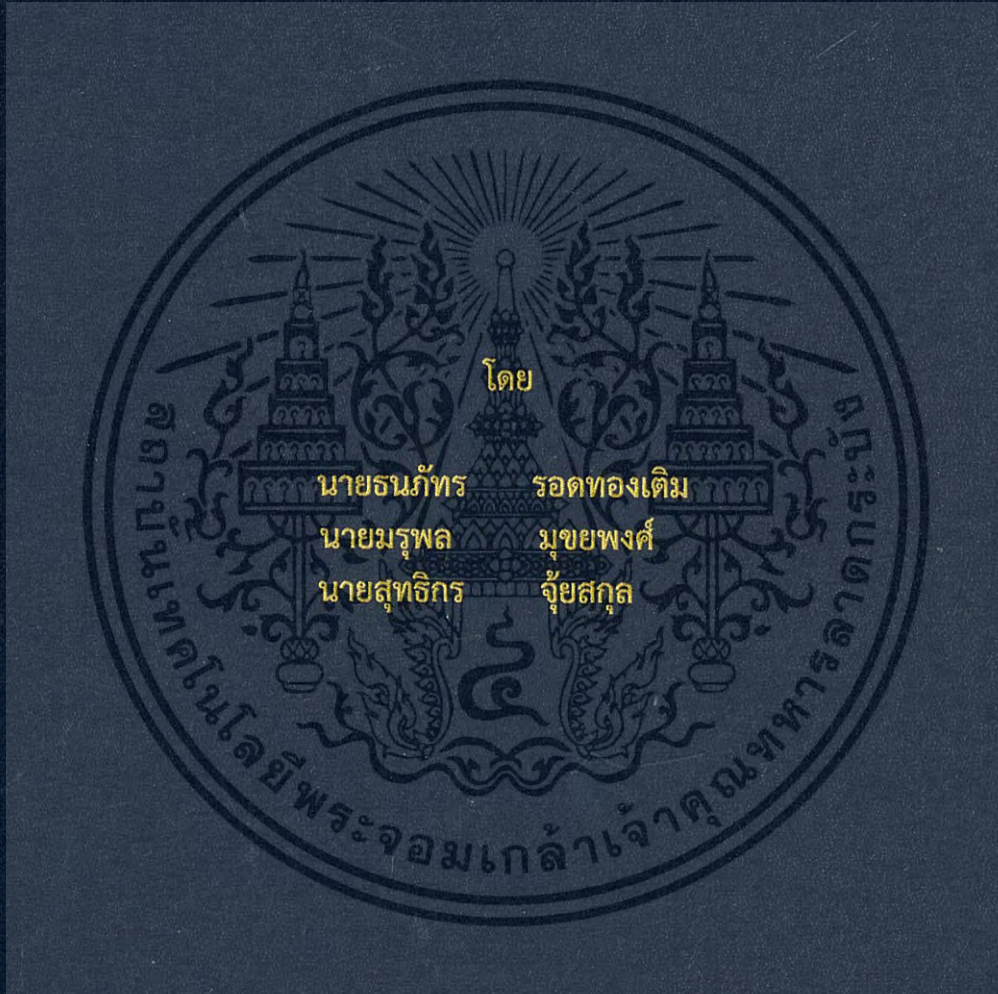


อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสแกนเฟอร์ไรท์สำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน
FERRITE CORE CURRENT TRANSDUCER FOR PARTIAL DISCHARGE
DETECTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสแกนเฟอร์ไรท์สำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน
FERRITE CORE CURRENT TRANSDUCER FOR PARTIAL DISCHARGE
DETECTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FERRITE CORE CURRENT TRANSDUCER FOR PARTIAL DISCHARGE
DETECTION



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสแกนเฟอร์ไรท์สำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

FERRITE CORE CURRENT TRANSDUCER FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสแกนเฟอร์ไรต์สำหรับตรวจจับดิสซาร์จบางส่วน

ผู้จัดทำ



1. นายธนภัทร รอดทองเต็ม
2. นายมรุพล มุขยพงษ์
3. นายสุทธิกร จัยสกุล

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณมาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสแกนเฟอร์ไรต์สำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

นายธนภัทร	รอดทองเต็ม	
นายมรุตผล	มุขยพงษ์	
นายสุทธิกร	จ้วยสกุล	
ผศ.ดร.พีรวุฒิ	ยุทธโกวิท	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	อาจารย์ที่ปรึกษา
		ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสแกนเฟอร์ไรต์สำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี ซึ่งได้สร้างอุปกรณ์ดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพโดยเนื้อหาของปริญญานิพนธ์นี้ได้แบ่งการออกแบบออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งการออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสดิสชาร์จด้วยขดลวดโรกอฟสกีโดยใช้แกนเฟอร์ไรต์และส่วนที่สองการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันภายนอก (Shield) โดยนำชุดอุปกรณ์ไปทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลของชุดอุปกรณ์ตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC60270 ซึ่งคาดว่าชุดอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นนั้นจะมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับชุดตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ประจำ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FERRITE CORE CURRENT TRANSDUCER FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION

Mr.Thanapat	Rodthongterm
Mr.Maruphol	Mukkayapong
Mr.Suttikorn	Juisakun
Asst.Prof.Dr.Peerawut	Yutthagowit Advisor
Assoc.Prof.Dr.Anantawat	Kunakorn Advisor

2017

ABSTRACT

This senior project presents design and construction of a ferrite core current transducer for partial discharge detection. The scope of this project is divided into two section. The first part is to introduce the design of a Rogowski with the ferrite coil. Secondly, it is to demonstrate the design of a enclosure of the developed equipment set which has been tested to detect partial discharge in the high voltage laboratory. The experimental results of the developed system are also compared with those from a commercial detector. Good agreements were observed in all experiment. From the experimental results, the validity of the developed equipment has been confirmed and accords to IEC 60270 standard.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและได้รับการช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พีรฤติ ยุทธโกวิท ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา การอธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง แนวทางการปฏิบัติงานและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างทำงาน นอกจากนี้ยังสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงการอีกด้วย รวมไปถึง คุณปณณวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดี ตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะคุณวรากร ชลปฐมพิกุลเลิศ ที่ให้คำแนะนำคำปรึกษาในด้านการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับโครงการและควบคุมการทดสอบมาโดยตลอดรวมถึงไปถึงการให้คำแนะนำในการจัดทำปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงสำหรับการช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการปฏิบัติการ รวมถึงเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ช่วยกันดูแลห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงมาชิกท่านอื่นๆ ในครอบครัว ตลอดจนถึงผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ให้กำลังใจและมีส่วนช่วยเหลือเสมอมา ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประเภทของการดิสซาร์จบางส่วน	5
2.1.1 การดิสซาร์จแบบโคโรนา	5
2.1.2 การดิสซาร์จตามผิว	6
2.1.3 การดิสซาร์จภายใน	7
2.2 ผลกระทบของการเกิดดิสซาร์จบางส่วน	9
2.3 หลักการวัดการดิสซาร์จบางส่วนของขดลวดโรกอฟสกี	9
2.3.1 หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี	9
2.3.2 วงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกี	12
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกี	15
3.1 ออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกี	15
3.1.1 แกนของขดลวด	15
3.1.2 การพันขดลวด	16
3.1.3 ความเหนียวนำของขดลวดโรกอฟสกี	18
3.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ป้องกัน	20
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	29
4.1 การทดสอบสัญญาณรบกวนในระบบ	29
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบสัญญาณรบกวนในระบบ	29
4.1.2 ผลการทดสอบสัญญาณรบกวนในระบบ	29
4.2 การทดสอบการเกิดดิสซาร์จบางส่วน	32
4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการเกิดการดิสซาร์จบางส่วน	32
4.2.2 ผลการทดสอบการเกิดดิสซาร์จบางส่วน	32
4.2.2.1 การดิสซาร์จแบบโคโรนา	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.2.2 การติสซาร์จตามผิว	35
4.4.2.3 การติสซาร์จภายในโพรงอากาศ	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ	38
5.1 สรุป	38
5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่พบ	39
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก	41
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	42
ประวัติผู้เขียน	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การติสซาร์จบางส่วน	4
2.2 ลักษณะการเกิดติสซาร์จแบบโคโรนา	5
2.3 ลักษณะรูปแบบฉนวนที่ทำให้เกิดการติสซาร์จบางส่วนตามผิว	6
2.4 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดติสซาร์จภายในวงจร	8
2.5 วงจรสมมูลของการเกิดติสซาร์จแบบโคโรนาและการติสซาร์จตามผิว	8
2.6 หลักการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี	9
2.7 วงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกี	12
2.8 ผลตอบสนองต่อความถี่	13
3.1 ขนาดของแกนขดลวด	15
3.2 การตัดแกนเฟอร์ไรท์	16
3.3 การพันขดลวดโรกอฟสกี	17
3.4 ขดลวดโรกอฟสกีที่พันเรียบร้อยแล้ว	18
3.5 การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันในโปรแกรม SolidWorks	20
3.6 ขนาดชิ้นส่วนของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำการออกแบบ	27
3.7 อุปกรณ์ป้องกันขดลวดโรกอฟสกีแบบสมบูรณ์	28
4.1 วงจรสมมูลการทดสอบสัญญาณรบกวนในระบบ	30
4.2 สัญญาณรบกวนในระบบที่วัดได้	31
4.3 วงจรสมมูลการติสซาร์จแบบโคโรนา	33
4.4 วงจรสมมูลการติสซาร์จแบบโคโรนาเมื่อต่อสำเร็จ	33
4.5 วัสดุทดสอบปลายแหลมกับเพลนอะคริลิก	34
4.6 พัลส์การเกิดการติสซาร์จแบบโคโรนาทางด้านแรงสูง	34
4.7 พัลส์การเกิดการติสซาร์จแบบโคโรนาทางด้านกราวด์	35
4.8 วัสดุทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ที่ตรงกลมกับเพลนอะคริลิก	35
4.9 พัลส์การเกิดการติสซาร์จแบบตามผิว	36
4.10 วัสดุทดสอบเพลนกับเพลนอะคริลิกที่มีโพรงอากาศภายใน	36
4.11 พัลส์การเกิดการติสซาร์จแบบภายใน	37

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	3
3.1 ค่าความเหนียวนำของขดลวดโรกอฟสกี	19



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การตรวจสอบคุณภาพของระบบไฟฟ้านั้นเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์และตรวจสอบระบบไฟฟ้าแรงสูงโดยการตรวจสอบอุปกรณ์ของระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะทำให้พบความบกพร่องของอุปกรณ์ก่อนที่จะได้รับความเสียหายและทำให้ระบบไฟฟ้าแรงสูงมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นซึ่งความเสียหายในระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้นเกิดจากหลายปัจจัยแต่ที่เราสนใจและทำการศึกษาคือ การดิสชาร์จบางส่วน

การดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge; PD) คือ การเกิดการเสถียรภาพการเป็นฉนวนเพียงบางส่วนของระบบการฉนวนแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักคือ 1. การดิสชาร์จแบบโคโรนา (Corona discharge) 2. การดิสชาร์จตามผิว (Surface discharge) และ 3. การดิสชาร์จภายใน (Internal discharge) ซึ่งผลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะของการชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ณ จุดนั้นทำให้ฉนวนเสียหาย จึงอาจนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการคิดค้นเทคโนโลยีที่สามารถตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge; PD) ขึ้นมาและมีมาตรฐานในการวัดตามมาตรฐานสากล IEC 60270 : 2000 แต่จะมีความยุ่งยากในการต่อวงจรทดสอบ อีกทั้งมีราคาที่ยังค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงได้มีการคิดสร้างอุปกรณ์ตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ที่เป็นไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลักการขดลวดโรกอฟสกี (Rogowski coil; RC) ซึ่งขดลวดโรกอฟสกีจะมีลักษณะการพันแบบพิเศษคือการพันย้อนกลับเข้าไปภายในขดลวดอีกหนึ่งรอบเพื่อหักล้างผลจากสนามแม่เหล็กภายนอกจึงทำให้เกิดความแม่นยำในการตรวจวัด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาวิธีการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยขดลวดโรกอฟสกีและทำการสร้างอุปกรณ์การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วยขดลวดโรกอฟสกีที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจจับกระแสการดิสชาร์จบางส่วน โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีแกนเฟอร์ไรท์ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อวัดกระแสการดิสชาร์จบางส่วน

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

ขั้นตอนการศึกษาของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถแบ่งเป็นหัวข้อตามลำดับขั้นดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยทั้งภายในและภายนอก
2. ศึกษาหลักการทำงานของขดลวดโรกอฟสกี
3. ศึกษาข้อมูลและคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรท์
4. ออกแบบและประกอบการสร้าง อุปกรณ์สำหรับการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน
5. หาค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชัน แรงดันเอาต์พุตต่อกระแสอินพุต ของขดลวดโรกอฟสกีแกนเฟอร์ไรท์
6. นำแกนขดลวดโรกอฟสกีที่ได้มาทดสอบระบบวัดกระแส Partial Discharge
7. บันทึกและทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง
8. นำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่อ้างอิง
9. สรุปผลการทดลอง
10. จัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงานโครงการ

ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาข้อมูลและทฤษฎีตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศจากนั้นจึงดำเนินการสร้างและประกอบชิ้นงานรวมไปถึงการทดลองโดยมีระยะเวลาในการดำเนินการตั้งแต่ สิงหาคม 2560 ถึง พฤษภาคม 2561 รวมระยะเวลา 10 เดือนโดยมีแผนการดำเนินงานดังตาราง 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการ

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่1					ภาคเรียนที่2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	←-----→		←-----→							
2.ออกแบบชิ้นงานและประกอบสร้าง			←-----→							
3.ทดลองและสรุปผล				←-----→		←-----→				
4.จัดทำปฏิญญาพนธ์						←-----→		←-----→		

←-----→ ระยะเวลาปฏิบัติงานจริง

←-----→ ระยะเวลาตามแผนปฏิบัติงาน

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. ทำให้เข้าใจหลักการทำงานของขดลวดโรกอฟสกีสำหรับการตรวจับการดิสชาร์จบางส่วน
2. สามารถนำความรู้ที่ได้มาสร้างเครื่องตรวจับการดิสชาร์จบางส่วนด้วยขดลวดโรกอฟสกีแกนเฟอร์ไรท์
3. สามารถวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเนื้อฉนวนเมื่อเกิดการดิสชาร์จบางส่วน
4. ช่วยสนับสนุนและพัฒนาในการทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

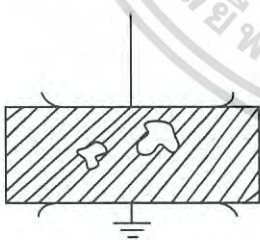
การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge ; PD) คือ การเกิดการเสียดสภาพการเป็นฉนวนเพียงบางส่วนของระบบการฉนวนเป็นการเกิดเบรกดาวนหรือดิสชาร์จที่ไม่เชื่อมโยงกันระหว่างอิเล็กโทรด ไม่ได้เป็นการเสียดสภาพการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีสิ่งเจือปนซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ 1.การดิสชาร์จแบบโคโรนา 2.การดิสชาร์จตามผิว 3.การดิสชาร์จภายใน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



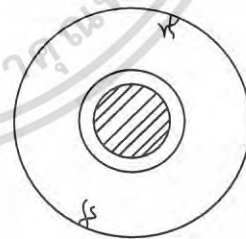
ก. การดิสชาร์จแบบโคโรนา
รอยต่อ

ข. การดิสชาร์จตามผิว

ค. การดิสชาร์จภายใน



ง. การดิสชาร์จภายในโพรงอากาศ



จ. การดิสชาร์จภายในมีสิ่งแปลกปลอม

รูปที่ 2.1 การดิสชาร์จบางส่วน

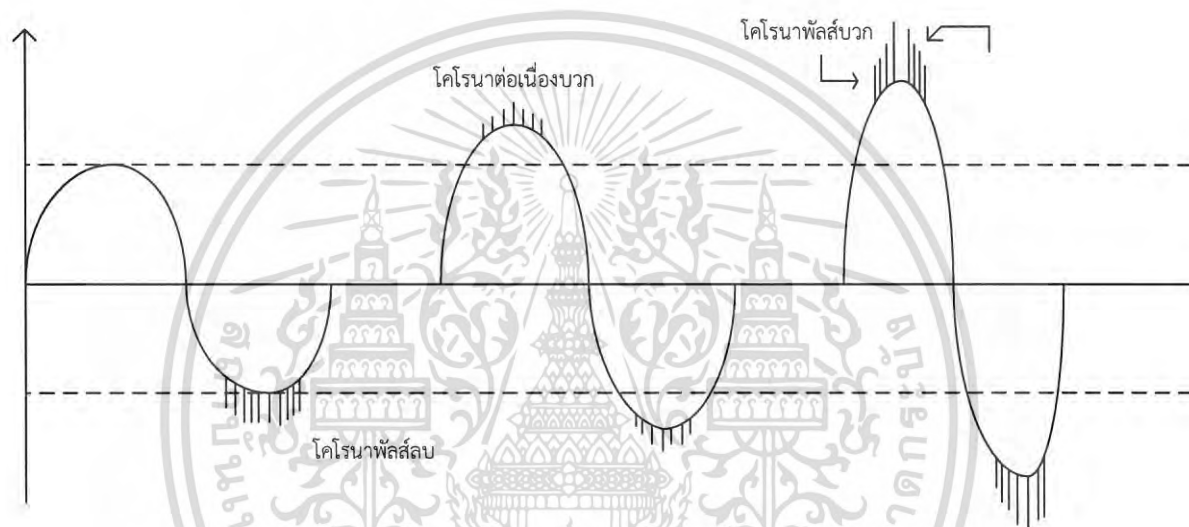
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 ประเภทของการดิสชาร์จบางส่วน

2.1.1 การดิสชาร์จแบบโคโรนา

การดิสชาร์จแบบโคโรนา (Corona discharge) จะเกิดตรงบริเวณรอบๆ อิเล็กโทรดปลายแหลมหรือขอบคมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เช่น สายตัวนำแรงสูงที่มีขนาดเล็กเกินไป หรือผิวสายตัวนำไม่เรียบพอ ทำให้อากาศรอบๆ บริเวณนั้นเกิดไอออนเซชัน

การทดลองเพื่อการศึกษาการเกิดการดิสชาร์จแบบโคโรนาในอากาศเริ่มต้นโดยใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมกับระนาบ ผลการวัดรูปคลื่นแรงดันออกสซิลโลสโคปแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดดิสชาร์จแบบโคโรนา

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่เกิดจากอิเล็กโทรดปลายแหลม เมื่อป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง ถ้าพิจารณารูปคลื่นแรงดันจากออกสซิลโลสโคป จะสังเกตเห็นพัลส์ซึ่งเริ่มเกิดขึ้นก่อนที่ยอดครึ่งคลื่นลบของรูปคลื่นแรงดันกระแสรูปคลื่นไซน์มีขนาดและช่วงห่างพัลส์สม่ำเสมอเท่า ๆ กัน เรียกว่า “Tracheal Pulses” มีช่วงกว้างของคลื่นเพียงสิบนาโนวินาที ความถี่อาจถึง 0.5MHz ถ้าเพิ่มแรงดันสูงขึ้นอีก จะสังเกตเห็นพัลส์ขึ้นที่ยอดครึ่งคลื่นบวกแต่จะไม่สม่ำเสมอทั้งยอดบวกและยอดลบพัลส์อาจจะหายไปหากเพิ่มแรงดันอีก เรียกลักษณะโคโรนาเช่นนี้ว่าโคโรนาต่อเนื่อง(Continuous Corona) ทำให้คลื่นรบกวนวิทยุจึงลดลง แต่พลังงานสูญเสียโคโรนากลับยังเพิ่มมากขึ้นต่อจากนั้นก็สังเกตเห็นพัลส์หนาแน่นมากขึ้นที่ยอดคลื่นบวกเรียกว่า ดิสชาร์จขนแปรง(Brush Discharge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การดิสชาร์จตามผิว

การดิสชาร์จตามผิวอาจเกิดขึ้นตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน เช่น ของแข็งกับของเหลว เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤต เช่น ปลอกฉนวนนำสายปลายสายเคเบิลหรือดิสชาร์จภายนอก กระทบเข้ากับฉนวนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน์เจาะทะลุได้ เช่น แผ่นคั่นระหว่างอิเล็กโทรด หรือปลอกฉนวนนำสายดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปแบบฉนวนที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนตามผิว

ในรูปที่ 2.3ก การดิสชาร์จตามผิวจะเกิดขึ้นที่บริเวณแท่งรีดทรงกลมสัมผัสหรือใกล้กับแผ่นฉนวนหรือแผ่นแก้วเพราะความเครียดสนามไฟฟ้าจะสูงกว่าบริเวณอื่น เมื่อเพิ่มแรงดันหรือความเครียดสูงขึ้น การดิสชาร์จจะขยายตัวกว้างยาวขึ้นห่างออกไปจากแท่งรีดหรือทรงกลมสู่ขอบแผ่นฉนวนหรือแผ่นแก้ว ถ้าแผ่นฉนวนหรือแผ่นแก้วหนาพอและแผ่นไม่กว้างเกินไปก็จะเกิดวาบไฟข้ามผ่านแผ่นแก้วไปหาอิเล็กโทรดระนาบได้ ถ้าแผ่นแก้วไม่หนามากและแผ่นกว้างใหญ่ การเกิดดิสชาร์จตามผิวก็จะกว้างไประดับหนึ่งแล้วก็จะเกิดเบรกดาวน์เจาะทะลุผ่านแก้วได้

ในรูปที่ 2.3ข การดิสชาร์จตามผิวจะเริ่มเกิดที่อิเล็กโทรดแหวนยึดต่อลงดินและวิ่งขยายตัวออกไปปลายปลอกฉนวนนำสายเข้าหาตัวนำ ทั้งนี้เพราะความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

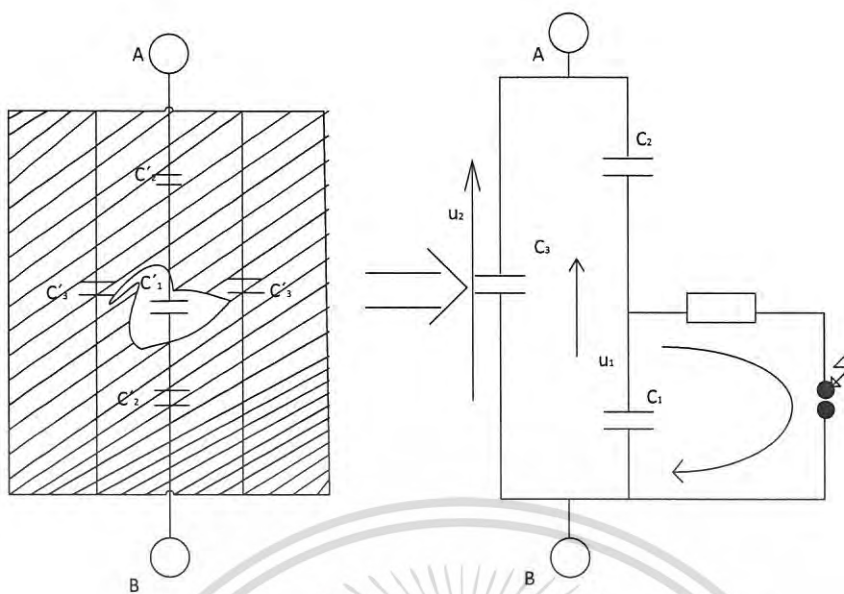
การดิสชาร์จตามผิวที่เริ่มเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าวอาจอธิบายได้ด้วยลักษณะของสมศักดิ์หรือ ศักย์ไฟฟ้าเท่าในรูปทั้งสามกรณีค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนแข็งจะมีค่าสูงกว่าอากาศหลายเท่า ค่าความจุไฟฟ้า C_2 ย่อมมีค่ามากกว่า C_1 ดังนั้นตามหลักของโวลเตจดีไวเดอร์ แรงดันตกคร่อมส่วนใหญ่จะอยู่ที่ C_1 หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนนั้นจะมีค่าสูงกว่าเมื่อป้อนแรงดันถึงค่าหนึ่ง จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวมีค่าเกินค่าวิกฤต การดิสชาร์จตามผิวก็จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อแรงดันเพิ่มสูงกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดดิสชาร์จจะเปลี่ยนจากโคโรนาไปเป็นดิสชาร์จแบบขนแปรง วิ่งคืบหน้าไปตามผิวฉนวนแข็ง ความเข้มของการดิสชาร์จตามผิวจะขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้าแข็ง C_2 ถ้าค่า C_2 ยิ่งมากการดิสชาร์จตามผิวจะยิ่งเข้มแรงมากขึ้น

2.1.3 การดิสชาร์จภายใน

การดิสชาร์จภายใน หมายถึง การดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ที่ซึ่งมีโพรงหรือฟองก๊าซหรือสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่ค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลัก อันทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงหรือสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าสูงกว่าฉนวนรอบๆ ซึ่งอาจพิสูจน์ได้จากกรณีวิเคราะห์ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกันวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเมื่อขึ้นฉนวนซ้อนได้รับแรงดันถึงระดับหนึ่งแล้วจะทำให้ฉนวนโดยรอบเสียหายเกิดการกัดกร่อน การฉนวนเสื่อมสภาพอายุการใช้งานจะสั้นลงและในบางกรณีอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ในที่สุด การวัดและประเมินค่าดิสชาร์จภายในจะใช้วิธีวิเคราะห์จากวงจรสมมูล

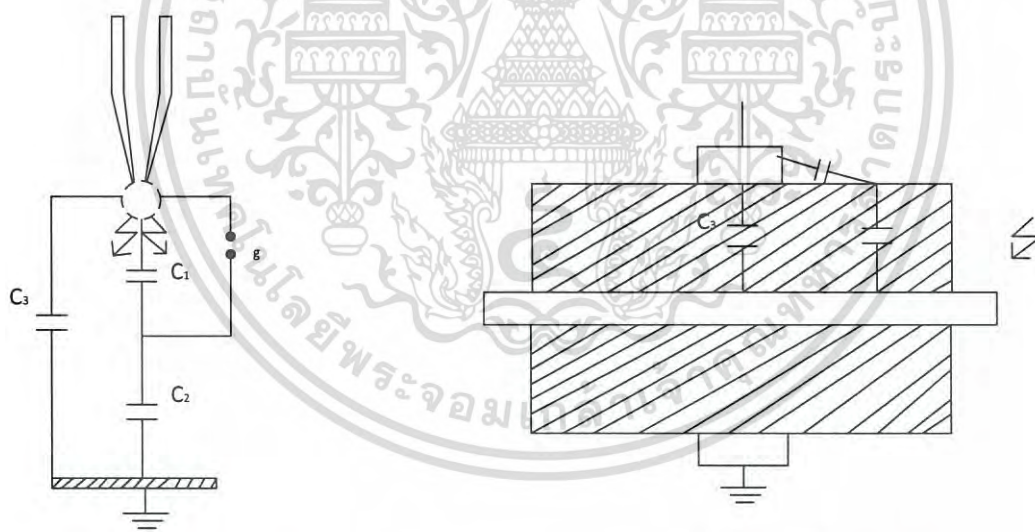
วัสดุฉนวนมีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B แสดงในรูป 2.4ก โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_1 ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ C_1 เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_2' และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_3 ดังรูปที่ 2.4ข ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_1 จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ C_3 ซึ่งมีค่ามากกว่า C_2 มากๆ

ถ้าแรงดันที่ป้อนทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงก๊าซที่แทนด้วย C_1 ก็จะเกิดเบรกดาวน์ในโพรงก๊าซซึ่งแทนด้วยแกป g โดยมีความต้านทาน R_1 ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวกักกระแสดิสชาร์จ $i_1(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์กว้างเป็นนาโนวินาทีและทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม Δq_1 กระแส $i_1(t)$ นี้ไหลอยู่ภายในซึ่งไม่สามารถวัดได้แต่การดิสชาร์จของ C_1 ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ C_2 และ C_3 ของวงจรสมมูลเป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A-B เท่ากับ Δu_1 ซึ่งหาได้จากประจุที่อัดไว้ที่ C_1



ก.วัสดุฉนวนมีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวน ข.โพรงก๊าซที่เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า

รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จภายในวงจร สามารถไปประยุกต์ใช้กับการดิสชาร์จแบบโคโรนาและการดิสชาร์จตามผิวแสดงดังรูปที่ 2.5



ก.การดิสชาร์จแบบโคโรนา

ข.การดิสชาร์จตามผิว

รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของการเกิดดิสชาร์จแบบโคโรนาและการดิสชาร์จตามผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ผลกระทบของการเกิดดิสรจางบางส่วน

การดิสรจางบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวนวนในลักษณะชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆและเกิดความผิพรองขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวอย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานฉนวนจะสั้นลง

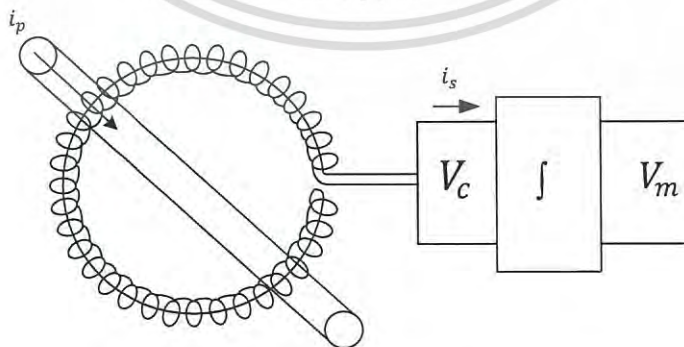
การเกิดดิสรจางบางส่วนบนสายแรงสูงแบบชิงอากาศเรียกว่า โคโรนา หมายถึงการเกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลาและยิ่งกว่านั้นการเกิดโคโรนาพัลส์ดังกล่าว ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ(Radio interferent voltage ; RIV) เรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ

2.3 หลักการวัดการดิสรจางบางส่วนของขดลวดโรกอฟสกี

2.3.1 หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี

ขดลวดโรกอฟสกีเป็นอุปกรณ์วัดกระแสซึ่งสามารถออกแบบให้วัดกระแสที่มีแถบ (Bandwidth) กว้างและมีค่ากระแสมาก ๆ เช่น กระแสฟ้าผ่า

เมื่อนำขดลวดโรกอฟสกีไปล้อมรอบแท่งตัวนำที่มีสนามไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กล้อมรอบแท่งตัวนำไปคาบเกี่ยวกับขดลวดโรกอฟสกีที่พันรอบแกนวัสดุที่มีค่าอิมิตตัวของสนามแม่เหล็กสูง เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย ผลจากฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลานี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายทั้งสองของขดลวด ถ้านำแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ไปผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสม จะได้รูปคลื่นของกระแสที่ต้องการวัดปรากฏผลออกมาในรูปของแรงดันขาออกของวงจร ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หลักการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎของแอมแปร์ ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะมีความสัมพันธ์

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i_p \quad (2.1)$$

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

$$d\phi = \mu_0 n A \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.2)$$

เมื่ออินทิเกรตตามความยาวรอบของขดลวด จะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านขดลวดทั้งหมด

$$\phi = \mu_0 n A \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 n A i_p \quad (2.3)$$

จากกฎของฟาราเดย์ จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ปลายของขดลวด

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

กำหนดให้ $M = N\mu_0 A$ กระแส i_p ที่ต้องการวัดจะมีค่าเท่ากับ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่ากรวดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี ต้องทำการอินทิเกรตแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด เพื่อให้ได้เป็นกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัด จึงต้องมีวงจรรินทิเกรตด้วยเสมอ

ขนาดแรงดันที่ทำการอินทิเกรต จะขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงตัว (τ) ของวงจรรินทิเกรต

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

โดยอัตราขยายของระบบวัดจะอยู่ในเทอมของอัตราส่วนแรงดันขาออกต่อกระแสที่วัด (V/I) เป็นดังสมการ

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

สามารถหาค่า L_0 , C_0 และค่า R_0 ได้ดังนี้

$$L_0 = \mu_0 A n^2 l = MN \quad (2.8)$$

$$C_0 = \frac{16 \epsilon_0 \epsilon_r l}{\pi \ln\left(\frac{A}{a}\right)} \quad (2.9)$$

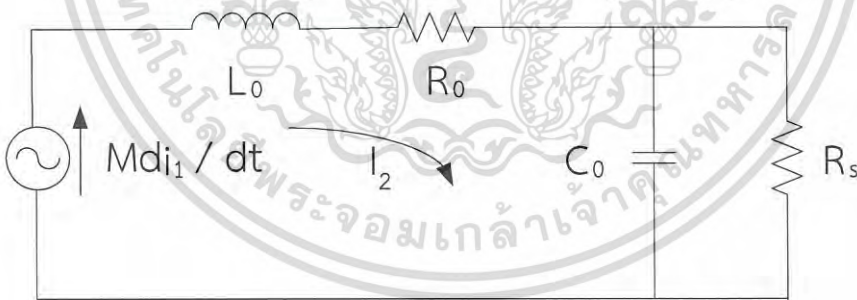
$$R_0 = \frac{\rho_w \cdot l_w}{A_w} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $M \frac{di_1}{dt}$	คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V)
R_0	คือ ความต้านทานของขดลวดโรกอฟสกี (Ω)
L_0	คือ ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกี (H)
C_0	คือ ความจุไฟฟ้าของขดลวดโรกอฟสกี (F)
a	คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m^2)
A	คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m^2)
N	คือ จำนวนรอบขดลวดทั้งหมด (turn)
n	คือ จำนวนรอบต่อความยาวแกน (turn/m)
ϵ_0	คือ เปรอริมิตติวิตีสัมพัทธ์ของแกนที่ใช้พันขดลวด (Relative permittivity) (F/m)
ϵ_r	คือ เปรอริมิตติวิตีสัมพัทธ์ของอากาศ (permittivity) (F/m)
ρ_w	คือ ความต้านทานจำเพาะของลวด (Ωm)
A_w	คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (mm^2)
l_w	คือ ความยาวของลวด (m)

2.3.2 วงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกี

ขดลวดโรกอฟสกีสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกี

จากกฎการแบ่งแรงดันจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

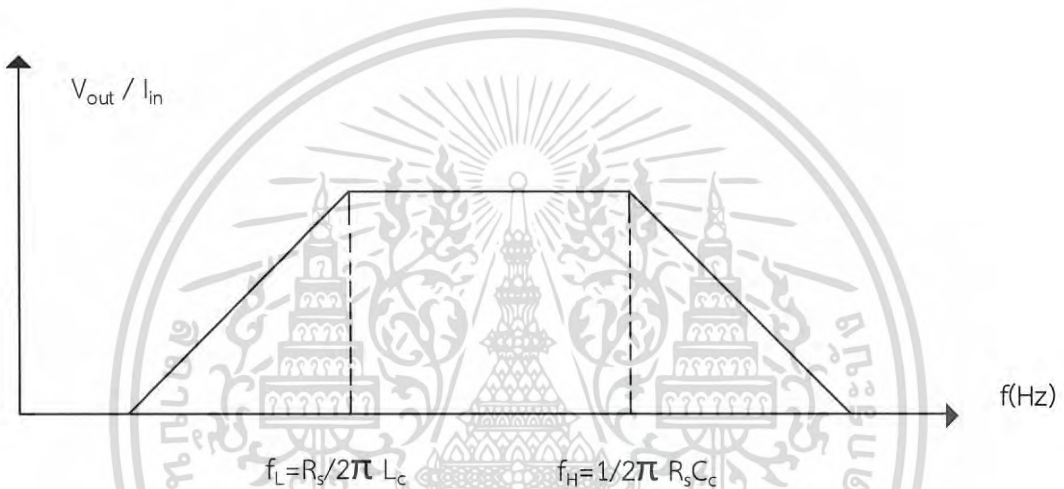
$$V_{out} = MIS \times \frac{\left(\frac{R_s}{1 + SR_s C_c}\right)}{\left(\frac{R_s}{1 + SR_s C_c} + R_c + SL_c\right)} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากฟังก์ชันการถ่ายโอน อัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุต

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{\left(\frac{MS}{L_c C_c}\right)}{\left(S + \frac{R_c}{L_c}\right) \times \left(S + \frac{1}{R_s C_c}\right)} \quad (2.12)$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.7 สามารถเขียนผลตอบสนองความถี่ (frequency respond) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองต่อความถี่

ก่อนเข้าสู่ช่วงสภาวะคงตัวที่ความถี่ค่าหนึ่ง เรียกว่า ความถี่คัตออฟด้านความถี่ต่ำ โดยค่าจะขึ้นอยู่กับ R_s และ L_c ดังสมการที่ 2.13 และจะยังมีสภาวะคงตัวไปจนถึงความถี่คัตออฟด้านความถี่สูง โดยค่าจะขึ้นอยู่กับ R_s และ C_c ดังสมการที่ 2.14 ในช่วงที่มีสภาวะคงตัวเรียกว่า Gain ดังสมการที่ 2.15

$$f_L = \frac{R_s}{2\pi L_c} \quad (2.13)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_s C_c} \quad (2.14)$$

$$\text{Gain} = \frac{R_s}{N} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ M คือ ความเหนียวนำร่วมระหว่างขดลวดโรกอฟสกีกับตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน (H/turn)
 R_c คือ ความต้านทานของขดลวดโรกอฟสกี (Ω)
 R_s คือ ความต้านทานแมทซิ่ง 50 (Ω)
 L_c คือ ความเหนียวนำของขดลวดโรกอฟสกี (H)
 C_c คือ ความจุไฟฟ้าของขดลวดโรกอฟสกี (F)
 N คือ จำนวนรอบทั้งหมด (turn)
 S คือ $j\omega$ (Radian)
 f_L คือ ความถี่คัตออฟด้านความถี่ต่ำ (Hz)
 f_H คือ ความถี่คัตออฟด้านความถี่สูง (Hz)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกี

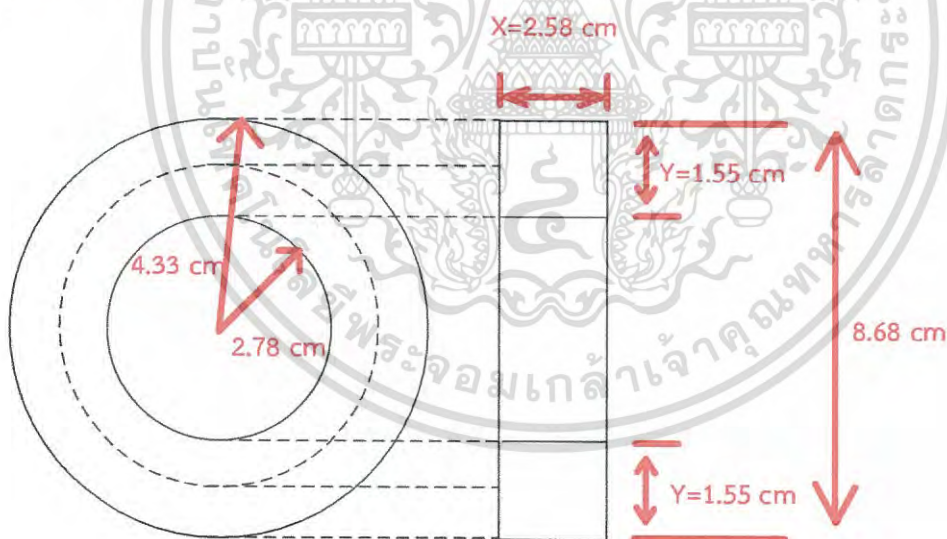
ในขั้นตอนของการออกแบบขดลวดโรกอฟสกีจะเริ่มจากการเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรท์ที่มีขนาดเหมาะสมต่ออุปกรณ์ที่ต้องการนำไปคล้องในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจากนั้นจึงทำการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันขดลวดโรกอฟสกี

3.1 การออกแบบและประกอบสร้างแกนขดลวด

3.1.1 แกนของขดลวด

ออกแบบโดยใช้แกนเฟอร์ไรท์เป็นแกนของขดลวด เนื่องด้วยแกนเฟอร์ไรท์นั้นมีค่าการซึมซาบแม่เหล็กที่สูงทำให้มีค่า ความเหนี่ยวนำ (inductance) สูง เมื่อมีกระแสไหลที่ความถี่พลังงานอาจทำให้แกนของขดลวดอิ่มตัว เราจึงทำการตัดแกนเฟอร์ไรท์เป็นสองส่วนเพื่อให้เกิดช่องว่างอากาศ (airgap)

ทางผู้จัดทำได้เลือกแกนเฟอร์ไรท์ขนาดรัศมีภายนอก 4.33 cm รัศมีภายใน 2.78 cm มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 4.0 cm^2 ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขนาดของแกนขดลวด

ในการออกแบบแกนขดลวด จะใช้แกนเฟอร์ไรท์สองแกนร่วมกันแล้วนำมาวางซ้อนกันและทำการตัดแบ่งครึ่ง เพื่อที่จะทำให้เกิดช่องว่างอากาศ ทำให้แกนเฟอร์ไรท์มีค่าความเหนี่ยวนำลดลงดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การตัดแกนเฟอร์ไรท์

จากการออกแบบตามรูปที่ 3.2 จะคำนวณหาความยาวเฉลี่ยของขดลวด (l) ที่ใช้พัน ได้จาก ความยาวของเส้นรอบวงครบรอบ (l_d) และพื้นวนกลับมาอีกรอบรวมกับความยาวของการพันแกน เฟอร์ไรท์ห้ำรอบ (l_n)

$$\begin{aligned}
 l &= 2l_d + l_n & (3.1) \\
 &= 2(2\pi R) + 5(2X + 2Y) \\
 &= 2(2)(\pi)(4.33) + 5((2)(5.16) + (2)(1.55)) \\
 &= 109.11 \text{ เซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

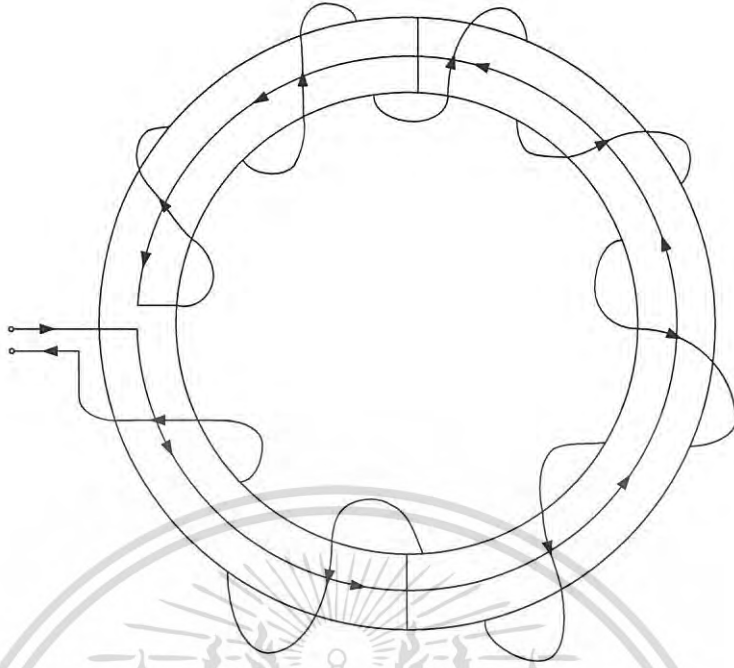
เมื่อ X คือ ความยาวของแกนเฟอร์ไรท์

Y คือ ความกว้างของแกนเฟอร์ไรท์

3.1.2 วิธีการพันขดลวด

ในการพันขดลวดโรกอฟสกีนั้นมีการพันที่แตกต่างจากการพันแบบปกติ คือ นอกจากการพันอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวแกนแล้วจะต้องพันย้อนกลับเข้าไปในแกนขดลวดตามแนวแกนของขดลวดโรกอฟสกีเพื่อหักล้างผลจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวด ทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากขดลวดเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กของกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัดเท่านั้น

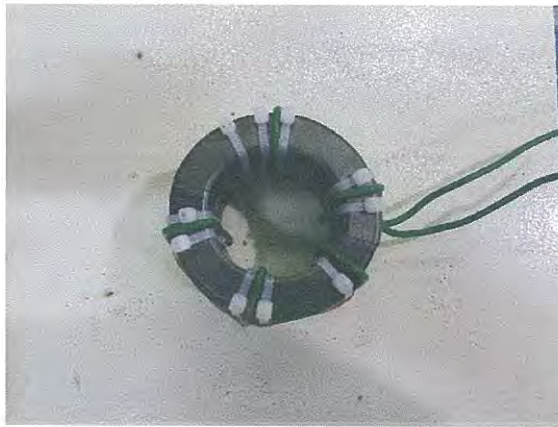
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การพันขดลวดโรกอฟสกี

การวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กตามกฎของแอมแปร์ ซึ่งการวัดจะมีความถูกต้องเมื่อพื้นที่หน้าตัดและความหนาแน่นของรอบขดลวดคงที่ตลอดช่วงความยาวแกน ดังนั้นการพันขดลวดจึงต้องคำนึงถึงความสม่ำเสมอของพื้นที่หน้าตัดและจำนวนรอบด้วย โดยกลุ่มของผู้จัดทำจะใช้จำนวนรอบในการพันทั้งหมด 5 รอบ และระยะห่างระหว่างในการพันแต่ละรอบจะห่างกันสม่ำเสมอ

ในการออกแบบจะพันตามหลักการพันขดลวดโรกอฟสกีธรรมดาโดยการพันบนแกนเฟอร์ไรท์จริงนั้นจะเริ่มจากการพันเส้นที่ย้อนกลับออกมาก่อนตามเส้นรอบวงของแกนเฟอร์ไรท์แล้วจึงพันรอบแกนเฟอร์ไรท์ทับ 5 รอบ โดยระยะห่างระหว่างรอบของการพันจะต้องสม่ำเสมอกันเพื่อทำให้เกิดการวัดที่แม่นยำ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขดลวดโรกอฟสกีที่พันเรียบร้อยแล้ว

3.1.3 ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกี [3]

ในการออกแบบ สามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกีได้จาก

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (3.2)$$

โดยที่ความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetic Reluctance, \mathcal{R}) ของขดลวดโรกอฟสกีจะเป็นความต้านทานแม่เหล็กเส้นทางฟลักซ์รวมของแกนเฟอร์ไรท์และช่องอากาศดังสมการ 3.3

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

ความต้านทานที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาว (l) และเป็นสัดส่วนผกผันกับพื้นที่หน้าตัด (A) และ (μ) ที่เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ผ่านไป จะได้

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (3.4)$$

ซึ่งสมการที่ (3.3) ถ้าเราเลือกแกนเหล็กที่ใช้ สารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) ที่มีค่า μ_r สูงมาก ๆ จะทำให้ค่า $\mathcal{R}_g > \mathcal{R}_c$ ($\mathcal{R}_c = 0$) จะได้ สมการหาค่าความเหนี่ยวนำใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จำนวนรอบขดลวดที่ต้องการพัน คือ 5 รอบ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศมีค่าเท่ากับ $4 \times 10^{-7} \text{ H/m}$ พื้นที่ตัดที่ของแกนเฟอร์ไรท์เท่ากับ $5.16 \text{ cm} \times 1.55 \text{ cm}$ และความกว้างของช่องว่างอากาศเท่ากับ 0.035 cm ดังนั้นค่า L ที่เหมาะสมคือ

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A_g}{l_g} = 71.7 \mu\text{H}$$

จากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วทำให้ทราบค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมในการออกแบบขดลวดโรกอฟสกี ผู้จัดทำจึงได้ทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกีจากเครื่อง RLC METER MODEL 878 ที่ได้ออกแบบมาดังนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกี

ครั้งที่	ค่าความเหนี่ยวนำ(μH)
1	63.8
2	64.2
3	64.7
4	65.2
5	65.5
ค่าเฉลี่ย	64.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ป้องกัน

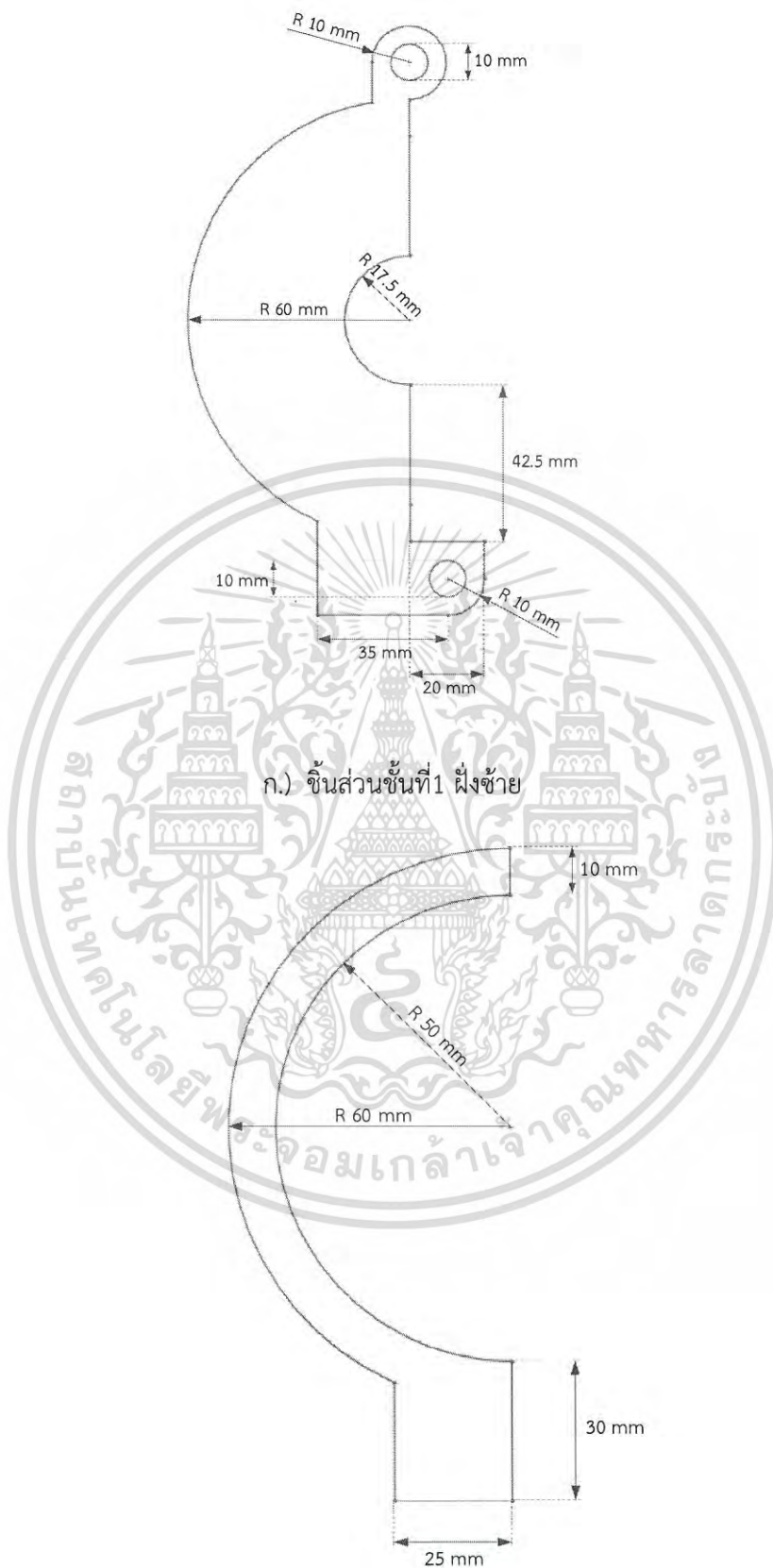
ในการทดสอบจริงเราไม่สามารถที่จะทดสอบโดยการนำขดลวดโรกอฟสกีมาทำการทดสอบได้จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์มาป้องกันขดลวดโรกอฟสกีเพื่อไม่ให้มีความเสียหายและความคลาดเคลื่อนแก่การทดสอบ อีกทั้งยังสามารถช่วยลดสัญญาณรบกวนได้โดยผู้จัดทำได้ทำการออกแบบในโปรแกรม SolidWorks



รูปที่ 3.5 การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันในโปรแกรม SolidWorks

โดยขนาดของชิ้นส่วนในแต่ละชิ้นโดยอ้างอิงจากขนาดของขดลวดโรกอฟสกีให้สามารถใส่ได้พอดีโดยไม่ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) ชั้นส่วนชั้นที่1 ฝั่งซ้าย

ข.) ชั้นส่วนชั้นที่2,4และ8 ฝั่งซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค.) ชั้นส่วนชั้นที่3และ7 ฝั่งซ้าย

ง.) ชั้นส่วนชั้นที่5 ฝั่งซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ.) ชั้นส่วนชั้นที่ 6 ฝั่งซ้าย

ฉ.) ชั้นส่วนชั้นที่ 9 ฝั่งซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข.) ชั้นส่วนวงในฝั่งซ้าย

ค.) ชั้นส่วนที่ใช้ประกอบ N-type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ฉ.) ชั้นส่วนชั้นที่1และ9 ฝั่งขวา

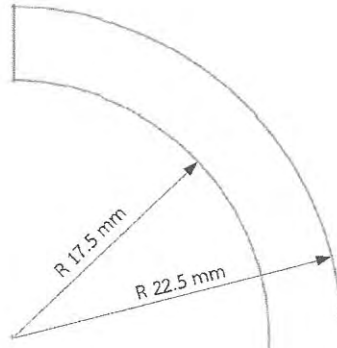
ญ.) ชั้นส่วนชั้นที่2,4,6และ8 ฝั่งขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ฎ.) ชั้นส่วนชั้นที่5 ฝั่งขวา

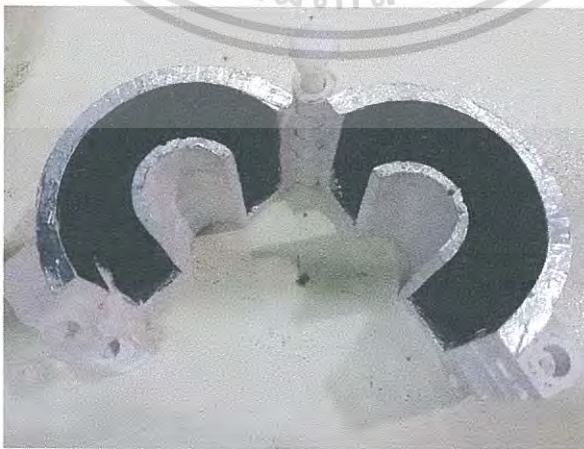
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ฎ.) ชั้นส่วนวงในฝั่งขวา

รูปที่ 3.6 ขนาดชั้นส่วนของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำการออกแบบ

หลังจากทำการออกแบบเสร็จแล้วจึงทำการสร้างโดยวัสดุที่ใช้คือพลาสติก (Plastwood) ทางผู้จัดทำได้เลือกน็อตที่ทำจากพลาสติกและใส่ฟองน้ำเข้าไปเพื่อดูดซับแรงกระแทกและยังช่วยให้ขดลวดโรกอฟสกีไม่เคลื่อนจากนั้นนำอลูมิเนียมเทปมาติดโครงสร้างภายในแล้วเชื่อมต่อกับกราวด์ (Ground) ของระบบ



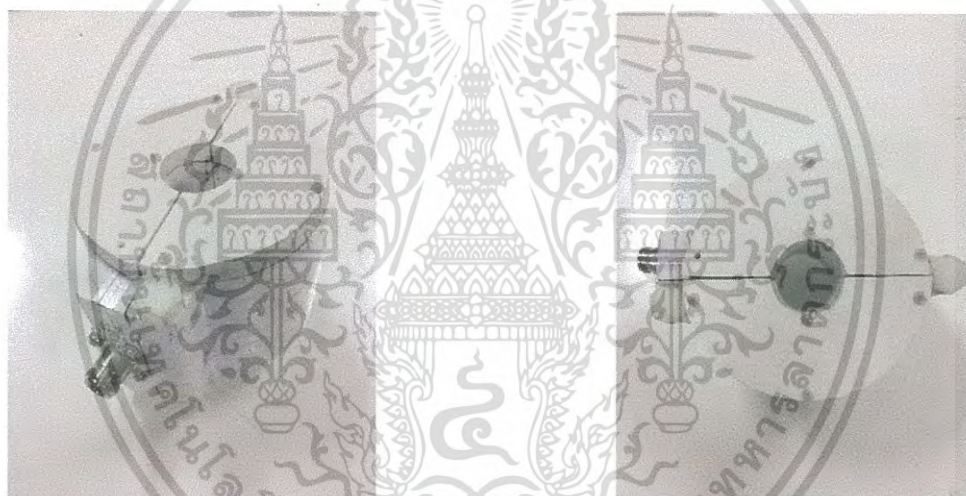
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ป้องกันโรกอฟสกีแบบสมบูรณ์จากการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจึงนำขดลวดโรกอฟสกีมาใส่ในอุปกรณ์ป้องกันพร้อมก็นำหัวต่อ N-Type มาต่อที่ปลายขดลวด



ก) ก่อนปิดฝาอุปกรณ์ป้องกัน



ข) หลังปิดฝาอุปกรณ์ป้องกัน

รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ป้องกันขดลวดโรกอฟสกีแบบสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสชนิดหนึ่งขึ้นมาจำเป็นต้องมีมาตรฐานของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นโดยมีการทดสอบความเป็นมาตรฐานและประสิทธิภาพพร้อมทั้งหาความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์เพื่อนำไปปรับปรุงก่อนที่นำไปทดสอบจริงโดยมีทั้งหมด 2 การทดสอบ ได้แก่ 1.การทดสอบสัญญาณรบกวนในระบบ 2.การทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

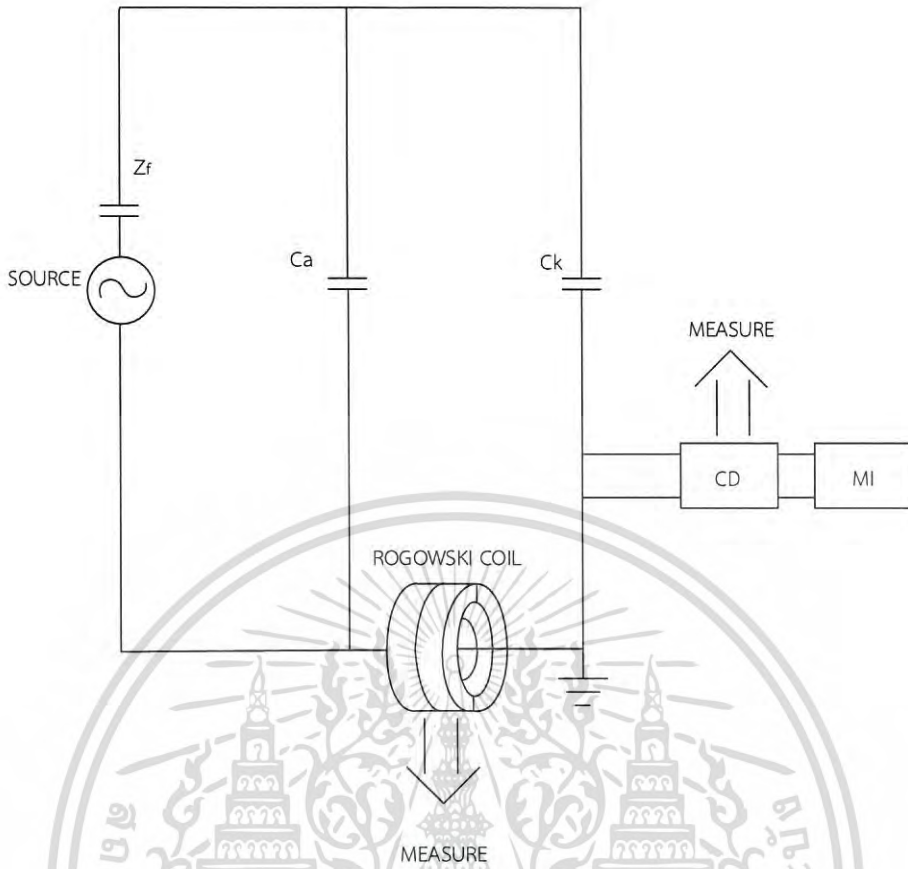
4.1 การทดสอบสัญญาณรบกวนในระบบ

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบสัญญาณรบกวนในระบบ

- | | |
|----------------------------------|--------|
| 1) ขดลวดโรกอฟสกี | 1 ชุด |
| 2) Picoscope | 1 ชุด |
| 3) ตัวต้านทาน 50 ohm | 2 ตัว |
| 4) Coaxial Cable | 2 เส้น |
| 5) ชุดหัวต่อเข้า Picoscope | 1 ชุด |
| 6) ตัวต้านทานไร้ความเหนียวนำ | 1 ชุด |
| 7) PD Pulse Calibrator | 1 ชุด |
| 8) Test object | 1 ชุด |
| 9) Coupling device (CD) | 1 ชุด |
| 10) Coupling capacitor (C_k) | 1 ชุด |
| 11) สาย RG-8 | 1 เส้น |

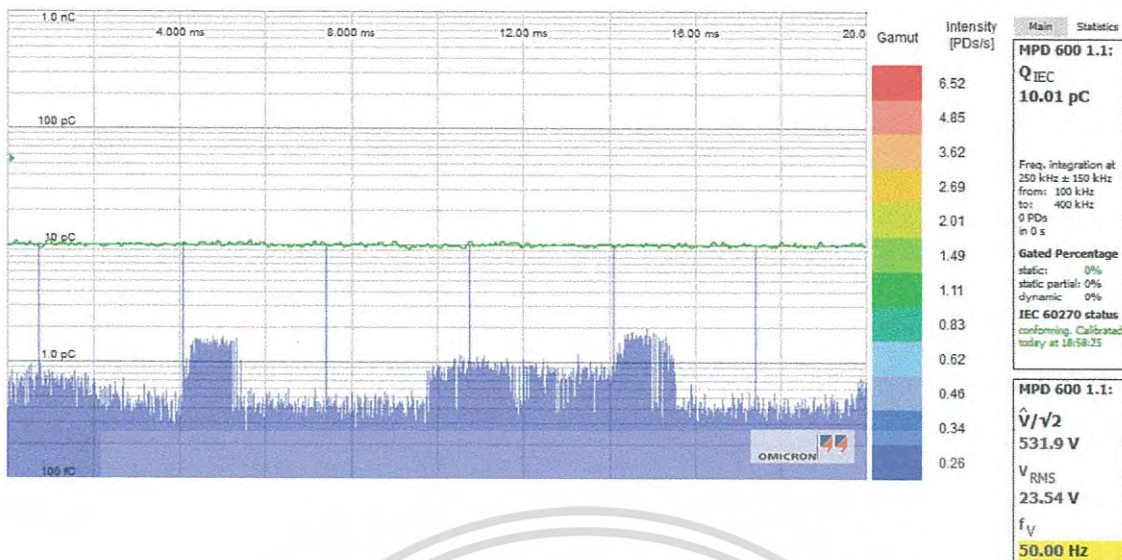
4.1.2 ผลการทดสอบสัญญาณรบกวนในระบบ

ในการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ตรวจจับจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นโดยหากมีค่าสัญญาณรบกวนไม่เกินครึ่งหนึ่งของประจุจากการดิสชาร์จบางส่วนถือว่าอุปกรณ์ตรวจจับนั้นได้มาตรฐานโดยวงจรสมมูลสัญญาณรบกวนในระบบจะเป็นดังรูปที่ 4.1

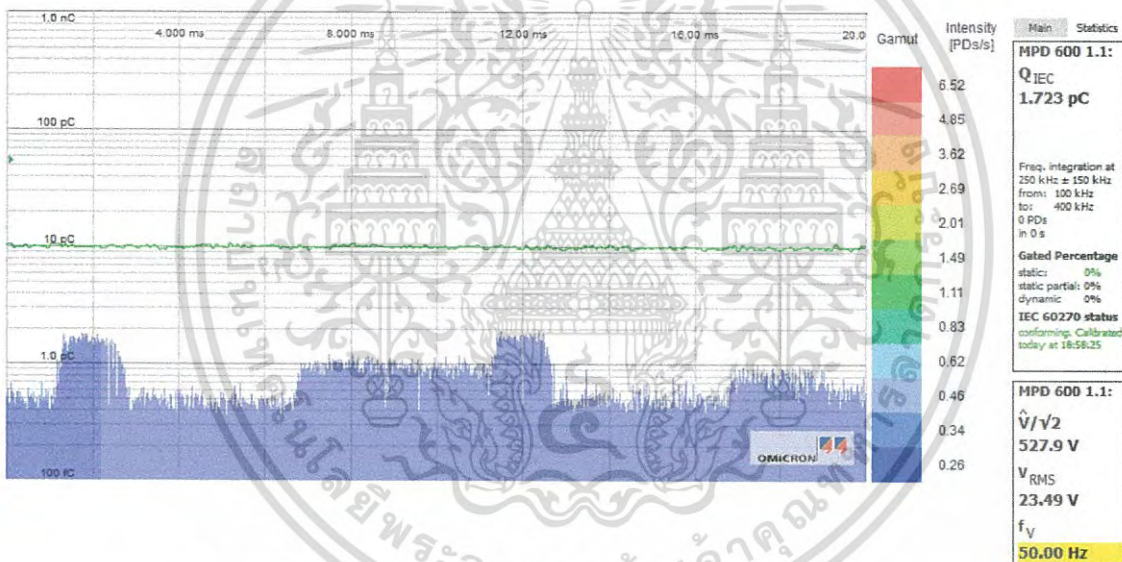


รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลการทดสอบสัญญาณรบกวน

อุปกรณ์จำลองการเกิดพัลส์ดีสชาร์จบางส่วน (Omicron mtronix technology CAL 542) เป็นตัวป้อนให้กับวัสดุทดสอบ (Test object) ที่ระดับ 10 pC เพื่อปรับเทียบโดยให้โปรแกรม Omicron mtronix technology MPD 600 อ่านค่าได้ใกล้เคียงหรือเท่ากับ 10 pC ดังรูปที่ 4.2ก จากนั้นทำการปลดอุปกรณ์การเกิดพัลส์ดีสชาร์จบางส่วนออก ผลลัพธ์ของสัญญาณรบกวนที่ตรวจพบในโรกอฟสกีมีค่าเท่ากับ 1.732 pC ดังรูปที่ 4.2ข



ก) ทำการปรับเทียบที่ 10pC ด้วยเครื่อง Omicron mtronix technology MPD 600



ข) หลังทำการปรับเทียบค่าสัญญาณรบกวนค่าสัญญาณรบกวนที่ได้คือ 1.732 pC
รูปที่ 4.2 สัญญาณรบกวนในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

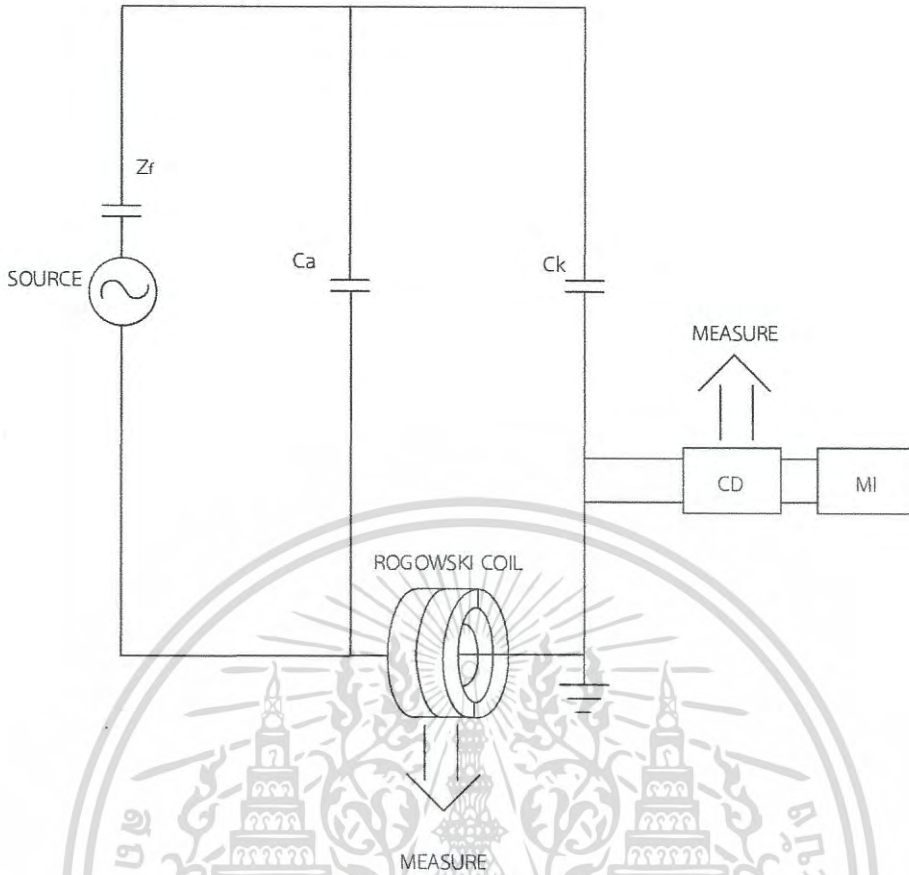
4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

1) ขดลวดโรกอฟสกี	1 ชุด
2) Picoscope	1 ชุด
3) ตัวต้านทาน 50 ohm	2 ตัว
4) Coaxial Cable	2 เส้น
5) ชุดหัวต่อเข้า Picoscope	1 ชุด
6) ตัวต้านทานรั่วความเหนียวน้ำ	1 ชุด
7) Corona discharge test object	1 ชุด
8) Surface discharge test object	1 ชุด
9) Internal discharge test object	1 ชุด
10) Coupling device (CD)	1 ชุด
11) Coupling capacitor (C_k)	1 ชุด
12) สาย RG-8	1 เส้น
13) หม้อแปลงทดสอบ 100kVA	1 ลูก
14) โพรบและมิเตอร์วัดแรงดัน	1 ชุด
15) ตู้ควบคุมแรงดัน	1 ชุด

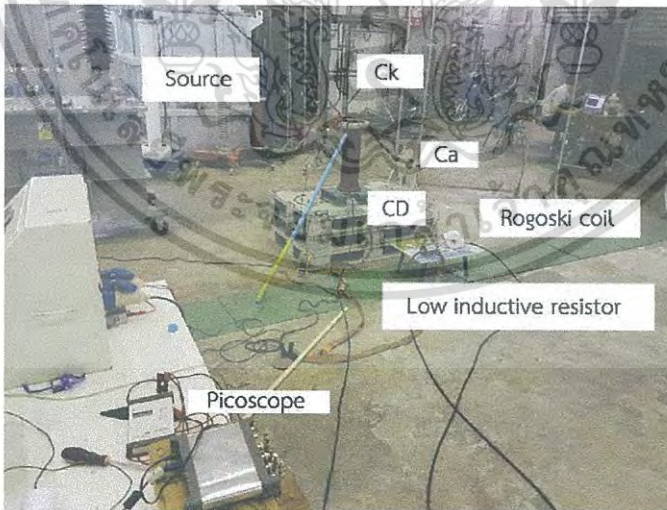
4.2.2 ผลการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

4.2.2.1 การดิสชาร์จแบบโคโรนา

การทดสอบการดิสชาร์จแบบโคโรนาจะใช้วัสดุปลายแหลมกับเฟลนเป็นวัสดุทดสอบโดยจะมีวงจรสมมูลในการทดสอบดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลการดิสชาร์จแบบโคโรนา



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลการดิสชาร์จแบบโคโรนาเมื่อต่อสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 วัสดุทดสอบปลายแหลมกับเฟลนอะคริลิก

โดยการดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงสูงจะต่อวัสดุปลายแหลม (Rod) เข้ากับด้านแรงดันสูง และต่อแผ่นระนาบ (Plane) ลงดินเมื่อทำการต่อสำเร็จจากนั้นค่อยๆขึ้นแรงดันจนมีพัลส์เกิดขึ้นโดยการดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงดันสูงจะมีพัลส์เกิดขึ้นที่ 270° และการดิสชาร์จแบบโคโรนาด้านแรงต่ำจะมีพัลส์เกิดขึ้นที่ 90° หากขึ้นแรงดันอีกจะมีพัลส์เกิดขึ้นที่ 90° , 270° เพิ่มขึ้นมาแต่หากเพิ่มแรงดันสูงขึ้นอีกอาจเกิดการเบรกดาวนได้โดยในการทดสอบการเกิดการดิสชาร์จจะไม่ทำการทดสอบจนเกิดการเบรกดาวนเพราะจะทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้



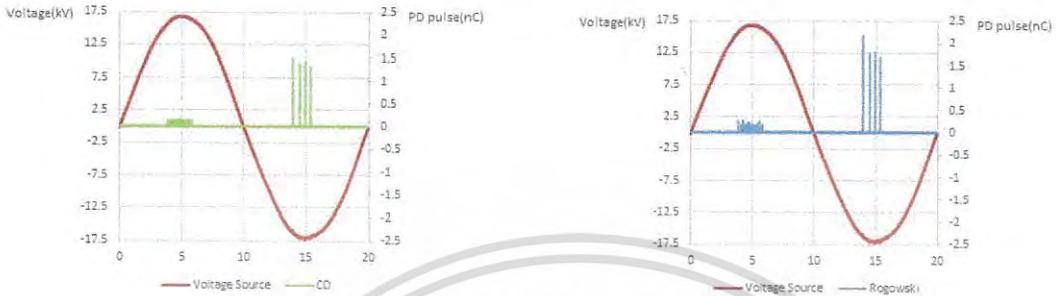
ก) อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน
ตามมาตรฐานสากล (Coupling device)

ข) ขดลวดโรกอฟสกี

รูปที่ 4.6 พัลส์การเกิดการดิสชาร์จแบบโคโรนาทางด้านแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดิสชาร์จแบบโคโรนาทางด้านแรงดันต่ำจะใช้วัสดุทดสอบเช่นเดียวกับการดิสชาร์จแบบโคโรนาทางด้านแรงดันสูงซึ่งจะแตกต่างกันที่การต่อวัสดุทดสอบโดยวัสดุปลายแหลม (Rod) จะต่อลงดิน และแผ่นระนาบ (Plane) จะต่อเข้ากับทางด้านแรงสูง



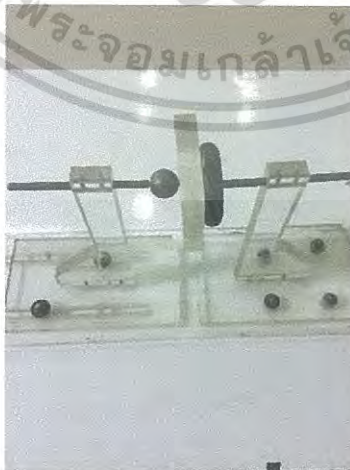
ก) อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน
ตามมาตรฐานสากล (Coupling device)

ข) ขดลวดโรกอฟสกี

รูปที่ 4.7 พัลส์การเกิดการดิสชาร์จแบบโคโรนาทางด้านกราวด์

4.4.2.2 การดิสชาร์จตามผิว

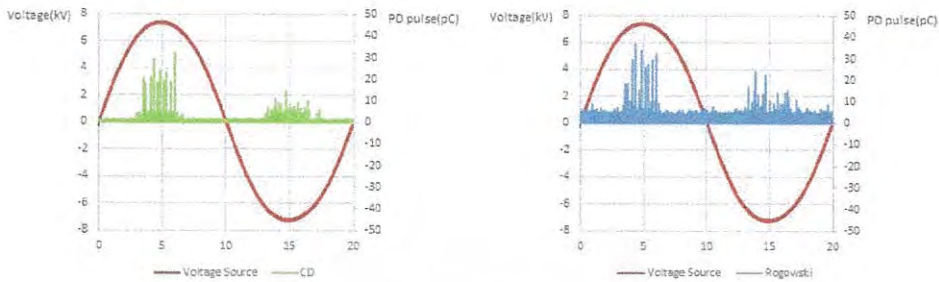
การทดสอบดิสชาร์จตามผิวจะมีวงจรการทดสอบเหมือนการดิสชาร์จแบบโคโรนาแต่จะแตกต่างกันตรงวัสดุทดสอบโดยจากปลายแหลมกับเพลนจะเปลี่ยนเป็นอิเล็กโตรดทรงกลมกับเพลนที่มีฉนวนเป็นอะคริลิก



รูปที่ 4.8 วัสดุทดสอบอิเล็กโตรดทรงกลมกับเพลนอะคริลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการต่อสำเร็จจากนั้นค่อยๆขึ้นแรงดันจนมีพัลส์เกิดขึ้นโดยการดิสชาร์จแบบตามผิวจะมีพัลส์เกิดขึ้นทั้ง 90° และ 270° ดังรูปที่ 4.9



ก) อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน
ตามมาตรฐานสากล (Coupling device)

ข) ขดลวดโรกอฟสกี

รูปที่ 4.9 พัลส์การเกิดการดิสชาร์จแบบตามผิว

4.4.2.3 การดิสชาร์จภายในโพรงอากาศ

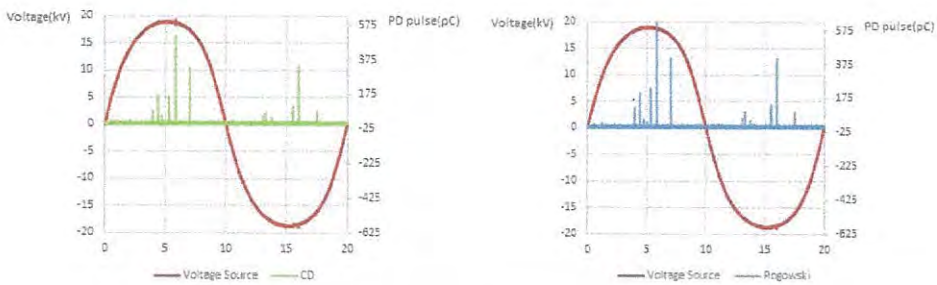
การทดสอบการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศจะมีวงจรเหมือนกับการทดสอบการดิสชาร์จแบบโคโรนาและตามผิวแตกต่างกันที่วัสดุทดสอบโดยการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศจะใช้เพลนกับเพลนที่มีฉนวนเป็นอะคริลิกที่มีโพรงอากาศภายใน



รูปที่ 4.10 วัสดุทดสอบเพลนกับเพลนอะคริลิกที่มีโพรงอากาศภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการต่อวงจรสำเร็จจากนั้นค่อยๆขึ้นแรงดันจนมีพัลส์เกิดขึ้นโดยการเกิดการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศจะมีพัลส์เกิดขึ้นทั้ง 90° และ 270° เช่นเดียวกับการดิสชาร์จแบบตามผิว



ก) อุปกรณ์ตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน
ตามมาตรฐานสากล (Coupling device)

ข) ขดลวดโรกอฟสกี

รูปที่ 4.11 พัลส์การเกิดการดิสชาร์จแบบภายใน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุป

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสแกนเฟอร์ไรท์สำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน โดยในการออกแบบจะใช้แกนเฟอร์ไรท์พันจำนวน 5 รอบและออกแบบระบบป้องกันภายนอก (Shield) จากนั้นนำมาทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพและนำมาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงแก้ไขโดยการทดสอบ ในการทดสอบสัญญาณรบกวนในระบบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสขดลวดโรกอฟสกีจะมีสัญญาณรบกวนภายในตัวอุปกรณ์ ในการทดสอบสัญญาณรบกวนที่ตรวจพบมีค่าเท่ากับ 1.723 pC ซึ่งมีการปรับเทียบโดยอุปกรณ์จำลองการเกิดพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน (Omicron mtronix technology CAL 542) ที่ระดับ 10 pC

การทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนซึ่งทำการทดสอบโดยใช้วัตถุทดสอบ 3 ชนิด การดิสชาร์จแบบโคโรนาทำการทดสอบทั้งทางด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ ทางด้านแรงสูงพัลส์ดิสชาร์จเกิดที่ค่ายอดลูกคลื่นไซน์ของแรงดันที่ป้อนที่มุม 270 องศา ที่ระดับแรงดัน 10.14 kV และเมื่อปรับระดับแรงดันเพิ่มขึ้นพัลส์ดิสชาร์จจะเกิดที่มุม 90 องศา ด้วยเช่นกัน ทางด้านแรงต่ำพัลส์ดิสชาร์จเกิดที่ค่ายอดลูกคลื่นไซน์ของแรงดันที่ป้อนที่มุม 90 องศา ที่ระดับแรงดัน 12.0 kV และเมื่อปรับระดับแรงดันเพิ่มขึ้นพัลส์ดิสชาร์จจะเกิดที่มุม 270 องศา ด้วยเช่นกัน การดิสชาร์จแบบตามผิวพัลส์ดิสชาร์จจะเกิดที่ค่ายอดลูกคลื่นไซน์ของแรงดันที่ป้อนที่มุม 90 และ 270 องศาตามลำดับ ที่ระดับแรงดัน 3.2 kV โดยพัลส์ดิสชาร์จที่มุม 270 องศา จะมีการกระจายตัวของพัลส์ถี่กว่าและมีจำนวนพัลส์มากกว่าที่มุม 90 องศา การดิสชาร์จภายในโพรงอากาศพัลส์ดิสชาร์จเกิดที่ค่ายอดลูกคลื่นไซน์ของแรงดันที่ป้อนที่มุม 90 และ 270 องศาเช่นเดียวกับการดิสชาร์จแบบตามผิว ที่ระดับแรงดัน 7.9 kV โดยลักษณะพัลส์ดิสชาร์จที่มุม 90 และ 270 องศา มีจำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นไม่มากและพัลส์กระจายออกไปเป็นระยะห่างใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสซึ่งเป็นขดลวดโรกอฟสกีที่ออกแบบมีลักษณะสัญญาณใกล้เคียงกับอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล (Coupling device) และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่พบ

ปัญหาและอุปสรรคที่พบในโครงการอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสแกนเฟอร์ไรต์สำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนมีข้อเสนอแนะและข้อควรระวังดังต่อไปนี้

- 1) ไม่สามารถหาค่าความถี่ต่อพด้านความถี่สูงได้เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าความจุของขดลวดโรกอฟสกีตามสมการในบทที่ 2 อีกทั้งโปรแกรม Picoscope ปรับย่านความถี่ได้แค่ 20 MHz
- 2) ควรเพิ่มระดับแรงดันอย่างช้าๆ เพราะอาจทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ เป็นเหตุให้อุปกรณ์วัดต่างๆ เกิดความเสียหาย
- 3) ควรระมัดระวังในขณะที่ทำการทดสอบไม่ให้อุปกรณ์หรือสายไฟเกิดการชำรุด เช่นการเดินเหยียบสายไฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] นรภัท สุขธิโชค และ คณะ, การวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ด้วยวงจรโวลงานอินทิเกรตลดรอกอฟสกี, ปรียญานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558
- [2] ดร.สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ, 2547.
- [3] มนตรี เภาเดช, “เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1” (ออนไลน์), แหล่งที่มา : http://montri.rmutl.ac.th/old/ee/04210210machine/1_Magnetic%20Circuit.pdf
- [4] IEC 60270, High-voltage test techniques - Partial discharge measurements, 2000-12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสแกนเฟอร์ไรท์สำหรับตรวจจับดิสราร์จบางส่วน

FERRITE CORE CURRENT TRANSDUCER FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION

ชนภัทร รอดทองเต็ม มรุตผล มุขยพงศ์ และ สุทธิกร จัยสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย 1 ลาดกระบัง 1 กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสแกนเฟอร์ไรท์สำหรับตรวจจับดิสราร์จบางส่วนโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี ซึ่งได้สร้างอุปกรณ์ดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพโดยเนื้อหาของบทความฉบับนี้ได้แบ่งการออกแบบออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสดิสราร์จด้วยขดลวดโรกอฟสกีโดยใช้แกนเฟอร์ไรท์และส่วนที่สองเป็นการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันภายนอก (Shield) โดยนำชุดอุปกรณ์ไปทดสอบการเกิดดิสราร์จบางส่วนและนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลของชุดอุปกรณ์ตรวจจับดิสราร์จบางส่วนอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC60270 ซึ่งคาดว่าชุดอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นนั้นจะมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับชุดตรวจจับการดิสราร์จบางส่วนที่ใช้ประจำ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.

คำสำคัญ ขดลวดโรกอฟสกี, ดิสราร์จบางส่วน

Abstract

This paper presents design and construction of a ferrite core current transducer for partial discharge detection. The scope of this project is divided into two section. The first part is to introduce the design of a Rogowski with the ferrite coil. Secondly, it is to demonstrate the design of a enclosure of the developed equipment set which has been tested to detect partial discharge in the high voltage laboratory. The experimental results of the developed system are also compared with those from a commercial detector. Good agreements were observed in all experiment. From the experimental results, the validity of the developed equipment has been confirmed and accords to IEC 60270 standard.

Keyword Rogowski coil, partial discharge

1.ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การตรวจสอบคุณภาพของระบบไฟฟ้านั้นเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญ เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์และตรวจสอบระบบไฟฟ้าแรงสูง โดยการตรวจสอบอุปกรณ์ของระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะทำให้พบความบกพร่องของอุปกรณ์ก่อนที่จะได้รับความเสียหายและทำให้ระบบไฟฟ้าแรงสูงมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นซึ่งความเสียหายในระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้นเกิดจากหลายปัจจัยแต่ที่เราสนใจและทำการศึกษาคือ การดิสราร์จบางส่วน

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดดิสราร์จบางส่วน

การเกิดดิสราร์จบางส่วน (Partial discharge ; PD) คือ การเกิดการเสียดสภาพการเป็นฉนวนเพียงบางส่วนของระบบการฉนวนเป็นการเกิดเบรกควานหรือดิสราร์จที่ไม่เชื่อมโยงกันระหว่างอิเล็กโทรด ไม่ได้เป็นการเสียดสภาพการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบ การเกิดดิสราร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต ดิสราร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ 1.การดิสราร์จแบบโคโรนา 2.การดิสราร์จตามผิว 3.การดิสราร์จภายใน

2.2 ผลกระทบของการเกิดดิสราร์จบางส่วน

การดิสราร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆและเกิดความผิพองของขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกควานอย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานฉนวนจะสั้นลง

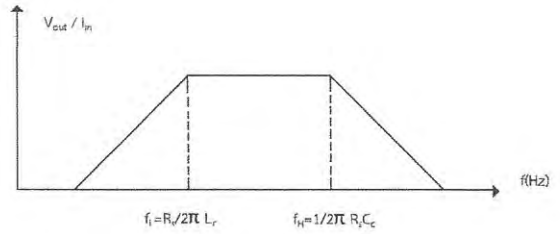
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการวัดการคิสร่างของบางส่วนของขดลวดโรกอฟสกี

2.3.1 หลักการวัดกระแสด้วยขดลวด โรกอฟสกี

ขดลวด โรกอฟสกีเป็นอุปกรณ์วัดกระแสซึ่งสามารถออกแบบให้วัดกระแสที่มีแถบ(Bandwidth)กว้างและมีค่ากระแสมาก ๆ เช่น กระแสไฟฟ้า

เมื่อนำขดลวดโรกอฟสกีไปล้อมรอบแท่งตัวนำที่มีสนามไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กล้อมรอบแท่งตัวนำไปคายเกี่ยวกับขดลวด โรกอฟสกีที่พันรอบแกนวัสดุที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของสนามแม่เหล็กสูง เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย ผลจากฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลานี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายทั้งสองของขดลวด ถ้านำแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ไปผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสม จะได้รูปคลื่นของกระแสที่ต้องการวัดปรากฏผลออกมาในรูปของแรงดันขาออกของวงจร ดังรูปที่ 1

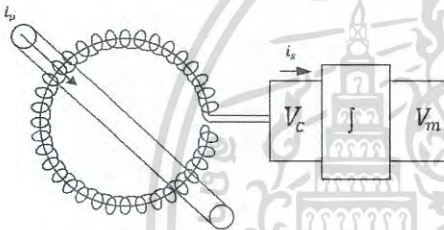


รูปที่ 3 ผลตอบสนองต่อความถี่

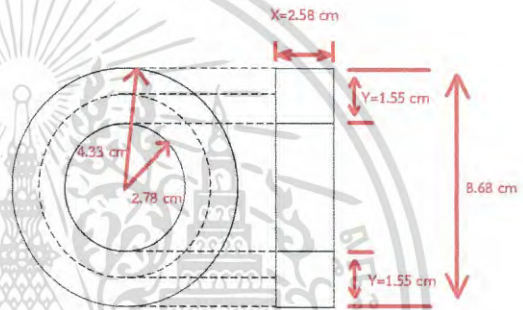
3.การออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกี

3.1 การออกแบบและประกอบสร้างแกนขดลวด

3.1.1 การออกแบบแกนของขดลวด



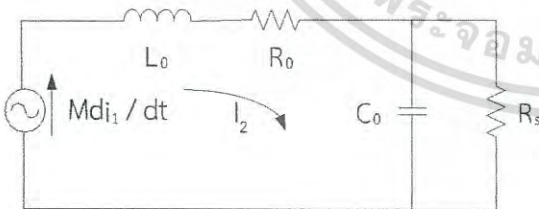
รูปที่ 1 หลักการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี



รูปที่ 4 ขนาดของแกนขดลวด

2.3.2 วงจรสมมูลของขดลวด โรกอฟสกี

ขดลวด โรกอฟสกีสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของขดลวด โรกอฟสกี

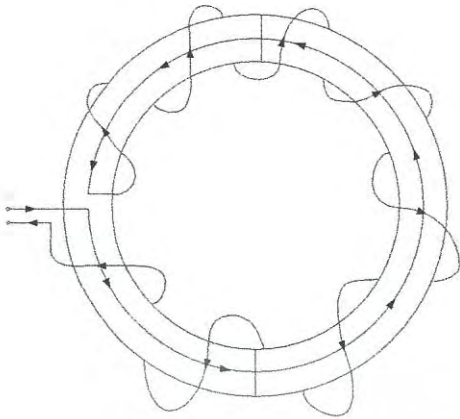


รูปที่ 5 การประกอบสร้างแกนเฟอร์ไรท์

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.7 สามารถเขียนผลตอบสนองความถี่ (frequency respond) ดังรูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 วิธีการพันขดลวด



รูปที่ 6 การพันขดลวดโรกอฟสกี



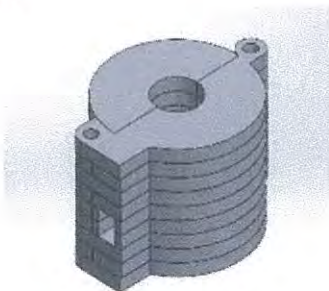
รูปที่ 9 อุปกรณ์ป้องกันขดลวดโรกอฟสกีแบบสมบูรณ



รูปที่ 7 ขดลวดโรกอฟสกีที่พันเรียบร้อยแล้ว

3.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ป้องกัน

ในการทดสอบจริงเราไม่สามารถที่จะทดสอบโดยการนำขดลวด โรกอฟสกีมาทำการทดสอบได้จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์มาป้องกันขดลวดโรกอฟสกีเพื่อไม่ให้มีความเสียหายและความคลาดเคลื่อนแก่การทดสอบอีกทั้งยังสามารถช่วยลดสัญญาณรบกวนได้โดยผู้จัดทำได้ทำการออกแบบในโปรแกรม SolidWorks

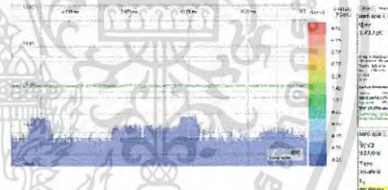


รูปที่ 8 การออกแบบอุปกรณ์ป้องกัน ใน โปรแกรม SolidWorks

4.การทดสอบและประเมินผล

4.1 การทดสอบสัญญาณรบกวนในระบบ

อุปกรณ์จำลองการเกิดพัลส์ดีซิสซาร์จบางส่วน (Omicron mtronix technology CAL 542) เป็นตัวป้อนให้กับวัสดุทดสอบ (Test object) ที่ระดับ 10 pC เพื่อเปรียบเทียบโดยให้โปรแกรม Omicron mtronix technology MPD 600 อ่านค่าได้ใกล้เคียงหรือเท่ากับ 10 pC จากนั้นทำการปลดอุปกรณ์การเกิดพัลส์ดีซิสซาร์จบางส่วนออก ผลลัพธ์ของสัญญาณรบกวนที่ตรวจพบในโรกอฟสกีมีค่าเท่ากับ 1.732 pC ดังรูปที่ 12



รูปที่ 10 สัญญาณรบกวนในระบบ

4.2 การทดสอบการเกิดดิซซาร์จบางส่วน

4.2.1 การดิซซาร์จแบบโคโรนา



ก) Coupling device

ข) ขดลวดโรกอฟสกี

รูปที่ 11 พัลส์การเกิดการดิซซาร์จแบบโคโรนาทางด้านแรงสูง



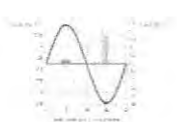
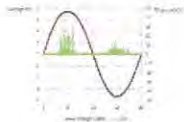
ก) Coupling device

ข)ขดลวดโรกอฟสกี

รูปที่ 12 พัลส์การเกิดการดิซซาร์จแบบโคโรนาทางด้านกรวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การดิสชาร์จตามผิว



ก) Coupling device

ข) ขดลวดโรกอฟสกี

รูปที่ 13 พัลส์การเกิดการดิสชาร์จแบบตามผิว

4.2.3 การดิสชาร์จภายใน



ก) Coupling device

ข) ขดลวดโรกอฟสกี

รูปที่ 14 พัลส์การเกิดการดิสชาร์จแบบภายใน

5.สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนซึ่งทำการทดสอบโดยใช้วัตถุทดสอบ 3 ชนิด การดิสชาร์จแบบโคโรนาทำการทดสอบทั้งทางด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ ทางด้านแรงสูงพัลส์ดิสชาร์จที่เกิดที่ค่าขอดลูกคลื่นไซน์ของแรงดันที่ป้อนที่มุม 270 องศา ที่ระดับแรงดัน 10.14 kV และเมื่อปรับระดับแรงดันเพิ่มขึ้นพัลส์ดิสชาร์จจะเกิดที่มุม 90 องศา ด้วยเช่นกัน ทางด้านแรงต่ำพัลส์ดิสชาร์จที่เกิดที่ค่าขอดลูกคลื่นไซน์ของแรงดันที่ป้อนที่มุม 90 องศา ที่ระดับแรงดัน 12.0 kV และเมื่อปรับระดับแรงดันเพิ่มขึ้นพัลส์ดิสชาร์จจะเกิดที่มุม 270 องศา ด้วยเช่นกัน การดิสชาร์จแบบตามผิว พัลส์ดิสชาร์จจะเกิดที่ค่าขอดลูกคลื่นไซน์ของแรงดันที่ป้อนที่มุม 90 และ 270 องศา ตามลำดับ ที่ระดับแรงดัน 3.2 kV โดยพัลส์ดิสชาร์จที่มุม 270 องศา จะมีการกระจายตัวของพัลส์ที่กว้างและมีจำนวนพัลส์มากกว่าที่มุม 90 องศา การดิสชาร์จภายในโพรงอากาศพัลส์ดิสชาร์จที่เกิดที่ค่าขอดลูกคลื่นไซน์ของแรงดันที่ป้อนที่มุม 90 และ 270 องศาเช่นเดียวกับการดิสชาร์จแบบตามผิว ที่ระดับแรงดัน 7.9 kV โดยลักษณะพัลส์ดิสชาร์จที่มุม 90 และ 270 องศา มีจำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นไม่มากและพัลส์กระจายออกไปเป็นระยะห่างใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสซึ่งเป็นขดลวดโรกอฟสกีที่ออกแบบ มีลักษณะสัญญาณใกล้เคียงกับอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

ตามมาตรฐานสากล (Coupling device) และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ได้ออกแบบไว้

6.กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและได้รับการช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะระหว่างทำงาน นอกจากนี้ยังสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงการอีกด้วย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สำหรับการช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการปฏิบัติการทดลองผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ให้กำลังใจและมีส่วนช่วยเหลือเสมอมา ทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] นริศ สุทธิโชค และ คณะ, การวัดกระแสสมิตต์ด้วยวงจรโวลงานอินดิเคอร์ทขดลวด โรกอฟสกี, ปริญญาบัตรคณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558
- [2] ดร.สำราญ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพ, 2547.
- [3] มนตรี เงามาศ, "เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1"(ออนไลัน), แหล่งที่มา: http://montri.rmutl.ac.th/old/ec/04210210machine/1_Magnetic%20Circuit.pdf
- [4] IEC 60270, High-voltage test techniques - Partial discharge measurements, 2000-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

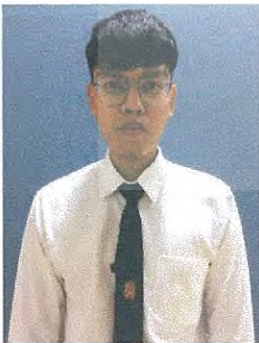
ประวัติผู้เขียน



นายธนภัทร รอดทองเต็ม รหัส 57010559
 วันเกิด 11 กันยายน 2538
 ที่อยู่ 49/253 ม.5 ต.ลาดสวาย อ.ลำลูกกา ปทุมธานี 12150
 มัธยมศึกษา โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย รังสิต
 E-mail thanapat_matt@hotmail.com



นายมรุพล มุขยพงศ์ รหัส 57011014
 วันเกิด 17 ธันวาคม 2538
 ที่อยู่ 472/31 หมู่บ้านฮาปิเตียชาย ท่าข้าม บางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
 มัธยมศึกษา โรงเรียนเทพศิรินทร์
 E-mail cottonds@hotmail.co.th



นายสุทธิกร จุ้ยสกุล รหัส 57011393
 วันเกิด 18 พฤษภาคม 2538
 ที่อยู่ 71/3 ซ.พระปิยะ1 ต.ทะเลชุบศร อ.เมือง ลพบุรี
 มัธยมศึกษา โรงเรียนพระนารายณ์ ลพบุรี
 E-mail physicssine@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้