen Films", Ph. D Thesis., I.I.Sc. Bangalore, pp. 517-520, 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายวรากร ชลปฐมพิกุลเลิศ
 วัน เดือน ปีเกิด 6 พฤศจิกายน 2536
 ที่อยู่ 17 ถ.วงศ์ยฤทธิ์ ต.ห้วยจรเข้ม
 อ.เมืองนครปฐม จ.นครปฐม
 73000

ประวัติการศึกษา 2551 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมต้นจากโรงเรียนโพธิสารพิทยากร
 2554 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนโพธิสารพิทยากร
 2558 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา
 วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง
 2559 เข้าศึกษาในระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา
 วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง