

การศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน
สำหรับในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

FEASIBLE STUDIES OF PARTIAL DISCHARGE DETECTION
FOR A THREE-PHASE SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-020-088

การศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน
สำหรับในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

FEASIBLE STUDIES OF PARTIAL DISCHARGE DETECTION
FOR A THREE-PHASE SYSTEM



ณัฐพล มฤคพิต
NATTAPON MARUKATAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-020-088

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FEASIBLE STUDIES OF PARTIAL DISCHARGE DETECTION
FOR A THREE-PHASE SYSTEM



NATTAPON MARUKATAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-M-020-088

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจจัดการเกิด การดิสชาร์จบางส่วนสำหรับในระบบไฟฟ้า 3 เฟส
นักศึกษา	นายณัฐพล มฤคทัต
รหัสประจำตัว	59601159
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการการศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจจัดการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนสำหรับในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60270:2015 โดยการพัฒนาจากระบบตรวจจัดการเกิดการดิสชาร์จแบบหนึ่งเฟส ซึ่งมีจุดประสงค์ในการพัฒนาศักยภาพการวิจัยและการทดสอบในด้านที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจัดการดิสชาร์จบางส่วนของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. ให้ครอบคลุมการทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงแบบสามเฟส จากแต่เดิมจะสามารถทำการทดลองได้ทีละเฟสเท่านั้น

โดยภายในระบบตรวจจัดการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟสที่พัฒนาขึ้นนั้นจะประกอบไปด้วย 1. ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว 2. อุปกรณ์คาบเกี่ยว และ 3. เครื่องมือการวัดและแสดงผลการตรวจจัดการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟส ในส่วนของชุดคาบเกี่ยวซึ่งเกิดจากการรวมกันของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์คาบเกี่ยวนั้นจะมีพิกัดแรงดันต่อเฟสเท่ากับ $50 \text{ kV}_{\text{rms}}$ และค่าความเก็บประจุต่อเฟสของ (C_k) เท่ากับ 1 nF รวมทั้งมีอัตราการลดทอนแรงดันต่อเฟสโดยประมาณเท่ากับ $1:44,000$ และต่อมาในส่วนของเครื่องมือการวัดและแสดงผลการตรวจจัดการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนนั้นจะประกอบไปด้วย 1. ตัวรับและแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล 2. โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวัดและแสดงผล

และเมื่อทำการประกอบสร้างเสร็จสิ้นแล้วนั้นระบบตรวจจัดการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนที่พัฒนาขึ้นนั้นก็จะถูกนำไปทดสอบเพื่อยืนยันประสิทธิภาพในการตรวจจัดการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนของวัสดุทดสอบแบบสามเฟส

Thesis	FEASIBLE STUDIES OF PARTIAL DISCHARGE DETECTION FOR A THREE-PHASE SYSTEM
Student	Mr.Nattapon Marukatat
Student ID.	59601159
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Dr. Anantawat Kunakorn
Thesis Co-Advisor	Asst. Dr. Peerawut Yutthagowith

ABSTRACT

This thesis presents a feasible studies of partial discharge detection for a three-phase system according to IEC 60270:2015 standard by further improvement from a single phase partial discharge system. The purpose of this research is develops potential capability of research and testing which is related to partial discharge detection in a high voltage laboratory.

The three phase partial discharge detection system consists of 1. The coupling capacitor 2. Coupling device and 3. Three phase partial discharge detection and display device. The coupling units which cause by the connection of coupling capacitor and coupling device have rated voltage per phase is $50 \text{ kV}_{\text{rms}}$ and a capacitance of coupling capacitor is 1 nF and have approximately divided ratio 1:44,000. In the Three phase partial discharge detection and display device consists of 1. Analogue to digital and signal receiver and 2. Measurement and display program

When the construction is completed, the developed three phase partial discharge detection system is tested to validate the efficiency in the partial discharge detection.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองเป็นอย่างยิ่ง ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และมอบความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดการศึกษาในระดับปริญญาโทเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณปณณวีร์ ฉายศิริ คุณบุษยพล เพาพาน คุณบัญญัติ ลีลาจรรย์กุล และสมาชิกห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำในการใช้งานเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำหรือข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยของข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวถึงที่ให้การสนับสนุนในด้านการศึกษามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ณัฐพล มฤคทัต

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการทำวิจัย.....	2
1.7 ทบทวนวรรณกรรม.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การดิสซาร์จบางส่วน.....	4
2.2 วงจรสมมูลของการดิสซาร์จบางส่วน.....	7
2.2.1 ธรรมชาติของการเกิดการดิสซาร์จบางส่วน.....	9
2.2.2 ประจุที่ปรากฏและวัดได้.....	10
2.3 วงจรการตรวจจับการดิสซาร์จบางส่วน.....	12
2.3.1 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว.....	13
2.3.2 อุปกรณ์คาบเกี่ยว.....	15
2.4 การประมวลผลสัญญาณอะนาล็อก.....	15
2.4.1 การทำงานเบื้องต้น.....	15
2.4.2 ผลการตอบสนองของพัลส์การดิสซาร์จบางส่วน.....	16
2.5 การเปรียบเทียบวงจรการดิสซาร์จบางส่วน.....	17
2.6 โปรแกรม LabVIEW.....	19
2.6.1 Dataflow.....	19
2.6.2 ส่วนประกอบต่างๆ ภายใน LabVIEW.....	20
2.6.3 ประเภทของข้อมูล.....	24
2.6.4 หลักการทำงานของ Dataflow Programming.....	25
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง.....	26
3.1 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว.....	26
3.1.1 การออกแบบโครงสร้างของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 การประกอบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว.....	29
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างอุปกรณ์คาบเกี่ยว.....	31
3.2.1 การออกแบบวงจรของอุปกรณ์คาบเกี่ยว.....	31
3.2.2. การประกอบสร้างอุปกรณ์คาบเกี่ยว.....	34
3.3 โปรแกรมแสดงผลการดิสชาร์จบางส่วน.....	34
3.3.1 การทำงานเบื้องต้นของโปรแกรม.....	37
3.3.2 การแก้ปัญหาที่เกิดจากการเปลี่ยนช่วงแรงดัน.....	37
3.3.3 การกรองสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวกรองความถี่แบบดิจิทัล.....	38
3.3.4 การปรับเทียบประจุ.....	39
3.3.5 การอ้างอิงแกนเวลาและการแสดงผล.....	41
3.3.6 การวัดและแสดงผลสัญญาณแรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ.....	43
บทที่ 4 การทดสอบ.....	45
4.1 การทดสอบตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่แรงดันพิกัด.....	45
4.2 การปรับเทียบแรงดันด้วยอุปกรณ์วัดแรงดันสูง (Voltage Divider).....	48
4.3 การปรับเทียบประจุด้วยเครื่องปรับเทียบมาตรฐาน (Pulse Calibrator).....	51
4.4 การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวัสดุทดสอบ จำลองการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน.....	54
4.5 การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบแบบสามเฟส.....	60
4.6 การทดสอบกับแหล่งจ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ 200 Hz.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	64
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก PicoScope 5000 A and B User's Guide.....	69
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	96

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ค่าขององค์ประกอบทางไฟฟ้าภายในวงจรจำลองการทำงาน ของอุปกรณ์คาบเกี่ยว.....	32
ตารางที่ 4.1 การหาค่าเฉลี่ยอัตราการลดทอนแรงดันของแต่ละเฟส.....	51
ตารางที่ 5.1 อัตราการลดทอนแรงดันของแต่ละเฟส.....	64



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ประเภทของการดิสชาร์จบางส่วน.....	5
รูปที่ 2.2 การเกิดการดิสชาร์จภายใน.....	5
รูปที่ 2.3 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จ.....	6
รูปที่ 2.4 การเกิดการดิสชาร์จตามผิว.....	7
รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงแก๊สและเกิดการดิสชาร์จบางส่วนภายใน.....	8
รูปที่ 2.6 แรงดันตกคร่อมโพรงแก๊สและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิดการดิสชาร์จ บางส่วน.....	10
รูปที่ 2.7 การดิสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน.....	10
รูปที่ 2.8 ผลของค่าตัวเก็บประจุ C_k ต่อความไวการวัด q_m/q ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_k/C_t	12
รูปที่ 2.9 วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนวิธีตรง.....	13
รูปที่ 2.10 การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม.....	14
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการติดตั้งและวงจรมูลของอุปกรณ์คาบเกี่ยว.....	15
รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องมือวัดการดิสชาร์จบางส่วนแบบอะนาล็อก.....	16
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดและความถี่ของพัลส์การดิสชาร์จบางส่วน ในระบบวัดแบบไวต์แบนด์.....	16
รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบวงจรการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน.....	17
รูปที่ 2.15 รูปคลื่นแรงดัน U_0 ที่ใช้ในการสร้างเครื่องเปรียบเทียบมาตรฐาน.....	18
รูปที่ 2.16 หน้า Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW.....	19
รูปที่ 2.17 หน้า Block Diagram ของโปรแกรม LabVIEW.....	20
รูปที่ 2.18 Block Diagram เครื่องมือวัดที่สร้างจาก LabVIEW.....	20
รูปที่ 2.19 Object ต่างๆที่อยู่บนหน้า Front Panel ของ LabVIEW.....	21
รูปที่ 2.20 Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel.....	22
รูปที่ 2.21 Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel.....	22
รูปที่ 2.22 ตัวอย่าง Block Diagram ที่ไม่เกิดข้อผิดพลาด พร้อมรันโปรแกรม.....	23
รูปที่ 2.23 ตัวอย่าง Block Diagram Node.....	23
รูปที่ 2.24 Functions Palette ของหน้า Block diagram.....	24
รูปที่ 3.1 การต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 10 ตัว เป็นตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว.....	26
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการออกแบบ.....	27
รูปที่ 3.3 แบบจำลองสามมิติของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการออกแบบ.....	27
รูปที่ 3.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว.....	28
รูปที่ 3.5 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ปรากฏบนตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการออกแบบ.....	28
รูปที่ 3.6 การติดตั้งตัวเก็บประจุจำนวน 10 ตัว บนแกนยึดตรึงอะครีลิก.....	29
รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการประกอบสร้างเสร็จสิ้น.....	30
รูปที่ 3.8 ค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวแต่ละตัว.....	30
รูปที่ 3.9 วงจรจำลองการทำงานของวงจรรูปกรณ์คาบเกี่ยวด้วยโปรแกรมเพื่อพิจารณา ผลตอบสนองทางความถี่ในส่วนของการตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วน.....	31

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.10 วงจรจำลองการทำงานของวงจรอุปกรณ์คาบเกี่ยวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ในส่วนของการวัดสัญญาณแรงดันทดสอบ.....	32
รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของจุดวัดสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วน.....	33
รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของจุดวัดสัญญาณแรงดันทดสอบ.....	33
รูปที่ 3.13 อุปกรณ์คาบเกี่ยวที่ทำการประกอบสร้างขึ้น.....	34
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์คาบเกี่ยวที่ทำการประกอบสร้างเสร็จสิ้นจำนวน 3 ตัว.....	34
รูปที่ 3.15 เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า Picoscope รุ่น 5444B แบบ 4 ช่องวัด.....	35
รูปที่ 3.16 วงจรการตรวจวัดและแสดงผลการดิสซาร์จบางส่วนแบบสามเฟส ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผ่านเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า.....	35
รูปที่ 3.17 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของ การทดสอบการดิสซาร์จบางส่วน.....	36
รูปที่ 3.18 Block Diagram ช่วงการทำงานเบื้องต้นของโปรแกรม.....	37
รูปที่ 3.19 การกำหนดเคสของแต่ละช่วงการวัด.....	38
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างตัวกระทำทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้หาค่าแก้ของแต่ละช่วงการวัด.....	38
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างโมดูลตัวกรองความถี่ (Butterworth Filter).....	39
รูปที่ 3.22 การใช้งานตัวกรองความถี่ดิจิทัลชนิด Band Pass กับช่องวัด A.....	39
รูปที่ 3.23 Block Diagram ในสถานะที่ยังไม่ได้ปรับเทียบ (สถานะ False) ซึ่งใช้ในการเก็บค่า Scale Factor ของช่องวัด A.....	40
รูปที่ 3.24 Block Diagram ในสถานะที่ปรับเทียบแล้ว (สถานะ True).....	40
รูปที่ 3.25 Front Panel ในสถานะที่ยังไม่ได้ปรับเทียบ.....	40
รูปที่ 3.26 Front Panel ในสถานะปรับเทียบแล้ว.....	41
รูปที่ 3.27 Block Diagram ในการเปลี่ยนแกน X จากรูปแบบ samples ให้อยู่ในรูปแบบเวลา.....	41
รูปที่ 3.28 Front Panel ของหน้าจอแสดงรูปคลื่นช่องวัด A ที่มีแกน X เป็นจำนวนการ samples.....	42
รูปที่ 3.29 Front Panel ของหน้าจอแสดงรูปคลื่นช่องวัด A ที่มีแกน X เป็นระบบเวลา.....	42
รูปที่ 3.30 Block Diagram ในการวัดและแสดงผลสัญญาณแรงดันทดสอบ ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	43
รูปที่ 3.31 Front Panel ของหน้าจอแสดงรูปคลื่นแรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ.....	44
รูปที่ 3.32 ตัวอย่างหน้า Front Panel ของโปรแกรมที่ทำการออกแบบเสร็จสิ้น.....	44
รูปที่ 4.1 วงจรจำลองการทดสอบตัวเก็บประจุที่แรงดันพิกัด.....	46
รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบตัวเก็บประจุที่แรงดันพิกัด.....	46
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดการดิสซาร์จบางส่วนของตัวเก็บประจุเฟส A ที่แรงดันพิกัด 50 kVrms.....	47
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดการดิสซาร์จบางส่วนของตัวเก็บประจุเฟส B ที่แรงดันพิกัด 50 kVrms.....	47

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนของตัวเก็บประจุเฟส C ที่แรงดันพิกัด 50 kVrms.....	47
รูปที่ 4.6 โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่นำมาเปรียบเทียบแรงดัน.....	48
รูปที่ 4.7 วงจรจำลองการทดสอบเปรียบเทียบแรงดัน.....	49
รูปที่ 4.8 วงจรการทดสอบเปรียบเทียบแรงดัน.....	49
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นขณะทำการเปรียบเทียบแรงดันของตัวเก็บประจุและอุปกรณ์คาบเกี่ยวเฟส A.....	50
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นขณะทำการเปรียบเทียบแรงดันของตัวเก็บประจุและอุปกรณ์คาบเกี่ยวเฟส B.....	50
รูปที่ 4.11 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นขณะทำการเปรียบเทียบแรงดันของตัวเก็บประจุและอุปกรณ์คาบเกี่ยวเฟส C.....	51
รูปที่ 4.12 เครื่องปรับเทียบมาตรฐานหรือ Pulse Calibrator ที่ใช้ในการปรับเทียบประจุ... ..	52
รูปที่ 4.13 วงจรจำลองการทดสอบเปรียบเทียบประจุที่เฟส A ในกรณีไม่มีวัสดุทดสอบ.....	52
รูปที่ 4.14 วงจรการทดสอบเปรียบเทียบประจุที่เฟส A ในกรณีไม่มีวัสดุทดสอบ.....	53
รูปที่ 4.15 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมในขณะการปรับเทียบประจุ.....	54
รูปที่ 4.16 วัสดุทดสอบสำหรับจำลองการเกิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงสูง.....	55
รูปที่ 4.17 วัสดุทดสอบสำหรับจำลองการเกิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงต่ำ.....	55
รูปที่ 4.18 วัสดุทดสอบสำหรับจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิว.....	55
รูปที่ 4.19 วัสดุทดสอบสำหรับจำลองการเกิดดิสชาร์จบางภายในเนื้อฉนวน.....	56
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างวงจรจำลองการทดสอบด้วยวัสดุทดสอบจำลองการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนชนิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงสูงที่เฟส A.....	56
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างวงจรการทดสอบด้วยวัสดุทดสอบจำลองการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนชนิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงสูงที่เฟส A.....	57
รูปที่ 4.22 การตรวจสอบระดับของสัญญาณรบกวนก่อนทำการทดสอบ.....	57
รูปที่ 4.23 ผลการเกิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงสูงเมื่อติดตั้งวัสดุทดสอบจำลองที่เฟส A.....	58
รูปที่ 4.24 ผลการเกิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงต่ำเมื่อติดตั้งวัสดุทดสอบจำลองที่เฟส A.....	58
รูปที่ 4.25 ผลการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวเมื่อติดตั้งวัสดุทดสอบจำลองที่เฟส A.....	59
รูปที่ 4.26 ผลการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวนเมื่อติดตั้งวัสดุทดสอบจำลองที่เฟส A.....	59
รูปที่ 4.27 วงจรจำลองการทดสอบการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบแบบสามเฟส.....	60
รูปที่ 4.28 วงจรการทดสอบการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบแบบสามเฟส	61
รูปที่ 4.29 ผลการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงทดสอบแบบสามเฟส.....	61
รูปที่ 4.30 วงจรจำลองการทดสอบกับแหล่งจ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ 200 Hz.....	62
รูปที่ 4.31 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 Hz ที่วัดได้.....	62
รูปที่ 4.32 สัญญาณรบกวนจากคอนเวอร์เตอร์ที่ตรวจวัดได้.....	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญปัญหา

ระบบฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นนับเป็นส่วนสำคัญในด้านเสถียรภาพและความมั่นคงของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพราะถ้าหากฉนวนนั้นเกิดความบกพร่องขึ้นไม่ว่าอันเนื่องมาจากระบบการผลิตที่ไม่ได้คุณภาพ หรือสภาพการติดตั้งที่ไม่ได้มาตรฐาน หรือสภาพแวดล้อมที่เลวร้ายในบริเวณที่ติดตั้ง อาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวน ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge : PD) ขึ้น และหากปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลาชานาน ขาดการตรวจสอบ หรือไม่ทำการซ่อมแซม เปลี่ยนใหม่ จะนำไปสู่การเกิดข้อผิดพลาด(Fault) ขึ้น เช่นการเบรกดาวนแบบสมบูรณ์ หรือสายส่งขาดอันเนื่องมาจากความร้อนขณะเกิดการเบรกดาวน จนนำไปสู่การเกิดความเสียหายอย่างมากแก่อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งนั่นหมายถึงไม่สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้และก่อให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจอย่างมากตามมา

ดังนั้นแล้วอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงจึงจำเป็นต้องผ่านการตรวจสอบการดิสชาร์จบางส่วนเพื่อเป็นการประเมินสภาพของฉนวนทั้งก่อนการนำไปใช้งาน หรือในระหว่างการใช้งานว่าค่าของการดิสชาร์จบางส่วนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ ในปัจจุบันการตรวจจัดการดิสชาร์จบางส่วนจะต้องอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างละเอียดอ่อนและซับซ้อน จึงจำเป็นต้องทำการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการที่มีความพร้อมทั้งด้านการป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก และอุปกรณ์ตรวจจัดการดิสชาร์จบางส่วนที่แม่นยำ โดยในส่วนของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. นั้นก็มีความพร้อมที่จะทำการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนได้ ด้วยโครงสร้างของห้องปฏิบัติการที่มีติดตั้งกรงเหล็กที่จะป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ รวมทั้งมีเครื่องมือตรวจจัดการดิสชาร์จบางส่วนที่แม่นยำและเป็นที่ยอมรับในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งมีราคาสูง ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ แต่ทำการตรวจจัดการดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้เพียงหนึ่งเฟสเท่านั้น

ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงนำเสนอการศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจจัดการการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60270:2015 ขึ้น เพื่อให้สามารถทำการตรวจจัดการดิสชาร์จบางส่วนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นชนิดสามเฟสได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ รวมทั้งเป็นการลดการพึ่งพาเทคโนโลยีและการนำเข้าจากต่างประเทศอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษามาตรฐาน งานวิจัย ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน
2. เพื่อสร้างโปรแกรมการวัดและวิเคราะห์การดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับฯ
3. เพื่อสร้างอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟสตามมาตรฐาน IEC 60270:2015

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การออกแบบและประกอบสร้างระบบตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟส จะสามารถนำไปทดสอบกับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นแบบสามเฟสได้ ซึ่งจากแต่เดิมนั้นจะทำการทดลองได้ที่ละหนึ่งเฟสเท่านั้น ทำให้ผลการทดลองที่นำมาวิเคราะห์การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนนั้นจะมีความแม่นยำ และถูกต้องมากขึ้นกว่าเดิม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสในวิทยานิพนธ์เล่มนี้นั้น จะเป็นการพัฒนาระบบตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟสขึ้นมาจากระบบตรวจจับแบบหนึ่งเฟส โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งสามารถทำการทดสอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าสามเฟสได้ โดยการสร้างอุปกรณ์การวัดแบบหนึ่งเฟสขึ้นมาจำนวน 3 ชุดแล้วทำการวัดและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้น

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส โดยการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดที่เหมือนกันทุกประการ จำนวน 3 ชุด มาประกอบเป็นระบบวัดฯ สามเฟส และทำการแสดงผลและวิเคราะห์ผลผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

1.6 ขั้นตอนการทำวิจัย

1. ศึกษามาตรฐานและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานและหลักการเกี่ยวกับการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน
3. ศึกษาทฤษฎีของวงจรกรองความถี่ (Filter) แบบต่างๆ
4. ศึกษาการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์การดิสชาร์จบางส่วน
5. ออกแบบและประกอบสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบตรวจจับการดิสชาร์จแบบสามเฟส
6. ออกแบบและสร้างโปรแกรมการวัดและวิเคราะห์การดิสชาร์จบางส่วน
7. ทำการทดสอบระบบตรวจจับฯ ที่ได้พัฒนาขึ้น พร้อมกับติดตั้งวัสดุทดสอบ
8. วิเคราะห์และสรุปผล
9. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ได้แก่

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาของปัญหาและความสำคัญ จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐาน แนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการทำวิจัย และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งประกอบด้วย ความหมายของการดิสชาร์จบางส่วน รูปแบบการเกิด วงจรสมมูลของการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน วงจรการตรวจวัดแบบต่างๆ การเปรียบเทียบระบบตรวจจับฯ การประมวลผลสัญญาณ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโปรแกรมที่ต้องการสร้างขึ้น

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุคัปปลิ่ง อุปกรณ์คัปปลิ่ง โปรแกรมการวัดและวิเคราะห์และวงจรการทดสอบ

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบความคงทนของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่พัฒนาขึ้น การทดสอบตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบไม่มีวัสดุทดสอบ แบบมีวัสดุทดสอบจำลอง การตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนจากวัสดุทดสอบจริง และการทดสอบกับแหล่งจ่ายคอนเวอร์เตอร์ 200 Hz

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบที่ได้ทดสอบมาทั้งหมด

1.7 ทบทวนวรรณกรรม

ในปี ค.ศ. 1968 ได้มีนำเสนอวงจรการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบ 1 เฟสด้วยวิธีตรง โดย DIETER KIND และคณะ จากบทความ AC Breakdown of Epoxy Resins by Partial Discharges in Voids ซึ่งคล้ายกับวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC60270 ที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้ แต่ภายในวงจรการทดสอบนั้นจะมีเพียง measuring impedance (Z_m) ต่ออนุกรมกับวัสดุทดสอบเท่านั้น โดยไม่มีตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวประกอบอยู่ในวงจร

ในปี ค.ศ. 1987 ได้มีนำเสนอวงจรการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟส โดย G. Mole จากบทความ Three-phase coupling unit for partial discharge tests on cables ซึ่งได้มีการนำเสนอชุดต่อคาบเกี่ยวแบบสามเฟส และทำการแสดงผลด้วยเครื่องแสดงผลแบบอะนาล็อก แต่วิธีการตรวจจับนั้นไม่ใช่วิธีตรงแต่เป็นวิธี Kreuger's balanced

ในปี ค.ศ. 2008 ได้มีนำเสนอวงจรของอุปกรณ์คาบเกี่ยว โดย Eberhard Lemke และคณะ จากบทความ Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270 ซึ่งภายในวงจรนั้นประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุและต่อขนานทั้งหมดด้วยตัวต้านทานแมทซิง โดยได้กำหนดให้จุดวัดสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วน อยู่ต่อจากสัญญาณขาเข้าจากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว ซึ่งทำให้สัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้นั้นมีสัญญาณรบกวนเป็นจำนวนมาก

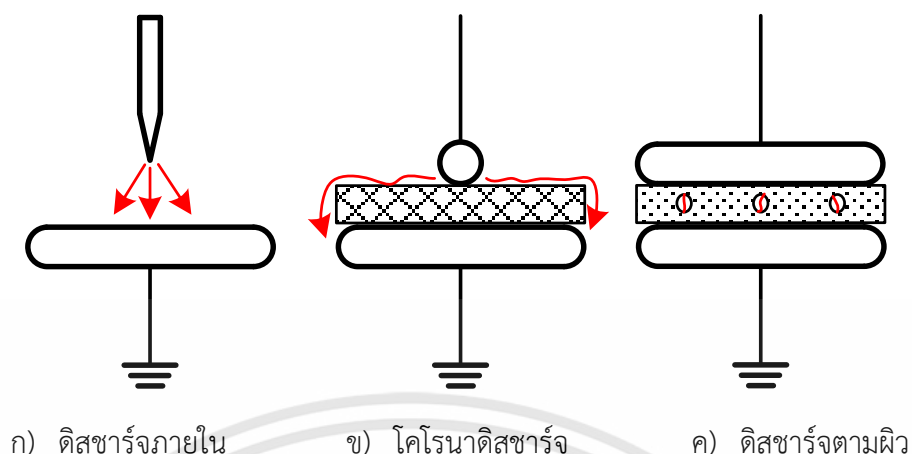
ในปี ค.ศ. 2014 ได้มีการนำเสนอวงจรของอุปกรณ์คาบเกี่ยวอีกรูปแบบหนึ่ง โดย Wolfgang Haushild และ Eberhard Lemke จากหนังสือ High-Voltage Test and Measuring Techniques ซึ่งพบว่าวงจรใหม่นั้นมีความคล้ายกับวงจรในขั้นต้น ต่างเพียงนำตัวต้านทานขนานกับตัวเหนี่ยวนำ และต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ โดยมีจุดวัดสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนอยู่จุดขาเข้าเช่นเดิม ทำให้ยังคงประสบปัญหาสัญญาณรบกวน

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดิสชาร์จบางส่วน

ตามคำนิยามของมาตรฐาน IEC 60270:2015 กล่าวว่า การดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) คือ [1] การดิสชาร์จทางไฟฟ้าเฉพาะส่วนซึ่งเชื่อมต่อบางส่วนของฉนวนที่อยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้าแต่ไม่สามารถเชื่อมโยงระหว่างตัวนำไฟฟ้าให้ถึงกันได้ นั่นคือ การดิสชาร์จบางส่วนเป็นการดิสชาร์จเบรกดาวน์แบบไม่สมบูรณ์ เกิดขึ้นกับฉนวนที่คั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรดซึ่งอาจจะเป็นฉนวนแข็ง ฉนวนเหลวหรือฉนวนแก๊สก็ได้ เมื่อการดิสชาร์จบางส่วนเกิดในโพรง หรือช่องว่างที่อยู่ในฉนวนแข็ง หรือเกิดในโพรงแก๊สที่อยู่ในฉนวนเหลว หรือเกิดที่อากาศบริเวณรอบอิเล็กโตรด พลังงานที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด การดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่ป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตทำให้เกิดเบรกดาวน์เพียงบางส่วนเท่านั้น แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้ แม้ว่าขนาดการดิสชาร์จบางส่วนโดยส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็ก แต่การดิสชาร์จบางส่วนก็สามารถก่อให้เกิดการทำลายเนื้อฉนวนได้หากปล่อยไว้เป็นระยะเวลานาน และอาจนำไปสู่ความผิดปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ในที่สุด ด้วยเหตุนี้การตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วนจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง และผลจากการตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วนจะทำให้ทราบสภาพความสมบูรณ์ของเนื้อฉนวน หรือข้อมูลเกี่ยวกับขนาดและลักษณะของการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

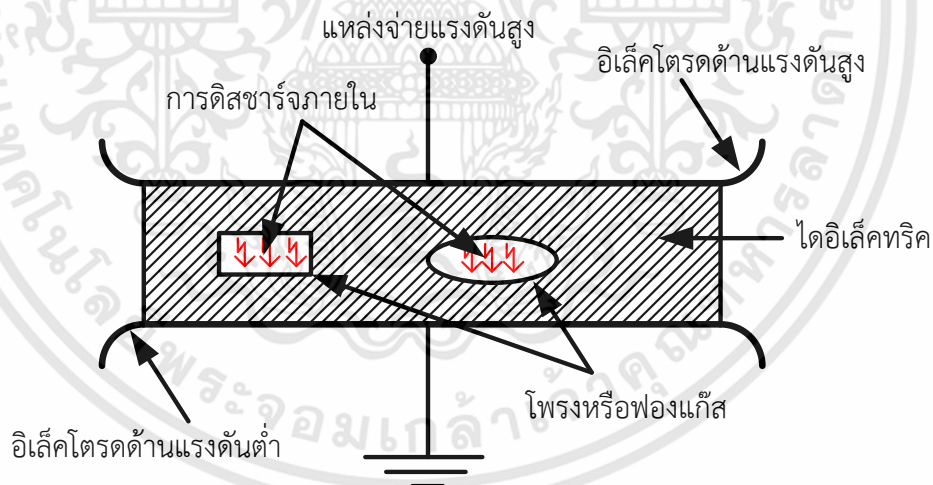
[2] เมื่อเกิดการดิสชาร์จบางส่วนจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวหรือเนื้อฉนวนเป็นเหตุให้เกิดความร้อนที่พื้นผิวหรือเนื้อฉนวนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ฉนวนเสียหาย พร้อมทั้งขยายตัวมากขึ้นและเกิดความผิดปกติขึ้นได้ ทำให้ฉนวนเสียหายและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะสั้นลง อีกทั้งการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนก่อให้เกิดปัญหาอื่นๆ ได้เช่น การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนบนสายส่งแรงสูงแบบชิ่งอากาศ จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าและทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ หรือการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงก็จะทำให้เกิดแก๊สต่างๆ เกิดความร้อน ยิ่งไปกว่านั้นยังทำให้น้ำมันหม้อแปลงเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าการใช้งานที่สภาวะปกติ [3] ซึ่งการดิสชาร์จบางส่วนนั้นสามารถจำแนกประเภทตามลักษณะการเกิดได้ 3 ประเภท แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ประเภทของการดิสชาร์จบางส่วน

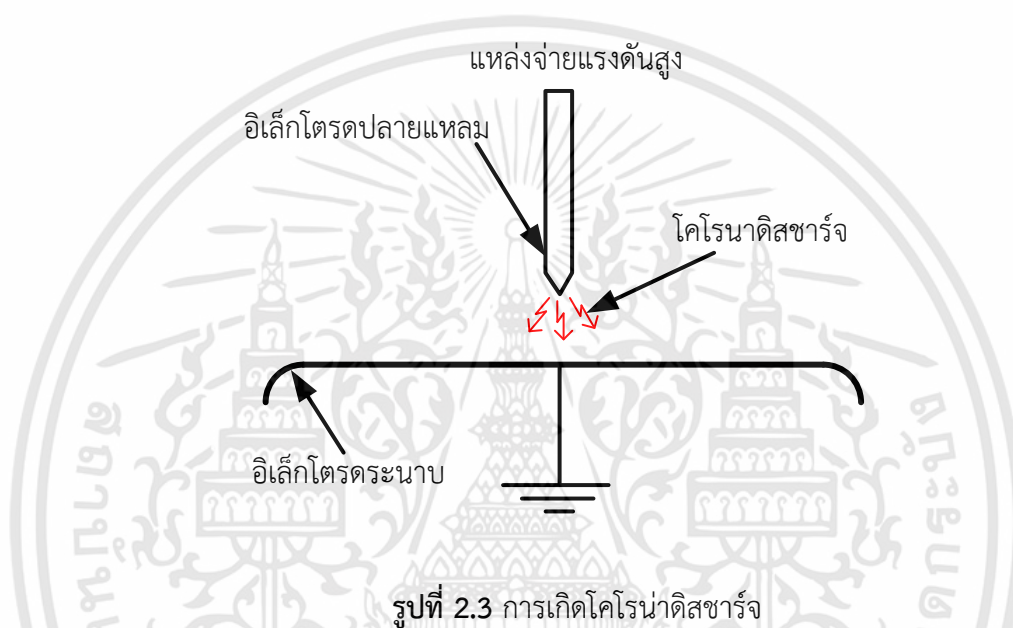
ประเภทของการดิสชาร์จบางส่วน [4] การดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

1. การดิสชาร์จภายใน (Internal discharge) เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนที่มีสิ่งเจือปน ซึ่งสิ่งเจือปนนั้นมีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกต่ำ จึงมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น ทำให้บริเวณนี้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้น การดิสชาร์จภายในเกิดขึ้นได้ทั้งในฉนวนแข็ง หรือฉนวนเหลว เช่น Cross Linked Polyethylene (XLPE), กระจกฉนวน และน้ำมันหม้อแปลง ลักษณะการเกิดการดิสชาร์จภายในแสดงดังรูปที่ 2.2



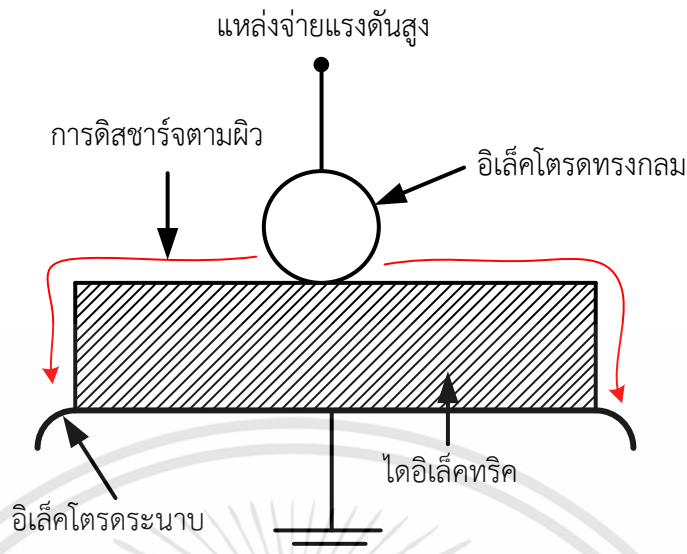
รูปที่ 2.2 การเกิดการดิสชาร์จภายใน

2. โครนาดีสชาร์จ (Corona discharge) สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในฉนวนแก๊สและฉนวนเหลว บริเวณอิเล็กโตรดปลายแหลมหรือลักษณะขอบคม ซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โครนาดีสชาร์จยังสามารถจำแนกย่อยได้อีก 2 ประเภท ได้แก่ การเกิดโครนาดีสชาร์จด้านแรงสูง และการเกิดโครนาดีสชาร์จด้านต่อลงดิน ถ้าให้อิเล็กโตรดปลายแหลมเป็นด้านแรงสูงและให้อิเล็กโตรดระนาบเป็นด้านต่อลงดิน การดีสชาร์จก็จะเกิดขึ้นด้านครึ่งลบของรูปคลื่นแรงดันทดสอบ ถ้าอิเล็กโตรดปลายแหลมเป็นด้านต่อลงดินและให้อิเล็กโตรดระนาบเป็นด้านแรงสูง การดีสชาร์จก็จะเกิดขึ้นที่ครึ่งบวกของรูปคลื่นแรงดัน และถ้าเพิ่มแรงดันทดสอบขึ้นอีกก็จะเกิดสัญญาณการดีสชาร์จขึ้นทั้งครึ่งลบและครึ่งบวกของรูปคลื่นแรงดันทดสอบ ลักษณะการเกิดโครนาดีสชาร์จแสดงดังรูปที่ 2.3



การเกิดโครนาดีสชาร์จในระดับที่ไม่รุนแรงนั้นจะไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาหรือการได้ยิน แต่ในระดับที่รุนแรงมากขึ้นนั้นจะสามารถรับรู้ได้ด้วยการได้ยินเสียงฮิสซิ่ง และในยามมืดสนิทจะสามารถมองเห็นแสงเรือง รวมทั้งโครนาดีสชาร์จที่เกิดขึ้นจะเกิดในรูปแบบพัลส์สั้นๆ ซึ่งมีสเปกตรัมความถี่สูงถึงระดับ MHz คลื่นความถี่สูงนี้จะเข้าไปรบกวนระบบการสื่อสาร เรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ (Radio Influence Voltage : RIV)

3. การดีสชาร์จตามผิว (Surface discharge) มักจะเกิดขึ้นถ้าผิวฉนวนบริเวณนั้นมีความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวขนานหรือแนวเดียวกันกับผิวฉนวน การดีสชาร์จตามผิวสามารถเกิดขึ้นได้กับปกฉนวนนำสาย ปลายสายเคเบิล เป็นต้น การดีสชาร์จจะส่งผลกระทบต่อสนามไฟฟ้าเป็นผลให้แผ่ขยายออกจากบริเวณพื้นผิว (บริเวณแรกที่เกิดการดีสชาร์จเริ่มเกิด) ที่ซึ่งองค์ประกอบพื้นผิวแรกเริ่มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดการดีสชาร์จ การดีสชาร์จตามผิวเกิดได้ทั้งในอากาศ หรือในน้ำมันฉนวนและในแก๊ส SF₆ และอาจเกิดตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน (ของแข็งกับแก๊สหรือของแข็งกับของเหลว) เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤต ลักษณะการเกิดการดีสชาร์จตามผิวแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดการดีสชาร์จตามผิว

จากรูปที่ 2.4 การดีสชาร์จตามผิวจะเกิดขึ้นบริเวณที่อิเล็กโตรดทรงกลมสัมผัสกับแผ่นฉนวน เพราะบริเวณดังกล่าวมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นตาม การดีสชาร์จจะขยายตัวออกไปยังขอบของแผ่นฉนวน ถ้าแผ่นฉนวนมีความหนาพอ และแผ่นไม่กว้างเกินไปก็จะเกิดวาบไฟข้ามแผ่นฉนวนไปหาอิเล็กโตรดระนาบได้ หรือถ้าแผ่นฉนวนมีความหนาน้อยและแผ่นกว้างมาก การดีสชาร์จตามผิวก็จะเกิดเป็นบริเวณกว้างในระดับหนึ่ง แล้วก็จะเกิดเบรกดาวนจ์เอาทะเลาะแผ่นฉนวนได้

2.2 วงจรสมมูลของการดีสชาร์จบางส่วน

[4] เพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดปริมาณของการดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดในเนื้อฉนวนจึงได้มีการพัฒนาวงจรสมมูลของฉนวนที่มีการดีสชาร์จบางส่วนขึ้น โดยใช้เป็นวงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงแก๊ส เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณการดีสชาร์จบางส่วน รูปที่ 2.5 แสดงวัสดุฉนวนมีโพรงแก๊สภายในเนื้อฉนวนและฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด A - B โพรงแก๊สจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_a เนื้อฉนวนส่วนที่ต่ออนุกรมกับโพรงแก๊ส C_c เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_b และ C'_b และ C''_b (เนื้อฉนวนส่วนที่ต่ออนุกรมกับโพรงแก๊สนี้จะรวมกันเป็น C_b) เนื้อฉนวนส่วนที่สมบรูณ์ดีอยู่โดยรอบของโพรงแก๊สจะให้ป็นความจุไฟฟ้า C'_a และ C''_a (เนื้อฉนวนส่วนที่สมบรูณ์ดีอยู่โดยรอบของโพรงแก๊ส ซึ่งรวมกันได้เป็น C_a)

$$C_a = C'_a + C''_a \quad (2.1)$$

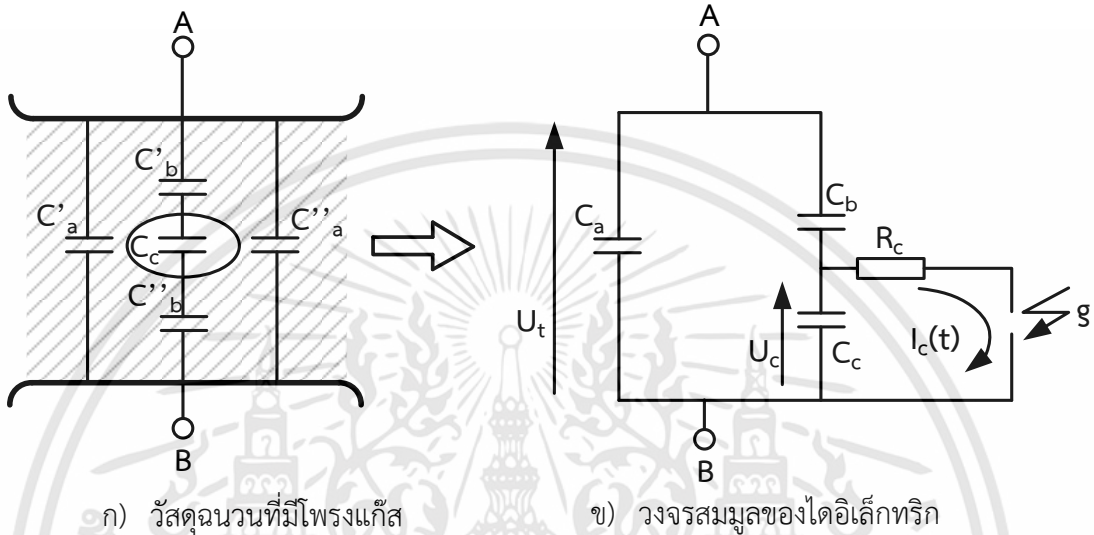
ค่าความจุไฟฟ้าของส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงแก๊ส

$$C_b = \frac{C''_b}{C'_b + C''_b} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า C_a มากกว่า C_c และ C_c มากกว่า C_b จะได้ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ C_c ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มากๆ นั่นคือ

$$C_t = \frac{C'_b C''_b}{C_b + C_c} + C_a \approx C_a \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงแก๊สและเกิดการดิสชาร์จบางส่วนภายใน

ถ้าป้อนแรงดัน U_t ที่ขั้ว A - B ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงแก๊สมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาวนของโพรงแก๊ส (แทนด้วย C_c) ก็จะทำให้เกิดเบรกดาวนในโพรงแก๊ส ซึ่งเขียนแทนด้วยแกป g (แล้วเอาตัวจ่ายแรงดันออก) มีความต้านทาน R_c ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสการดิสชาร์จ $i_c(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์มีช่วงกว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก δU_c ประจุที่ปล่อยออกมาจากโพรงแก๊สมีค่าเท่ากับ

$$\Delta q_c = \delta U_c C_c \quad (2.4)$$

กระแส $i_c(t)$ ที่ไหลอยู่ภายในไม่สามารถตรวจวัดได้ แต่การดิสชาร์จบางส่วนของ C_c ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ C_b และ C_a ในวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A - B เท่ากับ δU_t ซึ่งหาได้จากประจุใน C_c คือ

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta U_c}{C_b + C_a} \quad (2.5)$$

ค่าแรงดันตกนี้มิได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับ δq_c เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ $C_b \delta U_c$ ค่า δU_t ที่วัดได้นี้เป็นพัลส์รูปซันและขึ้นอยู่กับการกระจายของ $i_c(t)$ เมื่อแทนค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta U_c = \frac{\delta q_c}{C_c} \quad (2.6)$$

จะได้ว่า

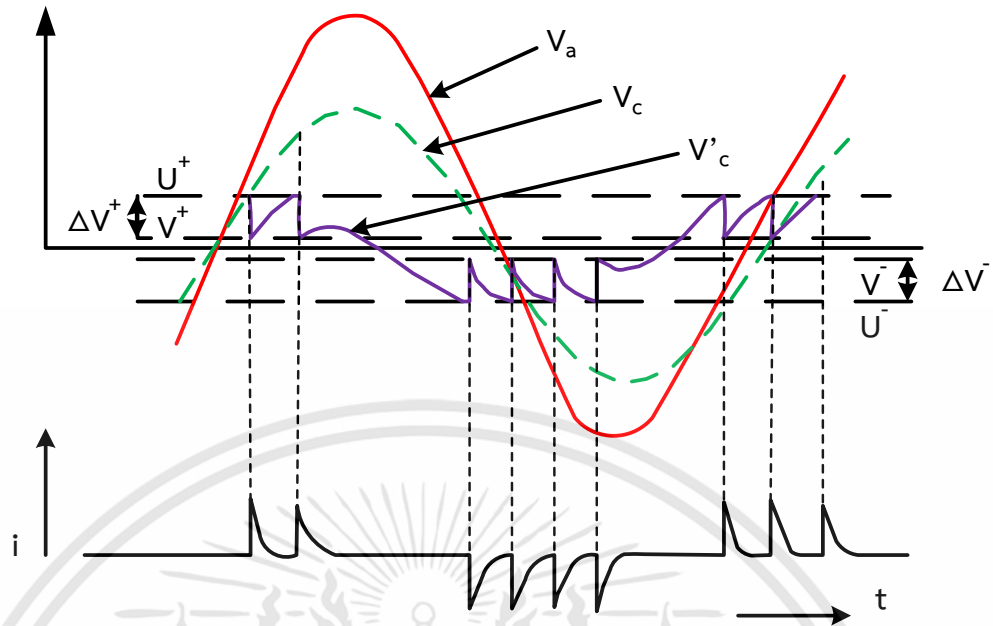
$$\delta U_t = \frac{C_b \delta q_c}{C_c (C_b + C_a)} \quad (2.7)$$

ค่าของ δU_t มีค่าเป็น mV ถึง V ในขณะที่ δU_c มีค่าเป็น kV โดยที่ไม่ทราบค่า C_c และ C_b จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของ δU_t กับ δU_c และ δq_c ได้ อย่างไรก็ตามการเกิดการดิสชาร์จในโพรงแก๊สจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทพลังงาน หรือกระแสในวงจรมานอกที่สามารถตรวจวัดได้

2.2.1 ธรรมชาติของการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

[4] ลักษณะการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนในทางปฏิบัติอาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยที่ V_a คือแรงดันคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์ V_c คือแรงดันคร่อมโพรงแก๊สถ้าไม่เกิดการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน V'_c คือแรงดันคร่อมโพรงแก๊สซึ่งมีการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน และ i คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ตามลำดับ U คือแรงดันเบรกดาว์นของโพรงแก๊ส V คือแรงดันหลังเบรกดาว์นของโพรงแก๊ส

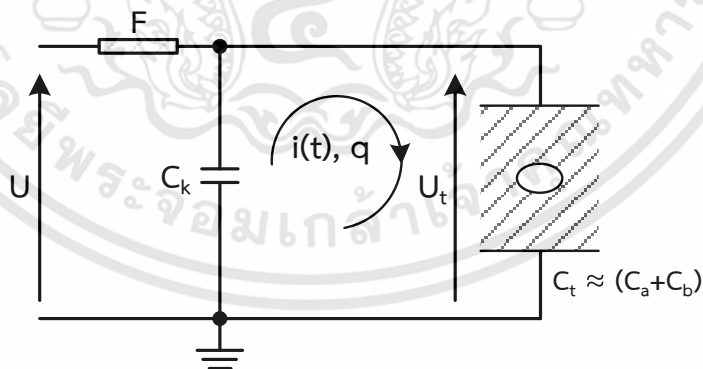
ในรูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการเกิดการดิสชาร์จซ้ำอธิบายได้ว่า แรงดันคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์หรือวัสดุทดสอบ V_a แรงดันคร่อมโพรงแก๊สถ้าไม่เกิดการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน V_c ถ้าแรงดัน V_c ในช่วงครึ่งบวกมีการเพิ่มขึ้นจนถึงแรงดันเบรกดาว์น การดิสชาร์จก็จะเกิดในโพรงแก๊ส(หรือฉนวนส่วนที่บัพรอง) ต่อจากนั้นแรงดันดังกล่าวนี้จะลดลงเป็น V^+ ทำให้ไม่เกิดการดิสชาร์จ ช่วงเวลาในการลดลงของแรงดัน U^+ มาเป็น V^+ มีค่าน้อยกว่า 100 ns หลังจากที่ไม่เกิดการดิสชาร์จในโพรงแก๊สแล้วแรงดันที่คร่อมโพรงแก๊สก็จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งและเพิ่มจนกระทั่งถึงแรงดันเบรกดาว์น U^+ ก็จะทำให้การดิสชาร์จในโพรงแก๊สก็เกิดอีกครั้ง เหตุการณ์การเกิดการดิสชาร์จเช่นนี้อาจเกิดขึ้นได้หลายครั้งจนกว่าแรงดัน V_c ที่เพิ่มขึ้นไม่มากพอที่จะเกิดการดิสชาร์จ สำหรับลักษณะการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนเมื่อแรงดัน V_a ในช่วงครึ่งลบนั้นคือถ้าแรงดัน V_c เพิ่มถึงแรงดันเบรกดาว์น U ก็จะทำให้การดิสชาร์จในโพรงแก๊ส ต่อจากนั้นแรงดันดังกล่าวนี้จะลดลงเป็น V การดิสชาร์จก็จะไม่เกิด และลักษณะการเกิดการดิสชาร์จก็จะเหมือนกับการเกิดการดิสชาร์จของแรงดันในช่วงครึ่งบวก



รูปที่ 2.6 แรงดันตกคร่อมโพรงแก๊สและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิดการดีสชาร์จบางส่วน

2.2.2 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้

[4] การดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นนั้นจะอยู่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีลักษณะหุ้มห่อมิดชิด ฉะนั้น ประจุหรือกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการดีสชาร์จบางส่วนนั้นจะไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่การดีสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c นั้นมีผลให้เกิดการถ่ายเทประจุ เป็นผลให้เกิดแรงดันตก δU_t ที่ขั้วป้อนแรงดันภายนอก A - B และเกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า หรือเกิดกระแสไหลวน เป็นค่ากระแสชดเชยที่วัดได้ (Measurable current) ดังรูปที่ 2.7 แต่มิใช่กระแสหรือประจุที่เกิดขึ้นจริงภายในโพรงก๊าซ



รูปที่ 2.7 การดีสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน

ค่ากระแสไหลวน $i(t)$ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนค่าความเก็บประจุ C_k/C_t เพราะประจุจะเคลื่อนที่จากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ชดเชยแรงดันตก δU_t ในกรณีอุดมคติที่ $C_k \gg C_t$ และ $C_t \approx C_a + C_b$ ประจุ q จะมีค่ามากที่สุด

ค่า $C_k \gg C_t$ ค่า δU_t จะได้รับชดเชยสมบูรณ์ และประจุที่ถ่ายเทคือกระแส $i(t)$

ประจุถ่ายเทหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = \int i(t)dt = \left\{ C_a + \frac{C_c C_b}{C_c + C_b} \right\} \delta U_t \quad (2.8)$$

และเพราะ $C_b \ll C_c$ จึงได้

$$q \approx (C_a + C_b) \delta U_t \quad (2.9)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการ (2.7) จะได้

$$q = \frac{C_b}{C_c} \delta q_c \quad (2.10)$$

ประจุ q นี้เรียกว่าประจุปรากฏของพัลส์การดิสชาร์จบางส่วน เพราะประจุ q นี้ไม่เท่ากับประจุที่เกิดขึ้นจริงในโพรงก๊าซ C_c แต่สัมพันธ์กับ δq_c ด้วยอัตราส่วนของ C_b/C_c และเป็นพื้นฐานของการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนที่มีความเป็นจริงมากกว่า δU_t ในสมการ 2.5 โดยที่ C_a เป็นค่าตัวเก็บประจุหลักของ C_t ซึ่งไม่มีผลเกี่ยวกับค่าการดิสชาร์จบางส่วน

ในทางปฏิบัติ เงื่อนไขที่ทำให้ได้ $C_k \gg C_t$ หมายถึงค่าเก็บประจุคาบเกี่ยวมีค่ามากๆ นั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าจะเป็นภาระทางไฟฟ้าให้กับแหล่งจ่ายแรงดันแทน อย่างไรก็ตามค่าเก็บประจุ C_k จะมีค่ามากกว่า C_t ของวัสดุทดสอบเพียงเล็กน้อย เป็นผลให้ความไวในการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนนั้นน้อยลง เนื่องจากกระแสชดเชย $i(t)$ จะมีค่าน้อยลง

เมื่อพิจารณาจากการถ่ายเทประจุระหว่าง C_k กับ C_t จะได้ความสัมพันธ์

$$Q = C_t \delta U_t \quad \text{เมื่อ } C_t \approx (C_a + C_b) \quad (2.11)$$

นั่นคือ

$$q = (C_t + C_k) \delta U'_t \quad (2.12)$$

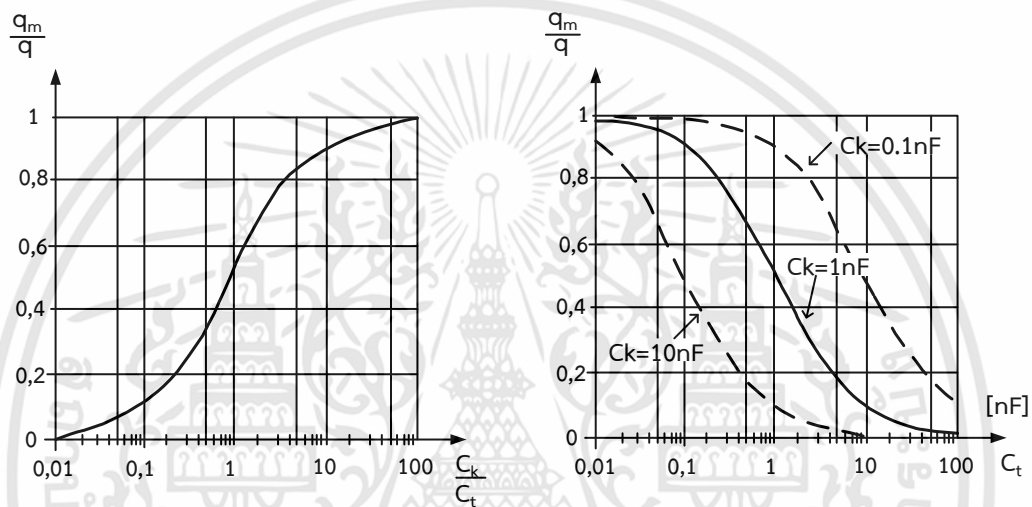
เมื่อ $\delta U'_t$ คือแรงดันที่ชั่วหลังจากสิ้นสุดการถ่ายเทประจุ ประจุที่ถูกปล่อยออกมาจากตัวเก็บคาบเกี่ยว (C_k) สามารถวัดได้ และเรียกประจุที่วัดได้นั้นว่า q_m (Measurable charge)

$$q_m = C_k \delta U'_t \quad (2.13)$$

ดังนั้นอัตราส่วนของประจุที่วัดได้ต่อประจุที่ปรากฏคือ

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_t + C_k} \quad (2.14)$$

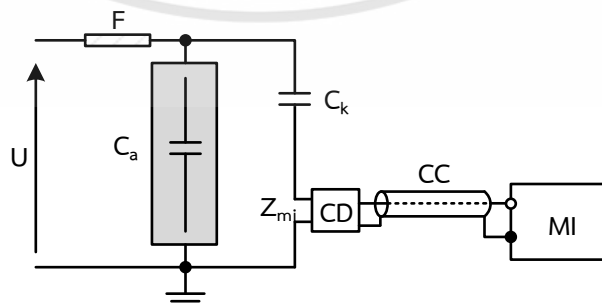
ความสัมพันธ์ของ q_m/q ในรูปของ C_k/C_t หรือในเทอมของ C_t แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะช่วยให้เลือกค่า C_k ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าความไวในการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนที่ต้องการ หากต้องการความไวสูงจะต้องเลือกใช้ค่า C_k ที่มีค่ามากพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_t แพกเตอรืวงจร q_m/q และความไวการวัดอาจตรวจสอบได้ จึงต้องมีการปรับเทียบวงจรทดสอบ โดยการป้อนประจุที่ทราบค่าแน่นอนและถูกต้องไปยังวัสดุทดสอบ



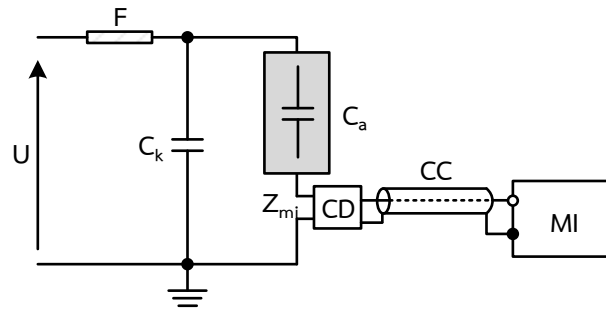
รูปที่ 2.8 ผลของค่าตัวเก็บประจุ C_k ต่อความไวการวัด q_m/q ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_k/C_t

2.3 วงจรการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน

[4] การต่อวงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC-60270:2015 จะมีความแตกต่างตรงที่การต่อตัวอิมพีแดนซ์วัดสัญญาณ (Z_{mi}) ซึ่งมาตรฐานในปัจจุบันเรียกว่าตัวต่อคาบเกี่ยว (Coupling device : CD) สามารถต่อที่ต้นระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่ การต่อแบบอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว และการต่อแบบอนุกรมกับวัสดุทดสอบ แสดงดังรูปที่ 2.9 ก.) และ ข.) ตามลำดับ ซึ่งเป็นวิธีการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนวิธีตรง (Straight detection circuit)



ก.) การต่อวงจรทดสอบแบบตัวต่อคาบเกี่ยวติดตั้งอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว



ข.) การต่อวงจรทดสอบแบบตัวต่อคาบเกี่ยวติดตั้งอนุกรมกับวัสดุทดสอบ

รูปที่ 2.9 วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนวิธีตรง

โดยที่

U	คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ
F	คือ ตัวกรองความถี่ฮาร์โมนิกส์จากแหล่งจ่าย
Z_{mi}	คือ อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ
CC	คือ สายเคเบิล
C_k	คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว
C_a	คือ วัสดุทดสอบ
CD	คือ ตัวต่อคาบเกี่ยว
MI	คือ ระบบวัดการดิสชาร์จบางส่วน

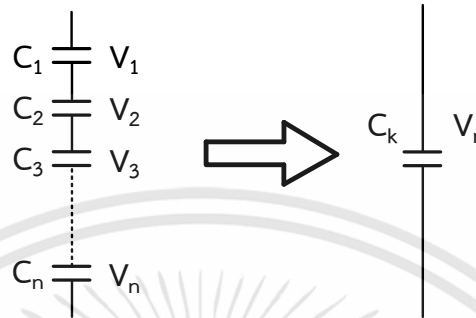
ความแตกต่างของการต่อวงจรทดสอบแบบ ก.) และแบบ ข.) คือ แบบ ก.) ตัวต่อคาบเกี่ยวติดตั้งอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ สามารถติดตั้งวัสดุทดสอบได้ง่าย และไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ที่วัสดุทดสอบ เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว แต่ความไวในการวัดสัญญาณจะน้อยกว่าแบบ ข.) เนื่องจากการดิสชาร์จที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในวัสดุทดสอบ (C_a) จึงสามารถวัดสัญญาณได้ไวกว่า เพราะตัวต่อคาบเกี่ยวต่ออนุกรมโดยตรงกับวัสดุทดสอบ แต่มีข้อเสียข้อหนึ่งคือหากเกิดการเบรกดาวน์ที่วัสดุทดสอบจะทำให้เครื่องมือวัดการดิสชาร์จบางส่วนเสียหายได้

2.3.1 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor)

[5] ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว หรือตัวเก็บประจูปลิ้ง (Coupling capacitor ; C_k) มีหน้าที่สำหรับถ่ายโอนสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนให้ครบวงจรระหว่างค่าเก็บประจุของวัตถุทดสอบ (Test object capacitance ; C_a) และอุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling device ; CD) ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนดังนั้นตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำเพื่อส่งสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งมีความถี่สูงโดยปราศจากการรบกวน ความจุของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวควรมีค่าสูงพอสมควรเพื่อลดผลกระทบของความเก็บประจุสเตรย์ (Stray capacitance) ของวงจรการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวให้ได้ค่าความเก็บประจุ และพิกัดแรงดันเท่าที่ต้องการด้วยตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียวนั้นเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก เพราะอาจจะทำให้มีขนาดใหญ่ หรือมีราคาสูง ดังนั้นแล้ววิธีการสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่สามารถทำได้ง่ายคือการนำตัวเก็บประจุแบบเดียวกันที่มีค่าความเก็บประจุมากกว่าค่าเก็บประจุของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวมาทำการต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม

การหาค่าความเก็บประจรรวม และพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวสามารถทำได้โดยกำหนดให้ C แทนค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุแต่ละตัว ซึ่งมีค่าเท่ากันทุกตัว และ V คือพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุแต่ละตัว ซึ่งมีค่าเท่ากันทุกตัว และต้องเป็นพิกัดแรงดันที่ไม่เกิดการดิสชาร์จขึ้นจากตัวเก็บประจุ จะได้ว่า

$$C = C_1 = C_2 = C_3 = C_n \quad (2.15)$$

และ

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = V_n \quad (2.16)$$

ค่าความเก็บประจรรวมของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว : C_k

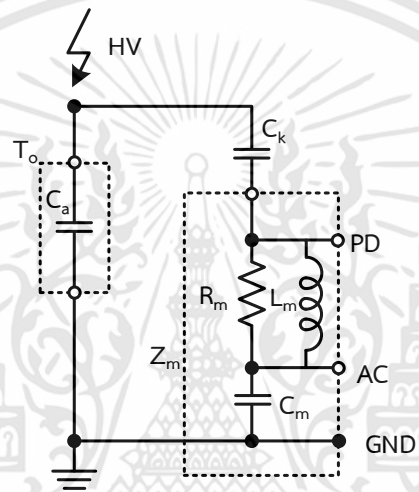
$$C_k = \frac{C}{n} \quad (2.16)$$

พิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว : V_r

$$V_r = nV \quad (2.17)$$

2.3.2 อุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling device)

[5] อุปกรณ์คาบเกี่ยว หรือตัวต่อคาบเกี่ยว (Coupling Device : CD) หรือ อิมพีแดนซ์วัดสัญญาณ (Measuring impedance : Z_m) มีหน้าที่ทำการอินทิเกรตกระแสพัลส์ที่ได้จากวงจรทดสอบและส่งผ่านสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไปยังเครื่องมือการวัดการดิซาร์จบางส่วน อุปกรณ์คาบเกี่ยวยังมีหน้าที่ที่สำคัญอีกหลายประการคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำและฮาร์โมนิกส์ต่างๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่ให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดฯ ได้ เป็นตัวป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินไม่ให้เกิดความเสียหายกับเครื่องมือวัดหรือระบบแสดงผลสัญญาณการดิซาร์จบางส่วนในกรณีที่เกิดความผิดพลาดจนเกิดการเบรกตาวขึ้นที่วัสดุทดสอบ และยังเป็นตัวลดทอนแรงดัน (Voltage divider) สำหรับการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันทดสอบอีกด้วย ตัวอย่างการติดตั้งและวงจรสมมูลของอุปกรณ์คาบเกี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.11



HV : แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับ	R_m : ตัวต้านทานวัดสัญญาณ
T_o : วัสดุทดสอบ	C_m : ตัวเก็บประจุวัดสัญญาณ
C_a : ค่าเก็บประจุจำลองของวัสดุทดสอบ	PD : ช่องวัดสัญญาณพัลส์ PD
C_k : ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว	AC : ช่องวัดแรงดันทดสอบ
Z_m : อิมพีแดนซ์วัดสัญญาณ	GND : จุดต่อหลักดิน
L_m : ตัวเหนี่ยวนำขนาน	

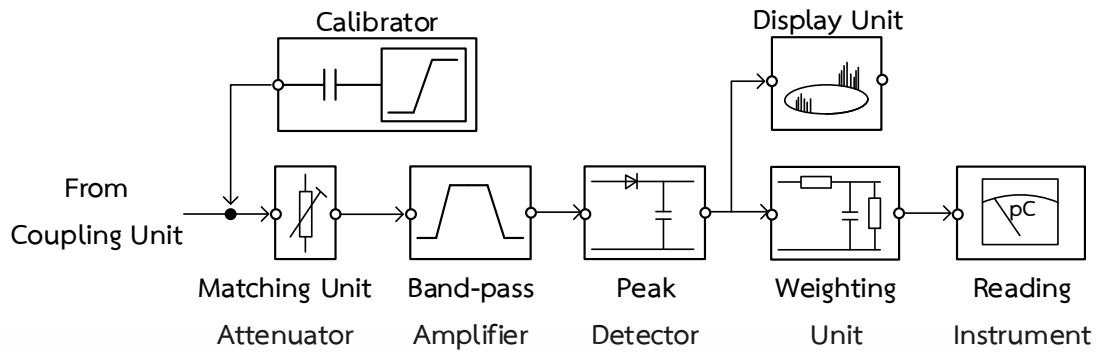
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการติดตั้งและวงจรสมมูลของอุปกรณ์คาบเกี่ยว

2.4 การประมวลผลสัญญาณอะนาล็อก

2.4.1 การทำงานเบื้องต้น

[5] บล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายในการจำแนกการประมวลผลสัญญาณการดิซาร์จบางส่วน ของเครื่องมือตรวจจับการเกิดการดิซาร์จบางส่วนแสดงดังรูปที่ 2.12 และเพื่อให้การประมวลผลสัญญาณพัลส์นั้นมีความถูกต้องและแม่นยำ จะต้องใช้ตัวเมทซิงที่เหมาะสมกับวงจรเพราะวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านที่เกิดขึ้นจากการต่ออนุกรมกันของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์คาบเกี่ยวซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 จะทำให้พัลส์ของการดิซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากจุดต่อของวัสดุทดสอบนั้นมีความแตกต่างกัน ดังนั้นแล้วจึงต้องนำมาทำการอินทิเกรตอีกครั้งหนึ่งเพื่อหาค่าของประจุปรากฏ (q_a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

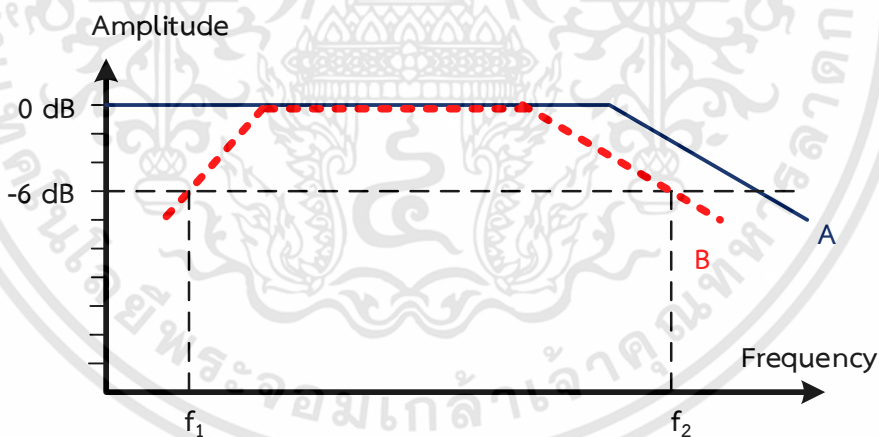


รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องมือวัดการดิสซาร์จบางส่วนแบบอะนาล็อก

การประมวลผลสัญญาณอนาล็อกนอกจากจากนี้แล้วยังต้องมียูนิท quasi - peak detector และตัวยูนิท weighting unit and reading เพื่อทำหน้าที่แสดงค่าของ ขนาดของสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วนที่มีค่ามากที่สุดและมีการเกิดซ้ำ ตามมาตรฐาน IEC 60270:2015

2.4.2 ผลการตอบสนองของพัลส์การดิสซาร์จบางส่วน

[5] โดยปกติแล้วสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจะมีสเปกตรัมความถี่ตั้งแต่ช่วงของความถี่ต่ำมากๆ ไปจนถึงช่วงความถี่สูงมาก แต่ระบบวัดสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วนนั้นจะมีการติดตั้งตัวกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter) เพื่อวัดเฉพาะความถี่ในช่วงๆหนึ่งเท่านั้น



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดและความถี่ของพัลส์การดิสซาร์จบางส่วนในระบบวัดแบบไวต์แบนด์

เมื่อ

A	คือ	ขนาดความถี่ครอบคลุมของสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วน
B	คือ	ช่วงกรองความถี่ของตัวกรองแถบความถี่ผ่านของระบบวัด
f_1	คือ	ขีดจำกัดความถี่ล่าง
f_2	คือ	ขีดจำกัดความถี่บน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามมาตรฐาน IEC 60270:2000 ได้กำหนดแถบความถี่ของระบบของเครื่องมือวัดทั้ง Narrow-band และ Wide-band ไว้ดังนี้

Narrow - Band เป็นช่วงความถี่ที่ใช้กับเครื่องมือวัดในการทดสอบแบบ On-Site

ความถี่ Mid-band	$50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$
แบนด์วิธ	$9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$

Wide-band เป็นช่วงความถี่ที่ใช้กับเครื่องมือวัดในการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ

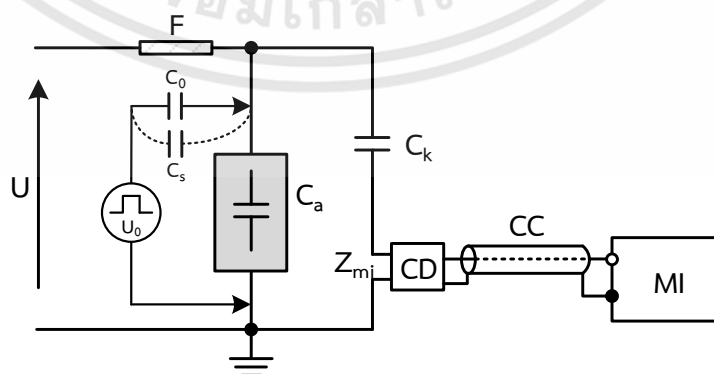
ขีดจำกัดความถี่ล่าง	$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$
ขีดจำกัดความถี่บน	$f_2 \leq 500 \text{ kHz}$
แบนด์วิธ	$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$

แต่ในมาตรฐาน IEC 60270 ฉบับแก้ไขปี 2015 ได้ทำการแก้ไขในส่วนของขีดจำกัดความถี่บนของระบบ Wide-band ให้มีค่าได้มากขึ้นซึ่งจะทำให้ช่วงความถี่ใหม่ผ่านการแก้ไขแล้วเป็นดังนี้

ขีดจำกัดความถี่ล่าง	$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$
ขีดจำกัดความถี่บน	$f_2 \leq 1 \text{ MHz}$
แบนด์วิธ	$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 900 \text{ kHz}$

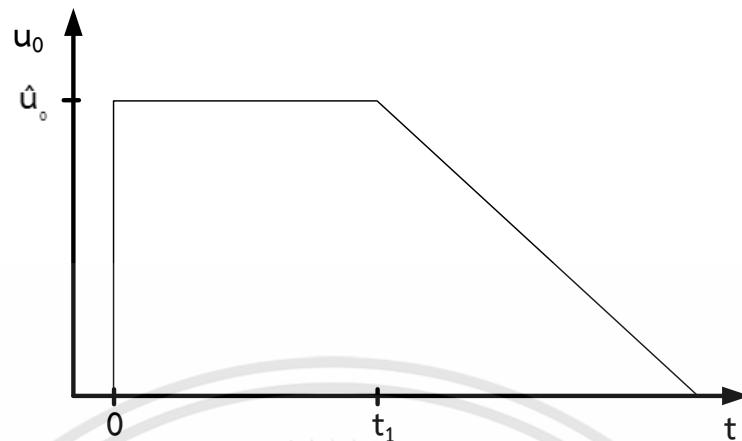
2.5 การเปรียบเทียบวงจรการดิสชาร์จบางส่วน

[4] เนื่องจากสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนที่เครื่องมือวัดวัดได้นั้นจะแปรผันตามขนาดของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว และวัสดุทดสอบ จึงต้องมีการปรับเทียบด้วยสัญญาณการดิสชาร์จมาตรฐานก่อนทำการทดสอบ โดยใช้เครื่องสร้างพัลส์การดิสชาร์จบางส่วนที่ทราบค่าประจุไฟฟ้าถูกต้องแน่นอน ซึ่งเป็นการจำลองการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนด้วยการส่งพัลส์กระแสที่มีขนาดของประจุมาตรฐาน (q_0) ไปยังขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ดังรูปที่ 2.14 เครื่องปรับเทียบมาตรฐานประกอบด้วยแหล่งจ่ายรูปคลื่น U_0 ซึ่งมีรูปคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.15 ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุขนาด C_0 ตามมาตรฐาน IEC 60270:2015 ได้กำหนดให้ $C_0 \leq 0.1 C_a$ และมีช่วงเวลาขาขึ้นของรูปคลื่น U_0 (t_r) เท่ากับหรือน้อยกว่า 60 ns



รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบวงจรการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 รูปคลื่นแรงดัน U_0 ที่ใช้ในการสร้างเครื่องปรับเทียบมาตรฐาน

การสร้างประจุที่รู้ค่าถูกต้องแน่นอน สามารถหาค่าประจุที่ถูกสร้างขึ้นได้จากการอินทิเกรตกระแสที่ไหลออกจากเครื่องปรับเทียบมาตรฐานเทียบกับเวลา ตามสมการที่ 2.18 หรือคำนวณจากค่าเก็บประจุ C_0 และค่ายอดของแรงดัน U_0 ตามสมการที่ 2.19

$$q = \int_0^{t_1} i(t) dt \quad (2.18)$$

$$q = C_0 U_0 \quad (2.19)$$

2.6 โปรแกรม LabVIEW

LabVIEW หรือ Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น LABVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument หรือ VI ซึ่งมีความหมายว่า เครื่องมือวัดเสมือน

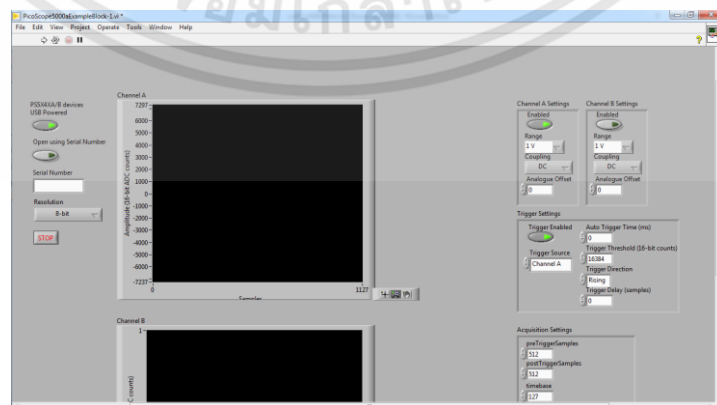
โปรแกรม Labview เป็นโปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปใช้เกี่ยวกับการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับทางวิศวกรรม โดยมีจุดประสงค์หลักคือการจัดการในด้านการวัดและเครื่องมือวัดอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในตัวของโปรแกรมเองนั้นจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันต่างๆ จำนวนมากที่จะช่วยให้การวัดแม่นยำและถูกต้องที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมต่างๆ จะทำให้สามารถนำไปปรับใช้ได้หลากหลายแนวทางมากขึ้น จุดเด่นของ LabVIEW คือเป็นโปรแกรมประเภท GUI หรือ Graphic User Interface นั่นคือไม่จำเป็นต้องทำการเขียนโค้ดหรือคำสั่งใดๆ และลักษณะภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมคือภาษารูปภาพ หรือที่เรียกว่า ภาษา G (Graphic Language) ซึ่งจะไม่ใช้การเขียนโปรแกรมเป็นบรรทัดอย่างที่เป็นภาษาพื้นฐานเช่น C, BASIC หรือ FORTRAN

จุดประสงค์หลักของทางผู้พัฒนาโปรแกรม LabVIEW คือ ต้องการพัฒนาโปรแกรมที่จะนำมาใช้กับระบบเครื่องมือวัดที่มีความง่ายในการเขียนโปรแกรมและมีฟังก์ชันเพื่อจะช่วยให้การวัดทางวิศวกรรมให้มากที่สุด เพราะทางบริษัทที่เป็นผู้พัฒนาเองก็เริ่มจากการผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดทางวิศวกรรม มีใช้ผู้พัฒนาซอฟต์แวร์เป็นหลัก ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของ LabVIEW คือ การทำให้คอมพิวเตอร์ของผู้ใช้ที่ทำงานร่วมกับ LabVIEW และ อุปกรณ์เชื่อมต่อเพื่อการเก็บข้อมูล (Data Acquisition Card) เปลี่ยนเป็นมือได้หลากหลายรูปแบบ อาทิ เช่น Oscilloscope, Multimeter, Function Generator, Strain meter Thermometer หรือเครื่องมือวัดอื่นๆ ตามต้องการ

2.6.1 Dataflow

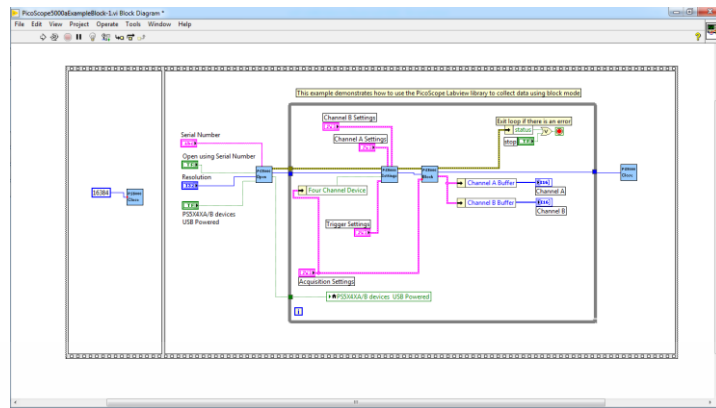
Data flow หรือการเขียนแผนภาพการไหลของข้อมูลนั้นจะเป็นการลดความผิดพลาดในด้านการสะกดผิด หรือพิมพ์ผิด และทำให้ผู้เขียนสามารถเขียนได้ง่ายขึ้นเนื่องการใช้รูปภาพแทนข้อความนั้นจะทำให้ไม่ต้องจดจำรูปแบบคำสั่งที่ยุ่งยาก

ตัวโปรแกรมจะประกอบด้วยสองหน้าหลักได้แก่ Front Panel ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการแสดงค่าหรือควบคุม และ Block Diagram ซึ่งเปรียบเสมือนวงจรภายในของเครื่องมือวัด



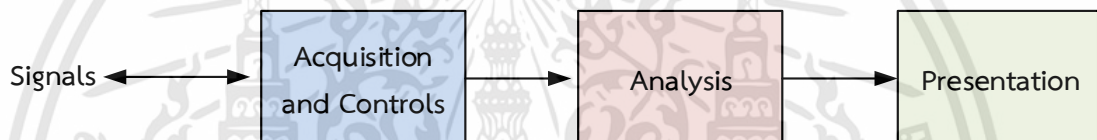
รูปที่ 2.16 หน้า Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 หน้า Block Diagram ของโปรแกรม LabVIEW

LabVIEW อาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัด หรือการวัดคุ่มทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบตามที่ต้องการ หลักการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ



รูปที่ 2.18 Block Diagram เครื่องมือวัดที่สร้างจาก LabVIEW

1. Acquisition เป็นส่วนที่รับข้อมูลจากภายนอกเข้าสู่คอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบนี้อาจมาจากการ์ด DAQ
2. Analysis หลักจากที่ได้รับข้อมูลแล้วอาจจะต้องผ่านฟังก์ชันในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบที่สื่อความหมายแสดงแทนสิ่งที่วัดได้
3. Presentation คือ การแสดงผลในรูปแบบที่เป็ประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โดยอาจแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่นใด เช่น Digital Multimeter ซึ่งสามารถเลือกการแสดงผลได้มากมายหลายรูปแบบ

2.6.2 ส่วนประกอบต่างๆ ภายใน LabVIEW

โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาโดย LabVIEW เราจะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) เพราะลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพเมื่อผู้ใช้ใช้งานจะเหมือนกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางวิศวกรรม ในขณะที่ตัวหลังฉากของอุปกรณ์เสมือนจริงเหล่านั้นจะเป็นการทำงานของ ฟังก์ชัน, Subroutines และโปรแกรมหลักเหมือนกับภาษาทั่วไป สำหรับ VI หนึ่งๆ จะประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนคือ

1. Front Panel
2. Block Diagram
3. Icon และ Connector

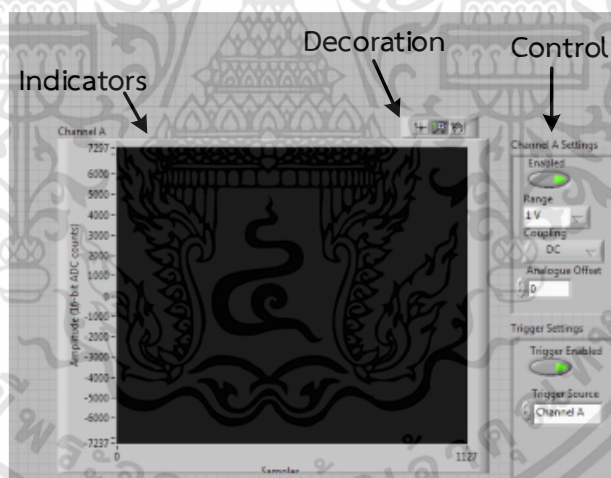
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสามส่วนนี้จะประกอบกันขึ้นมาเป็นอุปกรณ์เสมือนจริง ลักษณะและหน้าที่ของส่วนประกอบทั้งสามมีดังต่อไปนี้

1. Front Panel หรือหน้าปัทม์ จะเป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม (หรือที่นิยมเรียก User Interface) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัทม์ของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัดต่างๆ ไป โดยทั่วไปจะประกอบด้วย สวิตช์ปิดเปิด, ปุ่มบิด, ปุ่มกด จอแสดงผลหรือแม้แต่ค่าที่ผู้ใช้สามารถกำหนด สำหรับผู้ที่คุ้นเคยกับการเขียนโปรแกรมประเภท Visual ทั้งหมดคงจะเข้าใจกันดีว่า Front Panel นี้จะเปรียบเสมือนเป็น GUI ของโปรแกรมหรือ VI นั้นเอง

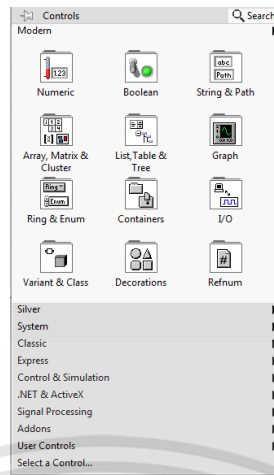
Object ที่อยู่บน Front Panel จะมีอยู่สามประเภท คือ

- 1) Control คือประเภทที่รับค่าจากผู้ใช้ (Input) ซึ่งผู้ใช้สามารถพิมพ์ค่าลงไป หรือใช้เมาส์คลิกเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าได้ เช่น ปุ่มหมุน ปุ่มเลื่อน สวิตช์ เป็นต้น
- 2) Indicators คือประเภทที่ใช้แสดงค่าต่างๆ เท่านั้น (Output) ผู้ใช้ไม่สามารถแก้ไขได้ เช่น กราฟ มิเตอร์ LED
- 3) Decorations เป็น Object ที่ไม่เกี่ยวข้องทั้งกับโปรแกรมและ code บน Block Diagram เลยแต่มีไว้เพื่อความสวยงามเป็นระเบียบของ Front panel เท่านั้นนั่นเอง ลักษณะของ Front Panel แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.19 Object ต่างๆที่อยู่บนหน้า Front Panel ของ LabVIEW

เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel จะประกอบไปด้วย Control Palette และ Tools Palette ซึ่ง LabVIEW มี Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel แสดงดังรูป 2.18 ซึ่งเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) โดยจะจัดเป็นกลุ่มต่าง ๆ เช่น กลุ่มของตัวเลข (Numeric) ซึ่งภายในกลุ่มจะมี Control และ Indicator ต่างๆ ที่เกี่ยวกับตัวเลข



รูปที่ 2.20 Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel

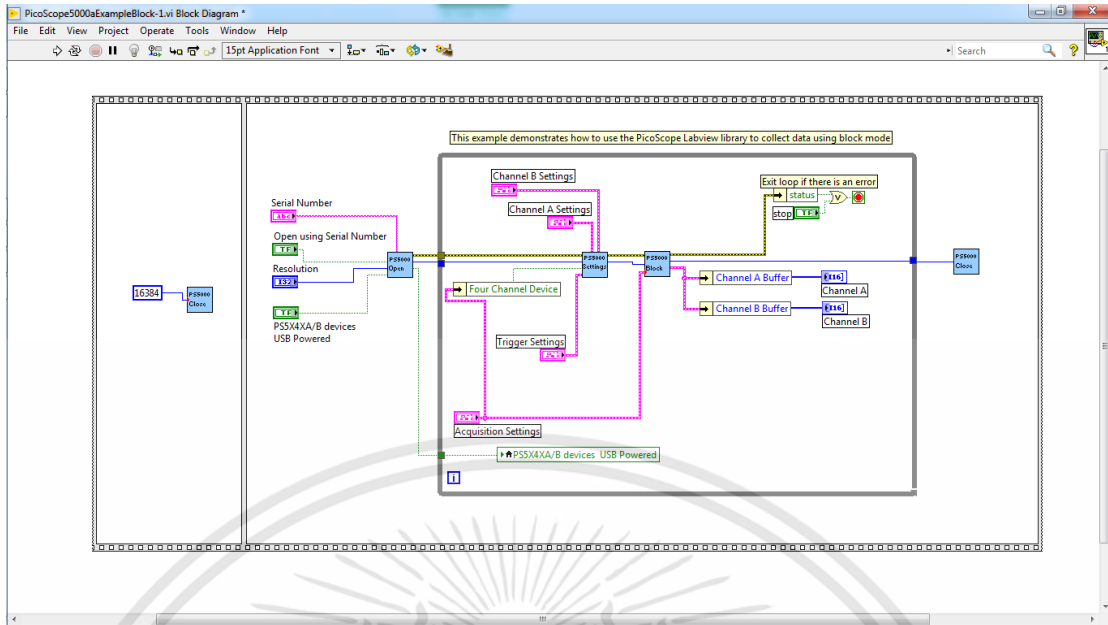
Tools Palette คือ เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม ซึ่งจะใช้ทั้งการออกแบบ Front Panel และ Block Diagram ในส่วนนี้จะกล่าวถึง Tools Palette สำหรับออกแบบ Front Panel



รูปที่ 2.21 Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel

- Block Diagram นี้เป็นเสมือนกับ Source Code หรือโปรแกรมของ LabVIEW ซึ่งปรากฏว่าอยู่ในรูปของภาษา G ซึ่ง Block Diagram นี้ ถือว่าเป็น Executable Program คือสามารถที่จะทำงานได้ทันที และข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือ LabVIEW จะมีการตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรมตลอดเวลา ทำให้โปรแกรมจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อไม่มีข้อผิดพลาดในโปรแกรมเท่านั้นโดยผู้ใช้สามารถที่จะดูรายละเอียดของความผิดพลาดแสดงให้เห็นได้ตลอดเวลาทำให้การเขียนโปรแกรมนั้นง่ายขึ้นมาก ส่วนประกอบภายใน Block Diagram นี้ จะประกอบด้วย ฟังก์ชัน ค่าคงที่ โปรแกรมควบคุมการทำงานหรือโครงสร้าง จากนั้นในแต่ละส่วนเหล่านี้ ซึ่งจะปรากฏในรูปของ Block เราจะได้รับการต่อสาย (Wire) สำหรับ Block ที่เหมาะสมเข้าด้วยกัน เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง Block เหล่านั้น ทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามที่ต้องการและแสดงผลออกมาให้แก่ผู้ใช้ต่อไป

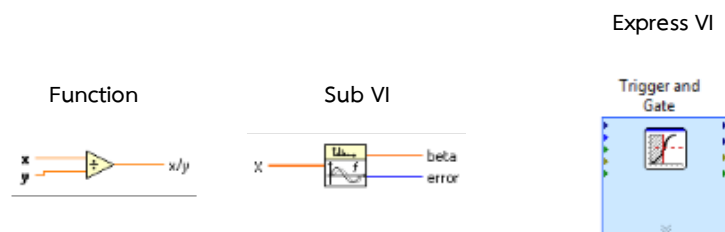
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ตัวอย่าง Block Diagram ที่ไม่เกิดข้อผิดพลาด พร้อมรันโปรแกรม

Block Diagram Node คือรูป Icon ที่อยู่บน Block Diagram ซึ่งมี Input และ/หรือ Output และจะทำงานตามหน้าที่เมื่อมีการรันโปรแกรม โดนแบ่งเป็นสามชนิดหลัก

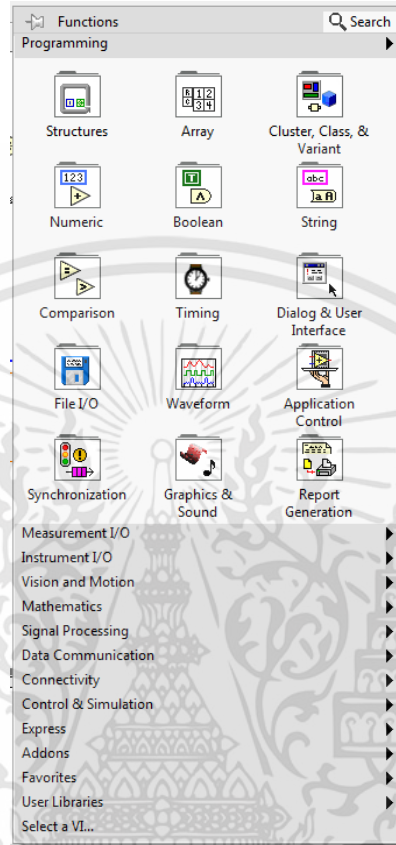
- 1) Function คือ Node ที่มีหน้าที่พื้นฐานของคอมพิวเตอร์ ซึ่งเราไม่สามารถที่จะเจาะเข้าไปดูรายละเอียดภายในได้อีก เช่น การบวก การคูณ
- 2) SubVIs หรือใน ภาษาทางซอฟต์แวร์อาจจะเรียกว่า Subroutine หรือ Subprogram คือโปรแกรมย่อยที่ถูกเขียนขึ้นมาเพื่อถูกนำมาเรียกใช้ในอีกโปรแกรมหนึ่ง เราสามารถเปิดเข้าไปดู front panel และ block diagram ได้เมื่อ double click ที่ Icon ของมัน
- 3) Express VIs เป็น subVIs ประเภทพิเศษคือเมื่อเราเลือก Express VI มาวางบน Block Diagram มันจะปรากฏหน้าต่าง Configuration ขึ้นมาเพื่อนให้เราเข้าไปป้อนค่า Parameters ต่าง ตามต้องการและเมื่อเราป้อนค่าเสร็จ มันก็จะสร้างโค้ดไว้ภายในอัตโนมัติตามที่เราได้ตั้งค่าไว้ ซึ่งความสามารถของ Express VI นี้ทำให้เราแทบไม่จำเป็นต้องต่อสาย Input เลยเพราะ Parameter ทั้งหมดได้ถูกสร้างขึ้นมาแล้วถูกเก็บไว้ภายในเรียบร้อยแล้ว จึงทำให้การเขียน LabVIEW ง่ายและเร็วขึ้นมาก สังเกตง่ายๆ Express VI จะมี Icon ขนาดใหญ่ที่มีพื้นหลังเป็นสีฟ้า



รูปที่ 2.23 ตัวอย่าง Block Diagram Node

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมบน Block Diagram คือ Functions Palette ซึ่งจะมี Function และ SubVI ต่าง ๆ ที่มีอยู่แล้วให้ผู้ใช้เลือกใช้ โดย Function และ SubVI จัดเป็นกลุ่ม ๆ เช่น Numeric Function จะมี Function ต่าง ๆ เกี่ยวกับตัวเลข เช่น บวก ลบ คูณ หาร แสดงดังรูป 2.21



รูปที่ 2.24 Functions Palette ของหน้า Block diagram

2.6.3 ประเภทของข้อมูล

ในการเขียนโปรแกรมทุกอย่างไปจะต้องมีการประกาศตัวแปรก่อนที่จะใช้ตัวแปรนั้น แต่สำหรับโปรแกรม LabVIEW ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องทำเอง โปรแกรมจะทำการกำหนดให้ เพียงแค่เลือกประเภทของข้อมูลที่มาวางบนโค้ดให้ถูกต้องเท่านั้น ประเภทของข้อมูลภายใน LabVIEW ก็มีหลายอย่างที่เหมือนกับโปรแกรมในภาษาอื่นๆ และยังมีอีกบางประเภทที่ใช้ใน LabVIEW เท่านั้น โปรแกรม LabVIEW แบ่งข้อมูลเป็น 6 ชนิดดังนี้คือ

1. Numeric คือข้อมูลประเภทตัวเลข มีทั้งจำนวนเต็มซึ่งใน Block Diagram จะเห็นเป็นสีน้ำเงิน และจำนวนทศนิยมจะเห็นเป็นสีส้ม และสามารถเปลี่ยนไปได้โดยการคลิกขวาที่ตัวเลขนั้น แล้วเลือก representation และเลือกประเภทตัวเลข
2. Boolean คือข้อมูลประเภทที่มีสองค่า คือ True และ false บน Block Diagram จะแสดงข้อมูลเป็นสีเขียว และสำหรับ Front Panel ตัว Boolean จะมีลักษณะเป็น ตัว Control หรือ สวิตช์ ถ้าเป็น Output ก็จะเป็น LED หรือหลอดไฟประเภทต่างๆ

3. String คือข้อมูลประเภทที่เป็นตัวอักษร Icon จะแสดงเป็นสีชมพู สำหรับการแสดงผล จะมีอยู่ 4 แบบ คือ
 - 1) Normal Display คือการแสดงปกติ
 - 2) Code Display คือการแสดงแบบ โค้ดมีประโยชน์สำหรับแสดงตัวอักษรที่ตาเปล่ามองไม่เห็น การเว้นวรรค แทบ หรือการขึ้นบรรทัดใหม่
 - 3) Password Display คือการแทนตัวอักษรด้วย *
 - 4) Hex Display แสดงผลเป็นรหัสเลขฐานสิบหก
4. Enum คือข้อมูลประเภทแสดงให้ผู้ใช้เห็นเป็นตัวหนังสือ แต่ค่าจริงของมันคือตัวเลข ดังนั้นบน Block Diagram เราจึงมองเห็นข้อมูลประเภทนี้เป็นสีน้ำเงิน ซึ่งเหมือนกับจำนวนเต็ม
5. Dynamic เป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปของ Waveform บน Block Diagram ถูกแสดงด้วยสีน้ำเงินเข้มซึ่งภายในจะประกอบด้วย Array ของเวฟฟอร์ม Time Stamp ชื่อของสัญญาณ ข้อมูลประเภท Dynamic นี้ส่วนใหญ่ใช้ใน Express VI จากพวกการอ่าน กานิต และวิเคราะห์สัญญาณ
6. Time Stamp เป็นข้อมูลที่ประกอบด้วยวันที่ และเวลาที่มีความละเอียดถึงมิลลิวินาที Time Stamp บน Block diagram จะมีหน้าต่างที่เป็นสีน้ำตาลเส้นหน้า สามารถนำมาแปลงให้เป็นวันที่ เวลา แบบ String ได้

2.5.4 หลักการทำงานของ Dataflow Programming

ก่อนจะเริ่มพัฒนาโปรแกรมจะต้องทราบหลักการทางานของโปรแกรมในรูปแบบ Dataflow และรูปแบบข้อมูล (Data Type) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วย LabVIEW นั้น จะทำงานโดยอาศัยหลักการของ Dataflow ซึ่งมีหลักการดังต่อไปนี้ คือ

1. ฟังก์ชันหรือ SubVI จะทำงานเมื่อมีข้อมูล (Input)
2. เมื่อฟังก์ชันหรือ SubVI ทำงานเสร็จจะให้ข้อมูล (Output) ไปยังฟังก์ชันหรือ SubVI อื่น ๆ ที่ต้องการข้อมูล
3. ข้อมูลจะถูกส่งผ่านโดยสาย (Wire)
4. นำข้อมูลที่ได้รับมาแสดงค่า หรือรูปคลื่นด้วยตัว Indicator ต่างๆ

บทที่ 3

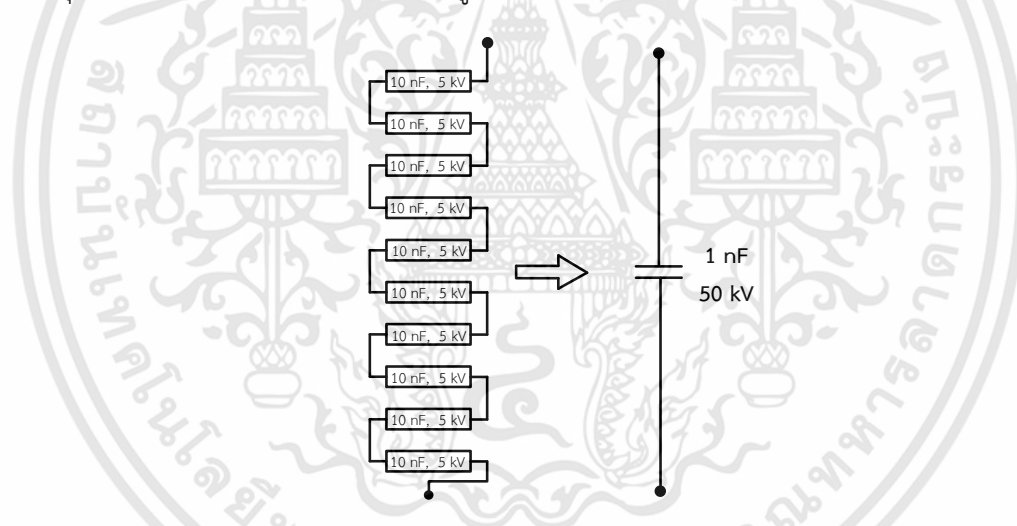
การออกแบบและประกอบสร้าง

ในบทที่สามนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและประกอบสร้างส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ ตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟส ได้แก่ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว อุปกรณ์คาบเกี่ยว และ โปรแกรมแสดงผลการดิสชาร์จบางส่วน

3.1 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

3.1.1 การออกแบบโครงสร้างของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

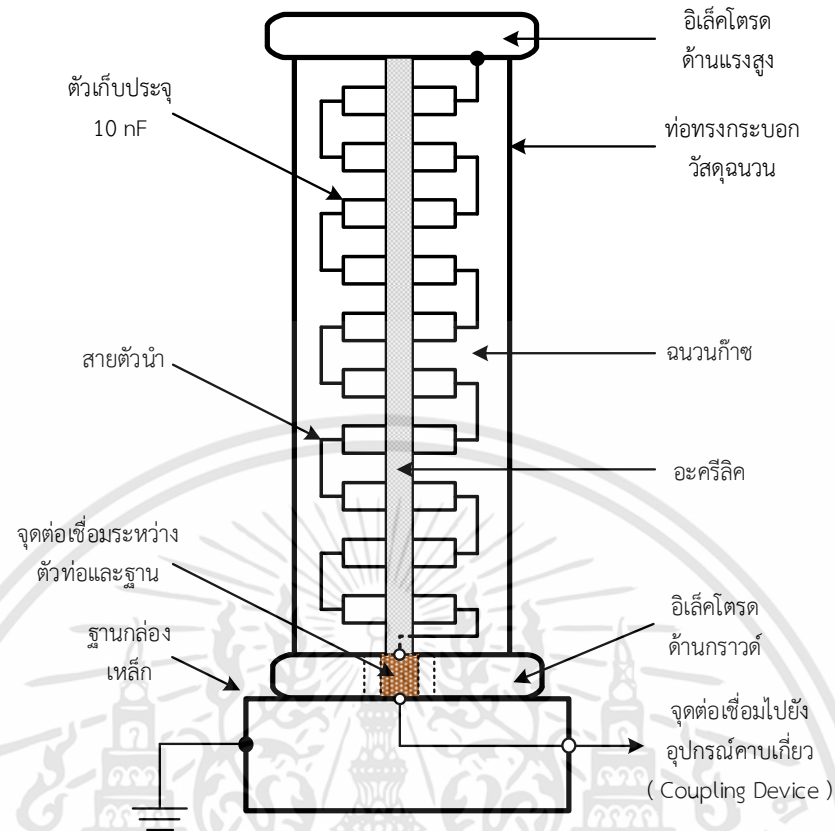
ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว หรือตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling capacitor : C_k) ที่ทำการออกแบบจะเป็นแบบ 1 เฟส จำนวน 3 ตัวที่เหมือนกันทุกประการ และมีค่าความเก็บประจุ 1 nF พิกัด 50 kV_{rms} โดยต้องปราศจากการดิสชาร์จบางส่วนทั้ง 3 ชนิดอย่างสิ้นเชิง (Free of PD) และทำการออกแบบโดยใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความเก็บประจุ 10 nF มีพิกัดแรงดันที่ไม่ก่อให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน 5 kV/ตัว จำนวน 10 ตัว มาทำการต่ออนุกรมกันจะได้ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่มีค่าความเก็บประจุ 1 nF พิกัดแรงดัน 50 kV แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 10 ตัว เป็นตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

จากนั้นจึงออกแบบให้บรรจุติดตั้งในท่อทรงกระบอกที่เป็นวัสดุฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride : PVC) และมีฝาตัวนำ (Electrode) ปิดสนิททั้งส่วนบนและส่วนล่าง โดยให้อิเล็กโตรดส่วนบนเป็นอิเล็กโตรดด้านแรงสูง และอิเล็กโตรดส่วนล่างเป็นอิเล็กโตรดด้านกราวด์ที่มีศักดีเป็นกราวด์ โดยเว้นรูไว้สำหรับติดตั้งจุดเชื่อมต่อไปยังฐานหลักโดยมีฉนวนแข็งหุ้มโดยรอบเพื่อมิให้สัมผัสกับอิเล็กโตรดด้านกราวด์ และทำการอัดฉนวนแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ที่ความดัน 2 bar เพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาดิสชาร์จซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ตามจุดรอยต่อต่างๆ ที่มีขอบคม และเมื่อทำการปิดผนึกและอัดฉนวนแก๊สเรียบร้อยแล้วจึงนำมาติดตั้งบนฐานกล่องเหล็ก ทำให้ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการออกแบบมีความสูงประมาณ 1 เมตร ภาพรวมของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.2 และภาพจำลองสามมิติของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวเก็บประจุคัปเปิลที่ทำการออกแบบ

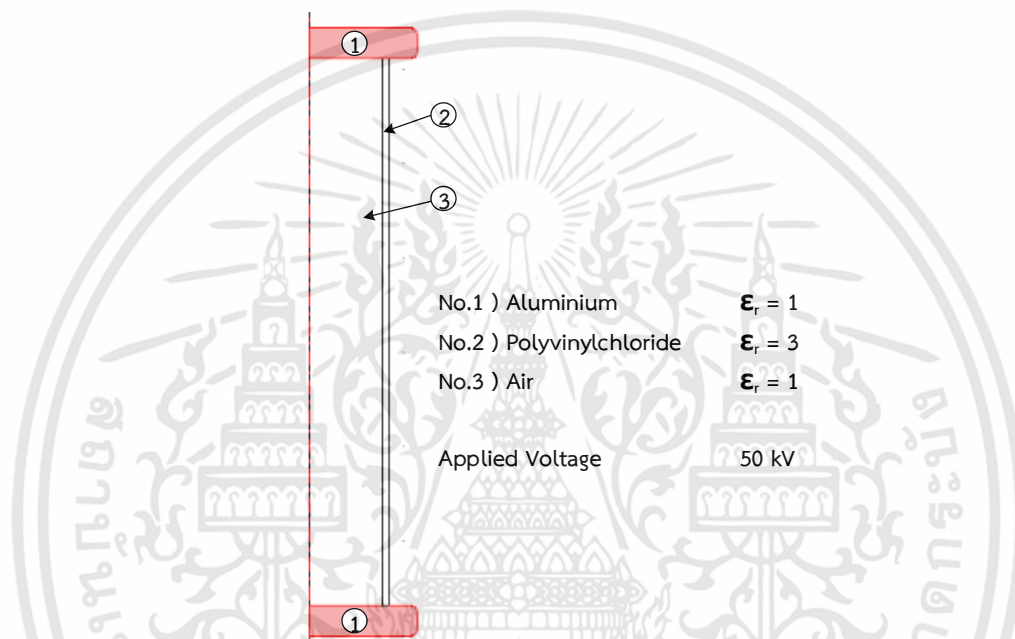


รูปที่ 3.3 แบบจำลองสามมิติของตัวเก็บประจุคัปเปิลที่ทำการออกแบบ

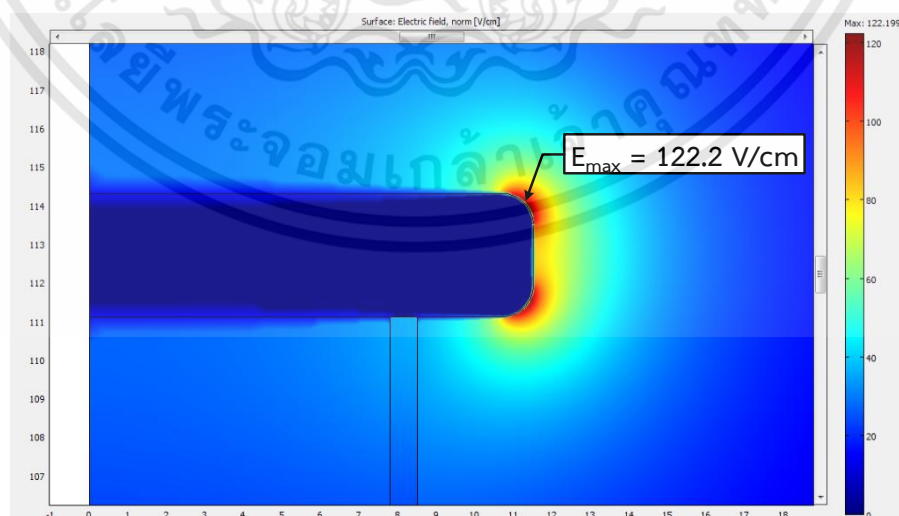
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบโครงสร้างของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวมีสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาอย่างถี่ถ้วนนั่นคือ ความเครียดสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากขอบโค้งงอของอิเล็กโตรดส่วนบนและส่วนล่างที่มีความคมหรือมีโค้งมนมากพอในการเปลี่ยนสนามไฟฟ้าไม่ให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโคโรนาดิสชาร์จบริเวณอิเล็กโตรดของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวขณะทดสอบ ทำให้ค่าการดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจจับได้มีความผิดพลาด เนื่องจากการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดขึ้นจากวัสดุทดสอบ

ดังนั้นแล้วจึงต้องทำการจำลองสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดส่วนบนและส่วนล่างของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเพื่อดูค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดว่าเหมาะสมหรือไม่ โดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์



รูปที่ 3.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว



รูปที่ 3.5 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ปรากฏบนตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

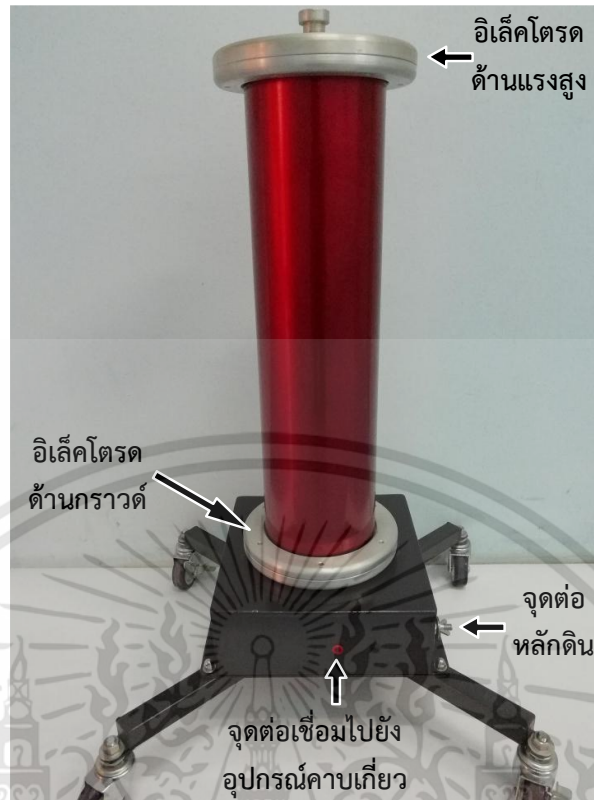
จากรูปที่ 3.5 จะได้ว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 122.2 V/cm ซึ่งถือว่ามีความต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติที่จะทำให้โคโรนาเริ่มเกิด ดังนั้นแล้วจึงสรุปได้ว่าการจ่ายแรงดันทดสอบจนถึงพิกัดของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ 50 kV_{rms} จะไม่เกิดโคโรนาดิสชาร์จขึ้นบริเวณขอบของอิเล็กโตรดทั้งส่วนบนและส่วนล่าง สามารถนำโครงสร้างที่ออกแบบขึ้นนั้นไปประกอบสร้างได้

3.1.2 การประกอบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

เมื่อทำการออกแบบเสร็จสิ้นจึงได้ทำการประกอบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวจำนวน 3 ตัว ตามที่ได้ออกแบบไว้ รูปที่ 3.6 จะแสดงถึงการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 10 nF จำนวน 10 ตัว บนแกนยึดตรึงที่ทำจากวัสดุฉนวนอะคริลิกที่มีความแข็งแรง และทำการต่ออนุกรมตัวเก็บประจุด้วยท่อทองแดงที่ตัดให้มีความโค้งมนเพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาดิสชาร์จตามจุดรอยต่อระหว่างตัวเก็บประจุ และเมื่อทำการต่ออนุกรมตัวเก็บประจุครบทั้ง 10 ตัว จึงทำการติดสายต่อเชื่อมทั้งส่วนบนและส่วนล่างเข้ากับอิเล็กโตรดด้านแรงสูงและด้านกราวด์ตามลำดับแล้วบรรจุลงในท่อพีวีซี ทำการขันอัดปิดให้แน่นจากนั้นจึงทำการอัดฉนวนก๊าซ SF₆ แล้วนำไปติดตั้งบนฐานกล่องเหล็กเป็นอันประกอบสร้างเสร็จสิ้น ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการประกอบสร้างเสร็จเรียบร้อยแสดงดังรูปที่ 3.7 และทำการวัดค่าความเก็บประจุรวมของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวทั้งสามตัวด้วยเครื่องวัดค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.6 การติดตั้งตัวเก็บประจุจำนวน 10 ตัว บนแกนยึดตรึงอะคริลิก



รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการประกอบสร้างเสร็จสิ้น



ก.)

ข.)

ค.)

รูปที่ 3.8 ค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวแต่ละตัว

- ก.) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวตัวที่ 1
- ข.) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวตัวที่ 2
- ค.) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวตัวที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบและประกอบสร้างอุปกรณ์อุปกรณ์คาบเกี่ยว

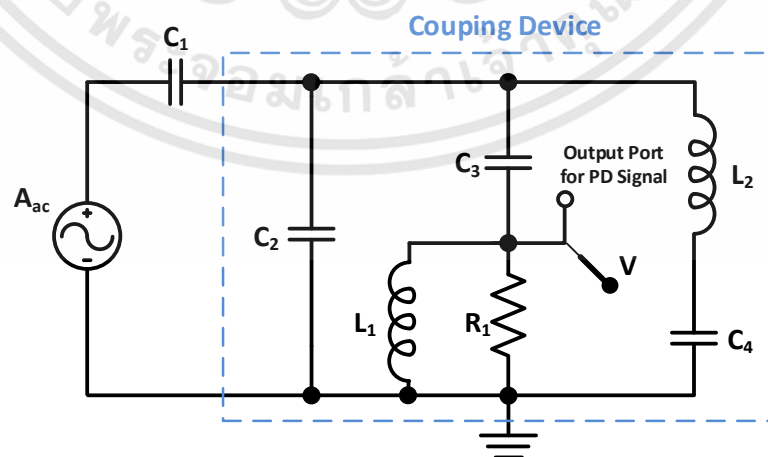
3.2.1 การออกแบบวงจรของอุปกรณ์คาบเกี่ยว

อุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling device : CD) หรืออุปกรณ์คัปปลิ่งที่ทำการออกแบบจะประกอบด้วยวงจรสองส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือ ส่วนของการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบซึ่งมีความถี่ 50 Hz และ 200 Hz ส่วนที่สองคือ ส่วนของการวัดสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งอุปกรณ์คาบเกี่ยวแต่ละตัวจะมีจุดเชื่อมต่อทั้งหมด 4 จุด ได้แก่

1. จุดต่อสัญญาณขาเข้า ซึ่งรับสัญญาณการทดสอบมาจากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว
2. จุดต่อวัดสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วน
3. จุดต่อวัดสัญญาณแรงดันทดสอบ
4. จุดต่อหลักดิน

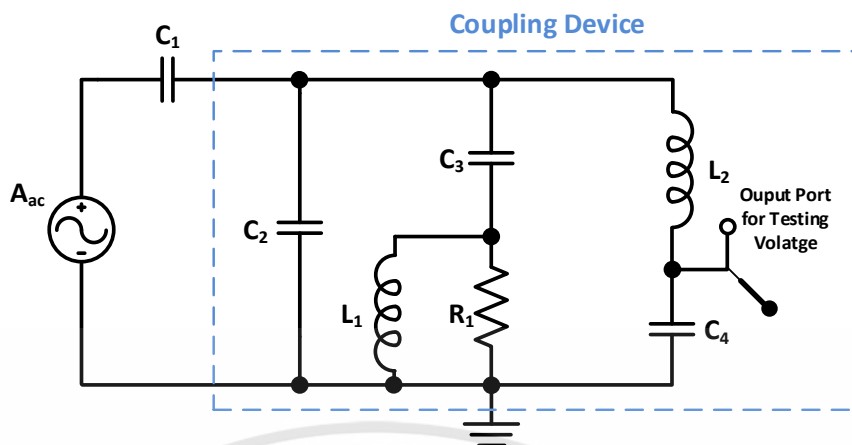
การออกแบบอุปกรณ์คาบเกี่ยวนั้นจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสัญญาณรบกวนและอัตราส่วนการลดทอนแรงดันที่เหมาะสมกับระบบวัดฯ ดังนั้นแล้วในส่วนของการวัดสัญญาณแรงดันทดสอบกระแสสลับและการวัดสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนจึงต้องทำการเลือกองค์ประกอบความต้านทานให้เหมาะสมเพื่อให้ได้อัตราส่วนการลดทอนแรงดันที่เหมาะสม และไม่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วน และในส่วนของการวัดสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนเองก็ต้องเลือกค่าขององค์ประกอบความต้านทานให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ขีดจำกัดความถี่บน (Upper limit frequency) และขีดจำกัดความถี่ล่าง (Lower limit frequency) ที่ 20 MHz และ 30 kHz ตามลำดับ ซึ่งในส่วนนี้จะต้องพิจารณาถึงการกำจัดสัญญาณรบกวนอย่างรอบคอบด้วย มิฉะนั้นจะทำให้สัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนผิดเพี้ยนได้ จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงได้ทำการออกแบบ วงจรของอุปกรณ์คาบเกี่ยวและได้ทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อดูผลลัพธ์และประสิทธิภาพการทำงานของวงจรที่ออกแบบ

วงจรดังรูปที่ 3.9 คือวงจรจำลองการทำงานของอุปกรณ์คาบเกี่ยวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ในส่วนของการวัดสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วน และรูปที่ 3.10 แสดงวงจรจำลองการทำงานของวงจรอุปกรณ์คาบเกี่ยวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ในส่วนของการวัดสัญญาณแรงดันทดสอบ โดยที่ตารางที่ 3.1 แสดงค่าขององค์ประกอบทางไฟฟ้าภายในวงจรจำลองการทำงานของอุปกรณ์คาบเกี่ยว



รูปที่ 3.9 วงจรจำลองการทำงานของวงจรอุปกรณ์คาบเกี่ยวด้วยโปรแกรมเพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ในส่วนของการตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วงจรจำลองการทำงานของวงจรอุปกรณ์คาบเกี่ยวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ในส่วนของการวัดสัญญาณแรงดันทดสอบ

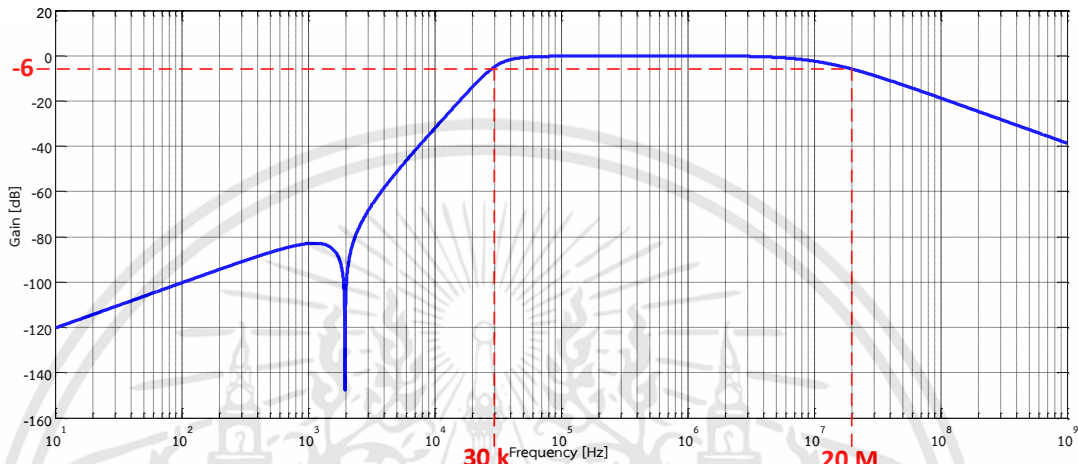
ตารางที่ 3.1 ค่าขององค์ประกอบทางไฟฟ้าภายในวงจรจำลองการทำงานของอุปกรณ์คาบเกี่ยว

องค์ประกอบทางไฟฟ้า	ค่าขององค์ประกอบทางไฟฟ้า
C_1 (ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว)	1 nF
C_2	330 pF
C_3	75 nF
C_4	44 μ F
L_1	450 μ H
L_2	150 μ H
R_1	50 Ω

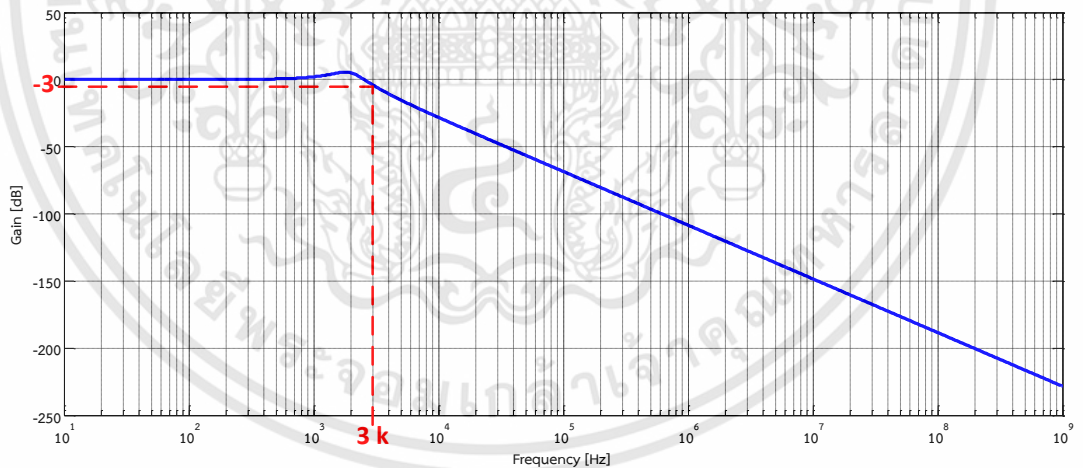
การทำงานของอุปกรณ์คาบเกี่ยวจะแบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนของวงจรการวัดสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วน และในส่วนของวงจรการวัดสัญญาณแรงดันทดสอบซึ่งเป็นสัญญาณแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50 และ 200 Hz ซึ่งการเลือกใช้ความถี่นั้นขึ้นอยู่กับวัสดุทดสอบ โดยทั้งสองวงจรได้ทำการต่อขนานกันและรับสัญญาณขาเข้าที่มีทั้งสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วน (ความถี่สูง) และสัญญาณแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ (ความถี่ต่ำ) ซึ่งสัญญาณที่มีความถี่มากกว่า 20 MHz นับว่าเป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการจึงต้องกำจัดทิ้งโดยตัวเก็บประจุ C_2 จะดึงสัญญาณนั้นไหลลงสู่จุดต่อหลักดิน ส่วนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า 20 MHz จะผ่านเข้าสู่วงจรการวัดสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วนโดยมีตัวเก็บประจุ C_3 ป้องกันสัญญาณความถี่ต่ำไม่ให้เข้าสู่วงจรการวัดสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วน ซึ่งจะป้องกันไม่ได้ทั้งหมด ดังนั้นแล้วตัวเหนี่ยวนำ L_1 จะทำการดึงสัญญาณความถี่ต่ำที่ผ่านตัวเก็บประจุ C_3 มาได้ให้ไหลลงสู่จุดต่อหลักดิน ไม่ผ่านเข้าสู่ระบบวัดการดิสซาร์จบางส่วนต่อไป ทำให้ความถี่ของสัญญาณที่ผ่านเข้าสู่ระบบวัดการดิสซาร์จบางส่วนจะอยู่ที่ 30 kHz – 20 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาในส่วนของวงจรการวัดสัญญาณแรงดันทดสอบซึ่งมีความถี่ต่ำ จะมีตัวเหนี่ยวนำ L_2 ป้องกันสัญญาณความถี่สูงไม่ให้ผ่านเข้าสู่จุดวัดสัญญาณแรงดันทดสอบกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ซึ่งมีความถี่อยู่ที่ 200 Hz ดังนั้นแล้วจึงออกแบบให้ขีดจำกัดความถี่บนอยู่ที่ 3 kHz จึงได้ว่า รูปที่ 3.11 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของจุดวัดสัญญาณการดิซาร์จบางส่วน และรูปที่ 3.12 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของจุดวัดสัญญาณแรงดันทดสอบ



รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของจุดวัดสัญญาณการดิซาร์จบางส่วน



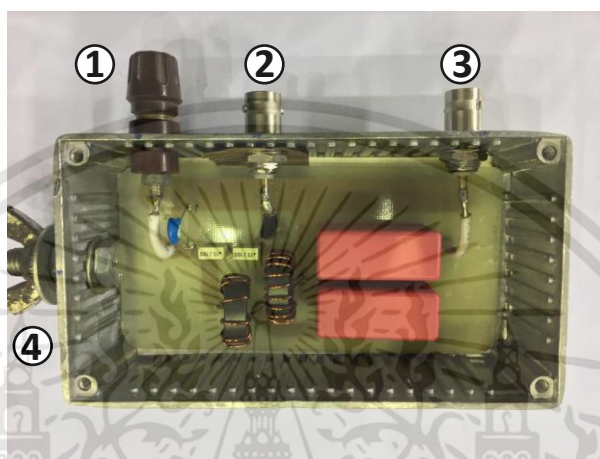
รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของจุดวัดสัญญาณแรงดันทดสอบ

จากรูปที่ 3.11 จะได้ว่าสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า 30 kHz และสัญญาณที่มีความถี่มากกว่า 20 MHz จะถูกลดทอนลง และจากรูปที่ 3.12 จะได้ว่าสัญญาณที่มีความถี่มากกว่า 3 kHz จะถูกลดทอนลง สามารถสรุปได้ว่าวงจรที่ทำการออกแบบนั้นมีประสิทธิภาพทั้งในการวัดสัญญาณการดิซาร์จบางส่วน และสัญญาณแรงดันทดสอบ สามารถนำไปประกอบสร้างได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การประกอบสร้างอุปกรณ์คาบเกี่ยว

เมื่อทำการออกแบบเสร็จสิ้นจึงได้ทำการประกอบสร้างอุปกรณ์คาบเกี่ยวจำนวน 3 ตัว ตามที่ได้ออกแบบไว้ให้มีความเหมือนกันทุกประการมากที่สุด รูปที่ 3.13 จะแสดงถึงการติดตั้งองค์ประกอบทางไฟฟ้าลงบนแผ่นปริ้นท์ (Printed Circuit Board: PCB) และทำการบรรจุลงในกล่องตัวนำปิดทึบเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก จากนั้นทำการต่อเชื่อมจากจุดวัดสัญญาณบนแผ่นปริ้นท์มายังหัวต่อทั้ง 4 ตัว โดยให้จุดอ้างอิงของวงจรทำการต่อร่วมกับจุดต่อหลักดิน



รูปที่ 3.13 อุปกรณ์คาบเกี่ยวที่ทำการประกอบสร้างขึ้น 1.) จุดต่อสัญญาณขาเข้า 2.) จุดต่อวัตสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วน 3.) จุดต่อวัตสัญญาณแรงดันทดสอบ 4.) จุดต่อหลักดิน



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์คาบเกี่ยวที่ทำการประกอบสร้างเสร็จสิ้นจำนวน 3 ตัว

3.3 โปรแกรมแสดงผลการดิสซาร์จบางส่วน

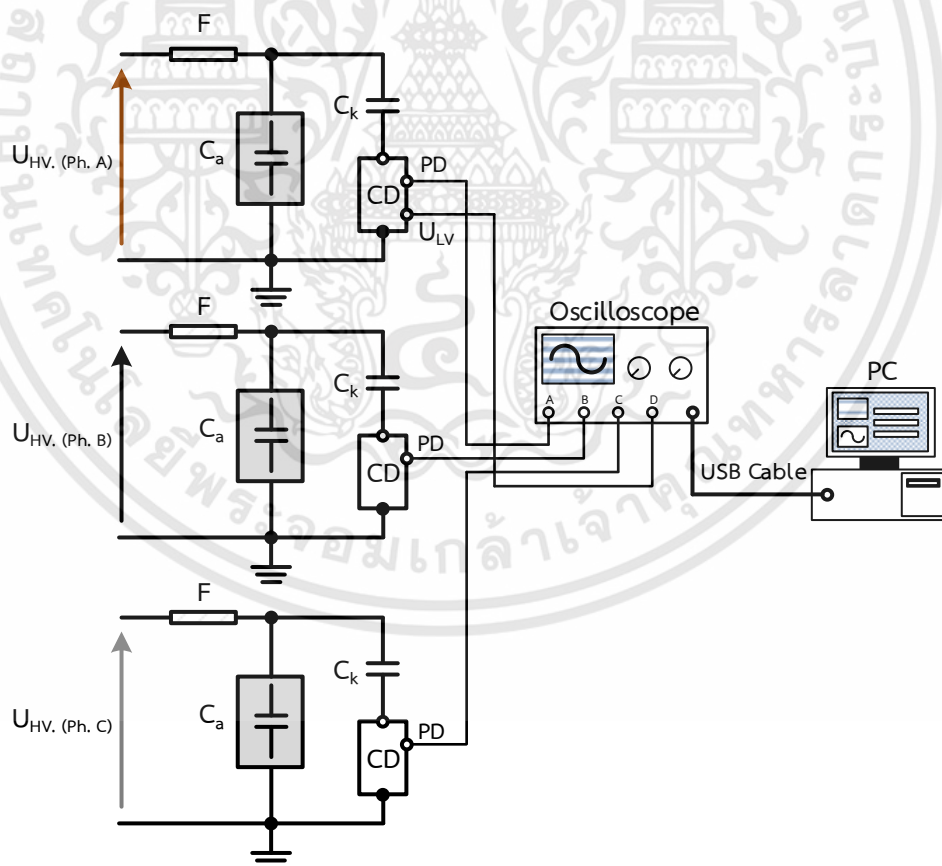
แนวคิดในการออกแบบคือการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์รับสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วนและสัญญาณแรงดันทดสอบมาจากเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า(Oscilloscope) และทำการประมวลผลสัญญาณนั้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้อยู่ในช่วงความถี่ที่มาตรฐานกำหนด และทำการแสดงรูปคลื่นของสัญญาณที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้บันทึกสัญญาณนั้นจะเป็นแบบช่องวัด 4 ช่อง (4 Channels : Ch.A, Ch.B, Ch.C และ Ch.D) โดยให้ช่องวัด A, B และ C เป็นช่องรับสัญญาณการดิซาร์จบางส่วน ของเฟส A, B และ C ตามลำดับ และให้ช่องวัด D เป็นช่องรับสัญญาณแรงดันทดสอบของเฟส C รูปที่ 3.15 คือเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า Picoscope รุ่น 5444B แบบ 4 ช่องวัดที่ใช้ในการวิจัย และ รูปที่ 3.16 แสดงถึงวงจรการวัดการดิซาร์จบางส่วนแบบสามเฟสโดยใช้เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งแสดงผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำการพัฒนาขึ้น



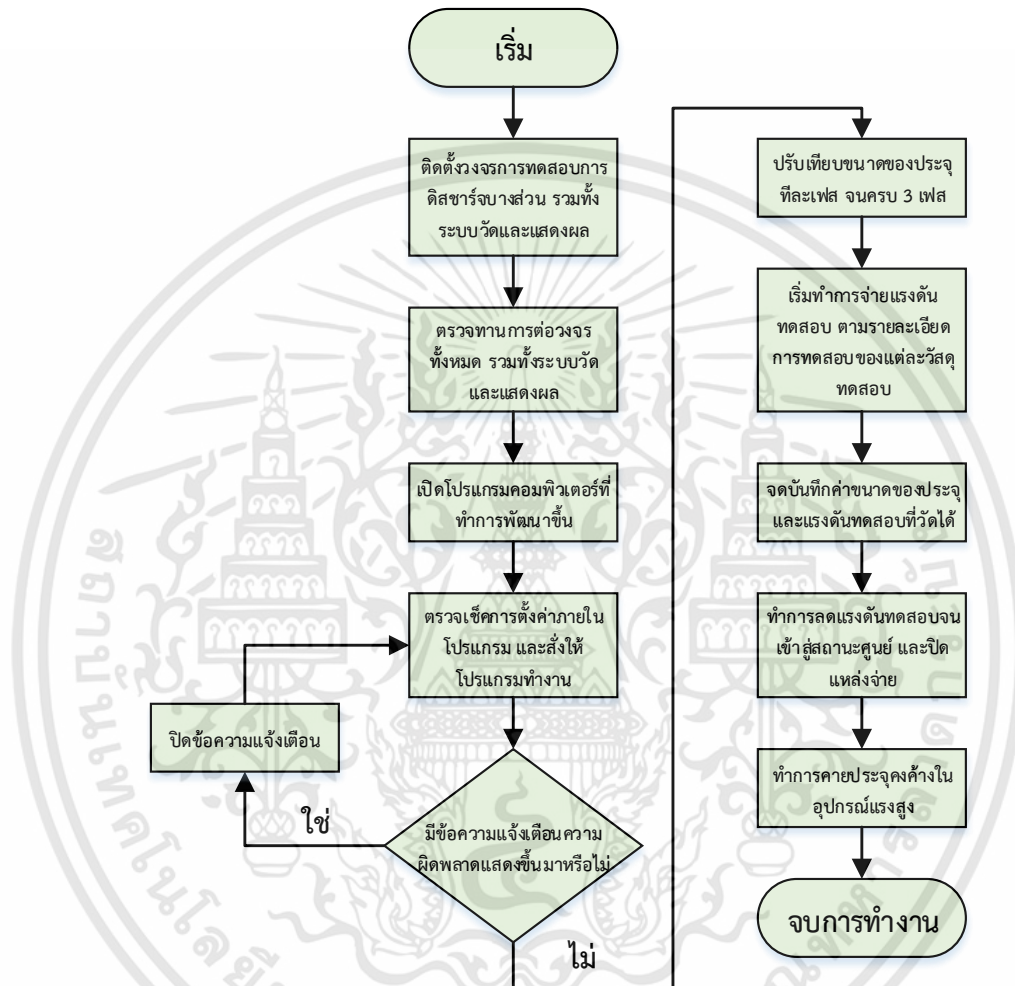
รูปที่ 3.15 เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า Picoscope รุ่น 5444B แบบ 4 ช่องวัด



รูปที่ 3.16 วงจรการตรวจวัดและแสดงผลการดิซาร์จบางส่วนแบบสามเฟส ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผ่านเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นจะทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม LabView ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์ภายนอกอื่นๆ เพื่อรับข้อมูลต่างๆ ที่เป็นข้อมูลอนาล็อกทั้งแรงดันและกระแสแล้วนำมาเก็บบันทึกและเปลี่ยนเป็นข้อมูลดิจิทัล ประมวลผล และแสดงรูปคลื่นสัญญาณผ่านทางโปรแกรมได้ โดยแผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานทดสอบการดิซาร์จบางส่วน ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของการทดสอบการดิซาร์จบางส่วน

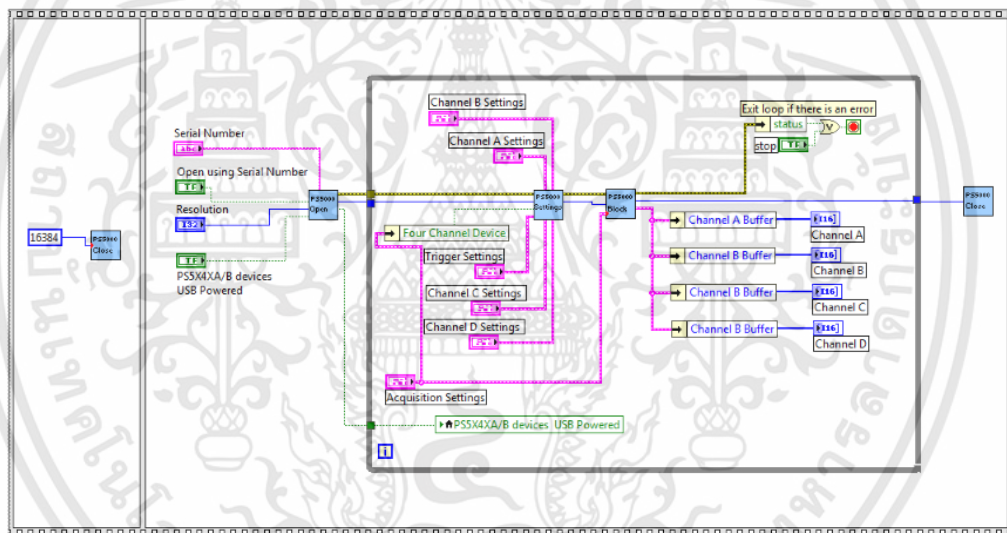
การอธิบายการออกแบบโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลการดิซาร์จบางส่วนในหัวข้อที่ 3.3 นั้นจะแบ่งเป็น 6 หัวข้อดังนี้

1. การทำงานเบื้องต้นของโปรแกรม
2. การแก้ปัญหาที่เกิดจากการเปลี่ยนช่วงการวัดแรงดัน
3. การกรองสัญญาณการดิซาร์จบางส่วนด้วยตัวกรองความถี่แบบดิจิทัล
4. การปรับเทียบประจุ
5. การอ้างอิงแกนเวลาและการแสดงผล
6. การวัดและแสดงผลสัญญาณแรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ

3.3.1 การทำงานเบื้องต้นของโปรแกรม

การทำงานเบื้องต้นของโปรแกรมทั้งในส่วนของการเปิดโปรแกรม การตั้งค่าที่ช่องวัดทั้ง 4 ช่อง และการรับข้อมูลจากช่องวัด 4 ช่องนั้นจะกระทำผ่านตัว VI หรือ Virtual Instrument สำเร็จรูปที่ทางผู้พัฒนามีมาให้ โดยรูปที่ 3.18 จะแสดงในส่วน Block Diagram ช่วงการทำงานเบื้องต้นของโปรแกรม โดยยังไม่รวมในส่วนของการประมวลผลสัญญาณที่ได้รับมา และมีขั้นตอนการทำงานเบื้องต้นดังนี้

1. สั่งการเปิดเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าโดย VI (Virtual Instrument) ที่ชื่อ PS5000Open โดยจะมี PS5000PowerSource เป็นตัวตรวจสอบแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าว่าพร้อมทำงานหรือไม่
2. ทำการตั้งค่าแต่ละช่องวัด และการตั้งค่า Trigger ด้วย PS5000Settings
3. รับข้อมูลดิจิทัลที่มาจากเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าผ่าน PS5000Block ซึ่งจะแบ่งเป็นข้อมูลจากช่องวัด A, B, C และ D ด้วย Unbundle By Name Function
4. ซึ่งหากมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นไม่ว่าในขั้นตอนใดจะมีข้อความแจ้งเตือน และทำการปิดเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าด้วย PS5000Close



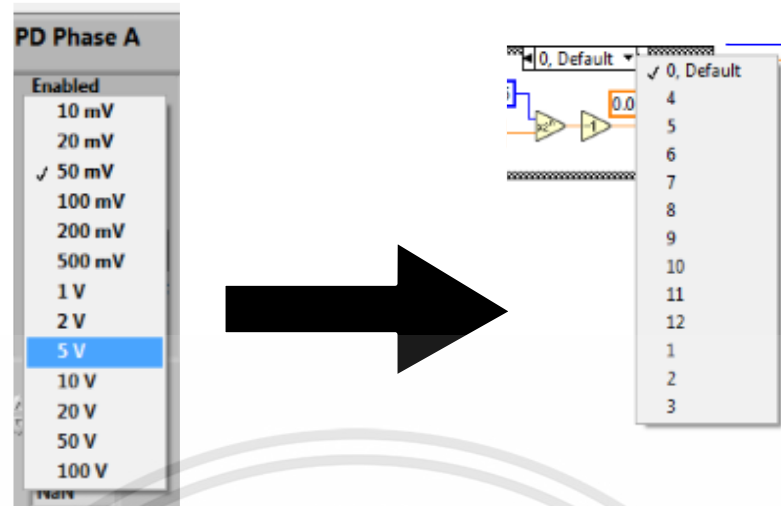
รูปที่ 3.18 Block Diagram ช่วงการทำงานเบื้องต้นของโปรแกรม

3.3.2 การแก้ปัญหาที่เกิดจากการเปลี่ยนช่วงการวัดแรงดัน

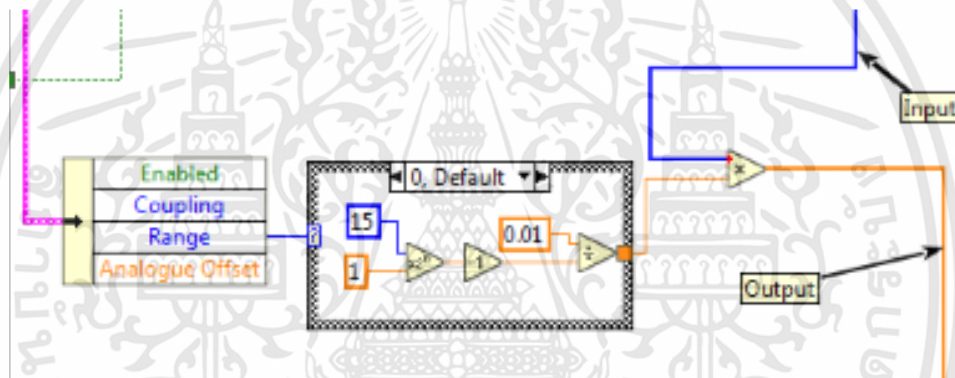
ปัญหาที่เกิดจากการเปลี่ยนช่วงการวัดแรงดัน หรือ Range ของช่องวัดแต่ละช่องนั้นเกิดเป็นปัญหาเดียวกันคือ เมื่อทำการเปลี่ยนช่วงการวัด เช่น จากช่วงแคบไปสู่ช่วงที่กว้างกว่านั้นจะทำให้สัญญาณ หรือค่าที่อ่านได้มีความผิดเพี้ยนไป และจากการศึกษา ค้นคว้า พบว่าแต่ละช่วงการวัดจะต้องนำค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่งซึ่งไม่ซ้ำกันในแต่ละช่วงมาคูณกับสัญญาณทั้งหมดเสมอ สัญญาณหรือค่าที่อ่านได้จึงจะมีความถูกต้อง

ดังนั้นแล้วจึงได้สร้าง Block Diagram สำหรับการแก้ปัญหการเปลี่ยนช่วงการวัด โดยการกำหนดให้แต่ละช่วงการวัดแทนด้วยตัวเลขหมายเลขหนึ่ง และนำตัวเลขนั้นไปกระทำกับตัวกระทำทางคณิตศาสตร์จนได้ค่าคงที่ของแต่ละช่วงการวัดนั้น จากจึงนำค่าคงที่นั้นไปคูณกับข้อมูลที่หมดก่อนจะนำไปประมวลผลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



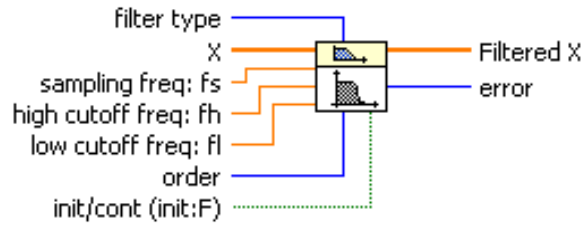
รูปที่ 3.19 การกำหนดเคสของแต่ละช่วงการวัด



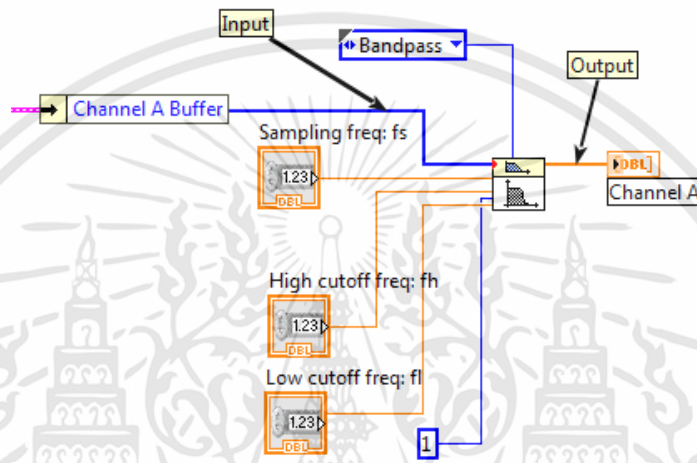
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างตัวกระทำทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้หาค่าแก้ของแต่ละช่วงการวัด

3.3.3 การกรองสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวกรองความถี่แบบดิจิทัล

เมื่อได้รับข้อมูลจากแต่ละช่องวัดแล้ว ตามที่ได้กำหนดไว้ว่าให้ช่องวัด A, B และ C เป็นการวัดสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนจากเฟส A, B และ C ตามลำดับ และให้ช่องวัด D เป็นการวัดสัญญาณแรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ จึงได้นำสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนของแต่ละช่องวัด (ยกเว้นช่องวัด D) มาทำการกรองผ่านตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบ Band Pass ด้วยโมดูล Butterworth Filter VI ซึ่งมีช่วงกรองความถี่อยู่ที่ 100 kHz - 400 kHz (สามารถปรับค่าได้) โดยให้มีค่า Sampling Frequency หรือ Sampling Rate อยู่ที่ 250 MHz หรือ Sample/s (สามารถปรับค่าได้) รูปที่ 3.21 แสดงถึงตัวอย่างโมดูลตัวกรองความถี่ที่ใช้งานในการกรองความถี่ของสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนให้เป็นไปตามมาตรฐาน และรูปที่ 3.22 แสดงถึงการใช้งานตัวกรองความถี่ชนิด Band Pass กับช่องวัด A ซึ่งจะนำไปใช้กับทั้งช่องวัด B และ C อีกด้วย



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างโมดูลตัวกรองความถี่ (Butterworth Filter)



รูปที่ 3.22 การใช้งานตัวกรองความถี่ดิจิทัลชนิด Band Pass กับช่องวัด A

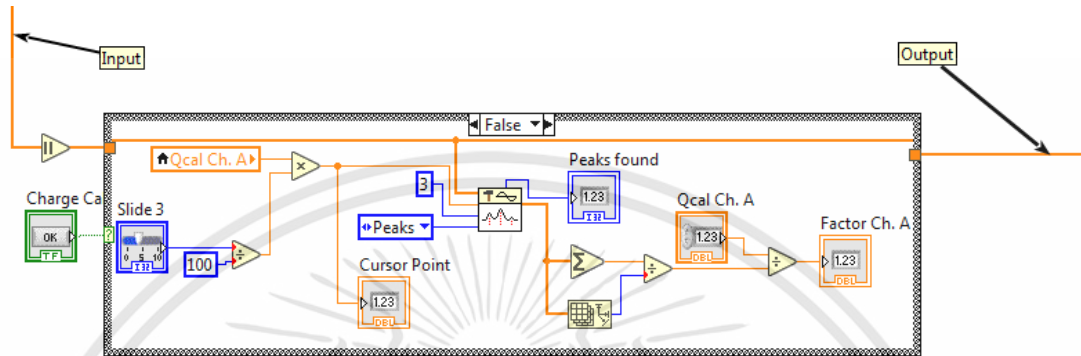
3.3.4 การเปรียบเทียบประจุ

ขั้นตอนต่อไปคือการเปรียบเทียบประจุมาตรฐาน โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้ คือ

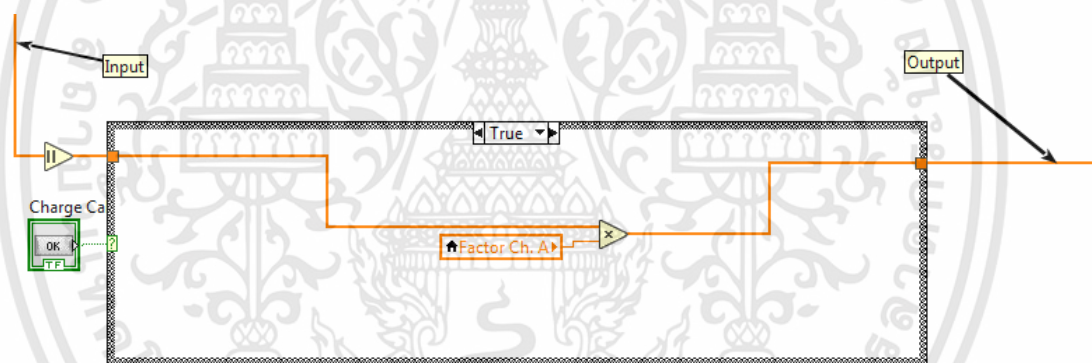
- นำข้อมูลที่ได้จากการกรองความถี่ในขั้นตอนข้างต้นซึ่งอยู่ในสถานะยังไม่ได้เปรียบเทียบ (สถานะ False) มาทำให้เป็นค่าสัมบูรณ์ (Absolute Value) โดยใช้ตัวกระทำที่ชื่อว่า Absolute Value Function เพื่อให้ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนเป็นค่าบวกทั้งหมด
- หาค่าประจุเฉลี่ยของค่าสูงสุด (peak) ซึ่งจะมีค่าสูงสุดทั้งหมด 6 ค่า เนื่องจากเครื่องเปรียบเทียบประจุมาตรฐานที่ใช้งานประจำอยู่นั้น จะจ่ายพัลส์ประจ่ออกมาทั้งหมด 6 พัลส์ โดยค่าประจุของทั้ง 6 พัลส์นั้นสามารถหาได้จากโมดูลที่ชื่อว่า Peak Detector VI ซึ่งจะต้องทำการกำหนดระดับที่ต้องการตรวจจับค่าสูงสุดด้วย จึงได้ออกแบบให้ผู้ใช้งาน (User) สามารถปรับเปลี่ยนระดับของการตรวจจับค่าสูงสุดเพื่อให้ได้พัลส์จำนวน 6 พัลส์ โดยคำนวณระดับของการตรวจจับค่าสูงสุดเป็นเปอร์เซ็นต์จากค่าประจุที่ต้องการเปรียบเทียบ
- นำค่าประจุเฉลี่ยที่วัดได้ไปหารกับค่าประจุไฟฟ้าที่ต้องการเปรียบเทียบ ซึ่งตัวกระทำหารนั้นจะสามารถรับค่าประจุที่ต้องการเปรียบเทียบได้จากตัว Control ที่ชื่อว่า Qcal Ch. A ทำให้ได้ค่า Factor ของช่องวัด A แล้วนำค่า Factor ที่ได้ไปเก็บไว้ในโมดูล Indicator ที่ใช้ชื่อว่า Factor Ch. A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

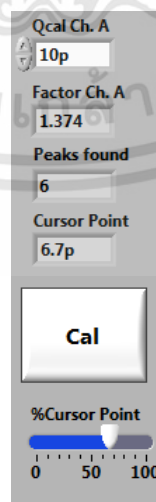
4. เมื่อทำการกดปุ่ม Cal (พื้นหลังสีขาว) ในหน้า Front Panel สถานะบนปุ่มจะเปลี่ยนเป็น Calibrated (พื้นหลังสีเขียว) จะเป็นการนำค่า Factor ที่เก็บอยู่ในโมดูล Indicator ที่ใช้ชื่อว่า Factor Ch. A มาใช้ผ่านทางโมดูล Local Variable โดยการนำค่า Factor มาคูณกับข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากช่องวัด A ทำให้อยู่ในสถานะปรับเทียบแล้ว(สถานะ True) และสามารถดูค่าประจุนสูงสุดได้จาก Indicator ที่ชื่อ Q_{\max} Ch.A



รูปที่ 3.23 Block Diagram ในสถานะที่ยังไม่ได้ปรับเทียบ (สถานะ False) ซึ่งใช้ในการเก็บค่า Scale Factor ของช่องวัด A

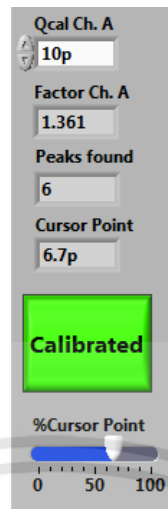


รูปที่ 3.24 Block Diagram ในสถานะที่ปรับเทียบแล้ว (สถานะ True)



รูปที่ 3.25 Front Panel ในสถานะยังไม่ได้ปรับเทียบ

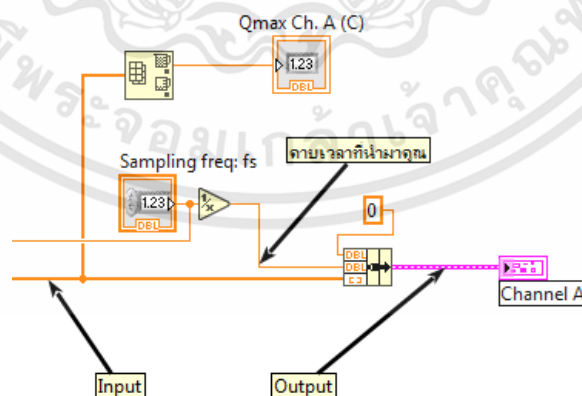
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 Front Panel ในสถานะปรับเทียบแล้ว

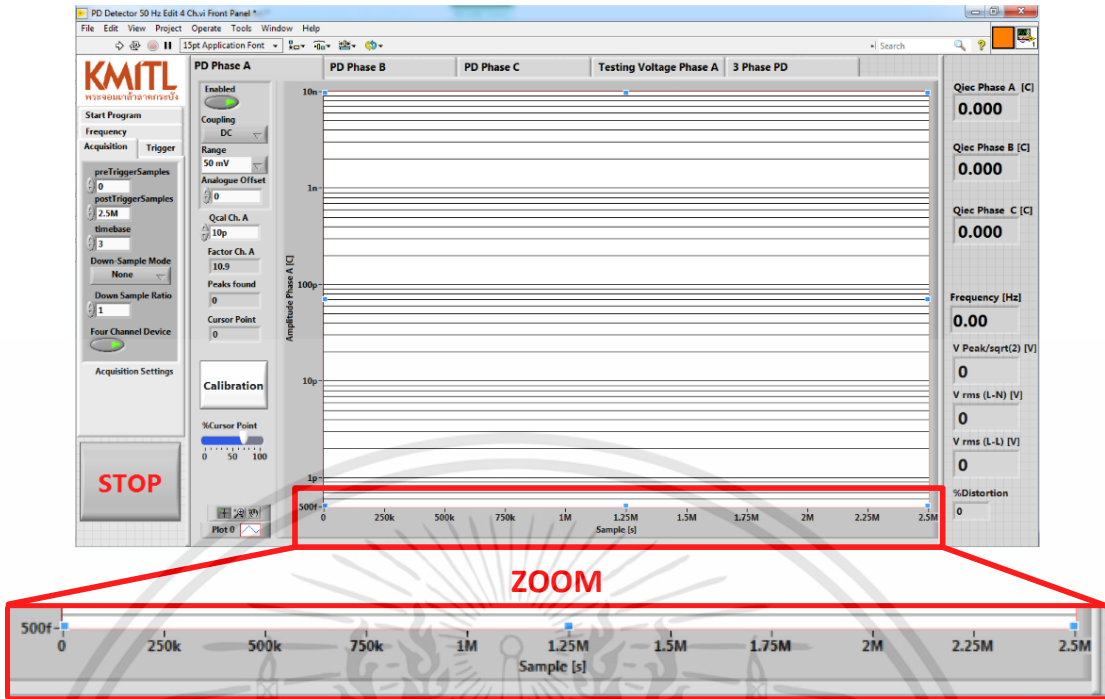
3.3.5 การอ้างอิงแกนเวลาและการแสดงผล

การแสดงผลรูปคลื่นที่วัดได้จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีการทดสอบด้วยแหล่งจ่าย ความถี่ 50 Hz และกรณีการทดสอบด้วยแหล่งจ่าย 200 Hz ซึ่งในแต่ละกรณีนั้นจะต้องแสดงผล รูปคลื่นเป็นจำนวน 1 รอบ (1 Cycle) ทำให้โปรแกรมที่ทำการออกแบบจะต้องสามารถแสดงแกน เวลาได้ทั้ง 5 ms สำหรับการทดสอบที่ 200 Hz และ 20 ms สำหรับการทดสอบที่ 50 Hz แต่จะต้อง ทำการอ้างอิงแกนเวลาให้กับข้อมูลก่อนซึ่งสามารถทำได้โดยการนำอัตราการแซมปลิงหรือ Sampling Frequency ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 125 MHz มาเปลี่ยนเป็นคาบเวลาโดยการกระทำผ่านตัวโมดูล Reciprocal Function จะได้ว่า 1 คาบเวลาของการแซมปลิงเท่ากับ 8 ns จากนั้นจึงนำเอาคาบเวลา ที่ได้ไปคูณกับจำนวนของข้อมูลทั้งหมดที่ช่องวัด A วัดได้ ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 2.5 ล้านจุดทำให้ได้ เวลาในการพิจารณาทั้งหมดเท่ากับ 20 ms ซึ่งรองรับการทดสอบทั้งกรณี 50 Hz และ 200 Hz จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปแสดงผลรูปคลื่นที่หน้า Front Panel ด้วยตัว Indicator ที่ชื่อ Channel A และกระทำขั้นตอนทั้งหมดนี้กับช่องวัด B และ C

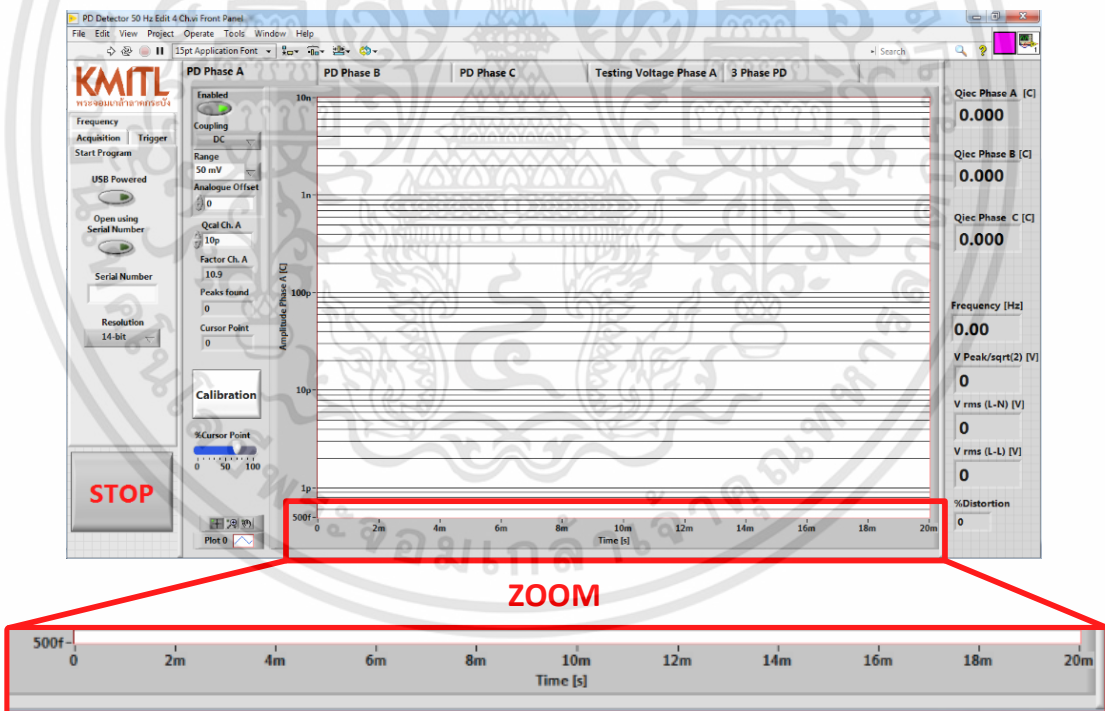


รูปที่ 3.27 Block Diagram ในการเปลี่ยนแกน X จากรูปแบบ samples ให้อยู่ในรูปแบบเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 Front Panel ของหน้าจอแสดงรูปคลื่นช่องวัด A ที่มีแกน X เป็นจำนวนการ samples



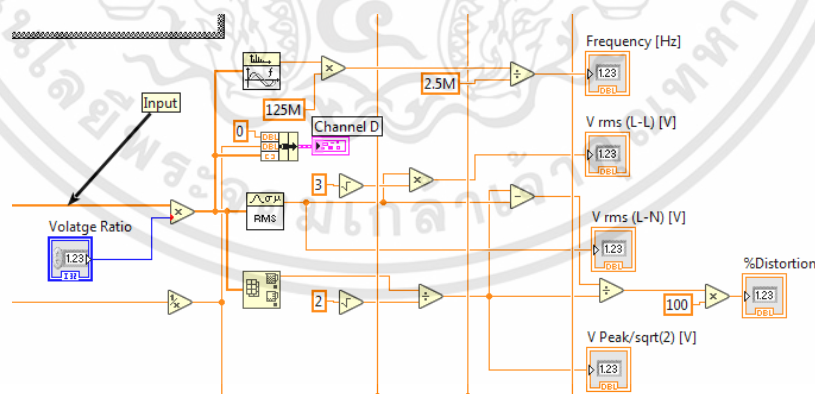
รูปที่ 3.29 Front Panel ของหน้าจอแสดงรูปคลื่นช่องวัด A ที่มีแกน X เป็นระบบเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 การวัดและแสดงผลสัญญาณแรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ

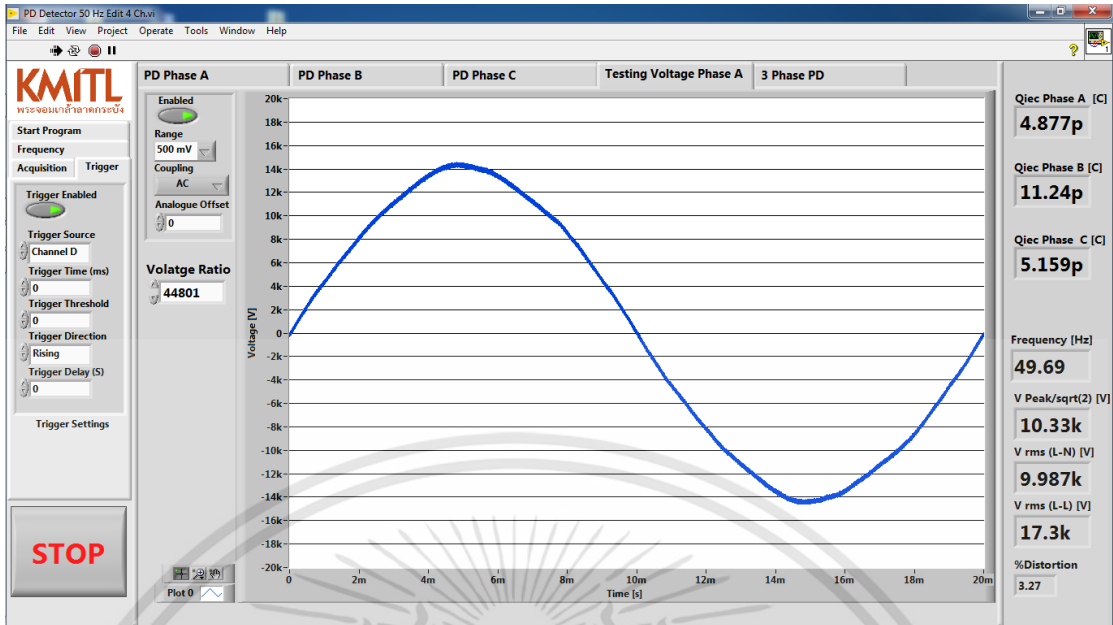
การวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 และ 200 Hz ซึ่งเป็นแรงดันที่ใช้ทดสอบนั้น จะใช้ช่องวัด D ในการรับสัญญาณที่ถูกลดทอนแล้วจากอุปกรณ์คาบเกี่ยวมาแสดงผล โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. นำสัญญาณที่วัดได้จากช่องวัด D มาคูณกับอัตราการลดทอนแรงดัน ทำให้ได้ค่าของแรงดันด้านแรงสูงที่ใช้ในการทดสอบก่อนจะถูกลดทอน เพื่อให้มีความสะดวกในการอ่านค่าแรงดันขณะทำการทดสอบ แต่ตัวเลขของอัตราการลดทอนแรงดันนั้นจะสามารถหาได้จากการทดสอบในบทที่ 4 ต่อไป ดังนั้นในบทการออกแบบนี้จึงให้อัตราการลดทอนแรงดันมีค่าเท่ากับ 1 ก่อน
2. เมื่อได้สัญญาณที่ผ่านการคูณกับอัตราการลดทอนแรงดันแล้วจึงนำสัญญาณนั้นไปหาค่าแรงดันเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square : RMS) ของแรงดันเฟส และแรงดันไลน์ด้วยโมดูล RMS VI และแสดงตัวเลขด้วย Indicator ที่ชื่อว่า $V_{RMS} (L-N)$ และ $V_{RMS} (L-L)$
3. นอกจากการแสดงค่าเฉลี่ยกำลังสองแล้ว ยังแสดงค่ายอดที่หารด้วยรากที่สองของสองอีกค่าหนึ่ง ($V_{peak}/\sqrt{2}$) เพื่อพิจารณาค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันกระแสสลับที่นำมาทดสอบ โดยจะต้องมีค่าไม่เกิน 5% โดยค่า $V_{peak}/\sqrt{2}$ นั้นจะแสดงด้วย Indicator ที่ชื่อว่า $V_{peak}/\sqrt{2}$
4. นำค่าแรงดันเฉลี่ยกำลังสอง และค่า $V_{peak}/\sqrt{2}$ มาคำนวณด้วยตัวกระทำทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันกระแสสลับเมื่อเทียบกับแรงดันเฟสเฉลี่ยกำลังสอง ($V_{RMS} (L-N)$) และแสดงค่าด้วย Indicator ที่ชื่อว่า %Distortion
5. ทำการวัดความถี่ของสัญญาณด้วยตัวโมดูล Buneman Frequency Estimator
6. นำสัญญาณที่ได้ไปผ่านการอ้างอิงแกนเวลาด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับที่กระทำกับช่องวัด A, B และ C ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.3.4 แล้วแสดงผลรูปคลื่นของสัญญาณไปที่หน้า Front Panel

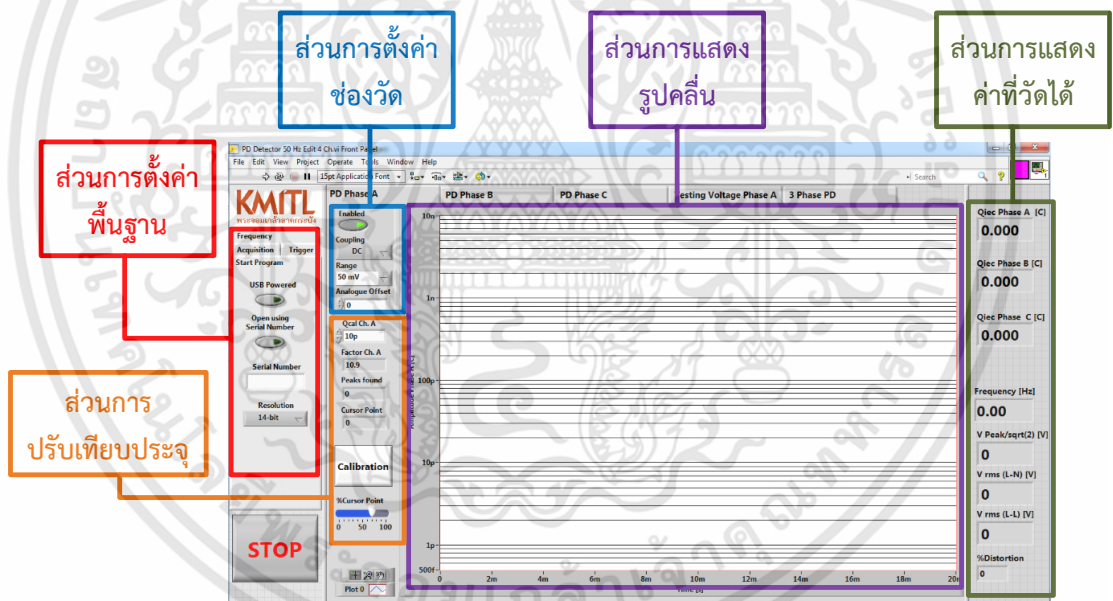


รูปที่ 3.30 Block Diagram ในการวัดและแสดงผลสัญญาณแรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 Front Panel ของหน้าจอแสดงรูปคลื่นแรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 3.32 ตัวอย่างหน้า Front Panel ของโปรแกรมที่ทำการออกแบบเสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบ

เมื่อทำการออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว อุปกรณ์คาบเกี่ยว และโปรแกรมตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็จะต้องนำสิ่งที่พัฒนาขึ้นมาทั้งหมดนั้นมาทำการทดสอบเพื่อ เก็บผล ตรวจสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของระบบตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนที่สร้างขึ้นว่าสามารถตรวจจับจากดิสชาร์จบางส่วนได้ถูกต้องแม่นยำ และตรงตามมาตรฐาน IEC 60270:2015 หรือไม่

ดังนั้นแล้วในบทที่ 4 หัวข้อการทดสอบนี้จะกล่าวถึงหัวข้อย่อยในการทดสอบดังต่อไปนี้

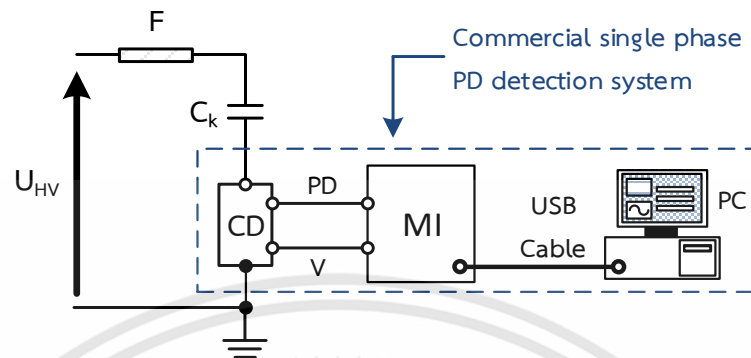
1. การทดสอบตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่แรงดันพิกัด เพื่อตรวจสอบการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนเมื่อนำตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ได้ทำการประกอบสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วนั้นไปใช้ในงานทดสอบที่พิกัดแรงดัน $50 \text{ kV}_{\text{rms}}$
2. การปรับเทียบแรงดันด้วยอุปกรณ์วัดแรงดันสูง (Voltage Divider) ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. ที่ทราบอัตราการลดทอนแรงดันที่แน่นอน เพื่อนำไปปรับเทียบกับค่า Voltage Ratio ในโปรแกรมแสดงผลการดิสชาร์จบางส่วน
3. การปรับเทียบประจุด้วยเครื่องปรับเทียบมาตรฐาน (Pulse Calibrator) ตัวอ้างอิง ที่จะจ่ายค่าประจุที่มีความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งใช้งานประจำอยู่ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. เพื่อปรับเทียบค่าประจุให้โปรแกรมการวัดและแสดงผลการดิสชาร์จบางส่วนแสดงผลได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ
4. การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวัสดุทดสอบจำลองการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบ 1 เฟส เป็นการทดสอบด้วยวัสดุทดสอบที่สามารถจำลองการเกิดการดิสชาร์จรูปแบบต่างๆ ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ โคโรนาดิสชาร์จด้านแรงสูง โคโรนาดิสชาร์จด้านแรงต่ำ การดิสชาร์จบางส่วนตามผิว และการดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อวัสดุ
5. การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบแบบสามเฟส เพื่อยืนยันประสิทธิภาพในการทดสอบจริงว่าระบบการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟสที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นได้
6. การทดสอบกับแหล่งจ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ 200 Hz เป็นการทดสอบแบบไม่ต่อวัสดุทดสอบเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการใช้งานระบบตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนที่พัฒนาขึ้นกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 4 สาย ความถี่ 200 Hz

4.1 การทดสอบตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่แรงดันพิกัด

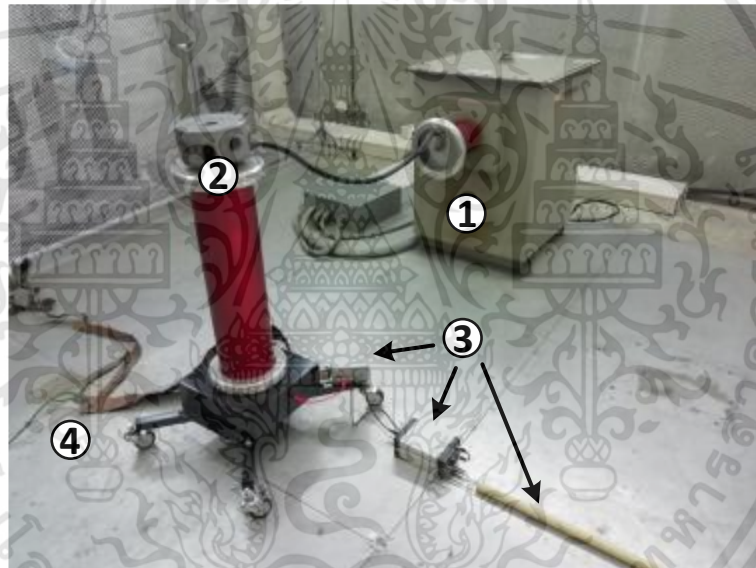
เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันการออกแบบตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวทั้งสามตัวที่ได้ทำการออกแบบไว้ให้มีพิกัดแรงดัน $50 \text{ kV}_{\text{rms}}$ โดยไม่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนจากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเองในขณะนำไปใช้งาน

ทำการทดสอบโดยการนำตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการพัฒนาขึ้นต่ออนุกรมกับอุปกรณ์คาบเกี่ยวและระบบตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนแบบ 1 เฟส ที่ใช้งานประจำอยู่ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. และทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ด้วยหม้อแปลงทดสอบพิกัด 75 kV และเมื่อทำการจ่ายแรงดันถึงพิกัดแรงดัน $50 \text{ kV}_{\text{rms}}$ แล้ว ให้ทำการคงค่าแรงดันนั้นไว้เป็นเวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1 นาที่ จึงทำการลดแรงดันลงจนเป็นสถานะศูนย์ และทำการทดสอบเช่นเดียวกันกับตัวเก็บประจุอีก
- 2 ตัว



รูปที่ 4.1 วงจรจำลองการทดสอบตัวเก็บประจุที่แรงดันพิกัด



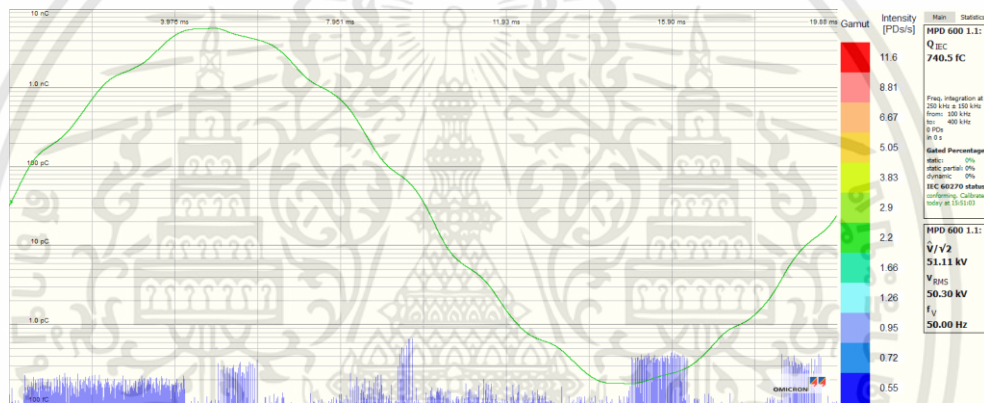
รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบตัวเก็บประจุที่แรงดันพิกัด

- 1) หม้อแปลงทดสอบพิกัด 75 kV_{rms} 2) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการพัฒนาขึ้น 3) ระบบตรวจจับการเกิดการดีสชาร์จบางส่วนแบบหนึ่งเฟสที่ใช้งานประจำอยู่ ณ ห้องปฏิบัติการฯ
- 4) จุดต่อหลักดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนของตัวเก็บประจุเฟส A
ที่แรงดันพิกัด 50 kV_{rms}
(ค่าประจุสูงสุด 797.7 fC ที่ 50.13 kV_{RMS})



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนของตัวเก็บประจุเฟส B
ที่แรงดันพิกัด 50 kV_{rms}
(ค่าประจุสูงสุด 740.5 fC ที่ 50.30 kV_{RMS})



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนของตัวเก็บประจุเฟส C
ที่แรงดันพิกัด 50 kV_{rms}
(ค่าประจุสูงสุด 747.2 fC ที่ 50.06 kV_{RMS})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบพบว่าเมื่อทำการจ่ายแรงดันทดสอบจนถึง $50 \text{ kV}_{\text{rms}}$ และคงค้างระดับแรงดันนั้นไว้เป็นเวลา 1 นาทีแล้ว พบว่าประจุที่วัดได้นั้นมีค่าต่ำกว่า 1 pC นับได้ว่าไม่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้นภายในตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นทั้งสามตัว จึงเป็นการยืนยันได้ว่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นนั้นมีพิกัดแรงดันตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ และสามารถนำไปใช้ในการทดสอบการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟสได้

4.2 การเปรียบเทียบแรงดันด้วยอุปกรณ์วัดแรงดันสูง (Voltage Divider)

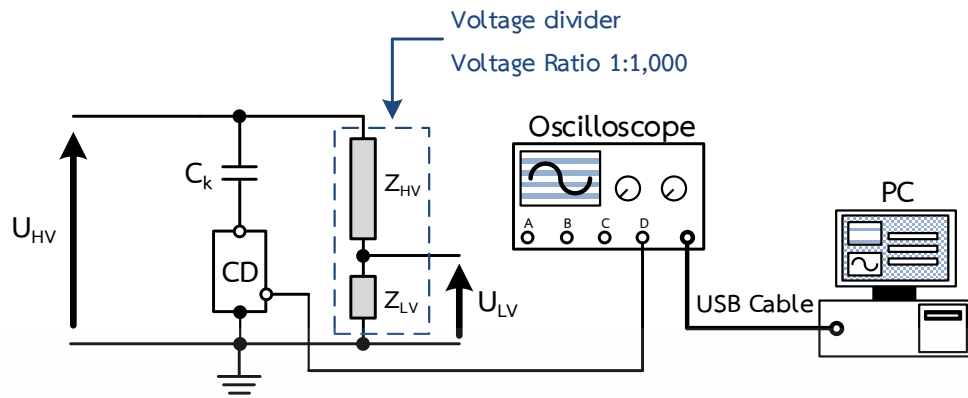
การเปรียบเทียบแรงดันเป็นการทดสอบโดยไม่ต่อวัสดุทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบการลดทอนแรงดันของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์คาบเกี่ยวทั้งสามเฟส ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกันเป็นโวลต์เตจดีไวเดอร์ โดยมีตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเป็นอิมพีแดนซ์ด้านแรงดันสูง และมีอุปกรณ์คาบเกี่ยวเป็นอิมพีแดนซ์ด้านแรงต่ำ

วิธีการในเปรียบเทียบแรงดันคือ นำโวลต์เตจดีไวเดอร์พิกัด 50 kV ที่ทราบอัตราการลดทอนแรงดันที่แน่นอนคือ $1:1,000$ มาทำการต่อขนานกับวงจรทดสอบและทำการจ่ายแรงดันทดสอบให้กับวงจรด้วยหม้อแปลงทดสอบพิกัดแรงดันสูง 75 kV จากนั้นทำการวัดแรงดันด้านแรงดันต่ำที่วัดได้จากโวลต์เตจดีไวเดอร์ แล้วนำอัตราการลดทอนมาคูณกับแรงดันต่ำที่วัดได้จะทำให้ทราบค่าแรงดันทดสอบที่จ่ายให้กับวงจรในขณะนั้น จากนั้นให้นำค่าแรงดันต่ำที่โปรแกรมวัดได้ไปหารกับค่าแรงดันทดสอบที่จ่ายให้กับวงจร จะทำให้ทราบอัตราการลดทอนแรงดันของระบบวัดที่พัฒนาขึ้นของเฟสนั้นๆ โดยทำการหาอัตราการลดทอนที่ระดับแรงดันจำนวน 5 ระดับแรงดัน ซึ่งได้แก่ 10 kV , 15 kV , 20 kV , 25 kV และ 30 kV เพื่อนำมาเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำที่สุด โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่นำมาเปรียบเทียบแรงดันแสดงดังรูปที่ 4.6 วงจรจำลองการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันแสดงดังรูปที่ 4.7 และวงจรการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันแสดงดังรูปที่ 4.8 ผลการหาอัตราการลดทอนแรงดันเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.1

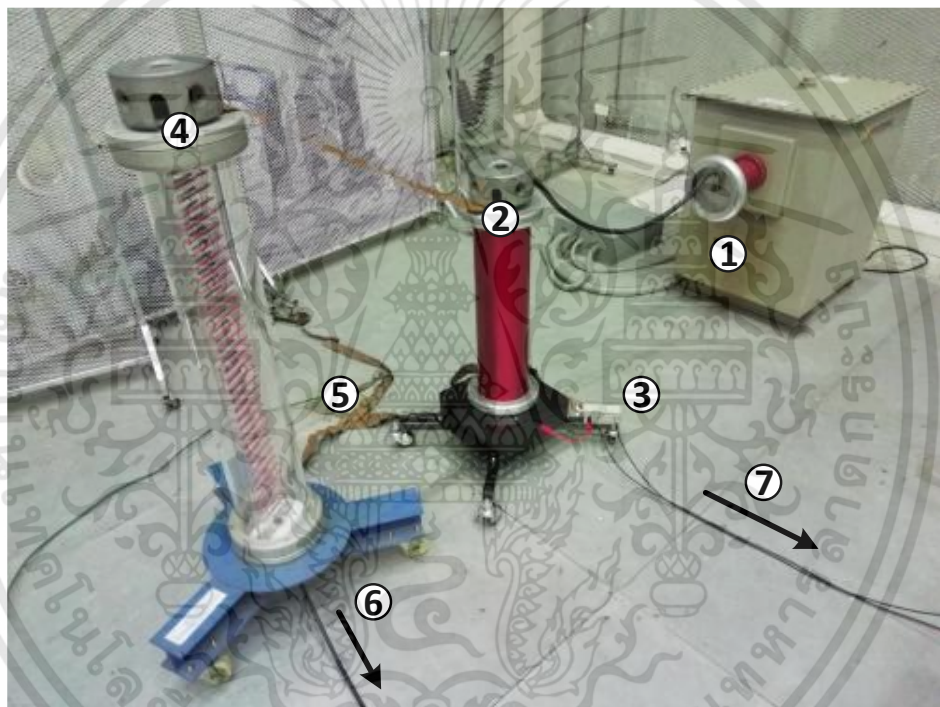


รูปที่ 4.6 โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่นำมาเปรียบเทียบแรงดัน

1) อิเล็กโตรดด้านแรงสูง 2) จุดต่อไปยังหลักดิน 3) ด้านขาออกของสัญญาณแรงดันที่ถูกลดทอนแล้ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



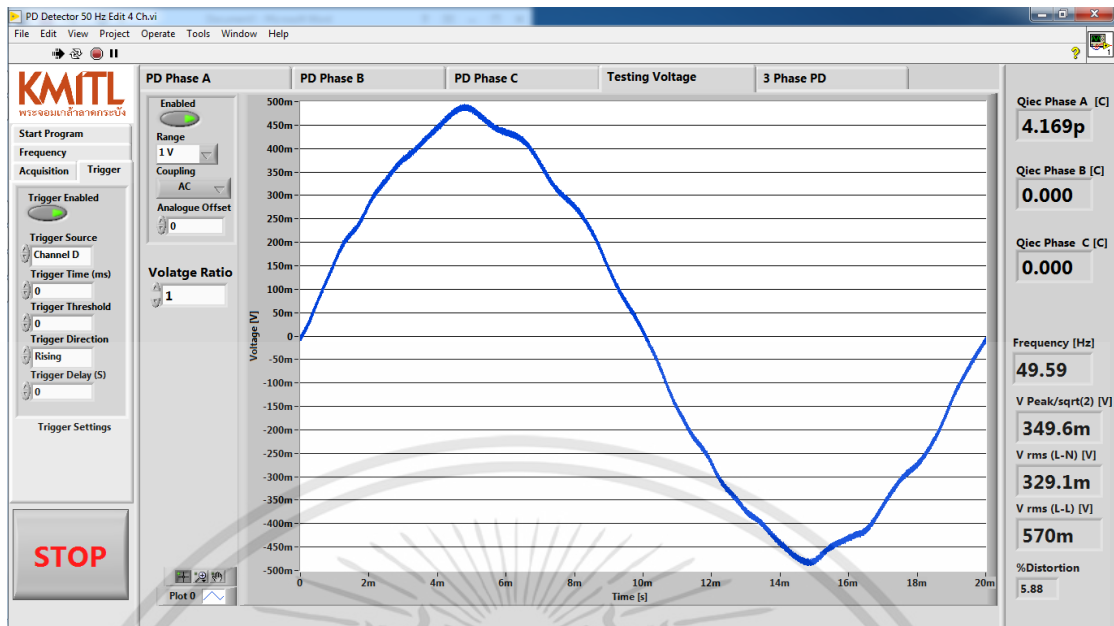
รูปที่ 4.7 วงจรจำลองการทดสอบปรับเทียบแรงดัน



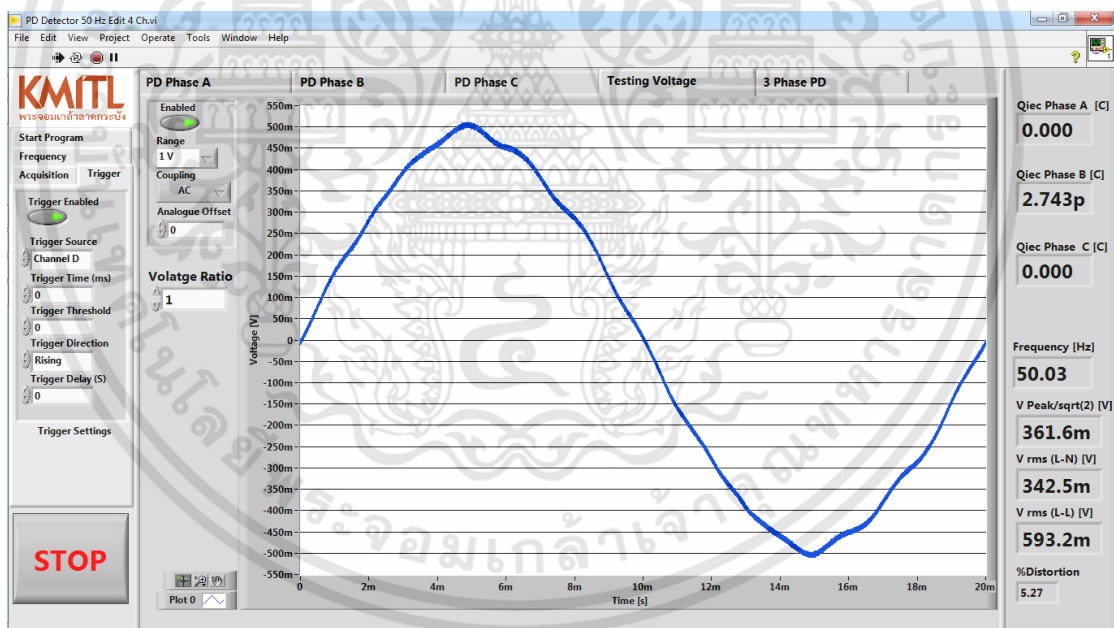
รูปที่ 4.8 วงจรการทดสอบปรับเทียบแรงดัน

- 1) หม้อแปลงทดสอบพิกัด 75 kV
- 2) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเฟส C
- 3) อุปกรณ์คาบเกี่ยวเฟส C
- 4) โวลต์เตจติไวเตอร์พิกัด 50 kV
- 5) จุดต่อหลักเดิน
- 6) สายสัญญาณขาออกด้านแรงดันต่ำของโวลต์เตจติไวเตอร์
- 7) สายสัญญาณขาออกด้านแรงดันต่ำของอุปกรณ์คาบเกี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

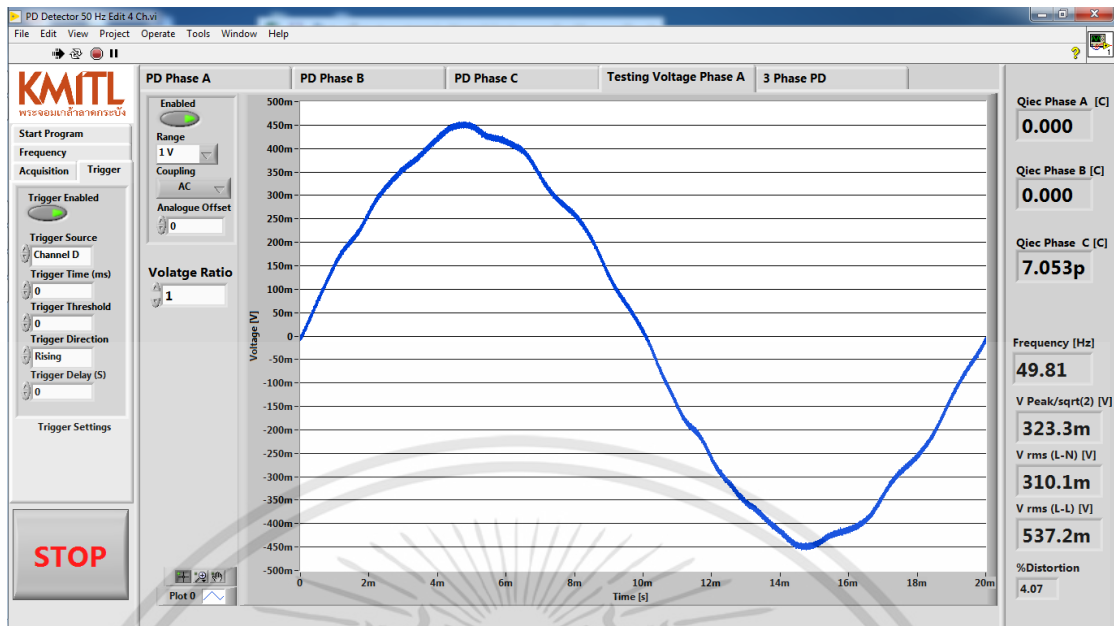


รูปที่ 4.9 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นขณะทำการปรับเทียบแรงดัน ของตัวเก็บประจุ และอุปกรณ์คานาเกี่ยวเฟส A



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นขณะทำการปรับเทียบแรงดัน ของตัวเก็บประจุและอุปกรณ์คานาเกี่ยวเฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นขณะทำการปรับเทียบแรงดัน ของตัวเก็บประจุและอุปกรณ์คาบเกี่ยวเฟส C

ตารางที่ 4.1 การหาค่าเฉลี่ยอัตราการลดทอนแรงดันของแต่ละเฟส

แรงดันทดสอบ	อัตราการลดทอนแรงดัน เฟส A	อัตราการลดทอนแรงดัน เฟส B	อัตราการลดทอนแรงดัน เฟส C
10 kV	44935	45088	44967
15 kV	44854	45160	45012
20 kV	44728	44796	44913
25 kV	44726	44702	44835
30 kV	44762	45020	44947
เฉลี่ย	44800.8	44953.2	44934.8

4.3 การปรับเทียบประจุด้วยเครื่องปรับเทียบมาตรฐาน (Pulse Calibrator)

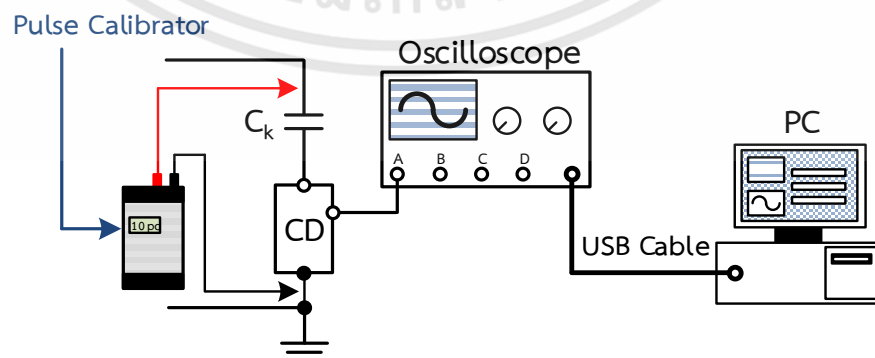
การทดสอบปรับเทียบประจุนี้เป็นการแสดงตัวอย่างการปรับเทียบประจุให้กับวงจรการทดสอบ ซึ่งจะต้องทำการปรับเทียบทุกครั้งก่อนทำการทดสอบ หรือมีการเปลี่ยนวัสดุทดสอบ หรือมีการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ต่างๆ ภายในวงจรทดสอบ เพราะค่าเก็บประจรวมของวงจรจะเปลี่ยนแปลงไปทุกครั้งที่มีการต่อเพิ่มหรือปลดวัสดุทดสอบออกจากวงจร หรือมีการเปลี่ยนตัวอุปกรณ์อื่นใดภายในวงจร หากไม่ทำการปรับเทียบจะทำให้การตรวจวัดขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนผิดพลาดได้

วิธีการปรับเทียบประจุคือ นำเครื่องปรับเทียบมาตรฐานหรือ Pulse Calibrator ซึ่งมีระดับประจุดังนี้ 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, -100, -50, -20, -10, -5, -2 และ -1 pC มาต่อขนานกับวัสดุทดสอบ โดยการนำด้านขั้วสายสีแดงต่อเข้ากับด้านแรงดันสูง และนำด้านขั้วสายสีดำต่อเข้ากับจุดต่อหลักดิน ส่วนในกรณีที่ไม่ได้ต่อวัสดุทดสอบนั้นให้นำด้านขั้วสายสีแดงต่อเข้ากับอิเล็กทรอนิกส์ด้านแรงสูงของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว ส่วนด้านซ้ายสายสีดำต่อเข้ากับจุดต่อหลักดินเหมือนดังเช่นในกรณีที่มีวัสดุทดสอบ ต่อมาจึงทำการเปิดเครื่องปรับเทียบประจุมาตรฐาน และเลือกค่าประจุที่จะปรับเทียบให้เหมาะสมกับวัสดุทดสอบ จากนั้นให้ทำการระบุค่าที่ต้องการปรับเทียบในช่อง Control ที่ชื่อว่า Q_{cal} ให้ตรงกับเฟสที่ต้องการปรับเทียบประจุ และปรับระดับ %Cursor point ให้ได้ยอดสูงสุด จำนวน 6 ยอด เนื่องจากเครื่องปรับเทียบประจุมาตรฐานนั้นจะทำการจ่ายพัลส์ประจุทั้งหมด 6 พัลส์ จากนั้นกดปุ่ม Calibration พื้นหลังสีขาว จนปุ่มเปลี่ยนสถานะเป็นพื้นหลังสีเขียว จะเป็นการแสดงสถานะปรับเทียบแล้ว ณ เฟสที่ต้องการเรียบร้อย จากนั้นให้ปลดด้านซ้ายสายสีแดงเพื่อไปปรับเทียบกับเฟสอื่นต่อไปจนครบทุกเฟส เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการปรับเทียบประจุ ซึ่งกระบวนการปรับเทียบประจุทั้งหมดนั้นจะต้องทำในขณะที่ไม่จ่ายแรงดันให้กับวงจรทดสอบ วงจรจำลองการทดสอบปรับเทียบประจุแสดงดังรูปที่ 4.13 วงจรการทดสอบปรับเทียบประจุแสดงดังรูปที่ 4.14 หน้าต่างโปรแกรมก่อนและหลังปรับเทียบแสดงดังรูปที่ 4.15 ก. และ ข. ตามลำดับ

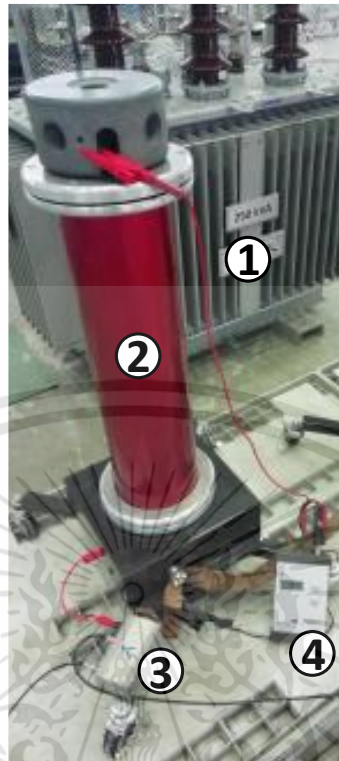


รูปที่ 4.12 เครื่องปรับเทียบมาตรฐานหรือ Pulse Calibrator ที่ใช้ในการปรับเทียบประจุ
 1) ด้านขาออกของสัญญาณประจุปรับเทียบ 2) จอแสดงผลค่าของประจุที่ต้องการปรับเทียบ
 3) ปุ่มปรับระดับของประจุที่ต้องการปรับเทียบ

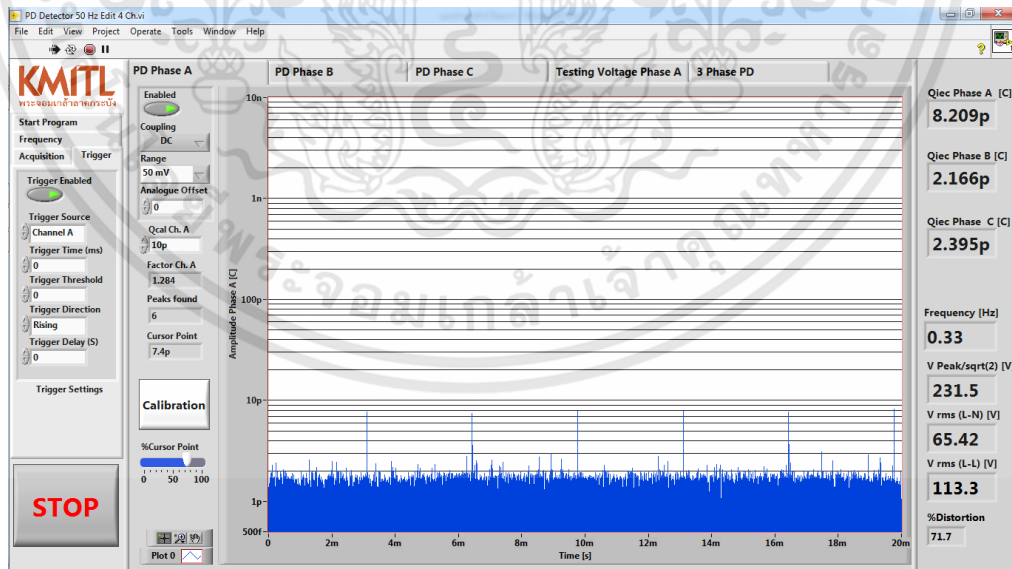


รูปที่ 4.13 วงจรจำลองการทดสอบปรับเทียบประจุที่เฟส A ในกรณีไม่มีวัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

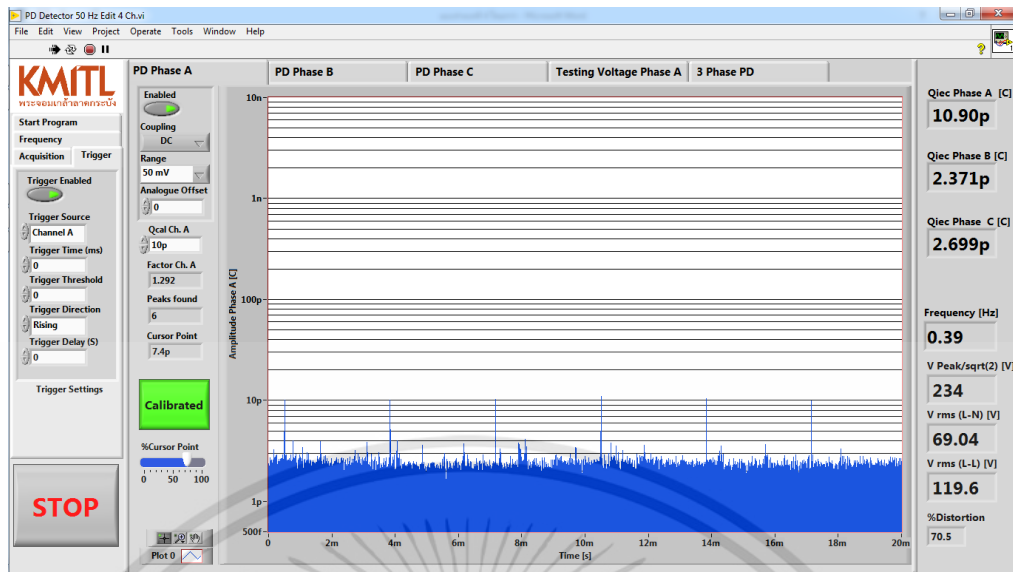


รูปที่ 4.14 วงจรการทดสอบปรับเทียบประจุที่เฟส A ในกรณีไม่มีวัสดุทดสอบ
 1) หม้อแปลงทดสอบ 2) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเฟส A 3) อุปกรณ์คาบเกี่ยวเฟส A
 4) เครื่องปรับเทียบประจุมาตรฐาน



ก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข.)

รูปที่ 4.15 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมในขณะการปรับเทียบประจุ ก.) ก่อนทำการปรับเทียบประจุ ข.) หลังทำการปรับเทียบประจุ

4.4 การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวัสดุทดสอบจำลองการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

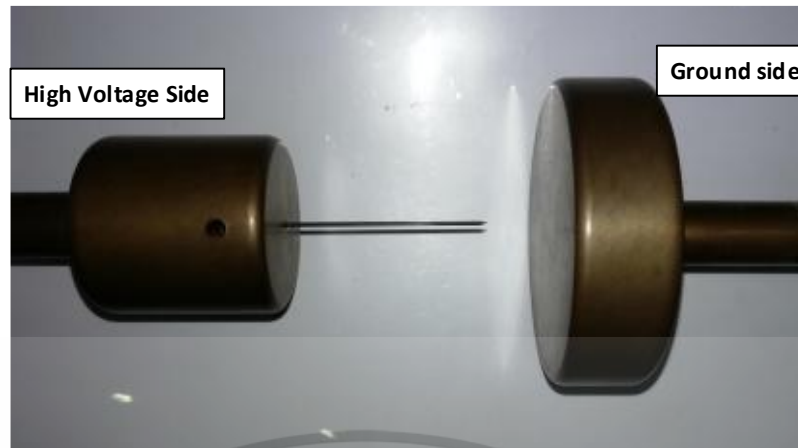
การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวัสดุทดสอบจำลองการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน เป็นการทดสอบด้วยวัสดุทดสอบที่สามารถจำลองการเกิดการดิสชาร์จรูปแบบต่างๆ ได้ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ โครโนดิสชาร์จด้านแรงสูง โครโนดิสชาร์จด้านแรงต่ำ การดิสชาร์จบางส่วนตามผิว และการดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวน

โดยมีแนวคิดในการทดสอบคือ เมื่อเฟส A เกิดการดิสชาร์จบางส่วนในรูปแบบต่างๆ ขึ้นตามที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว ที่เฟส B และ C จะสามารถตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนได้หรือไม่ หากได้ผลการตรวจจับจะมีรูปแบบอย่างไร

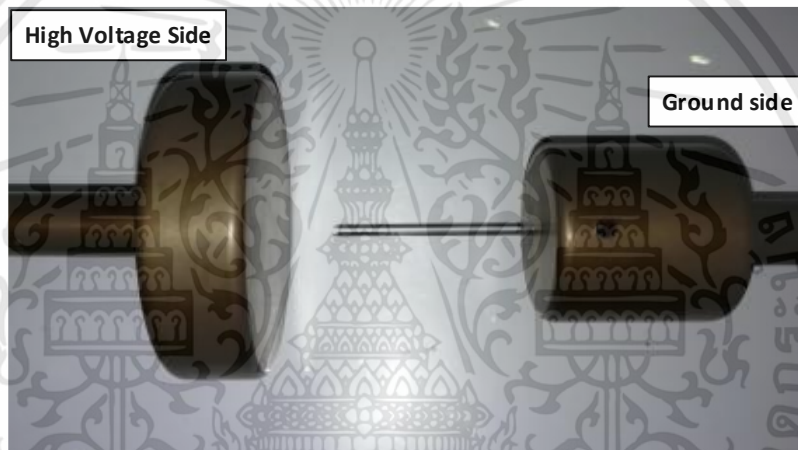
ดังนั้นแล้วจึงได้ทำการติดตั้งวัสดุทดสอบจำลองทั้ง 4 แบบตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นซึ่งทราบระดับแรงดันที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนแต่ละรูปแบบเข้ากับเฟส A และทำการจ่ายด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 4 สาย ความถี่พลังงาน 50 Hz ผ่านหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน Star - Delta พิกัด 416/24,000 V ควบคุมแรงดันโดยใช้หม้อแปลงปรับค่าได้แบบสามเฟส และทำการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนทั้งเฟส A, B และ C รวมทั้งตรวจวัดแรงดันทดสอบที่เฟส A โดยก่อนการทดสอบนั้นจะต้องทำการปรับเทียบประจุ และตรวจสอบสัญญาณรบกวนก่อนเสมอ มิให้มีค่าเกินกว่า 50 % ของขนาดการดิสชาร์จบางส่วนที่มาตรฐานยอมรับได้ ซึ่งในที่นี้อ้างอิงพื้นฐานการทดสอบหม้อแปลงชนิดแห้งที่มีค่าการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนยอมรับได้ไม่เกิน 10 pC ดังนั้นแล้วสัญญาณรบกวนจะต้องมีค่าไม่เกิน 5 pC

วัสดุทดสอบจำลองการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนทั้ง 4 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 4.16 - 4.19 ตัวอย่างวงจรจำลองการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.20 ตัวอย่างวงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.21 การตรวจสอบสัญญาณรบกวนแสดงดังรูปที่ 4.22 และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.23- 4.26

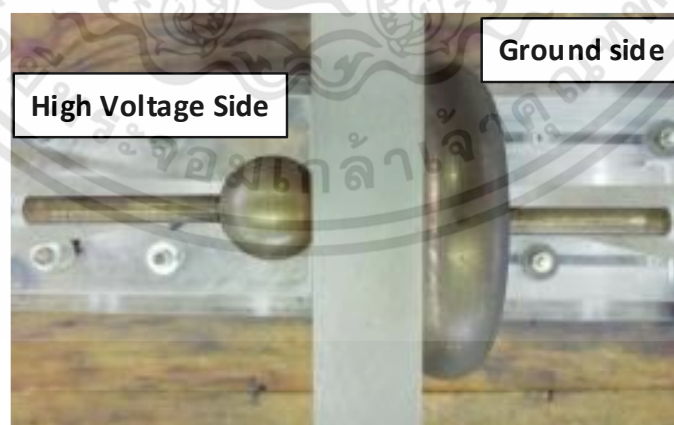
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 วัสดุทดสอบสำหรับจำลองการเกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงสูง

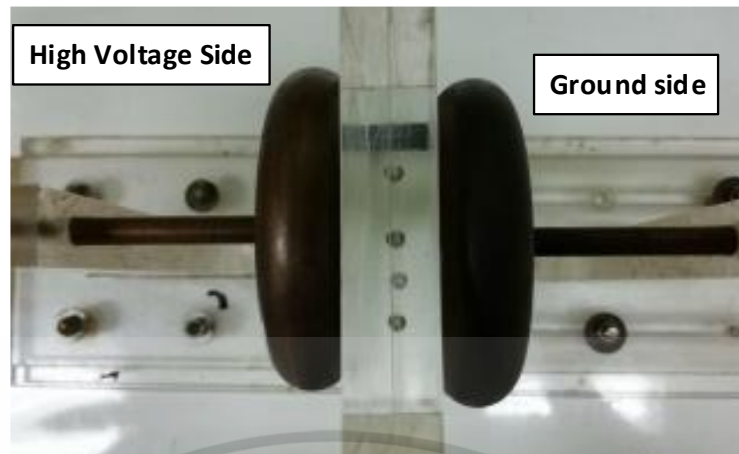


รูปที่ 4.17 วัสดุทดสอบสำหรับจำลองการเกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงต่ำ

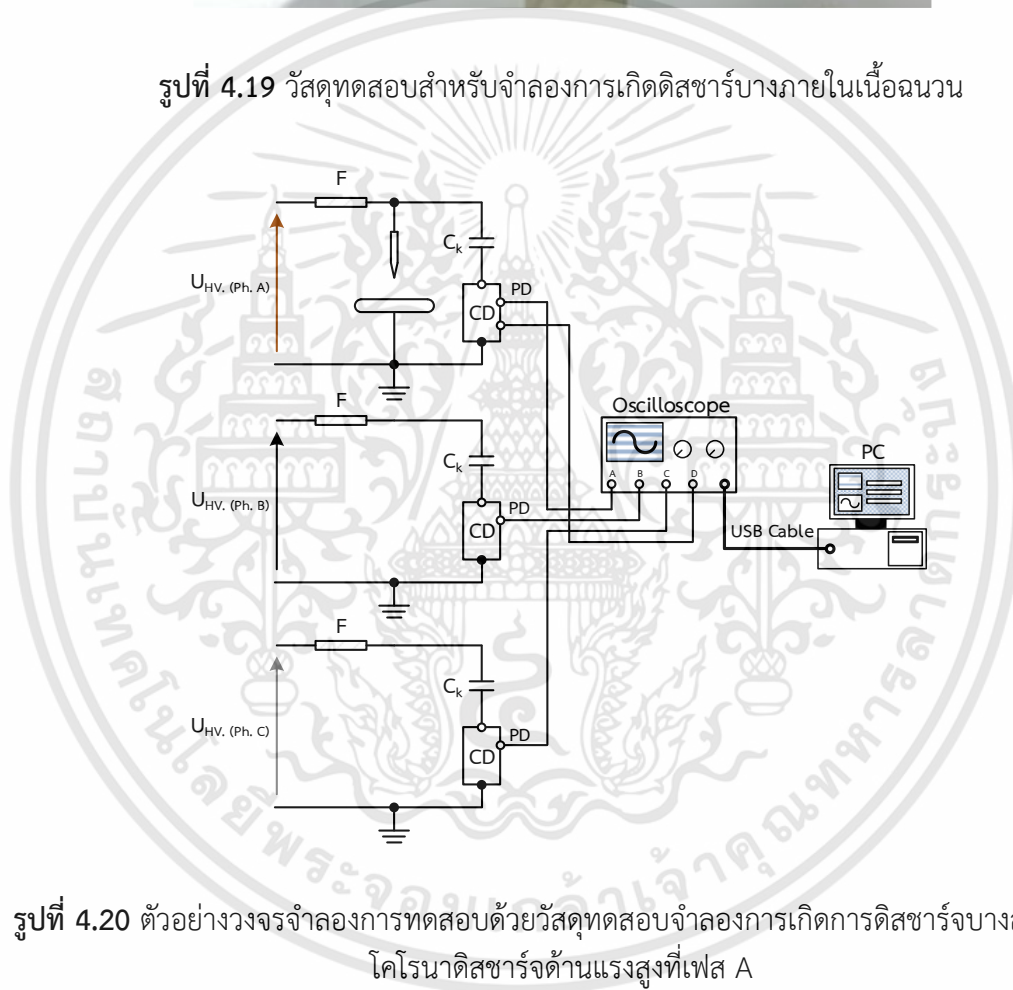


รูปที่ 4.18 วัสดุทดสอบสำหรับจำลองการเกิดดีสชาร์จบางส่วนตามผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

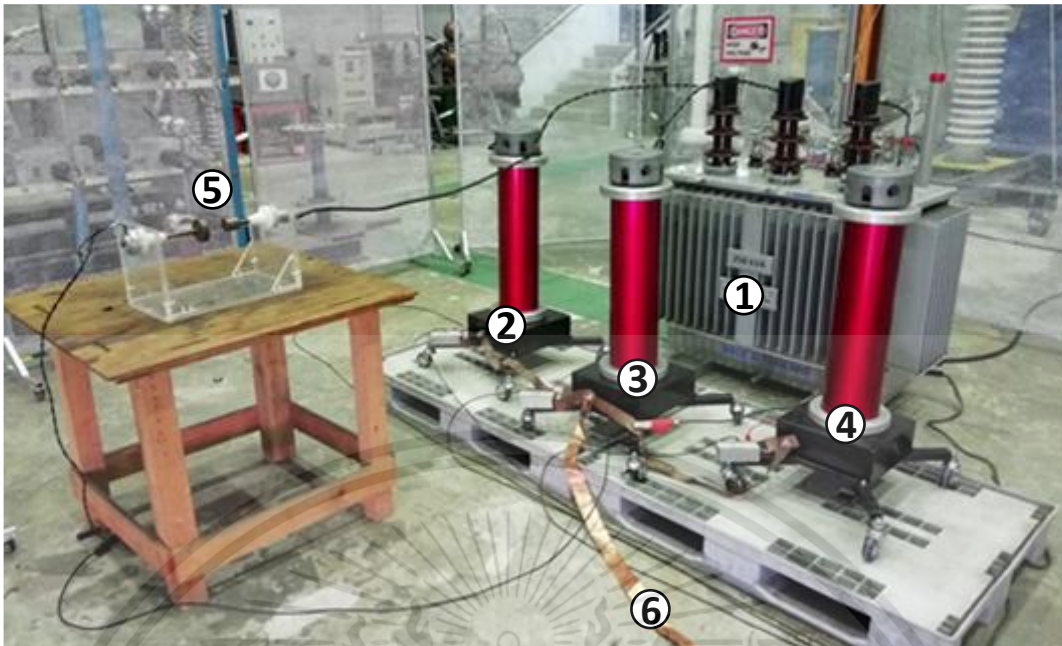


รูปที่ 4.19 วัสดุทดสอบสำหรับจำลองการเกิดดิซชาร์จภายในเนื่อฉนวน



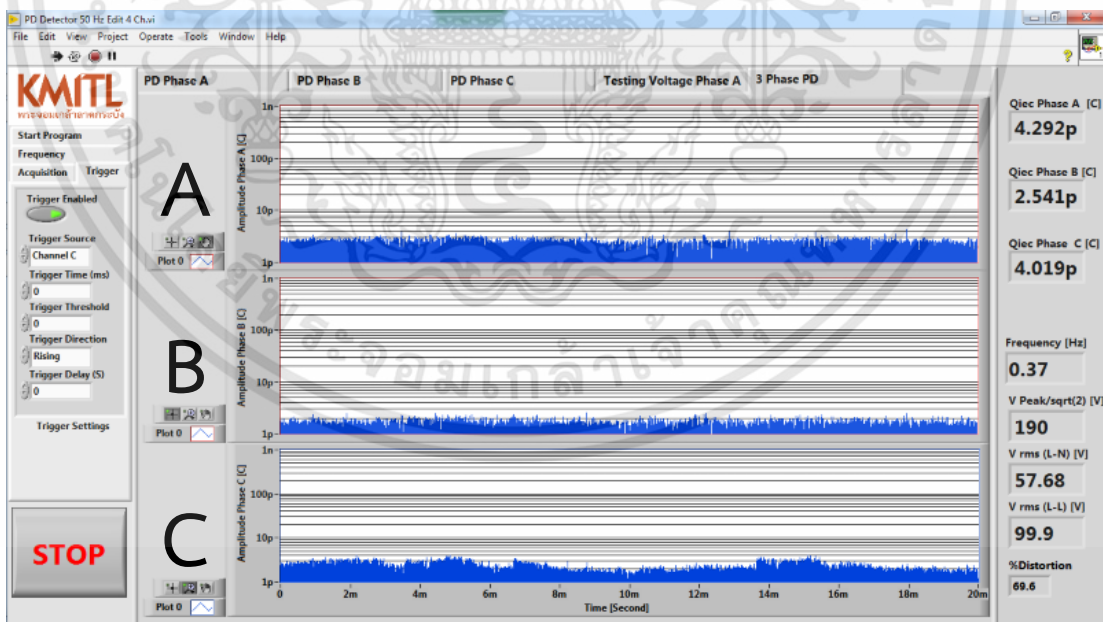
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างวงจรจำลองการทดสอบด้วยวัสดุทดสอบจำลองการเกิดการดิซชาร์จบางส่วนชนิดโคโรนาดิซชาร์จด้านแรงสูงที่เฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



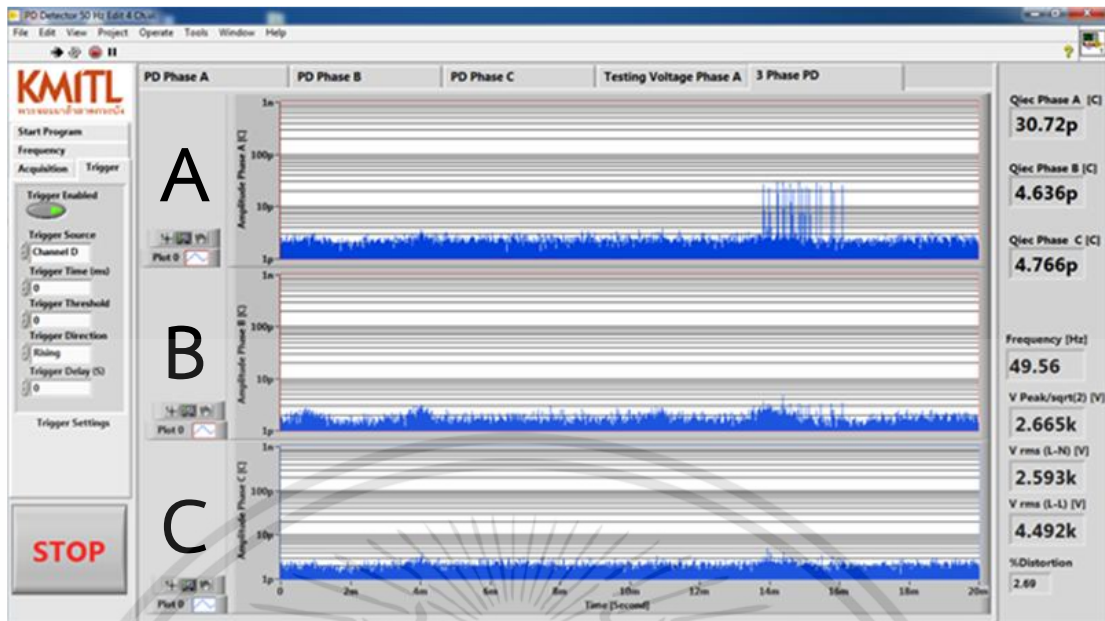
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างวงจรการทดสอบด้วยวัสดุทดสอบจำลองการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนชนิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงสูงที่เฟส A

- 1) หม้อแปลงทดสอบ 2) ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์คานเกี่ยวเฟส A
- 3) ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์คานเกี่ยวเฟส B 4) ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์คานเกี่ยวเฟส C
- 5) วัสดุทดสอบจำลองการเกิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงสูง 6) สายต่อฝากไปยังจุดต่อหลักดิน

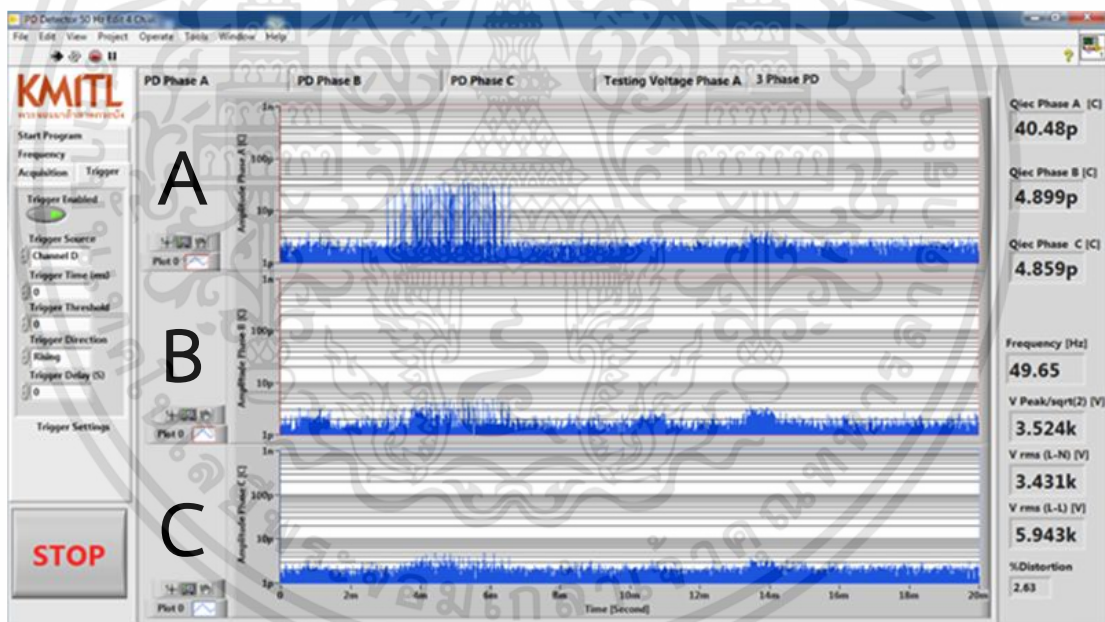


รูปที่ 4.22 การตรวจสอบระดับของสัญญาณรบกวนก่อนทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

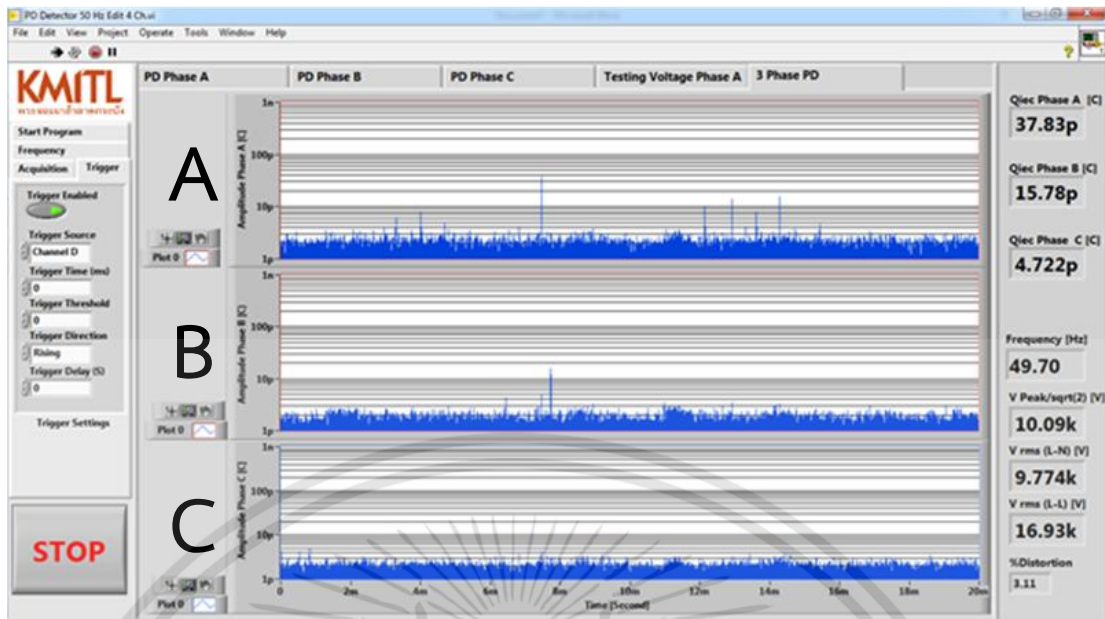


รูปที่ 4.23 ผลการเกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงสูงเมื่อติดตั้งวัสดุทดสอบจำลองที่เฟส A

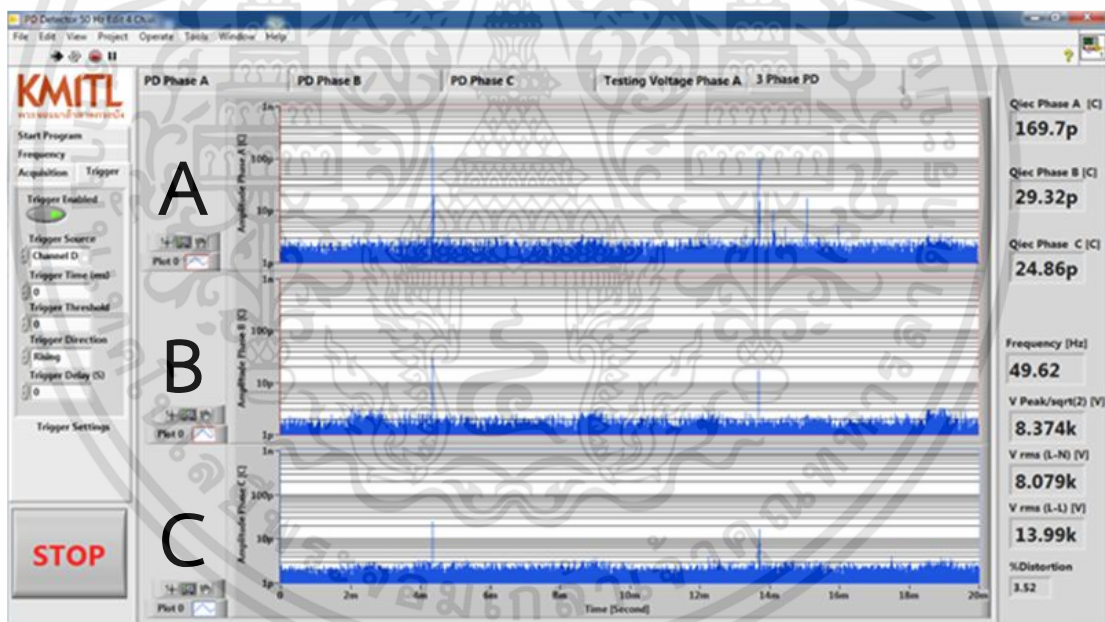


รูปที่ 4.24 ผลการเกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงต่ำเมื่อติดตั้งวัสดุทดสอบจำลองที่เฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ผลการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวเมื่อติดตั้งวัสดุทดสอบจำลองที่เฟส A



รูปที่ 4.26 ผลการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวนเมื่อติดตั้งวัสดุทดสอบจำลองที่เฟส A

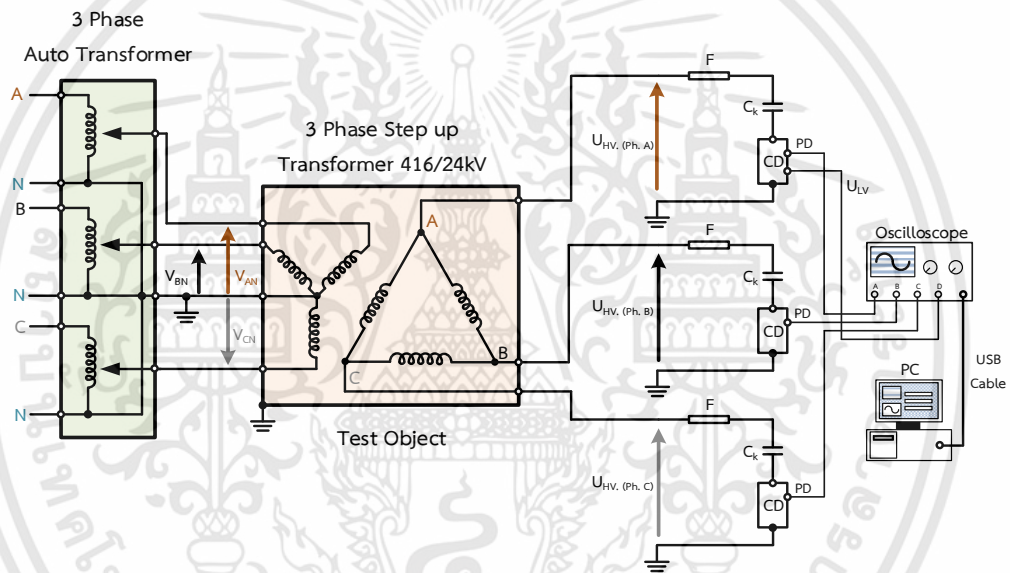
จากผลการทดสอบพบว่า การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนที่เฟส A นั้นจะสามารถตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนได้ที่เฟส B และ C ด้วยเช่นกัน แต่จะมีขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนที่น้อยกว่าเฟส A รวมทั้งรูปแบบการเกิดการดิสชาร์จนั้นจะไม่สมบูรณ์เท่ากับเฟส A ที่ตั้งใจให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

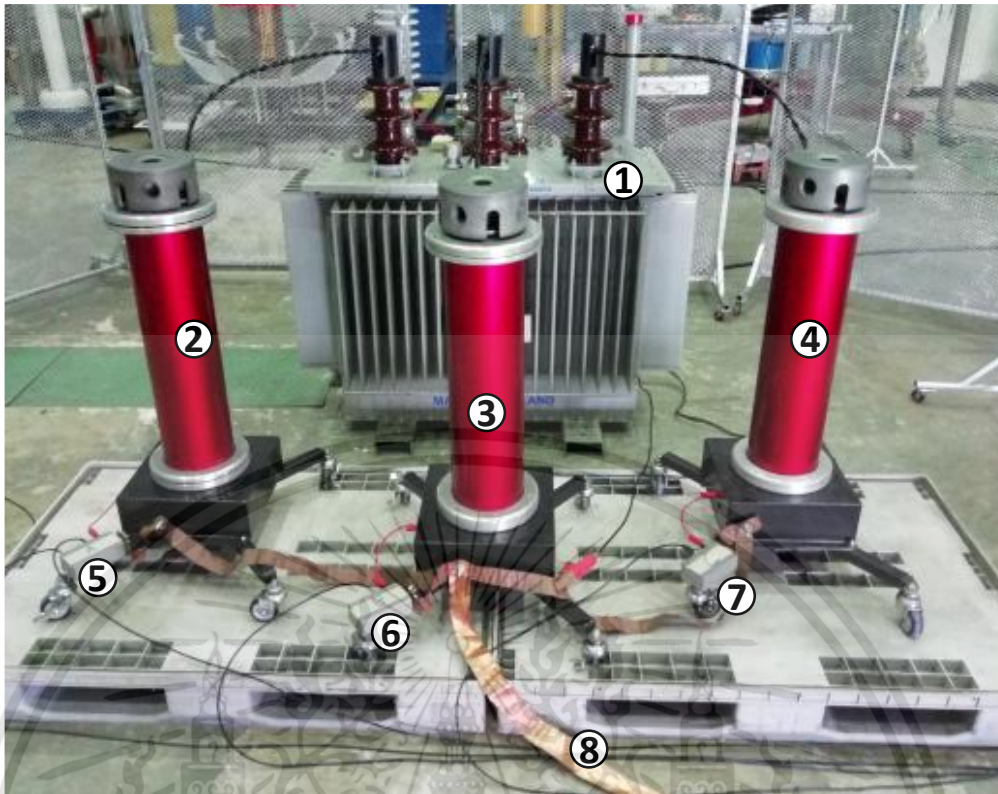
4.5 การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบแบบสามเฟส

การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบแบบสามเฟส เพื่อยืนยันประสิทธิภาพในการทดสอบจริงว่าระบบการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟสที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเชื่อถือได้

ในการทดสอบนี้จะใช้หม้อแปลงเพิ่มแรงดันที่ใช้เป็นหม้อแปลงทดสอบในการทดสอบหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 ที่ผ่านมาเป็นวัสดุทดสอบด้วย เพื่อทำการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงทดสอบเอง ทำการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 4 สาย ความถี่พลังงาน 50 Hz ผ่านหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน Star - Delta พิกัด 416/24,000 V ควบคุมแรงดันโดยใช้หม้อแปลงปรับค่าได้แบบสามเฟส และทำการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนทั้งเฟส A, B และ C รวมทั้งตรวจวัดแรงดันทดสอบที่เฟส A โดยก่อนการทดสอบนั้นจะต้องทำการปรับเทียบประจุ และตรวจสอบสัญญาณรบกวนก่อนเสมอ

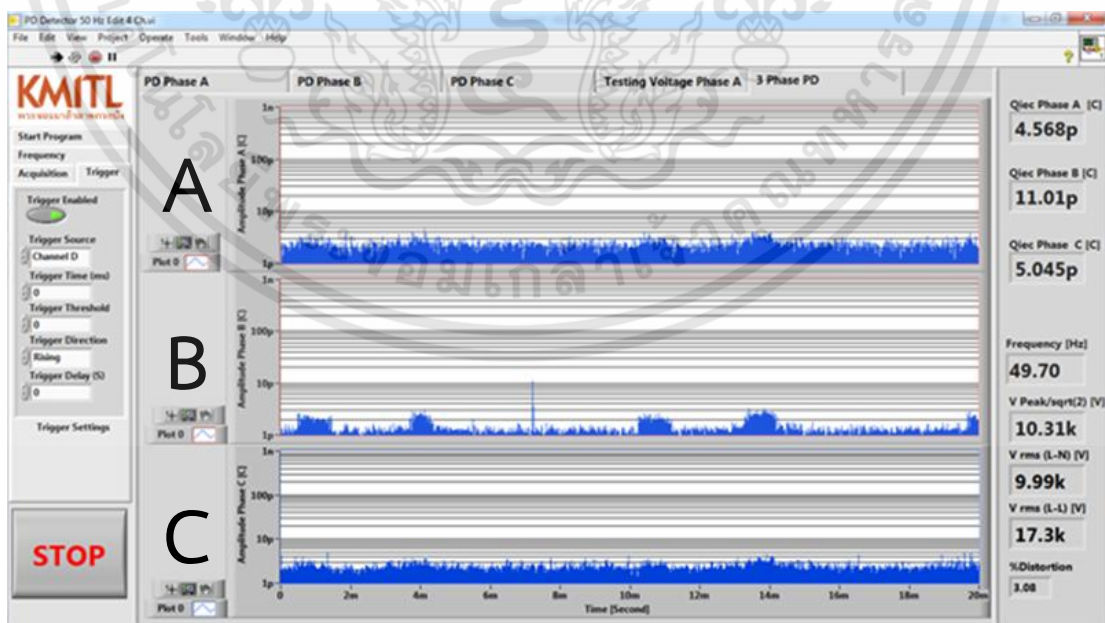


รูปที่ 4.27 วงจรจำลองการทดสอบการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบแบบสามเฟส



รูปที่ 4.28 วงจรการทดสอบการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบแบบสามเฟส

- 1) หม้อแปลงทดสอบ และวัสดุทดสอบ
- 2) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเฟส A
- 3) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเฟส B
- 4) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเฟส C
- 5) อุปกรณ์คาบเกี่ยวเฟส A
- 6) อุปกรณ์คาบเกี่ยวเฟส B
- 7) อุปกรณ์คาบเกี่ยวเฟส C
- 8) สายต่อฝากไปยังจุดต่อหลักดิน



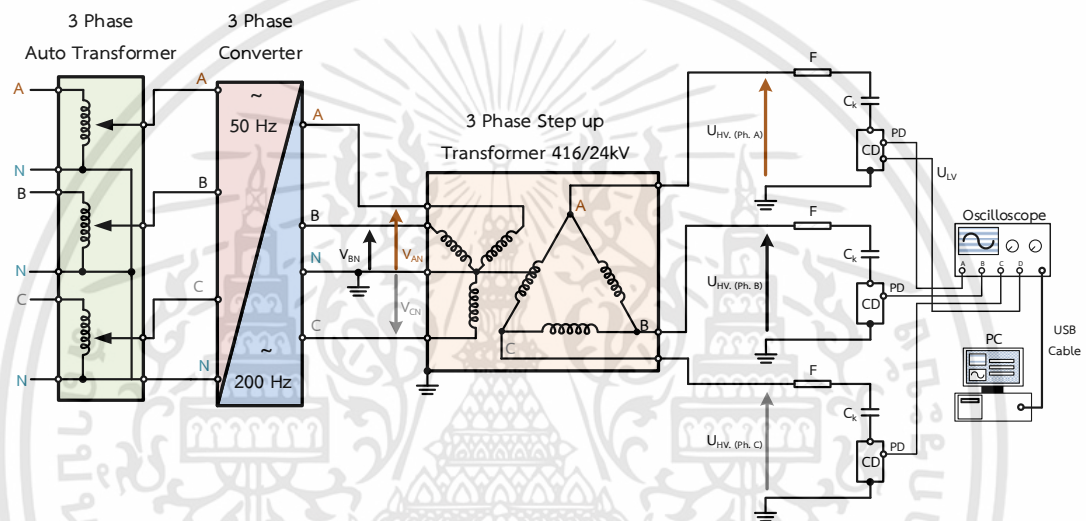
รูปที่ 4.29 ผลการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงทดสอบแบบสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

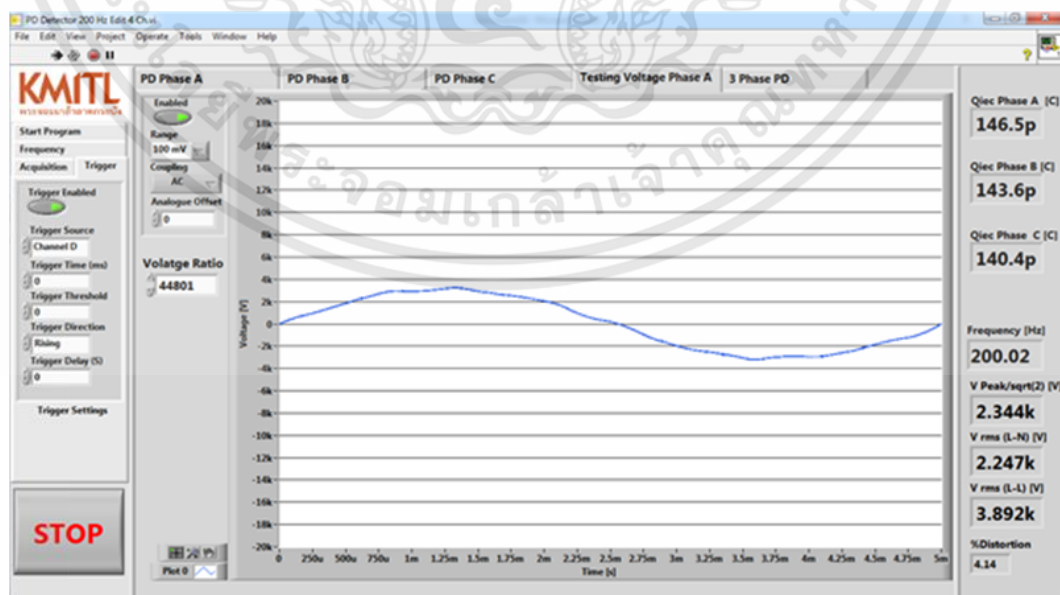
จากการทดสอบพบว่าหม้อแปลงทดสอบแบบสามเฟส Star - Delta พิกัด 416/24,000 ที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบด้วยนั้นเกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้นที่เฟส B ขนาด 11.01 pC ที่แรงดันเฟส 9.99 kV หรือที่แรงดันไลน์ 17.3 kV ซึ่งสามารถตรวจจับได้ด้วยโปรแกรมตรวจจับการดิสชาร์จที่พัฒนาขึ้น

4.6 การทดสอบกับแหล่งจ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ 200 Hz

เป็นการทดสอบแบบไม่มีวัสดุทดสอบ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกับแหล่งจ่าย 200 Hz โดยใช้คอนเวอร์เตอร์แปลงความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 50 Hz เป็น 200 Hz เพื่อใช้ในการทดสอบการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60076 - 3 ซึ่งต้องใช้แหล่งจ่ายความถี่ 200 Hz ในการทดสอบ

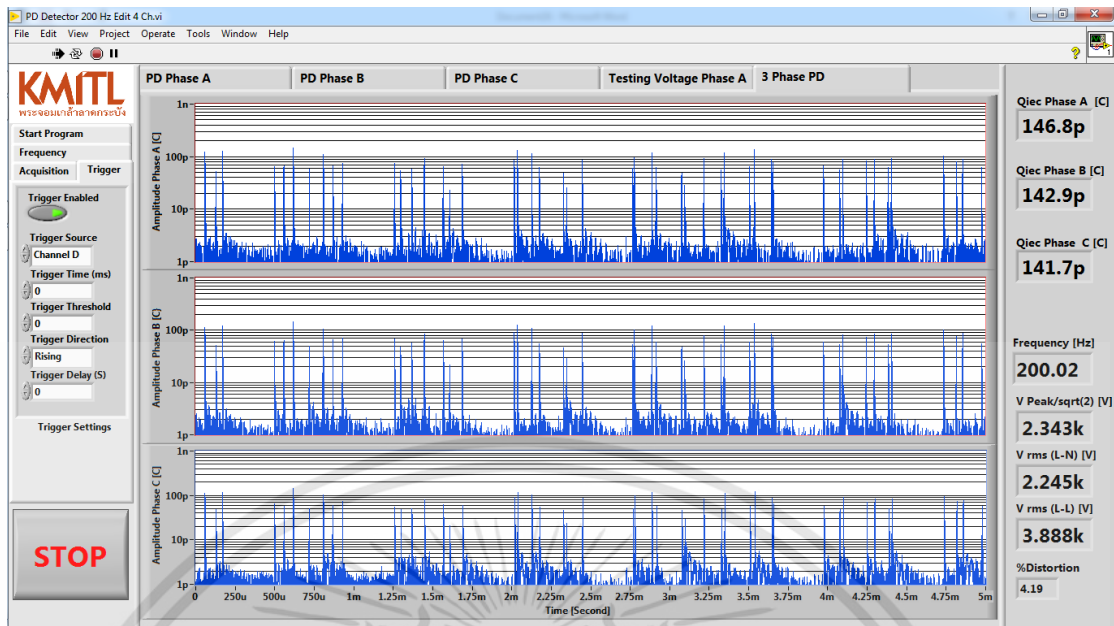


รูปที่ 4.30 วงจรจำลองการทดสอบกับแหล่งจ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ 200 Hz



รูปที่ 4.31 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 Hz ที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 สัญญาณรบกวนจากคอนเวอร์เตอร์ที่ตรวจวัดได้

จากผลการทดสอบพบว่าสัญญาณการดิสซาร์จบางส่วนที่วัดได้จากทั้งสามเฟสนั้นถูกรบกวนโดยสัญญาณการสวิตซ์จากฝั่งแรงดันต่ำ ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบที่ความถี่ 200 Hz ได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาอุปกรณ์ หรือวงจรการทดสอบต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการออกแบบและประกอบสร้างระบบตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟสที่เสร็จสิ้นแล้วนั้น เมื่อนำอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นซึ่งประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวขนาด 1 nF พิกัดแรงดัน 50 kV_{rms} จำนวน 3 ตัว อุปกรณ์คาบเกี่ยวจำนวน 3 ตัว และโปรแกรมตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟสไปทดสอบนั้นสามารถสรุปผลการทดสอบแบ่งตามหัวข้อทดสอบได้ดังนี้

5.1.1 การทดสอบตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่แรงดันพิกัด

จากการทดสอบในหัวข้อนี้พบว่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวจำนวน 3 ตัวที่ได้ประกอบสร้างขึ้นนั้นมีค่าความเก็บประจุอยู่ที่ 1 nF ตามที่ได้ออกแบบไว้และมีค่าความคลาดเคลื่อนของค่าเก็บประจุมากที่สุดเพียง 2.9 % ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ และมีพิกัดแรงดัน 50 kV_{rms} โดยที่ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวแต่ละตัวนั้นได้ผ่านการทดสอบที่พิกัดแรงดันแล้วและไม่ก่อให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้น (Free of PD) จากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเอง จึงสามารถนำตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ประกอบสร้างขึ้นนั้นไปใช้ในการทดสอบการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270:2015 ได้

5.1.2 การปรับเทียบแรงดันด้วยอุปกรณ์วัดแรงดันสูง (Voltage Divider)

เมื่อได้ทำการประกอบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์คาบเกี่ยวเป็นจำนวนอย่างละ 3 ตัวแล้ว จึงได้ทำการกำหนดคู่ของตัวเก็บประจุและอุปกรณ์คาบเกี่ยวตัวที่ 1 เป็นเฟส A ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์คาบเกี่ยวตัวที่ 2 เป็นเฟส B และตัวเก็บประจุและอุปกรณ์คาบเกี่ยวตัวที่ 3 เป็นเฟส C จากนั้นจึงได้ทำการปรับเทียบแรงดันของแต่ละเฟสทำให้ทราบอัตราการลดทอนแรงดันของแต่ละเฟสดังนี้

ตารางที่ 5.1 อัตราการลดทอนแรงดันของแต่ละเฟส

เฟส	อัตราการลดทอนแรงดัน
A	44801
B	44953
C	44935

ซึ่งอัตราการลดทอนแรงดันของแต่ละเฟสนี้เป็นข้อมูลที่จำเป็นต้องการใช้ในการใช้ตั้งค่าภายในโปรแกรมตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน เมื่อต้องการวัดสัญญาณแรงดันทดสอบของเฟสนั้นๆ

5.1.3 การเปรียบเทียบประจุ

การเปรียบเทียบประจุด้วยเครื่องเปรียบเทียบประจุมาตรฐาน คือการทำให้โปรแกรมตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนนั้นทราบค่าประจุที่อ่านได้ในขณะนั้นเป็นค่าเท่าใด ซึ่งจากการทดสอบพบว่าการใช้งานเครื่องเปรียบเทียบประจุมาตรฐาน ร่วมกับโปรแกรมการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนที่ได้ออกแบบขึ้นมานั้นสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี โปรแกรมสามารถรับค่าประจุเปรียบเทียบที่จ่ายให้กับวงจรทดสอบ และเปรียบเทียบด้วยตัวโปรแกรมพร้อมทั้งแสดงผลตรงกับค่าประจุเปรียบเทียบที่กำหนดไว้

5.1.4 การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวัสดุทดสอบจำลองการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า โปรแกรมที่ออกแบบขึ้นมานั้นสามารถแสดงรูปแบบการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้ตรงตามชนิดของวัสดุทดสอบจำลองแบบ 1 เฟส อีกทั้งการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนที่เฟสใดเฟสหนึ่ง เช่น เฟส A ที่มีการติดตั้งวัสดุทดสอบจำลองการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนรูปแบบต่างๆ โปรแกรมสามารถตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้ตรงตามเฟสที่กำหนดไว้ และยังสามารถตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้จากเฟส B และ C แต่ค่าประจุที่วัดได้นั้นจะมีขนาดที่น้อยกว่าเฟส A อีกทั้งรูปแบบการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนนั้นจะมีความสมบูรณ์น้อยกว่าเฟส A

5.1.5 การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบแบบสามเฟส

จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าระบบตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้น สามารถตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนของวัสดุทดสอบแบบสามเฟสได้ ซึ่งในที่นี้คือหม้อแปลงในระบบจำหน่ายพิกัด 416/24,000 V พบว่าเกิดการดิสชาร์จบางส่วนภายในชั้นที่เฟส B ที่แรงดันเฟส 9.99 kV หรือที่แรงดันไลน์ 17.3 kV

5.1.6 การทดสอบกับแหล่งจ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ 200 Hz

จากการทดสอบพบว่าการใช้งานระบบตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบสามเฟส ร่วมกับแหล่งจ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ 200 Hz นั้นยังไม่สามารถนำไปใช้ในการทดสอบจริงได้ เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการสวิตชิงของวงจรอิเล็กทรอนิกส์เกิดขึ้น ซึ่งจะต้องทำการแก้ไขและพัฒนาต่อไป

จากการทดสอบทั้งหมดนี้ทำให้สรุปได้ว่าระบบตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนที่พัฒนาขึ้นเมื่อใช้งานร่วมกับแหล่งจ่าย 50 Hz จากหน่วยงานการไฟฟ้าแล้วสามารถทำการทดสอบการตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้ตรงตามมาตรฐาน IEC 60270 แต่เมื่อใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นจะไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากปัญหาของสัญญาณรบกวนจากการสวิตชิงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปัญหาสัญญาณรบกวนจากการสวิตชิงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อาจแก้ไขได้โดยการใส่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ด้านแรงต่ำของหม้อแปลงทดสอบ โดยจะต้องติดตั้งตัวกรองความถี่ที่หัวต่อสายด้านแรงต่ำให้เหมือนกันทุกเฟส

2. การแสดงผลของโปรแกรมนั้นยังไม่สามารถแสดงได้อย่างทันทีทันใด (Real time) ยังคงมีการหน่วงเวลาเล็กน้อย อันเนื่องมาจากจำนวนของข้อมูลที่โปรแกรมต้องคำนวณนั้นมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงควรพัฒนาการเขียนโปรแกรมให้ลดภาระการคำนวณให้มากที่สุด



เอกสารอ้างอิง

- [1] High-voltage test techniques - Partial Discharge measurements IEC 60270:2015, 2015.
- [2] นายศุภชัย บุญปก, การพัฒนาระบบรู้จำรูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2553.
- [3] รฐนนท์ ศรีเผือก ศุภกิตติ์ โชติโก และกิตติเมศศักดิ์ ดิกะโกศล, การประยุกต์ใช้การตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วนแบบออนไลน์ สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทย, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 39, ฉบับที่ 1 มกราคม - มีนาคม 2559.
- [4] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มีนาคม 2549.
- [5] Eberhard Lemke, Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270, December 2008
- [6] นายภาณุพงศ์ คงประเสริฐ และคณะ, การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม LabVIEW, ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตร บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม, 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PicoScope[®] 5000 A and B

Flexible Resolution Oscilloscopes

User's Guide



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contents

1 Welcome	1
2 Introduction	2
1 Safety symbols	2
2 Safety warning	2
3 FCC notice	3
4 CE notice	3
5 License conditions	4
6 Trademarks	5
7 Warranty	5
8 Company details	5
9 Minimum system requirements	6
10 Cleaning	6
3 Pack contents	7
4 Installation	8
5 Product information	9
1 Model comparison table	10
2 Connector diagrams	11
3 Moving to another USB port	12
4 Compensating probes	12
6 Glossary	13
7 Appendix A: Declaration of Conformity	14
Index	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ดัดแปลงหรือแก้ไขเนื้อหาใดๆโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

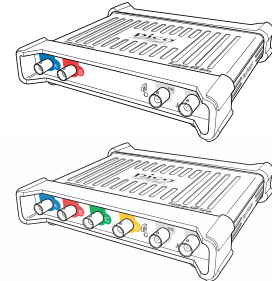


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 Welcome

Thank you for buying a **PicoScope 5000 Series Flexible Resolution Oscilloscope** from Pico Technology!

The PicoScope 5000 A and B Series of Flexible Resolution Oscilloscopes from Pico Technology are a range of high-specification real-time measuring instruments that connect to the USB port of your computer. With the PicoScope software you can use these devices as oscilloscopes and spectrum analyzers. With various options of portability, resolution, deep memory, fast sampling rates and high bandwidth, these highly versatile oscilloscopes suit a wide range of applications.



The A models are high-speed portable oscilloscopes with a function generator:

PicoScope 5242A	PicoScope 5243A	PicoScope 5244A
PicoScope 5442A	PicoScope 5443A	PicoScope 5444A

The B models are as the A models, but feature an arbitrary waveform generator and deeper memory:

PicoScope 5242B	PicoScope 5243B	PicoScope 5244B
PicoScope 5442B	PicoScope 5443B	PicoScope 5444B

Here are some of the benefits provided by the PicoScope 5000 A and B Series oscilloscopes:

- **Flexibility:** Whether you want 8, 12, 14, 15 or 16-bit resolution, the PicoScope 5000 Series Oscilloscopes will suit your needs.
- **Portability:** Take the unit with you and plug it in to any Windows PC.
- **Performance:** Up to 1 GS/s sampling, 200 MHz bandwidth and 512 MS buffer.
- **Programmability:** The PicoScope 5000A SDK lets you write your own programs, in your chosen programming language, to control all the features of the scope. Using the API functions, you can develop your own programs to collect and analyze data from the oscilloscope. Refer to the *PicoScope 5000 Series (A API) Programmer's Guide* for more information.
- **Long-term support:** Software upgrades are available to download from our [website](#). You can also call our technical specialists for support. You can continue to use both of these services free of charge for the lifetime of the product.
- **Value for money:** You don't have to pay twice for all the features that you already have in your PC, as the PicoScope 5000 Series oscilloscope contains the special hardware you need and nothing more.
- **Convenience:** The software makes full use of the full-sized display, disk storage, user interface and networking built in to your PC.
- **Five-year warranty:** Your oscilloscope is covered for five years from the day of purchase against manufacturing faults. We don't charge a penny extra for this benefit.

For further information on the PicoScope 5000 A and B Series oscilloscopes, see the [comparison table](#) in this manual, and the specifications tables in the PicoScope 5000 Series data sheets available on our [website](#).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2 Introduction

2.1 Safety symbols

Warning Triangle



This symbol indicates that a safety hazard exists on the indicated connections if correct precautions are not taken. Read all safety documentation associated with the product before using it.

2.2 Safety warning

We strongly recommend that you read the general safety information below before using your oscilloscope for the first time. Safety protection built in to equipment may cease to function if the equipment is used incorrectly. This could cause damage to your computer, or lead to injury to yourself and others.

Maximum input range

The PicoScope 5000 A and B Series Oscilloscopes are designed to measure voltages in the range -20 V to +20 V. Attempting to measure voltages outside this range (other than using a differential or isolating probe specifically designed for this purpose) may expose the user to a risk of electric shock.

The analog inputs of the PicoScope 5000 A and B Series Oscilloscopes are protected to ± 100 V. Contact with voltages outside the protection range may cause permanent damage to the unit.

Mains (line) voltages

PicoScope 5000 A and B Series oscilloscopes are not designed for use with mains (line) voltages. To measure mains (or line) voltage, use a differential isolating probe specifically designed for that purpose.

Safety grounding

PicoScope 5000 A and B Series Oscilloscopes connect directly to the ground of a computer through the USB cable provided to minimize interference.

Avoid connecting the ground input to any potential other than ground. The outer shells of the BNC connectors are all at the same potential (shorted together). If in doubt, use a meter to check that there is no significant AC or DC voltage between the ground input of the oscilloscope (and also, if your oscilloscope is connected to a laptop, mains ground) and the point to which you intend to connect it, as this may cause a large current to flow. Failure to check may cause damage to your computer and connected equipment, or lead to injury to yourself and others.

Do not rely on the product to provide a protective safety earth.

Repairs

The oscilloscope contains no user-serviceable parts. Repair or calibration of the oscilloscope requires specialized test equipment and must be performed by Pico Technology.

2.3 FCC notice

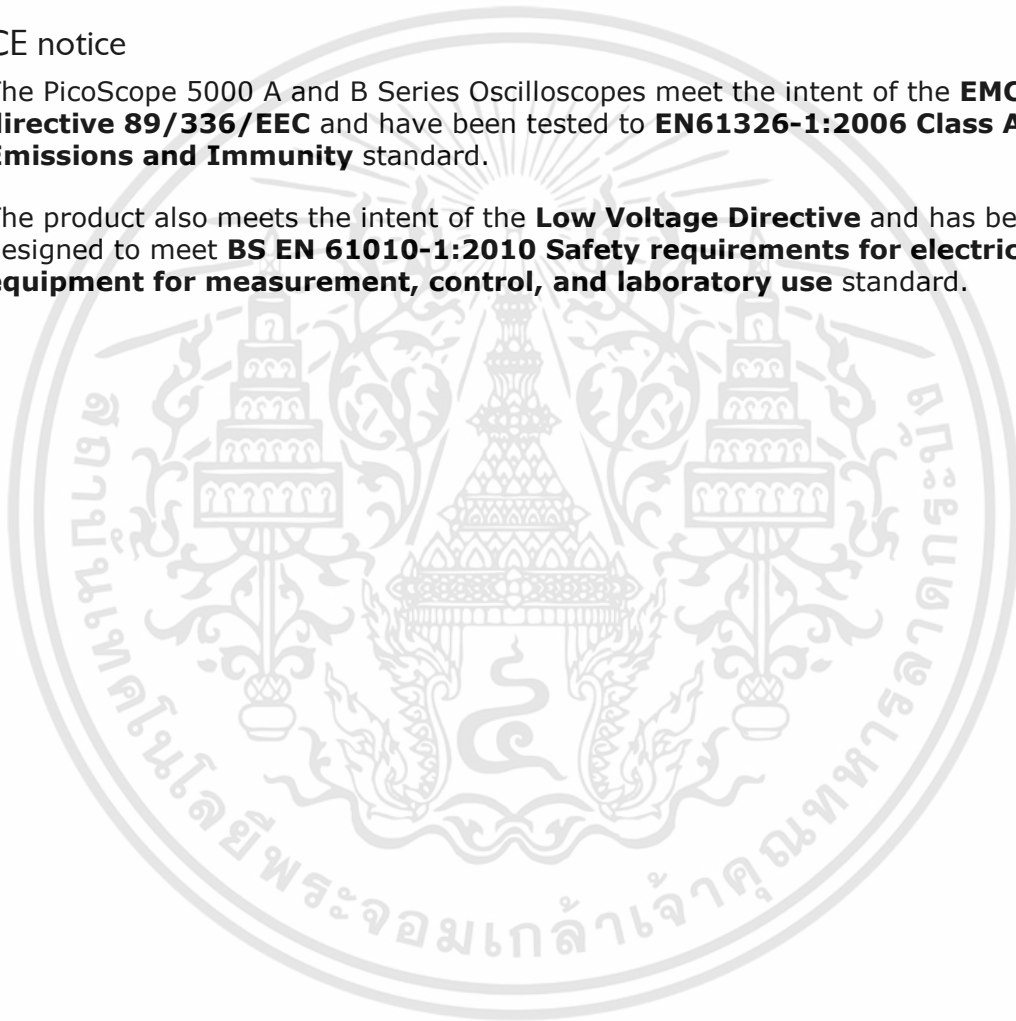
This equipment has been tested and found to comply with the limits for a Class A digital device, pursuant to **Part 15 Subpart B of the FCC Rules**. These limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference when the equipment is operated in a commercial environment. This equipment generates, uses, and can radiate radio frequency energy and, if not installed and used in accordance with the instruction manual, may cause harmful interference to radio communications. Operation of this equipment in a residential area is likely to cause harmful interference in which case the user will be required to correct the interference at his or her own expense.

For safety and maintenance information see the [safety warning](#).

2.4 CE notice

The PicoScope 5000 A and B Series Oscilloscopes meet the intent of the **EMC directive 89/336/EEC** and have been tested to **EN61326-1:2006 Class A Emissions and Immunity** standard.

The product also meets the intent of the **Low Voltage Directive** and has been designed to meet **BS EN 61010-1:2010 Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use** standard.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.5 License conditions

The software supplied with this product is licensed, not sold. Pico Technology Limited grants a **license** to the person who installs this software, subject to the **conditions** listed below:

Access. The licensee agrees to allow access to this software only to persons who have been informed of these conditions and agree to abide by them.

Usage. The software in this release is for use only with Pico Technology products or with data collected using Pico Technology products.

Copyright. Pico Technology Limited claims the copyright of, and retains the rights to, all material (software, documents etc.) contained in this release. You may copy and distribute the entire release in its original state, but must not copy individual items within the release other than for backup purposes.

Liability. Pico Technology and its agents shall not be liable for any loss, damage or injury, howsoever caused, related to the use of Pico Technology equipment or software, unless excluded by statute.

Fitness for purpose. Because no two applications are the same, Pico Technology cannot guarantee that its equipment or software is suitable for a given application. It is your responsibility, therefore, to ensure that the product is suitable for your application.

Mission-critical applications. This software is intended for use on a computer that may be running other software products. For this reason, one of the conditions of the license is that it excludes usage in mission-critical applications; for example, life-support systems.

Viruses. This software was continuously monitored for viruses during production, but you are responsible for virus-checking the software once it is installed.

Support. If you are dissatisfied with the performance of this software, please contact our technical support staff, who will try to fix the problem within a reasonable time. If you are still dissatisfied, please return the product and software to your supplier within 14 days of purchase for a full refund.

Upgrades. We provide upgrades, free of charge, from our website at www.picotech.com. We reserve the right to charge for updates or replacements sent out on physical media.

2.6 Trademarks

Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the USA and other countries.

Pico Technology Limited and *PicoScope* are trademarks of Pico Technology Limited registered in the United Kingdom and other countries.

2.7 Warranty

Pico Technology **warrants** upon delivery, and for a period of 5 years unless otherwise stated from the date of delivery, that the Goods will be free from defects in material and workmanship.

Pico Technology shall not be liable for a breach of the warranty if the defect has been caused by fair wear and tear, willful damage, negligence, abnormal working conditions or failure to follow Pico Technology's spoken or written advice on the storage, installation, commissioning, use or maintenance of the Goods or (if no advice has been given) good trade practice; or if the Customer alters or repairs such Goods without the written consent of Pico Technology.

2.8 Company details

Address:

Pico Technology
James House
Colmworth Business Park
St Neots
Cambridgeshire PE19 8YP
United Kingdom

Phone: +44 (0) 1480 396 395

Fax: +44 (0) 1480 396 296

Email:

Technical Support: support@picotech.com

Sales: sales@picotech.com

Web site: www.picotech.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ได้รับอนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 Minimum system requirements

To ensure that your PicoScope 5000 Series Oscilloscope operates correctly, you must have a computer with at least the minimum system requirements as shown in the following table. The performance of the oscilloscope will be better with a more powerful PC, and will benefit from a multi-core processor.

Item	Specification
Operating system	Windows 7, Windows 8 (not Windows RT), Windows 10*. 32 bit and 64 bit versions. Beta software is also available for Linux and OS X operating systems.
Processor	As required by the operating system
Memory	
Free disk space	
Ports	USB 3.0 or USB 2.0 port(s)

* PicoScope version 6.11 and SDKs are compatible with Windows XP SP3 and Vista SP2 in addition to the Windows versions listed above. For best performance we recommend Windows 7 or later.

2.10 Cleaning

Clean the oscilloscope using a soft cloth dampened with a solution of mild soap or detergent in water.

CAUTION: Do not allow water to enter the oscilloscope casing, as this could damage the sensitive electronic components inside.

3 Pack contents

A PicoScope 5000 A or B Series Oscilloscope is supplied with the following items:

- Standard USB cable (4-channel scopes only)
- Double-headed USB cable
- AC adaptor (4-channel scopes only)
- Software and Reference CD
- Installation Guide
- 2 or 4 x Probes (see [Model Comparison table](#) for probe details)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

4 Installation

Please note the various power supply options below. Consult the appropriate section relating to the intended use of the oscilloscope and the instructions in the Installation Guide and the leaflet included with your product package.

Powering 2-channel scopes

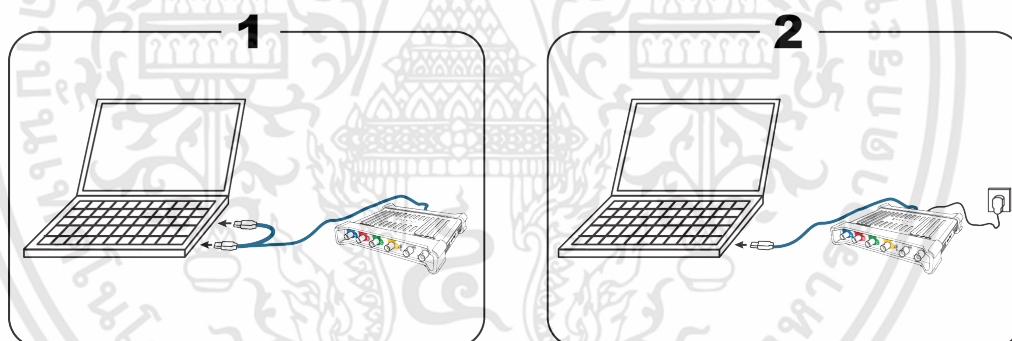
Connect your 5000 Series 2-channel oscilloscope to two free, powered USB ports on the PC or USB hub using the double-headed USB cable supplied (see image 1 below).

Powering 4-channel scopes

When using one or two channels of the 4-channel 5000 Series oscilloscopes, you have two options for power.

1. If your computer or USB hub does not have two free, powered USB ports, connect your 5000 Series oscilloscope to the PC or hub using the single-headed USB cable supplied. Plug the power adaptor into the mains and connect the DC cable to the [DC power socket](#) on the rear of the oscilloscope (see image 2 below).
2. If your computer or USB hub has two free, powered USB ports, connect your 5000 Series oscilloscope to two ports on the PC or hub using the double-headed USB cable supplied (see image 1 below).

When using three or four channels on the 4-channel 5000 Series oscilloscopes, connect your oscilloscope to the PC or hub using the single-headed USB cable supplied. Plug the power adaptor into the mains and connect the DC cable to the [DC power socket](#) on the rear of the oscilloscope (see image 2 below).



Note: If you connect or disconnect the AC adaptor while the oscilloscope is in operation it will restart automatically and any unsaved data will be lost.

Checking the installation

Once you have installed the software and connected the oscilloscope to the PC, start the PicoScope software. The software should now display any signal connected to the scope inputs. If you have a probe connected to your oscilloscope, you should see a small 50 or 60 hertz signal in the oscilloscope window when you touch the probe tip with your finger.

5 Product information

Standard oscilloscope connectors

The PicoScope 5000 Series Flexible Resolution Oscilloscopes have input channels with standard BNC connectors and standard input impedance. They are therefore compatible with most oscilloscope probes including x10 and switched x1/x10 types.

The probes supplied with the PicoScope 5000 A and B Series oscilloscopes have been trimmed specifically for use with the scopes they are supplied with. For optimum performance, please use the probes supplied. Although other oscilloscope probes can be used, the specified performance cannot be guaranteed. Replacement probes matched to your PicoScope 5000 can be ordered from Pico Technology.

Signal generator (Gen) output

The **Gen** connector is the output of the oscilloscope's built-in signal generator, which can generate a number of built-in waveforms as well as user-defined arbitrary waveforms (B Models only).

- If you are using the PicoScope 6 program, refer to the *PicoScope 6 User's Guide* for information on how to configure the signal generator.
- If you are writing your own software, refer to the *PicoScope 5000 Series (A API) Programmer's Guide*.

External trigger (Ext) input

The **Ext** input can be used as a trigger source. It is selected using the trigger drop-down menu in the PicoScope software, or using a function call if you are writing your own software.

The **Ext** input uses dedicated circuitry with a software-configurable threshold to detect a trigger signal. This has the advantage of freeing the analog channels for viewing signals. The **Ext** input has the same characteristics as a scope channel so that a supplied probe can be trimmed on one of the channels and then used with the **Ext** input to give best vertical accuracy. If trigger timing accuracy is critical, we recommend using one of the main input channels as the trigger source. These channels use digital triggering (accurate to one sample period) and have a vertical resolution of 1 LSB.

5.1 Model comparison table

For full specifications, refer to the 5000 Series data sheets on your Software and Reference CD or to the 5000 Series page on www.picotech.com.

PicoScope 2-channel models overview					
Model	Maximum Bandwidth	Memory		Waveform Output	Probes Supplied
		8-bit	≥ 12-bit		
5242A	60 MHz	16 MS	8 MS	Func. Gen.	2 x 60 MHz
5242B	60 MHz	32 MS	16 MS	Func. Gen. and AWG	2 x 60 MHz
5243A	100 MHz	64 MS	32 MS	Func. Gen.	2 x 150 MHz
5243B	100 MHz	128 MS	64 MS	Func. Gen. and AWG	2 x 150 MHz
5244A	200 MHz	256 MS	128 MS	Func. Gen.	2 x 250 MHz
5244B	200 MHz	512 MS	256 MS	Func. Gen. and AWG	2 x 250 MHz

PicoScope 4-channel models overview					
Model	Maximum Bandwidth	Memory		Waveform Output	Probes Supplied
		8-bit	≥ 12-bit		
5442A	60 MHz	16 MS	8 MS	Func. Gen.	4 x 60 MHz
5442B	60 MHz	32 MS	16 MS	Func. Gen. and AWG	4 x 60 MHz
5443A	100 MHz	64 MS	32 MS	Func. Gen.	4 x 150 MHz
5443B	100 MHz	128 MS	64 MS	Func. Gen. and AWG	4 x 150 MHz
5444A	200 MHz	256 MS	128 MS	Func. Gen.	4 x 250 MHz
5444B	200 MHz	512 MS	256 MS	Func. Gen. and AWG	4 x 250 MHz

Resolution vs sampling rate				
Resolution	Sampling rate vs. number of channels in use			
	Any 1 channel	Any 2 channels	Any 3 channels	All channels
8-bit	1 GS/s	500 MS/s	250 MS/s	250 MS/s
12-bit	500 MS/s	250 MS/s	125 MS/s	125 MS/s
14-bit	125 MS/s	125 MS/s	125 MS/s	125 MS/s
15-bit	125 MS/s	125 MS/s	-	-
16-bit	62.5 MS/s	-	-	-

For further information see the specifications tables in the PicoScope 5000 Series data sheets available on our [website](http://www.picotech.com).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในที่อื่น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารฉบับนี้ทุกครั้งไป

5.2 Connector diagrams

PicoScope 5000 A and B Series oscilloscopes



A. Input channel A

B. Input channel B

C. Input channel C

D. Input channel D

1. Probe compensation output

2. LED: red when scope is connected but not operating. Flashes green when the oscilloscope is capturing data.

3. External trigger input

4. Signal generator output

5. DC power socket: for use with the AC adaptor supplied. See [Installation](#) for details.

6. USB 2.0 port: connects to your PC using the Hi-Speed USB cable supplied. See [Installation](#) for powering options.

7. Earth terminal: Some laptop power supplies can produce electrical noise which may interfere with your measurements. If this occurs, the earth terminal can be connected to an external ground point (for example, on the system you are testing) to provide a ground reference for the scope. This can help to avoid external noise interfering with your measurements. Alternatively you can run the laptop using battery power.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

5.3 Moving to another USB port

The process is automatic. When you move the device from one port to another, Windows displays an "Installing device driver software" message and then a "PicoScope 5000 Series PC Oscilloscope" message. The oscilloscope is then ready for use.

5.4 Compensating probes

We recommend that you compensate each oscilloscope probe before using it with your PicoScope. Compensation instructions specific to the probe are included in the leaflet supplied with the probe.

Connecting a probe for compensation

1. Plug the probe's BNC connector into the appropriate input channel on the scope.
2. Fit the spring hook (supplied with the probe) on the probe tip.
3. Attach the spring hook to the [probe compensation output](#) located on the front panel.
4. Attach the ground lead (supplied) to the probe and connect the crocodile clip to the ground shell of one of the scope's BNC inputs.
5. Run the PicoScope software. Set the input coupling to AC and then click Auto Setup, which ensures that the correct range and timebase are selected.
6. Follow the compensation (or 'trimming') instructions in the probe leaflet.

Note: if the probe is moved to a different scope channel, the compensation procedure must be repeated.

6 Glossary

API. Application Programming Interface. A set of function calls that give programmers access to the PicoScope 5000 A/B Series driver.

Bandwidth. The range of input frequencies over which the measured signal amplitude is no more than 3 decibels below its true value.

Buffer size. The size of the oscilloscope buffer memory, measured in samples. In block mode, the buffer memory is used by the oscilloscope to store data temporarily. This allows the oscilloscope to sample data independently of the speed at which it can transfer data to the computer.

Driver. A program that controls a piece of hardware. The driver for the PicoScope 5000 A and B Series Oscilloscopes is supplied in the form of a 32-bit Windows DLL, ps5000a.dll. This is used by the PicoScope software, and by user-designed applications, to control the oscilloscopes.

External trigger. This is the BNC connector marked Ext on the PicoScope 5000 A and B Series oscilloscopes. It can be used as a trigger source but not as a waveform input.

Flexible Resolution Oscilloscope. The instrument formed by connecting a PicoScope 5000 A and B Series Oscilloscope to a computer running the PicoScope software application.

Maximum sampling rate. A figure indicating the maximum number of samples the oscilloscope can acquire per second. Maximum sample rates are usually given in MS/s (megasamples per second) or GS/s (gigasamples per second.) The higher the sampling rate of the oscilloscope, the more accurate the representation of the high-frequency details in a fast signal.

MS/s. Megasamples per second. Used to quantify the sampling rate of an oscilloscope.

PicoScope software. This is a software product that accompanies all our oscilloscopes. It turns your PC into an oscilloscope, spectrum analyzer, and meter display.

Signal generator. A built-in circuit that generates signals suitable for driving an external device under test. Its output is on the BNC connector marked Gen on the oscilloscope. If you connect a BNC cable between this and one of the channel inputs, you can send a signal into the channel.

Timebase. A timer that controls the speed at which the scope device captures data. At slow timebases this process is visible as PicoScope draws the trace across the scope view from left to right, but at fast timebases PicoScope draws the whole trace in a single operation. The timebase is measured in units of time (such as seconds) per division. There are ten divisions across the scope view, so the total time across the width of the view is ten times the "per division" setting.

USB 1.1. USB (Universal Serial Bus) is a standard port that enables you to connect external devices to PCs. A typical USB 1.1 port supports a data transfer rate of 12 Mbps (12 megabits per second), much faster than an RS232 port.

USB 2.0. A typical USB 2.0 port supports a data transfer rate that is 40 times faster than USB 1.1. USB 2.0 is backwards-compatible with USB 1.1.

USB 3.0. A USB 3.0 port uses signaling speeds of up to 5 gigabits per second and is backwards-compatible with USB 2.0 and USB 1.1.

Vertical resolution. A value, in bits, indicating the precision with which the oscilloscope converts input voltages to digital values. The resolution enhancement function in PicoScope can improve the effective vertical resolution.

Voltage range. The range of input voltages that the oscilloscope can measure. For example, a voltage range of ± 20 V means that the oscilloscope can measure voltages between -20 V and $+20$ V. Input voltages outside this range will not be measured correctly, but will not damage the instrument as long as they remain within the protection limits stated in the specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

7 Appendix A: Declaration of Conformity



Pico Technology

James House, Marlborough Road.
Colmworth Business Park.
Eaton Socon, St Neots, Cambridgeshire.
PE19 8YP United Kingdom.
Tel: +44 1480 396395. Fax: +44 1480 396296

EC Declaration of Conformity

Pico Technology declares that the following products comply with the requirements of the specified Directives and Standards as listed below. Technical documentation required to demonstrate compliance to the standards is available for inspection by the relevant enforcement authorities. Products carry the CE mark.

Products covered by this declaration:

PicoScope 5242 A & B **2 channel USB oscilloscopes.**
PicoScope 5243 A & B **2 channel USB oscilloscopes.**
PicoScope 5244 A & B **2 channel USB oscilloscopes.**
PicoScope 5442 A & B **4 channel USB oscilloscopes.**
PicoScope 5443 A & B **4 channel USB oscilloscopes.**
PicoScope 5444 A & B **4 channel USB oscilloscopes.**

EU Directives covered by this declaration:

2004/108/EC - Electromagnetic Compatibility Directive.
 2006/95/EC - Low Voltage Equipment Directive.
 2012/19/EU - Waste Electrical and Electronic Equipment
 2011/65/EC - Restriction of the use of certain Hazardous Substances Directive.

The basis on which conformity is being declared:

EN61010-1:2010 Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use, general equipment requirements.
 EN61010-2-030:2010 Particular requirements for testing and measuring circuits.
 EN61326-1:2006 Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements. Group 1, Class A equipment – (emissions section only)
 EN61326-1:2006 Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements. Basic Immunity – (immunity section only)
 EN61326-2-1:2006 Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements – Particular requirements
 CFR 47:2009 Code of Federal Regulations FCC: part 15 Subpart B – Frequency devices – unintentional Radiators. Radiated emissions standard. Class A emissions.

All component parts are supplied to Pico Technology under a valid EC Declaration of Conformity declaring their RoHS compliance. Additional analysis may be performed and recorded by Pico Technology Ltd or its subcontractors of the materials used in the manufacture of the above products as required by the Pico quality standards.

Alan Tong
Managing Director
October 2015

Signed

Pico Technology Limited is an internationally registered trade mark
Registered in England and Wales No. 2626181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่อนุญาตให้นำออกทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารฉบับนี้เมื่อมีการนำไปใช้

Index

A

- AC adaptor 7, 8, 11
- Arbitrary waveform generator 9

B

- Bandwidth 10
- Buffer size 10

C

- Calibration 2
- Cleaning 6
- Company information 5
- Compliance 3
- Connections
 - Arbitrary waveform generator 11
 - Compensation output 11
 - Earth terminal 11
 - Ext connector 11
 - External trigger 11
 - Function generator 11
 - Gen connector 11
 - USB port 11, 12
- Contact details 5

E

- Earth terminal 9
- Ext connector 9
- External trigger 9

F

- Function generator 9

G

- Gen connector 9

L

- LED 11
- License conditions 4

M

- Maximum input range 2
- Maximum sampling rate 10
- Memory 10

- Model comparison 10

O

- Oscilloscope probe 8, 9, 11
 - compensating 12

P

- Pack contents
 - AC adaptor 7
 - Installation Guide 7
 - Probes 7
 - Software and Reference CD 7
 - USB cable (double-headed) 7
 - USB cable (single-headed) 7
- PicoScope 5000 Series 2, 6, 9
- PicoScope software 8, 9
- Probes 10

R

- Repair 2

S

- Safety
 - symbols 2
 - warning 2, 3
- Signal generator 10
 - output 9
- Specifications 10
- System requirements 6

T

- Technical support 5
- Test equipment 2
- Trademarks 5

U

- USB 6
- USB cable (double-headed) 8
- USB cable (single-headed) 8

W

- Warranty 5



UK headquarters

Pico Technology
James House
Colmworth Business Park
St. Neots
Cambridgeshire
PE19 8YP
United Kingdom

Tel: +44 (0) 1480 396 395
Fax: +44 (0) 1480 396 296

sales@picotech.com
support@picotech.com

www.picotech.com

USA headquarters

Pico Technology
320 N Glenwood Blvd
Tyler
Texas 75702
United States


Tel: +1 800 591 2796
Fax: +1 620 272 0981

ps5000ab.en r3 2015-12-02

Copyright © 2013–2015 Pico Technology Limited. All rights reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Nattapon Marukatat, Anantawat Kunakorn, Peerawut Yutthagowith “**Design and Construction of a Quad-pole Coupling Device for Partial Discharge Tests**”, 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), PP.830-833, Phuket, Thailand, 27-30 June 2017

ECTI-CON 2017

2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics,
Computer, Telecommunications and Information Technology

27-30 June 2017

Phuket, Thailand

PROCEEDINGS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Construction of a Quad-pole Coupling Device for Partial Discharge Tests

Nattapon Marukat

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

Anantawat Kunakorn

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

Peerawat Yutthagowith

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

Abstract— This paper presents design and construction of a quad-pole coupling device which is used for measurement of PD signal and AC voltage as the conventional partial discharge testing according to IEC 60270[1]. The developed coupling device is capable to measure AC voltage at frequencies of 50 Hz and 200 Hz. Lower limit and Upper limit frequencies of the developed coupling device are 30 kHz and 20 MHz, respectively. The remarkable feature of the developed coupling device has the accuracy in PD signal measuring and the ability in eliminating noise signal such as unwanted AC signal at PD measuring point and interference signal. Therefore, in the design procedure based on OrCAD computer program, two main parts being the AC signal measuring part and the PD signal measuring part are considered. In the AC signal measuring part, the proper impedance was chosen to achieve appropriate voltage divide ratio and accuracy in PD signal measuring. In the coupling device, voltage surge protective device was installed to protect the PD measuring part. In PD signal measuring part, the value of the components in PD signal measuring circuit must be chosen properly to achieve the determined upper and lower limit frequencies and consider the value of the matching resistance. In this part, noise signal elimination must be considered to gain less effect to PD signal, otherwise the PD signal waveform will distort. From this intensive study, the coupling device circuits were designed and constructed and then, they were tested at 50 Hz and 200 Hz AC Voltage supply. The results of the developed coupling device are compared to that of the reference coupling device in the high voltage laboratory of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. The developed coupling device can be used in conventional PD testing according to IEC 60270. The comparisons of the simulated and experimental results show that the performance of the developed coupling devices as same as the reference coupling device.

Keywords-Coupling device, IEC 60270, Partial discharge detection

I. INTRODUCTION

The prevention of electrical fault relies on precision diagnosis. Especially, the insulation diagnosis before were install. If the insulation of electrical equipment have contamination or air gap it lead to occur Partial discharge

activity in insulation material. And if left for a long time, it will cause a breakdown between the electrodes. This will cause damage to the electrical system equipment. So then the electrical high voltage equipment must be tested a partial discharge testing to analyze the condition of the insulation before installation in electrical systems. Partial discharge testing is compulsory in most of high voltage equipment. Most of the instruments for the partial discharge test are imported from abroad and high price. Therefore, in order to reduce the imported from abroad, it is necessary to developed. From this development, it is also a new knowledge for High Voltage laboratory KMITL. Theory

A. What is Partial Discharge

A Partial Discharge is an electrical discharge or spark that bridges a small portion of the insulation between two conducting electrodes. Partial Discharge can occur at any point in the insulation system, where the electric field strength exceeds the breakdown strength of that portion of the insulating material. The partial discharge is classified in three types. The first type is a corona discharge which occurs at sharp rod conductor. The second type is a surface discharge which is occurred on skin of insulation. The last one is internal discharge which is occurred at adulterated thing in Insulation material as shown in Figure 1.

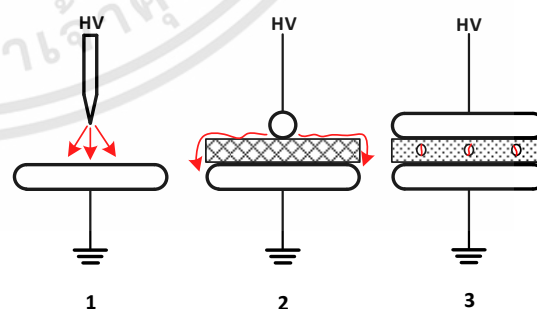


Figure 1. The Three types of Partial discharge 1.corona discharge 2.surface discharge 3.internal discharge [2].

B. Partial Discharge Measurement [3]

Partial discharge test circuit according to IEC 60270 is shown in Figure 2. The discharge activity can be measured in pC or μV . The PD level and PD patterns are very important information to evaluate the insulation characteristics of high voltage equipment. Then, some measures may be conducted in the early stage of preventive maintenance when the defective insulation is found.

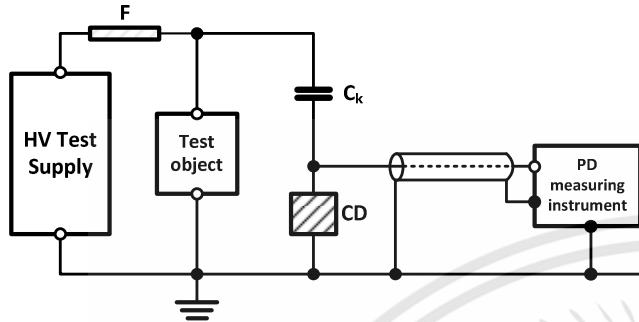


Figure 2. Partial discharge measuring circuit [4].

C. Coupling device [5]

Coupling device or measuring impedance (Z_m) is the main part which converts the input PD current pulses into equivalent output voltage pulses to be routed via a measuring cable to the PD measuring instrument. Additionally the coupling device is composed with supplementary elements for signal filtering in order to eliminate disturbing signals caused by the AC test voltage supply. Moreover, a fast over-voltage protection unit is required for suppressing over-voltages which may result from unexpected breakdowns of the test object. To ensure an optimum PD signal transmission, the coupling device should be located physically as close as possible to the coupling capacitor C_k and, for safety reasons, always inside the high voltage test area. The series connection of the coupling capacitor C_k with the measuring impedance Z_m forms a high-pass filter. The conventional measuring impedance circuit is shown in Figure 3. However, this equivalent circuit of the coupling device still has a weak point that when a failure occurred in a part and make the circuit open, the high voltage will be across the measuring instrument and it lead the instrument failure due to the unintentional over voltage.

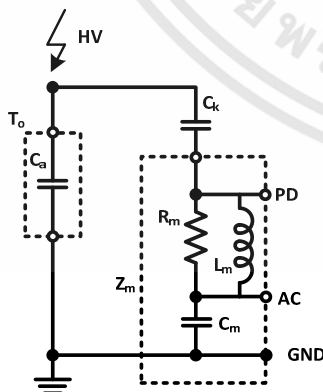


Figure 3. Equivalent circuit of the PD coupling unit.

II. DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE COUPLING DEVICE

A. Design of the coupling device

Determination of the electrical components of the coupling device can be simulated by a circuit based computer program. With the selected circuit parameters, the coupling device has lower limit and upper limit frequency of the developed device are 30 kHz and 20 MHz, respectively. The equivalent circuit of the coupling device is shown in Figure 4. The circuit parameters of the circuit are given in Table 1.

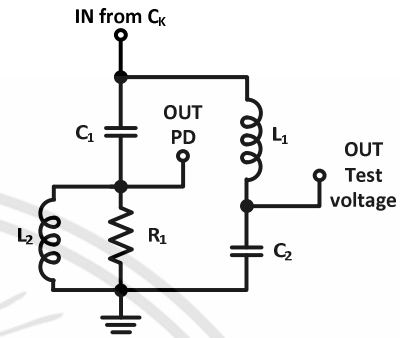


Figure 4. The simulation equivalent circuit of the designed coupling device.

Table 1. The circuit parameter of Figure 4

Circuit component	Circuit parameter
C_1	75 nF
C_2	44 μF
L_1	400 μH
L_2	470 μH
R_1	50 Ω

The frequency response of the designed coupling device at the PD port is shown in Figure 5. It is noticed on Figure 5 that the designed coupling impedance has the bandwidth according to the standard requirement. The signals with the frequency of below 30 kHz and of above 20 MHz are attenuated.

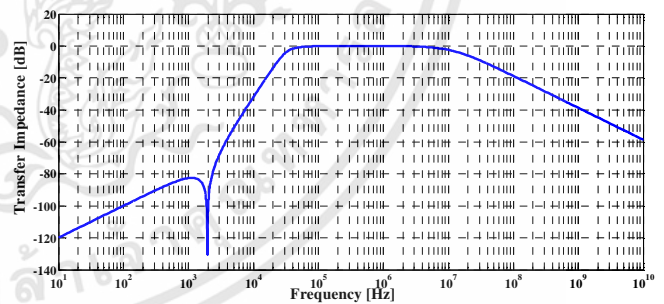


Figure 5. Frequency response of the designed coupling device.

The frequency response of the designed coupling device at the Test voltage port is shown in Figure 6. It is noticed that the unwanted signal with high frequency of above 2 kHz is attenuated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

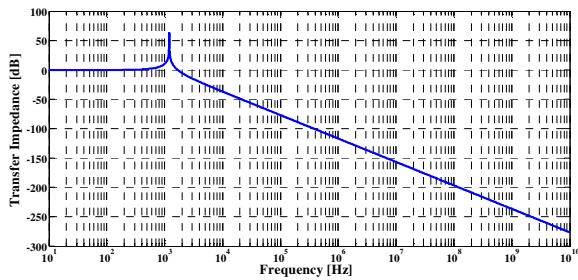


Figure 6. Frequency response of the designed coupling device at the Test voltage port.

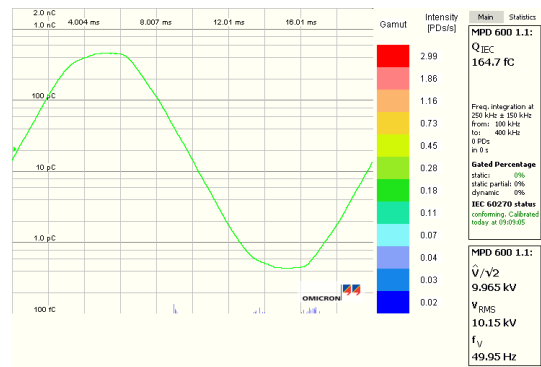


Figure 9. The experimental result of Omicron coupling device at 10 kV_{rms} 50 Hz. without test objects.

B. Construction of the coupling device

From design of the coupling device topic, the developed coupling device is depicted in Figure 6.

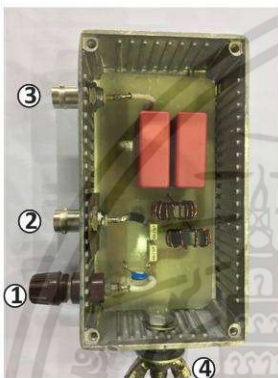


Figure 7. The developed coupling device, 1.IN From C_k, 2.Out PD, 3.Out test voltage, 4.Ground terminal.

III. EXPERIMENT

A. The testing of the developed coupling device compared with Omicron coupling device without test object

From design and construction of the coupling device. This experiment for the performance of developed coupling device is comparable with that from Omicron coupling device without test object at 10 kV_{rms} 50 Hz. The comparison result between developed coupling device and Omicron coupling device is depict in Fig. 7 and Fig. 8, respectively.

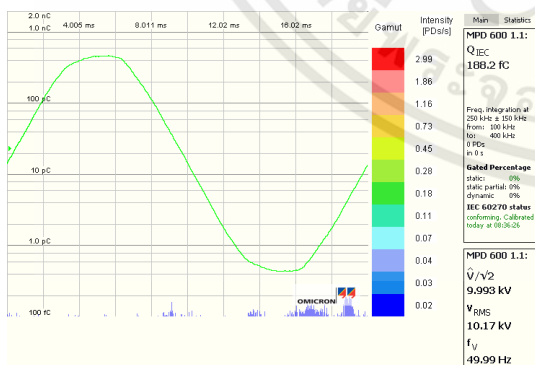


Figure 8. The experimental result of the developed coupling device at 10 kV_{rms} 50 Hz. without test object.

B. The testing of the developed coupling device compared with Omicron coupling device with test object

This topic is present the testing of the developed coupling device compared with Omicron coupling device with three test objects. The first is the test object for corona discharge simulation. The second is the test object for surface discharge simulation. The last is the test object for internal discharge simulation. Fig. 9 shows the test circuit in the PD measurement used in all test cases.

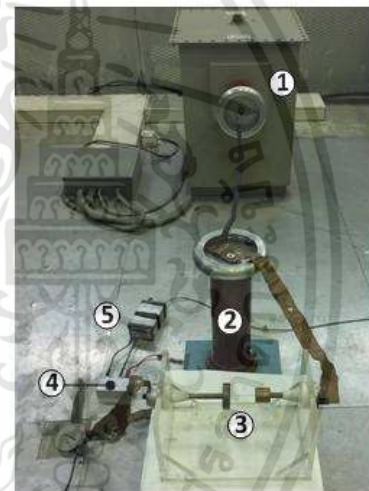


Figure 10. PD detection test circuit, 1.HV test Supply, 2.Coupling capacitor (C_k), 3. Test object for corona discharge simulation, 4. Developed coupling device, 5.PD measuring instrument.

The comparison results in the PD measurement from the developed coupling device and Omicron coupling device (the reference one) with test objects are depict in Fig. 10 to 15. Corona discharge cases are shown in Figs. 10 and 11, Figs. 12 and 13 for surface discharge cases, and Figs. 14 and 15 for corona discharge cases. From the test results, it is found that the developed coupling device provides the same test results as provided by the reference one.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

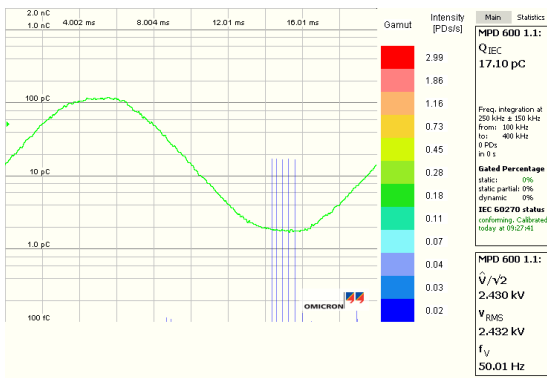


Figure 11. The experimental result of developed coupling device with test object for corona discharge simulation.

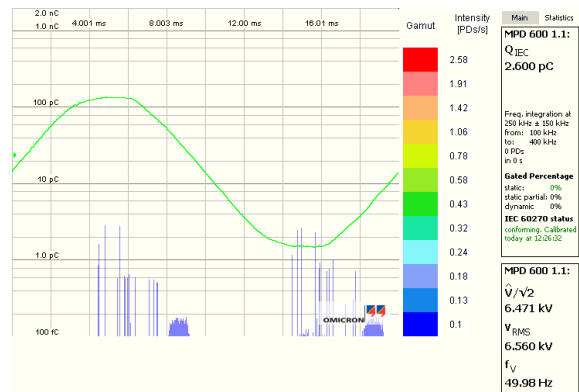


Figure 15. The experimental result of the developed coupling device with test object for internal discharge simulation.

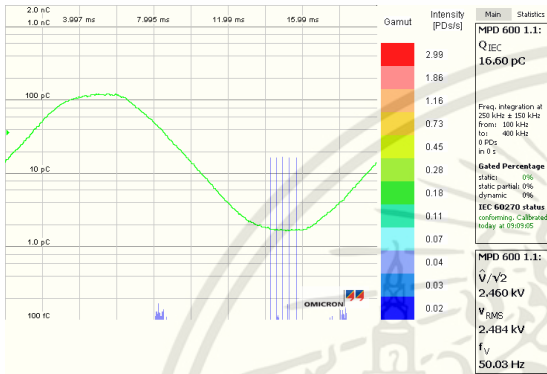


Figure 12. The experimental result of Omicron coupling device with test object for corona discharge simulation.

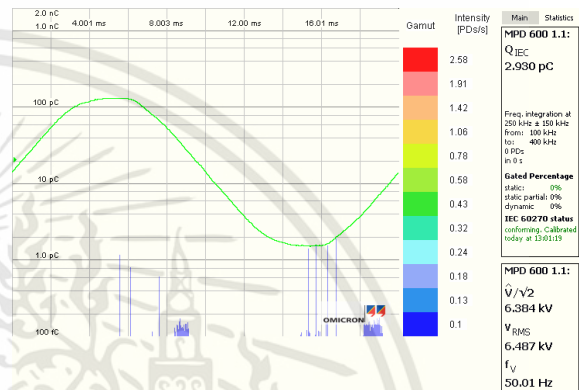


Figure 16. The experimental result of Omicron coupling device with test object for internal discharge simulation.

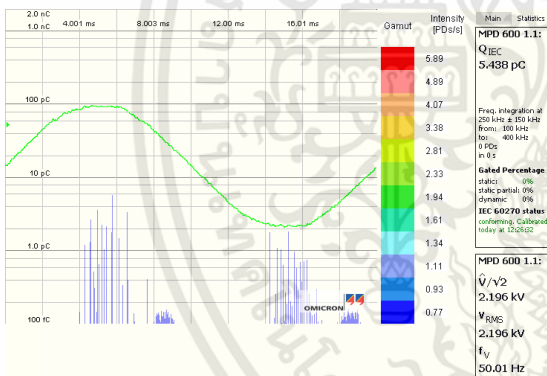


Figure 13. The experimental result of the developed coupling device with test object for surface discharge simulation.

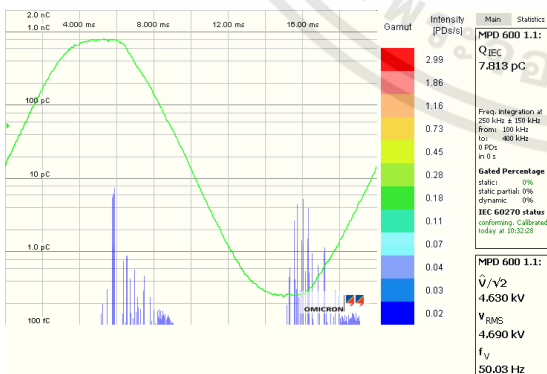


Figure 14. The experimental result of Omicron coupling device with test object for surface discharge simulation.

VI. CONCLUSION

From the test results, the performance of developed coupling device is comparable that of the omicron coupling device (the commercial and well-known one) in terms of very low background noise and of performance in PD detection. It can be concluded that the developed coupling device can be used in testing of partial discharge detection according to IEC 60270.

ACKNOWLEDGMENT

This research is supported by High Voltage laboratory KMITL and Meidensha Corporation, Japan.

REFERENCES

- [1] Partial Discharge Measurements, IEC 60270, 2000.
- [2] S. Leelajindakraierk, "Novel Design, Implementation and analysis of PD Measurement Using The High Frequency Current Transformer Technique", 2015, pp. 6.
- [3] N. Pattanadech and P. Nimsanong, "Self-Organizing Map Performance for Partial Discharge Classification", in Proc. ISLH., Bangkok, Thailand, 2015, pp. 85-89.
- [4] W. Hauschild and E. Lemke, "High-Voltage test and Measuring Techniques", 2014.
- [5] E. Lemke, "Guide for Partial Discharge measurements in compliance to IEC 60270", in Coupling Device, 2008, pp. 21-22.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายณัฐพล มฤคทัต
 วัน เดือน ปีเกิด 16 สิงหาคม 2535 ที่สมุทรปราการ
 ที่อยู่ 42/21 หมู่ 3 ตำบลบางเมือง อำเภอเมืองฯ
 จังหวัดสมุทรปราการ 10270



ประวัติการศึกษา

- 2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ
- 2558 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์
- การทดสอบด้วยกระแสลิตพัลส์
- การทดสอบกับดักแรงดันเกินด้านแรงต่ำด้วย Combination Wave
- การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC60270

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้