

ระบบตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินขณะใช้งาน



นายสุกิตต์ ชะวาใต้

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

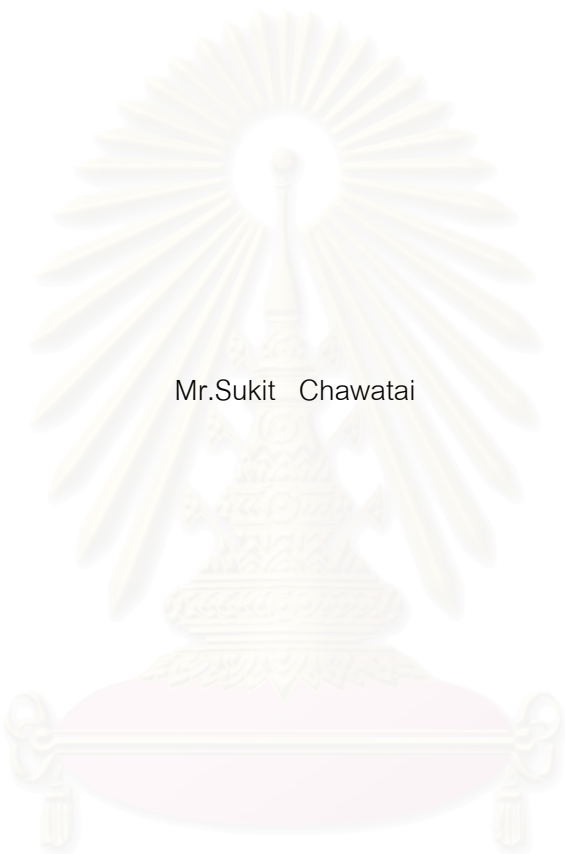
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A PARTIAL DISCHARGE DETECTION SYSTEM IN THE JOINT OF HIGH VOLTAGE UNDERGROUND
CABLE UNDER LOAD CONDITIONS



Mr.Sukit Chawatai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering

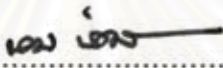
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic year 2007


Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบตรวจหาการเกิดดีเอสอาร์บางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูงใต้
ดิน ขณะใช้งาน
โดย นายสุกิตต์ ชะวาใต้
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ ังส์วิจิตรประภา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรัตน์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. วีระพันธ์ ังส์วิจิตรประภา)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสคติพงษ์ พิชัยสวัสดิ์)

สุกิตต์ ชะวาใต้ : ระบบตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน
ขณะใช้งาน. (A PARTIAL DISCHARGE DETECTION SYSTEM IN THE JOINT OF
HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLE UNDER LOAD CONDITIONS).

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นรายงานการพัฒนารูปแบบและสร้างระบบที่ใช้ในการ
ตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ขณะใช้งาน ซึ่งในการตรวจหา
ดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้ใช้เซ็นเซอร์ที่เรียกว่าโรกอฟฟ์คอยล์ ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อ
แบบเหนี่ยวนำ โดยจะไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของเซ็นเซอร์ต่อกับสายเคเบิลที่มีแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
ซึ่งในการออกแบบและสร้างเซ็นเซอร์นั้นสามารถเปิดออกได้ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

หลักการทำงานจะมีเซ็นเซอร์ 2 ชุดต่อวัดสัญญาณบริเวณรอบของจุดต่อสายเคเบิลแรง
สูงทั้งสองด้าน และจะนำเอาวงจรถอดสัญญาณที่สร้างขึ้นมารับสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์ทั้ง 2
ชุด โดยถ้าเกิด PD ที่จุดต่อสายเคเบิลแรงสูงนั้น ขนาดของแรงดันที่ได้จากวงจรรวมสัญญาณจะ
ได้ ประมาณ 2 เท่าของสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์แต่ละชุด ในทางกลับกันถ้าเกิด PD นอกจุดต่อ
สายเคเบิลแรงสูง สัญญาณที่ได้จากวงจรรวมสัญญาณจะหักล้างกันหมด

ในการวิจัยนี้ ได้สร้างจุดเกิดดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้โลหะปลายแหลมแทงเข้าเนื้อฉนวน
ของสายเคเบิลแรงสูง ในกรณีที่เกิดดีสชาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูง ผลที่ได้จากการ
รวมสัญญาณ จะได้สัญญาณรวมแล้วประมาณ 1.6-1.7 เท่าของสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์ ใน
กรณีตรงข้ามเมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วนนอกจุดต่อสายเคเบิลแรงสูง ผลที่ได้จากการรวมสัญญาณ
จะได้สัญญาณรวมแล้วน้อยมากประมาณ 0.1 เท่าของสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์ จากผล
การศึกษาดังกล่าวที่ได้ผลต่างกัน จึงสามารถตรวจหาดีสชาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูง
ได้ดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2550

4770502021 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : PARTIAL DISCHARGE DETECTION / UNDERGROUD CABLE

SUKIT CHAWATAI : A PARTIAL DISCHARGE DETECTION SYSTEM IN THE
JOINT OF HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLE UNDER LOAD
CONDITIONS.

THESIS ADVISOR: WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA, Dr.-Ing.

This thesis presents the development, design and construction of a partial discharge(PD) detection system in joint of underground high voltage cable under load conditions. This work used "Rogowski coil" , inductive coupling sensor type, as a PD detector. By which, it does not provide any contact to the high voltage cable. This sensor was designed and constructed to easily open and very convenience usage.

The operational principle is the usage of 2 sensors measured at the both edges of cable joint. The measured signals will be summarized by developed electronic circuit. In case of PD existence in the cable joint, the magnitude of the summarized voltage will be approximated twice of their original magnitude. On the contrary ,when the PD comes from the outside, the measured signals will be cancelled each other.

The PD in this research was created by the sharpen rod drove into the high voltage cable insulation. In case of PD in the joint, the summarized signal was about 1.6-1.7 times of the signal taken from each sensor. On the contrary, if the PD outside the joint, the summarized signal was about 0.1 times of the original signal. It can be concluded that, the different results from this work provide that, the system can well used to determine the PD in the joint.

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature.....*sukit*

Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature.....*W. Rungseevijitprapa*

Academic year 2007.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางศึกษาวิจัย และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ และ ผศ. ดร.โสทธิพงษ์ พิชัยสวัสดิ์ ที่ช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์และยังให้ข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์กับวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณท่านผู้บริหาร บริษัท ยู เอ็ม ซี ไคเคาส์ติง จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนเวลาในการเรียนมาโดยตลอด เพื่อให้ข้าพเจ้าได้มีเวลาศึกษาต่อ และยังสามารถปฏิบัติงานควบคู่ไปด้วย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านที่ทำงานอยู่ในบริษัท ยู เอ็ม ซี ไคเคาส์ติง จำกัด ฝ่ายซ่อมบำรุง และท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านที่อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง และท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการสอนการใช้งานเครื่องมือวัดต่างๆ และเป็นกำลังใจ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านที่มหาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษา ในการจัดทำอุปกรณ์ต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบคุณพระคุณบิดา, มารดา, ญาติผู้ใหญ่ และพี่น้อง ที่ได้ให้การอบรมสั่งสอนความรู้ทั้งทางโลกและทางธรรม ตลอดจนมอบกำลังใจให้ข้าพเจ้า จนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ในที่สุด จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. หลักการและทฤษฎี.....	4
2.1 ดิสชาร์จบางส่วน	4
2.1.1 ดิสชาร์จแบบโคโรนา (Corona Discharge).....	5
2.1.2 ดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge).....	5
2.1.3 ดิสชาร์จภายใน (Inner Discharge).....	5
2.2 พฤติกรรมของดิสชาร์จบางส่วน.....	6
2.2.1 วงจรสมมูลดิสชาร์จบางส่วน.....	6
2.2.2 ธรรมชาติพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน.....	8
2.3 เทคนิคการตรวจหาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิล	10
2.3.1 Capacitive Coupling.....	10
2.3.1 Inductive Coupling.....	11
2.4 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟฟ์คอยล์	12
2.4.1 การพันขดลวดของโรกอฟฟ์คอยล์.....	12
2.4.2 หลักการโรกอฟฟ์คอยล์ชนิด Self integrator	15

2.4.3	หลักการโรกอฟที่คอยล์ชนิด RC integrator	18
2.5	วงจรขยายวัตต์คัมอุปกรณ์.....	20
2.6	วงจรรวมสัญญาณ	22
2.7	วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (comparator circuit)	23
3.	การออกแบบและประกอบสร้างระบบตรวจหาดีสชาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ขณะใช้งาน.....	24
3.1	คุณสมบัติของโรกอฟที่คอยล์	26
3.2	การออกแบบโรกอฟที่คอยล์.....	26
3.2.1	แกนขดลวด	26
3.2.2	ขดลวด.....	27
3.2.3	การชิลด์	27
3.3	การสร้างโรกอฟที่คอยล์.....	28
3.4	วงจรอินทิเกรตเตอร์.....	29
3.5	วงจรรวมสัญญาณ.....	31
3.6	วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ.....	34
3.7	อุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ทดสอบ	35
4.	ผลการทดสอบและประเมินผลระบบตรวจหาดีสชาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ขณะใช้งาน.....	40
4.1	การทดสอบและประเมินผลส่วนตรวจหาสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน	41
4.1.1	การทดสอบอุปกรณ์ต่างๆก่อนทำการทดสอบจริง	43
4.1.2	การทดสอบและประเมินผลโรกอฟที่คอยล์ เมื่อเกิด PD ที่จุดต่อสายเคเบิล	44
4.1.3	การทดสอบและประเมินผล Delay time เมื่อคล้องโรกอฟที่คอยล์ในตำแหน่งต่างๆ	50
4.1.4	การทดสอบและประเมินผลโรกอฟที่คอยล์ เมื่อเกิด PD ที่นอกจุดต่อสายเคเบิล (ด้านซ้าย).....	52
4.1.5	การทดสอบและประเมินผลโรกอฟที่คอยล์ เมื่อเกิด PD ที่นอกจุดต่อสายเคเบิล (ด้านขวา)	54
4.1.6	การ calibrate rogowski coil	56
4.2	การทดสอบและประเมินผลส่วนประมวลผล	57
4.2.1	การทดสอบและประเมินผลสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนเมื่อผ่านวงจรรวมสัญญาณ	57

4.2.2 การทดสอบและประเมินผลสัญญาณดีศจารย์บางส่วนเมื่อผ่านวงจรเปรียบเทียบ
 สัญญาณ.....58

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ..... 61

รายการอ้างอิง..... 63

ภาคผนวก..... 64

 ภาคผนวก ก 65

 ภาคผนวก ข..... 66

 ภาคผนวก ค..... 68

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 71



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงสัญญาณที่ Capacitive Coupler บอกการเกิด PD	11
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในระบบกับแรงดันของสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน	48
4.2 ผล Delay time ระหว่างโรกอฟฟี่คอยล์ทั้งสองชุด เมื่อทดสอบคัลลิ่งโรกอฟฟี่คอยล์ที่ตำแหน่ง ต่างๆ(ตำแหน่ง X , Y).....	51



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 รูปแบบของดีสชาร์จบางส่วน ก) โคโรนาดีสชาร์จ ข) ดีสชาร์จตามผิว ค) ดีสชาร์จภายใน ...	6
2.2 วงจรสมมูลดีสชาร์จภายใน.....	7
2.3 วงจรสมมูล PD ในทางปฏิบัติ	7
2.4 วงจรสมมูลของโคโรนาดีสชาร์จและดีสชาร์จตามผิว.....	8
2.5 แรงดันตกคร่อมแก๊สและกระแสไหลเมื่อเกิด PD	8
2.6 การเกิด PD ซ้ำๆ.....	9
2.7 รูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแก๊สเล็กๆ.....	10
2.8 เทคนิคการตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายในจุดต่อสายเคเบิล แบบวิธี Capacitive Coupler.....	10
2.9 เทคนิคการตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายในจุดต่อสายเคเบิล แบบวิธี Inductive Coupler.....	11
2.10 ขดลวดโรกอฟฟ์คอยล์	13
2.11 วงจรสมมูลของโรกอฟฟ์คอยล์.....	14
2.12 วงจรสมมูลเมื่อต่ออิมพีแดนซ์ขาออก	15
2.13 วงจรสมมูลโรกอฟฟ์คอยล์ชนิด self integrator	16
2.14 ผลตอบสนองของควมถี่ของโรกอฟฟ์คอยล์ชนิด self integrator.....	18
2.15 วงจรสมมูลโรกอฟฟ์คอยล์ชนิด RC integrator.....	18
2.16 ผลตอบสนองของควมถี่ของโรกอฟฟ์คอยล์ชนิด RC integrator	20
2.17 วงจรขยายการวัดคัมอุปรณ์ที่ใช้ในการคำนวณ.....	21
2.18 วงจรรวมสัญญาณที่ใช้ในการคำนวณ.....	22
2.19 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ใช้ในการคำนวณ.....	23
3.1 แสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบตรวจหาดีสชาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิล	25
3.2 การพันขดลวด.....	27
3.3 ทฤษฎีการไหลของกระแสและการเหนี่ยวนำร่วม	28
3.4 การพันขดลวด 2 ชุดตรงข้ามกัน.....	29
3.5 โรกอฟฟ์คอยล์ที่้ออกได้.....	29
3.6 ผลตอบสนองของควมถี่ของโรกอฟฟ์คอยล์ชนิด RC integrator โดยใช้โปรแกรม MultiSim.....	30

3.7 สัญญาณดีสซาร์จบางส่วน ที่วัดได้จากโรกอฟก็คอยล์ชนิด RC integrator 31

3.8 วงจรรวมสัญญาณดีสซาร์จบางส่วน 32

3.9 สัญญาณพัลส์ V1 ขนาด 30 mv ที่จำลองโดยใช้โปรแกรมmultisim 7.0 32

3.10 สัญญาณพัลส์ V2 ขนาด 30 mv ที่จำลองโดยใช้โปรแกรมmultisim 7.0 33

3.11 สัญญาณ รวม V1 กับ V2 ที่วัดสัญญาณที่ R7 ใช้โปรแกรม Multisim 7.0..... 33

3.12 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ..... 34

3.13 สัญญาณ input ขนาด 800 mV และ แรงดันอ้างอิง 400 mvใช้โปรแกรม Multisim 34

3.14 สัญญาณ output วงจรเปรียบเทียบ ใช้โปรแกรม Multisim 35

3.15 วงจรรวมสัญญาณและวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ประกอบใช้งาน..... 35

3.16 สายเคเบิลวัด 50 ohm หัวต่อ BNC 36

3.17 ผลการ calibrate สายเคเบิลวัด 2 เส้น โดยวัดสัญญาณดีสซาร์จบางส่วน ที่ออกจากโรกอฟก็คอยล์ จุดเดียวกัน36

3.18 Oscilloscope 37

3.19 Variac..... 37

3.20 หม้อแปลงไฟฟ้า 38

3.21 หม้อแปลงสปาร์ก 38

3.22 Pulse Generator 39

4.1 ส่วนประกอบต่างๆของระบบตรวจหาดีสซาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิล..... 41

4.2 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ทดสอบ..... 42

4.3 การคลั่งองโรกอฟก็คอยล์ 42

4.4 สัญญาณที่วัดได้จากโรกอฟก็คอยล์ RC1 และ RC2 ที่แรงดันระบบ 6,818 V เมื่อไม่สร้างดีสซาร์จบางส่วน..... 43

4.5 การสร้างดีสซาร์จบางส่วนที่จุดต่อสาย..... 44

4.6 สัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่เกิดซ้ำๆที่วัดได้จากโรกอฟก็คอยล์ RC1 ที่แรงดันระบบ 6,818 Volt..... 44

4.7 สัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟก็คอยล์ RC1 แะ RC2 ที่แรงดัน 80 V..... 45

4.8 สัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟก็คอยล์ RC1 แะ RC2 ที่แรงดัน 100 V..... 45

4.9 สัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟก็คอยล์ RC1 แะ RC2 ที่แรงดัน 120 V..... 46

4.10 สัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟก็คอยล์ RC1 แะ RC2 ที่แรงดัน 140 V46

4.11 สัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟก็คอยล์ RC1 แะ RC2 ที่แรงดัน 160 V..... 47

4.12 สัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟก็คอยล์ RC1 แะ RC2 ที่แรงดัน 180 V..... 47

4.13 สัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟฟ์คอยล์ RC1 และ RC2 ที่แรงดัน 200 V.....	48
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระบบกับสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่โรกอฟฟ์คอยล์....	49
4.15 สัญญาณที่ได้จากการรวมสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟฟ์คอยล์ RC1 และ RC2 เมื่อสร้างดีสซาร์จบางส่วนที่จุดต่อสาย(ใช้ Function Sum ใน Oscilloscope ในการรวมสัญญาณ) ...	50
4.16 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบคล็องโรกอฟฟ์คอยล์ ในตำแหน่งต่างๆ.....	51
4.17 การสร้างดีสซาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านซ้าย)	52
4.18 สัญญาณดีสซาร์จที่วัดได้จากโรกอฟฟ์คอยล์ RC1(เขียว) และ RC2(แดง)เมื่อสร้างดีสซาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านซ้าย)...	53
4.19 สัญญาณที่ได้จากการรวมสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟฟ์คอยล์ RC1 และ RC2 เมื่อสร้างดีสซาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านซ้าย)(ใช้ Function Sum ใน Oscilloscope ในการรวมสัญญาณ).....	54
4.20 การสร้างดีสซาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านขวา).....	54
4.21 สัญญาณดีสซาร์จที่วัดได้จากโรกอฟฟ์คอยล์ RC1(เขียว) และ RC2(แดง)เมื่อสร้างดีสซาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านขวา).....	55
4.22 รูปสัญญาณที่ได้จากการรวมสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟฟ์คอยล์ RC1 และ RC2 เมื่อสร้างดีสซาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านขวา) (ใช้ Function Sum ใน Oscilloscope ในการรวมสัญญาณ).....	56
4.23 วงจรใช้ calibrate โรกอฟฟ์คอยล์	56
4.24 สัญญาณที่ได้จากวงจรรวมสัญญาณ (น้ำเงิน) และสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนก่อนเข้าวงจรรวมสัญญาณ (เขียว,แดง)	57
4.25 แรงดันสัญญาณ input วงจรเปรียบเทียบ(น้ำเงิน) และ แรงดันสัญญาณ input อ้างอิง (เขียว) เมื่อสร้างดีสซาร์จบางส่วนที่จุดต่อสาย ที่แรงดันระบบ 2,727 Volt.....	58
4.26 แรงดันสัญญาณ input วงจรเปรียบเทียบ(น้ำเงิน) และ แรงดันสัญญาณ input อ้างอิง (เขียว) เมื่อสร้างดีสซาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสายที่แรงดันระบบ 6,818 Volt	59
4.27 แรงดันสัญญาณ input วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (น้ำเงิน) และ output วงจรเปรียบเทียบสัญญาณทำงาน(เขียว)	59
4.28 แรงดันสัญญาณ input วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (น้ำเงิน) และ output วงจรเปรียบเทียบสัญญาณไม่ทำงาน(เขียว)	60

ก.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวเหนี่ยวนำ	65
ข.1 ลักษณะทางกายภาพโรกอฟท์คอล์ major axis = B , minor axis = A	66
ข.2 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ output ของโรกอฟท์คอล์ เมื่อ A/B=1.....	66
ข.3 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ output ของโรกอฟท์คอล์ เมื่อ A/B=0.75.....	67
ข.4 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ output ของโรกอฟท์คอล์ เมื่อ A/B=0.578.....	67
ข.5 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ output ของโรกอฟท์คอล์ เมื่อ A/B=0.3141.....	67
ข.5 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ output ของโรกอฟท์คอล์ เมื่อ A/B=0.3141.....	67
ค.1 : สัญญาณดีสซาร์จที่โรกอฟท์คอล์ ที่แรงดันที่ Variac 80 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 2,727 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)	68
ค.2 : สัญญาณดีสซาร์จที่โรกอฟท์คอล์ ที่แรงดันที่ Variac 100 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 3,409 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)	68
ค.3 : สัญญาณดีสซาร์จที่โรกอฟท์คอล์ ที่แรงดันที่ Variac 120 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 4,090 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)	69
ค.4 : สัญญาณดีสซาร์จที่โรกอฟท์คอล์ ที่แรงดันที่ Variac 140 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 4,772 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)	69
ค.5 : สัญญาณดีสซาร์จที่โรกอฟท์คอล์ ที่แรงดันที่ Variac 160 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 5,454 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)	70
ค.6 : สัญญาณดีสซาร์จที่โรกอฟท์คอล์ ที่แรงดันที่ Variac 180 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 6,136 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)	70
ค.7 : สัญญาณดีสซาร์จที่โรกอฟท์คอล์ ที่แรงดันที่ Variac 200 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 6,818 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ฉนวนไฟฟ้าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากในระบบไฟฟ้า เนื่องจากเป็นตัวป้องกันการเกิดการลัดวงจร และเกิดการไฟฟ้าดับ ดังนั้นหากต้องการให้ระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือสูง จึงจำเป็นต้องใช้ฉนวนที่ดี และควรมีการทดสอบก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งตามมาตรฐานแล้ว ในการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนเป็นข้อหวัข้อหนึ่งในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล

ดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge = PD) เป็นการเกิดกระแสที่มีขนาดเล็ก ที่เกิดขึ้นในคาบเวลาที่สั้นๆ แต่จะเกิดขึ้นตลอดเวลาเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าแรงสูงนั้นตกคร่อมระบบอยู่ โดยในระบบไฟฟ้านั้นไม่ต้องการให้มีการเกิดดีสชาร์จบางส่วนขึ้นในระบบ

ดีสชาร์จบางส่วนอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น แสง เสียงรบกวน ความร้อน การเปลี่ยนแปลงทางเคมี การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานสูญเสียในฉนวนและกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์ เป็นต้น [1] ผลของดีสชาร์จบางส่วนหรือ PD อาจก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ (Radio Interference Voltage = RIV) เข้าไปรบกวนระบบสื่อสารได้ และในกรณีที่ PD นั้นเกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ผลอันนี้จะไปทำลายระบบฉนวน ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็วขึ้น อายุการใช้งานอุปกรณ์จะสั้นลง และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด ดังนั้นเราจึงถือเอา PD เป็นตัวประกอบสำคัญที่จะบ่งชี้ถึงคุณภาพของฉนวนของอุปกรณ์ [2] การออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจึงต้องป้องกันหรือหลีกเลี่ยงมิให้มี PD เกิดขึ้น โดยการออกแบบลักษณะอุปกรณ์ให้มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าค่าวิกฤต หรือใช้เทคนิคการฉนวนที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่ออกแบบหรือผลิตอาจมี PD เกิดขึ้นได้โดยมิได้ตั้งใจ ซึ่งอาจเกิดความบกพร่องของระบบการฉนวนในระหว่างการผลิต หรือคุณภาพของฉนวนไม่ได้ตามที่กำหนด จึงต้องมีการวัดหรือการตรวจวัด PD ก่อนนำอุปกรณ์ไปใช้งานว่ามี PD เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ โดยวัดด้วยเครื่องตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน และเมื่อนำไปใช้งานแล้วอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง อาจจะมีการชำรุดของเนื้อฉนวนได้ จึงต้องใช้เครื่องตรวจวัดการเกิด PD แม้ว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะใช้งานอยู่ก็ตาม เพื่อจะได้หาวิธีวางแผนแก้ไข และป้องกัน ก่อนที่จะชำรุดมากขึ้น

เครื่องตรวจหาดีสชาร์จบางส่วน เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งจัดเป็นวิธีการตรวจหา PD แบบไม่ทำลาย

ในการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลนั้น แบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆด้วยกัน คือ การตรวจหาโดยตรง สัมผัสกับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันตกคร่อมโดยตรง และ การตรวจหาโดยอ้อม

ไม่สัมผัสกับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันตกคร่อมโดยตรง หรือ แบบเหนี่ยวนำ โดยการตรวจหาแบบเหนี่ยวนำ ก็ยังสามารถแบ่งเป็นเหนี่ยวนำแบบอินดักทีฟ(Inductive Coupling) และ เหนี่ยวนำแบบคาปาซิทีฟ(Capacitive Coupling) แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ต้องการตรวจหาดีเอสอาร์บางส่วนขณะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในระบบนั้น จึงเลือกการตรวจจับเหนี่ยวนำแบบอินดักทีฟ เพราะอินดักทีฟคอยล์นั้นสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย

อินดักทีฟคอยล์ หรือ เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจหาเป็นชนิดที่เรียกว่า โรกอฟกีคอยล์ (Rogowski Coil) มีข้อดีในการตรวจหากระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงทางคาบเวลาที่สั้นๆ จึงสามารถตรวจหาดีเอสอาร์บางส่วนได้

1.2 ที่มาของปัญหา

ปัจจุบันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ต้องการความต่อเนื่องและความเชื่อมั่นในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงมากขึ้น ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้นอาจเกิดการชำรุดเสียหายได้ในขณะใช้งาน และการเสื่อมสภาพของฉนวนสายเคเบิลแรงสูง หรือตามจุดต่อของสายเคเบิลแรงสูงก็เป็นสาเหตุของการไม่ต่อเนื่องในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ในการเกิดดีเอสอาร์บางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะการชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิวดร้งขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเบรกดาวนอย่างสมบูรณ์ แล้วจะเกิดการลัดวงจร และจะทำให้ระบบป้องกันการลัดวงจรทำงานตัดการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในที่สุด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าไม่มากนักน้อย ดังที่กล่าวมาถ้ามีการตรวจเช็คและพบความผิดปกติ ในขณะเกิดดีเอสอาร์บางส่วนแล้วมีการวางแผนในการบำรุงรักษา ซึ่งต้องใช้เครื่องมือวัดที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ที่มีราคาแพง จึงได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อสร้างเครื่องมือที่สามารถตรวจหาการเกิดดีเอสอาร์บางส่วนต่อไป

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

จากวิทยานิพนธ์นี้ ในการออกแบบระบบตรวจหาการเกิดดีเอสอาร์บางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินในขณะใช้งาน นั้นมีขอบเขตดังนี้

1. ระบบจะทำการตรวจหาพัลส์ของสัญญาณดีเอสอาร์ที่มีอยู่ในจุดต่อสายเท่านั้น
2. ระบบสามารถตรวจหาสัญญาณดีเอสอาร์ที่เกิดเพียงจุดเดียวเท่านั้น

1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและวิเคราะห์ คุณสมบัติของสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่เกิดบนสายเคเบิลแรงสูง
2. ศึกษา ออกแบบและสร้างอินดักทีฟเซนเซอร์ที่นำมาตรวจจับสัญญาณ PD
3. ศึกษา ออกแบบและสร้าง วงจรของสัญญาณรบกวน ของสัญญาณ PD
4. ศึกษาออกแบบและสร้าง วงจรที่ใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณดีสซาร์จของทั้งสอง Sensor เพื่อหาการเกิด PD
5. ทดลองใช้งานจริง โดยจำลองให้เกิดจุดเกิด PD ในจุดต่างๆ และดูผลการทดลอง ปรับปรุงข้อบกพร่องที่พบ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถใช้งานระบบตรวจหาการเกิดดีสซาร์จบางส่วนในการประเมินระบบสายเคเบิลใต้ดิน
2. สามารถพัฒนาระบบในการตรวจหาการเกิดดีสซาร์จบางส่วน พร้อมกันหลายๆจุดได้
3. สามารถใช้ความรู้ที่ได้จากการวิจัย เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยพัฒนา ระบบตรวจหาการเกิดดีสซาร์จบางส่วนแบบทั้งระบบต่อไป

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

บทนี้ จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับดีสชาร์จบางส่วน สาเหตุการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ประเภทของดีสชาร์จบางส่วน และผลกระทบเมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วนแล้ว และยังรวมถึงการศึกษาและพัฒนาระบบตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่ผ่านมาในอดีตที่ผ่านมา

2.1 ดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)

ในระบบการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ถ้าหากความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใด จุดใดมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต หรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric Strength) ของฉนวนก็จะทำให้เกิดเบรกดาวนโดยสมบูรณ์ หรือเบรกดาวนเป็นเพียงบางส่วน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าจะเกิดแนวที่ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าที่มีความต้านทาน ระหว่างอิเล็กโทรดต่ำพอหรือไม่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ พลังงานที่ทำให้เกิดดีสชาร์จนั้นมากพอหรือไม่ ถ้าเกิดเบรกดาวนที่สมบูรณ์ไม่ได้ก็จะกลายเป็น ดีสชาร์จพัลส์สั้น ๆ หรือที่เรียกว่า ดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge; PD) เพราะดีสชาร์จนั้นไม่เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรดและการดีสชาร์จบางส่วนนี้ การฉนวนอิเล็กโทรดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้านยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่

นิยามดีสชาร์จบางส่วน (PD) ได้ให้คำอธิบายไว้ว่า ดีสชาร์จบางส่วนเป็นดีสชาร์จทางไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกันระหว่างอิเล็กโทรด ดีสชาร์จบางส่วนจัดอยู่ในกลุ่มใหม่ของก๊าซดีสชาร์จ ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าแล้ววิ่งชนโมเลกุลของก๊าซก่อเป็น อะวาลานซ์ (Avalanche) ของอิเล็กตรอนแล้วทิ้งไอออนบวกนี้ไว้เบื้องหลังที่เคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโทรดอีกด้านหนึ่ง อิเล็กตรอนและไอออนบวกนี้จะเป็นเส้นทางให้กระแสไหลผ่านก๊าซได้

ดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าของจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดในสนามวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวนโดยสมบูรณ์ได้ หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น

ดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และสนามไฟฟ้ากระแสตรง ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับดีสชาร์จจะเกิดขึ้นซ้ำทุก ๆ ไซเคิลของแรงดัน โดยปกติจะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่ายอดพัลส์ดีสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นที่ผิวฉนวนในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็น

ผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้ฉนวนเสียเป็นจุด ๆ และเกิดผิวดพร่องขยายตัวมากขึ้น อาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานจะสั้นลง

ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้อย่างยาวนานการออกแบบฉนวนไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพเพียงพอ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติจะต้องต่ำกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวนต้องไม่ตีสาร์จบางส่วน แม้จะมีแรงดันเกิดขึ้นมาเนื่องจากแรงดันกระเพื่อมเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามเพื่อความมั่นใจในคุณภาพของการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องมีการทดสอบตรวจวัดค่าตีสาร์จบางส่วน ตามที่มาตรฐานกำหนด

ตีสาร์จบางส่วนโดยทั่วไปอาจแบ่งตามลักษณะที่เกิดขึ้นได้เป็น 3 แบบ คือ

2.1.1 ตีสาร์จแบบโคโรนา (Corona Discharge)

ตีสาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงรอบปลายอิเล็กโทรดแหลม หรือขอบคมที่อยู่ในอากาศหรือก๊าซความดันปกติ เรียกว่า โคโรนา

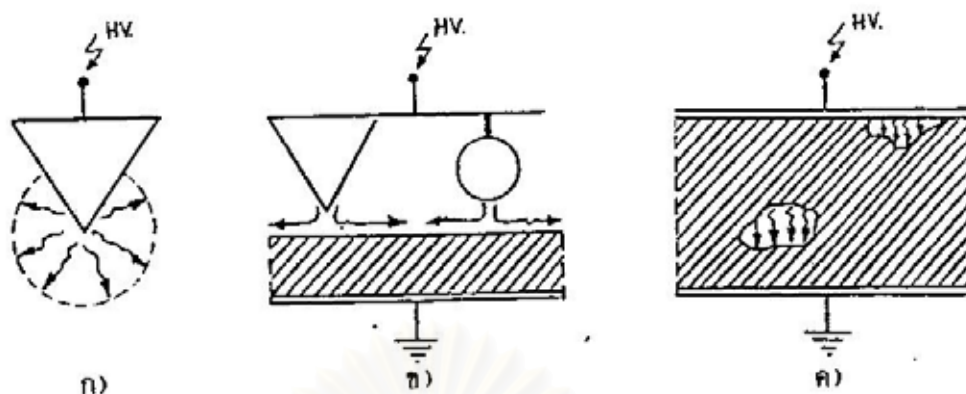
ตีสาร์จ จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต E_c ในอากาศ ดังรูปที่ 2.1(ก)

2.1.2 ตีสาร์จตามผิว (Surface Discharge)

ก๊าซหรืออากาศมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น จนทำให้เกิดตีสาร์จขึ้นในส่วนที่เป็นอากาศ ตีสาร์จตามผิวเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวน มีค่าสูงถึงค่าวิกฤต ดังรูปที่ 2.1(ข)

2.1.3 ตีสาร์จภายใน (Inner Discharge)

ตีสาร์จภายในจะเกิดภายในฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ซึ่งมีฟองก๊าซอยู่ภายในความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนที่ตีสาร์จภายในเริ่มเกิดขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซที่แฝงอยู่ภายใน ซึ่งสามารถคำนวณได้ในบางกรณี ฉนวนที่มีสิ่งเจือปนอยู่จะทำให้เกิดก๊าซขึ้นหลังจากเกิดเบรกดาวน์ครั้งแรก การมีฟองก๊าซอยู่ภายในฉนวนจะเป็นต้นเหตุนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด ดังรูปที่ 2.1(ค) จึงอาจกล่าวได้ว่าฉนวนใดที่มีตีสาร์จภายใน จะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง ฉะนั้นการตรวจสอบคุณภาพของการฉนวน จึงมีเรื่องการตรวจตีสาร์จภายในที่เรียกว่า PD เป็นเรื่องสำคัญประการหนึ่ง



รูปที่ 2.1 : รูปแบบของดีสชาร์จบางส่วน

- ก) โคโรนาดีสชาร์จ
- ข) ดีสชาร์จตามผิว
- ค) ดีสชาร์จภายใน

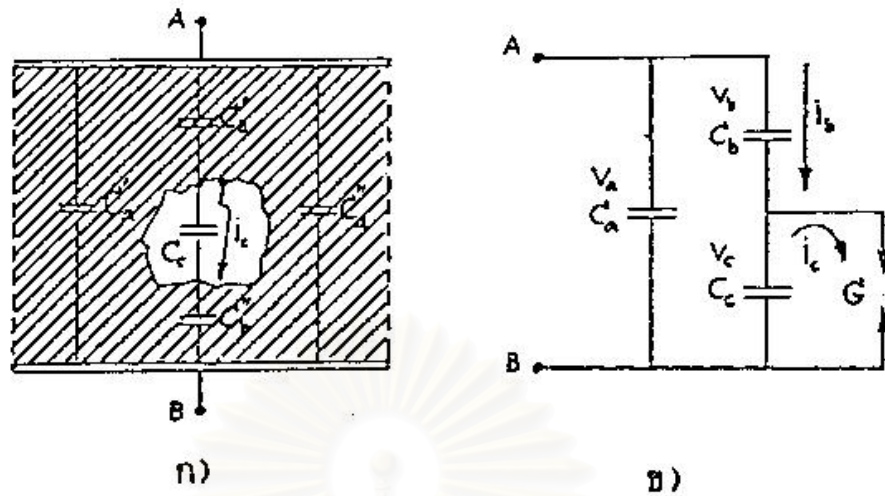
ดีสชาร์จบางส่วนอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น แสง เสียงรบกวน ความร้อน การเปลี่ยนแปลงทางเคมี การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ผลของดีสชาร์จบางส่วนหรือ PD อาจก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ เข้าไปรบกวนระบบสื่อสารได้

2.2 พฤติกรรมของดีสชาร์จบางส่วน

ปริมาณของดีสชาร์จบางส่วน จะวัดในเทอมของ “ประจุที่ปรากฏ” (Apparent charge) เนื่องจากมาตรฐานทั่วไปนิยมปริมาณของ PD ในเทอมนี้มากที่สุด การวัด PD นี้จะไม่รวมถึงดีสชาร์จบางส่วนตามผิว และโคโรนาดีสชาร์จ ซึ่งปกติจะวัดในเทอมของ “คลื่นรบกวนวิทยุ”

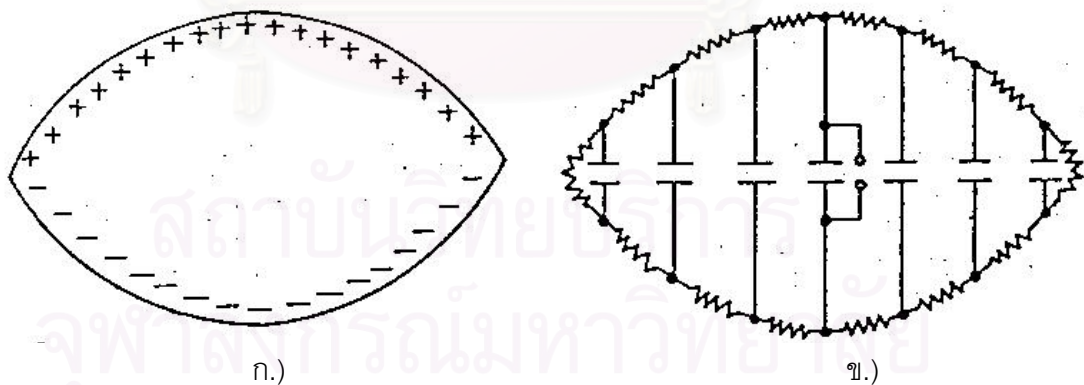
2.2.1 วงจรสมมูลดีสชาร์จบางส่วน

โดยปกติแล้ววงจรสมมูลของดีสชาร์จภายในนั้นจะหมายถึง วงจรสมมูลที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรสมมูลสำหรับฉนวนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขณะเกิด PD อาจแทนด้วย ตัวเก็บประจุ C_a , C_b , C_c และแกป G ตามลำดับ โดยที่ แกป G จะแทนการลัดวงจรขณะเกิด PD , $C_a = C'_a + C''_a$ และ $C_b = C'_b + C''_b / (C'_b + C''_b)$ ดังรูปที่ 2.2 ในทางปฏิบัติจะพบว่า $C_a \gg C_c \gg C_b$



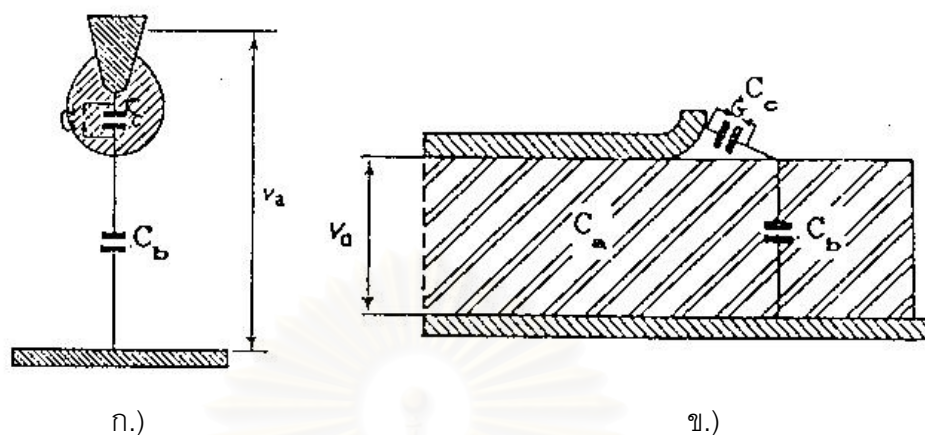
รูปที่ 2.2 : วงจรสมมูลดีสชาร์จภายใน

วงจรมูลในทางปฏิบัติของ PD เนื่องจากเกิดโพรงอากาศในเนื้อฉนวนแสดงดังรูป 2.2 ซึ่งจะแสดงเฉพาะส่วนของโพรงอากาศและผิวของฉนวนที่อยู่ติดกับโพรงเท่านั้น โดยในรูปที่ 2.2 ก แสดงการกระจายของประจุก่อนการเกิดเบรกดาวน ในรูป 2.2 ข แทนผิวของฉนวนรอบโพรงอากาศด้วยตัวเก็บประจุต่างๆ และสปาร์กแกปตรงตำแหน่งที่จะเกิดเบรกดาวน ดังนั้นถ้าไม่คำนึงถึงผลของความต้านทานที่ผิว ผลที่ได้จึงใกล้เคียงกับวงจรมูลในรูปที่ 2.3 นั้นเอง



รูปที่ 2.3 ก,ข : วงจรมูล PD ในทางปฏิบัติ

แต่อย่างไรก็ตามวงจรมูลในรูปที่ 2.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโคโรนาดีสชาร์จและดีสชาร์จตามผิวได้ โดยแทนส่วนต่างๆ ของฉนวนหรืออากาศรอบๆ ด้วย C_d, C_b, C_c และแกป G ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.4

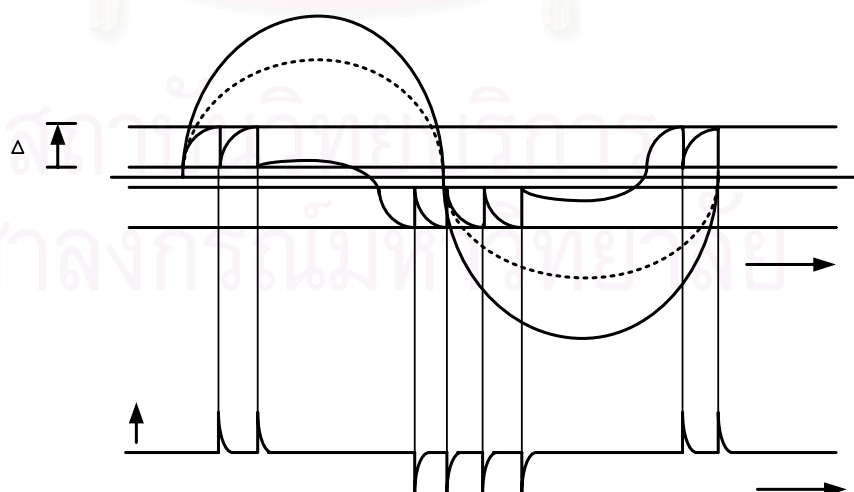


รูปที่ 2.4 ก,ข : วงจรสมมูลของโคโรนาดีสชาร์จและดีสชาร์จตามผิว

2.2.2 ธรรมชาติพัลส์ของดีสชาร์จบางส่วน

1. การเกิดดีสชาร์จซ้ำ

ในทางปฏิบัติ PD จะเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังรูปที่ 2.5 โดยที่ V_a คือ แรงดันของระบบ, V_b คือแรงดันเบรกดาว์นของโพรงอากาศหรือแก๊ป V_r คือแรงดันหลังเกิดเบรกดาว์นของโพรงอากาศหรือแก๊ป, V_p คือ แรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือแก๊ปถ้าไม่เกิด PD เลย และ i คือกระแสไหลเมื่อเกิด PD

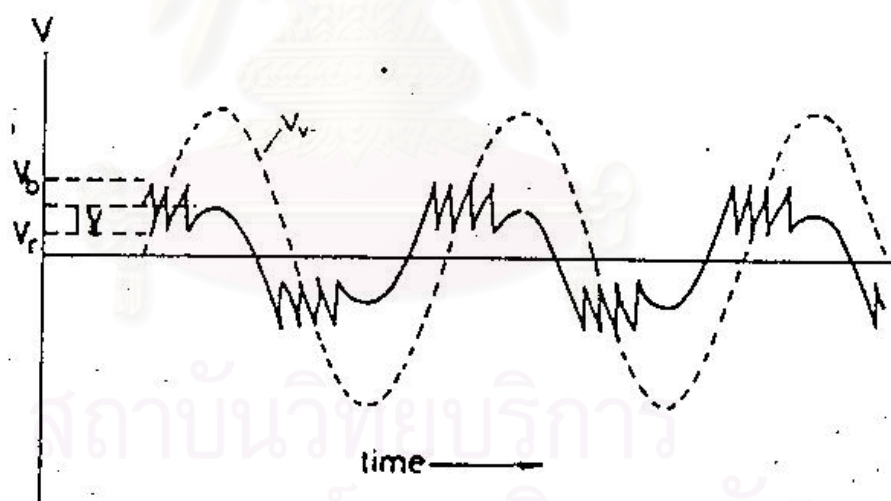


รูปที่ 2.5 : แรงดันตกคร่อมแก๊ปและกระแสไหลเมื่อเกิด PD

จำนวนครั้งการเกิด PD สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 2.6 โดยสมมติว่า PD เกิดแบบ สม่ำเสมอกับแกนเวลา ดังนั้นจำนวน PD ต่อครั้งคาบเวลา N คำนวณดังนี้

$$N = 2[(V_b - V_r) - Y]/(V_b - V_r) \quad (2.1)$$

- โดยที่ N คือ จำนวนครั้งการเกิด PD ต่อครั้งคาบเวลา
 V_b คือ แรงดันเบรกดาวนของโพรงอากาศหรือแก๊ป
 V_r คือ แรงดันหลังการเบรกดาวนของโพรงอากาศหรือแก๊ป
 V_v คือ ค่ายอดของแรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือแก๊ปถ้าไม่มีการ PD เกิดเลย ซึ่งเท่ากับ $[C_b / (C_b + C_c)]$ เท่าของค่ายอดแรงดัน คร่อมวัสดุทดสอบ
 Y คือ แรงดันใดๆ ซึ่งมีค่า $0 \leq Y \leq (V_b - V_r)$

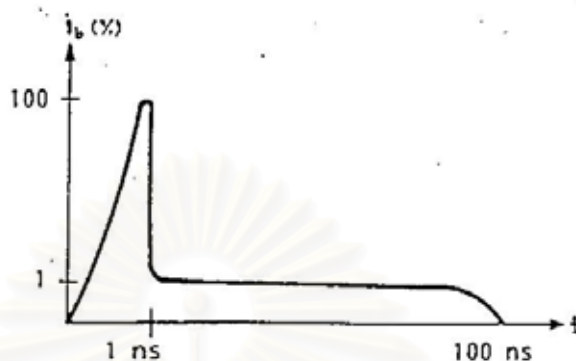


รูปที่ 2.6 : การเกิด PD ซ้ำๆ

2. ลักษณะรูปร่างของกระแสไอซาร์จบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแก๊ปเล็กๆ ในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.7 กล่าวคือขณะเกิด PD การไหลของกระแสผ่านแก๊ปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแก๊ปสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอน

ไหลผ่านแกปหมด กระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วและกระแสที่ลดลงนี้ก็จะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก



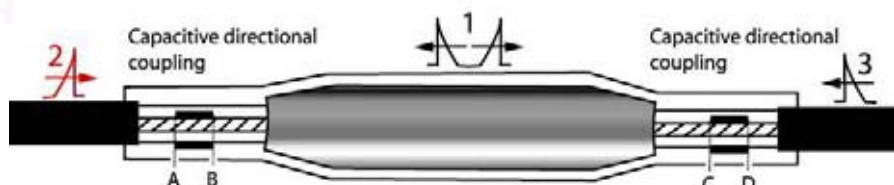
รูปที่ 2.7 : รูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแกปเล็กๆ

2.3 เทคนิคการตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิล

จากศึกษาผลการวิจัยที่ผ่านมาเทคนิคในการตรวจหา การเกิด PD ภายในจุดต่อสายเคเบิลนั้น สรุปเป็น 2 วิธีดังนี้

2.3.1 Capacitive Coupling

โดยใช้หลักการ Coupling สนามไฟฟ้าจากสายเคเบิลแรงสูง ผ่าน sensor ในการตรวจหาดีสชาร์จบางส่วน แบบ Capacitive Coupler ดังรูปที่ 2.8 โดยตัว sensor สร้างจากแผ่นอิเล็กโทรด พันรอบสายเคเบิลเป็นวงแหวน ซึ่งจะใช้ sensor แบบ Capacitive Coupler จำนวน 2 ชุดด้วยกัน โดยในแต่ละชุดจะมี tap ส่งสัญญาณ และสายสัญญาณทั้งหมดจะต่อไปยังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาการเกิดดีสชาร์จบางส่วน โดย จะมีความหมายตามตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.8 : เทคนิคการตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายในจุดต่อสายเคเบิล แบบวิธี

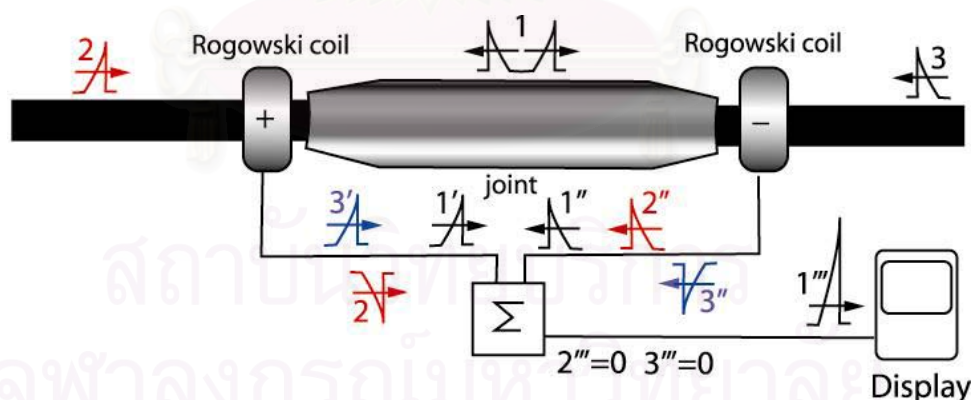
Capacitive Coupler

ตารางที่ 2.1 : สัญญาณที่ Capacitive Coupler บอกการเกิด PD

Impulse source / -No	Signal at coupling output			
	A	B	C	D
Joint / 1	-	X	X	-
Left / 2	X		X	
Right / 3		X		X

2.3.2 Inductive Coupling

ใช้ sensor ในการตรวจหาดีสชาร์จบางส่วน แบบ Inductive Coupling ดังรูปที่ 2.9 โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในสายเคเบิล ซึ่งต้องใช้ Inductive Coupler 2 ตัว ในการเปรียบเทียบสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน โดย Inductive Coupler ทั้ง 2 ตัว จะมีขั้วตรงข้ามกัน และนำสัญญาณทั้ง 2 ชุด ต่อเข้ากับวงจรรวมสัญญาณ ซึ่งจะเห็นว่า ถ้าสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน เกิดในจุดต่อสายเคเบิลระหว่าง Inductive Coupler ทั้ง 2 ตัว เมื่อผ่านวงจรรวมสัญญาณ แล้วจะได้สัญญาณที่มีขนาดสูงขึ้นเป็น 2 เท่า



รูปที่ 2.9 : เทคนิคการตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายในจุดต่อสายเคเบิล แบบวิธี Inductive Coupler

จากที่กล่าวมาในการตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วน แบบ Capacitive Coupler จะมีความไวในการตรวจหามากกว่า แต่ในการตรวจหาในขณะสายเคเบิลแรงสูงถูกใช้งานอยู่นั้น

อุปกรณ์ที่จะนำมาตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนจะต้องติดตั้ง และถอดออกง่าย แล้วยังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการวัดด้วย จึงเห็นว่าการใช้ sensor แบบ Inductive Coupler จึงมีความเหมาะสมเนื่องจากติดตั้ง และถอดออกง่าย รวมถึงยังปลอดภัยจากกระแสไฟฟ้าเพราะใช้หลักการเหนี่ยวนำในการตรวจวัด ไม่ได้วัดที่สายเคเบิลโดยตรง

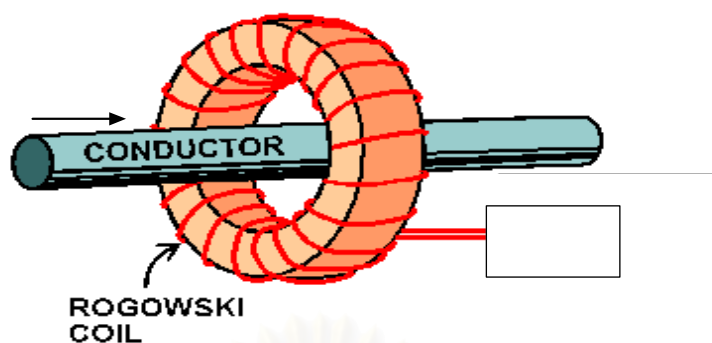
Inductive Coupler ที่มีการใช้งานก็คือ หม้อแปลงกระแส โดยทั่วไปหม้อแปลงกระแสจะใช้ขดลวดพันรอบแกนเหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหลในสายตัวนำ แต่แกนเหล็กจะมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า การเหนี่ยวนำก็จะลดลง ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่ไหลในสายตัวนำ จึงมีการออกแบบให้แกนเป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า โดยจะเรียกว่า ขดลวด Rogowski ซึ่งจะไม่มีผลของการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า จึงเหมาะกับการวัดกระแสไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก

2.4 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยโรกอฟสกีคอปเลอร์ (Inductive Coupler)

เป็นการวัดกระแสโดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแส (CT) แบบพิเศษ กล่าวคือ โรกอฟสกีคอปเลอร์เป็นอุปกรณ์วัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้เกิดการสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อฟลักซ์นี้ไปคล้องขดลวดที่พันรอบบนแกนที่ไม่ใช่แม่เหล็ก ที่วางอยู่รอบตัวนำที่มีกระแสที่ต้องการวัดไหลอยู่ จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายขดลวดคือ $U_c(t)$ ซึ่งมีสัดส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของกระแส di_p/dt ค่าแรงดันที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนกับรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวนำนั้น ถ้านำแรงดันเหนี่ยวนำนี้ผ่านค่าอินทิเกรตที่เหมาะสม ก็จะได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดอย่างถูกต้อง

2.4.1 การพันขดลวดของโรกอฟสกี

การวัดกระแสอิมพัลส์ที่อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2.10 จะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อพื้นที่ภาคตัดขวาง และความถี่ของจำนวนรอบสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาวแกน อีกประการหนึ่งสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดต้องมาจากแหล่งกำเนิดที่เกิดจากกระแสที่ต้องการวัดเพียงอย่างเดียว ไม่มีของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ฉะนั้นเพื่อให้การวัดมีความถูกต้อง จึงต้องมีการพันขดลวดโรกอฟสกีที่มีลักษณะพิเศษ คือ ต้องมีการพันย้อนกลับเข้าไปภายในขดลวดอีกหนึ่งรอบ เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน



รูปที่ 2.10 : ขดลวดโรกอฟสกีคอยล์

ขดลวดโรกอฟสกีคอยล์คือขดลวดที่กระแสวิ่งไหล I_p โดยอาศัยกฎของแอมแปร์จะให้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวด ซึ่งอยู่ห่างจากตัวนำในแนวรัศมีเท่ากับ x

$$H_x = \frac{I_p}{2\pi x} \quad (2.2)$$

ขดลวดวางอยู่ในอากาศ จะให้ความหนาแน่นเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก ณ.จุดนั้นคือ

$$B = \mu H_x = \frac{\mu I_p}{2\pi x} \quad (2.3)$$

ถ้าขดลวดมีพื้นที่ตัดขวาง เท่ากับ A จึงหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่วิ่งผ่านคัล้งขดลวด ซึ่งมีจำนวนรอบทั้งหมด N รอบ และมีความยาวเท่ากับ $l = 2\pi x$ ได้คือ

$$\phi = \frac{\mu A I_p}{l} \quad (2.4)$$

และอาศัยกฎเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ จะหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดจำนวน N รอบ ได้

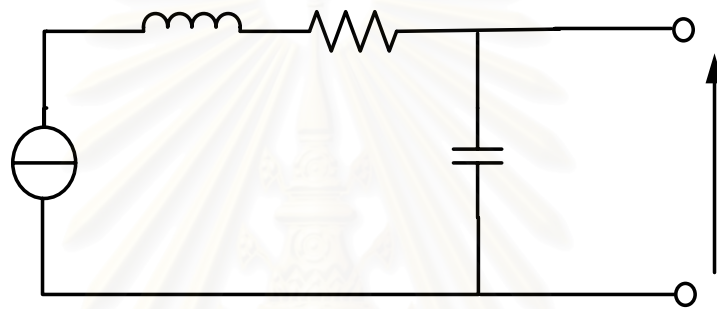
$$U_c(t) = \frac{M dI_p}{dt} \quad (2.5)$$

โดยที่ $M = \frac{N\mu A}{l}$ คือความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดโรกอฟสกีกับตัวนำที่

มีกระแสไหลผ่าน I_p

จากสมการที่ 2.5 จะเห็นว่ากรวัดกระแสอิมพัลส์ของโรกอฟสกีคอยล์นั้นต้องทำการ integrate แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดจึงจะได้กระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

โดยขดลวดโรกอฟสกีคอยล์สามารถเขียนวงจรมมูลได้ดังรูปที่ 2.11 โดยสามารถหาค่า L_c จากสมการที่ 2.6 และค่า C' จากสมการที่ 2.7



รูปที่ 2.11 : วงจรมมูลของโรกอฟสกีคอยล์

$$L_c = \mu n^2 \cdot I \cdot A = MN \quad (2.6)$$

$$C' = \frac{16 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot I}{\pi \cdot \ln\left(\frac{A}{a}\right)} \quad (2.7)$$

$$R_c = \frac{\sigma_w \cdot I_w}{A_w} \quad (2.8)$$

โดยที่ V_c = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced voltage, V)

R_c = ความต้านทานของขดลวด (Ω)

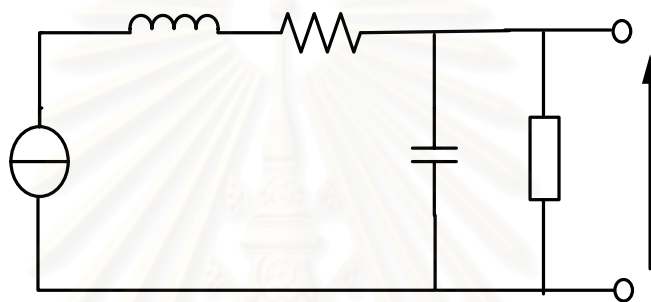
L_c = ความเหนี่ยวนำของขดลวด (H)

C' = ความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวด (F)

a = พื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ใช้พันย้อนกลับ (m^2)

A = พื้นที่หน้าตัดของแกนการพันขดลวด

- N = พื้นที่หน้าตัดของแกนการพันขดลวด
 n = จำนวนรอบขดลวดต่อความยาวแกน
 ϵ_r = เปรอริมิตติวิตี้สัมพัทธ์ของแกน (Relative permittivity)
 σ_w = ความนำไฟฟ้าของขดลวด
 A_w = พื้นที่หน้าตัดของขดลวด
 l_w = ความยาวของลวด

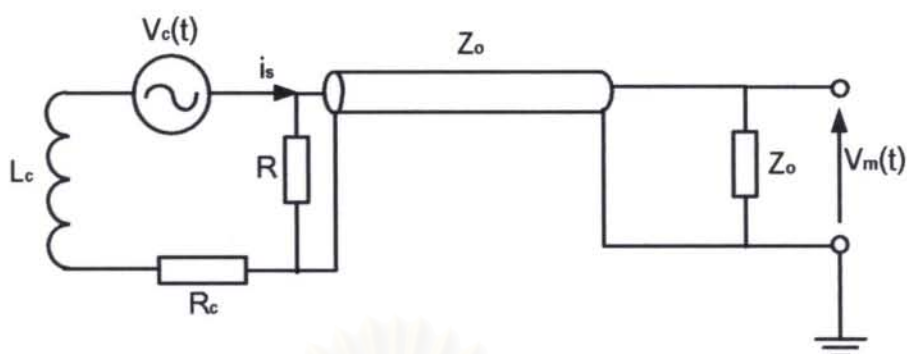


รูปที่ 2.12 : วงจรสมมูลเมื่อต่ออิมพีแดนซ์ขาออก

แรงดันขาออกของโรกอฟก็คอยล์ขึ้นกับ อิมพีแดนซ์ขาออก Z ที่ต่อกับวงจรดังรูปที่ 2.12 ดังนั้นสามารถ Z โดยใช้องค์ประกอบทางไฟฟ้าชนิดแพสซีฟเช่น R, L, C มาประกอบกันได้แก่ self integrator และ RC integrator หรือใช้วงจรแยกที่ฟ เช่น ออปแอมป์มาต่อเป็นวงจร integrate

2.4.2 หลักการโรกอฟก็คอยล์ชนิด self integrator

วงจร self integrator คือ วงจรที่ต่อขาออกของโรกอฟก็คอยล์ด้วยความต้านทานค่าต่ำ โดยมีเงื่อนไขคือ $\omega L_C \gg (R + R_C)$ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 : วงจรสมมูลโรกอฟที่คอยล์ชนิด self integrator

ความหมายในรูปวงจร

V_C = แรงดันเหนี่ยวนำ

L_C = ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟที่คอยล์

R_C = ความต้านทานของขดลวดโรกอฟที่คอยล์

R = ความต้านทานโหลด

Z_0 = เสรีจิมพีแดนซ์ของสายวัดและแมทชิงอิมพีแดนซ์

V_m = แรงดันที่วัดได้

จากรูปที่ 2.13 สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระแส กับแรงดันเหนี่ยวนำ ได้ดังนี้

$$V_C = M \frac{di_P}{dt} = L_C \frac{di_s}{dt} + i_s \cdot (R_C + R) \quad (2.9)$$

เนื่องจากการวัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น กระแสอิมพัลส์ จะได้ว่า

$L \frac{di}{dt} \gg i_s (R_C + R)$ ดังนั้น

$$V_C(t) = L_C \frac{di_s}{dt} \quad (2.10)$$

ทำการ integrate จะได้กระแสที่เหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด

$$i_s(t) = \frac{1}{L_C} \int V_C(t) dt \quad (2.11)$$

และแรงดันที่วัดได้

$$V_m = i_s(t).R \quad (2.12)$$

แทน i_s จากสมการที่ 2.11 ลงใน สมการที่ 2.12 จะได้

$$V_m(t) = \frac{R}{L_C} \int V_C(t) dt \quad (2.13)$$

แทนค่า $V_C(t)$ จากสมการ 2.10 ลงในสมการที่ 2.13 จะได้

$$V_m(t) = \frac{R}{L_C} M.i_p(t) \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.14 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้ กับกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัด ในการออกแบบสร้างโรคอฟก็คอยล์ นอกจากต้องคำนึงถึงขนาดแรงดันที่วัดได้แล้ว ยังต้องคำนึงถึงผลตอบสนองของความถี่ของวงจรถัดด้วย จากสมการที่ 2.9 ทำการแปลงลาปลาซ

$$MsI_p(s) = I_s(s)[sL_C + R_C + R] \quad (2.15)$$

จัดรูปใหม่

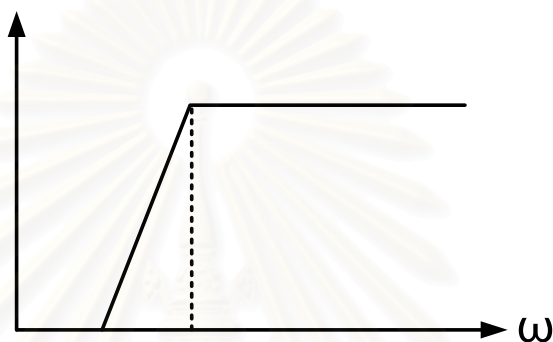
$$\frac{I_s(s)}{I_p(s)} = \frac{Ms}{sL_C + R_C + R} \quad (2.16)$$

จาก $V_m(s) = I_s(s).R$ จะได้

$$\frac{V_m(s)}{I_p(s)} = \frac{R.Ms}{R + R_C + L_Cs} = \frac{(R.M / L_C)s}{s + (R + R_C) / L_C} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.17 สามารถเขียนผลตอบสนองความถี่ของวงจร self integrator ที่เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านดังรูปที่ 2.14 โดยมีความถี่หักมุม

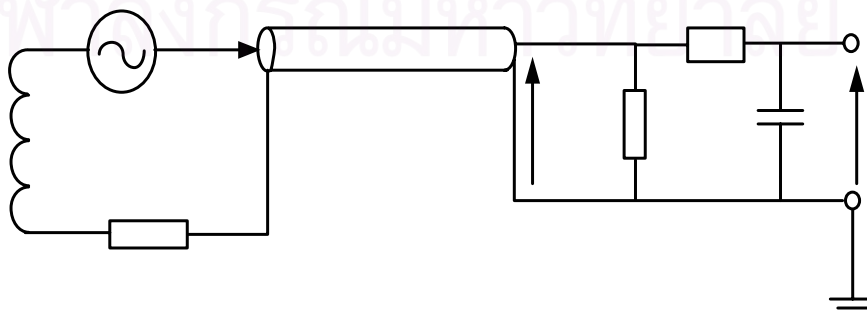
$$\omega_l = \frac{R + R_C}{L_C} ,$$



รูปที่ 2.14 : ผลตอบสนองความถี่ของโรกอพกึ่งคอยล์ชนิด self integrator

2.4.3 หลักการโรกอพกึ่งคอยล์ชนิด RC integrator

วงจร RC integrator คือ วงจรที่ต่อความต้านทานค่าสูง ($R \gg Z_0$) อนุกรมเข้ากับตัวเก็บประจุ แล้ววัดแรงดันขาออกที่ตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งมีผลตอบสนองความถี่เป็นวงจรกรองความถี่แถบผ่าน โดยมีเงื่อนไขด้านความถี่สูง คือ $\omega_u L_C \ll Z_0$ และ ด้านความถี่ต่ำ $1/\omega_l C \ll R$



รูปที่ 2.15 : วงจรสมมูลโรกอพกึ่งคอยล์ชนิด RC integrator

จากรูปที่ 2.15 จะได้ความสัมพันธ์ของกระแส กับ แรงดันเหนี่ยวนำ

$$V_C = M \frac{di_p}{dt} = L_C \frac{di_s}{dt} + i_s \cdot Z_0 + V_0 \quad (2.18)$$

เนื่องจากเงื่อนไขด้านความถี่สูง คือ $\omega_0 L_C \ll Z_0$ ดังนั้นจาก 2.18 จะได้

$$V_C = M \frac{di_p}{dt} = i_s \cdot Z_0 + V_0 \quad (2.19)$$

และทางด้าน RC จะได้

$$V_0 = i_s \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right) \quad (2.20)$$

จากเงื่อนไข $\frac{1}{\omega C} \ll R$ จะได้

$$V_0 = i_s \cdot R \quad (2.21)$$

แทนสมการที่ 2.21 ลงในสมการที่ 2.19

$$V_C = M \frac{di_p}{dt} = i_s \cdot Z + i_s \cdot R \quad (2.22)$$

เนื่องจากค่า $R \gg Z_0$ ดังนั้น

$$M \frac{di_p}{dt} = i_s \cdot R \quad (2.23)$$

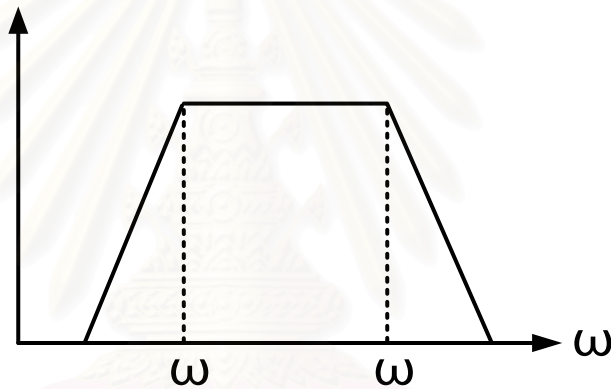
แทน $i_s = C \frac{dV_m}{dt}$ ในสมการที่ 2.23 จะได้

$$M \frac{di_p}{dt} = RC \frac{dV_m}{dt} \text{ หรือ จะได้ } V_m(t) = \frac{M}{RC} \cdot i_p(t) \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.24 สามารถเขียนผลตอบสนองของความถี่ของวงจร RC integrator ซึ่งเป็นวงจรของความถี่แถบผ่านได้ดังรูปที่ 2.16 ที่มีความถี่หักมุมด้านความถี่สูง (ω_u) ดังสมการที่ 2.25 และ ความถี่หักมุมด้านความถี่ต่ำ (ω_l) ดังสมการที่ 2.26

$$\omega_u \ll \frac{Z_0}{L_c} \quad (2.25)$$

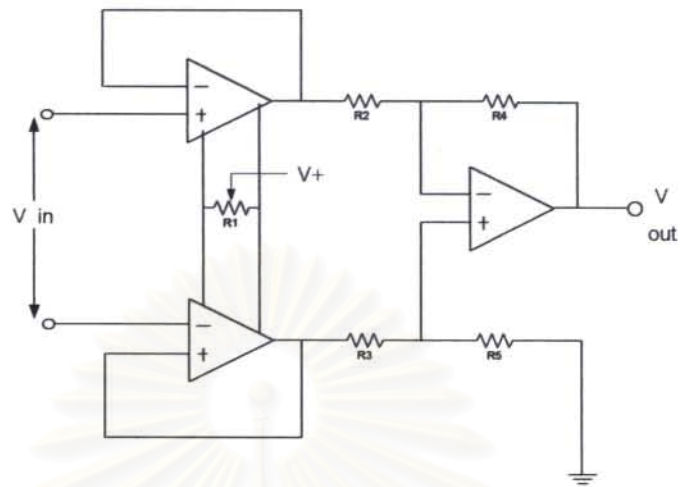
$$\omega_l \gg \frac{1}{RC} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.16 : ผลตอบสนองของความถี่ของโรกอพท์คอปยล์ชนิด RC integrator

2.5 วงจรขยายการวัดคมูลอุปกรณ์ (Instrumentation amplifier, IA)

วงจรที่มีประโยชน์มากที่สุดในการวัดความแม่นยำและการควบคุมคือวงจรขยายวัดคมูลอุปกรณ์ (instrumentation amplifier หรือ IA) IA บัฟเฟอร์อินพุต (buffered-input IA) ประกอบด้วย ฟอลโลเวอร์แรงดันอินพุต 2 วงจร ตัวต้านทานค่าที่เที่ยงตรงและวงจรขยายผลต่างดังแสดงในรูปที่ 2.17 ฟอลโลเวอร์แรงดันให้อิมพีแดนซ์อินพุตสูงยิ่งที่มีค่าผิดพลาดต่ำกว่าวงจรขยายผลต่างที่ให้อัตราขยายและอัตราการตัดทิ้งคอมมอนโหมด (CMRR) สูง ถ้าทำให้ R_5 เปลี่ยนแปลงแรงดันคอมมอนโหมดจะถูกคูลออกไป ในการตั้งค่าอัตราขยายแรงดัน ในวงจรจะใช้ตัวต้านทานเดี่ยว R_1 อิมพีแดนซ์อินพุตไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่อัตราขยายเปลี่ยนไป และ V_{out} ขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างแรงดันอินพุตของวงจรขยายผลต่างเท่านั้น



รูปที่ 2.17 : วงจรขยายการวัดความต่างศักย์ใช้ในการคำนวณ

วิธีคำนวณอุปกรณ์ส่วนต่างๆดังนี้

$$1. R_2 = R_3$$

(2.27a)

$$2. R_1 = 100\Omega$$

(2.27b)

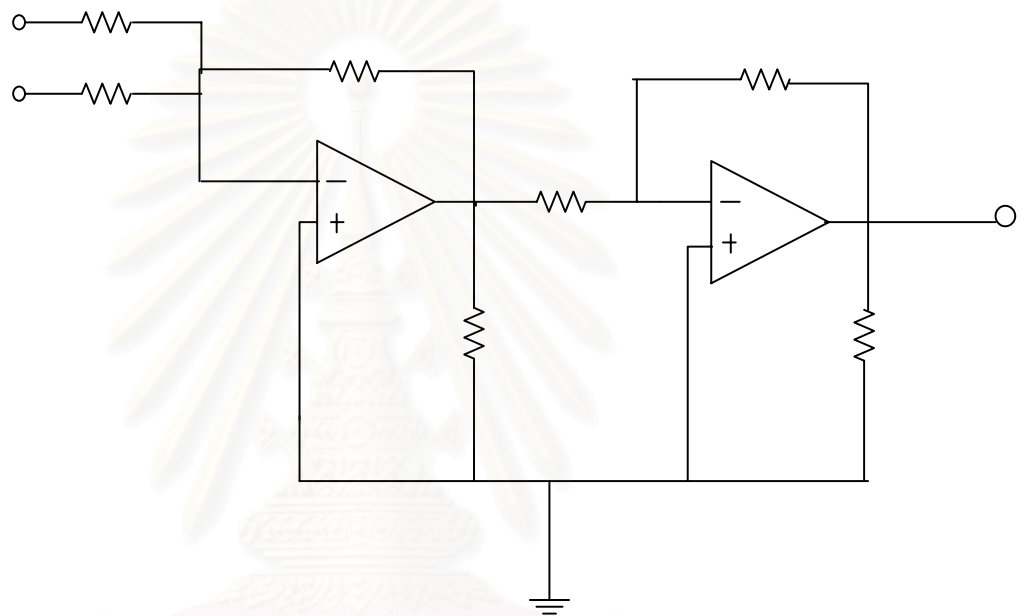
$$3. R_4 = R_5$$

(2.27c)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 วงจรรวมสัญญาณ (Summer Circuit)

วงจรรวมสัญญาณ ในรูปที่ 2.18 สร้างขึ้นจากการต่อตัวต้านทานสองตัวขึ้นไป เข้ากับขั้ว input ลบ ของออปแอมป์พร้อมกัน แรงดัน output ในวงจรเท่ากับผลรวมเท่ากับแรงดัน input แต่ละตัว กับตัวต้านทานแต่ละตัวด้วย ตามวิธีการคำนวณ



รูปที่ 2.18 : รูปวงจรรวมสัญญาณ ที่ใช้ในการคำนวณ

วิธีคำนวณอุปกรณ์ส่วนต่างๆดังนี้

$$1. V_{out} = R_3 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right) \quad (2.28a)$$

$$2. R_5 = R_6 \quad (2.28b)$$

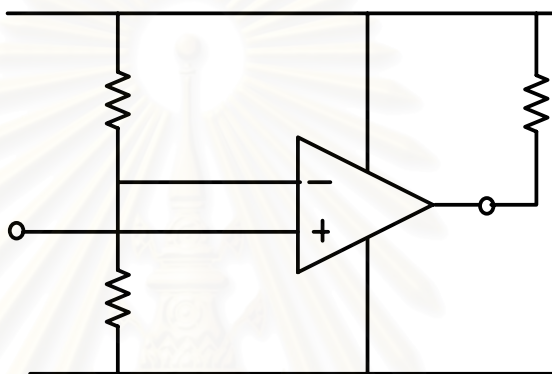
$$3. R_4 = R_7 \quad (2.28c)$$

V1 in

V2 in

2.7 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparator Circuit)

เป็นวงจรที่สร้างเพื่อการเปรียบเทียบแรงดัน input กับ แรงดันอ้างอิง ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งถ้าแรงดัน input น้อยกว่า แรงดันอ้างอิง วงจรจะสั่งให้ มี output เป็น off ในทางกลับกัน ถ้าแรงดัน input มากกว่า แรงดันอ้างอิง วงจรจะสั่งให้ มี output เป็น on แล้วสามารถต่อ output เข้ากับวงจรขับแรงดันให้กับอุปกรณ์ภายนอกได้ด้วย



รูปที่ 2.19 : รูปวงจรเปรียบเทียบสัญญาณพื้นฐาน

วิธีคำนวณอุปกรณ์ส่วนต่างๆดังนี้

$$1. V_{ref} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V \quad (2.29)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้างระบบตรวจหาดีเอ็นเอบางส่วนในจุดต่อสาย เคเบิลแรงสูงใต้ดิน ขณะใช้งาน

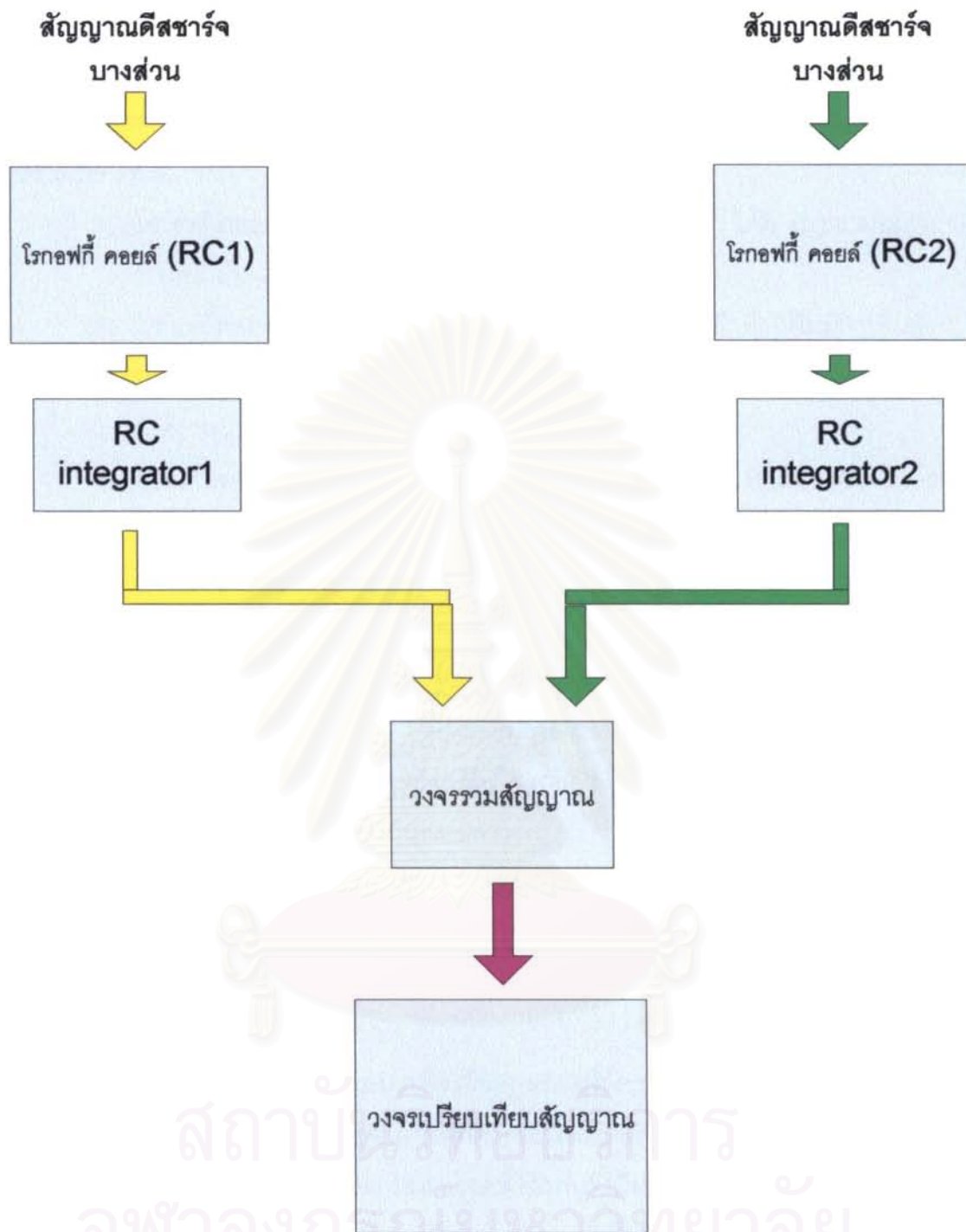
บทนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างระบบตรวจหาดีเอ็นเอบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูง โดยสามารถแบ่งเป็น ส่วนหลักคือ ส่วนตรวจจับสัญญาณดีเอ็นเอบางส่วน และส่วนประมวลผล ดังรูปที่ 3.1

ส่วนตรวจหาสัญญาณดีเอ็นเอบางส่วน โดยส่วนนี้จะใช้หลักการจากบทที่ 2 ในการออกแบบสร้างโรทอปีก์คอยล์ 2 ตัว เป็นตัวตรวจจับกระแสดีเอ็นเอบางส่วน ผ่านตัวอินทิเกรเตอร์ที่เหมาะสม แล้วจึงส่งสัญญาณไปยังส่วนถัดไป

ส่วนประมวลผล โดยส่วนนี้จะประกอบไปด้วย วงจรรวมสัญญาณ 2 สัญญาณ วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

โดยในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้น ซึ่งต้องคำนึงถึงรายละเอียดต่างๆที่จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์เอง และผลกระทบต่อสัญญาณจากภายนอก เพราะสัญญาณกระแสดีเอ็นเอบางส่วนที่เกิดขึ้นมีขนาดค่อนข้างเล็กมาก ซึ่งถ้าออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต่างไม่ดีแล้วอาจจะส่งผลในการประมวลผลผิดพลาดได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 : ลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบตรวจหาดีสชาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิล

3.1 คุณสมบัติของโรกอฟก็คอยล์

ปัจจุบันในการวัดกระแสมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ในการทดลองนี้เลือกใช้ อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสที่ใช้หลักการของหม้อแปลงกระแสแบบพิเศษ ที่เรียกว่า “โรกอฟก็คอยล์” เนื่องจากโรกอฟก็คอยล์มีข้อดีดังนี้

- 1) โรกอฟก็คอยล์สามารถใช้วัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงๆ ได้ดี เพราะแกนอากาศทำให้ไม่เกิด Hysteresis loss
- 2) โรกอฟก็คอยล์มีความเป็นเชิงเส้น เนื่องจากไม่ได้ใช้แกนเหล็กทำให้ไม่มีการอิ่มตัว
- 3) การวัดกระแสของโรกอฟก็คอยล์นั้นจะไม่มีผลกระทบต่อถึงกันทางไฟฟ้า ทำให้ปลอดภัยแก่ผู้ใช้งาน
- 4) กรณีที่โรกอฟก็คอยล์เป็นแบบเปิดอ่านออกได้ ทำให้การใช้งานง่ายเนื่องจากไม่ต้องไปปลดวงจรที่ต้องการวัดออก
- 5) สร้างง่าย และราคาถูกกว่าอุปกรณ์วัดกระแสที่นำเข้าจากต่างประเทศ

3.2 การออกแบบโรกอฟก็คอยล์

การออกแบบสร้างคอยล์ เพื่อให้วัดกระแสดีสหาร์จบางส่วนนั้น จะต้องคำนึงถึงวัสดุที่ใช้ทำแกนขดลวดที่ต้องไม่อิ่มตัว การพันขดลวดเพื่อป้องกันป้องกันสนามแม่เหล็ก และการชิลด์เพื่อป้องกันการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจากภายนอก

คอยล์ที่ทำการออกแบบสร้างประกอบด้วย แกนขดลวด ขดลวด และการชิลด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 แกนขดลวด

โรกอฟก็คอยล์ถูกออกแบบมาเพื่อให้วัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ ด้วยคุณสมบัติที่เด่นกว่าอุปกรณ์วัดที่อาศัยเทคนิคเดียวกัน เช่น หม้อแปลงกระแสที่ใช้แกนที่เป็นสารแม่เหล็ก ซึ่งจะเกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กได้ ขณะที่โรกอฟก็คอยล์ใช้แกนขดลวดที่เป็นวัสดุไม่ใช่สารแม่เหล็ก ทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัวของแกนขดลวด

โรกอฟก็คอยล์ที่ออกแบบจะใช้แกนขดลวดเป็นอากาศ ซึ่งอากาศเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก

3.2.2 ขดลวด

การวัดกระแสด้วยโรกอฟฟ์คือยลจะอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กตามกฎของแอมแปร์ โดยการวัดจะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อพื้นที่หน้าตัด และความหนาแน่นของรอบคองที่ตลอดช่วงความยาวแกน ดังนั้นในการพันขดลวดจึงต้องคำนึงถึงความสม่ำเสมอของพื้นที่หน้าตัด และรอบด้วย

รูปคลื่นกระแสที่วัดได้จะถูกต้องแม่นยำก็ต่อเมื่อ สนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในขดลวดต้องมาจากแหล่งกำเนิดที่ต้องการวัดเพียงอย่างเดียว ไม่มีผลจากสนามแม่เหล็กภายนอก ด้วยเหตุนี้ลักษณะการพันขดลวดของโรกอฟฟ์จึงมีความพิเศษ คือต้องมีการพันย้อนกลับเข้าไปในแกนของขดลวด เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน[1] ดังแสดงใน รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 : การพันขดลวด

3.2.3 การชิลด์

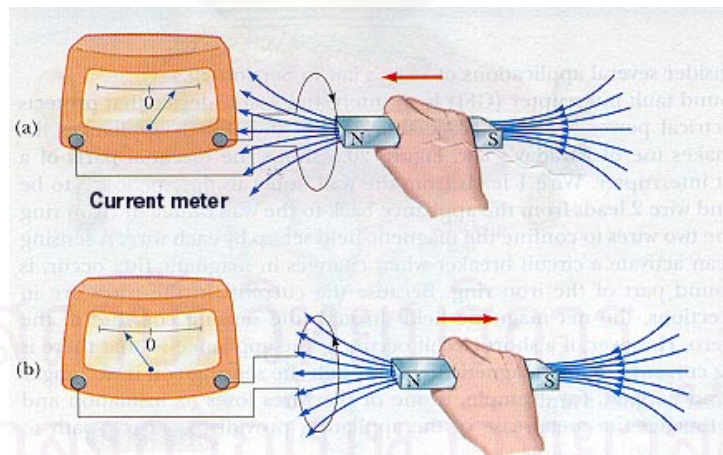
ในขณะที่ทำการวัดกระแสดีสซาร์จบางส่วนนั้น นอกจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสดีสซาร์จบางส่วนแล้ว ก็ยังจะเกิดสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาขนาดสูงขึ้นด้วย ทำให้เกิดการคาบเกี่ยวแบบคาปาซิทีฟ (Capacitive coupling) ขึ้นในตัวนำทำให้ผลการวัดผิดพลาดไป ดังนั้นเพื่อให้ผลที่วัดได้ถูกต้องจึงต้องมีการชิลด์สนามไฟฟ้างดไว้ ก่อสร้างชิลด์โรกอฟฟ์คือยลที่เลือกใช้ทำจากโลหะ (เหล็ก)

3.3 การสร้างโรกอฟกี้คอยล์

ในการออกแบบสร้างโรกอฟกี้คอยล์เพื่อวัดกระแส นั้น กระแสดีเอสอาร์จบางส่วนนั้นมีขนาดเล็กมาก จึงต้องทำการออกแบบสร้างคอยล์ที่มีความเหนี่ยวนำร่วมที่เหมาะสม ความถี่ที่ต้องการเพื่อจะได้นำสัญญาณที่โรกอฟกี้ตรวจวัดได้นั้นส่งไปยังส่วนถัดต่อไป ดังนั้นจึงออกแบบและสร้างโรกอฟกี้คอยล์ที่มีมิติดังนี้

จำนวนรอบของขดลวด , N	=	21	รอบ
พื้นที่หน้าตัดของแกนขดลวด , A	=	7.07	cm^2
ความยาวของแกนขดลวด , L	=	35.36	cm
ความต้านทานขดลวด , Rc	=	0.01	Ω
ความเหนี่ยวนำขดลวด , Lc	=	11.12	μH

ในการทดลองนี้ จะต้องใช้โรกอฟกี้คอยล์ 2 ชุด เพื่อใช้ในการตรวจหากระแสดีเอสอาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูงนั้น จากทฤษฎีในรูปที่ 3.3 เป็นพื้นฐานในการสร้างโรกอฟกี้คอยล์ทั้ง 2 ชุดซึ่งจะพันขดลวดในทิศทางตรงกันข้ามกัน แต่มีสัดส่วนอื่นๆ จะเท่ากันหมดทุกประการ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 : ทฤษฎีการไหลของกระแสและการเหนี่ยวนำร่วม



รูปที่ 3.4 : การพันขดลวด 2 ชุดตรงข้ามกัน

เมื่อต้องการตรวจหาการเกิดดีสซาร์จบางส่วน ขณะใช้งาน จึงต้องออกแบบสร้าง โรกอฟฟี่คอยล์ที่ต้องสามารถคล้องสายเคเบิลได้ โดยไม่ต้องปลดวงจรรอบๆ จึงได้สร้างโรกอฟฟี่คอยล์ที่สามารถ tháoออกได้ เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน ดังรูปที่ 3.5 จะเห็นว่ากล่องที่ใส่ขดลวดโรกอฟฟี่คอยล์เป็นโลหะเพื่อเป็นชิลด์ป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก



รูปที่ 3.5 : โรกอฟฟี่คอยล์ที่ถอดออกได้

3.4 วงจรอินทิเกรเตอร์

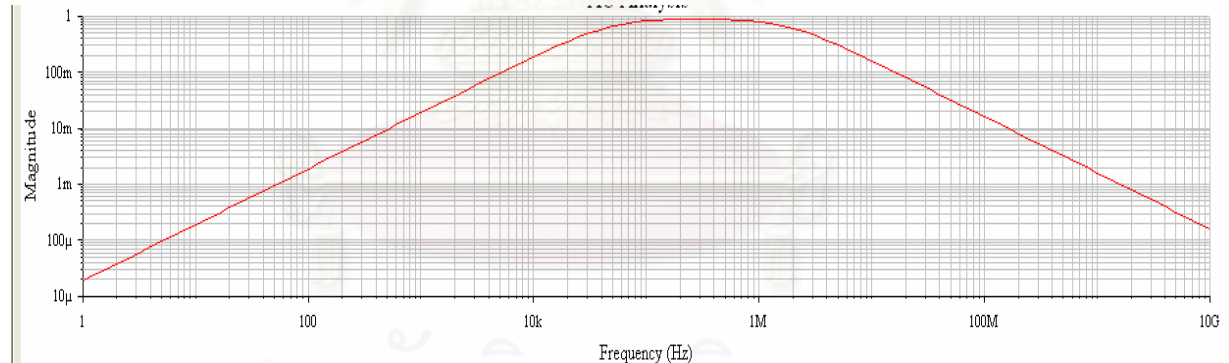
จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงการอินทิเกรตสัญญาณที่ออกจากโรกอฟฟี่คอยล์เพื่อให้ได้รูปแบบของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณจริง โดยในการวิจัยนี้เลือกการอินทิเกรตแบบแพสซีฟ โดยอิมพีแดนซ์ขาออกที่ใส่จะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ X_C เพราะค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดแต่ละรอบรวมกันมีค่าค่ามากๆ(หน่วยเป็น μF)

กรณี RC integrator สามารถจำกัดความถี่ผ่านได้ ทั้งด้านความถี่ผ่านต่ำ และความถี่ผ่านสูง โดยเฉพาะด้านความถี่ผ่านสูงจะช่วยกรองสัญญาณรบกวน ซึ่งสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่จะมีผลตอบสนองที่ความถี่สูง โดยในการต่อ R และ C จากภายนอกมีเงื่อนไข คือ $\omega L_C \ll Z_0$ ซึ่งในการตรวจหาดีสชาร์จบางส่วนโดยมีผลตอบสนองความถี่ส่วนใหญ่ที่ 200-500 kHz จึงเลือก $R = 10k\Omega$ และ $C = 15pF$ โดยมีค่าคงที่เวลา $\tau = RC = 15\mu s \gg 1000ns$ ซึ่งมีค่ามากกว่า 10 เท่าของความกว้างพัลส์ตามเงื่อนไข

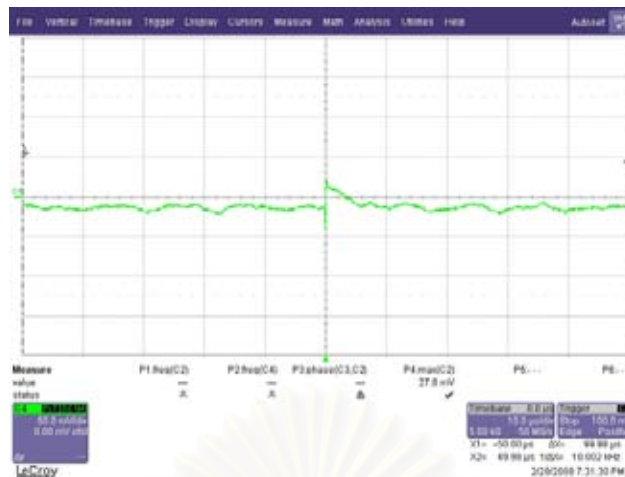
ความถี่หักมุมด้านความถี่ต่ำของโรกอพีก์คอยล์ ชนิด RC integrator ที่สร้างขึ้นมีความถี่หักมุมด้านความถี่ต่ำ (ω_l) และ ความถี่หักมุมด้านความถี่สูง (ω_u) ดังนี้

$$\omega_l \gg \frac{1}{RC} = \frac{1}{(10 \times 10^3 \times 15 \times 10^{-12})} = 1000 \text{krad/s} \text{ หรือ } f_l \gg 159 \text{kHz}$$

$$\omega_u \ll \frac{Z}{L} = \frac{50}{(11.12 \times 10^{-6})} = 4.5 \times 10^6 \text{rad/s} \text{ หรือ } f_u \ll 720 \text{kHz}$$



รูปที่ 3.6 : ผลตอบสนองความถี่ของโรกอพีก์คอยล์ชนิด RC integrator โดยใช้โปรแกรม MultiSim

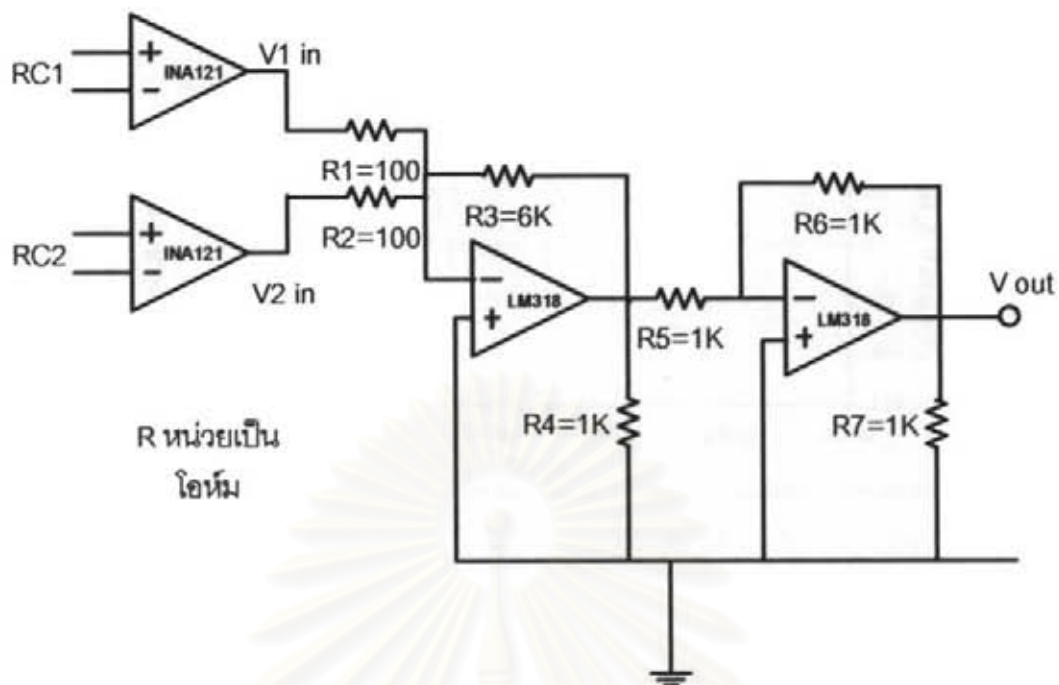


รูปที่ 3.7 : สัญญาณดีสชาร์จบางส่วน ที่วัดได้จากโรกอพท์คอยล์ชนิด RC integrator

3.5 วงจรรวมสัญญาณ

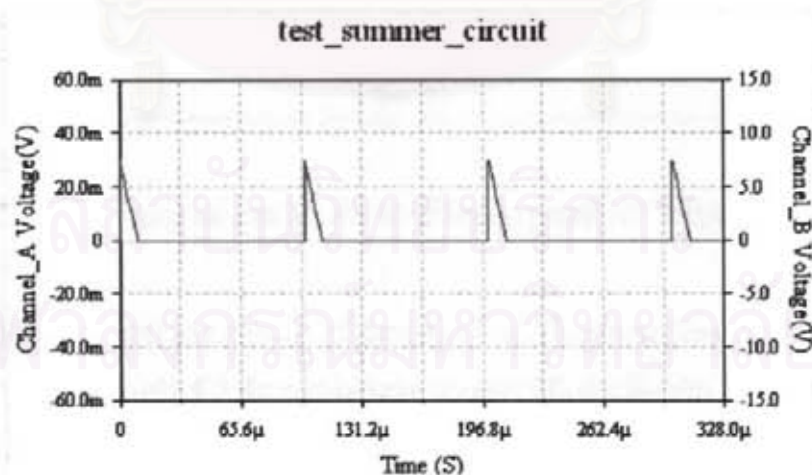
การออกแบบวงจรรวมสัญญาณ เพื่อรวมสัญญาณที่ออกจาก โรกอพท์คอยล์ทั้ง 2 ชุด จะใช้วงจรรขยายการวัดคูลอมบ์ (IA) ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งจะใช้ IC สำเร็จรูป เบอร์ INA121 ซึ่งเป็น IC ที่สร้างมาทำงานเป็น IA โดยเฉพาะ โดย IC ดังกล่าวจะรับสัญญาณจากโรกอพท์คอยล์ทั้งสองชุด หลังจากนั้นเป็นวงจรรวมสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ ซึ่งจากวงจรรวมสัญญาณในรูปที่ 3.8 จะใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักในการรวมสัญญาณ โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LM318 ซึ่งมีแบนด์วิดท์สูง 15 MHz ซึ่งมีความไวในการรวมสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่มีผลตอบสนองความถี่สูงถึง 500 kHz ได้ วงจรที่ออกแบบจะเป็นวงจรพื้นฐานจากวงจรรวมสัญญาณ โดยใช้ออปแอมป์ แต่สัญญาณที่ออกจากวงจรรวมสัญญาณ จะกลับเฟสกับสัญญาณที่นำเข้ามารวม จึงต้องใช้พื้นฐานของวงจร Inverting โดยใช้ออปแอมป์อีกตัว สัญญาณที่ได้ก็จะเป็นสัญญาณที่มีขนาด และเฟส ที่ถูกต้อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

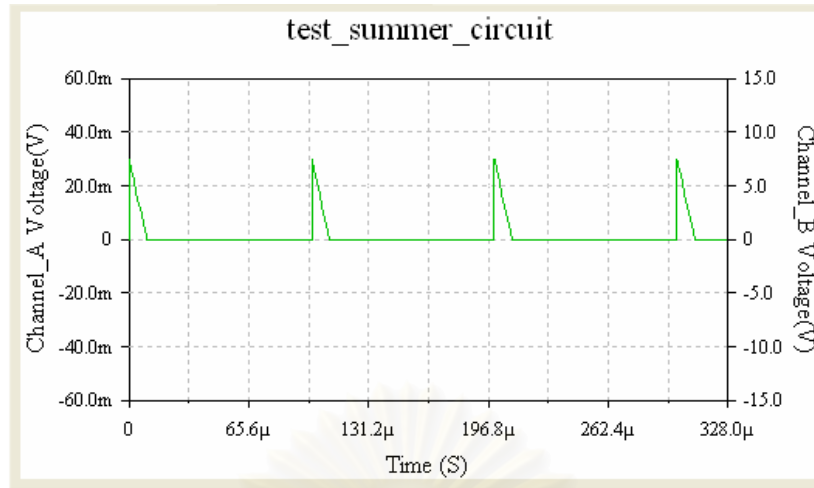


รูปที่ 3.8 : วงจรรวมสัญญาณคัสคาจบางส่วน

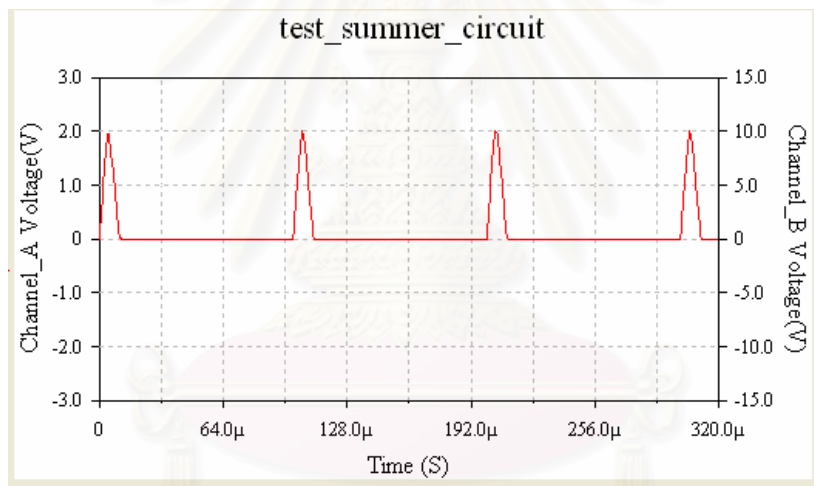
การทำงานของวงจรรวมสัญญาณ โดยการนำสัญญาณ 2 สัญญาณต่อเข้าที่ขา V1 และ V2 หลังจากนั้นวงจรรวมสัญญาณจะทำหน้าที่รวมสัญญาณ และผลของการรวมสัญญาณ 2 สัญญาณจะวัดได้ที่ขาออกของออปแอมป์ ได้โดยการวัดแรงดันที่คร่อม R7



รูปที่ 3.9 : สัญญาณพัลส์ V1 ขนาด 30 mV ที่จำลองโดยใช้โปรแกรมmultisim 7.0



รูปที่ 3.10 : สัญญาณพัลส์ V2 ขนาด 30 mV ที่จำลองโดยใช้โปรแกรมmultisim 7.0

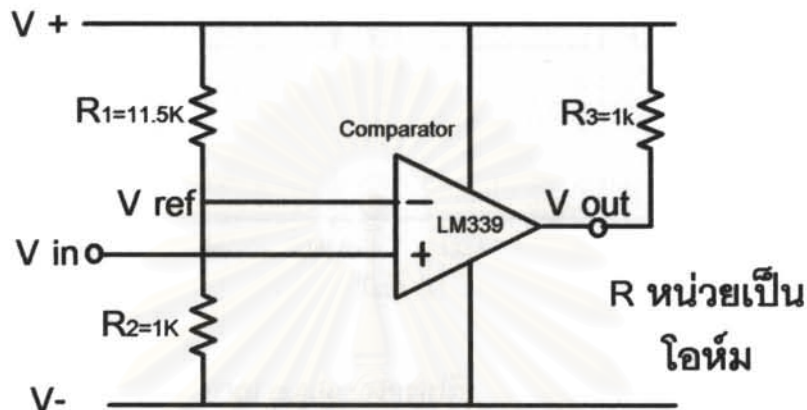


รูปที่ 3.11 : สัญญาณ รวม V1 กับ V2 ที่วัดสัญญาณที่ R7 ใช้โปรแกรม Multisim 7.0

ทดสอบวงจรที่ออกแบบก่อนนำไปใช้งานจริง โดยใช้โปรแกรม Simulation (Multisim 7.0) โดยการจำลองสัญญาณพัลส์ 2 สัญญาณขนาด 30 mV ที่มีเฟสเดียวกัน ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ผ่านวงจรรวมสัญญาณที่ออกแบบอัตราขยาย 60 เท่า และเมื่อจำลองนำ oscilloscope วัดแรงดันที่คร่อม R7 ก็จะได้สัญญาณในรูปที่ 3.11 ซึ่งได้สัญญาณพัลส์ขนาด 1.8 V

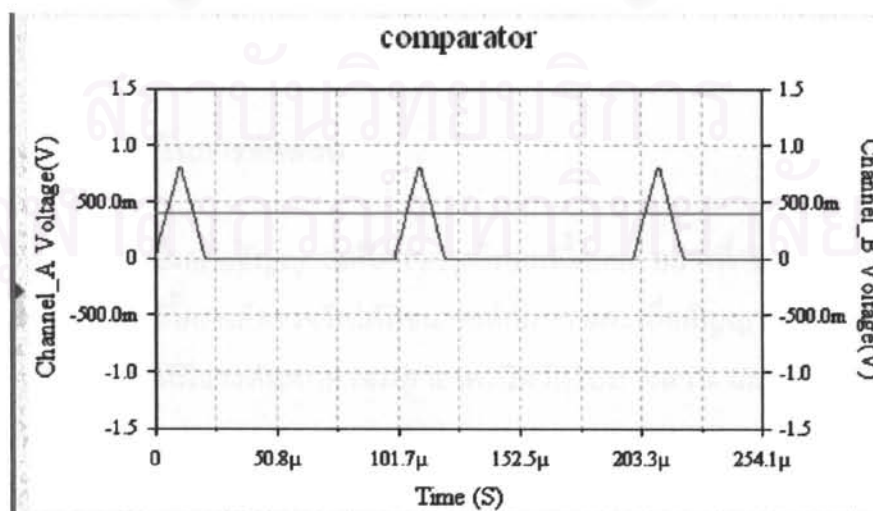
3.6 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

การออกแบบวงจรรวมสัญญาณโดยการนำสัญญาณที่ได้จากการรวมสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนแล้ว เทียบกับแรงดันอ้างอิง ซึ่งสามารถเลือกได้ว่าต้องการแรงดันอ้างอิงเท่าใด โดยปรับที่ R_1 และเลือกใช้ IC เบอร์ LM339 ในรูปที่ 3.12 เป็นวงจรที่ออกแบบสร้างขึ้นใช้งาน

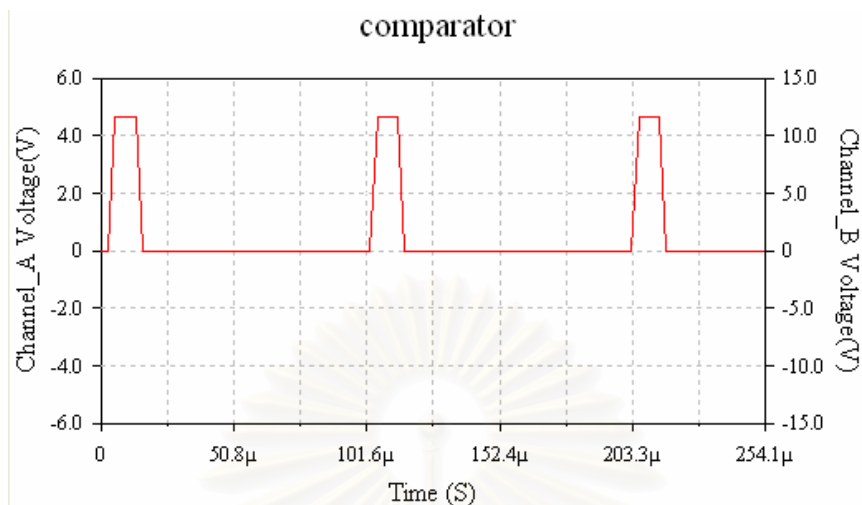


รูปที่ 3.12 : วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

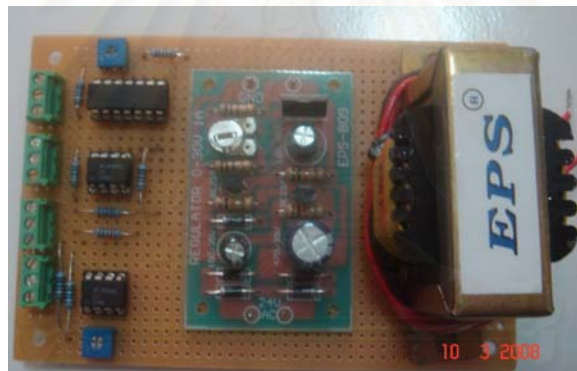
หลังจากออกแบบวงจรเปรียบเทียบแล้ว จึงต้องทำการทดสอบวงจรที่ออกแบบ โดยใช้โปรแกรม simulation จำลองแรงดัน input ดิสซาร์จบางส่วน ที่ 800 mV และจำลองแรงดันอ้างอิงที่ 400 mV รูปที่ 3.15 จะได้ขนาดสัญญาณ output ที่ออกจากวงจรเปรียบเทียบ ที่ 150 mV ดังรูปที่ 3.16 เมื่อทดสอบวงจรที่ออกแบบใช้งานได้จริงจึงทำการประกอบและสร้างวงจร ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.13 : สัญญาณ input ขนาด 800 mV และ แรงดันอ้างอิง 400 mV ใช้โปรแกรม Multisim



รูปที่ 3.14 : สัญญาณ output วงจรเปรียบเทียบ ใช้โปรแกรม Multisim



รูปที่ 3.15 : วงจรรวมสัญญาณและวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ประกอบใช้งาน

3.7 อุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

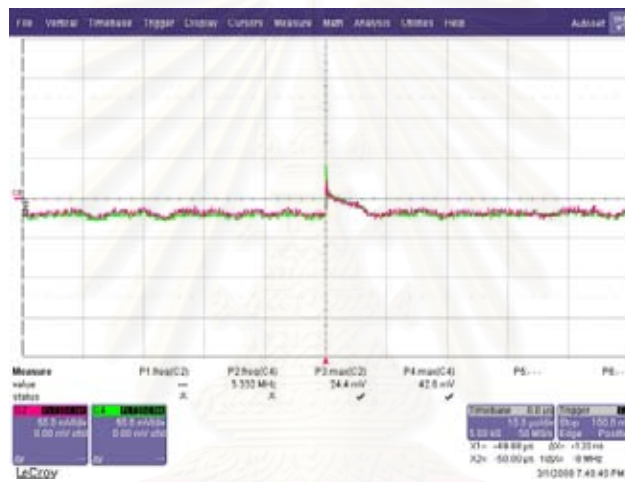
3.7.1 สายเคเบิลวัด

สายเคเบิลวัดมีผลต่อสัญญาณที่ได้จากชุดโรกอฟฟ์คอยล์ อย่างที่กล่าวมาคือสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนที่โรกอฟฟ์คอยล์ตรวจวัดได้มีขนาดเล็กมาก และเมื่อสัญญาณผ่านสายเคเบิลวัดดังกล่าว จะมีผลทำให้มีแรงดันตกคร่อมสายเคเบิลวัดไปบางส่วน ฉะนั้นสัญญาณที่วัดได้ปลายทางก็จะเล็กลงอีก

ดังนั้นในการออกแบบสร้าง จะต้องคำนึงถึงรายละเอียดให้มาก โดยเริ่มตั้งแต่ ชนิดของสายเคเบิลและความยาวสายเคเบิลที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ลักษณะการshield ที่ป้องกันสนามไฟฟ้าจากภายนอกได้ดี จึงได้ออกแบบสร้างสายเคเบิลวัดดังนี้



รูปที่ 3.16 : สายเคเบิลวัด 50 ohm หัวต่อ BNC



รูปที่ 3.17 : ผลการ calibrate สายเคเบิลวัด 2 เส้น โดยวัดสัญญาณดีสซาร์จบางส่วน ที่ออกจาก โรกอฟก็คอยล์ จุดเดียวกัน

3.7.2 สายเคเบิลทดสอบและการจำลองการชำรุดของฉนวน

ในการวิจัยนี้ จะใช้การจำลองสายเคเบิลที่ชำรุด จึงทำให้เกิดดีสซาร์จบางส่วนขึ้น โดยสัญญาณดีสซาร์จจะถูกตรวจหาโดยโรกอฟก็คอยล์ ซึ่งจะทราบทิศทางกาเดินทางของสัญญาณดีสซาร์จมากระทบโรกอฟก็คอยล์ จึงจำเป็นต้องให้สัญญาณที่มากระทบโรกอฟก็คอยล์มาจากแหล่งกำเนิดดีสซาร์จบางส่วนเท่านั้น

จากที่กล่าวมาในการเลือกความยาวสายเคเบิลทดสอบต้องไม่ยาวมาก โดยไม่ต้องการให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณดีสซาร์จบางส่วน

3.7.3 Oscilloscope

LeCroy “waverunner” 6050 A , 500 MHz Oscilloscope



รูปที่ 3.18 : Oscilloscope

3.7.4 Variable Voltage Control (VARIAC)

Brand : “STENDAL” , Model : SD-4 , Capacity 1 KVA , MAX 4.0 amp

Input 220 V 50-60 Hz , Output 0-250 Vac



รูปที่ 3.19 : Variac

3.7.4 หม้อแปลงไฟฟ้า

Model : EX230A16N , Normal : P.F. ,50 Hz , No. 332-07-02

Pri.V. 230 V , 2.0 A , Sec.V. 7500 , 30 mA



รูปที่ 3.20 : หม้อแปลงไฟฟ้า

3.7.5 หม้อแปลงสปาร์ก

Krom schroder , TZI 7.5/33W , Pri 220 V (50 Hz) 0.9 A , Sec 7.5 KV 20 mA



รูปที่ 3.21 : หม้อแปลงสปาร์ก

3.7.6 Pulse Generator

Model : POG 82 , 5 pC , 50 pC , 500 pC , 5,000 pC



รูปที่ 3.22 : Pulse Generator

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดสอบและประเมินผลระบบตรวจหาดีสซาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินขณะใช้งาน

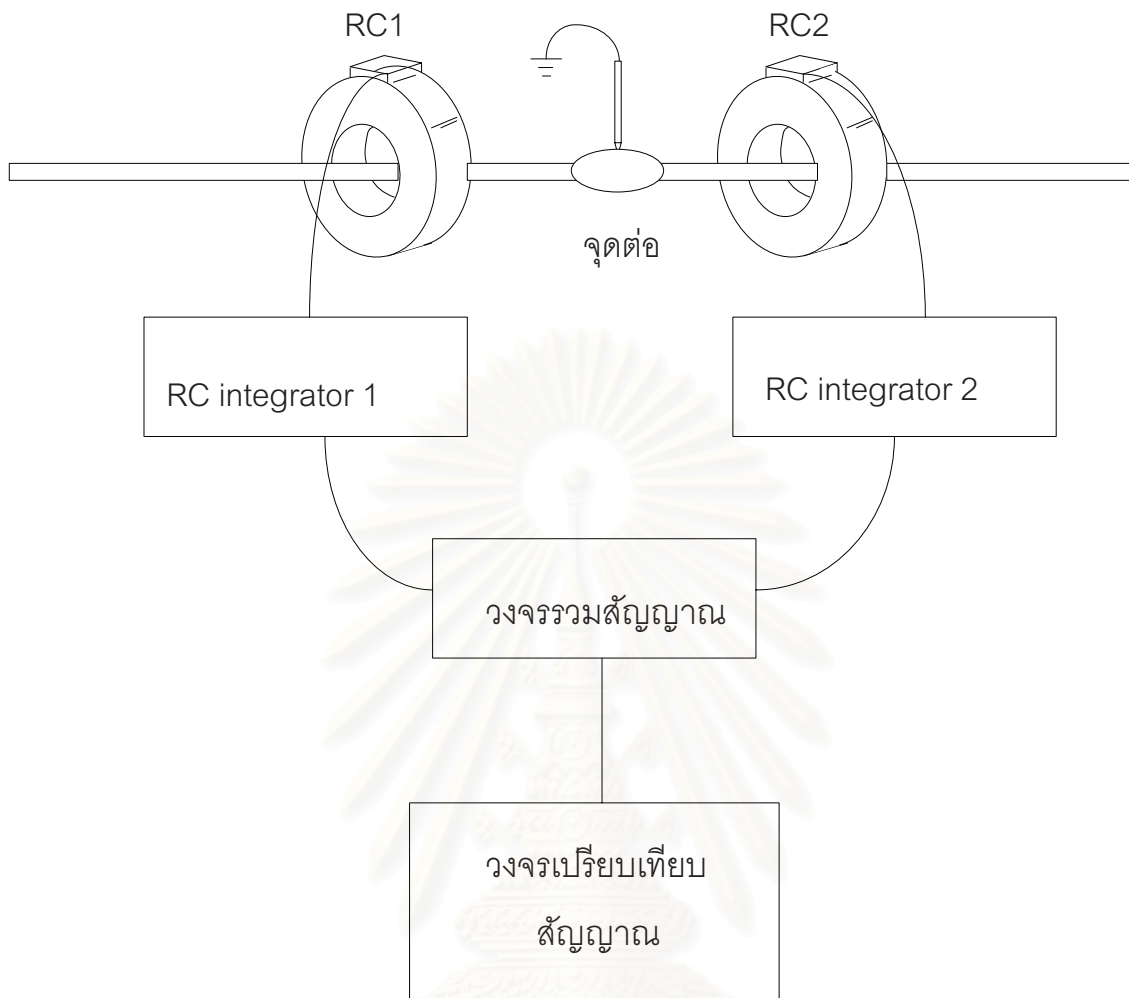
เป้าหมายหลักของการออกแบบสร้างระบบตรวจหาดีสซาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิลแรงสูงนั้น เพื่อตรวจเช็คจุดต่อสายเกิดความบกพร่องหรือไม่ เพราะถ้าตรวจพบจุดบกพร่องก็จะวางแผนในการซ่อมแก้ไขต่อไป

ซึ่งในระบบตรวจหาดีสซาร์จบางส่วนที่จุดต่อสายเคเบิลดังรูปที่ 4.1 นั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน

1. ส่วนตรวจจับสัญญาณดีสซาร์จบางส่วน ประกอบด้วย โรกอฟกีคอยล์ และ RC integrator ทั้ง 2 ชุด
2. ส่วนประมวลผลประกอบด้วย, วงจรรวมสัญญาณ, วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

ในการทดสอบและประเมินจะใช้ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



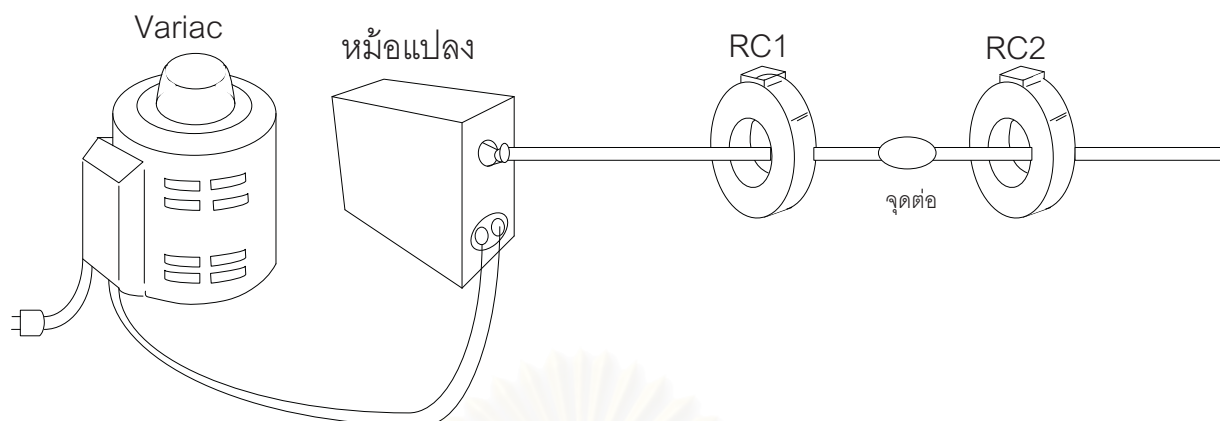
รูปที่ 4.1 : ส่วนประกอบต่างๆของระบบตรวจหาดีสชาร์จบางส่วนในจุดต่อสายเคเบิล

4.1 การทดสอบและประเมินผลส่วนตรวจหาสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน

เงื่อนไขในการทดสอบและประเมินผลจะประกอบอุปกรณ์ต่างๆดังรูปที่ 4.2

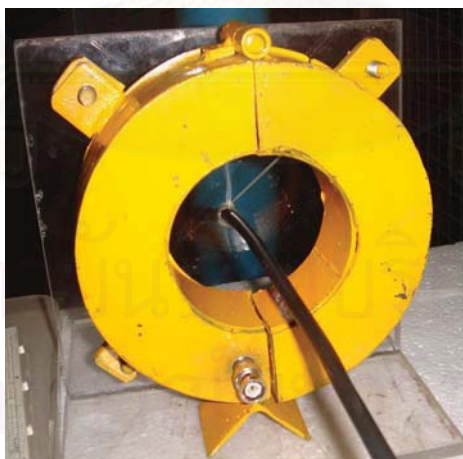
อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบดังนี้

1. Variac 0-220 V. , 4 A
2. หม้อแปลงไฟฟ้า 220 : 7,500 V. , 800 VA
3. สายเคเบิลทดสอบ Coaxial RG6 50 Ω , shield 95% ยาว 20 m
4. โรกอฟกี้คอยล์ RC1 และ RC2 ที่พันขดลวดในทิศตรงกันข้ามกัน



รูปที่ 4.2 : การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ทดสอบ

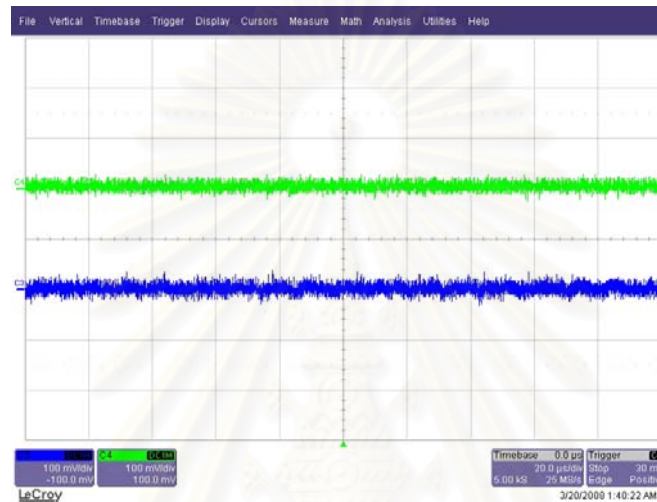
ในการทดสอบจะใช้โรกอฟฟี่คอยล์ในการตรวจจับกระแสอิมพัลส์ หรือสัญญาณดีสชาร์จ บางส่วน โรกอฟฟี่จะตรวจจับสัญญาณได้ดี และมีสัญญาณรบกวนต่ำ ควรจะให้สายเคเบิลทดสอบ ผ่านกึ่งกลางของโรกอฟฟี่คอยล์ [7] ดังรูป4.3 จะเห็นว่าในการทดสอบจะมีแผ่นอะคริลิก อยู่ด้านหลังโรกอฟฟี่คอยล์ ซึ่งให้สายเคเบิลทดสอบให้ตึง และผ่านกึ่งกลางของโรกอฟฟี่คอยล์



รูปที่ 4.3 : การคล้องโรกอฟฟี่คอยล์

4.1.1. การทดสอบอุปกรณ์ต่างๆก่อนทำการทดสอบจริง

ในการออกแบบระบบตรวจหาดีสชาร์จบางส่วน มีเงื่อนไขที่สามารถตรวจหาดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเพียงแหล่งเดียวเท่านั้น ในการทดสอบจึงจำเป็นต้องมั่นใจว่า อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองต้องไม่เกิดดีสชาร์จบางส่วน จึงต้องทำการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆก่อนทดสอบจริง โดยใช้วงจรทดสอบดังรูปที่ 4.2 โดยการค่อยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ VARIAC ขึ้นเรื่อยๆจนกว่าจะเกิดดีสชาร์จบางส่วน ซึ่งได้ผลตามรูปสัญญาณดังนี้

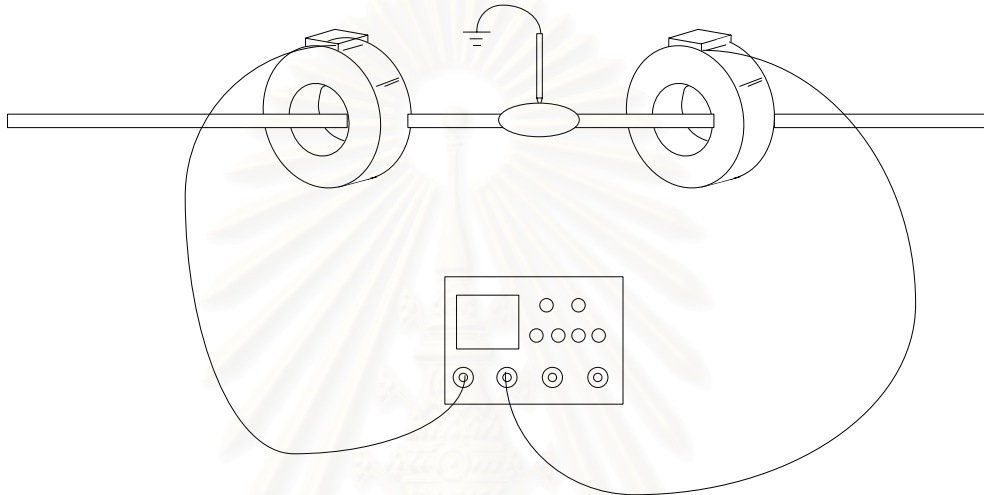


รูปที่ 4.4 : สัญญาณที่วัดได้จากโรกอฟก็คอยล์ RC1 และ RC2 ที่แรงดันระบบ 6,818 V เมื่อไม่สร้างดีสชาร์จบางส่วน

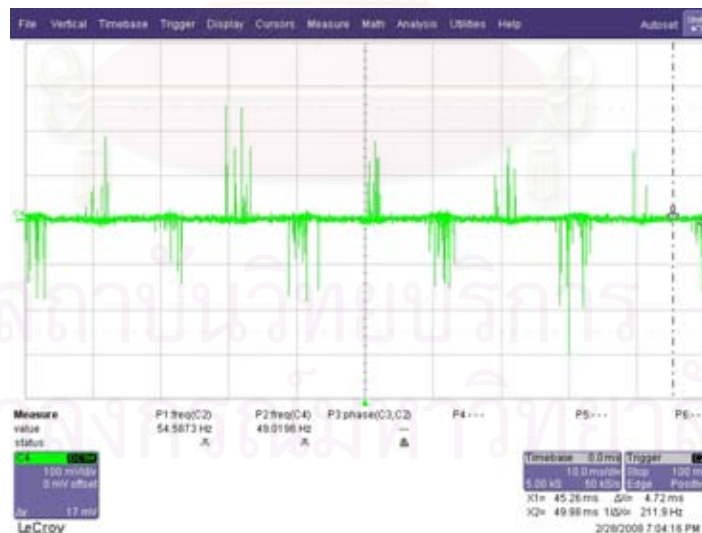
เมื่อทดสอบอุปกรณ์ต่างๆก่อนทำการทดสอบจริง โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นเรื่อยๆ ที่ Variac 0-220 V. หรือ ที่หม้อแปลง 0 - 7,500 V. (แรงดันระบบ) จากรูปที่4.4 จะเห็นว่าแรงดันที่ Variac 200 V. (90% ของแรงดันพิกัด) หรือแรงดันระบบที่ 6,818 V. สัญญาณที่ได้จากโรกอฟก็คอยล์ไม่มีสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นเลย จึงมั่นใจว่าอุปกรณ์ที่นำมาใช้ทดสอบ ตั้งแต่ Variac, หม้อแปลงไฟฟ้า, สายเคเบิลทดสอบ และอื่นๆ ไม่เกิดดีสชาร์จบางส่วนที่แรงดันระบบ ตั้งแต่ 0 ถึง 6,818 V. ดังนั้นในการทดสอบและประเมินระบบนั้นจะใช้แรงดันระบบในการทดสอบไม่เกิน 6,818 V. เพื่อให้แน่ใจได้ว่าไม่เกิดดีสชาร์จบางส่วนจากแหล่งกำเนิดจุดอื่น

4.1.2. การทดสอบและประเมินผลโรกอฟฟี่คอยล์ เมื่อเกิด PD ที่จุดต่อสายเคเบิล

ในการทดสอบนี้จะสร้างการเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่จุดต่อของสายเคเบิล โดยการใช้โลหะปลายแหลมแทงเข้าเนื้อฉนวนของสายเคเบิลทดสอบที่จุดต่อสายเคเบิล และต่อโลหะปลายแหลมลงการ์ด แล้วคล้องโรกอฟฟี่คอยล์ชนิด RC integrator RC1 และ RC2 ให้สายเคเบิลทดสอบผ่านกึ่งกลางของโรกอฟฟี่คอยล์ โดยโรกอฟฟี่คอยล์ทั้งสองชุด ให้ห่างจากจุดสร้างดีสชาร์จบางส่วนเท่าๆกัน ค่อยๆเพิ่มแรงดัน Variac ขึ้นเรื่อยๆ แต่ไม่ให้เกิน 200 V. แล้วบันทึกผล

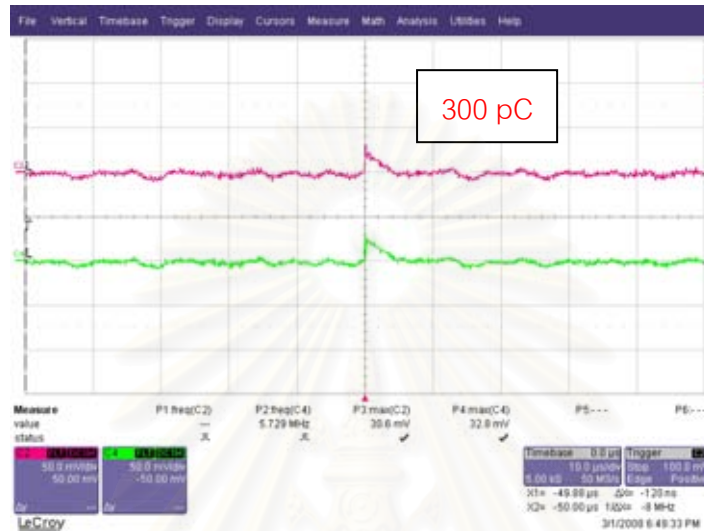


รูปที่ 4.5 : การสร้างดีสชาร์จบางส่วนที่จุดต่อสาย

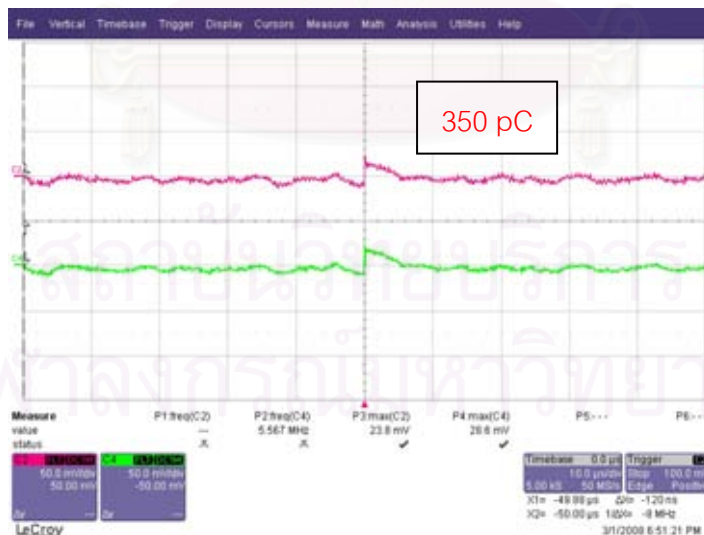


รูปที่ 4.6 : สัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดซ้ำๆที่วัดได้จากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1 ที่แรงดันระบบ 6,818 V.

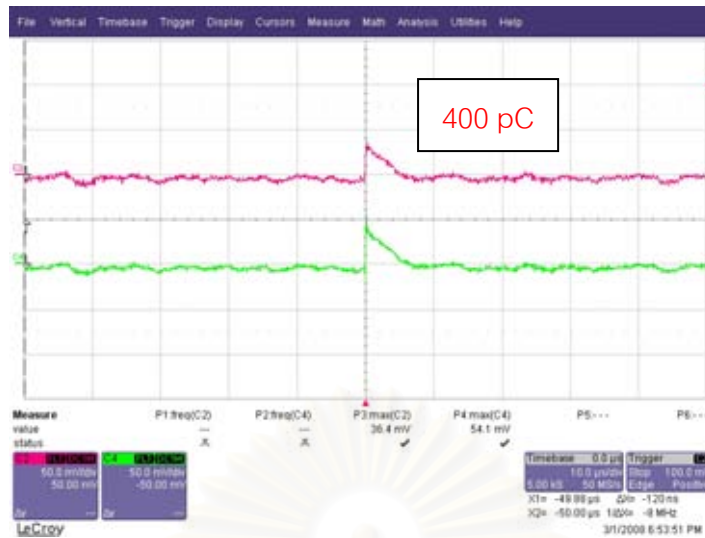
เมื่อทดสอบสร้างดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลทดสอบ ตามรูปที่ 4.5 แล้วจะได้สัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1 ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าดีสชาร์จบางส่วนจะเกิดซ้ำๆ ตลอดเวลา โดยแรงดันดีสชาร์จบางส่วนจะมีขนาดมากที่สุด เมื่อแรงดันระบบอยู่ในช่วง peak สูงสุดเช่นกัน



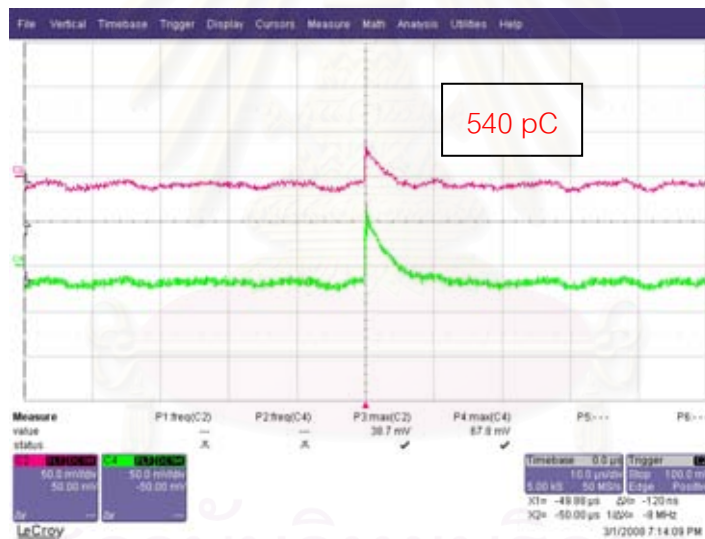
รูปที่ 4.7 : สัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1(เขียว) และ RC2(แดง) ที่แรงดัน Variac 80 V. หรือ แรงดันระบบ 2,727 V.



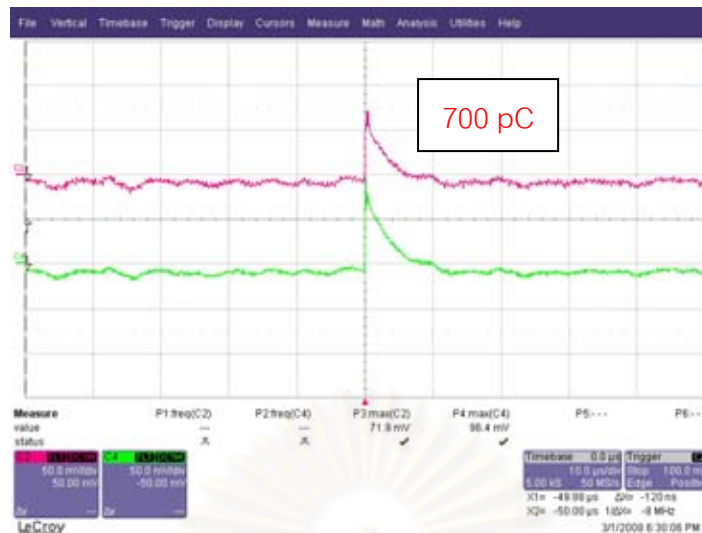
รูปที่ 4.8 : สัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1(เขียว) และ RC2(แดง) ที่แรงดัน Variac 100 V. หรือ แรงดันระบบ 3,409 V.



รูปที่ 4.9 : สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1(เขียว) และ RC2(แดง) ที่แรงดัน Variac 120 V.หรือ แรงดันระบบ 4,090 V.



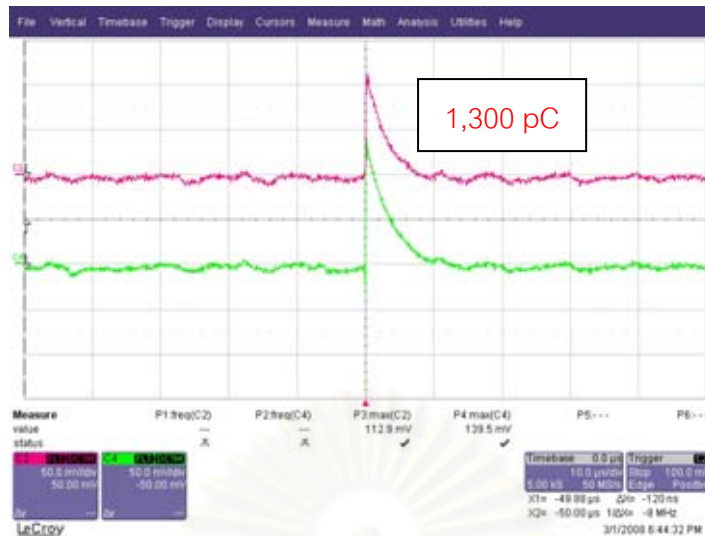
รูปที่ 4.10 : สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1(เขียว) และ RC2(แดง) ที่แรงดัน Variac 140 V. หรือ แรงดันระบบ 4,772 V.



รูปที่ 4.11 : สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟ์ค็อยล์ RC1(เขียว) และ RC2(แดง) ที่แรงดัน Variac 160 V. หรือ แรงดันระบบ 5,454 V.



รูปที่ 4.12 : สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟ์ค็อยล์ RC1(เขียว) และ RC2(แดง) ที่แรงดัน Variac 180 V. หรือ แรงดันระบบ 6,136 V.



รูปที่ 4.13: สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟกัคคอยล์ RC1(เขียว) และ RC2(แดง) ที่แรงดัน Variac 200 V. หรือ แรงดันระบบ 6.818 V.

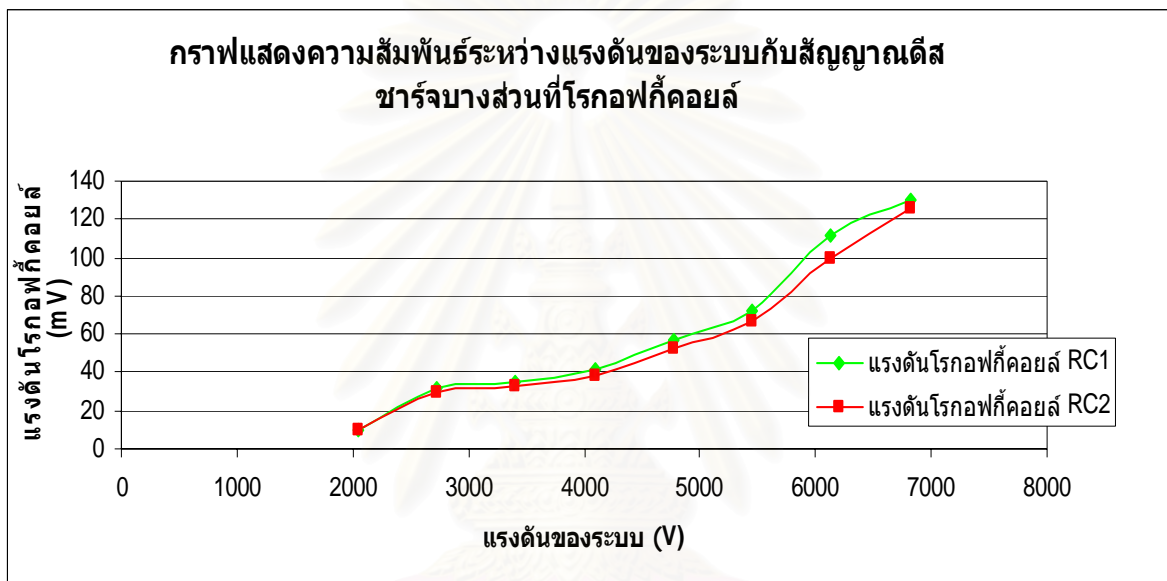
ตารางที่ 4.1 : ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระบบกับแรงดันของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน

แรงดันที่ Variac (V.)	60	80	100	120	140	160	180	200
แรงดันที่หม้อแปลง (V.)	2,045	2,727	3,409	4,090	4,772	5,454	6,136	6,818
แรงดันโรกอฟกัคคอยล์ RC1 (mV)	<10	31.8	35.5	41.7	57.3	71.8	112.1	130.2
แรงดันโรกอฟกัคคอยล์ RC2 (mV)	<10	29.5	33.3	38.6	52.5	67.1	99.1	125.7
ผลต่างแรงดันระหว่างโรกอฟกัคคอยล์ ทั้ง 2 ชุด (%)	-	7.79	6.60	8.03	9.14	7.00	13.11	3.58

จากการทดสอบป้อนแรงดันเข้าสายเคเบิลทดสอบ และสร้างจุดเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่จุดต่อสายเคเบิลดังที่กล่าวมานั้น สัญญาณแรงดันที่วัดได้จากโรกอฟกัคคอยล์ RC integrator เมื่อเพิ่มแรงดันระบบขึ้นเรื่อยๆ ดังรูปที่ 4.7 – 4.13 จะพบว่าโรกอฟกัคคอยล์ที่ออกแบบนั้น จะสามารถตรวจจับขนาดดิสชาร์จบางส่วนที่โรกอฟกัคคอยล์ที่วัดได้น้อยที่สุด ประมาณ 30 mV ที่แรงดันระบบ 2,727 V. ถ้าแรงดันระบบน้อยกว่า 2,727 V. สัญญาณดิสชาร์จที่โรกอฟกัคคอยล์สามารถตรวจจับได้จะมีค่าแรงดัน

สัญญาณดีสชาร์จน้อยมาก (<10 mV) ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวนในระบบ จึงจำเป็นสัญญาณดีสชาร์จที่ตรวจจับที่โรกอฟก็คอยล์ต้องมีขนาดมากพอ หรือ ประมาณ 30 mV ขึ้นไป

ในการออกแบบโรกอฟก็คอยล์นั้น ต้องการให้โรกอฟก็คอยล์ทั้ง 2 ชุดมีคุณสมบัติเท่ากันทุกประการ ไม่ว่าจะเป็นจำนวนรอบ ขนาดสายที่นำมาพันขดลวด ชนิดของสายที่นำมาพันขดลวด แต่ความเป็นจริงแล้วการที่จะสร้างโรกอฟก็คอยล์ทั้ง 2 ชุดให้มีคุณสมบัติเท่ากันทุกประการเป็นเรื่องที่ยากมาก โดยถ้าพิจารณาจากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ผลต่างของขนาดแรงดันโรกอฟก็คอยล์ทั้ง 2 ชุดจะต่างกันที่ เฉลี่ยไม่เกิน 10% ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [2]

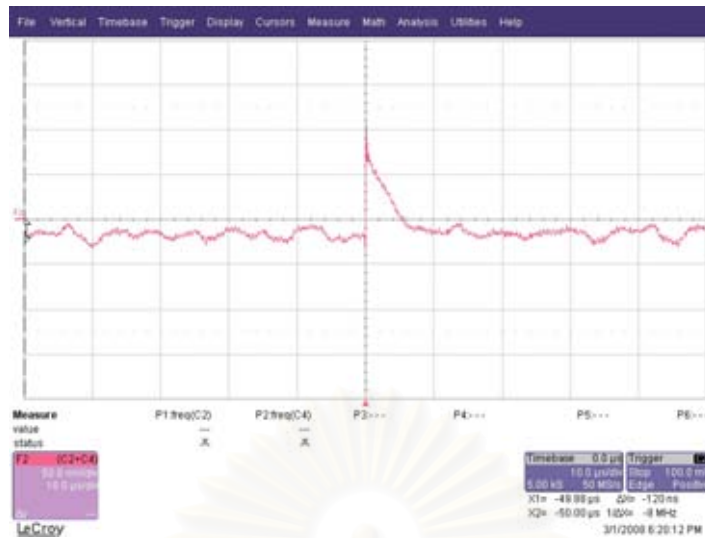


รูปที่ 4.14: กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระบบกับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่โรกอฟก็คอยล์

จากรูปที่ 4.14 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระบบกับแรงดันสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่โรกอฟก็คอยล์ จะว่าเมื่อแรงดันระบบมากขึ้น โรกอฟก็คอยล์ก็จะตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนมากขึ้นด้วย เป็นสัดส่วนโดยตรงกัน

เมื่อได้สัญญาณจากดีสชาร์จบางส่วนจากโรกอฟก็คอยล์ แล้ว จะส่งสัญญาณที่ได้ไปยังส่วนรวมสัญญาณและแสดงผลต่อไป แต่ก่อนจะข้ามไปยังส่วนถัดไป จึงได้ทดสอบดีสชาร์จบางส่วนที่ได้จากโรกอฟก็คอยล์ทั้ง 2 ชุด โดยใช้ Function Sum ที่มีใน Oscilloscope เพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่โรกอฟก็คอยล์ตรวจจับได้นั้น สามารถนำมารวมกันได้

โดยเลือกที่แรงดันระบบ 4,090 V. ขนาดแรงดันดีสชาร์จบางส่วนที่ RC1 คือ 44.5 mV และขนาดแรงดันดีสชาร์จบางส่วนที่ RC2 คือ 41.2 mV



รูปที่ 4.15 : สัญญาณที่ได้จากการรวมสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟกี้คอยล์ RC1 และ RC2 เมื่อสร้างดิสซาร์จบางส่วนที่จุดต่อสาย (ใช้ Function Sum ใน Oscilloscope ในการรวมสัญญาณ)

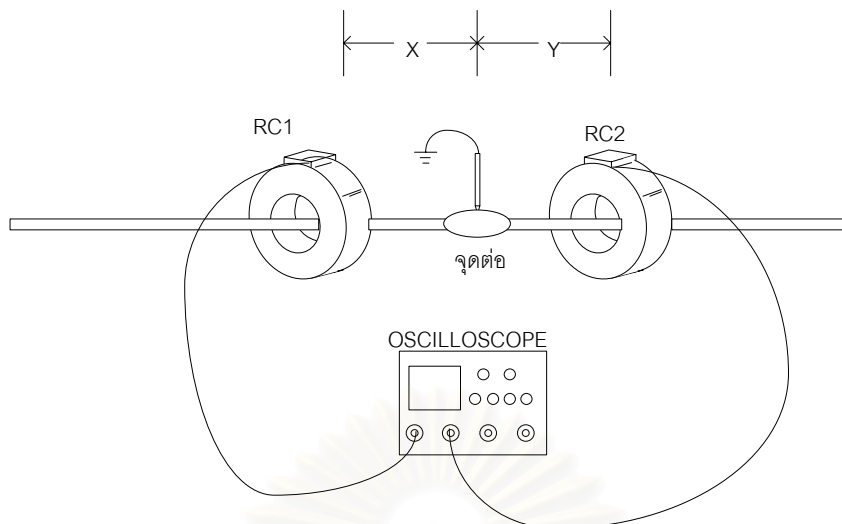
จากรูปสัญญาณที่ 4.15 จะเห็นว่าสัญญาณที่ได้จากการรวมสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนจาก RC1 และ RC2 มีขนาดแรงดัน ประมาณ 80 mV

สรุปจากการทดสอบได้ว่าสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่ตรวจจับได้จากโรกอฟกี้คอยล์ RC1 และ RC2 สามารถส่งเข้าส่วนรวมสัญญาณและแสดงผลได้

4.1.3 การทดสอบและประเมินผล Delay time เมื่อคล้องโรกอฟกี้คอยล์ในตำแหน่งต่าง ๆ

ในการทดสอบและประเมินผล เมื่อย้ายตำแหน่งคล้องโรกอฟกี้คอยล์ทั้ง 2 ชุดไปตำแหน่งต่างๆ โดยรูปที่ 4.16 เป็นรูปวงจรที่ใช้ในการทดสอบดังกล่าว ซึ่งในการทดสอบจะย้ายโรกอฟกี้คอยล์ไปตามตำแหน่ง X,Y ซึ่งในตอนเริ่มจะค่อยๆย้ายตำแหน่งโรกอฟกี้คอยล์ครั้งละ 5 cm ซึ่งได้ผล Delay time ที่โรกอฟกี้คอยล์ตรวจหาสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่น้อยมาก < 10 ns

จึงได้ทดสอบโดยการเพิ่มระยะห่างโรกอฟกี้คอยล์ เป็นครั้งละ 50 cm แล้วจึงทำการทดสอบและเก็บผลโดยใช้ oscilloscope ซึ่งได้ผลการทดสอบตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.16 : การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบคลื่นโรกอฟฟี่คอยล์ ในตำแหน่งต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ผล Delay time ระหว่างโรกอฟฟี่คอยล์ทั้งสองชุด เมื่อทดสอบคลื่นโรกอฟฟี่คอยล์ที่ตำแหน่งต่างๆ (ตำแหน่ง X , Y)

		Delay time ที่โรกอฟฟี่คอยล์ทั้ง 2 ชุด สามารถตรวจหาสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน (ns)					
ระยะ X (cm)		50	100	150	200	250	300
ระยะ Y (cm)	50	<10	<10	<10	<10	12.12	16.2
	100	<10	<10	<10	<10	10.02	13.07
	150	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	200	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	250	11.9	10.13	<10	<10	<10	<10
	300	16.02	11.9	<10	<10	<10	<10

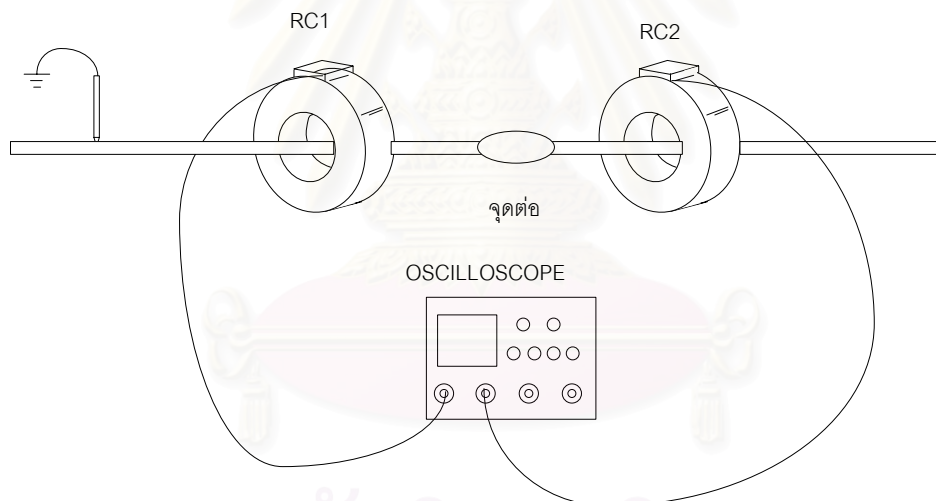
โดยธรรมชาติของสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนจะวิ่งออกจากจุดเกิดไปทั้งด้านขวา และด้านซ้ายของจุดต่อสายเคเบิล จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าที่ความห่างจากจุดเกิดดีสชาร์จบางส่วนของโรกอฟฟี่คอยล์ทั้ง 2 ชุดที่ 0 ถึง 100 cm สัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่โรกอฟฟี่คอยล์ทั้ง 2 ชุดจะ

Delay time < 10 ns ซึ่งน้อยมาก และ ที่ความห่างจากจุดเกิดดีสชาร์จบางส่วนของโรกอฟฟี่คอยล์ทั้ง 2 ชุดที่ 150-250 cm สัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่โรกอฟฟี่คอยล์ทั้ง 2 ชุดจะ Delay time 12-16 ns

จากการทดสอบและประเมินผลสรุปได้ว่าตำแหน่งในการคล้องโรกอฟฟี่คอยล์ ไม่มีผล Delay time จากโรกอฟฟี่คอยล์ทั้ง 2 ชุด ซึ่งในการทดสอบที่ตำแหน่งคล้องโรกอฟฟี่คอยล์ห่างจากจุดต่อสายเคเบิลถึง 300 cm ซึ่งจุดต่อสายเคเบิลทั่วไปจะไม่ยาวถึงขนาดนี้

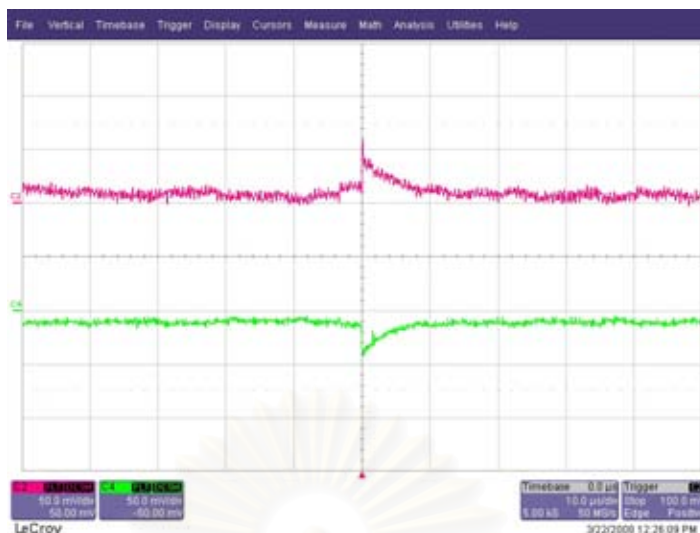
4.1.4 การทดสอบและประเมินผลโรกอฟฟี่คอยล์ เมื่อเกิด PD ที่นอกจุดสายเคเบิล (ด้านซ้าย)

ในการทดสอบและประเมิน โดยสร้างดีสชาร์จบางส่วน นอกจุดต่อสายเคเบิล ดังรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าในการติดตั้งอุปกรณ์จะเหมือนกับ การสร้างจุดเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่จุดต่อสายเคเบิล แต่จะย้ายจุดเกิดดีสชาร์จบางส่วนออกนอกช่วงระหว่างโรกอฟฟี่คอยล์ทั้ง 2 ชุด แล้วป้อนแรงดันระบบ 4,090 V. บันทึกขนาดแรงดันดีสชาร์จบางส่วนที่โรกอฟฟี่คอยล์ ทั้ง 2 ชุด



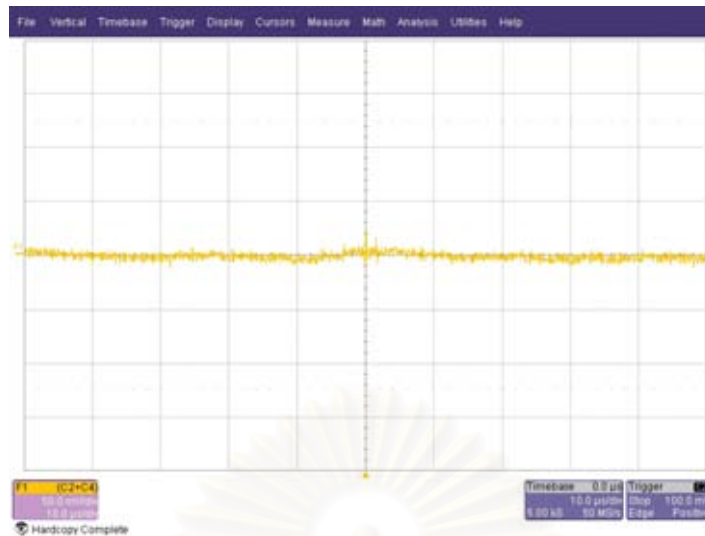
รูปที่ 4.17 : การสร้างดีสชาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านซ้าย)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 : สัญญาณดีสชาร์จที่วัดได้จากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1(เขียว) และ RC2(แดง)เมื่อสร้างดีสชาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านซ้าย)

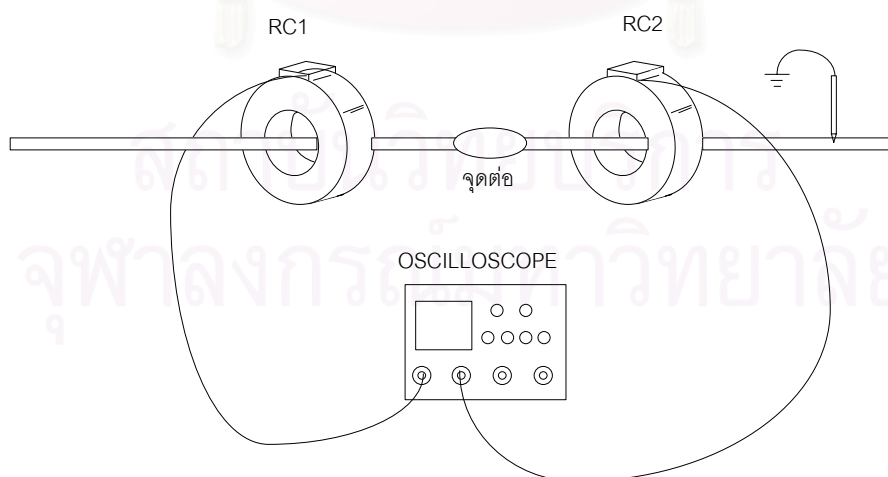
รูปที่ 4.18 แสดงสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน เมื่อสร้างดีสชาร์จบางส่วนนอกจุดต่อสายเคเบิลด้านซ้าย จะเห็นว่าสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่โรกอฟฟี่คอยล์จับได้จะมีช่วงตรงข้ามกัน และเมื่อใช้ Function Sum ใน oscilloscope รวมสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนจากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1 และ RC2 ดังรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าสัญญาณรวมสัญญาณดีสชาร์จจาก RC1 และ RC2 จะหักล้างกัน โดยธรรมชาติต้องหักล้างกันหมดพอดี แต่เนื่องด้วยโรกอฟฟี่ที่สร้างขึ้นทั้ง 2 ชุดนั้น มีคุณสมบัติทางกายภาพไม่เท่ากันทุกประการ จึงทำให้ขนาดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนของแต่ละโรกอฟฟี่คอยล์จะไม่เท่ากันพอดี พอเข้า Function Sum ใน oscilloscope จึงหักล้างกันไม่หมด



รูปที่ 4.19 : สัญญาณที่ได้จากการรวมสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1 และ RC2 เมื่อสร้างดิสชาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านซ้าย) (ใช้ Function Sum ใน Oscilloscope ในการรวมสัญญาณ)

4.1.5 การทดสอบและประเมินผลโรกอฟฟี่คอยล์ เมื่อเกิด PD ที่นอกจุดสายเคเบิล(ด้านขวา)

ในการทดสอบและประเมิน โดยสร้างดิสชาร์จบางส่วน นอกจุดต่อสายเคเบิล ดังรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าในการติดตั้งอุปกรณ์จะเหมือนกับ การสร้างจุดเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสายเคเบิล ด้านซ้าย แต่จะย้ายจุดเกิดดิสชาร์จบางส่วนไปที่ด้านขวานอกช่วงระหว่างโรกอฟฟี่คอยล์ทั้ง 2 ชุด แล้วป้อนแรงดันระบบ 4,090 V. บันทึกขนาดแรงดันดิสชาร์จบางส่วนที่โรกอฟฟี่คอยล์ ทั้ง 2 ชุด



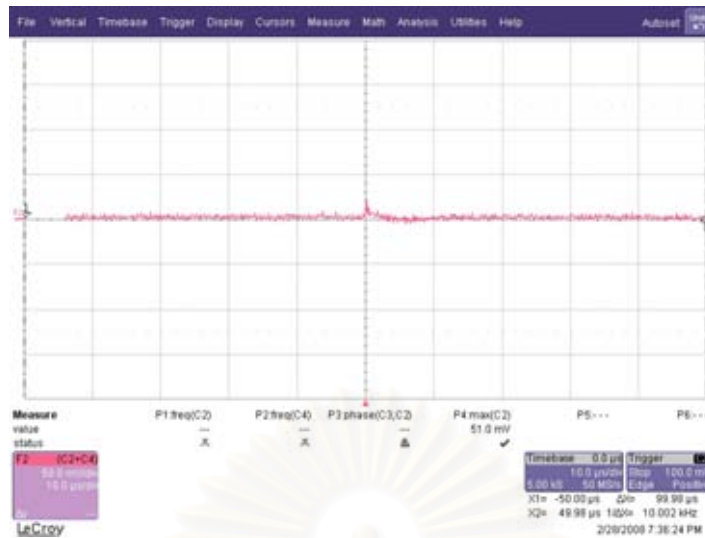
รูปที่ 4.20 : การสร้างดิสชาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านขวา)



รูปที่ 4.21 : สัญญาณดิสซาร์จที่วัดได้จากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1(เขียว) และ RC2(แดง)เมื่อสร้างดิสซาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านขวา)

รูปที่ 4.21 แสดงสัญญาณดิสซาร์จบางส่วน เมื่อสร้างดิสซาร์จบางส่วนนอกจุดต่อสายเคเบิลด้านขวา จะเห็นว่าสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่โรกอฟฟี่คอยล์จับได้จะมีช่วงตรงข้ามกัน และเมื่อใช้ Function Sum ใน oscilloscope รวมสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนจากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1 และ RC2 ดังรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าสัญญาณรวมสัญญาณดิสซาร์จจาก RC1 และ RC2 จะหักล้างกัน โดยธรรมชาติต้องหักล้างกันหมดพอดี แต่เนื่องด้วยโรกอฟฟี่ที่สร้างขึ้นทั้ง 2 ชุดนั้น มีคุณสมบัติทางกายภาพไม่เท่ากันทุกประการ จึงทำให้ขนาดสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนของแต่ละโรกอฟฟี่คอยล์จะไม่เท่ากันพอดี พอเข้า Function Sum ใน oscilloscope จึงหักล้างกันไม่หมด

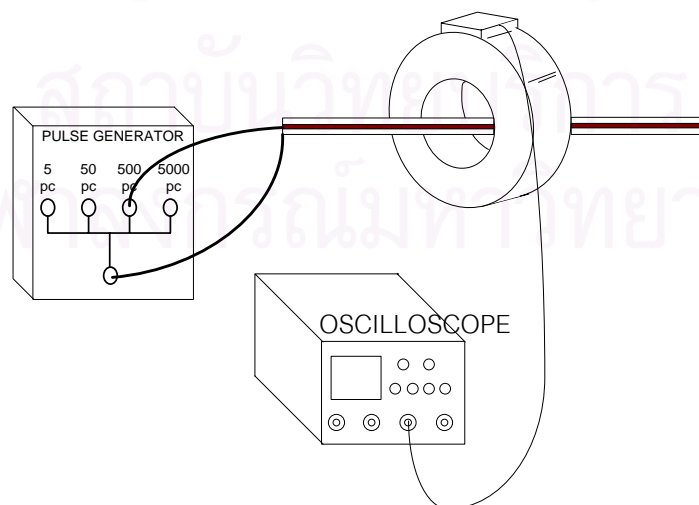
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.22 : รูปสัญญาณที่ได้จากการรวมสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากโรกอฟฟี่คอยล์ RC1 และ RC2 เมื่อสร้างดิสชาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสาย (ด้านขวา) (ใช้ Function Sum ใน Oscilloscope ในการรวมสัญญาณ)

4.1.6 การ calibrate rogowski coil

โดยตามมาตรฐานในการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะใช้หน่วยเป็น พิโคคูลอมป์ (pC) แต่ในการวัดที่ผ่านมาในการทดสอบจะวัดอยู่ในหน่วยของ mV จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนของโรกอฟฟี่คอยล์ในหน่วย pC เทียบกับ mV โดยต่อวงจร calibrate ดังรูปที่ 4.23 โดยการป้อน pulse ที่มีขนาด 5 pC , 50 pC , 500 pC , 5000 pC ตามลำดับ บันทึกรหัสแรงดันที่ออกจากโรกอฟฟี่คอยล์



รูปที่ 4.23 : วงจร calibrate โรกอฟฟี่คอยล์

จากการบันทึกค่าขนาดแรงดันโรกอพทีคอยล์ จะเห็นว่าแนวโน้มในเมื่อป้อนขนาดพัลส์มาตรฐานมากขึ้น ขนาดแรงดันที่โรกอพทีคอยล์ตรวจวัดได้ก็จะมากขึ้นเช่นกัน

สรุปจากการ calibrate โรกอพทีคอยล์ ในการทดสอบโรกอพทีคอยล์จะเห็นว่า ที่แรงดันโรกอพทีคอยล์ 30 mV คือ ขนาดพัลส์มาตรฐาน 300 pc

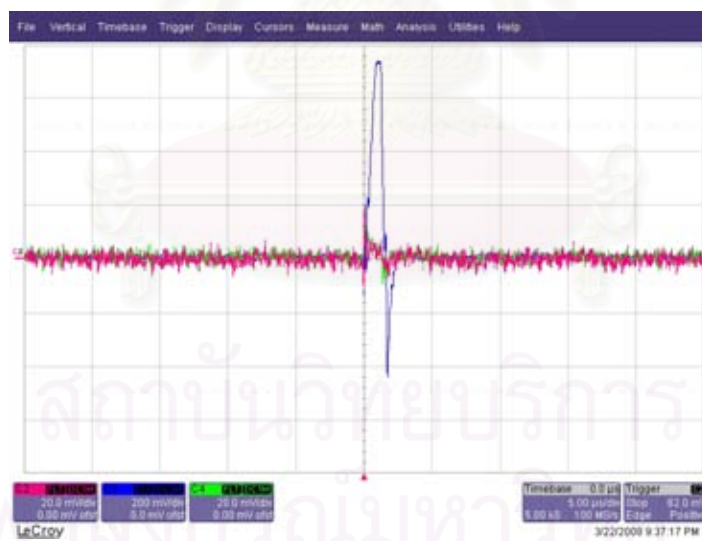
4.2 การทดสอบและประเมินผลส่วนประมวลผล

ในส่วนประมวลผลนี้ จะประกอบด้วยวงจรรวมสัญญาณ และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ซึ่ง จะทำการทดสอบและประเมินผลที่ละวงจร ดังต่อไปนี้

4.2.1 การทดสอบและประเมินผลสัญญาณดีสชาร์จ์เมื่อผ่านวงจรรวมสัญญาณ

เมื่อสัญญาณดีสชาร์จ์บางส่วนที่ได้จากโรกอพทีคอยล์ ผ่านวงจรintegrator แล้วนั้น สัญญาณที่ได้จะถูกส่งมายังวงจรรวมสัญญาณเพื่อดูผลจากวงจรรวมสัญญาณต่อไป

โดยสัญญาณดีสชาร์จ์บางส่วนที่ได้จากโรกอพทีคอยล์ เมื่อสร้างจุดเกิดดีสชาร์จ์บางส่วนที่จุดต่อสายเคเบิล ที่แรงดันระบบ 2,727 V. แล้วใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณ Output ของวงจรรวมสัญญาณแล้วดูผลการทดสอบบันทึกค่า

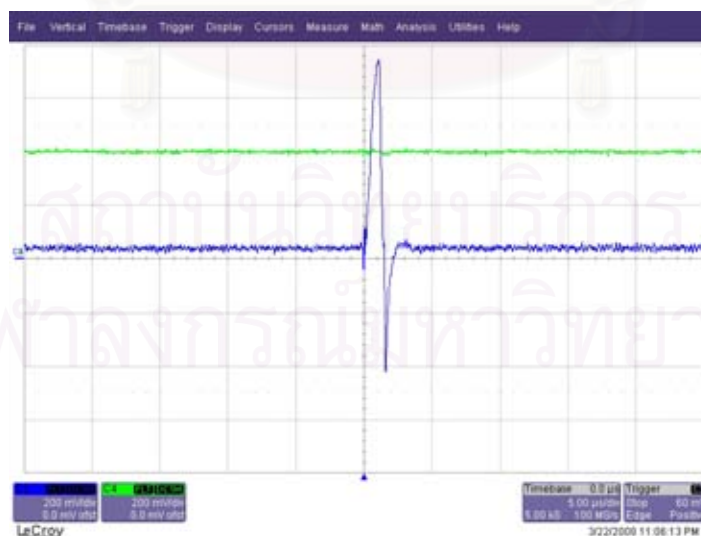


รูปที่ 4.24 : สัญญาณที่ได้จากวงจรรวมสัญญาณ (น้ำเงิน) และสัญญาณดีสชาร์จ์บางส่วนก่อนเข้าวงจรรวมสัญญาณ (เขียว,แดง)

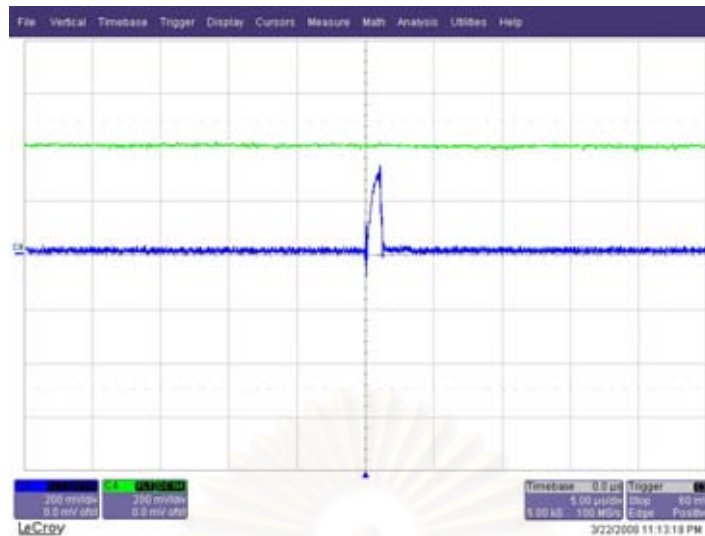
จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าสัญญาณ input 1 และ input 2 ของวงจรรวมสัญญาณ แต่ละสัญญาณ ประมาณ 15 mV และสัญญาณ output ของวงจรรวมสัญญาณ ประมาณ 720 mV ในการออกแบบวงจรรวมสัญญาณได้ปรับตั้งอัตราขยายสัญญาณ 60 เท่าด้วยเพื่อ่ง่ายในการตรวจจับสนวนเปรียบเทียบสัญญาณ ซึ่งจะได้ 1.6-1.7 เท่าของสัญญาณ input ของวงจรรวมสัญญาณ ซึ่งในอุดมคติแล้วสัญญาณรวมจะได้ 2 เท่าของสัญญาณ input ของวงจรรวมสัญญาณ แต่ในการรวมสัญญาณที่มีความถี่สูง และสัญญาณมีขนาดเล็กๆด้วย ประกอบกับอุปกรณ์ออปแอมป์ที่นำมาใช้ไม่มีความเป็นเชิงเส้น 100% จึงทำให้เมื่อทดสอบรวมสัญญาณจริงๆแล้วจะไม่ได้ตามอุดมคติ

4.2.2 การทดสอบและประเมินผลสัญญาณดีสชาร์จเมื่อผ่านวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

เมื่อสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนทั้ง 2 สัญญาณได้รวมกันที่วงจรรวมสัญญาณแล้ว สัญญาณที่ออกจากวงจรรวมสัญญาณจะถูกส่งมายังวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดยหลักการจะเปรียบเทียบจะใช้ขนาดแรงดัน 2 สัญญาณ โดยมีแรงดัน 1 สัญญาณเป็นแรงดันอ้างอิง ในระบบตรวจจับสนชาร์จบางส่วนที่ออกแบบขึ้นมา สามารถตรวจจับสนชาร์จดีสชาร์จบางส่วนที่โรกอฟก็ที่ขนาดแรงดันระบบ 2,727-6,818 V. เมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่จุดต่อ ที่แรงดันระบบ 2,727 V. ผ่านวงจรรวมสัญญาณและขยายสัญญาณแล้วจะได้สัญญาณประมาณ 720 mV ดังนั้นสัญญาณน้อยสุดที่ออกจากวงจรรวม ประมาณ 720 mV และเมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อ ที่แรงดันระบบ 6,818 V. และเมื่อผ่านวงจรรวมสัญญาณและขยายสัญญาณแล้วจะได้สัญญาณประมาณ 320 mV จึงเลือกปรับแรงดันอ้างอิง ที่ขนาดแรงดัน 400 mV ดังรูปที่ 4.25-4.26



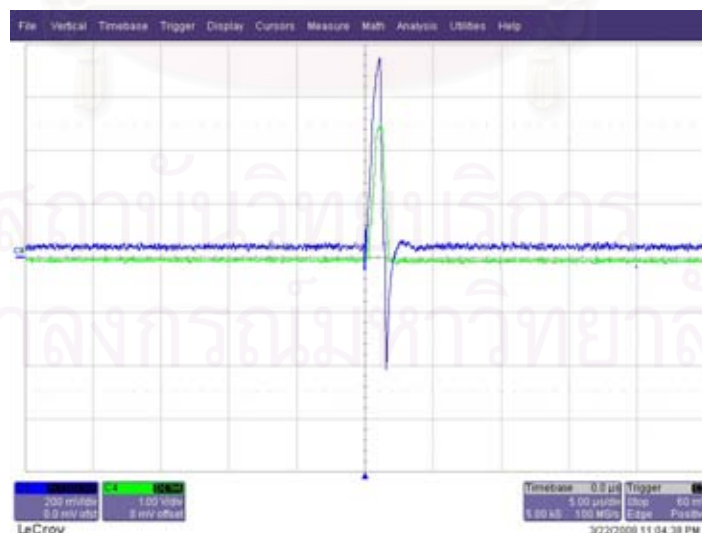
รูปที่ 4.25 : แรงดันสัญญาณ input วงจรเปรียบเทียบ(น้ำเงิน) และ แรงดันสัญญาณ input อ้างอิง (เขียว)เมื่อสร้างดีสชาร์จบางส่วนที่จุดต่อสาย ที่แรงดันระบบ 2,727 V.



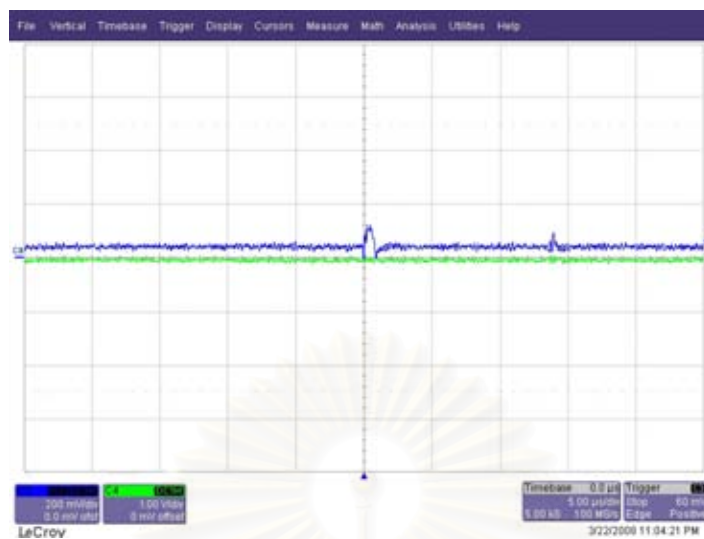
รูปที่ 4.26 : แรงดันสัญญาณ input วงจรเปรียบเทียบ(น้ำเงิน) และ แรงดันสัญญาณ input อ้างอิง (เขียว) เมื่อสร้างดีสชาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสายที่แรงดันระบบ 6,818 V.

จากรูปที่ 4.25 หมายความว่า เมื่อแรงดันสัญญาณ input ของวงจรเปรียบเทียบมากกว่า แรงดันอ้างอิง 400 mV ให้ output วงจรเปรียบเทียบทำงาน ดังรูปที่ 4.27 แสดงผลการตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนได้

ในทางกลับกัน ถ้าแรงดันสัญญาณ input ของวงจรเปรียบเทียบน้อยกว่า แรงดันอ้างอิง 400 mV ให้ output วงจรเปรียบเทียบไม่ทำงาน ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.27 : แรงดันสัญญาณ input วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (น้ำเงิน) และ output วงจรเปรียบเทียบสัญญาณทำงาน(เขียว)



รูปที่ 4.28 : แรงดันสัญญาณ input วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (น้ำเงิน) และ output วงจรเปรียบเทียบสัญญาณไม่ทำงาน(เขียว)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

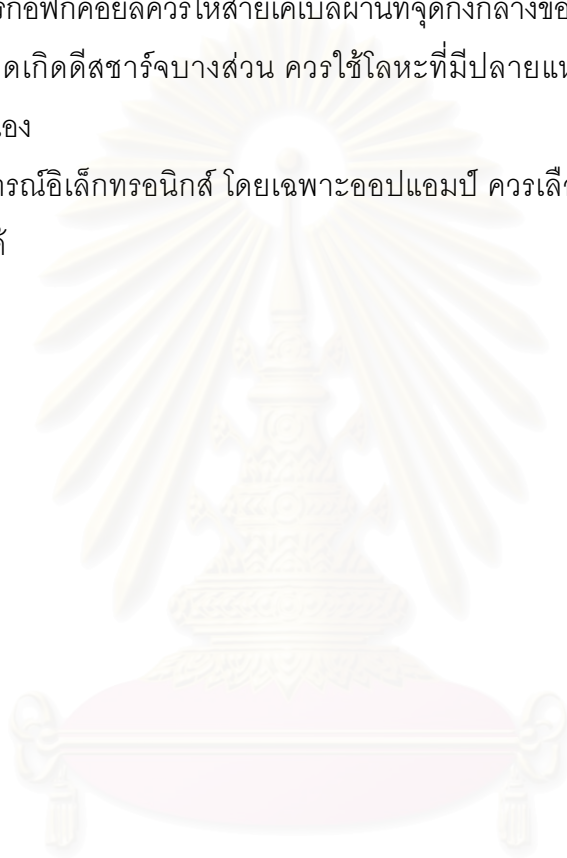
สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ การสร้างระบบตรวจหาดีเอสอาร์จบางส่วน ที่จุดต่อสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินขณะใช้งาน ซึ่งจากผลการทดสอบและประเมินผล ในบทที่ 4 สรุปได้ดังนี้

1. ระบบตรวจหาดีเอสอาร์จบางส่วนเมื่อป้อนแรงดันระบบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆนั้น จะพบว่าโรกอฟกี้คอยล์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น จะมีความไวเมื่อสัญญาณที่ตรวจจับได้มีขนาดแรงดันดีเอสอาร์จบางส่วน มีขนาดตั้งแต่ 30 mV หรือ 300 pC
2. ระบบตรวจหาดีเอสอาร์จบางส่วนที่ออกแบบขึ้นทดสอบและประเมินที่แรงดันระบบ 0-6,818 V.
3. ในการทดลองป้อนแรงดันระบบขึ้นเรื่อยๆ สัญญาณดีเอสอาร์จบางส่วนจะเพิ่มขึ้นตาม เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันระบบที่เพิ่มขึ้น
4. สัญญาณดีเอสอาร์จบางส่วนจะมีขนาดสูงสุด ที่ตำแหน่ง peak บวก และ peak ลบ ของแรงดันระบบ
5. ในการคล้องโรกอฟกี้คอยล์ทั้ง 2 ชุด ห่างจากจุดต่อที่เกิดดีเอสอาร์จบางส่วน ระยะเวลาใดๆจะไม่มีผลในการเรื่องของ Delay time ระหว่างโรกอฟกี้คอยล์ทั้ง 2 ชุด
6. ระบบจะตรวจหาดีเอสอาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น ที่แบนวิด $200\text{kHz} - 500\text{kHz}$
7. เมื่อเกิดดีเอสอาร์จบางส่วนที่จุดต่อสายเคเบิล ระบบจะสามารถประมวลผลรวมสัญญาณได้ 1.6-1.7 เท่า ของสัญญาณที่ได้จากโรกอฟกี้คอยล์แต่ละตัว
8. เมื่อเกิดดีเอสอาร์จบางส่วนที่นอกจุดต่อสายเคเบิล ระบบจะสามารถประมวลผลรวมสัญญาณ ได้ 0.1 เท่า ของสัญญาณที่ได้จากโรกอฟกี้คอยล์แต่ละตัว
9. ในการทดลองสามารถมั่นใจได้ว่าเกิดดีเอสอาร์จบางส่วนที่จุดที่ต้องการให้เกิดจริง และเกิดเพียงจุดเดียว

ข้อเสนอแนะ

1. ในการตรวจหาดีสซาร์จบางส่วนควรต้องมีการซีลด์ ป้องกันสัญญาณรบกวนด้วย เพราะสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนนั้นมีความถี่ค่อนข้างสูง
2. ในการพัฒนาการตรวจหาดีสซาร์จบางส่วน ควรคำนึงถึงเรื่องคลื่นจร ที่สามารถสะท้อนได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบตรวจหาดีสซาร์จบางส่วนที่โรกอฟกี้คอยล์ตรวจจับได้
3. ในการคล้องโรกอฟกี้คอยล์ควรให้สายเคเบิลผ่านที่จุดกึ่งกลางของโรกอฟกี้คอยล์
4. ในการสร้างจุดเกิดดีสซาร์จบางส่วน ควรใช้โลหะที่มีปลายแหลม เพื่อให้เกิดดีสซาร์จบางส่วนต่อเนื่อง
5. ในการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะออปแอมป์ ควรเลือกออปแอมป์ ที่สามารถปรับ offset ได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] สํารวย สังข์สะอาด . วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง . กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [2] พงศ์พันธ์ ปริญญา . การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ ขนาด 70 kA 30 kJ . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544
- [3] ณรงค์ ทองฉิม . เครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533
- [4] Egon F. Peschke and Rainer von Olshausen, Cable Systems for High and Extra High Voltage, Munich : Publicis MCD Werbeagentur GmbH ,1999
- [5] A. Kheirmand , M.Leijon and Chister Tornkvist . Detection and Localization of Partial Discharge in High Voltage Power Cable Joints . IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (June 1998) : 145-148
- [6] Ben Quak, Frank J. Wester, Edward Gulski and Johan J. Smit . Advance Partial Discharge Site Location in Power Cables using Numeric Data Processing . IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (June 2001) : 416-419
- [7] Kang-Won Lee, Jeong-Nam Park, Seong-Hwa Kang . Geometrical Effect in the Current Measurement by Rogowski Sensor . Engineering Science and Education Journal (June 1993) : 419-422
- [8] Chen Xiaolin, Cheng Yonghong, Rong Mingzhe, Zhang Shaofeng . Study on Wideband Sensor of Partial Discharge for XLPE Power Cable . International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (June 2003) : 203-206

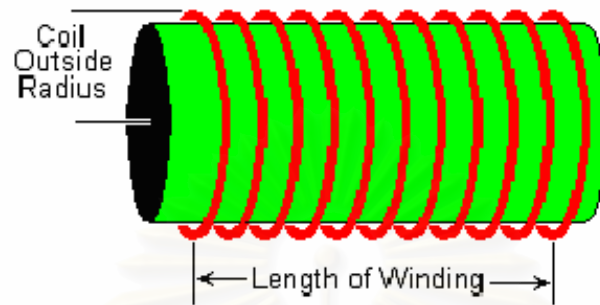


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

วิธีคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำ (INDUCTANCE, L)



รูปที่ ก.1 : ลักษณะทางกายภาพของตัวเหนี่ยวนำ

สูตรหาค่าความเหนี่ยวนำ (L)

$$L = \frac{N^2 A \mu}{l}$$

L = ค่าความเหนี่ยวนำ : H

A = พื้นที่ของแกนขดลวด : m^2

l = ความยาวของแกนขดลวด : m

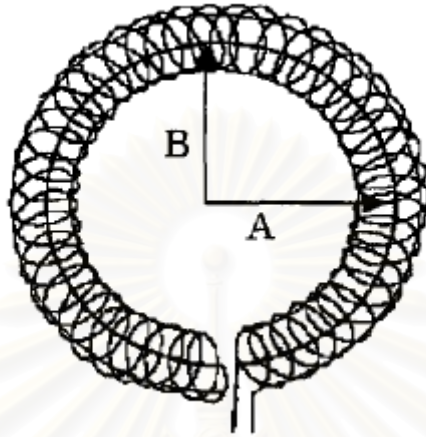
N = จำนวนรอบของขดลวด

μ = Permeability 1.26×10^{-6}

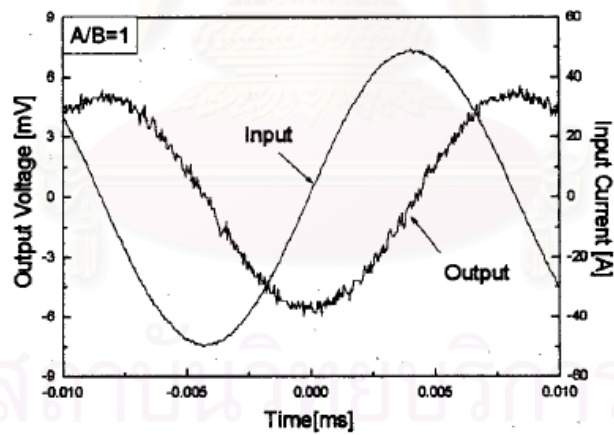
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

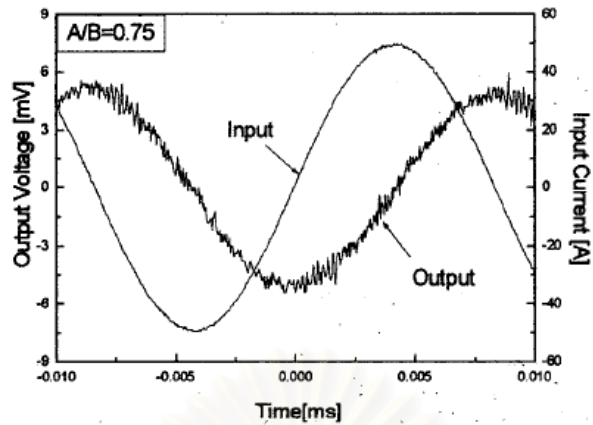
คุณสมบัติทางกายภาพของโรกอฟฟี่คอยล์



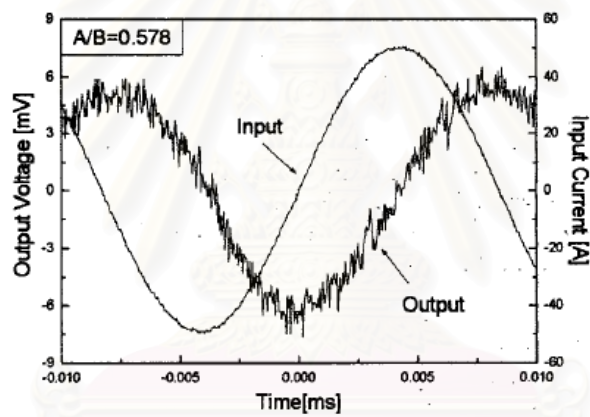
รูปที่ ข.1 : ลักษณะทางกายภาพของโรกอฟฟี่คอยล์ $major\ axis = B$, $minor\ axis = A$



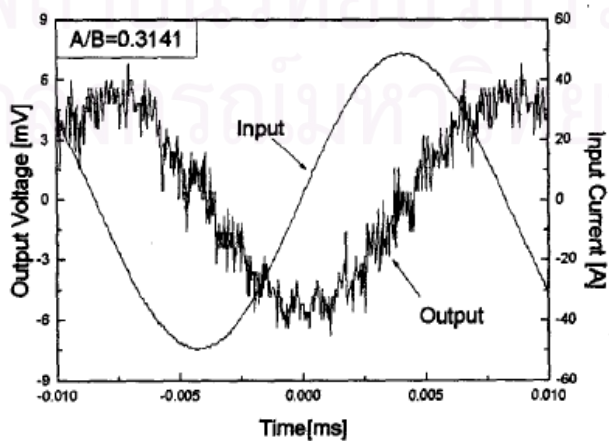
รูปที่ ข.2 : ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ output ของโรกอฟฟี่คอยล์ เมื่อ $A/B=1$



รูปที่ ข.3 : ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ output ของโรกอฟฟี่คอยล์ เมื่อ $A/B=0.75$



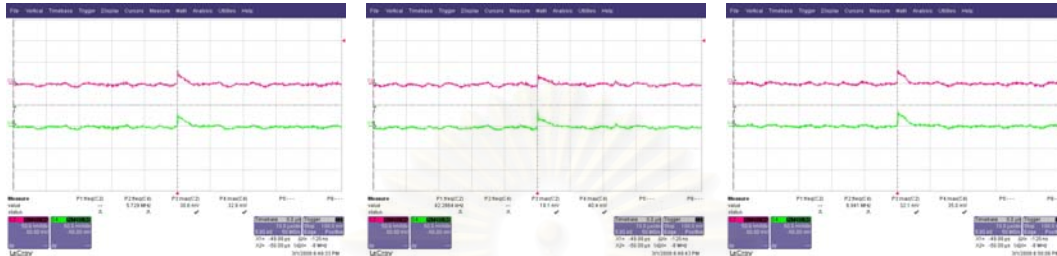
รูปที่ ข.4 : ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ output ของโรกอฟฟี่คอยล์ เมื่อ $A/B=0.578$



รูปที่ ข.5 : ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ output ของโรกอฟฟี่คอยล์ เมื่อ $A/B=0.3141$

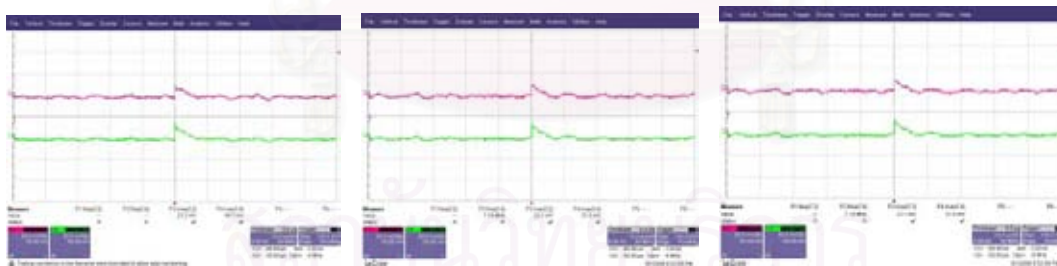
ภาคผนวก ค

ข้อมูลที่ได้จากการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน ที่แรงดันในระบบใดๆ



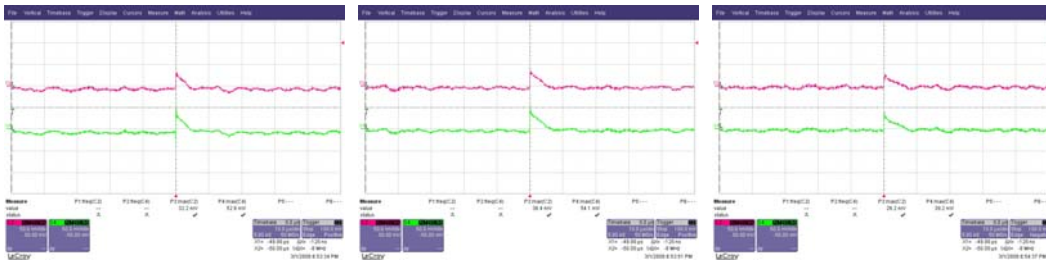
รูปที่ ค.1 : สัญญาณดิสชาร์จที่โรกอฟกี้คอยล์ ที่แรงดันที่ Variac 80 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 2,727 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)

โรกอฟกี้คอยล์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
RC1 (mV)	32.8	28.7	34	31.8
RC2 (mV)	30.6	25.7	31.4	29.5



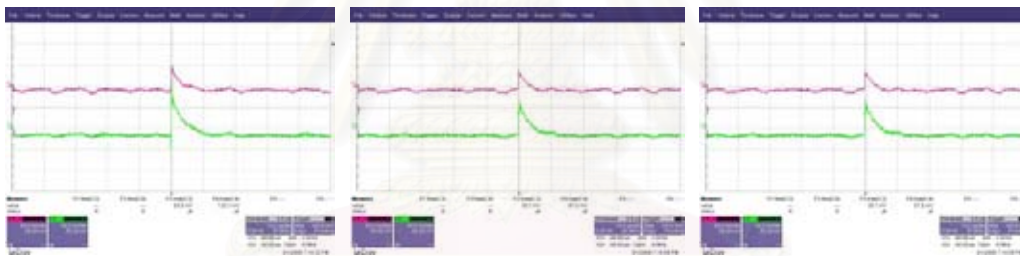
รูปที่ ค.2 : สัญญาณดิสชาร์จที่โรกอฟกี้คอยล์ ที่แรงดันที่ Variac 100 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 3,409 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)

โรกอฟกี้คอยล์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
RC1 (mV)	31	35.4	39.6	35.5
RC2 (mV)	22.1	32.4	35.6	33.3



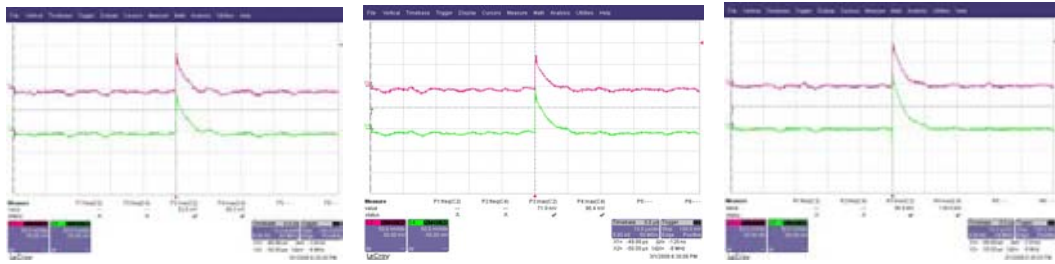
รูปที่ ค.3 : สัญญาณดีสชาร์จที่โรกอฟกัคอยล์ ที่แรงดันที่ Variac 120 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 4,090 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)

โรกอฟกัคอยล์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
RC1 (mV)	42.4	44.5	38.1	41.7
RC2 (mV)	39.4	41.2	35.1	38.6



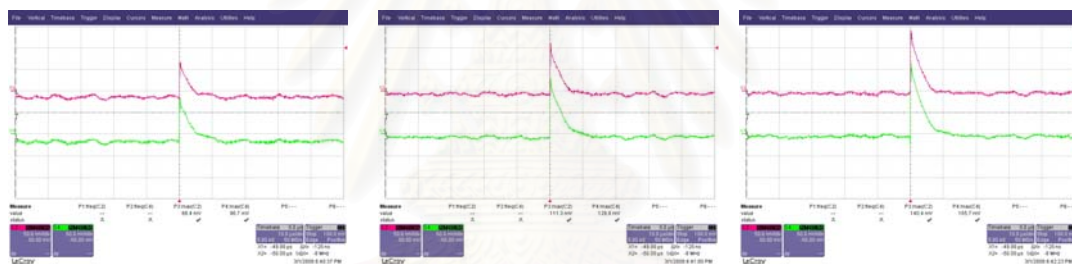
รูปที่ ค.4 : สัญญาณดีสชาร์จที่โรกอฟกัคอยล์ ที่แรงดันที่ Variac 140 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 4,772 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)

โรกอฟกัคอยล์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
RC1 (mV)	49.7	56.3	65.9	57.3
RC2 (mV)	47.1	50.7	59.6	52.5



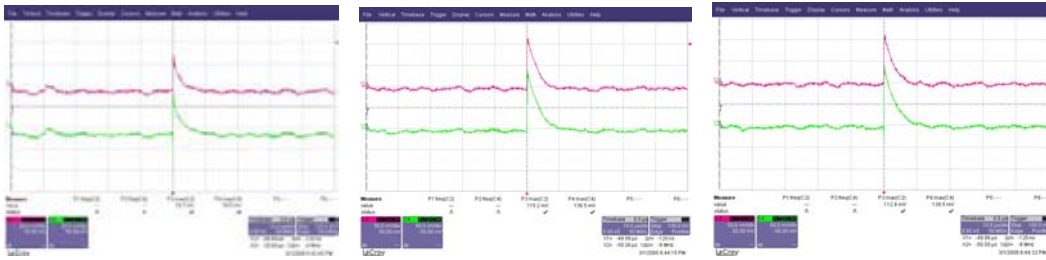
รูปที่ ค.5 : สัญญาณดิสชาร์จที่โรกอฟกัคอยล์ ที่แรงดันที่ Variac 160 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 5,454 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)

โรกอฟกัคอยล์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
RC1 (mV)	72.6	72.3	70.5	71.8
RC2 (mV)	70.9	65.6	64.7	67.1



รูปที่ ค.6 : สัญญาณดิสชาร์จที่โรกอฟกัคอยล์ ที่แรงดันที่ Variac 180 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 6,136 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)

โรกอฟกัคอยล์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
RC1 (mV)	96.7	118.8	120.9	112.1
RC2 (mV)	82.6	106.3	108.4	99.1



รูปที่ ค.7 : สัญญาณดีสชาร์จที่โรกอฟกีคอยล์ ที่แรงดันที่ Variac 200 V หรือ แรงดันออกจากหม้อแปลง 6,818 V (RC1=เขียว,RC2=แดง)

โรกอฟกีคอยล์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
RC1 (mV)	124.5	126.5	139.5	130.2
RC2 (mV)	121.7	122.5	132.9	125.7

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุกิตต์ ชะวาใต้ เกิดเมื่อวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2520 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ในปี การศึกษา 2542 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า กำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา ภาคต้น 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย