

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์รับสัญญาณดีสชาร์จ
บางส่วน

**Design and Construction of Coupling Capacitor and Coupling Device for
Partial Discharge Measurement**



โดย

นาย ธีรพงษ์ ดรละคร

นาย ธนสิทธิ์ หล่มสิริอนุสรณ์

นาย ธนากร เพ็ญทอง

นาย นฤพนธ์ ดีจริง

รฟว.

ธว 33917

2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 82989
วัน เดือน ปี..... 30 ก.ค. 2551

b. 119 58339
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การออกแบบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์รับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน
Design and Construction of Coupling Capacitor and Coupling Device for
Partial Discharge Measurement



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์
อ.นรเศรษฐ	พัฒนเดช
อ.พีระวุฒิ	ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

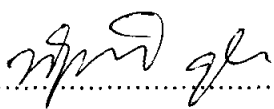
เรื่อง การออกแบบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์รับสัญญาณ

ผู้จัดทำ

นาย อนุรักษ์ ตรีละคร รหัส 48015106
นาย ธนสิทธิ์ หลิมสิริอนุสรณ์ รหัส 48015112
นาย ธนากร เพ็ญทอง รหัส 48015113
นาย นฤพนธ์ ดีจริง รหัส 48015115


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. มณฑล สิลาจินดาไกรฤกษ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ พีรวุฒิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์รับสัญญาณดีสซาร์จบางส่วน

นาย ณัฐพงษ์	ดลระคร	
นาย ธนสิทธิ์	หลิมสิริอนุสรณ์	
นาย ธนากร	เพ็ญทอง	
นาย นฤพนธ์	ดีจริง	
รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.นรเศรษฐ	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.พีรวุฒิ	ยุทธโกวิท	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว ขนาด 2 nF 50 kV และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนชนิดแถบกว้างความถี่ 37-415 kHz สำหรับตรวจจับดีสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีดั้งเดิม จากผลการตรวจจับดีสซาร์จบางส่วนทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ โคโรนาดิสซาร์จ ดีสซาร์จตามผิว และดีสซาร์จภายใน โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง พบว่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณดีสซาร์จบางส่วน สามารถตรวจจับสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนทั้ง 3 รูปแบบได้ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของอุปกรณ์ที่ออกแบบยังมีปัญหาของสัญญาณรบกวน ที่จะต้องปรับปรุงแก้ไขต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Construction of Coupling Capacitor and Coupling Device for Partial Discharge Measurement

Mr. Nathapong	Donlacon	
Mr. Tanasit	Limsirianusorn	
Mr. Tanakorn	Penthong	
Mr. Naruphon	Deejing	
Asso. Prof Monthon	Leelajindakrairerk	Advisor
Lecturer Norasage	Pattanadech	Advisor
Lecturer Peerawut	Yutthagowith	Advisor

2007

ABSTRACT

This project presents the design and construction of a coupling capacitor of 2 nF 50 kV and wide band coupling device in frequency range 37-415 kHz for conventional partial discharge measurement. Three types of partial discharge patterns, corona discharge, surface discharge and internal discharge, are simulated and measured by the partial discharge measurement reference system compared with the designed measuring system. From the test results, the designed measuring system can measure all types of partial discharge accurately. However, there is interference signal induced in the designed measuring system which have to be improved next.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือเป็นอย่างดี จากหลายๆฝ่าย

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์พีระวุฒิ ยุทธโกวิท และ รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ช่วยชี้แนะให้คำปรึกษาสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่การศึกษา ค้นคว้าหาข้อมูลเพื่อจัดทำโครงการโดยมิเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย รวมถึงตรวจสอบและแก้ไขปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ที่มีประโยชน์ต่อการนำมาใช้ในการจัดทำโครงการครั้งนี้ ขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ใช้เป็นสถานที่ในการทำทดสอบและเป็นที่ยอมรับในกลุ่มเพื่อทำงานต่างๆ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณณรงค์ ทองฉิม ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือเกี่ยวกับการทดสอบและการวัดดีสซาร์จบางส่วน คุณเพทาย นิมสนอง รุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท ที่คอยให้คำแนะนำ เป็นที่ปรึกษาในเรื่องการทำกรทดลองเป็นอย่างดี และช่วยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง อีกทั้งขอบคุณ คุณสุชาติ มณฑปใหญ่ คุณเกริก แซ่เลื่อง ที่คอยให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และงานด้านฮาร์ดแวร์ตลอดจนงานจิปาตะ เพื่อนร่วมงานและสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงทุกคน ที่คอยช่วยเหลือในทุกๆด้าน และคอยให้กำลังใจในการทำงานเสมอ จนกระทั่งโครงการสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนทางด้านการเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน อีกทั้งช่วยเหลือทางการเงินและให้กำลังใจในการทำงานเสมอมา

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญ	III
สารบัญรูปภาพ	V
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์และผลที่ได้รับจากงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนและวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน	4
2.1 ความหมายของดีสชาร์จบางส่วน (PD)	4
2.1.1 ดีสชาร์จแบบโคโรนา	5
2.1.2 ดีสชาร์จตามผิว	5
2.1.3 ดีสชาร์จภายใน	6
2.1.4 วงจรสมมูลดีสชาร์จบางส่วนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป	7
2.1.5 ธรรมชาติพัลส์ของดีสชาร์จบางส่วน	8
2.1.6 ลักษณะรูปร่างของกระแสดีสชาร์จบางส่วน	9
2.2 หลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน	9
2.2.1 การวิเคราะห์วงจรตรวจจับ PD จากวงจรสมมูล	11
2.2.2 การวิเคราะห์วงจรตรวจจับ PD โดยวิธีการอินทิเกรตด้วยตัวกรองผ่านแถบ	13
2.2.3 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity)	17
2.2.4 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน (Discharge calibrator)	19
2.3 เทคนิคการวัดดีสชาร์จบางส่วน	19
2.4 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน	21
2.4.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดีสชาร์จบางส่วน	22
2.4.2 การลดสัญญาณรบกวน	22
2.5 อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device)	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
2.6	คุณลักษณะของระบบวัด	25
2.6.1	คุณลักษณะสำคัญของระบบวัด PD ตามมาตรฐาน IEC	25
2.6.2	ระบบวัด PD สำหรับวัดประจุที่ปรากฏ	26
2.7	รูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge Pattern)	27
2.7.1	ดีสชาร์จภายใน (Internal Discharge)	27
2.7.2	ดีสชาร์จตามผิว (Surface Discharge)	28
2.7.3	โคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge)	29
บทที่ 3	การออกแบบสร้างตัวเก็บประจุความถี่สูงและอุปกรณ์รับสัญญาณ	31
3.1	การออกแบบสร้างตัวเก็บประจุความถี่สูง	31
3.1.1	ค่ากำหนดของการออกแบบตัวเก็บประจุความถี่สูง	31
3.1.2	การออกแบบสร้างจริง	31
3.2	การออกแบบสร้างอุปกรณ์รับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน	45
3.2.1	หลักเกณฑ์ในการออกแบบอุปกรณ์รับสัญญาณ	45
3.2.2	การเลือกอินพุตอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์รับสัญญาณ	46
บทที่ 4	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	52
4.1	การทดสอบความคงทนอยู่ใต้ต่อแรงดันไฟฟ้า	52
4.2	การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน	53
4.2.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	54
4.2.2	ขั้นตอนการทดสอบ	57
4.2.3	ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดีสชาร์จ	58
4.2.4	ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนตามผิว	66
4.2.5	ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน	70
บทที่ 5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	75
5.1	สรุป	75
5.2	ข้อเสนอแนะ	75
	เอกสารอ้างอิง	76
	ภาคผนวก	77
	กิตติกรรมประกาศ	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	การเกิดดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ	4
รูปที่ 2.2	ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ทำให้เกิดดีสชาร์จตามผิว	6
รูปที่ 2.3	วงจรสมมูล PD แบบทั่วไป	7
รูปที่ 2.4	แรงดันดัดคร่อมโพรงก๊าซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD	8
รูปที่ 2.5	ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแก๊สเล็กๆ	9
รูปที่ 2.6	วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD	10
รูปที่ 2.7	แทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่างๆ	13
รูปที่ 2.8	ลักษณะสเปกตรัมและการตอบสนองความถี่ต่างๆของเครื่องตรวจจับ PD	14
รูปที่ 2.9	ลักษณะเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ	16
รูปที่ 2.10	วงจรที่ใช้คำนวณความไวของเครื่องตรวจจับ PD สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป	17
รูปที่ 2.11	ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD ที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย	17
รูปที่ 2.12	วงจรสำหรับการปรับเทียบ	19
รูปที่ 2.13	วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ	21
รูปที่ 2.14	ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ	22
รูปที่ 2.15	ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน	23
รูปที่ 2.16	ลักษณะของอุปกรณ์รับสัญญาณแบบ RC	24
รูปที่ 2.17	ลักษณะของอุปกรณ์รับสัญญาณแบบ RLC	25
รูปที่ 2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายและความถี่ที่เกิดจากความผิดพลาดอินทิเกรชันของระบบวัดแบบแถบกว้าง	26
รูปที่ 2.19	ลักษณะการเกิดดีสชาร์จภายในบนฐานเวลารูปวงรี	27
รูปที่ 2.20	ลักษณะการเกิดดีสชาร์จภายในเนื้อฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	28
รูปที่ 2.21	ลักษณะการเกิดดีสชาร์จตามผิวบนฐานเวลารูปวงรี	28
รูปที่ 2.22	ลักษณะการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในอากาศ	29
รูปที่ 2.23	ลักษณะการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมัน	30
รูปที่ 3.1	ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการออกแบบ	31
รูปที่ 3.2	ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์	32
รูปที่ 3.3	แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น	34
รูปที่ 3.4	แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเมื่อแบ่งเป็น 2 ท่อน	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 การต่อกันแบบอนุกรมของตัวเก็บประจุ	38
รูปที่ 3.6 ท่ออะคริลิกที่ใช้เป็นฉนวนหุ้ม	39
รูปที่ 3.7 ฐานรองรับ	39
รูปที่ 3.8 โคโรนาซีลด์แบบวงแหวนท่อ	40
รูปที่ 3.9 แสดงผลการจำลองด้วยโปรแกรม	42
รูปที่ 3.10 เกจวัดความดันและวาล์วอัดก๊าซ	42
รูปที่ 3.11 ฝาปิดท่อด้านบนและด้านล่าง	43
รูปที่ 3.12 โอริงค์และฝารองปิด	43
รูปที่ 3.13 แผ่นยึดอะคริลิกบน ล่างและแผ่นอะคริลิกที่ใช้เป็นฉนวนรอง	44
รูปที่ 3.14 หัวกะโหลก และแหวนรองฝาปิด	44
รูปที่ 3.15 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling Capacitor)	45
รูปที่ 3.16 ลักษณะของตัวกรองแบบต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) อันดับที่ 2	46
รูปที่ 3.17 แสดงการออกแบบตัวกรองแบบต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) อันดับที่ 2	47
รูปที่ 3.18 ตัวกรองแบบผ่านแถบ (Band-Pass Filter) ที่ทำการออกแบบ	47
รูปที่ 3.19 ลักษณะของอุปกรณ์รับสัญญาณที่ออกแบบ	48
รูปที่ 3.20 ผลตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์รับสัญญาณชนิดแถบกว้าง	49
รูปที่ 3.21 วงจรที่ใช้ป้อนกระแสอิมพัลส์ที่มีประจุ 1 พิโคคูลอมป์	50
รูปที่ 3.22 ลักษณะเอาท์พุทที่ได้	50
รูปที่ 3.23 อุปกรณ์รับสัญญาณที่ออกแบบสร้าง	51
รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	52
รูปที่ 4.2 การตรวจจับ PD ที่แรงดัน withstand	53
รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบ	54
รูปที่ 4.4 วงจรที่ทำการทดสอบจริง	55
รูปที่ 4.5 แสดงระบบวัดที่ใช้ในการทดสอบ	57
รูปที่ 4.6 แสดงการต่อวงจรทดสอบ Corona Discharge	59
รูปที่ 4.7 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 2.27 pC, ที่แรงดัน 1.14 kV	59
รูปที่ 4.8 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 82.78 pC, ที่แรงดัน 5.71 kV	60
รูปที่ 4.9 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 582.13 pC, ที่แรงดัน 6.12 kV	60
รูปที่ 4.10 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 17.79 pC, ที่แรงดัน 1.43 kV	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 76.78 pC, ที่แรงดัน 7.23 kV	61
รูปที่ 4.12 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 482.20 pC, ที่แรงดัน 7.74 kV	61
รูปที่ 4.13 แสดงการต่อวงจรทดสอบ Corona Discharge	62
รูปที่ 4.14 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 2.28 pC, ที่แรงดัน 1.14 kV	63
รูปที่ 4.15 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 53.60 pC, ที่แรงดัน 7.79 kV	64
รูปที่ 4.16 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 679.92 pC, ที่แรงดัน 8.08 kV	64
รูปที่ 4.17 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 18.02 pC, ที่แรงดัน 1.37 kV	65
รูปที่ 4.18 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 56.87 pC, ที่แรงดัน 8.35 kV	65
รูปที่ 4.19 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 446.26 pC, ที่แรงดัน 8.89 kV	65
รูปที่ 4.20 แสดงการต่อวงจรทดสอบ Surface Discharge	67
รูปที่ 4.21 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 2.23 pC, ที่แรงดัน 1.14 kV	67
รูปที่ 4.22 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 395.49 pC, ที่แรงดัน 8.09 kV	68
รูปที่ 4.23 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 402.74 pC, ที่แรงดัน 8.22 kV	68
รูปที่ 4.24 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 17.95 pC, ที่แรงดัน 1.37 kV	69
รูปที่ 4.25 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 341.61 pC, ที่แรงดัน 9.41 kV	69
รูปที่ 4.26 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 363.10 pC, ที่แรงดัน 9.53 kV	69
รูปที่ 4.27 แสดงการต่อวงจรทดสอบ Internal Discharge	70
รูปที่ 4.28 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 2.28 pC, ที่แรงดัน 1.14 kV	71
รูปที่ 4.29 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 121.12 pC, ที่แรงดัน 11.93 kV	72
รูปที่ 4.30 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 121.81 pC, ที่แรงดัน 12.10 kV	72
รูปที่ 4.31 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 17.79 pC, ที่แรงดัน 1.43 kV	73
รูปที่ 4.32 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 132.08 pC, ที่แรงดัน 13.8 kV	73
รูปที่ 4.33 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 135.44 pC, ที่แรงดัน 13.7 kV	73

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม

หน้า

2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การฉนวนถือส่วนสำคัญในระบบไฟฟ้า หากฉนวนที่ไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐานที่ได้กำหนดหรือเกิดความผิดปกติในฉนวน จะทำให้เกิดความล้มเหลวในระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งความผิดปกติของฉนวนนั้นอาจเกิดมาจากการออกแบบการฉนวนที่ไม่ได้มาตรฐานและอาจเกิดจากความบกพร่องในกระบวนการผลิต ความบกพร่องของการฉนวน ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นและจะพัฒนาไปสู่การเสียหายของฉนวนอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการตรวจสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนก่อนนำอุปกรณ์ไปใช้งานจริงจึงเป็นส่วนสำคัญในการตรวจสอบถึงมาตรฐานการฉนวนของอุปกรณ์นั้นๆ

การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD : Partial Discharge) คือ การตรวจจับด้วยวิธีการทางไฟฟ้า และการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน จะเป็นการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพของฉนวนโดยตรง ปรากฏการณ์ดิสชาร์จบางส่วนเป็นการปล่อยประจุไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมต่อถึงกันระหว่างขั้วของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยเกิดการปล่อยประจุในเนื้อฉนวนเพียงบางส่วนหรือบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ โดยทั่วไปความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของอากาศที่ภาวะปกติจะมีค่าประมาณ 30 kV/cm เมื่อเกิดการดิสชาร์จบางส่วนจะทำให้บริเวณนั้นเกิดความร้อนสูง และทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพตำแหน่งที่จะเกิดการดิสชาร์จมีอยู่หลายตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งจะมีความรุนแรงของการเกิดแตกต่างกัน และส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาความบกพร่อง การเสื่อมสภาพของฉนวน และการเกิดดิสชาร์จภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
- 2) เพื่อศึกษาการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
- 3) เพื่อศึกษารูปแบบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
- 4) เพื่อศึกษาและออกแบบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม (ต่อ)

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์
6). จัดหาวัสดุที่ใช้สำหรับการประกอบสร้างและทดสอบ	██████████ -----	-----		
7). ประกอบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว และอุปกรณ์รับสัญญาณ	██████████ -----	-----		
8). ทำการทดสอบและเก็บผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน		██████████		
9). วิเคราะห์ผลการทดลอง			██████████ -----	-----
10). จัดและแก้ไขทำปริญญานิพนธ์			-----	██████████ -----



แสดงแผนการวิจัย



แสดงแผนงานจริง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1) สามารถออกแบบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนได้
- 2) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการวัดดีสชาร์จบางส่วน
- 3) ได้ฝึกฝนทักษะการแก้ไขปัญหาในการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

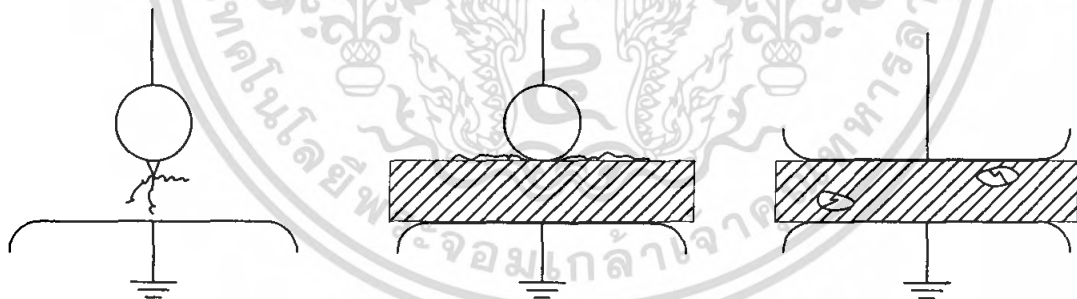
หลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนและการวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน

2.1 ความหมายการปล่อยประจุบางส่วนหรือดีสชาร์จบางส่วน (PD) [1]

ดีสชาร์จบางส่วน คือ ดีสชาร์จเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดดีสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด จึงเรียกว่า ดีสชาร์จบางส่วน เพราะฉนวนของอิเล็กโทรดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้านซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคง ดีสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนที่มีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้ หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น

ดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และสนามไฟฟ้ากระแสตรง ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ดีสชาร์จจะเกิดขึ้นซ้ำทุก ๆ ไซเคิลของแรงดัน โดยปกติจะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่ายอด

ดีสชาร์จบางส่วน อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดแบบ คือ ก) โคโรนาดีสชาร์จ ข) ดีสชาร์จตามผิว และ ค) ดีสชาร์จภายใน ในที่นี้จะอธิบายถึงดีสชาร์จบางส่วนแบบภายในอย่างไรก็ตามเพื่อให้เห็นภาพรวมของ PD ทั้ง 3 รูปแบบ จึงแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1



ก) โคโรนาดีสชาร์จ

ข) ดีสชาร์จตามผิว

ค) ดีสชาร์จภายในโพรงก๊าซ

รูปที่ 2.1 การเกิดดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ

2.1.1 ดิสชาร์จแบบโคโรนา [2]

ดิสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอรอบปลายแหลมอิเล็กโทรดแหลม หรือขอบคมที่อยู่ในอากาศหรือก๊าซความดันปกติ เรียกว่า โคโรนา โคโรนาดิสชาร์จจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในอากาศ

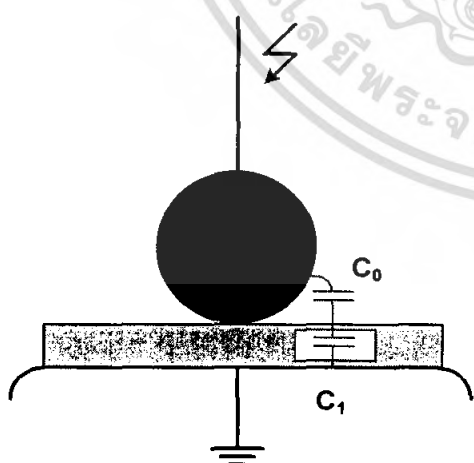
ผลเนื่องจากโคโรนาคือ

1. เมื่อเกิดโคโรนาในอากาศอาจสังเกตเห็นได้ด้วยร่างกายคน คือจะได้ยินเสียงฮิสซิ่ง (เสียงแมลงบิน) มีกลิ่นโอโซน (O_3) ในยามมืดสนิทจะเห็นแสงเรือง
2. โคโรนาดิสชาร์จเกิดขึ้นในรูปพัลส์สั้นๆ ซึ่งมีสเปกตรัมความถี่สูงถึง MHz คลื่นความถี่สูงนี้ จะรบกวนระบบสื่อสาร
3. การเกิดโคโรนาย่อมหมายถึง มีพลังงานสูญเสียเกิดขึ้นตลอดเวลา จึงเป็นสิ่งไม่พึงปรารถนาในการออกแบบระบบสายส่งจึงหลีกเลี่ยงมิให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าค่าสนามวิกฤต

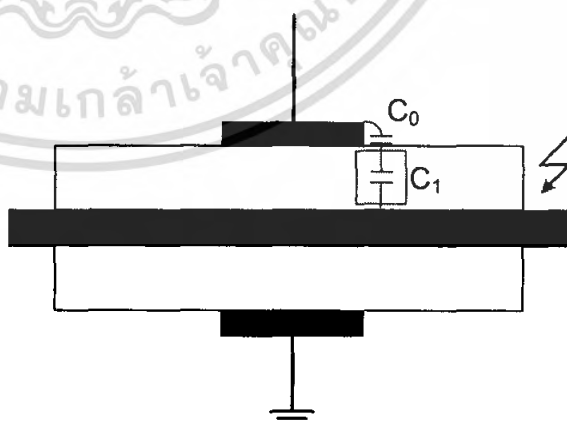
พลังงานสูญเสียเนื่องจากโคโรนาขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของผิวตัวนำ ด้วยเหตุนี้ในระบบสายส่งแรงสูงจึงใช้สายควบ (bundled conductors) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาวะบรรยากาศ ฝน หมอก น้ำค้าง จะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่าย

2.1.2 ดิสชาร์จตามผิว [2]

ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอก็ตามจนวนแข็งมีส่วนทำให้สนามไฟฟ้าในส่วนที่มีเปอร์มิตติวิตีต่ำ เช่น ก๊าซหรืออากาศมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น จนเป็นผลให้เกิดดิสชาร์จขึ้นในส่วนที่เป็นอากาศ ดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวนวน มีค่าสูงถึงค่าวิกฤต ตัวอย่างเช่นแผ่นฉนวนคั่นระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นระนาบ ที่ปักยึดปลอกฉนวนตัวนำ และปลายสายเคเบิลแรงสูงดังรูป 2.2

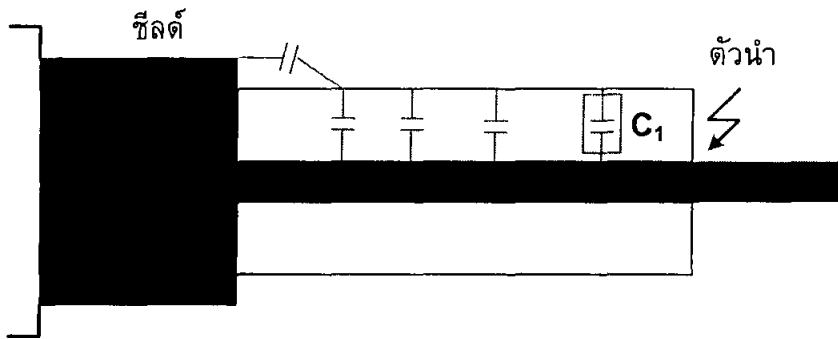


ก) อิเล็กโทรดทรงกลมกับระนาบคั่นด้วยแผ่นแก้ว



ข) ปลอกฉนวนตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) ปลายสายเคเบิลแรงสูง

รูปที่ 2.2 ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ทำให้เกิดดีสชาร์จตามผิว

ตามรูป ค่าเก็บประจุระหว่างอิเล็กโตรด $C_0 \ll$ ค่าเก็บประจุของฉนวนแข็ง C_1 ฉะนั้นแรงดันระหว่าง อิเล็กโตรดจะตกคร่อม C_0 เกือบทั้งหมด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบนส่วน C_0 มีค่าสูงเกินค่าวิกฤตได้ จึงเกิดเบรกดาวนหรือดีสชาร์จในส่วนที่เป็นอากาศ แต่ในส่วนที่เป็นฉนวนแข็ง ซึ่งมีความคงทนต่อแรงดัน E_b สูง จึงไม่อาจเกิดเบรกดาวนทะลุได้ แต่จะดีสชาร์จไปตามผิวฉนวนแข็ง

2.1.3 ดีสชาร์จภายใน [2]

การเกิดดีสชาร์จภายใน จะเกิดในส่วนที่มีความต้านทานของฉนวนทางไฟฟ้าต่ำ ปกติแล้วจะเกิดที่ช่องกลวงที่มีก๊าซอยู่ แต่ก็สามารถเกิดที่ช่องกลวงที่มีน้ำมันอยู่ได้เหมือนกัน และนำไปสู่การเกิดดีสชาร์จในก๊าซ ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการเกิดดีสชาร์จภายในได้ดังนี้

1) โพรงอากาศ การเกิดดีสชาร์จภายในจะเกิดขึ้นบ่อยๆในโพรงอากาศอยู่ซึ่งสามารถเกิดได้ในทั้ง พลาสติก เรซิน หรือกระดาษเคลือบเรซิน แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดดีสชาร์จขึ้นอยู่กับความเครียดในโพรง และความแข็งแรงทางไฟฟ้าของโพรง ความเครียดในโพรงสามารถคำนวณได้ในบางกรณี ถ้าโพรงตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ความเครียดในโพรงก็จะเท่ากับ ϵ คูณด้วย ความเครียดของ ไดอิเล็กตริก โดยที่ ϵ แทน ค่าคงที่ ไดอิเล็กตริกของฉนวน

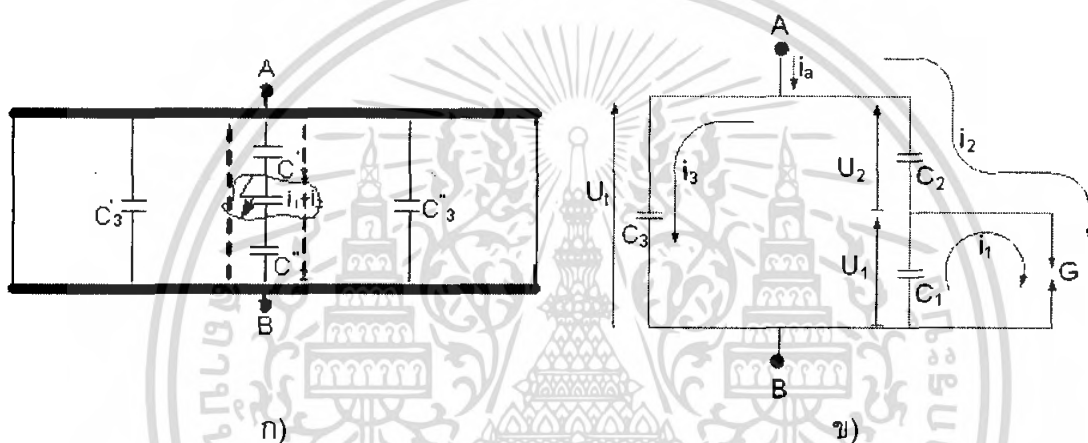
2) การปนเปื้อน (inclusion) การปนเปื้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในพลาสติกหรือเรซิน ขึ้นรูป การปนเปื้อนประกอบไปด้วย ฝุ่น กระดาษ ใยผ้า หรือ วัสดุแปลกปลอมอื่นๆ การปนเปื้อนทำให้ความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวนของฉนวนลดลงจากเดิม และหลังจากการ เบรกดาวนจากการปนเปื้อน จะเกิดก๊าซภายในฉนวน แล้วทำให้การดีสชาร์จในก๊าซเกิดขึ้น ซึ่งทำให้เกิดเบรกดาวนได้ง่ายขึ้น

3) โพรงที่มีน้ำมัน (Oil-filled cavities) โพรงที่มีน้ำมันจะถูกพบบริเวณระหว่างชั้นและกันของช่องว่างของ oil-impregnated paper insulation เช่น ขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า หรือ

สายเคเบิล ความเครียด ในโพรงที่มีน้ำมัน สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับที่ทำได้ในโพรงอากาศ กรณีที่เกิดขึ้นมากที่สุดก็คือโพรงมีผิวราบตั้งฉากกับ

2.1.4 วงจรสมมูลดีสซาร์จบางส่วนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป [3]

โดยปกติทั่วไปแล้ววงจรสมมูลของวงจรดีสซาร์จภายในนั้นจะหมายถึง วงจรสมมูลที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้ากล่าวถึงดีสซาร์จบางส่วนอย่างลอยๆก็ให้หมายถึงดีสซาร์จภายใน วงจรสมมูลสำหรับฉนวนของอุปกรณ์ขณะเกิด PD อาจแทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า C_1 , C_2 , C_3 และสปาร์กแกป ดังรูปที่ 2.3 โดยฉนวนส่วนที่บกพร่องซึ่งปกติแล้วจะเป็นโพรงก๊าซขนาดเล็กๆ จะถูกแทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า C_1 และสปาร์กแกป G และค่าความจุไฟฟ้ารวมของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงหรือวัสดุทดสอบเท่ากับ C_a



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูล PD แบบทั่วไป

จากรูปที่ 2.3 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสายของอุปกรณ์ (ขั้ว A-B) ในรูปที่ 2.3 ก) จะทำให้แรงดันตกคร่อมส่วนต่างๆของฉนวนดังรูปที่ 2.3 ข) ถ้าเกิดแรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซสูงเกินกว่าค่าแรงดันที่โพรงก๊าซสามารถทนได้ ทำให้เกิดเบรกดาวนหรือดีสซาร์จเฉพาะบริเวณโพรงก๊าซนี้จึงเรียกว่าเกิด “ดีสซาร์จบางส่วน” หรือ “PD” ภายในอุปกรณ์นั้น จากรูปที่ 2.3 ข) จะได้

$$C_3 = C'_3 + C''_3 \quad (2.1)$$

$$C_2 = \frac{C'_2 C''_2}{C'_2 + C''_2} \quad (2.2)$$

$$C_3 \gg C_1 \gg C_2 \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ
$$C_u = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_3 \approx C_3 \quad (2.4)$$

จากรูปที่ 2.3 ข) แรงดันตกคร่อมที่ขั้วสาย ΔU_1 เนื่องจากการเกิด PD สามารถคำนวณได้โดยเปรียบเทียบประจุที่สะสมก่อนและหลังการเกิด PD ได้ดังนี้

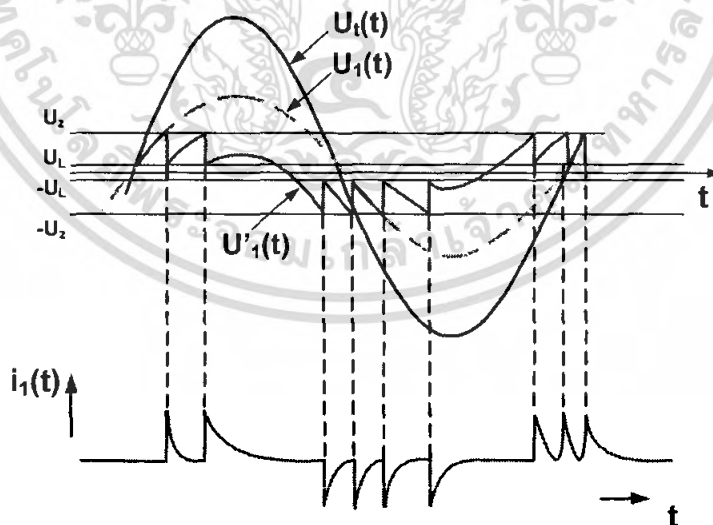
$$C_3 U_1 + C_2 (U_1 - \Delta U_1) = C_3 U'_1 + C_2 U'_1 \quad (2.5)$$

จะได้
$$\Delta U_1 = (U_1 - U'_1) = \frac{C_2 \Delta U_1}{C_2 + C_3} \quad (2.6)$$

โดยที่ U_1 คือ แรงดันตกคร่อมขั้วสายก่อนเกิด PD
 U'_1 คือ แรงดันตกคร่อมขั้วสายหลังเกิด PD

2.1.5 ธรรมชาติพัลส์ของดีสชาร์จบางส่วน [3]

ในทางปฏิบัติ PD อาจเกิดซ้ำ ๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังรูปที่ 2.4 โดยที่ $U_1(t)$ คือ แรงตกคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์ U_2 คือแรงดันเบรกตาวนของโพรงก๊าซ U_L คือแรงดันหลังเบรกตาวนของโพรงก๊าซ $U'_1(t)$ คือแรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซ $U_1(t)$ คือแรงดันคร่อมโพรงก๊าซ ถ้าไม่มีการเกิด PD เลย และ $i_1(t)$ คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ตามลำดับ

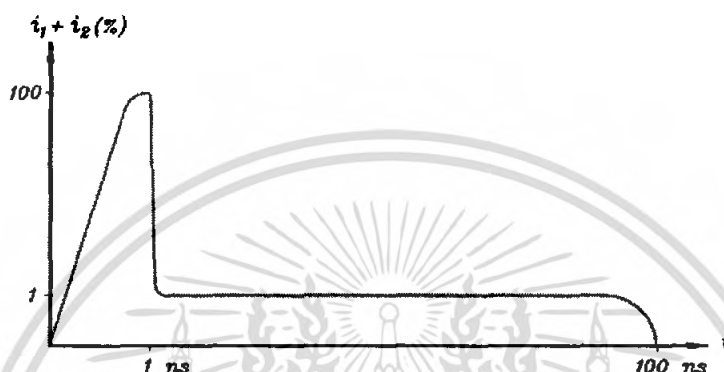


รูปที่ 2.4 แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 ลักษณะรูปร่างของกระแสไอซาร์จบางส่วน [3]

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแก๊ปหรือโพรงก๊าซเล็ก ในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.5 ขณะเกิด PD การไหลของกระแสผ่านแก๊ปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแก๊ปสั้น ๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแก๊ปหมด กระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วและกระแสที่ลดลงนี้จะยังคงไหลต่อไปอีก เนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก



รูปที่ 2.5 ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแก๊ปเล็ก ๆ

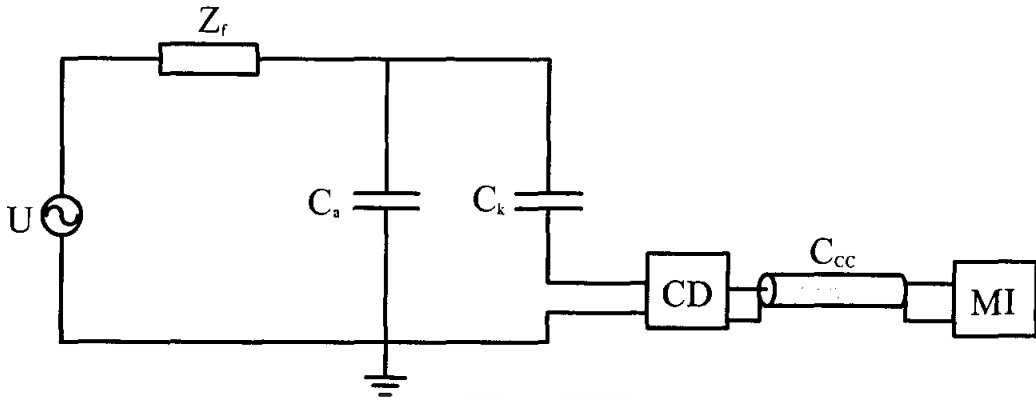
แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ จะพบว่าความกว้างของกระแสพัลส์ที่เกิดจาก PD ในฉนวนจะอยู่ในช่วงเวลา 1.5 นาโนวินาที ถึงช่วงเวลาเป็นหลัก 100 นาโนวินาที ดังนั้นกระแสพัลส์ดังกล่าวจึงมีสเปกตรัมของความถี่ที่มีแบนด์วิดท์กว้าง 10 เมกกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไป และอาจจะมี ความกว้างถึง 200 เมกกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งการเกิด PD จากลักษณะ “Tree” ในเนื้อฉนวนจะมี ช่วงเวลาของกระแสพัลส์ที่กว้างที่สุด

2.2 หลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน [3]

การตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน โดยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็น ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีการ ตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงหรือแรงดันทดสอบ U ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่าย หรืออิมพีแดนซ์ Z_f วัสดุทดสอบ (Test Object) C_u ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling Capacitor) C_k อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device) CD สายเคเบิลนำ สัญญาณ (Connecting Cable) C_{cc} และเครื่องมือวัด (Measuring Instrument) MI ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

ประกอบด้วย

- 1) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง U
- 2) ตัวกรองสัญญาณ หรืออิมพีแดนซ์ Z_r
- 3) วัสดุทดสอบ C_a (Test object)
- 4) สายนำสัญญาณ C_{cc} (Connecting Cable)
- 5) ตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k (Coupling Capacitor)
- 6) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD (Coupling Device)
- 7) เครื่องมือวัด MI (Measuring Instrument)

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

1) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง U ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบ และมีขนาดพิกัดเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น

2) ตัวกรองสัญญาณ หรืออิมพีแดนซ์ Z_r ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์ และ PD ที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเอง ที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย เป็นต้น และหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกัน PD จากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่าย ตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้ และปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรอง เช่น ตัวเหนี่ยวนำ (High Voltage Inductor) หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ (High Voltage Low-Pass Filter) เป็นต้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบปราศจาก PD เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองก็ได้ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทดสอบมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งหม้อแปลงทดสอบที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก

3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อ หรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง C_a, C_k และ CD ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำภายใน (Stray Inductance) ต่ำ ทนแรงดันได้โดยปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ ตัวเก็บประจุคัปปลิงอาจเรียก “Blocking Capacitor”

4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกัน คือ ทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์ i_i ที่ไหลในวงจรทดสอบ เนื่องจากการเกิด PD โดยมีสายนำสัญญาณ C_{CC} เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD และ MI อุปกรณ์รับสัญญาณ จะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิร์ตซ์) และฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบมิให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด PD จะทำหน้าที่สำคัญอีก 3 ประการคือ เป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ และลดสัญญาณความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุและใช้ในการแสดงผล PD

หลักการการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD เริ่มจากการค่อย ๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย U ผ่านตัวกรอง Z_f ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิด PD ที่วัสดุทดสอบ C_a (ถ้าฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นมีความบกพร่อง) ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ C_a ตามสมการ(2.6) C_k จะดีสชาร์จประจุไปที่ C_a เพื่อชดเชยแรงดันตก ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์ i_i ไหลวนครบวงจรระหว่าง C_a, C_k และ CD ดังนั้น CD และ MI วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง C_a และ C_k โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์ i_i เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

2.2.1 การวิเคราะห์ห้วงจรตรวจจับ PD จากวงจรสมมูล

วงจรพื้นฐานในรูปที่ 2.6 จะแทนวัสดุทดสอบ C_a ด้วยวงจรสมมูล ซึ่งประกอบด้วย C_1, C_2, C_3 และสปาร์กแกป G ดังรูปที่ 2.7 ก) เนื่องจากเบรกดาวน์ในโพรงก๊าซจะใช้เวลาในการเกิดน้อยกว่า 10^{-7} วินาที ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับคาบเวลาของแหล่งจ่าย (50 ถึง 400 เมกกะเฮิร์ตซ์) ดังนั้นจึงอาจแทนแรงดันคร่อมโพรงก๊าซด้วยแหล่งจ่ายแรงดันรูปขั้น ดังรูปที่ 2.7 ข) คือ

$$U_1 = \Delta U_1 U(t) \quad (2.7)$$

เมื่อ ΔU_1 คือ แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซและสปาร์กแกป G

$U(t)$ คือ ฟังก์ชันรูปขั้น (Unit step function)

ซึ่งวงจรในรูปที่ 2.7 ข) ก็คือ “วงจรพื้นฐานสำหรับเทียบ” นั่นเอง เนื่องจากโดยปกติแล้ว $C_3 \gg C_2$ ดังนั้นเพื่อทองอิมพีแดนซ์จากแหล่งจ่ายแรงดัน U_1 จะมองเห็นอิมพีแดนซ์รวมประมาณเท่ากับของ C_2 เพียงตัวเดียว จึงสามารถประมาณได้ว่า

$$i_2 \approx C_2 \frac{dU_1}{dt} \approx C_2 \Delta U_1 \delta(t) \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

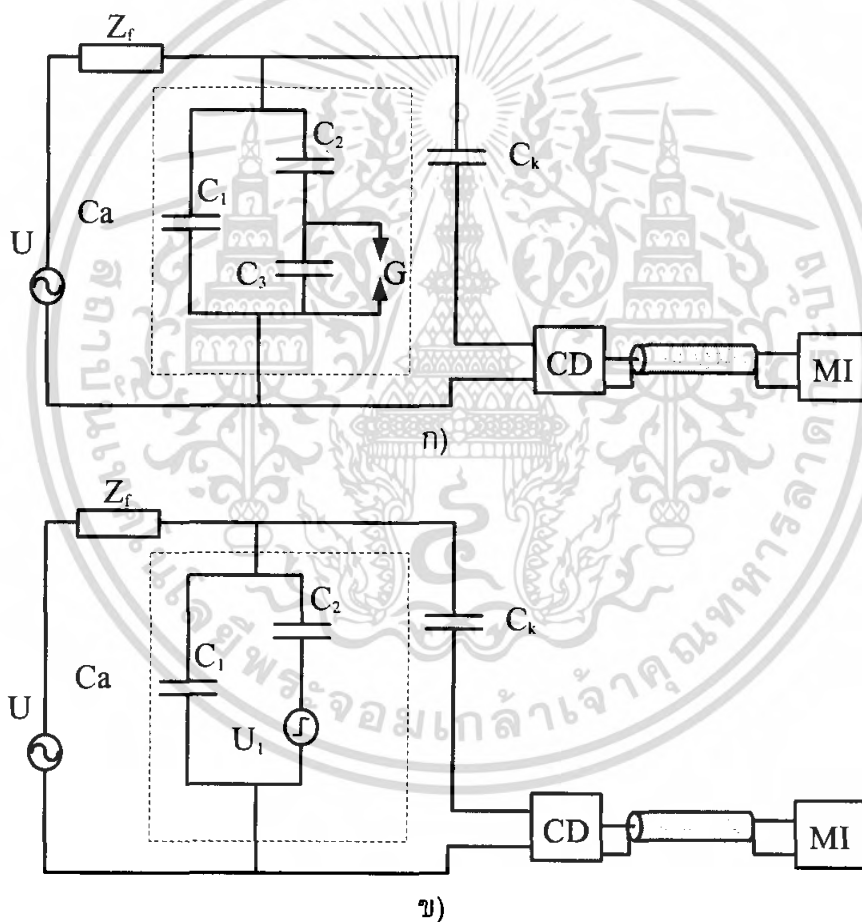
เมื่อ $\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันแบบอิมพัลส์ (Impulse Function)

ถ้านิยามให้ $q = C_2 \Delta U_1 = \int_0^\infty i_2 dt$ คือ ประจุที่ปรากฏ (Apparent Charge) ของ PD แทนค่า

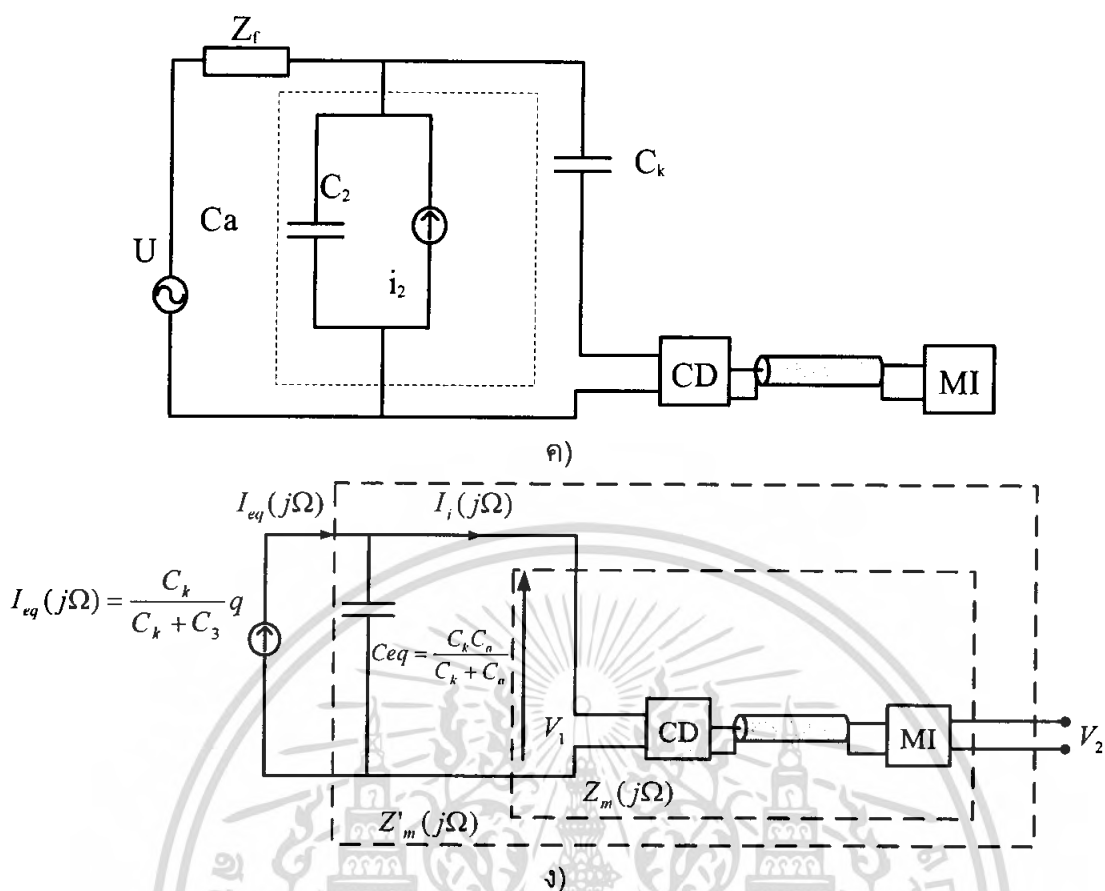
$q = C_2 \Delta U_1$ ในสมการ (2.8) จะได้

$$i_2 \approx q\delta(t) \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.9) จึงสามารถแทนการเกิดดีสชาร์จบางส่วนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ ดังรูปที่ 2.7 ค) ในทางปฏิบัติจะพบว่ากระแสพัลส์, i_2 มีช่วงเวลาการเกิด ≤ 5 นาโนวินาที สำหรับฉนวนของแข็ง และเหลว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่าง ๆ

- ก) แทนวัสดุทดสอบ C_a ด้วยวงจรสมมูลที่ประกอบด้วย C_1, C_2, C_3 และสปาร์กแก๊ป
 ข) แทน C_1 และ G ด้วยแรงดันรูปขั้น คือ $U_1 = \Delta U_1 U(t)$
 ค) แทน C_2 และ C_1 ด้วยแหล่งจ่ายกระแสพัลส์ $i_2 \approx q\delta(t)$
 ง) วงจรสมมูลสำหรับการคำนวณวงจรตรวจจับ PD โดยไม่คิดผลของ Z_r และ U เนื่องจาก Z_r มีอิมพีแดนซ์สูงเสมือนเปิดวงจร (open circuit) ขณะเกิด PD

2.2.2 การวิเคราะห์ห้วงจรตรวจจับ PD โดยวิธีการอินทิเกรตด้วยตัวกรองผ่านแถบ

การวิเคราะห์ห้วงจรตรวจจับ PD โดยวิธีการอินทิเกรตกระแสพัลส์ด้วยตัวกรองผ่านแถบ (Band-Pass Filter) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ โดยใช้วงจรในรูปที่ 2.7 ง) เป็นหลัก คือ

$$I_2(j\Omega) = F[i_2] \approx q \quad (2.10)$$

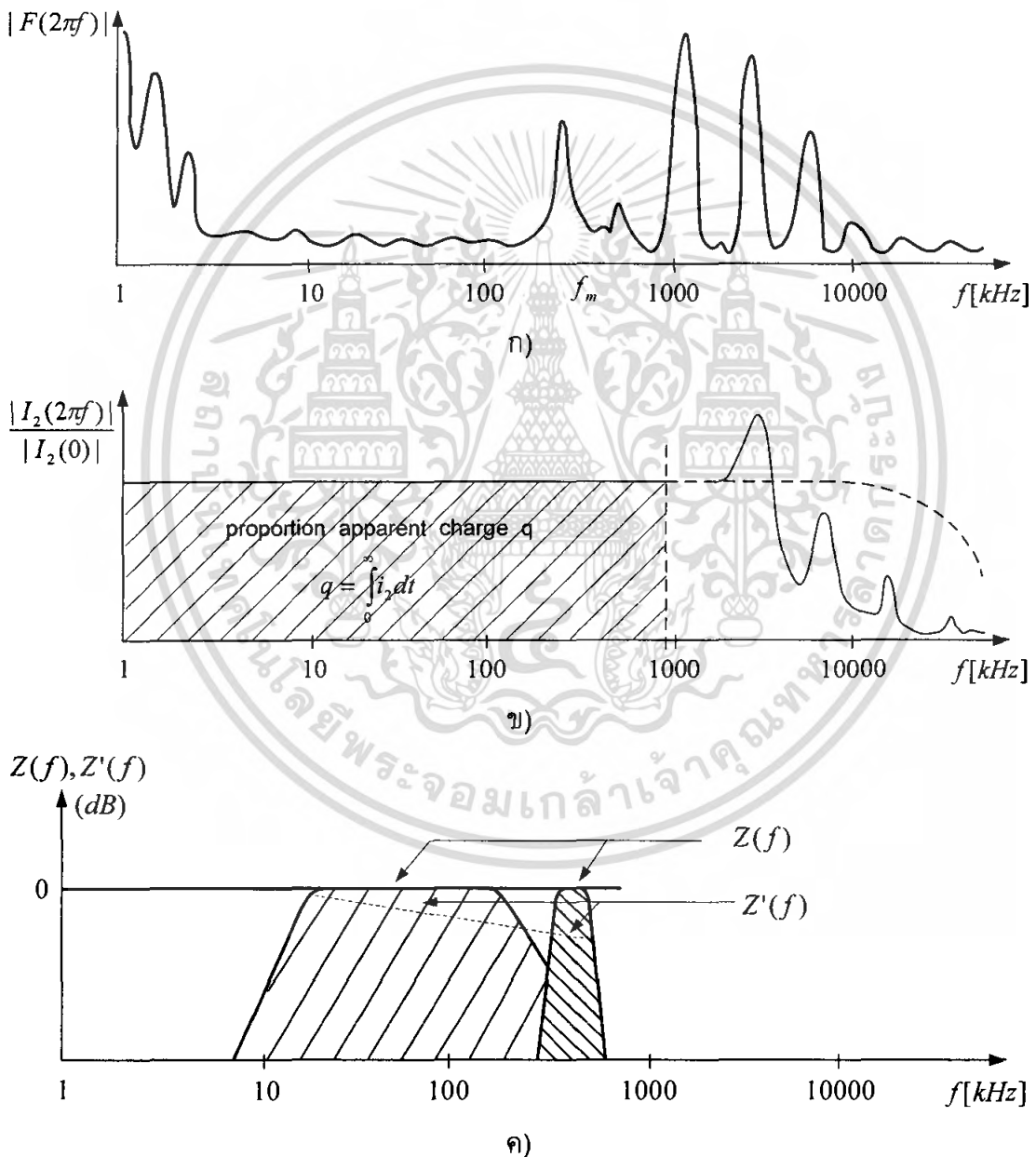
โดยที่ Ω คือ ความถี่เชิงมุมแบบแวนเดอวาล $\Omega = 2\pi f$

f คือ ความถี่แบบแวนเดอวาล

$F[\cdot]$ คือ ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การเชิงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถือว่า $[I_2(j\Omega)]$ มีค่าคงที่เสมอในช่วงความถี่ที่เราพิจารณา ลักษณะของ $[I_2(j\Omega)]$ ในทางปฏิบัติจะเป็นรูปที่ 2.8 ก) การตอบสนองความถี่ของเครื่องตรวจจับ PD (ประกอบด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณ และเครื่องมือวัด) จะมีคุณสมบัติเป็นตัวกรองผ่านแถบ คือ $Z'_m(j\Omega) = V_2(j\Omega)/I_{eq}(j\Omega)$ ซึ่ง $Z'_m(j\Omega)$ จะคิดผลกระทบของ C_a และ C_k เข้าไปด้วย ในกรณีที่ไม่นับผลกระทบของ C_a และ C_k จะได้ $Z_m(j\Omega) = V_2(j\Omega)/I_2(j\Omega)$ แสดงดังรูปที่ 2.8 ข) การเลือกความถี่ที่เหมาะสมนั้นจะต้องเลือกความถี่ในช่วงที่ปลอดภัยจากรบกวนจากภายนอกให้มากที่สุด ซึ่งลักษณะของสัญญาณรบกวนในช่วงโดเมนความถี่แสดงในรูปที่ 2.8 ค)



รูปที่ 2.8 ลักษณะสเปกตรัมและการตอบสนองความถี่ต่างๆของเครื่องตรวจจับ PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก) ลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณของรบกวน
 ข) ลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณของกระแสพัลส์ PD
 ค) Transfer Impedance ของเครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้างและแบบแถบแคบ
 โดยที่ $|Z_m(j\Omega) = Z(f)|$ และ $|Z'_m(j\Omega)| = Z'(f)$

ดังนั้นการวิเคราะห์เอาท์พุต v_2 ทำได้ดังนี้

$$I_{eq}(j\Omega) = \frac{C_k}{(C_k + C_3)} I_2(j\Omega) \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.10) แทนค่าในสมการ (2.11) จะได้

$$I_{eq}(j\Omega) = \frac{C_k}{(C_k + C_a)} q \quad (2.12)$$

เนื่องจาก

$$Z'_m(j\Omega) = \frac{V_2(j\Omega)}{I_{eq}(j\Omega)} \quad (2.13)$$

หรือ

$$V_2(j\Omega) = I_{eq}(j\Omega) Z'_m(j\Omega) \quad (2.14)$$

แทนค่า $I_{eq}(j\Omega)$ จากสมการที่ (2.12) ลงในสมการที่ (2.14) จะได้

$$V_2(j\Omega) = \frac{C_k}{(C_k + C_a)} q \times Z'_m(j\Omega) \quad (2.15)$$

$$v_2(j\Omega) = F^{-1}[V_2(j\Omega)] \quad (2.16)$$

$$v_2 = \frac{C_k}{(C_k + C_a)} q \times Z'_m(t) \quad (2.17)$$

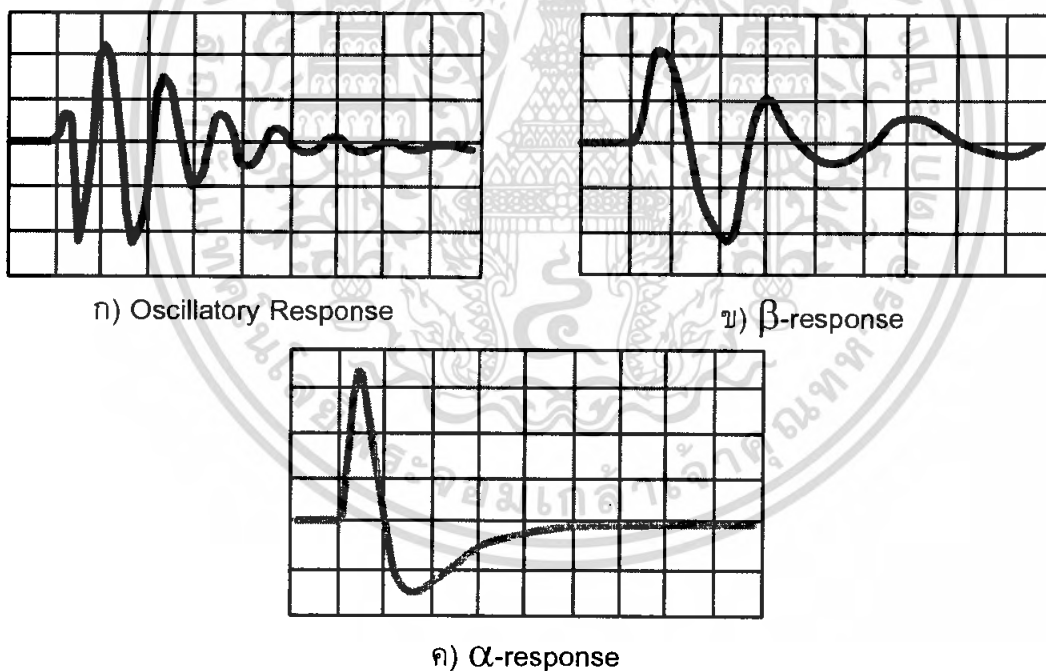
เมื่อไม่คิดผลของ C_a และ C_k จะได้

$$v_2 = \frac{C_k}{(C_k + C_a)} q \times Z_m(t) \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ $Z'_m(t)$ คือ การตอบสนองแบบอิมพัลส์ของเครื่องตรวจจับ PD เมื่อคิดผลกระทบบ C_a และ C_k
- $Z_m(t)$ คือ การตอบสนองแบบอิมพัลส์ของเครื่องตรวจจับ PD เมื่อไม่คิดผลกระทบบ C_a และ C_k
- $F^{-1}[\]$ คือ อินเวอร์สฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม

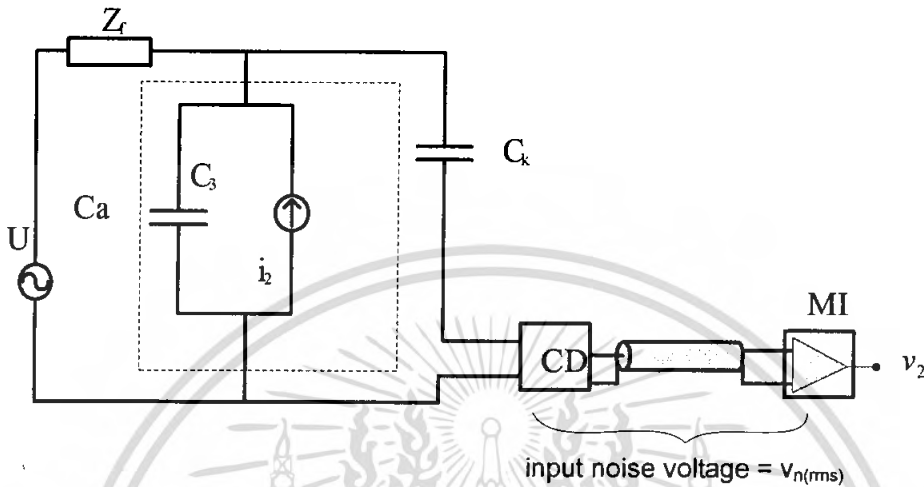
ตามเงื่อนไขสมการที่ (2.17) และ (2.18) เอาท์พุต v_2 แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ในกรณีที่ $|Z'_m(t)|$ มีแบนด์วิดท์แคบมาก จะให้สัญญาณเอาท์พุตแบบ "Oscillatory Response" จึงเรียกเครื่องตรวจจับ PD นี้ว่า "เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบแคบ" (Narrow-Band PD Detector) กรณีที่ $|Z'_m(t)|$ มีแบนด์วิดท์ไม่กว้างพอ จะให้สัญญาณเอาท์พุตแบบ β -response จึงเรียกเครื่องตรวจจับ PD นี้ว่า "เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกลาง" (Medium-Band PD Detector) กรณีสุดท้าย คือ $|Z'_m(t)|$ มีแบนด์วิดท์กว้าง จะให้สัญญาณเอาท์พุตแบบ α -response จึงเรียกเครื่องตรวจจับ PD นี้ว่า "เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้าง" (Wide-Band PD Detector) ซึ่งลักษณะสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะเอาท์พุตของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ

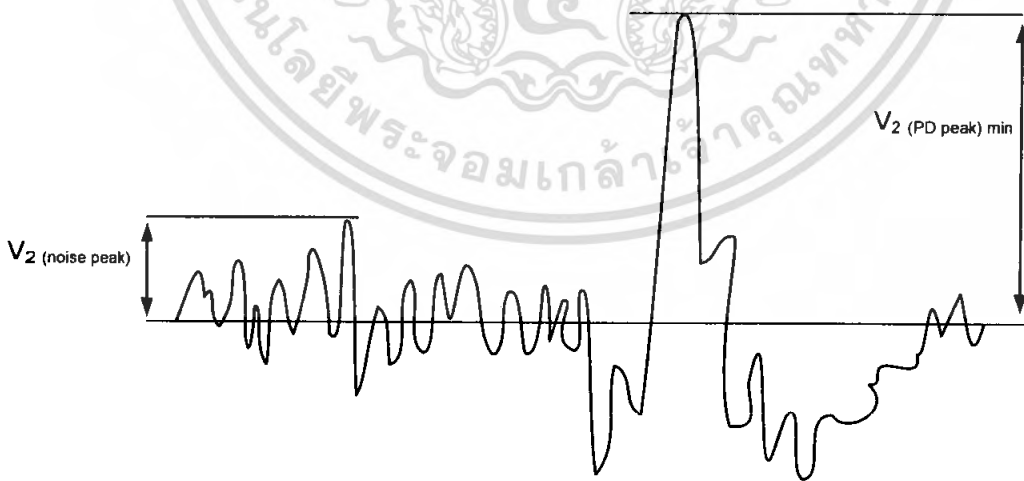
2.2.3 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity)

เนื่องจากสัญญาณรบกวน ทำให้ความไวของเครื่องตรวจจับ PD ลดลง ในการคำนวณความไวนั้นจะพิจารณาเฉพาะสัญญาณรบกวนภายในเครื่องวัดเท่านั้นคือ "Thermal Noise" ของอุปกรณ์รับสัญญาณ (CD) และ "Input noise" ของเครื่องวัด (MI) รวมกันคือ $V_{n(rms)}$



รูปที่ 2.10 วงจรที่ใช้คำนวณความไวของเครื่องตรวจจับ PD สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

ตามข้อกำหนดของ IEC 885-2 ได้กล่าวไว้ว่า ความไวของเครื่องตรวจจับ PD จะต้องมีความสามารถในการตรวจจับพัลส์ของดีสชาร์จต่ำสุดเป็น 2 เท่าของสัญญาณรบกวน ลักษณะสัญญาณรบกวนและ PD แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะสัญญาณเอาร์ทพุตของเครื่องตรวจจับ PD ที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย

กรณีวัสดุทดสอบทั่วไป เช่น ตัวเก็บประจุ บุชชิง เป็นต้น การคำนวณความไวทำได้ดังนี้

$$v_2 \text{ (PD peak) min} = 2v_2 \text{ (noise peak)} \quad (2.19)$$

กำหนดให้ค่ายอดของ $|Z'_m(t)|$ หรือ $|Z_m(t)|$ คือ $\xi \times A$ จะได้

$$v_2 \text{ (PD peak) min} = \frac{C_k}{(C_k + C_a)} q_{\min} \times \xi \times A \quad (2.20)$$

และกำหนดให้ค่ายอดของสัญญาณรบกวนประมาณ 2.5 เท่าของค่า rms จะได้

$$v_2 \text{ (noise peak)} = 2.5Av_{n \text{ (rms)}} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.20) และ (2.21) แทนค่าใน (2.19) จะได้

$$q_{\min} = 5 \left[\frac{C_k + C_a}{\xi C_k} \right] v_{n \text{ (rms)}} \quad (2.22)$$

ในกรณีที่สัญญาณรบกวนภายในเครื่องตรวจจับ PD เกิดจาก Thermal noise ของ CD เพียงอย่างเดียวจะได้

$$q_{\min} = 10 \left[\frac{C_k + C_a}{\xi C_k} \right] \sqrt{kTBR_{mi}} \quad (2.23)$$

- เมื่อ A คือ อัตราขยาย
 ξ คือ แฟกเตอร์สำหรับการตอบสนองแบบอิมพัลส์ มีค่าเท่ากับค่ายอดของ $|Z'_m(t)|$ หรือ $|Z_m(t)|$ หารด้วยอัตราขยาย A
 k คือ ค่าคงตัวโบลต์มันน์ $= 1.38 \times 10^{-23} \text{ joules / K}$
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 R_{mi} คือ ความต้านทานอินพุตของอุปกรณ์รับสัญญาณในช่วงความถี่แถบผ่าน
 $v_{n \text{ (rms)}}$ คือ สัญญาณรบกวนที่อินพุตของวงจรรขยายหรือตัวกรองและอุปกรณ์รับสัญญาณ
 B คือ แบนด์วิดท์สมมูล

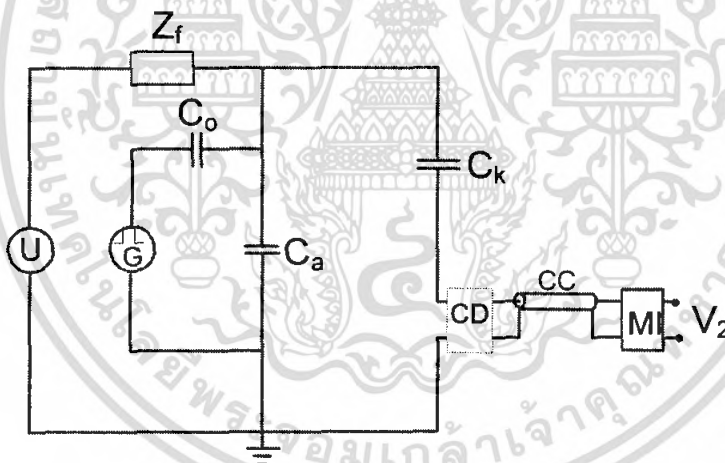
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน (Discharge calibrator)

จากสมการที่ (2.17) สัญญาณเอาต์พุต v_2 ของเครื่องตรวจจับ PD คือ

$$v_2 = \frac{C_k}{(C_k + C_a)} q \times Z'_m(t) \quad (2.24)$$

จากสมการ (2.24) จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุต v_2 แปรผันตามขนาดของตัวเก็บประจุ คัปปลิงและวัสดุทดสอบ จึงต้องมีการปรับเทียบด้วยค่า PD มาตรฐานก่อนทำการป้อนแรงดัน เข้าวงจรทดสอบโดยใช้เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน เพื่อใช้ในการจำลองการเกิด PD ด้วยการส่งผ่านกระแสพัลส์ที่มีขนาดของประจุมาตรฐาน q_0 ที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ดังรูปที่ 2.12 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันรูปขั้น หรือแรงดันแบบ สี่เหลี่ยม U_0 ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุขนาดเล็ก (Calibrating capacitor) C_0 ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้ $C_0 \leq 0.1C_a$ ถ้า C_0 เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ และกำหนดช่วงเวลาขึ้น t_r ของ U_0 เป็น $t_r \leq 60\text{ns}$ [4] ในการปรับเทียบต้องพิจารณาผลของค่าความจุไฟฟ้าสแตตริค C_s ด้วย คือ ต้องทำให้ $C_0 \gg C_s$



รูปที่ 2.12 วงจรสำหรับการปรับเทียบ

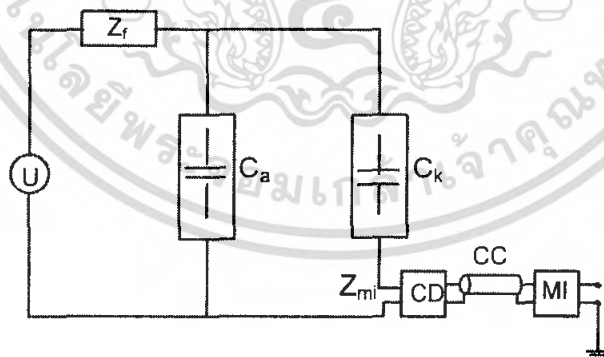
2.3 เทคนิคการวัดดีสชาร์จบางส่วน

โดยปกติวัสดุทดสอบทั่วไป อาจแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุชนิดองค์ประกอบแบบลัมปี หรือตัวเก็บประจุธรรมดา วงจรทดสอบ PD ตามมาตรฐานต่าง จะมีลักษณะเช่นเดียวกันในที่นี้ ใช้วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC [4,5] โดยรูปที่ 2.13 ก) และรูปที่ 2.13 ข) เป็นวงจรทดสอบ แบบวิธีตรง ข้อดีของวงจรรูปที่ 2.13 ก) คือ ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์โดยตรง ในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดการเบรกดาวน์ อุปกรณ์รับสัญญาณจะไม่ได้รับความเสียหายและ

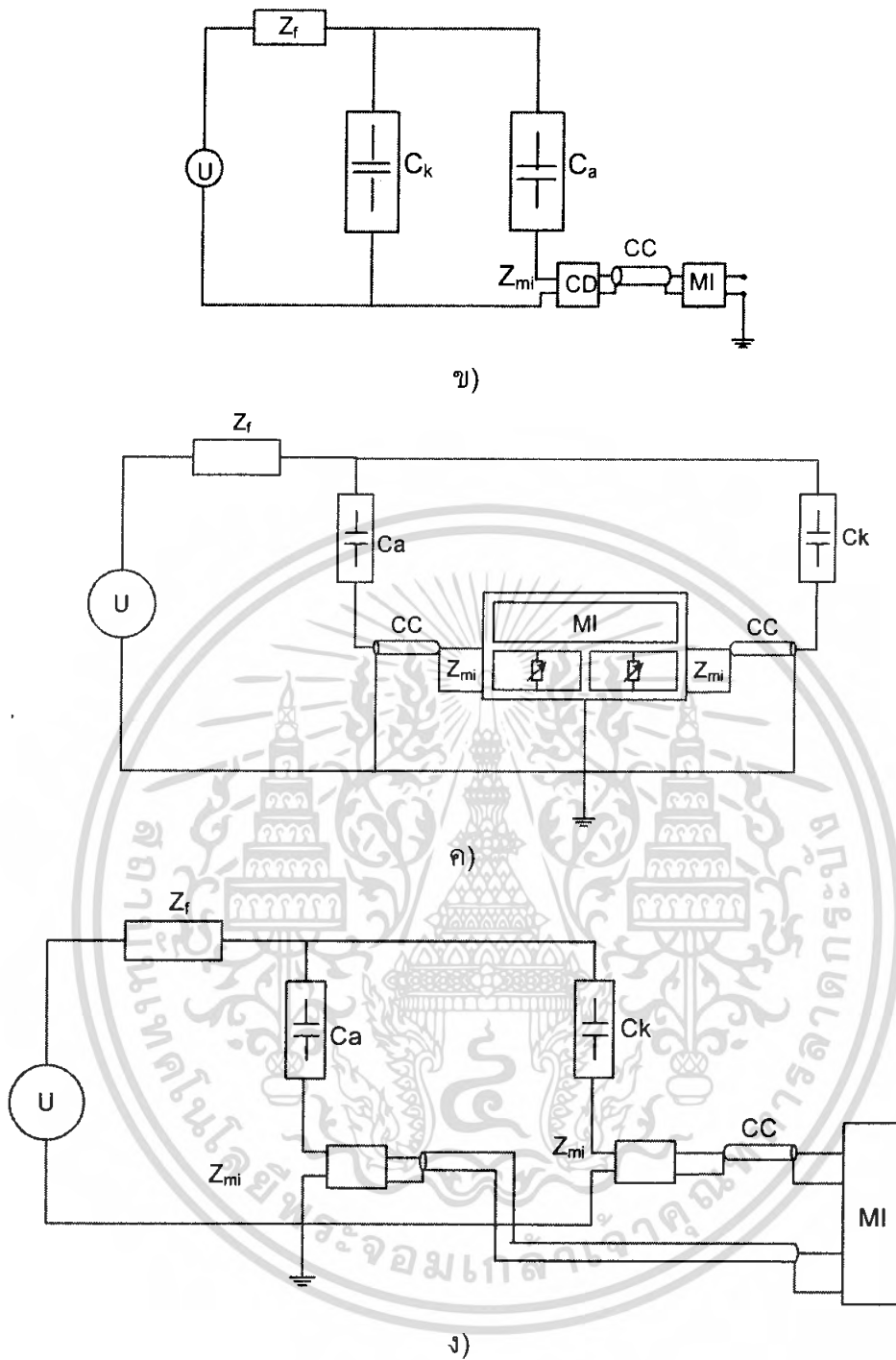
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสำหรับทดสอบวัสดุที่มีขั้วแรงดันต่ำหรือซิลด์หรือ Screen ขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ซิลด์ของเคเบิลจะต่อลงกราวด์โดยตรง ในรูปที่ 2.13 ข) วงจรตรวจวัดแบบนี้จะให้ความไวในการวัดสูงกว่าแบบ ก) ในรูปที่ 2.13 ค) เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุลวงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบคอมมอนโหมด (Common mode) ในรูปที่ 2.13 ง) เป็นวงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณได้ (Polarity discrimination) มีข้อดีเช่นเดียวกับวงจรทดสอบแบบสมดุล แต่มีความสามารถเพิ่มเติมในการแยกขั้วสัญญาณรบกวนภายนอกออกจาก PD ภายในวงจรทดสอบได้ แต่ข้อเสียของวงจรในรูปที่ 2.13 ข), 2.13 ค) และ 2.13 ง) คือ อาจทำให้เครื่องวัดได้รับความเสียหายในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดการเบรกดาวร์ และไม่เหมาะในการทดสอบวัสดุทดสอบที่มีซิลด์ขนาดใหญ่ เนื่องจากซิลด์ไม่ได้ต่อลงกราวด์โดยตรง ดังนั้นถ้ามีสัญญาณรบกวนที่มีซิลด์จะให้ความไวในการวัด PD ลดลง

การปรับเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันทดสอบเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ (Pulse area) q_{cal} ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ถ้าเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่า PD ได้ a_1 ดังนั้น Scale factor $K_1 = q_{cal}/a_1$ หลังจากทำการปรับเทียบเสร็จแล้วต้องเอาเครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ (ในกรณีที่ C_0 เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ) ขณะทำการทดสอบที่แรงดันมาตรฐานกำหนด ถ้าในขณะนั้นเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่าได้ a_2 ดังนั้นประจุที่ปรากฏของ PD คือ $K_1 a_2$ และความไวของวงจรทดสอบ $q_{min} = 2K_1 h_n$ เมื่อ h_n คือ ค่าสูงสุดของระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background Noise) ที่อ่านจากเครื่องตรวจจับ PD หลังการปรับเทียบก่อนการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบ [6]



ก)



รูปที่ 2.13 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ

2.4 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน

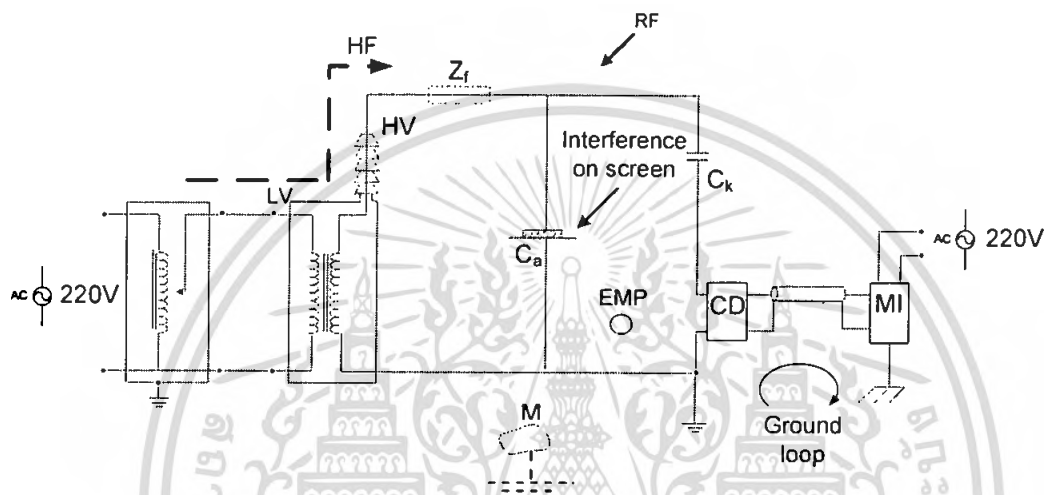
เนื่องจากสัญญาณ PD มีขนาดเล็ก ดังนั้นในการทดสอบ PD สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นย่อมมีผลต่อค่าที่วัดได้ แต่เราสามารถลดสัญญาณรบกวนให้เหลือน้อยลงเพื่อให้วงจรทดสอบมีความไวสูงขึ้นได้ โดยมีรายละเอียดลดสัญญาณรบกวนให้เหลือน้อยลงเพื่อให้วงจรทดสอบมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไวสูงขึ้น โดยมีรายละเอียดของสัญญาณรบกวนที่มีผลรบกวน และวิธีการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ดังต่อไปนี้

2.4.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดีสชาร์จบางส่วน

สัญญาณรบกวนประกอบด้วย สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางอากาศ และทางแหล่งจ่าย นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการดีสชาร์จของอุปกรณ์ที่เป็นโลหะและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบหรือกราวด์ไม่ดี การเกิดกราวด์ลูป (ground loop) และเกิดสัญญาณออสซิลเลตเนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ไม่ดีหรือหลวม เป็นต้น รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ

โดยที่ HF คือ สัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายได้แก่ ฮาร์มอนิกสูงๆ จากเมนโดยตรง จากอุปกรณ์พวกไครสโตร์ และ PD จากหม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น

RF คือ คลื่นรบกวนวิทยุซึ่งอาจจะเป็นคลื่นวิทยุโดยตรง คลื่นรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่อยู่ใกล้เคียง

EMP คือ สัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการทำงานของสวิตช์หรือไครสโตร์

Interference on screen คือ สัญญาณรบกวนที่ซิลด์ หรือ กรีน หรือที่ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบที่มีซิลด์ขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น

Ground loop คือ การเกิดครบวงรอบของสายดิน

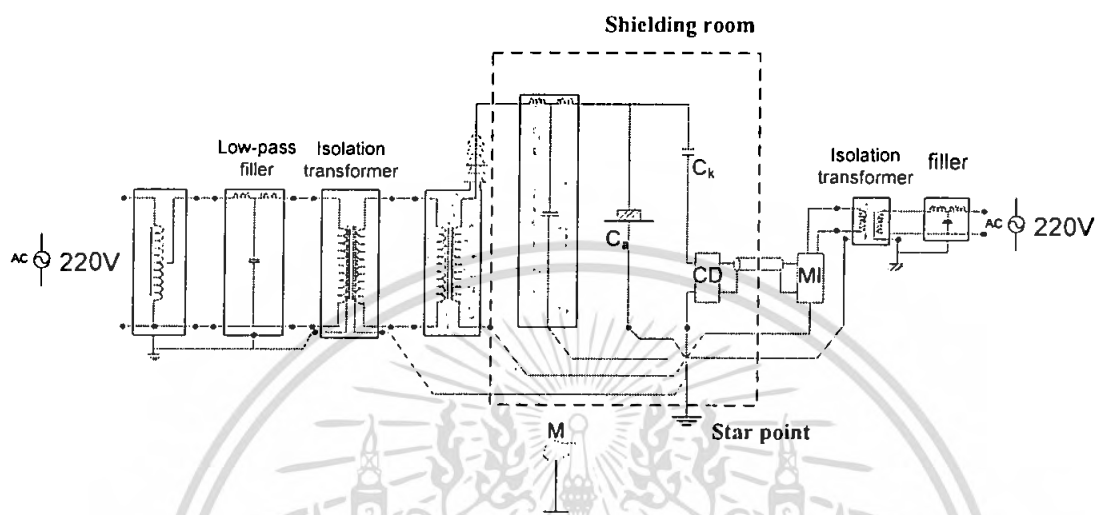
M คือ โลหะที่ไม่ได้ต่อลงดินและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ

2.4.2 การลดสัญญาณรบกวน

การลดสัญญาณความถี่สูง เช่น พวกรวมฮาร์มอนิกสูงๆ จะให้ตัวกรองแรงดันต่ำ และอาจจะเพิ่มหม้อแปลงขดลวดแยก (Isolation Transformer) ช่วย โดยต่อทางด้านขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดสอบ ในกรณีที่เกิด PD ในหม้อแปลงทดสอบจะต้องใช้ตัวกรองแรงดันสูงต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้มาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

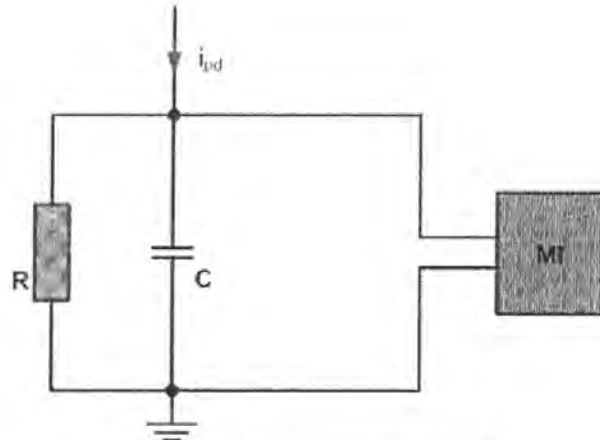
ทางด้านขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงทดสอบ การลดสัญญาณรบกวน RF และ EMP ซึ่งเข้ามาทางอากาศ ทำได้โดยการทดสอบในห้องชีลด์ การแก้ปัญหาเรื่องกราวด์รูปทำได้โดยการต่อกราวด์ร่วมกันเพียงจุดเดียว ตัวอย่างการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนในข้อ 2.4.1 แสดงในรูปที่ 2.15 [7]



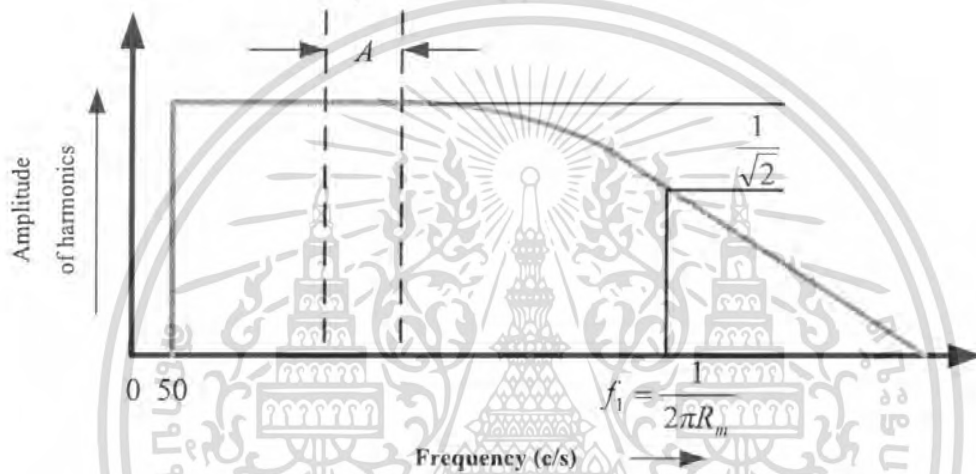
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน

2.5 อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device)

อุปกรณ์รับสัญญาณโดยปกติจะเป็นอิมพีแดนซ์วัต Z_m ซึ่งอาจจะเป็น RC หรือ RLC ต่อขนานกัน [8] ซึ่งต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน แบ่งออกเป็น 2 แบบ 1) แบบแอกทีฟ 2) แบบพาสซีฟ โดยแอกทีฟจะเป็นอุปกรณ์พวกออปแอมป์ ส่วนพาสซีฟ จะเป็นพวก RLC อุปกรณ์รับสัญญาณ (CD) จะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสอินพุตเป็นแรงดันเอาท์พุต ผลตอบสนองความถี่ (frequency response) ของชุดอุปกรณ์รับสัญญาณ CD เป็นอัตราส่วน (ratio) ระหว่าง $\frac{V_{output}}{I_{input}}$ ในการเลือกใช้อุปกรณ์รับสัญญาณ (CD) ต้องเลือกให้เหมาะสมโดยจะต้องป้องกันสัญญาณรบกวนด้วย [9] ในรูปที่ 2.16 และ 2.17 แสดงลักษณะของอุปกรณ์รับสัญญาณและผลตอบสนองความถี่ แบบ RC และ RLC ตามลำดับ

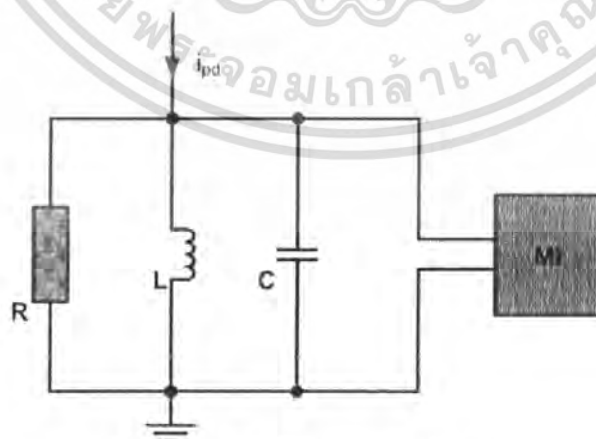


ก) อุปกรณ์รับสัญญาณแบบ RC



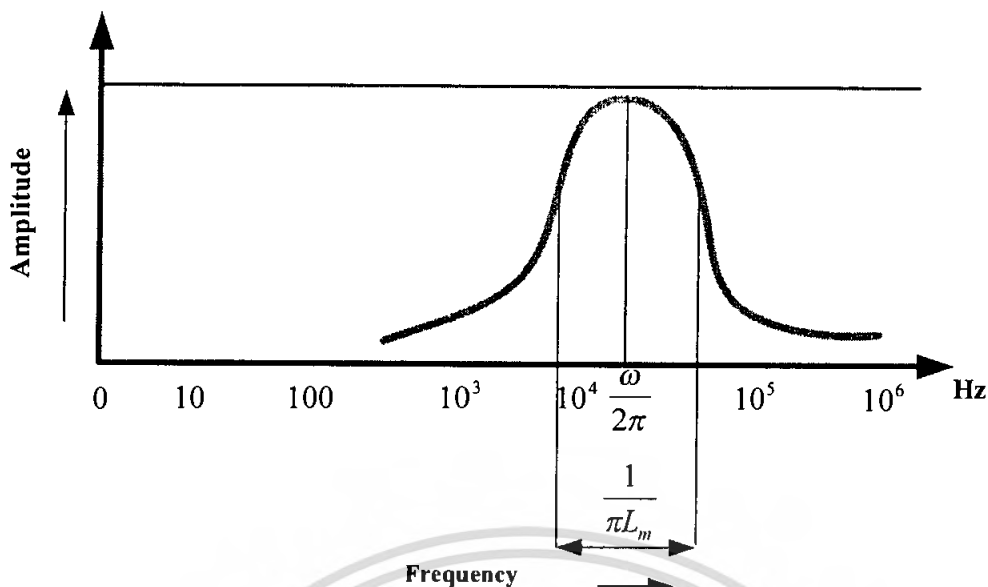
ข) ผลตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์รับสัญญาณแบบ RC [10]

รูปที่ 2.16 ลักษณะของอุปกรณ์รับสัญญาณแบบ RC



ก) อุปกรณ์รับสัญญาณแบบ RLC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) ผลตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์รับสัญญาณแบบ RC [10]

รูปที่ 2.17 ลักษณะของอุปกรณ์รับสัญญาณแบบ RLC

2.6 คุณลักษณะของระบบวัด [1]

2.6.1 คุณลักษณะสำคัญของระบบวัด PD ตามมาตรฐาน IEC ได้ระบุไว้ดังนี้

1) อิมพีแดนซ์ถ่ายโอน $Z(f)$ คือ อัตราส่วนของขนาดแรงดันต้านออก ต่อขนาดกระแสป้อนเข้าในฟังก์ชันความถี่ f เมื่อสัญญาณป้อนเข้าในรูปคลื่นไซน์

2) ความถี่จำกัดล่าง และบน f_1 และ f_2 คือ ความถี่อิมพีแดนซ์ถ่ายโอน $Z(f)$ ตกไป 6 dB จากค่ายอดแถบผ่าน

3) ความถี่แถบกลาง f_m และความกว้างแถบ Δf ตามลำดับ คือ

$$f_m = (f_1 + f_2)/2$$

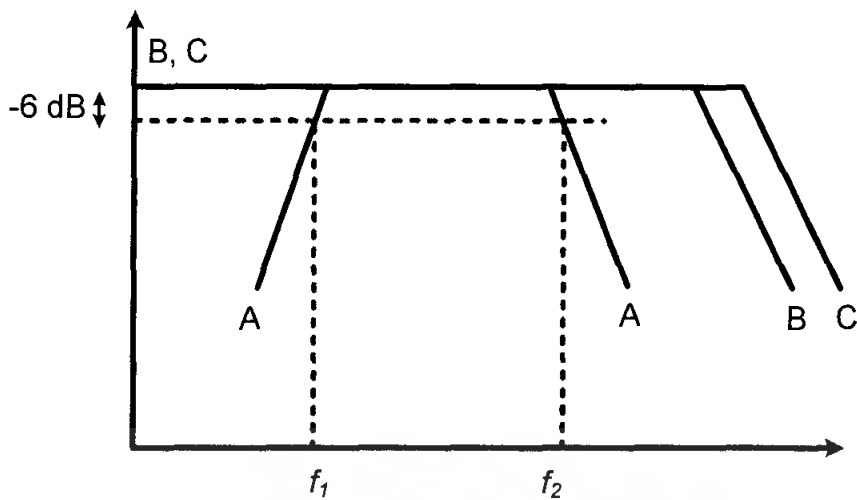
$$\Delta f = f_2 - f_1$$

4) เวลาแยกชัดพัลส์ (pulse resolution time) T_r คือ เวลาที่สั้นที่สุดระหว่าง 2 พัลส์ที่เข้าติดกันของพัลส์ที่แคบที่สุด รูปร่างเดียวกัน ชั่วเดียวกัน และขนาดประจุที่ค่ายอดของผลตอบสนองขนาดเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 10% ของพัลส์เดี่ยว ซึ่งเป็นตัวชี้บอกถึงความสามารถของเครื่องวัด PD

5) ความผิดพลาดอินทิเกรชันของการวัดประจุปรากฏขึ้น เมื่อขีดจำกัดความถี่บนของขนาดกระแสพัลส์ PD สเปกตรัมต่ำกว่า ความถี่ตัดบนของระบบวัดแถบกว้าง หรือความถี่แถบกลางของระบบวัดแบบแถบแคบ

อิมพีแดนซ์เข้า Z_{mi} ของ CD หรือระบบวัดมีผลต่อรูปร่างของกระแสพัลส์ PD $i(t)$ ถ้าอิมพีแดนซ์เข้ามีค่าสูงเกินไป จะทำให้การถ่ายโอนประจุระหว่าง C_i กับ C_k ล่าช้า อาจกระทบต่อขีดจำกัดความถี่บน Z_{mi} ในทางปฏิบัติ ประมาณ 100 โอห์มก็เพียงพอแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายและความถี่ที่เกิดจากความผิดพลาดอินทิเกรชันของระบบวัดแบบแถบกว้าง [11]

- โดย A คือ ช่วงแถบผ่านของระบบวัด
 B คือ ขนาดสเปกตรัมความถี่ของกระแสพัลส์ PD
 C คือ ขนาดสเปกตรัมความถี่ของกระแสพัลส์เปรียบเทียบ
 f_1 คือ ความถี่ตัดด้านต่ำ
 f_2 คือ ความถี่ตัดด้านสูง

2.6.2 ระบบวัด PD สำหรับวัดประจุที่ปรากฏ [6]

คุณสมบัติที่สำคัญของระบบวัด PD สำหรับวัดประจุที่ปรากฏมีดังนี้

1) ระบบวัดประจุที่ปรากฏ (q) นี้จะวัดเฉพาะค่ายอดพัลส์ของ PD ที่มีค่าสูงสุดและเกิดขึ้นซ้ำๆ ทุกคาบเวลาของความถี่ของแรงดันทดสอบ การอ่านค่าของอุปกรณ์วัดจะใช้หลักการเดียวกันกับวงจรตรวจจับค่ายอดแบบแอนะล็อกที่มีค่าคงตัวทางเวลาของการอัดประจุ (electric charging time constant) สั้นมาก และมีค่าคงตัวทางเวลาของการคายประจุ (electric discharging time constant) ≤ 0.44 วินาที การตอบสนองของระบบวัดที่มีต่อพัลส์ของ PD ที่มีระยะห่างระหว่างพัลส์เท่ากันที่ถูกป้อนด้วย Pulse repetition frequency, N จะทำให้ค่าที่ระบบวัดอ่านได้ R เป็นตามตารางต่อไปนี้ โดยสมมติว่าพิสัย (range) และอัตราขยาย (gain) ถูกปรับให้อ่านเต็มสเกลหรือ 100% เมื่อ $N = 100$

$N(1/s)$	1	2	5	10	50	≥ 100
$R_{min}(\%)$	35	55	76	85	94	95
$R_{max}(\%)$	45	65	86	95	104	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ระบบวัด PD แบบแถบกว้าง จะกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ต่างๆของ Transfer impedance, $Z(f)$ ดังนี้

$$30\text{kHz} \leq f_1 \leq 100\text{kHz}$$

$$f_2 \leq 500\text{kHz}$$

$$100\text{kHz} \leq \Delta f \leq 400\text{kHz}$$

3) ระบบวัด PD แบบแถบแคบ จะกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ต่างๆของ Transfer impedance, $Z(f)$ ดังนี้

$$9\text{kHz} \leq \Delta f \leq 30\text{kHz}$$

$$50\text{kHz} \leq f_m \leq 1\text{MHz}$$

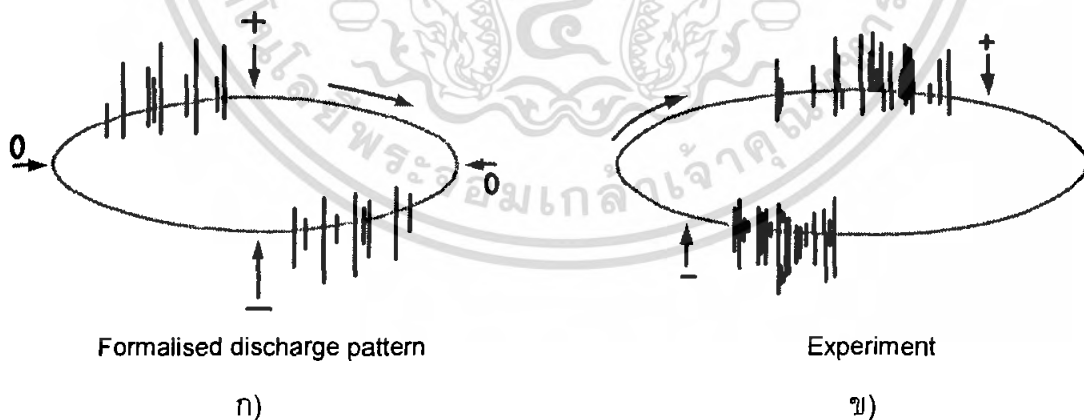
ซึ่ง f_m สามารถปรับค่าได้ และกำหนดให้ขนาดของ $Z(f)$ ที่ความถี่ $f_m \pm \Delta f$ มีค่าลดลงต่ำกว่าค่ายอดสูงสุดที่อยู่ในช่วงแถบผ่าน 20 dB

4) ความเป็นเชิงเส้นของระบบวัด มาตรฐานยอมให้สเกลแฟกเตอร์ k ผิดพลาดได้น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

2.7 รูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge Pattern) [9]

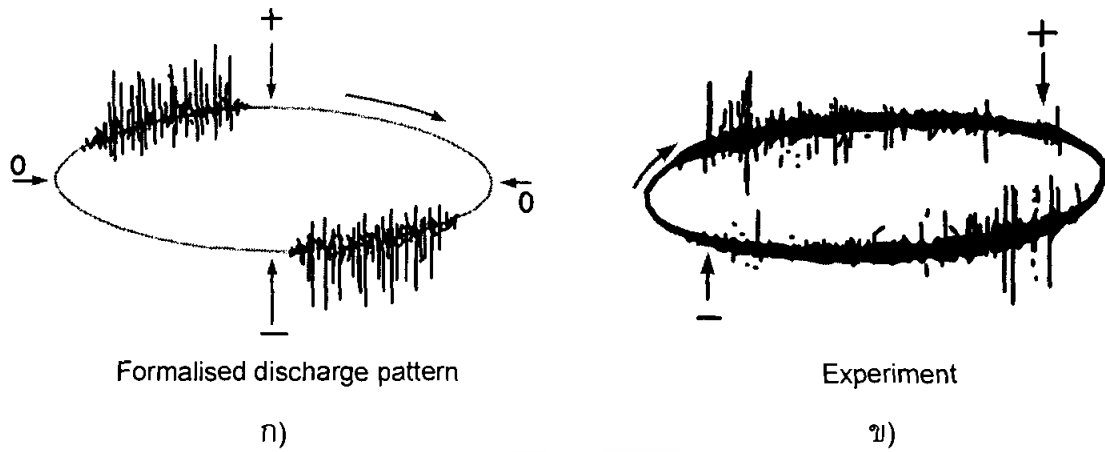
2.7.1 ดีสชาร์จภายใน (Internal Discharge)

ลักษณะของการเกิดดีสชาร์จภายในแสดงบนฐานเวลารูปวงรี จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0-90 องศา และ 180-270 องศา เช่นเดียวกับดีสชาร์จตามผิวแต่ลักษณะการกระจายของพัลส์ PD จะน้อยกว่า



รูปที่ 2.19 ลักษณะการเกิดดีสชาร์จภายในบนฐานเวลารูปวงรี

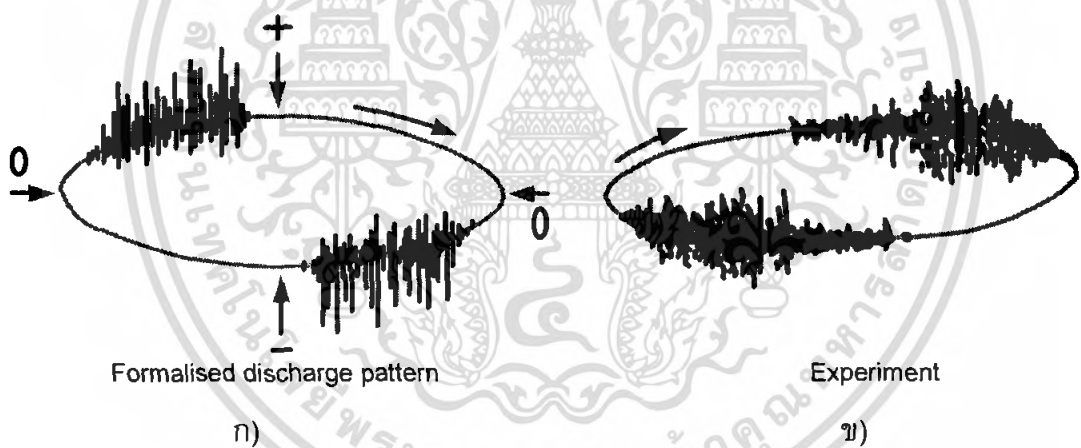
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ลักษณะการเกิดดีสชาร์จภายในเนื้อฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.7.2 ดีสชาร์จตามผิว (Surface Discharge)

ลักษณะของการเกิดดีสชาร์จตามผิวที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรี จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0-90 องศาและ 180-270 องศา

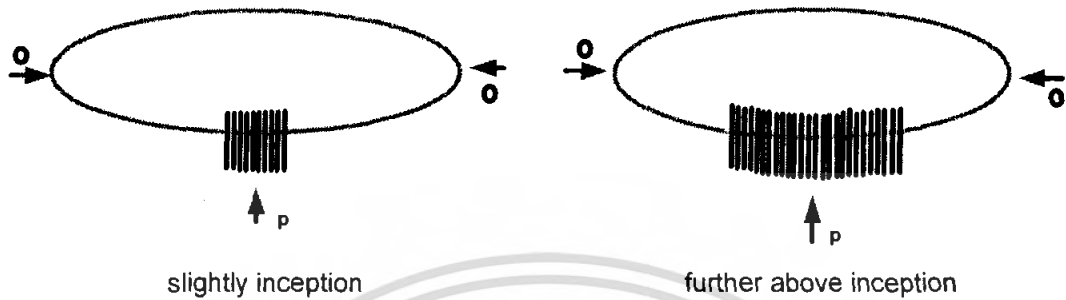


รูปที่ 2.21 ลักษณะการเกิดดีสชาร์จตามผิวบนฐานเวลารูปวงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 โครนาดีสชาร์จ (Corona Discharge)

ลักษณะของโครนาทางต้านแรงสูงที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรีจะเกิดในช่วงมมเฟส 270 องศา สำหรับในกรณีแรงดันเริ่มต้น และเมื่อแรงดันสูงขึ้นดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดในช่วง 90 องศาด้วย โดยขนาดของ PD จะมีค่าใกล้เคียงกัน



Formalised discharge pattern

ก)

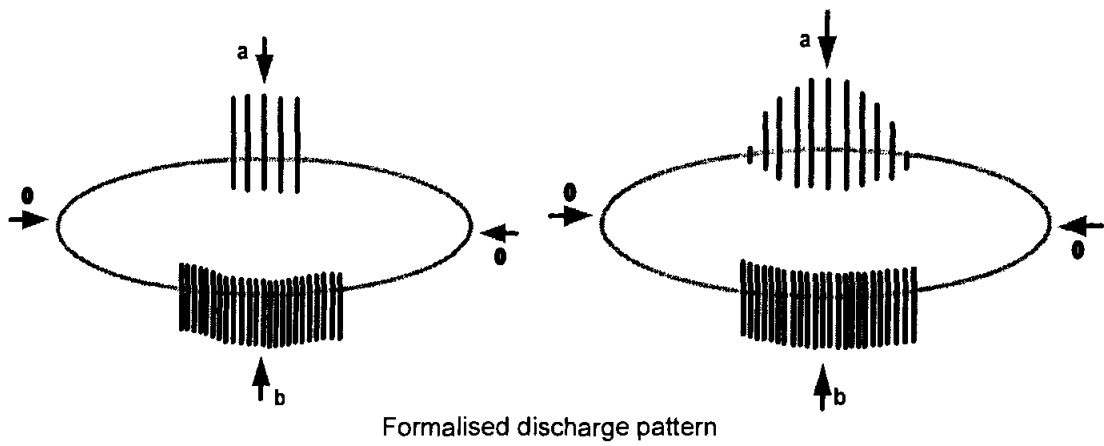


Experiment

ข)

รูปที่ 2.22 ลักษณะการเกิดโครนาดีสชาร์จในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Formalised discharge pattern

ก)



Experiment

ข)

รูปที่ 2.23 ลักษณะการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์รับสัญญาณ

ในการตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวนนั้น จำเป็นต้องรู้ลักษณะรูปร่าง และสเปกตรัมความถี่ของพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนที่ต้องการวัด เพื่อให้การวัดเกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด และสามารถนำข้อมูลของการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนมาออกแบบอุปกรณ์รับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน โดยในการออกแบบได้กำหนดคุณลักษณะของอุปกรณ์วัด และอุปกรณ์รับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60270 [6]

3.1 การออกแบบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

3.1.1 ค่ากำหนดของการออกแบบตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

- ขนาด 2 nF 50 kV(rms)
- ใช้ตัวเก็บประจุชนิด Metallize Polypropylene Film ต่ออนุกรมกัน 110 ตัว

การออกแบบในโครงการนี้เลือกใช้ ตัวเก็บประจุชนิด Metallize Polypropylene Film ของบริษัท VISHAY Type MKP 1845 0.22 μ F ค่าผิดพลาด $\pm 10\%$ 1.6 kV DC 650 V AC ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการออกแบบ

3.1.2 การออกแบบสร้างจริง

การออกแบบตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว ตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ในการออกแบบมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 220 nF จากข้อกำหนดในการออกแบบต้องการแรงดันที่พิกัด 50 kV(rms)

: เพื่อสำหรับการทดสอบ withstand ที่ 110 % ของแรงดันที่พิกัดเท่ากับ 55 kV(rms)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการออกแบบเลือกใช้ตัวเก็บประจุ 110 ตัว เพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ 2 nF ดังแสดงในรูปที่ 3.2

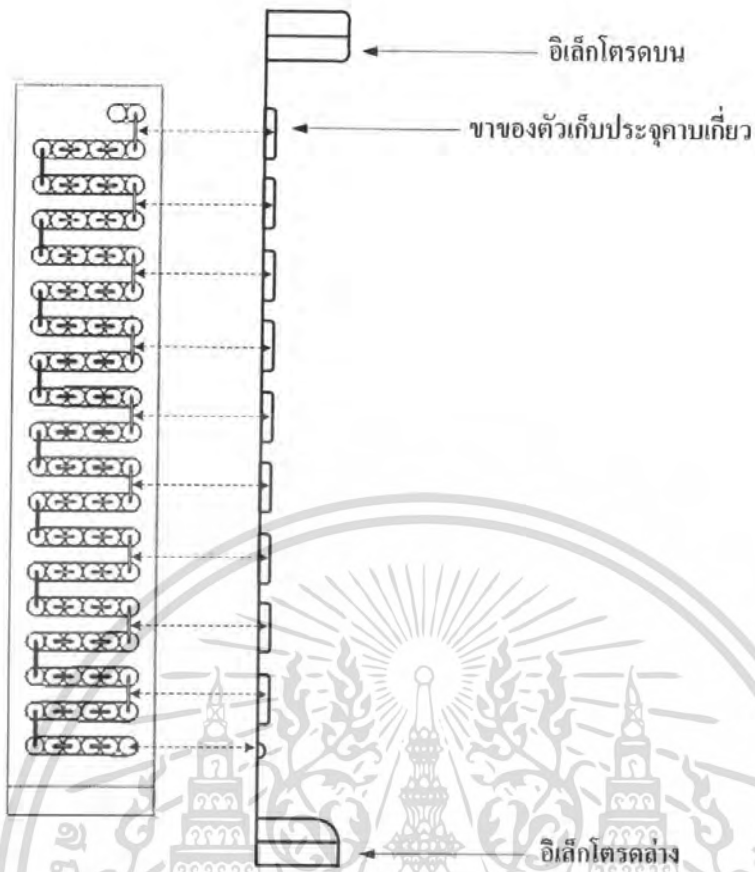


รูปที่ 3.2 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์

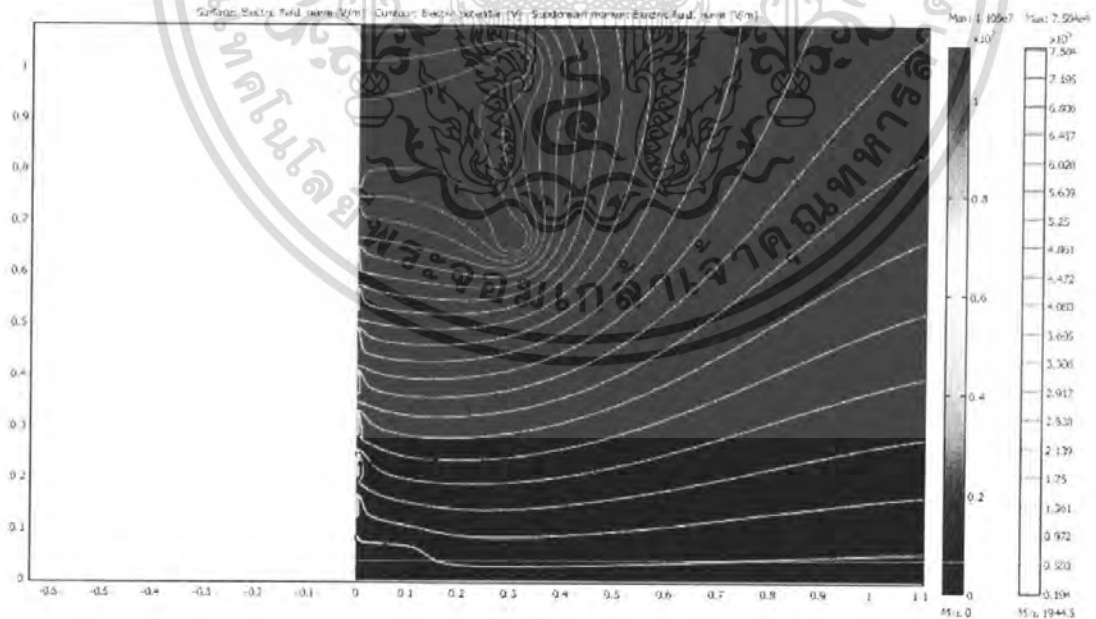
การจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณขาของตัวเก็บประจุที่ต่อกันภายในท่อ เพราะตัวเก็บประจุที่ออกแบบสร้างจะต้องไม่เกิด PD ที่แรงดันทดสอบ โดยกำหนดรัศมีของอิเล็กโตรดชนิดบริเวณหัวต่อแรงสูงมีรัศมีเท่ากับ 15 cm และขนาดพื้นที่หน้าตัดบริเวณเชื่อมต่อขาของตัวเก็บประจุมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.25 มิลลิเมตร

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ	77.78	kV _{peak}
2. ทำการป้อนแรงดันทางด้าน	ด้านบนของท่อ	
3. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max})	110.75	kV _{peak} /cm
4. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์	ไฟไนต์อีลิเมนต์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

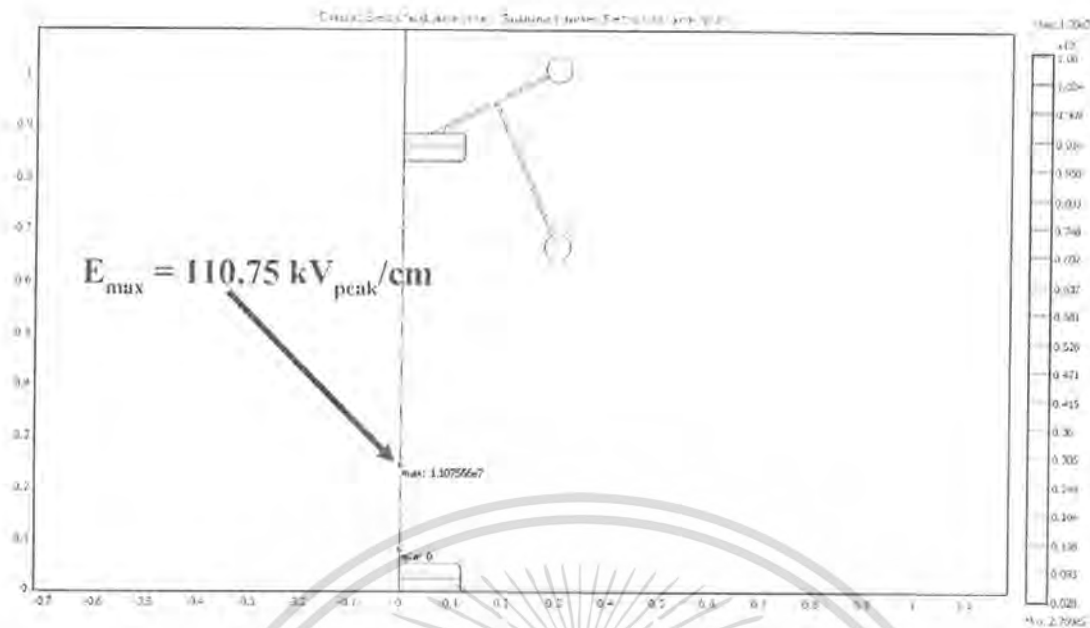


ก) รูปแบบการจำลองตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว



ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



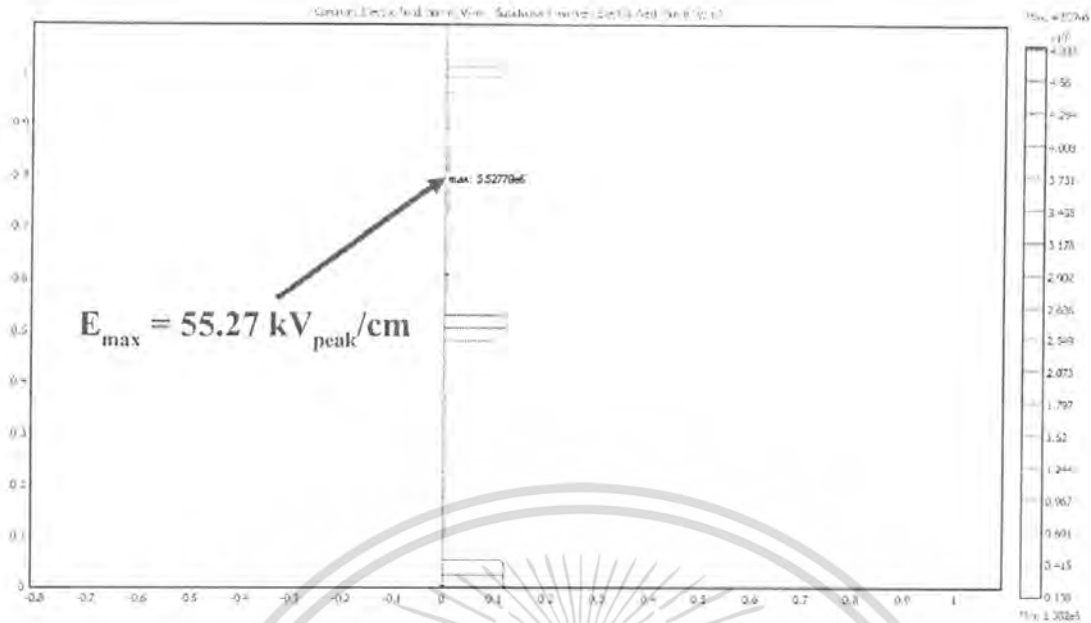
รูปที่ 3.3 แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าการจำลองแบบความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นมีความคงทนของอากาศ (ความคงทนของอากาศมีค่าเท่ากับ $30 \text{ kV}_{\text{peak}}/\text{cm}$) ขึ้นที่ระหว่างขั้วต่อขาของตัวเก็บประจุ ดังนั้นการแก้ไขปัญหามาจากแบบที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์สามารถทำได้ดังนี้

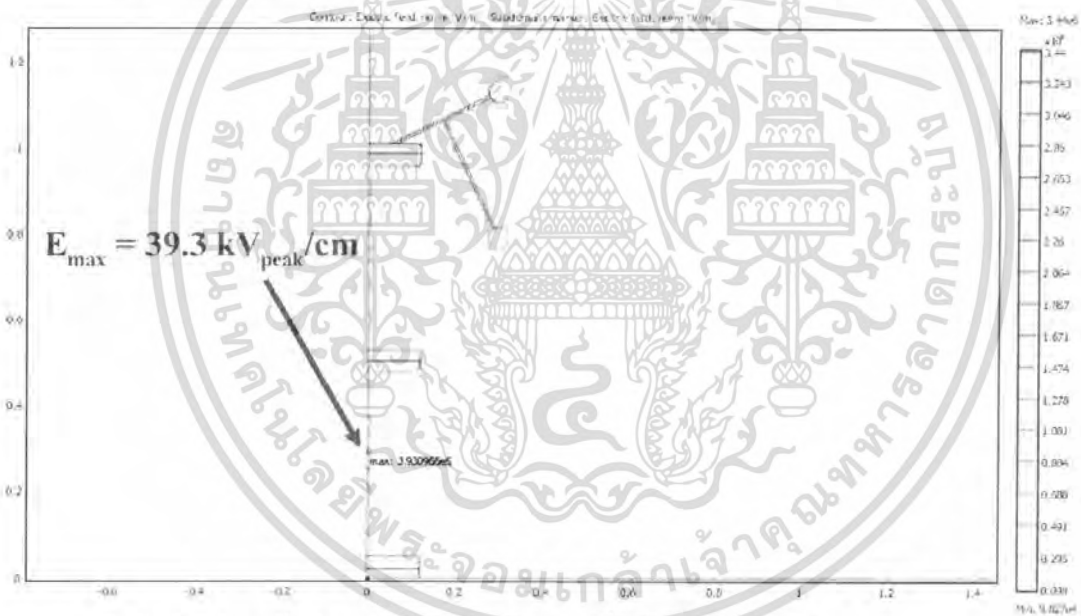
1) อัดก๊าซ SF_6 ที่ความดัน 2 bar สามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดได้ถึง $178 \text{ kV}_{\text{peak}}/\text{cm}$ (คุณสมบัติของก๊าซ SF_6 สามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าได้ $89 \text{ kV}/\text{cm}$ ที่ความดัน 1 bar)

2) ทำการออกแบบใหม่โดยแบ่งตัวเก็บประจุออกเป็น 2 ท่อน ท่อนละ 25 kV_{rms} โดยแต่ละท่อนมีค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 4 nF ใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน 2 ท่อน ได้ค่าความจุไฟฟารวมเท่ากับ 2 nF โดยในแต่ละท่อนใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันภายในท่อนละ 55 ตัว โดยใน 1 ท่อนนั้นจะมีทั้งหมด 9 ชั้น ชั้นละ 6 ตัว และอีก 1 ชั้น มี 1 ตัว บริเวณรอยต่อของขาตัวเก็บประจุควรเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดเพื่อลดการเกิดโคโรนา ในการ Simulation ได้จำลองโดยกำหนดให้ขนาดของท่อที่ใช้ในการเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดบริเวณเชื่อมต่อขาของตัวเก็บประจุมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของซิลต์อิเล็กโตรด 60 cm ผลการ Simulation เพื่อดูความเครียดสนามไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

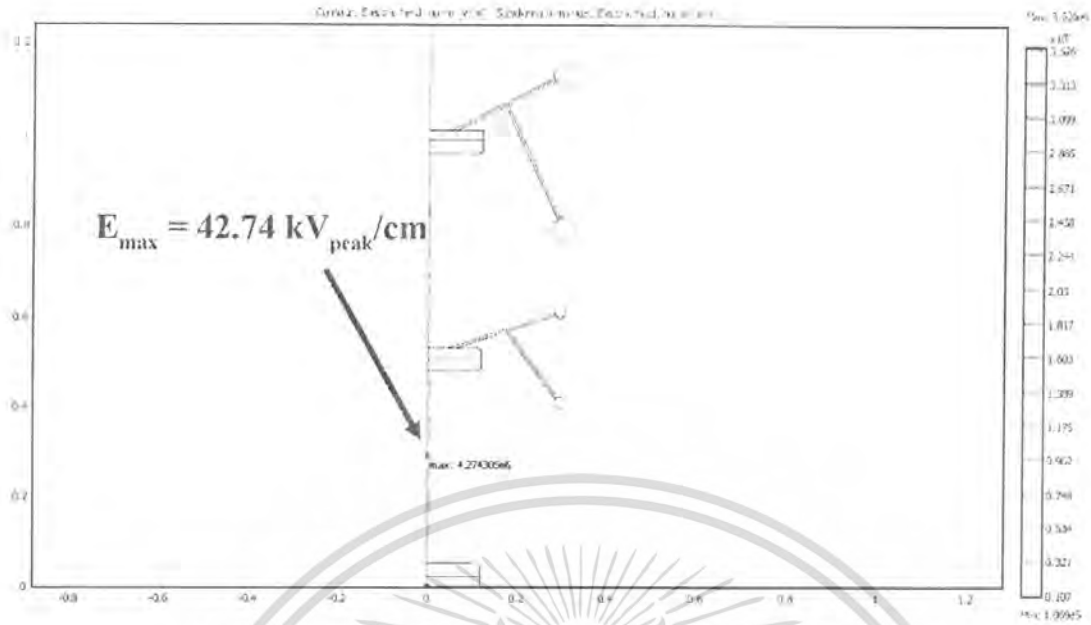


ก) การแบ่งตัวเก็บประจุออกเป็น 2 ส่วน เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า

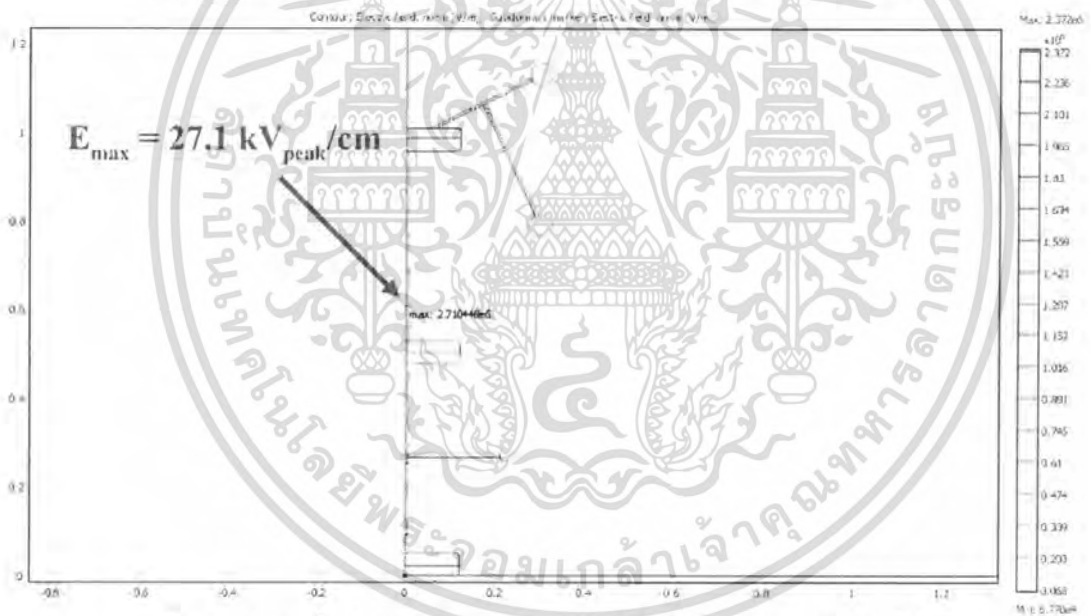


ข) ตัวเก็บประจุที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน และเพิ่มซีลต์ทางด้านอิเล็กโตรดแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

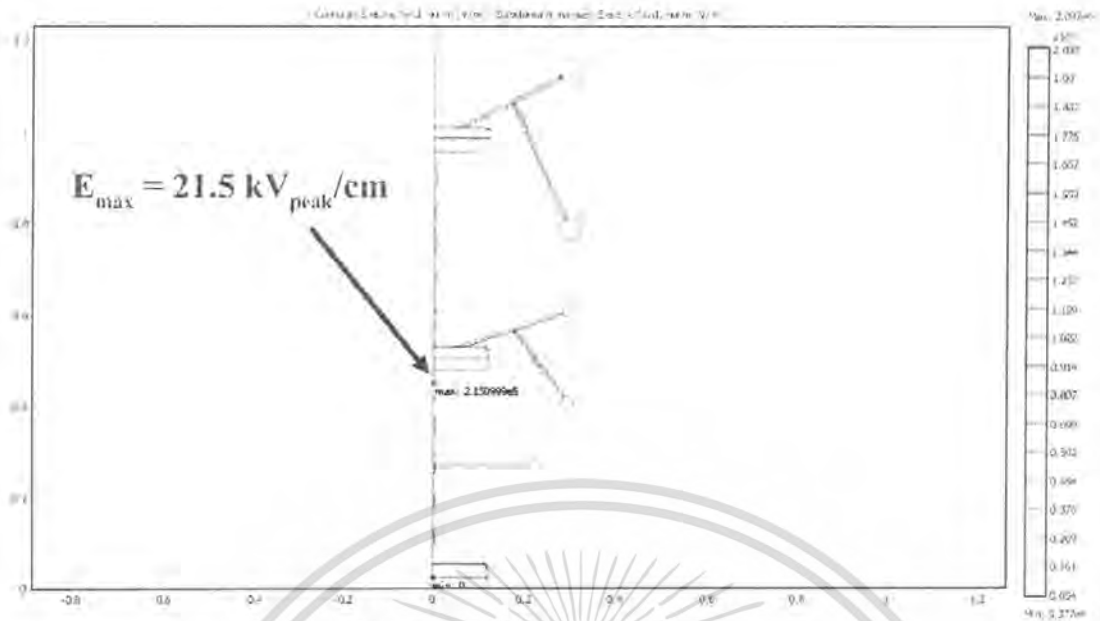


ค) ตัวเก็บประจุที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน และเพิ่มซิลด์ขึ้นทั้ง 2 ส่วน



ง) ตัวเก็บประจุที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน และมีซิลด์ 2 แบบประกอบเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



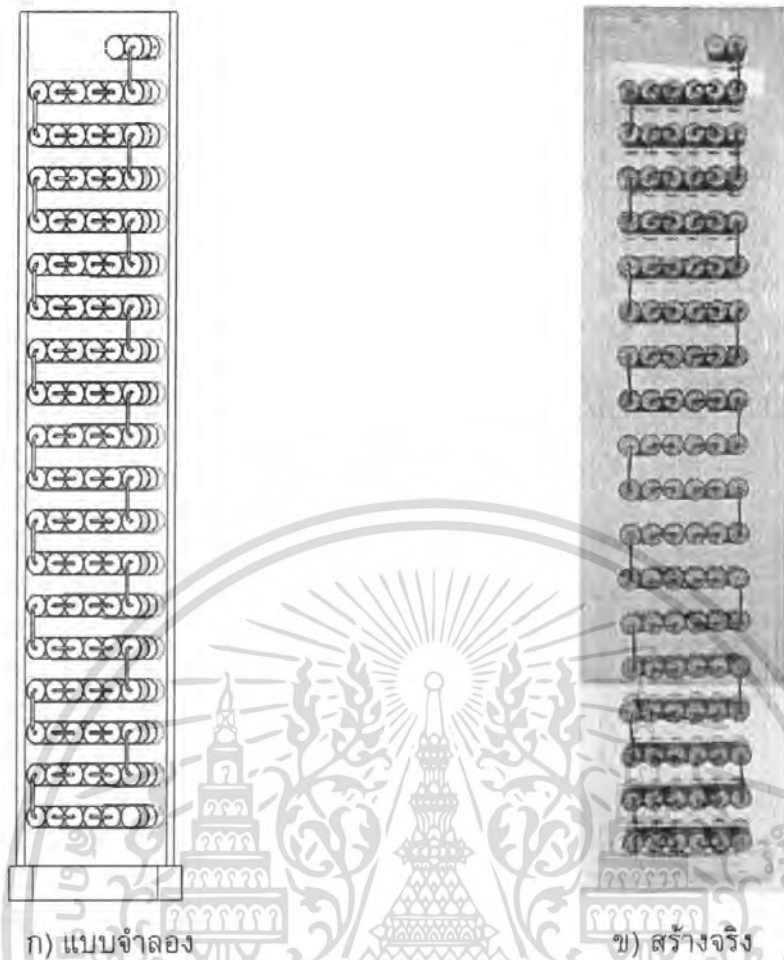
จ) ตัวเก็บประจุที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน และมีซีลด์เพิ่มเป็น 3 ชุด

รูปที่ 3.4 แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเมื่อแบ่งเป็น 2 ท่อน

จากรูปที่ 3.14 จ) จะเห็นได้ว่าเมื่อแบ่งเป็น 2 ท่อนแล้วความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 30 kV/cm ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ก๊าซ SF₆ แต่อย่างไรก็ตามปริณญานพันธฉบับนี้ทำการออกแบบโดยการอัดก๊าซ SF₆ ที่ความดัน 2 bar เพื่อป้องกันการเกิดโคโรนา เนื่องจากงบประมาณในการประกอบสร้างไม่เอื้ออำนวย ซึ่งถ้าทำการออกแบบสร้างเป็น 2 ท่อนงบประมาณจะเพิ่มขึ้นอีกประมาณเท่าตัว

ลักษณะการต่อกันทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ เป็นการนำตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมกันจำนวน 19 ชั้น แต่ละชั้นมีตัวเก็บประจุย่อย 6 ตัว จำนวน 18 แถว และอีก 1 แถว มี 2 ตัว ลักษณะการเชื่อมต่อกันของตัวเก็บประจุ จะใช้วิธีการเชื่อมแบบจุดต่อจุด โดยใช้ท่อทองแดง (Copper captube) เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.25 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณช่วงต่อกันระหว่างขาของตัวเก็บประจุแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.5

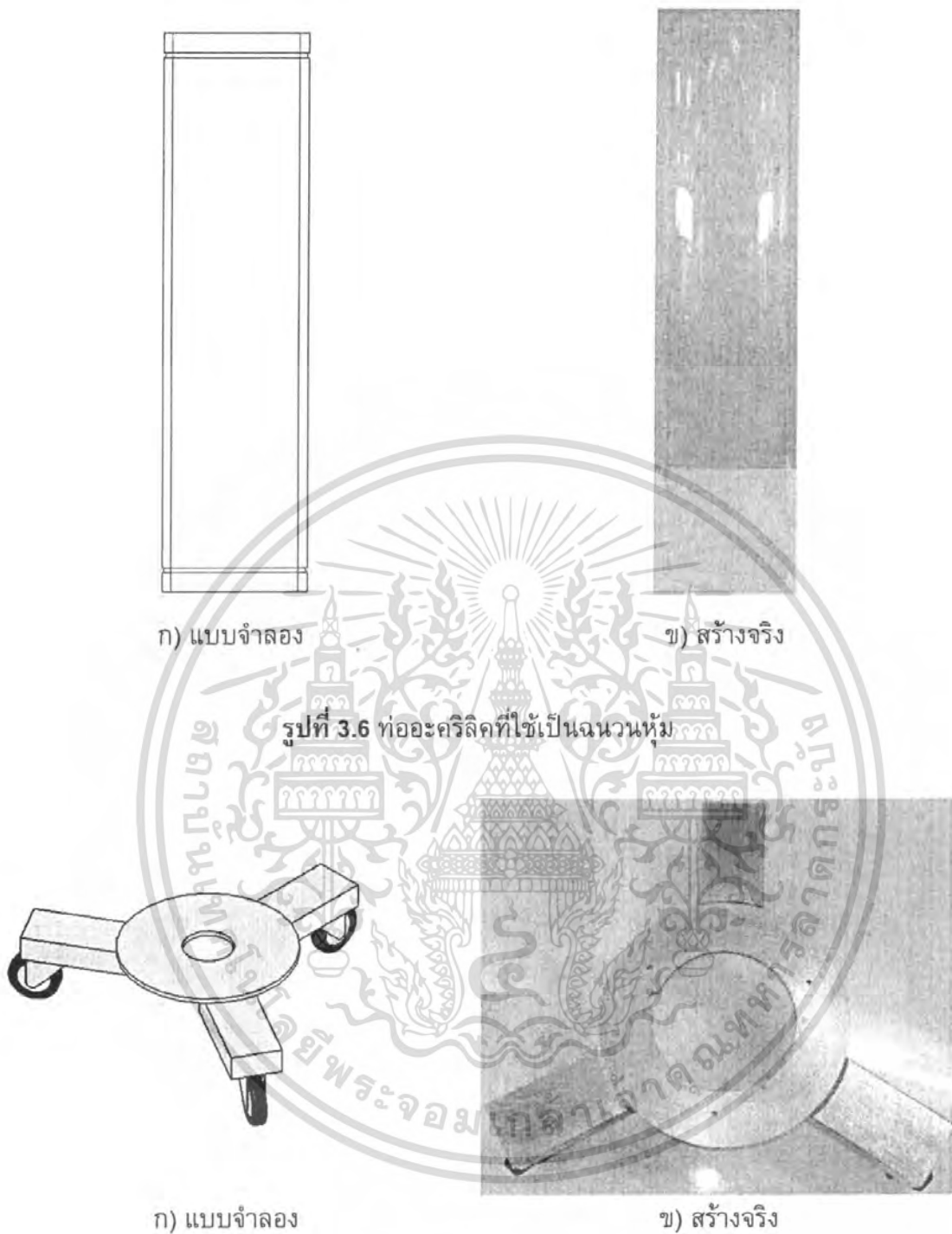
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การต่อกันแบบอนุกรมของตัวเก็บประจุ

ท่อ (ท่ออะคริลิก) ที่เป็นฉนวนหุ้ม ท่อจะต้องมีความยาวเพียงพอสำหรับระยะห่าง จาก ด้านขั้วต่อไฟฟ้าแรงสูงกับส่วนที่ต่อลงดิน (เพื่อป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวท่อ) และในการ กำหนดความยาวของท่อถูกบังคับเนื่องจากความสูงของแผ่นอะคริลิกที่ใช้เป็นฐานในการวางตัว เก็บประจุ ดังนั้นจะได้ความยาวของท่อเท่ากับ 78 cm มีเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อเท่ากับ 20 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และในรูปที่ 3.7 เป็นฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ฐานรองรับ

การคำนวณหาขนาดท่อซิลด์เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขั้วต่อแรงสูง โดยอาศัยหลักการของทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม เพราะตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวจะต้องไม่เกิด PD ที่แรงดันทดสอบ ดังนั้นในการคำนวณหาขนาดของท่อซิลด์จะใช้ค่ายอดแรงดันที่พิกัดในการคำนวณ ($77.78 \text{ kV}_{\text{peak}}$ เพื่อสำหรับการทดสอบ withstand 110 %) เนื่องจากการเกิดโคโรนา และการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศจะเกิดที่ค่ายอดแรงดันเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณ

จาก
$$E_{\max} \leq 24kV/cm = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

เมื่อ r_1 คือ รัศมีของท่อซิลด์

r_2 คือ ระยะห่างจากส่วนที่ต่อลงดิน หรือช่องว่าง (clearance)

กำหนดให้ $r_2 = 100$ cm

แทนค่า
$$24kV = \frac{77.78kV}{r_1 \ln \frac{100}{r_1}}$$

$$r_1 = \frac{77.78kV / 24kV}{\ln \frac{100}{r_1}}$$

จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์จะได้ $r_1 = 0.64$ cm Diameter = 1.28 cm แต่ในการออกแบบเลือกใช้ท่อขนาด 5 cm



ก) แบบจำลอง

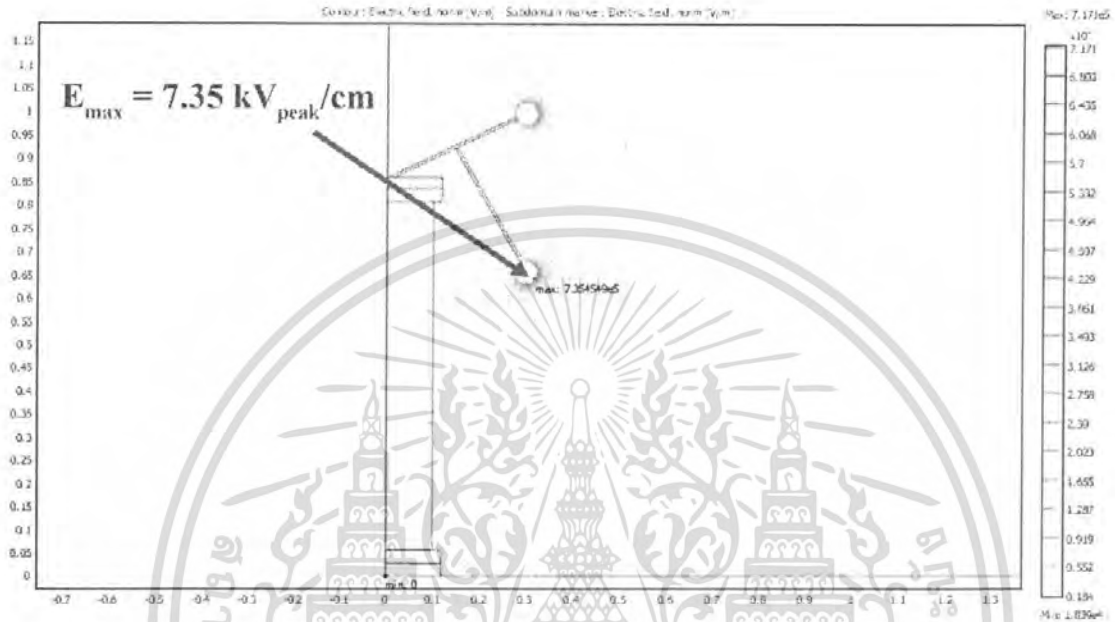
ข) สร้างจริง

รูปที่ 3.8 โครนาซิลด์แบบวงแหวนท่อ

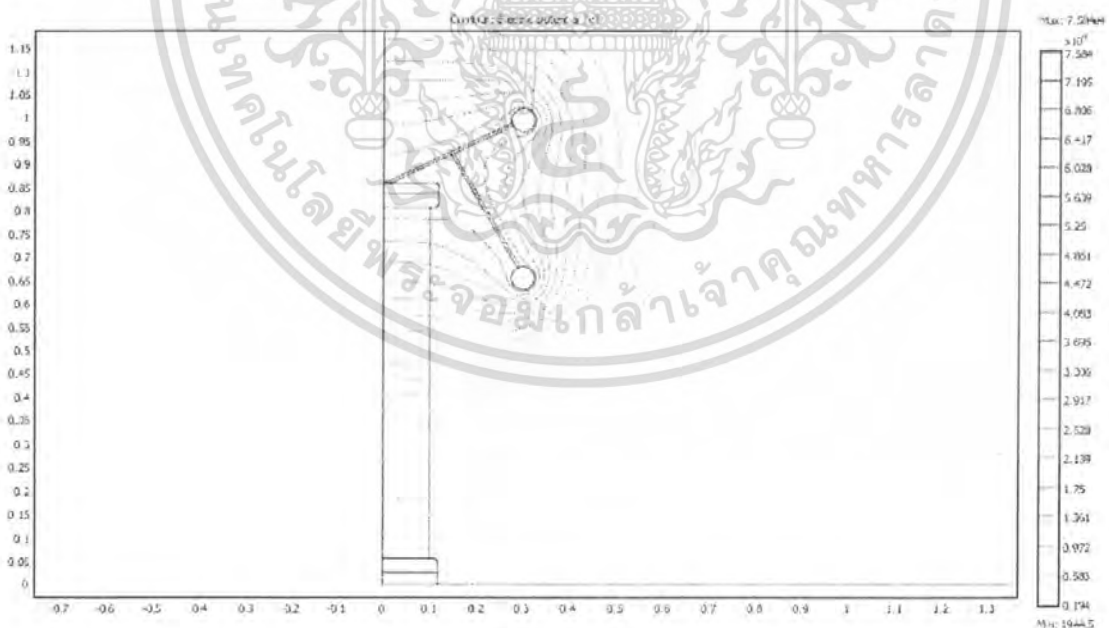
การจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหารัศมีของอิเล็กโตรดซิลด์ที่จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ผิวของท่อ อะคริลิก มีความสม่ำเสมอ เพื่อป้องกันการเกิดโครนาที่ผิวท่อด้วยพิกัดแรงดัน 77.78 kV_{peak} (เพื่อการทดสอบ withstand 110 %) ซึ่งจากการ Simulation ระยะที่ทำให้แรงดันที่ผิวท่อมีความสม่ำเสมอคือระยะที่มีรัศมีเท่ากับ 30 cm (เส้นผ่าศูนย์กลาง 60 cm) ดังแสดงในรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- | | | |
|---|-----------------|------------------------|
| 1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ | 77.78 | kV _{peak} |
| 2. ทำการป้อนแรงดันทางด้าน | ด้านบนของท่อ | |
| 3. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) | 7.35 | kV _{peak} /cm |
| 4. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์ | ไฟไนต์อีลิเมนต์ | |

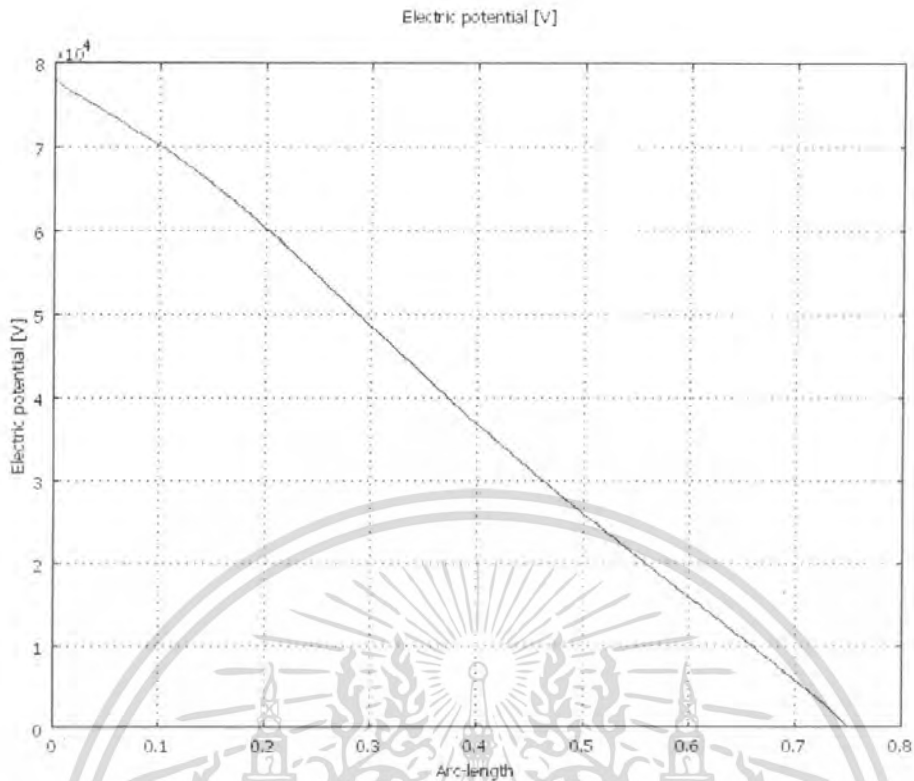


ก) ความเครียดสนามไฟฟ้า



ข) เส้นศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าที่ผิวท่อ

รูปที่ 3.9 แสดงผลการจำลองด้วยโปรแกรม

ส่วนประกอบที่ใช้ในการประกอบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว แสดงในรูปที่ 3.10 ถึงรูปที่ 3.14 และในรูปที่ 3.15 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling Capacitor) ที่ประกอบสร้าง



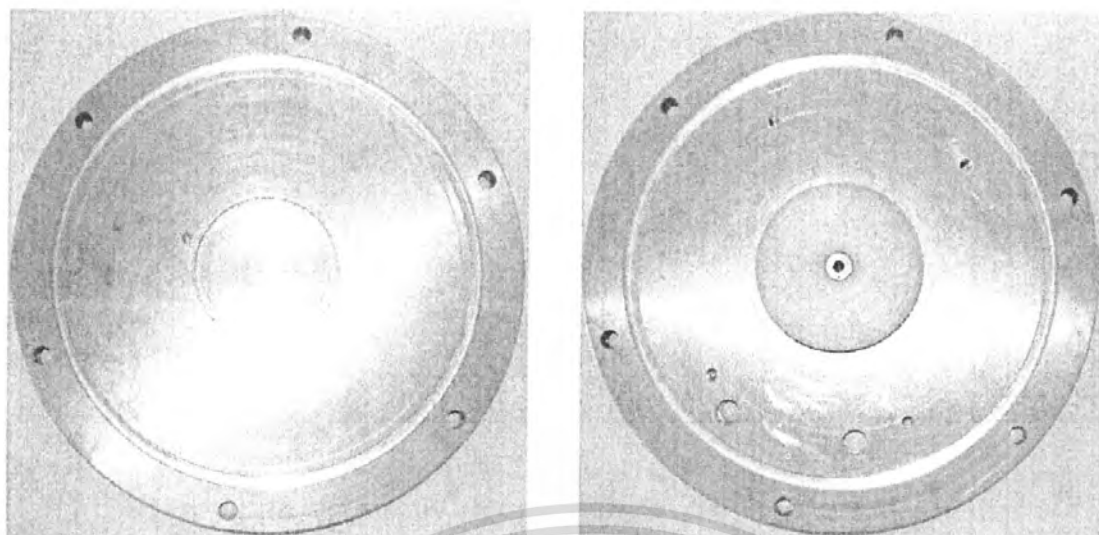
ก)



ข)

รูปที่ 3.10 เกจวัดความดันและวาล์วอัดก๊าซ

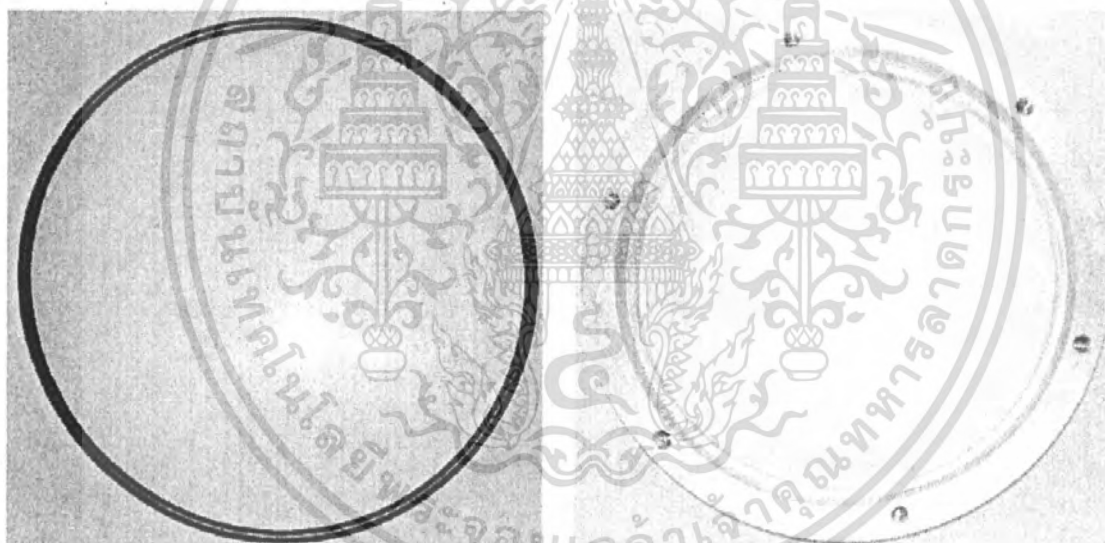
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

ข)

รูปที่ 3.11 ฝาปิดที่อด้านบนและด้านล่าง

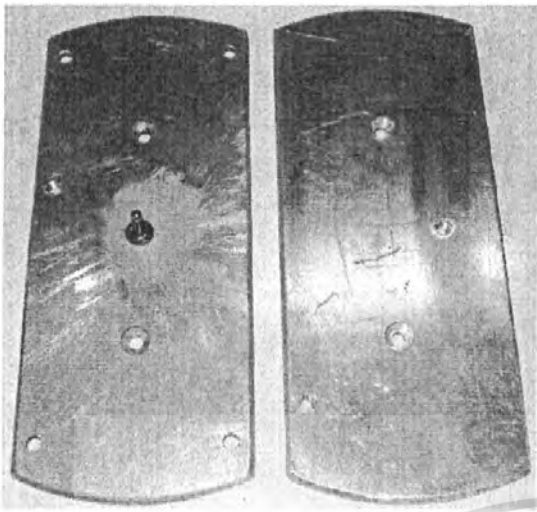


ก)

ข)

รูปที่ 3.12 โอริงค์และฝารองปิด

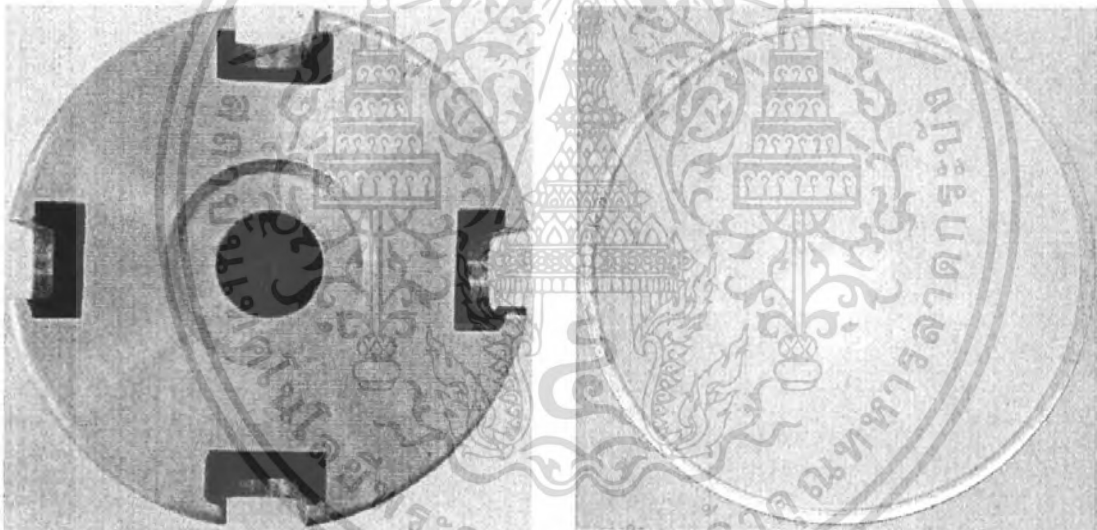
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

ข)

รูปที่ 3.13 แผ่นยึดอะคริลิคบน ล้างและแผ่นอะคริลิคที่ใช้เป็นฉนวนรอง

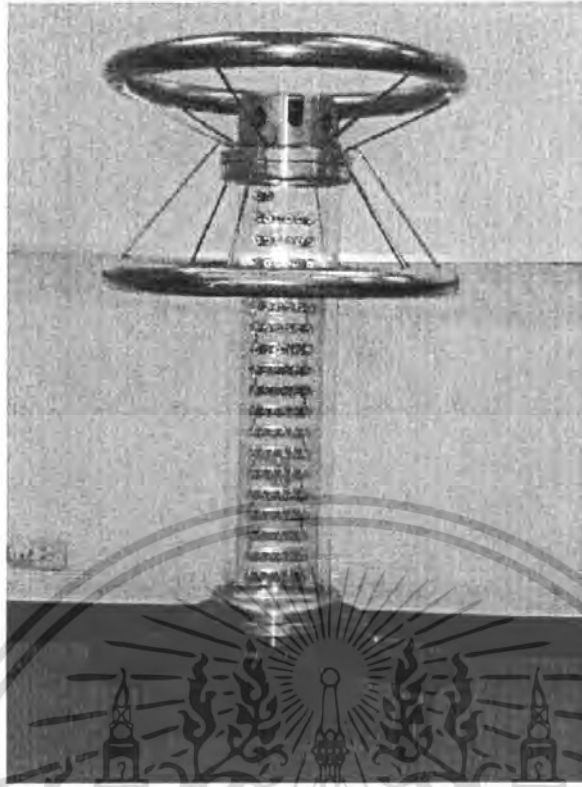


ก)

ข)

รูปที่ 3.14 หัวกะโหลก และแหวนรองฝาปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling Capacitor)

3.2 การออกแบบสร้างอุปกรณ์รับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน CD (Coupling Device)

3.2.1 หลักเกณฑ์ในการออกแบบอุปกรณ์รับสัญญาณและตัวกรองผ่านแถบเพื่อใช้ในการอินทิเกรตกระแสพัลส์มีรายละเอียดดังนี้

ระบบวัด PD แบบแถบกว้าง รวมถึง อุปกรณ์รับสัญญาณ (CD) ระบุคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ถ่ายโอน $Z(f)$ Transfer impedance, ที่มีความถี่จำกัดล่าง f_1 และ f_2 ดังนี้ [1]

$$30\text{kHz} \leq f_1 \leq 100\text{kHz}$$

$$f_2 \leq 500\text{kHz}$$

$$100\text{kHz} \leq \Delta f \leq 400\text{kHz}$$

จะเห็นว่ามาตรฐานกำหนดเฉพาะช่วงความถี่ของ $Z(f)$ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวกรองผ่านแถบ แต่ไม่ได้กำหนดอันดับของตัวกรอง ตัวกรองอันดับสูงจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่อยู่นอกช่วงความถี่แถบผ่าน (Pass-Band) หรือความถี่ที่ใช้ในการวัดได้ดีขึ้น แต่ถ้าอันดับของตัวกรองสูงเกินไป จะทำให้สัญญาณเอาท์พุทไม่เป็นแบบ “ α -response” ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องคำนึงข้อนี้ด้วย [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

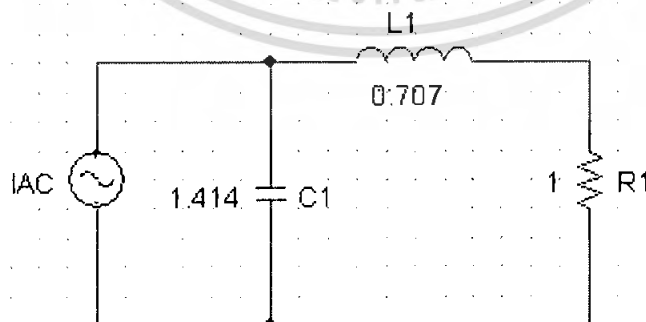
3.2.2 การเลือกอินพุตอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์รับสัญญาณ

เนื่องจากมาตรฐาน IEC มีได้กำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ไว้ การเลือกอินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าสูงจะทำให้ความไวในการวัดสูงตามไปด้วย แต่การเลือกอินพุตอิมพีแดนซ์สูงเกินไปจะทำให้ผลตอบสนองความถี่สูงของวงจรลดลง เนื่องจากค่าคงตัวทางเวลาเพิ่มขึ้น ($\tau=R_m C_m$) ผลกระทบนี้อาจทำให้เอาท์พุตเป็นแบบ “ β -response” ข้อควรคำนึงในการออกแบบ [8]

$$R_m = \frac{1}{6\pi f_2 C_m} \quad (3.1)$$

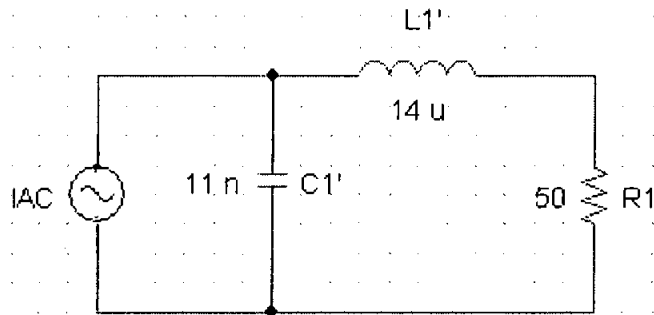
โดยที่ C_m คือ ค่าตัวเก็บประจุที่ประสิทธิภาพที่ต่อขนานกับ R_m
 R_m คือ ความต้านทานอินพุตของอิมพีแดนซ์วัด

จากเงื่อนไขข้างต้นและข้อกำหนดในการออกแบบ เนื่องจากอุปกรณ์รับสัญญาณและตัวเก็บประจุค่าที่เกี่ยวข้องที่ออกแบบสร้างเพื่อใช้ในการทดสอบโดยใช้ตัวเก็บประจุค่า C_k ขนาดเล็ก คือ $C_k = 2 \text{ nF}$ จึงเลือกอินพุตอิมพีแดนซ์ $R_m = \frac{1}{6\pi \times 415 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-9}} = 64 \Omega$ ดังนั้นในการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องวัด PD ภายในห้องปฏิบัติการจึงเลือกค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม อุปกรณ์รับสัญญาณเป็นตัวกรองผ่านแถบแบบ (Band-Pass Filter) Butterworth อันดับที่ 4 ที่มีช่วงความถี่ (-3dB) 37 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 415 กิโลเฮิร์ตซ์ และได้ออกแบบให้เป็นโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ มีสเกลแฟกเตอร์ 15000:1 โดยภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 30 μF หลักเกณฑ์ในการออกแบบตัวกรองผ่านแถบ (Band-Pass Filter) [12] พิจารณาจากรูปที่ 3.16 – รูปที่ 3.18 ลักษณะของอุปกรณ์รับสัญญาณแสดงดังในรูปที่ 3.19 และในรูปที่ 3.20 เป็นผลตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์รับสัญญาณ



รูปที่ 3.16 ลักษณะของตัวกรองแบบต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) อันดับที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

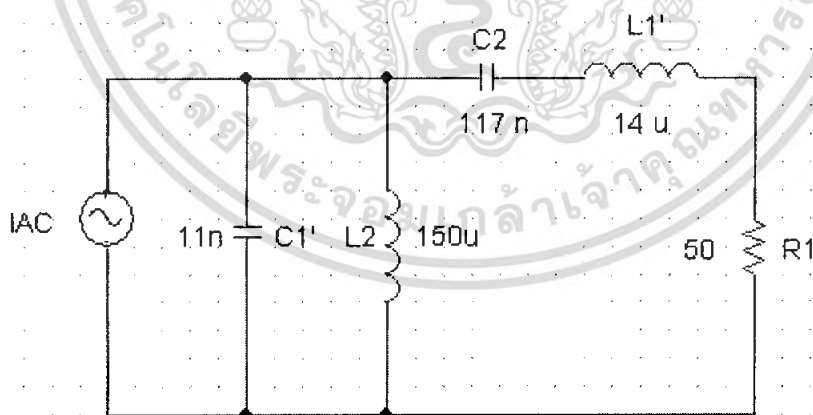


รูปที่ 3.17 แสดงการออกแบบตัวกรองแบบต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) อันดับที่ 2

- จากรูปที่ 3.16 และ รูปที่ 3.17 ทำการเปลี่ยนสเกล โดยกำหนดให้ตัวกรองแบบต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) มีค่าความถี่ cut-off (f_c) = 415 MHz และกำหนดให้ $R_1 = 50 \Omega$ จะต้องคำนวณค่า L_1' กับ C_1' ใหม่โดย

$$L_1' = \frac{L_1 \times R_1}{2\pi f_c} = \frac{0.707 \times 50}{2\pi \times 415 \times 10^3} = 14 \mu H$$

$$C_1' = \frac{C_1}{2\pi f_c R_1} = \frac{1.414}{2\pi \times 415 \times 10^3 \times 50} = 11 nF$$



รูปที่ 3.18 ตัวกรองแบบผ่านแถบ (Band-Pass Filter) ที่ทำการออกแบบ

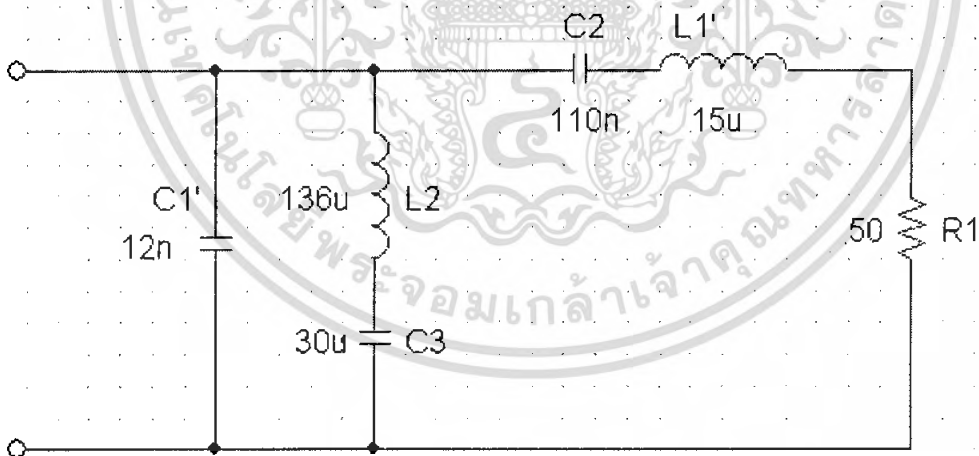
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.18 เป็นตัวกรองแบบแถบผ่านที่แปลงมาจากตัวกรองแบบต่ำผ่าน (Low-Pass Filter to Band-Pass Filter) กำหนดให้ $f_L = 37 \text{ kHz}$ $f_H = f_C = 415 \text{ kHz}$ จะได้ค่าความถี่กลาง $f_0 = \sqrt{f_L f_H} = 123.92 \text{ kHz}$ และ $\omega_0 = 778.22 \text{ kHz}$ และสามารถหาค่า C2 และ L2 ได้จาก

$$L2 = \frac{1}{\omega_0^2 C1'} = \frac{1}{(778.22)^2 \times 11 \times 10^{-9}} = 150 \mu\text{H}$$

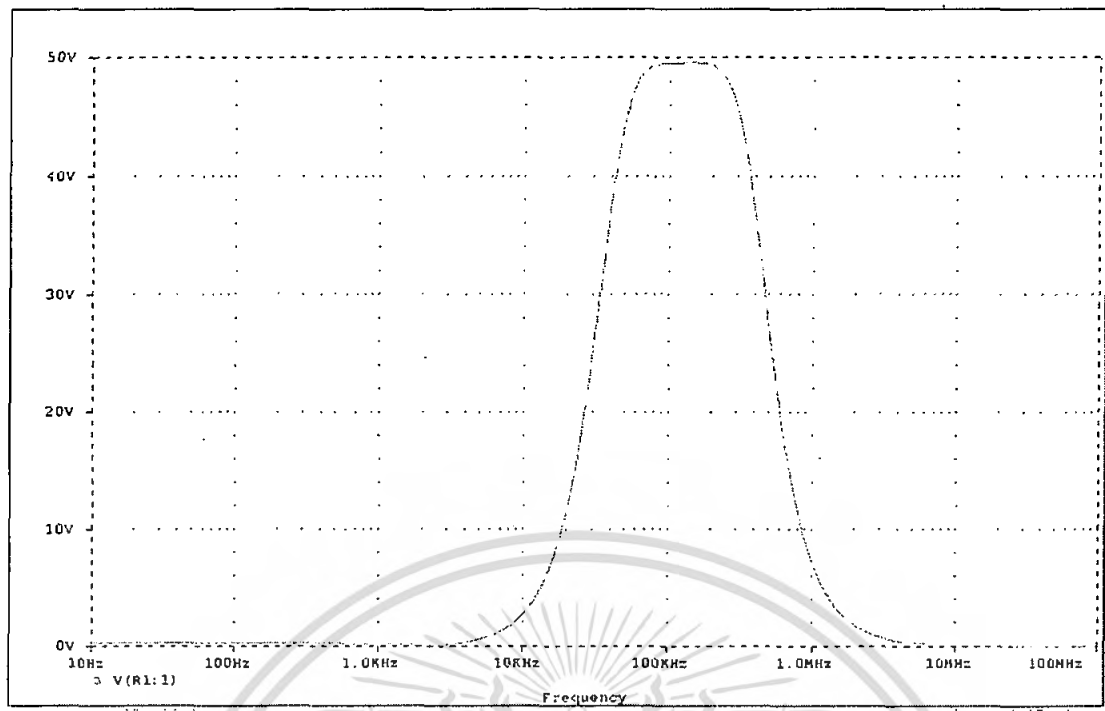
$$C2 = \frac{1}{\omega_0^2 L1'} = \frac{1}{(778.22)^2 \times 14 \times 10^{-6}} = 117 \text{ nF}$$

จากการออกแบบตัวกรองแบบแถบผ่าน (Band-Pass Filter) เพื่อใช้ร่วมกับโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ โดยภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุจะต่ออนุกรมอยู่กับตัวเหนี่ยวนำ (L2) โดยที่ความถี่ต่ำตัวเก็บประจุจะเสมือนเปิดวงจร ตัวเหนี่ยวนำจะเสมือนปิดวงจร และอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ (L2) จะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ C3 (ภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ) เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์รับสัญญาณที่คำนวณได้ เมื่อนำไปจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Pspice) ผลปรากฏว่าแบนวิดท์ที่ได้มีค่ามากกว่าที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ค่าตามที่กำหนดและเหมาะสม โดยการ simulation ลักษณะของอุปกรณ์รับสัญญาณที่ออกแบบ แสดงในรูปที่ 3.19 ผลตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์รับสัญญาณ แสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 ลักษณะของอุปกรณ์รับสัญญาณที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

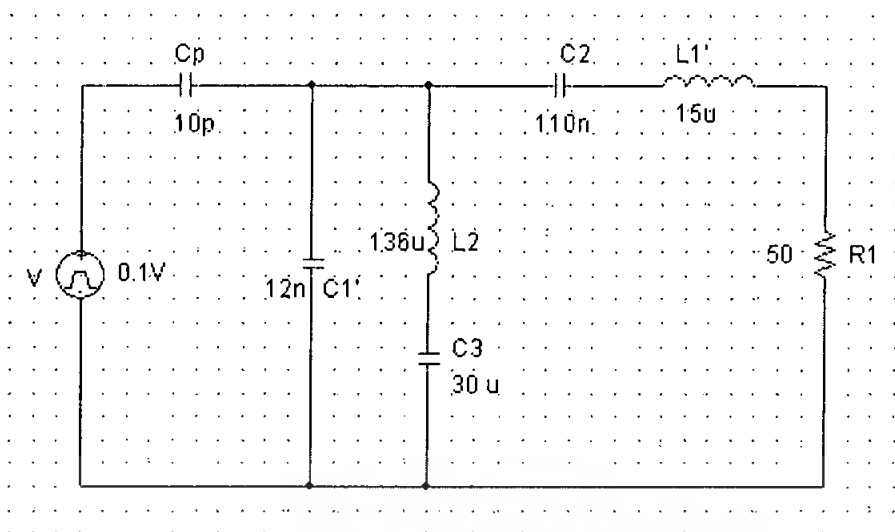


รูปที่ 3.20 ผลตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์รับสัญญาณชนิดแถบกว้าง

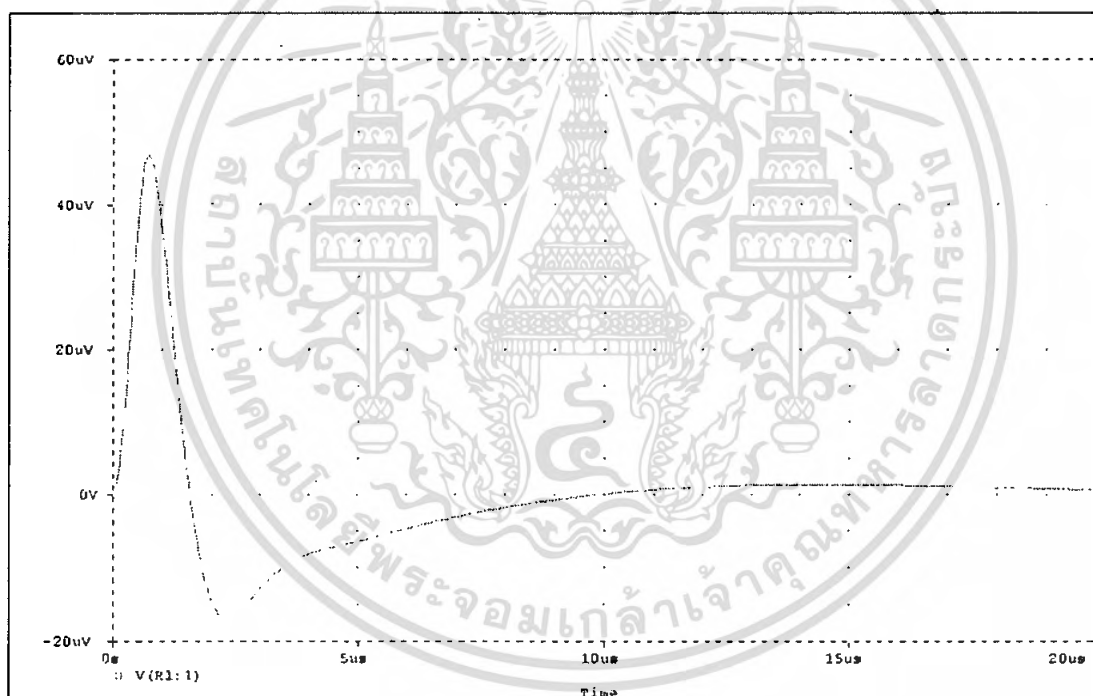
จากผลตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์รับสัญญาณมีความถี่จำกัดล่าง f_L ความถี่จำกัดบน f_H และความกว้างแถบ Δf ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 f_L &= 37 \text{ kHz} \\
 f_H &= 415 \text{ kHz} \\
 \Delta f &= 378 \text{ kHz}
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ลักษณะเอาร์ทพุต กรณีของวัสดุทดสอบทั่วไปทำได้โดยการป้อนกระแส อิมพัลส์ที่มีขนาดประจุ 1 พิโคคูลอมป์ที่อินพุตของอุปกรณ์รับสัญญาณ แสดงดังในรูปที่ 3.18 และในรูปที่ 3.19 สัญญาณเอาร์ทพุตเป็นแบบ “ α -response”

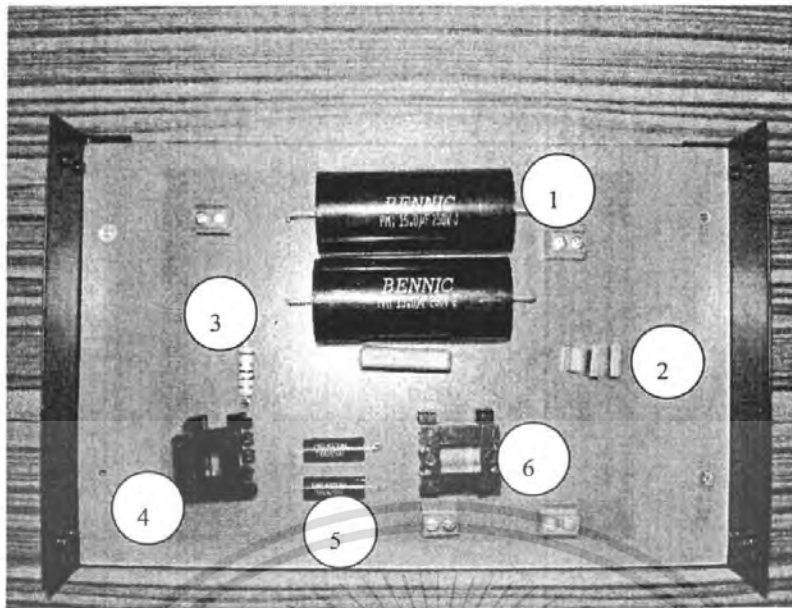


รูปที่ 3.21 วงจรที่ใช้ป้อนกระแสแอมป์ที่มีประจุ 1 พิโคคูลอมป์

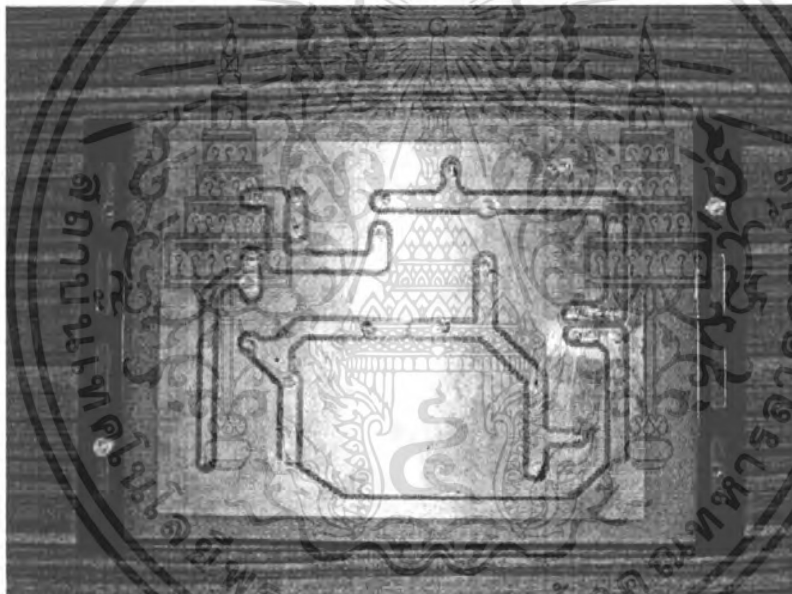


รูปที่ 3.22 ลักษณะเอาร์ทพุตที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

รูปที่ 3.23 อุปกรณ์รับสัญญาณที่ออกแบบสร้าง

- โดยที่ 1 คือ ภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุดีไวเดอร์ (C3)
 2 คือ C1'
 3 คือ อินพุตอิมพีแดนซ์ (R1)
 4 คือ L1'
 5 คือ C2
 6 คือ L2

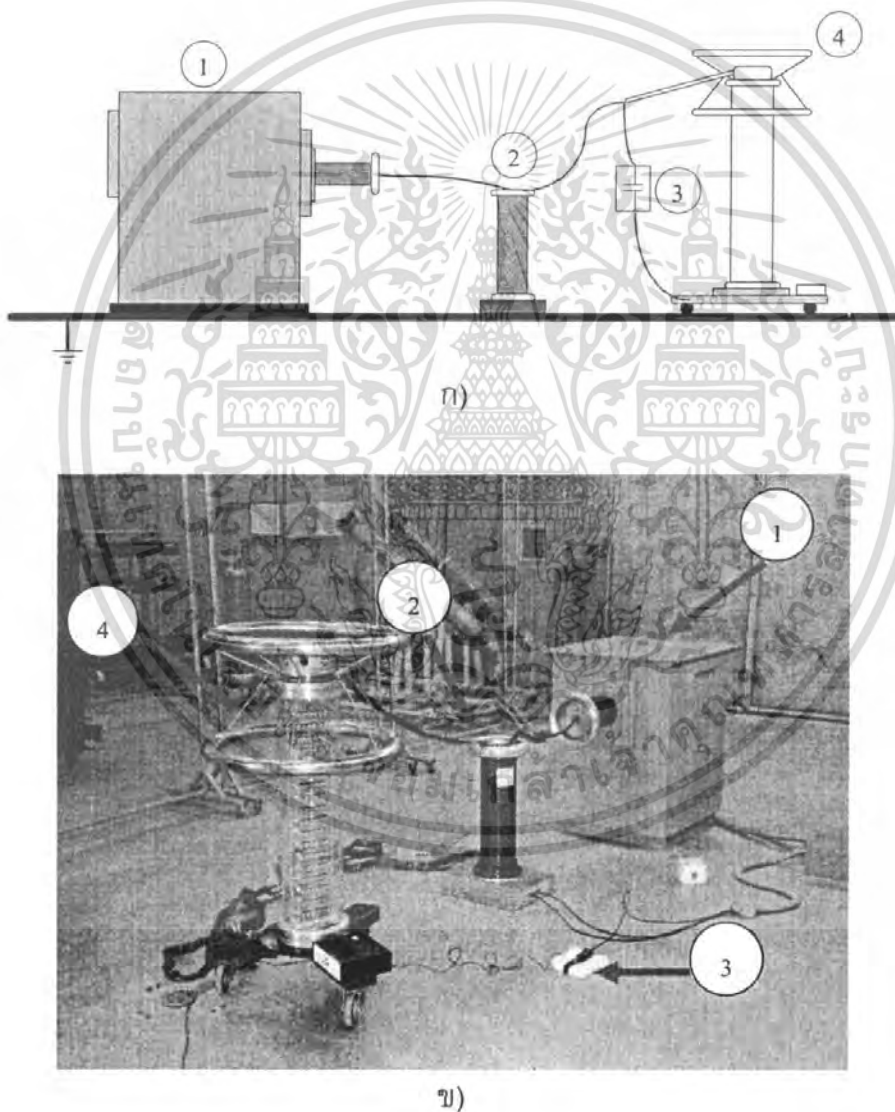
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันไฟฟ้า

ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 110 % ของพิกัดแรงดัน เวลา 1 นาที ในที่นี้ทำการทดสอบที่แรงดัน $55 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ตัวเก็บประจุที่ออกแบบสร้างต้องสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าและไม่เกิด PD ที่แรงดันทดสอบ วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ 1	คือ	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า
2	คือ	ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวอ้างอิง
3	คือ	C (Calibrator 100 pF)
4	คือ	ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ออกแบบ



รูปที่ 4.2 การตรวจจับ PD ที่แรงดันทดสอบ withstand

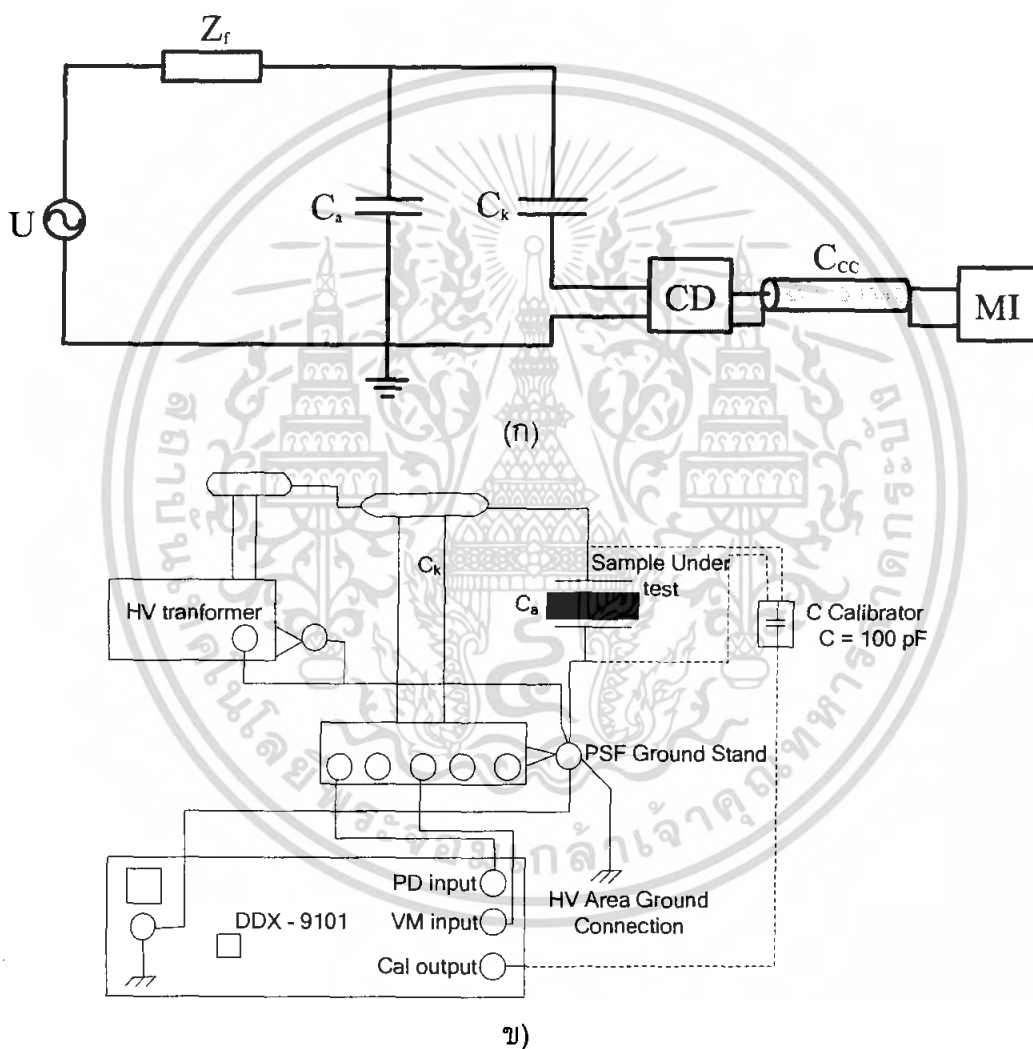
4.2 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

กระบวนการทดสอบจะเป็นการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่สภาวะเริ่มเกิดและที่ระดับแรงดันต่างๆของอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบต่างๆ โดยต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.3 หลังจากนั้นค่อยๆเพิ่มแรงดันจนกระทั่งสามารถตรวจจับโคโรนาเริ่มเกิด บันทึกรูปการเกิดดีสชาร์จบางส่วนด้วยเครื่องตรวจจับ PD ที่ออกแบบเทียบกับระบบวัด PD อ้างอิงภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. รวมทั้งบันทึกค่าแรงดันดังกล่าวด้วย จากนั้นจะทำการเพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อยๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและค่าแรงดัน และบันทึกผลการทดสอบจากเครื่องวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101)

4.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

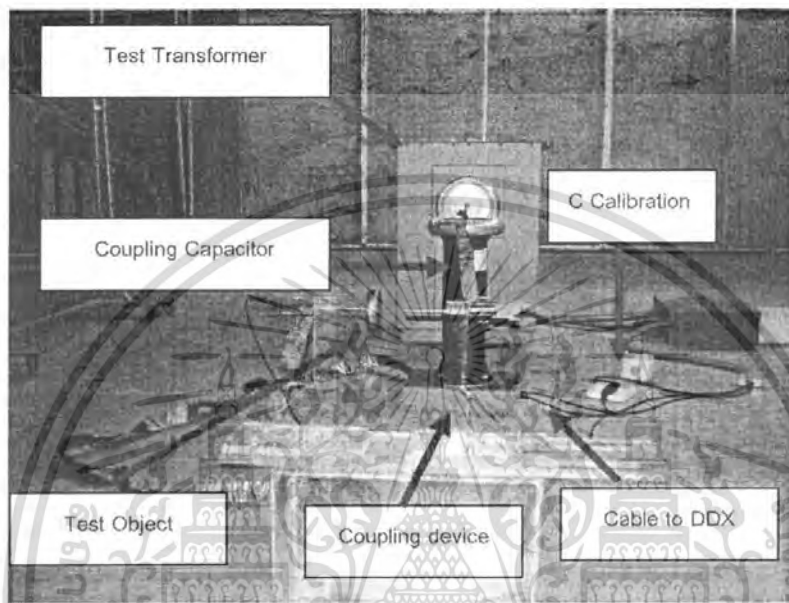
1. เครื่องตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน PD DETECTOR DDX-9101
2. ตู้ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า
3. ตัวเก็บประจุคงที่มีค่า 100 pF (C ปรับเทียบ)
4. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 75 kV, 40kVA, PD<2 pC



รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ U คือ หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 75 kV, 40kVA, PD<2 pC
 C_k คือ Coupling Capacitor 100 kV
 PD คือ ตัวตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน โดยที่ภายใน PD DETECTOR ได้รวมเอา PD Calibrator ไว้ด้วย
 C_a คือ วัสดุทดสอบ (Test Object)

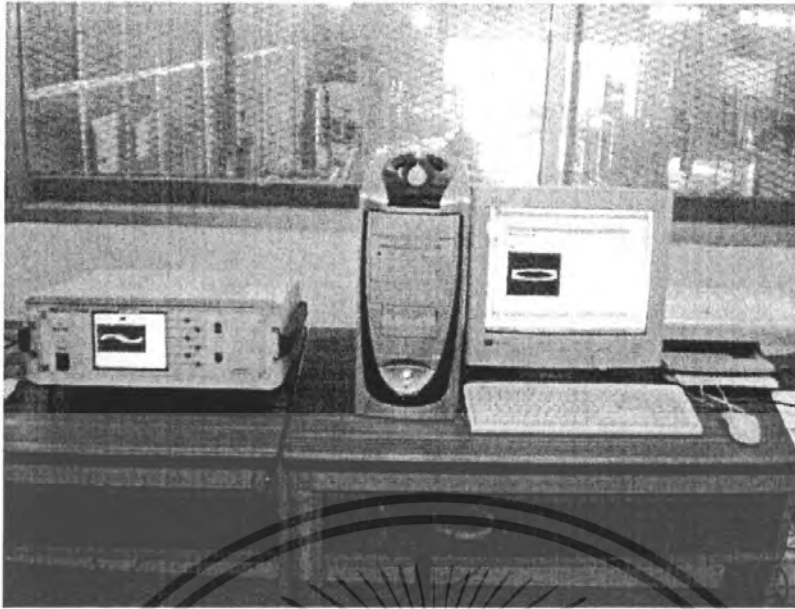


รูปที่ 4.4 วงจรที่ทำการทดสอบจริง

ระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนแสดงใน

รูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

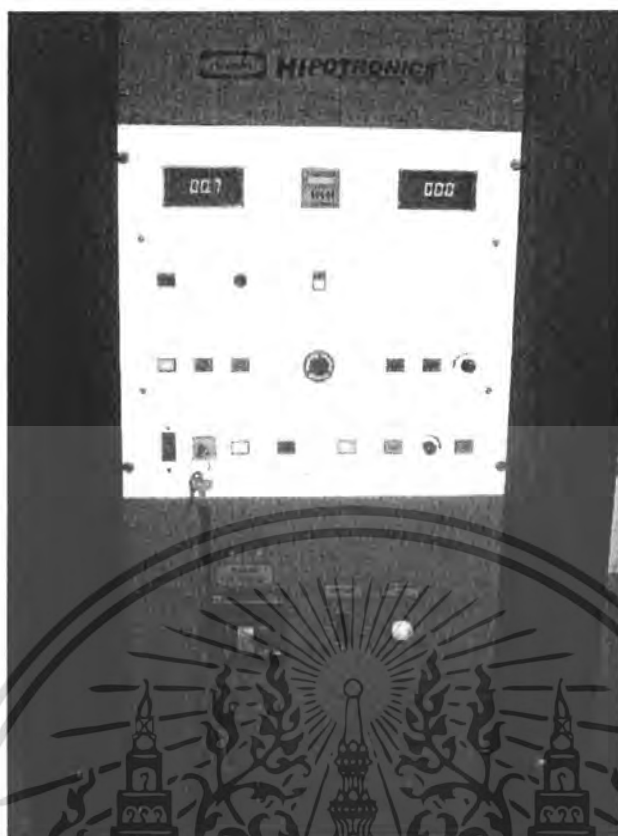


ก) ระบบวัดดิสชาร์จบางส่วน



ข) เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101 ใช้สำหรับทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) ตู้ควบคุมแรงดัน

รูปที่ 4.5 แสดงระบบวัดที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อดวงจรถูกทดลองดังรูปที่ 4.5 โดยที่อุปกรณ์ทดสอบ (C_a) จะใช้ Rod กับ Plate โดยต่อ Rod ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง ระบายต่อลงด้านกราวด์
2. จัดเตรียมรายงานผลการทดสอบ PD และวิธีการวัด PD มีรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก
3. ทำการเปรียบเทียบชุดวัด PD มีรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ข
4. ทำการป้อนแรงดันและการเก็บผลการทดสอบ
5. หลังจากทำการทดสอบ PD ของวัสดุทดสอบ (Test Object) ในวัสดุที่หนึ่งเสร็จแล้ว ทำการบันทึกค่าแล้วทำการเปลี่ยน Test Object มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ Plate-Rod โดยให้ระบายต่ออยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง และรีดต่อลงกราวด์

5.2 วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ Rod-Plate โดยให้รีดต่ออยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง และระบายต่อลงกราวด์

5.3 วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ Surface Discharge (ทรงกลม-ระนาบ) โดยให้ปลายทรงกลมอยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง และแผ่นระนาบต่อลงกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ Internal Discharge Multi Voids วัสดุทดสอบจำลองมีการเจาะรูไว้ตรงกลางแผ่นอะคริลิค โดยด้านระนาบอยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง และแผ่นระนาบที่ติดกับแผ่นอะคริลิคต่อลงกราวด์

6. ในส่วนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

6.1 บันทึกค่าประจุที่รู้ค่าของชุดปรับเทียบ และที่อ่านได้จากเครื่องตรวจจับรวมทั้ง Background noise

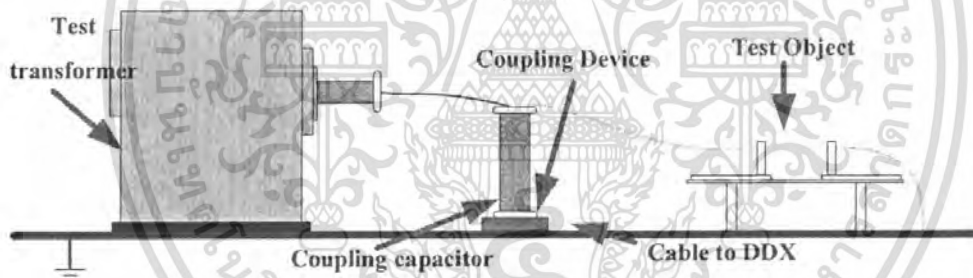
6.2 จ่ายแรงดันทดสอบ ให้กับ Test Object ที่นำมาทดสอบวัด PD

6.3 บันทึกค่า PD จาก Test Report โดยให้แสดงค่า PD บนฐานรูปวงรีและฐานรูปคลื่นไซน์ที่ค่า PD สูงสุด และบันทึกค่าขนาดของ PD (pC) (ห้ามป้อนแรงดันจนวัสดุทดสอบเกิดเบรกดาวร์)

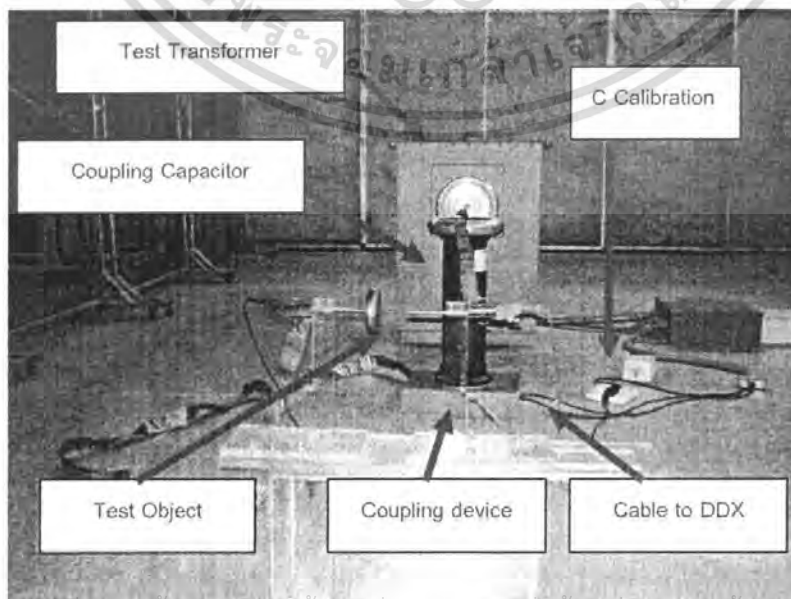
*** ก่อนการทำการทดลองจะต้องนำ C Calibration ออกจากวงจรทดสอบทุกครั้ง

4.2.3 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge)

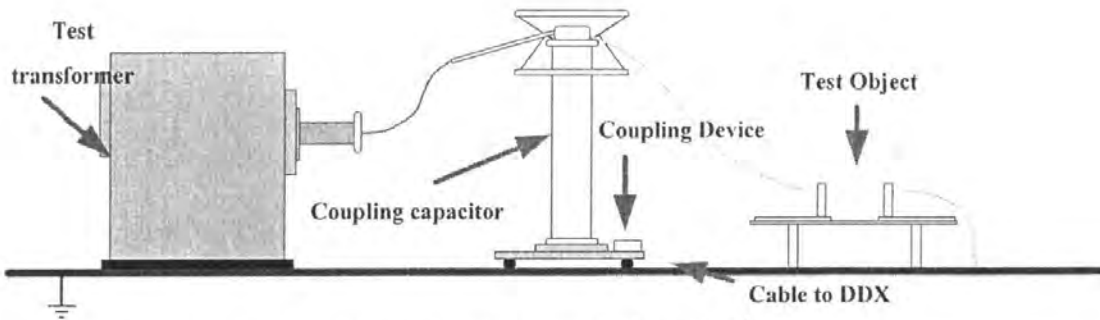
- วัสดุทดสอบประเภท Rod (หัวแหลม) – Plate (ระนาบ) ป้อนแรงดันด้าน Rod ทางด้าน Plate (ระนาบ) ต่อลงกราวด์ วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6



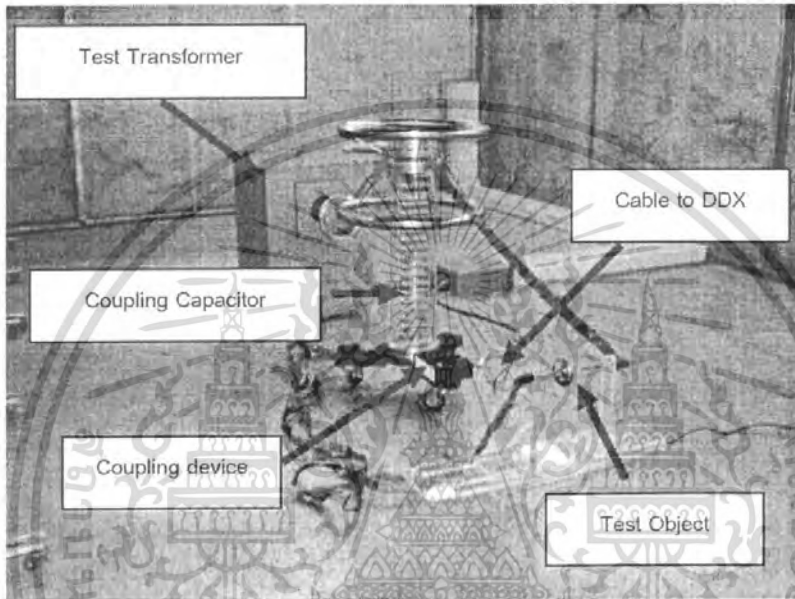
ก) วงจรสมมูลการทดสอบของชุดวัดสัญญาณอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก่อนนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ข) ชุดวัดสัญญาณอ้างอิง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) วงจรสมมูลการทดสอบชุดวัดสัญญาณที่ออกแบบ



ง) ชุดวัดสัญญาณที่ออกแบบ

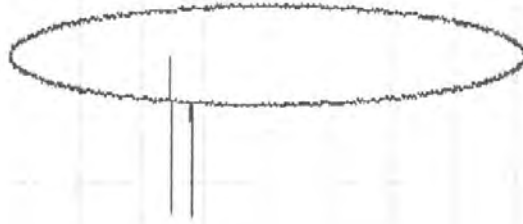
รูปที่ 4.6 แสดงการต่อวงจรทดสอบ Corona Discharge Rod (หัวแหลม) – Plate (ระนาบ)

- ผลการทดสอบจากชุดวัดอ้างอิง



รูปที่ 4.7 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 2.27 pC ที่แรงดัน 1.14 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขและประการด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 82.78 pC, ที่แรงดัน 5.71 kV



รูปที่ 4.9 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 582.13 pC, ที่แรงดัน 6.12 kV

- ผลการทดสอบจากชุดวัดที่ออกแบบ

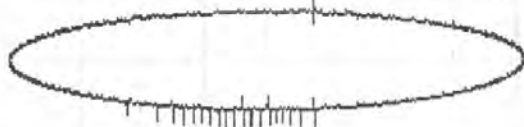
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 17.79 pC, ที่แรงดัน 1.43 kV



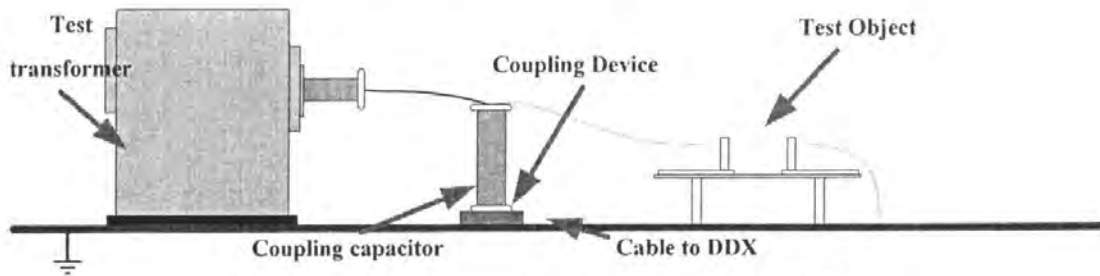
รูปที่ 4.11 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 76.78 pC, ที่แรงดัน 7.23 kV



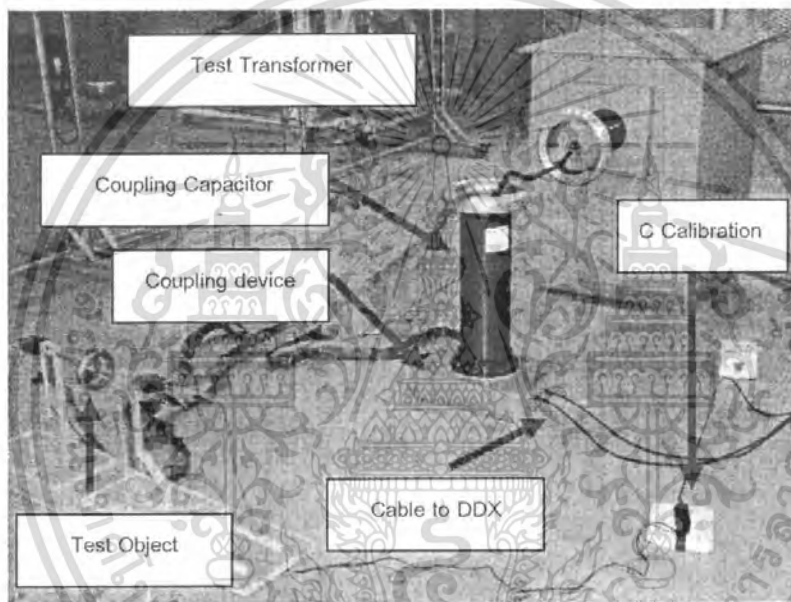
รูปที่ 4.12 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 482.20 pC, ที่แรงดัน 7.74 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

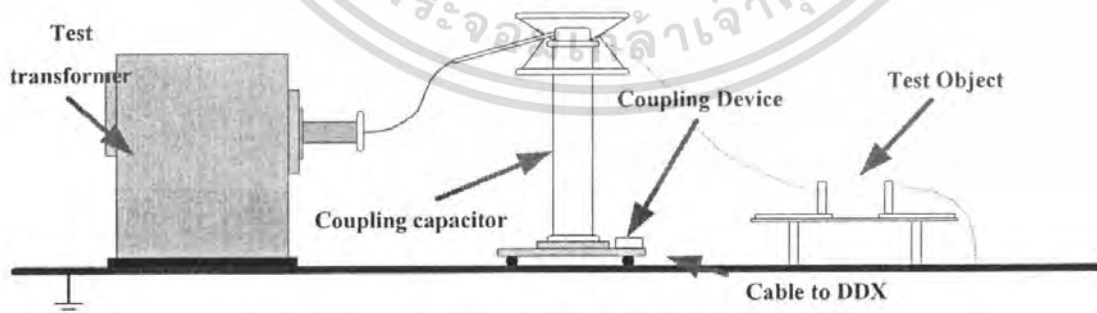
- วัสดุทดสอบประเภท Plate (ระนาบ) – Rod (หัวแหลม) ป้อนแรงดันด้าน Plate (ระนาบ) และทางด้าน Rod (หัวแหลม) ต่อลงกราวด์ วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.13



ก) วงจรสมมูลการทดสอบของชุดวัดสัญญาณอ้างอิง

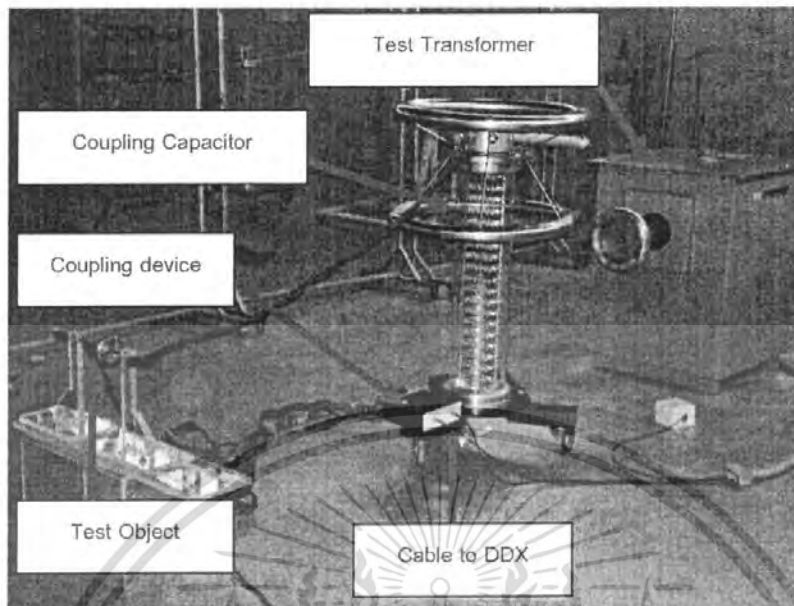


ข) ชุดวัดสัญญาณอ้างอิง



ค) วงจรสมมูลการทดสอบชุดวัดสัญญาณที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง) ชุดวัดสัญญาณที่ออกแบบ

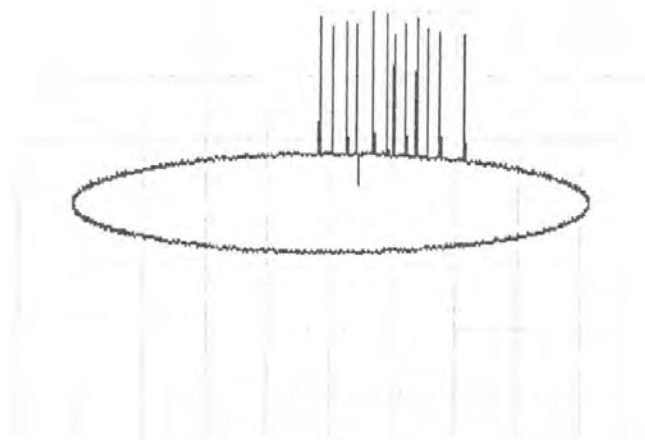
รูปที่ 4.13 แสดงการต่อวงจรทดสอบ Corona Discharge Plate (ระนาบ) – Rod (หัวแหลม)

- ผลการทดสอบจากชุดวัดอ้างอิง



รูปที่ 4.14 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 2.28 pC, ที่แรงดัน 1.14 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



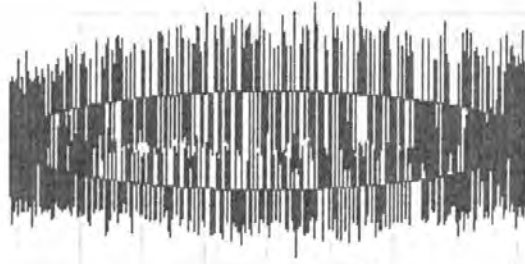
รูปที่ 4.15 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 53.60 pC, ที่แรงดัน 7.79 kV



รูปที่ 4.16 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 679.92 pC, ที่แรงดัน 8.08 kV

- ผลการทดสอบจากชุดวัดที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 18.02 pC, ที่แรงดัน 1.37 kV



รูปที่ 4.18 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 56.87 pC, ที่แรงดัน 8.35 kV

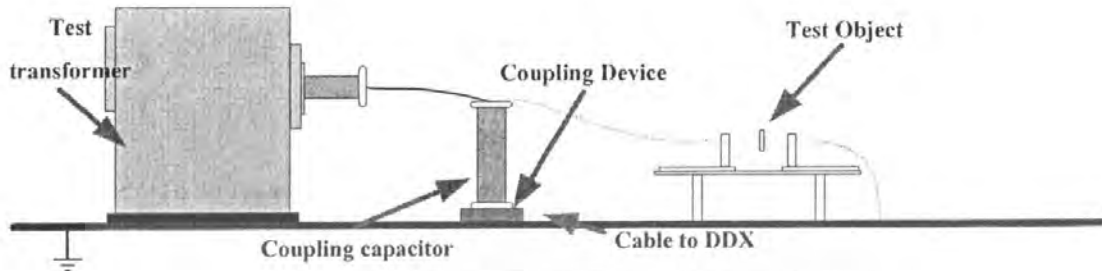


รูปที่ 4.19 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 446.26 pC, ที่แรงดัน 8.89 kV

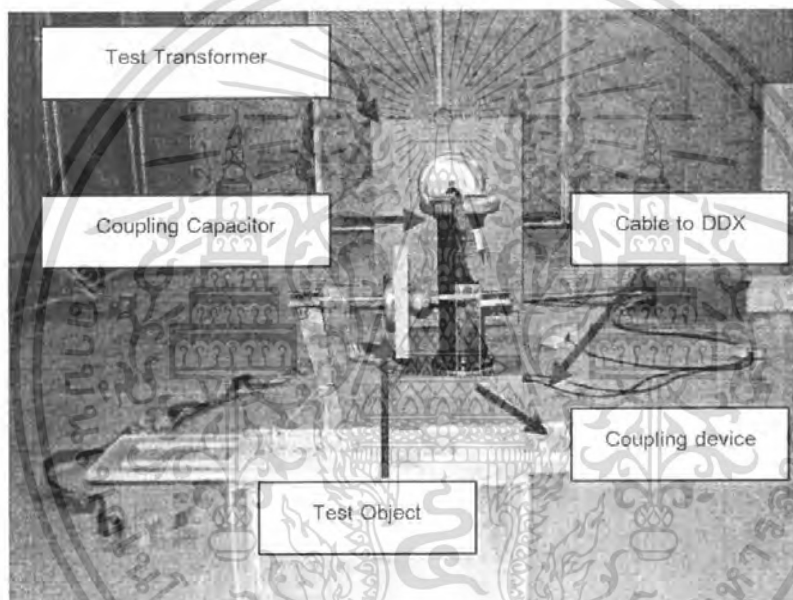
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนตามผิว (Surface Discharge)

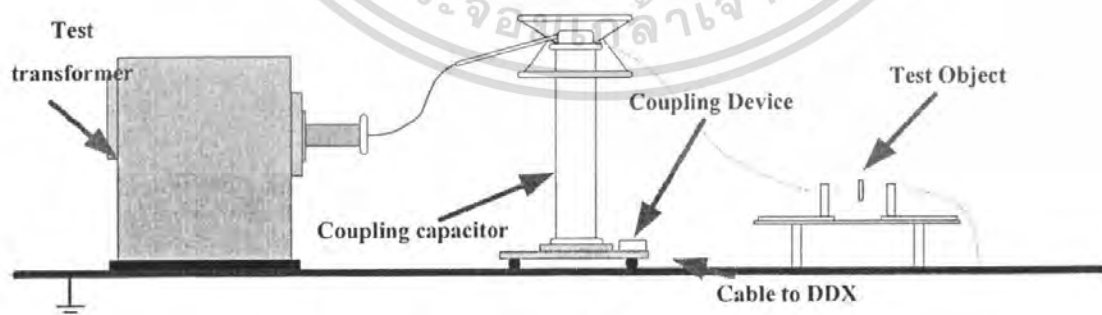
- วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ Surface Discharge (ทรงกลม-ระนาบ) โดยให้ปลายทรงกลมอยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง และแผ่นระนาบต่อลงกราวด์ วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.20



ก) วงจรสมมูลการทดสอบของชุดวัดสัญญาณอ้างอิง

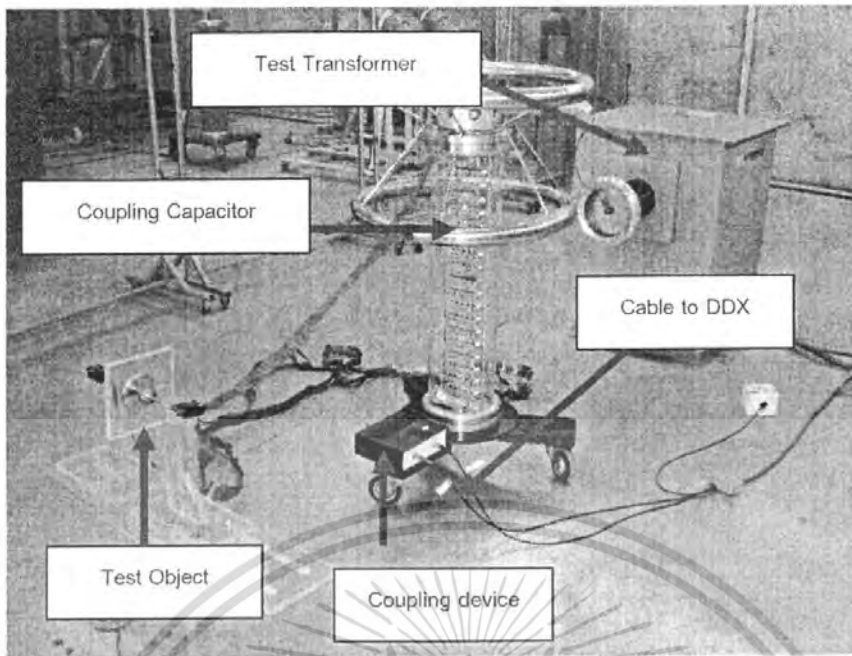


ข) ชุดวัดสัญญาณอ้างอิง



ค) วงจรสมมูลการทดสอบชุดวัดสัญญาณที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง) ชุดวัดสัญญาณที่ออกแบบ

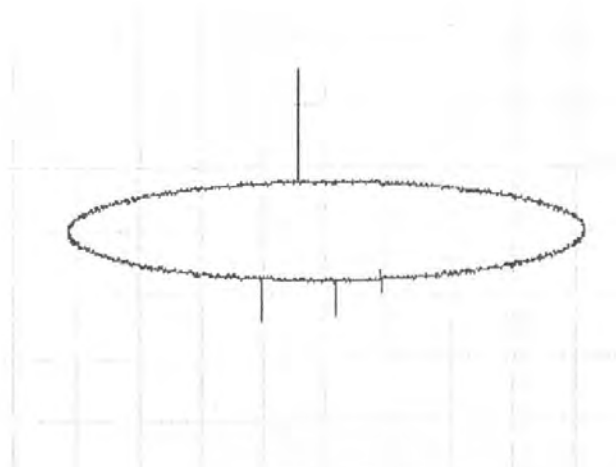
รูปที่ 4.20 แสดงการต่อวงจรทดสอบ Surface Discharge

- ผลการทดสอบจากชุดวัดข้างอิง



รูปที่ 4.21 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 2.23 pC, ที่แรงดัน 1.14 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 395.49 pC, ที่แรงดัน 8.09 KV



รูปที่ 4.23 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 402.74 pC, ที่แรงดัน 8.22 KV

- ผลการทดสอบจากชุดวัดที่ออกแบบ

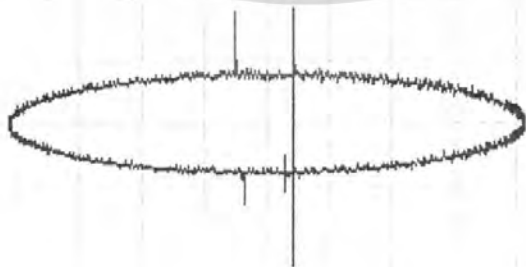
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 17.95 pC, ที่แรงดัน 1.37 kV



รูปที่ 4.25 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 341.61 pC, ที่แรงดัน 9.41 kV

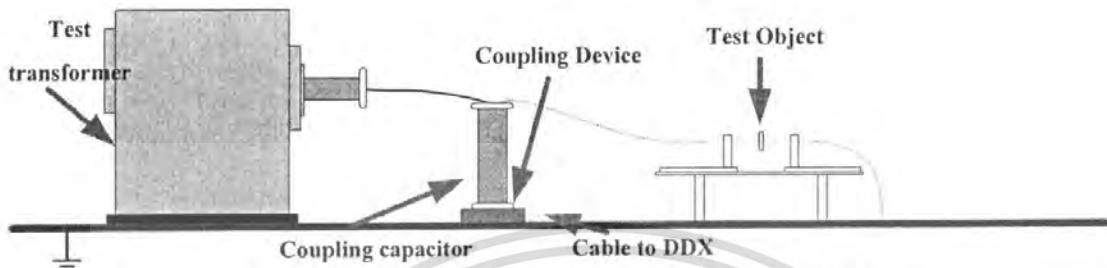


รูปที่ 4.26 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 363.10 pC, ที่แรงดัน 9.53 kV

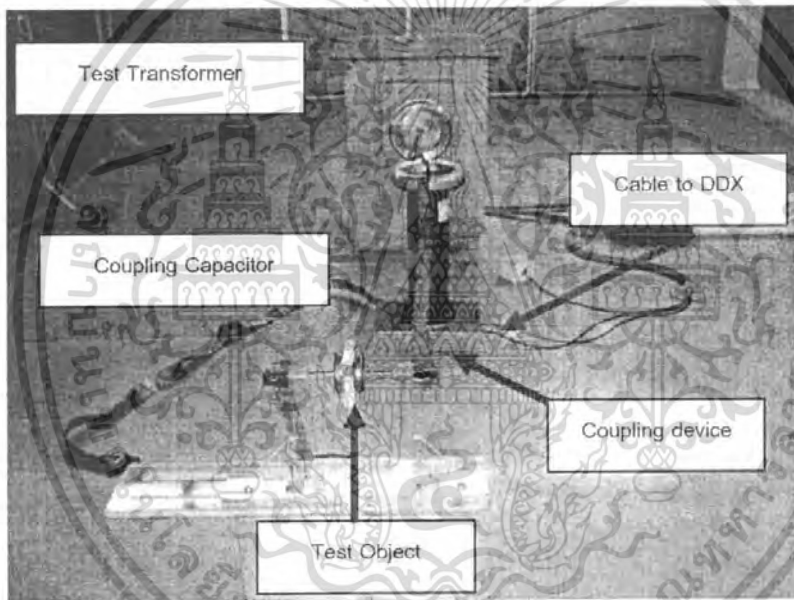
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน (Internal Discharge)

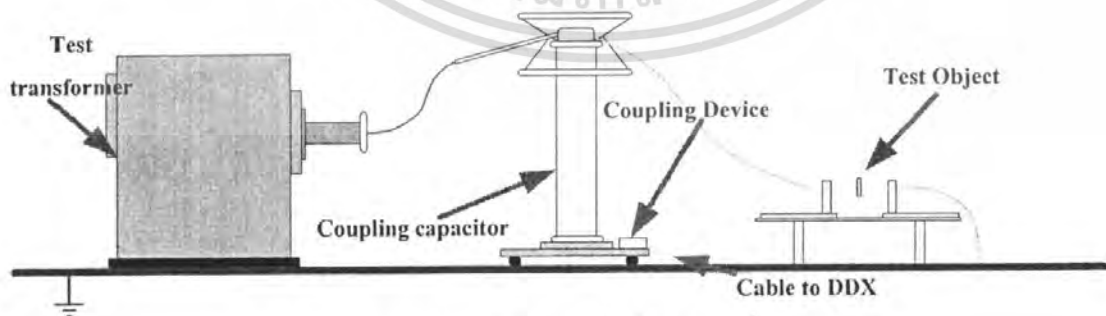
- วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ Internal Discharge Multi Voids วัสดุทดสอบจำลองมีการเจาะรูไว้ตรงกลางแผ่นอะคริลิก โดยด้านระนาบอยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง และแผ่นระนาบที่ติดกับแผ่นอะคริลิกต่อลงกราวด์ วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.27



ก) วงจรสมมูลการทดสอบของชุดวัสดุสัญญาณอ้างอิง

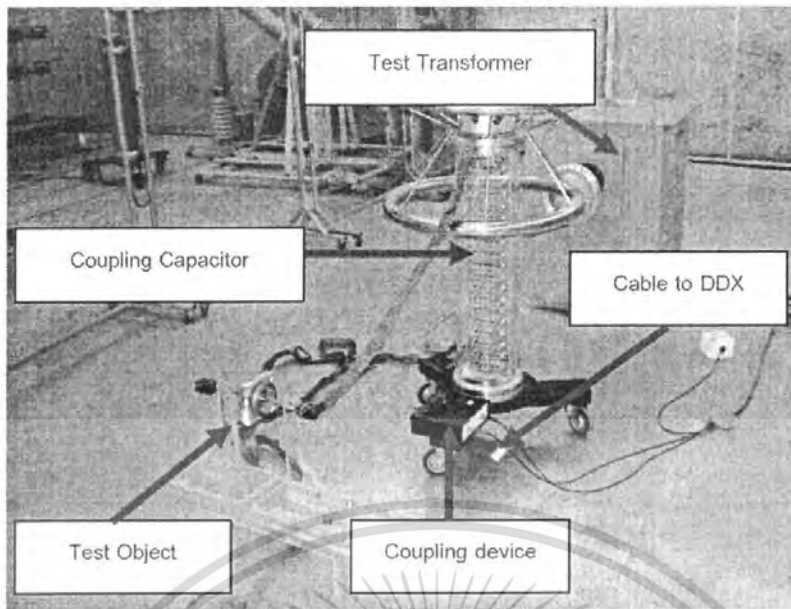


ข) ชุดวัสดุสัญญาณอ้างอิง



ค) วงจรสมมูลการทดสอบชุดวัสดุสัญญาณที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง) ชุดวัดสัญญาณที่ออกแบบ

รูปที่ 4.27 แสดงการต่อวงจรทดสอบ Internal Discharge

- ผลการทดสอบจากชุดวัดอ้างอิง



รูปที่ 4.28 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 2.28 pC, ที่แรงดัน 1.14 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



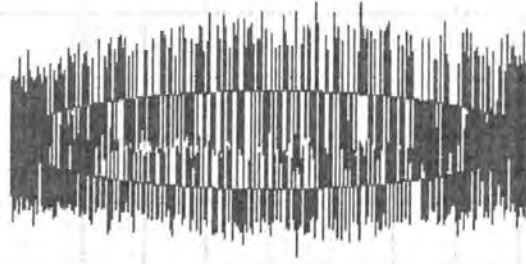
รูปที่ 4.29 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 121.12 pC, ที่แรงดัน 11.93 kV



รูปที่ 4.30 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 121.81 pC, ที่แรงดัน 12.10 kV

- ผลการทดสอบจากชุดวัดที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 Background Noise บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 17.79 pC, ที่แรงดัน 1.43 kV



รูปที่ 4.32 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 132.08 pC, ที่แรงดัน 13.8 kV



รูปที่ 4.33 PD บนฐานเวลารูปวงรี ค่าดีสชาร์จ 135.44 pC, ที่แรงดัน 13.7 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าชุดวัดสัญญาณที่ออกแบบสามารถตรวจจับดีสจาร์จบางส่วน ทั้ง 3 รูปแบบ ได้ใกล้เคียงกับชุดวัดอ้างอิง เมื่อแรงดันทดสอบมีค่าสูงขึ้น แต่ที่แรงดันค่าต่ำ ๆ ชุดวัดสัญญาณที่ออกแบบไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้เนื่องจากมี Background Noise สูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

การออกแบบลักษณะของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว และอุปกรณ์รับสัญญาณ เพื่อใช้ในการตรวจจับการเกิดดีสชาร์จบางส่วนทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม Autocad และ solidwork และในการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element) โดยตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวมีความจุไฟฟ้ารวม 2 nF 50 kV ปราสจาก PD ที่แรงดันทดสอบ

อุปกรณ์รับสัญญาณ มีคุณสมบัติดังนี้

$$f_L = 37 \text{ kHz}$$

$$f_H = 415 \text{ kHz}$$

$$\Delta f = 378 \text{ kHz}$$

อิมพีแดนซ์ช่วง Pass-Band 50 Ω

ชุดวัดสัญญาณที่ออกแบบสามารถตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน ทั้ง 3 รูปแบบ ได้ใกล้เคียงกับชุดวัดอ้างอิง เมื่อแรงดันทดสอบมีค่าสูงขึ้น แต่ที่แรงดันค่าต่ำ ๆ ชุดวัดสัญญาณที่ออกแบบไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้เนื่องจากมี Background Noise สูง จึงไม่เหมาะสำหรับการทดสอบวัดค่า PD ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีค่ามาตรฐานของการเกิด PD ต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากชุดวัดที่ออกแบบสร้างนั้นออกแบบมาเพื่อทดสอบวัดค่า PD ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีค่าของการเกิด PD สูง เช่น หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นถ้าต้องการทดสอบวัด PD ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีค่าของการเกิด PD ต่ำ ควรออกแบบตัวกรองให้มีประสิทธิภาพมากกว่านี้ เพื่อให้ Background Noise มีค่าต่ำลง
2. ผู้ที่ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการวัดดีสชาร์จบางส่วนควรจะมีความรู้ความเข้าใจเรื่องพฤติกรรมการเกิดดีสชาร์จบางส่วนและระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, 2549.
- [2] ธนัย อินทรใจเอื้อ และ คณะ, “การศึกษาและการแยกประเภทของการเกิดพาร์เชียลดีสชาร์จของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง”, **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [3] ณรงค์ ทองฉิม, สันติ ยอดเพชร และ รัฐภูมิ วุฒิจำนงค์, **ระบบตรวจหาตำแหน่งที่เกิดดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง**, 2541.
- [4] IEC Standard Publ. No 885-3, Test Methods for Partial Discharge Measurements.1988.
- [5] Osvath , P. , “Perspective of Partial Discharge Detection and Location”, IEEE-Thailand Section Seminar , Chulalongkorn University , 1988.
- [6] IEC 60270 , Partial Discharge Measurement.1988.
- [7] เกวริน วิเศษจินดาวัฒน์, “การจำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง”, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [8] ณรงค์ ทองฉิม, “เครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง”, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
- [9] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “เอกสารประกอบการสอนวิชาเลือกทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [10] Kreuger, F. H., **Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment**, Temple Press Books Ltd., London, 1964.
- [11] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel, **High Voltage Engineering Fundamentals**, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, 2000.
- [12] B. William and Fred J. Taylor, **Electronic Filter Design Handbook**, 2nd Ed., McGraw-HILL, 1988.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

สามารถศึกษาข้อมูลต่อไฟนี้ได้จาก Electrical Power Engineering Laboratory II, ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- วิธีการจัดเตรียมรายงานผลการทดสอบ PD และวิธีการวัด PD ของเครื่อง PD DETECTOR DDX – 9101
- การปรับเทียบค่าเก็บประจุในวงจรวัด PD
- การจ่ายแรงดันทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับ PD ตามมาตรฐาน IEC โครงการนี้จะกล่าวถึงข้อกำหนดตาม IEC 270(1981) ซึ่งยังคงใช้อยู่ถึงปัจจุบันนี้ และ IEC 60270(1998 ฉบับร่าง)ที่มีการแก้ไข ข้อบกพร่องและเพิ่มเติมรายละเอียดเกี่ยวกับข้อกำหนด วิธีการทดสอบ และวิธีการปฏิบัติ เพื่อให้การตรวจจับหรือการวัด PD มีความถูกต้องและเหมาะสมยิ่งขึ้น ซึ่งจะมาแทน IEC 270(1981) ในอนาคตอันใกล้นี้ ซึ่งข้อกำหนดตาม IEC 60270 จะครอบคลุมข้อกำหนดทุกข้อตาม IEC 270 ส่วนกรณีที่ใช้เครื่องตรวจจับ PD ในการวัด PD ในสายเคเบิลนั้น เครื่องตรวจจับ PD จะต้องมีความคุณสมบัติเพิ่มเติมตามมาตรฐาน IEC 885-3

1. ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC 270

ข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณสมบัติของเครื่องตรวจจับ PD ที่สำคัญมีดังนี้

1) เวลาแยกขีดของพัลส์ (Pulse resolution time) ของเครื่องตรวจจับ PD ต้องไม่เกิน 100 ไมโครวินาที ในกรณีที่ไมเกิดความผิดพลาดเนื่องจากเกิดซูปเปอร์โพสิชันของพัลส์ PD

2) เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน ที่ใช้ในการปรับเทียบวงจรทดสอบ ได้กำหนดให้แรงดันรูปขึ้นของเครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานมีช่วงเวลานขึ้น (rise time) ไม่เกิน 0.1 ไมโคร วินาที และแรงดันค่อยๆลดลงด้วยเวลาลดถอย (decay time) อยู่ในช่วง 100 ไมโครวินาที ถึงหลักพันของไมโคร วินาที และ $C_0 \leq 0.1 (C_a + C_k)$

2. ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC60270

มาตรฐาน IEC 60270 มีการแก้ไขและเพิ่มเติมรายละเอียดเกี่ยวกับข้อกำหนดวิธีการทดสอบ และวิธีการปฏิบัติหลายประการ

2.1 นิยามเพิ่มเติมและนิยามที่กำหนดใหม่ ในส่วนที่เกี่ยวข้องโดยตรง

นิยามเพิ่มเติมและนิยามที่กำหนดใหม่ ในส่วนที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการออกแบบเครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนได้แก่

1) Pulse Repetition Frequency, N คือจำนวนพัลส์ที่มีระยะห่างระหว่างพัลส์ทุกลูก เท่ากันที่นับได้ต่อวินาที

2) Phase Angle, ϕ , และ Time, t , ของพัลส์ PD ที่เกิดขึ้น กำหนดดังนี้

$$\phi = 360(t / T)$$

โดยที่ t , คือ เวลาที่เริ่มมุมเฟสของแรงดันทดสอบ เริ่มที่มุมศูนย์องศาจนถึง

เวลาที่เกิดพัลส์ PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T คือ คาบเวลาของความถี่ของแรงดันทดสอบ

3) Transfer impedance, $Z(f)$ ในที่นี้ใช้ $Z_m(f)$ แทน $Z(f)$ ของระบบวัด PD คือ อัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตต่อกระแสอินพุตของระบบวัด PD โดยการป้อนกระแสที่มีขนาดคงที่รูปไซน์ที่อินพุตและปรับเปลี่ยนความถี่เพื่อหาอัตราส่วนดังกล่าวที่ความถี่ต่างๆ

4) ความถี่จำกัดล่างและบน (lower and upper frequencies, f_1 and f_2) คือ ความถี่ที่ขนาด transfer impedance, $Z(f)$ มีค่าลดลง 6 dB จากค่ายอดสูงสุดที่อยู่ในช่วงแถบผ่าน

$$5) \text{ แบนด์วิดท์, } \Delta f = f_2 - f_1 \text{ และ midband frequency, } f_m = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

2.2 ระบบวัด PD สำหรับวัดประจุที่ปรากฏ

คุณสมบัติที่สำคัญของระบบวัด PD สำหรับวัดประจุที่ปรากฏมีดังนี้

1) ระบบวัดประจุที่ปรากฏ(q)นี้จะวัดเฉพาะค่ายอดพัลส์ของ PD ที่มีค่าสูงสุดและเกิดซ้ำๆ ทุกคาบเวลาของความถี่ของแรงดันทดสอบ การอ่านค่าของอุปกรณ์วัดจะใช้หลักการเดียวกันกับวงจรตรวจจับค่ายอดแบบแอนะล็อกที่มีค่าคงตัวทางเวลาของการอัดประจุ (electric charging time constant) สั้นมาก และมีค่าคงตัวทางเวลาของการคายประจุ (electric discharging time constant) ≤ 0.44 วินาที การตอบสนองของระบบวัดที่มีต่อพัลส์ของ PD ที่มีระยะห่างระหว่างพัลส์เท่ากันที่ถูกป้อนด้วย Pulse repetition frequency, N จะทำให้ค่าที่ระบบวัดอ่านได้ R เป็นตามตารางต่อไปนี้ โดยสมมติว่าพิสัย (range) และอัตราขยาย (gain) ถูกปรับให้อ่านเต็มสเกลหรือ 100% เมื่อ $N = 100$

N(1/s)	1	2	5	10	50	≥ 100
$R_{\min}(\%)$	35	55	76	85	94	95
$R_{\max}(\%)$	45	65	86	95	104	105

2) ระบบวัด PD แบบแถบกว้าง จะกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ต่างๆของ Transfer impedance, $Z(f)$ ดังนี้

$$30\text{kHz} \leq f_1 \leq 100\text{kHz}$$

$$f_2 \leq 500\text{kHz}$$

$$100\text{kHz} \leq \Delta f \leq 400\text{kHz}$$

3) ระบบวัด PD แบบแถบแคบ จะกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ต่างๆของ Transfer impedance, $Z(f)$ ดังนี้

$$9\text{kHz} \leq \Delta f \leq 30\text{kHz}$$

$$50\text{kHz} \leq f_m \leq 1\text{MHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง f_m สามารถปรับค่าได้ และกำหนดให้ขนาดของ $Z(f)$ ที่ความถี่ $f_m \pm \Delta f$ มีค่าลดลงต่ำกว่าค่ายอดสูงสุดที่อยู่ในช่วงแถบผ่าน 20 dB

4) ความเป็นเชิงเส้นของระบบวัด มาตรฐานยอมให้สเกลแฟกเตอร์ k ผิดพลาดได้น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

2.3 ระบบวัด PD แบบดิจิตอล สำหรับวัดประจุที่ปรากฏ

ข้อกำหนดของระบบวัด PD แบบดิจิตอล สำหรับวัดประจุที่ปรากฏ มีดังนี้

1) ระบบวัดนี้จะต้องใช้หลักการระบบวัดแบบแอนะล็อกที่กล่าวมาแล้วในข้อ 2.5.2.2 ส่วนภาคดิจิตอลนั้นจะวัดประจุที่ปรากฏโดยใช้การรับข้อมูลแบบดิจิตอลในการอ่านข้อมูลสัญญาณเพื่อนำไปแสดงผลและวิเคราะห์ต่อไป

2) ข้อกำหนดต่ำสุดของระบบวัด PD แบบดิจิตอล คือ ต้องสามารถแสดงผลค่าประจุที่ปรากฏได้ โดยค่าที่อ่านได้ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในข้อ 2.5.2.2 เวลาแสดงผลใหม่แต่ละครั้งของการแสดงผลแบบดิจิตอลต้องไม่เกิน 1 วินาที และในกรณีที่มีการใช้ Bipolar sensitivity threshold นั้น จะต้องมีการบันทึกระดับ threshold ด้วย

3) ข้อกำหนดในการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสของแรงดันทดสอบ ถ้าระบบวัดนี้สามารถวัดระดับแรงดันของแรงดันทดสอบได้ ค่าที่อ่านได้จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดใน IEC 60060-2(1994) ถ้าต้องการออกแบบให้ระบบวัดนี้สามารถวัดมุมเฟสของแรงดันทดสอบได้ มุมเฟสจะผิดพลาดได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ และถ้าหากระบบวัดนี้มีความสามารถในการวัดค่าขณะหนึ่ง (instantaneous value) ของแรงดันทดสอบ ค่าที่อ่านได้จะต้องผิดพลาดได้น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของค่ายอดของแรงดันทดสอบ การควอนไทซ์ (quantization) ของแรงดันทดสอบ จะต้องมีความละเอียดอย่างน้อย 8 บิต และต้องมีอัตราสุ่มตัวอย่าง (sampling rate) ไม่น้อยกว่า 100 ตัวอย่างในหนึ่งคาบเวลาของความถี่ของแรงดันทดสอบ

ภาคผนวก ค
คุณสมบัติของตัวเก็บประจุ

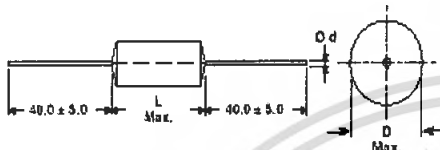


MKP 1845

Vishay Roederstein

Metallized Polypropylene Film Capacitor
Related Document: IEC 60384-16

Dimensions in millimeters



D	D d
≤ 7.5	0.7
> 16.0	0.8
≥ 16.0	1.0

CAPACITANCE RANGE

1000 pF to 4.7 μF

FEATURES

Product is completely lead (Pb)-free.
Product is RoHS compliant.

RoHS
COMPLIANT**CAPACITANCE TOLERANCES**

± 20 % (M), ± 10 % (K), ± 5 % (J)

RATED VOLTAGES (U_R):

160 VDC, 250 VDC, 400 VDC, 630 VDC,
1000 VDC, 1600 VDC, 2000 VDC

PERMISSIBLE AC VOLTAGES (RMS) UP TO 60Hz

100 VAC, 160 VAC, 220 VAC, 400 VAC, 600 VAC, 650 VAC,
700 VAC

MAIN APPLICATIONS

High voltage, high current and high pulse operations,
deflection circuits in TV sets (S-correction and fly-back
tuning), Protection circuits in SMPS's, Snubber and
electronic ballast circuits, Input and output filtering in SPS
designs, storage, timing and integrating circuits.

MARKING

Manufacturer's logo/type/C-value/rated voltage/tolerance/
date of manufacture

DIELECTRIC

Polypropylene film

ELECTRODES

Vacuum deposited aluminum

COATING

Metal-foil-wrapped, insulated, epoxy resin sealed, flame
retardant

CONSTRUCTION

Extended double-sided metallized polyester film, internal
series connection (630 to 2000 VDC), double-sided
metallized polyester carrier film, (refer to general
information)

LEADS

Tinned wire

IEC TEST CLASSIFICATION

55:100/50, according to IEC 60068

OPERATING TEMPERATURE RANGE

- 55 °C to + 100 °C

TEST VOLTAGE (ELECTRODE/ELECTRODE)1.6 x U_R for 2 s**INSULATION RESISTANCE**

Measured at 100 VDC after one minute

For C > 0.33 μF:

100000 MΩ minimum value (150000 MΩ typical value)

TIME CONSTANT

Measured at 100 VDC after one minute

For C > 0.33 μF:

30000 s minimum value (50000 s typical value)

TEMPERATURE COEFFICIENT- 250 x 10⁻⁶/°C (typical value)**CAPACITANCE DRIFT**

Up to - 40 °C, ± 0.5 % for a period of two years

DERATING FOR DC AND AC CATEGORY VOLTAGE U_CAt + 85 °C: U_C = 1.0 U_RAt + 100 °C: U_C = 0.7 U_R**SELF INDUCTANCE**

- 12 nH measured with 6mm long leads

PULL TEST ON LEADS

≥ 20 N in direction of leads according to IEC 60068-2-21

BEND TEST ON LEADS

2 bends through 90 °C with half of the force used in pull test

RELIABILITY

Operational life > 300000 h

Failure rate < 10 FIT (40 °C and 0.5 x U_R)

For further details, please refer to the general information
available at www.vishay.com/226033.

MAXIMUM PULSE RISE TIME

CAPACITOR LENGTH (MM)	Maximum Pulse Rise Time d ₁ /d ₂ [V/μs]						
	160 VDC	250 VDC	400 VDC	630 VDC	1000 VDC	1600 VDC	2000 VDC
17	900	1140	1840	—	—	—	—
22	450	560	910	3420	—	—	—
29	250	320	520	2120	2800	3900	5200
34	292	340	400	1524	2000	2690	3200
44	140	170	280	950	1280	1690	2000

If the maximum pulse voltage is less than the rated voltage higher d₁/d₂ values can be permitted.

Document Number: 26023
Revision: 07-Feb-06

For technical questions contact: prod.support@vishay.com

www.vishay.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MKP 1845

Vishay Roederstein

Metallized Polypropylene Film Capacitor
Related Document: IEC 60384-16DISSIPATION FACTOR TAN δ

MEASURED AT	$C < 0.1 \mu\text{F}$	$0.1 \mu\text{F} < C \leq 1.0 \mu\text{F}$	$C > 1.0 \mu\text{F}$
1 kHz	0.3×10^{-3}	0.3×10^{-3}	0.3×10^{-3}
10 kHz	0.4×10^{-3}	0.4×10^{-3}	-
100 kHz	1.5×10^{-3}	-	-
Maximum values			

CAPACITANCE	CAPACITANCE CODE	VOLTAGE CODE 16 160 VDC/100 VAC		VOLTAGE CODE 25 250 VDC/160 VAC		VOLTAGE CODE 40 400 VDC/220 VAC		VOLTAGE CODE 63 630 VDC/250 VAC	
		D	L	D	L	D	L	D	L
1000 pF	- 210	-	-	-	-	-	-	-	-
1500 pF	- 215	-	-	-	-	-	-	-	-
2200 pF	- 222	-	-	-	-	-	-	-	-
3300 pF	- 233	-	-	-	-	-	-	-	-
4700 pF	- 247	-	-	-	-	-	-	-	-
6800 pF	- 269	-	-	-	-	-	-	-	-
0.01 μF	- 310	-	-	-	-	6.0	17.0	7.0	22.0
0.015 μF	- 315	-	-	-	-	6.5	17.0	8.0	22.0
0.022 μF	- 322	-	-	6.0	17.0	7.5	17.0	9.5	22.0
0.033 μF	- 333	6.0	17.0	7.0	17.0	7.0	22.0	9.0	29.0
0.047 μF	- 347	6.5	17.0	8.0	17.0	8.0	22.0	10.5	29.0
0.068 μF	- 368	7.5	17.0	7.0	22.0	9.0	22.0	12.5	29.0
0.1 μF	- 410	7.0	22.0	8.0	22.0	11.0	22.0	12.5	34.0
0.16 μF	- 415	8.0	22.0	9.5	22.0	10.0	29.0	15.0	34.0
0.22 μF	- 422	9.5	22.0	9.0	29.0	12.0	29.0	14.5	44.0
0.33 μF	- 433	9.0	29.0	10.5	29.0	10.5	29.0	17.5	44.0
0.47 μF	- 447	10.0	29.0	12.0	29.0	15.0	34.0	21.0	44.0
0.68 μF	- 468	12.0	29.0	12.0	34.0	17.5	34.0	25.0	44.0
1.0 μF	- 510	12.5	34.0	15.5	34.0	17.5	44.0	-	-
1.5 μF	- 515	15.5	34.0	15.5	44.0	21.5	44.0	-	-
2.2 μF	- 522	15.5	44.0	18.5	44.0	26.0	44.0	-	-
3.3 μF	- 533	18.5	44.0	22.5	44.0	-	-	-	-
4.7 μF	- 547	22.0	44.0	-	-	-	-	-	-

Further C-values on request.

pcm = L + 3.5.

RECOMMENDED PACKAGING

LETTER CODE	TYPE OF PACKAGING	REEL DIAMETER (mm)	ORDERING CODE EXAMPLES	
G	AVMO	-	MKP 1845-310-135-G	X
H	REEL	350	MKP 1845-310-135-H	X
-	BULK for L > 31.5 mm	-	MKP 1845-410-135	X

www.vishay.com
2For technical questions contact documentation@vishay.comDocument Number: 26523
Revision: 07-Feb-08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MKP 1845

Metallized Polypropylene Film Capacitor
Related Document: IEC 60384-16

Vishay Roederstein

CAPACITANCE	CAPACITANCE CODE	VOLTAGE CODE 10 1000 VDC/600VAC		VOLTAGE CODE 13 1600 VDC/650 VAC		VOLTAGE CODE 20 2000 VDC/700 VAC	
		D	L	D	L	D	L
		1000 pF	- 210	-	-	-	-
1500 pF	- 215	-	-	-	-	5.5	29.0
2200 pF	- 222	-	-	-	-	5.5	29.0
3300 pF	- 233	-	-	-	-	7.0	29.0
4700 pF	- 247	-	-	-	-	5.0	29.0
6800 pF	- 258	-	-	-	-	9.5	29.0
0.01 µF	- 310	5.5	29.0	8.0	29.0	11.0	29.0
0.015 µF	- 315	6.0	29.0	9.5	29.0	11.5	34.0
0.022 µF	- 322	9.0	29.0	11.0	29.0	13.0	34.0
0.033 µF	- 333	11.0	29.0	11.5	34.0	16.0	34.0
0.047 µF	- 347	11.0	34.0	13.5	34.0	15.0	44.0
0.068 µF	- 368	13.0	34.0	15.0	34.0	18.0	44.0
0.1 µF	- 410	15.5	34.0	15.0	44.0	21.0	44.0
0.15 µF	- 415	15.0	44.0	18.5	44.0	-	-
0.22 µF	- 422	18.0	44.0	22.0	44.0	-	-
0.33 µF	- 433	-	-	-	-	-	-
0.47 µF	- 447	-	-	-	-	-	-
0.68 µF	- 458	-	-	-	-	-	-
1.0 µF	- 510	-	-	-	-	-	-
1.5 µF	- 515	-	-	-	-	-	-
2.2 µF	- 522	-	-	-	-	-	-
3.3 µF	- 533	-	-	-	-	-	-
4.7 µF	- 547	-	-	-	-	-	-

Further G-values on request.
sem = L + 3.5.

RECOMMENDED PACKAGING

LETTER CODE	TYPE OF PACKAGING	REEL DIAMETER (mm)	ORDERING CODE EXAMPLES	
G	AMVO	-	MKP 1845-310-135-G	X
R	TREEL	350	MKP 1845-310-135-R	X
-	BULK for L > 21.5 mm	-	MKP 1845-410-135	X

Document Number: 26323
Revision: 07-Feb-06

For technical questions contact 26323@vishay.com

www.vishay.com

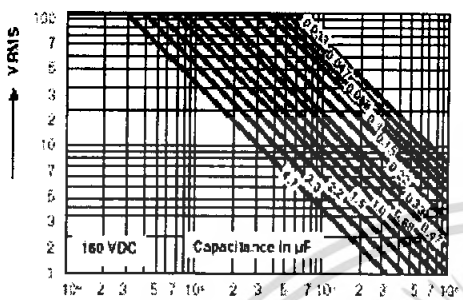
3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

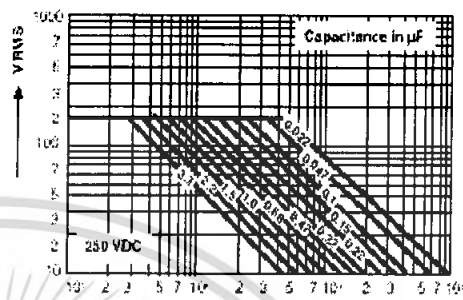
MKP 1845

Vishay Roederstein

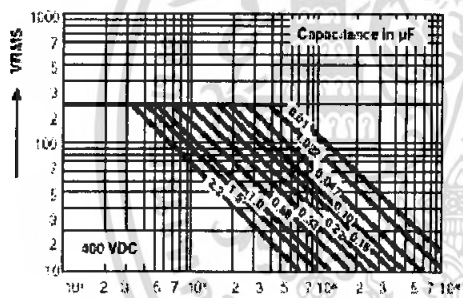
Metallized Polypropylene Film Capacitor
Related Document: IEC 60384-16



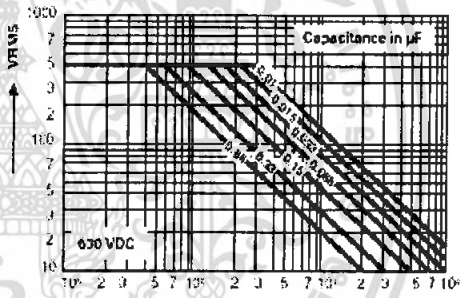
Permissible AC Voltage versus Frequency



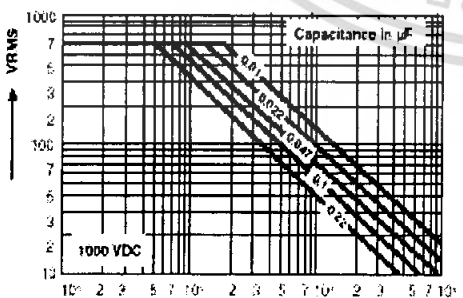
Permissible AC Voltage versus Frequency



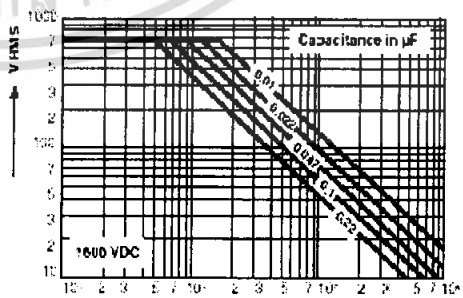
Permissible AC Voltage versus Frequency



Permissible AC Voltage versus Frequency



Permissible AC Voltage versus Frequency



Permissible AC Voltage versus Frequency

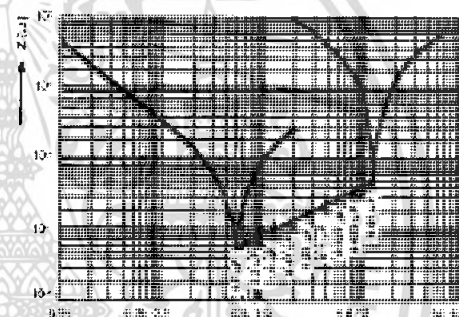
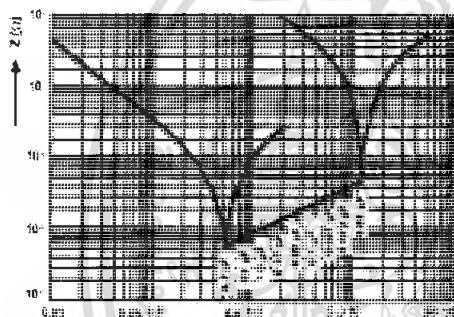
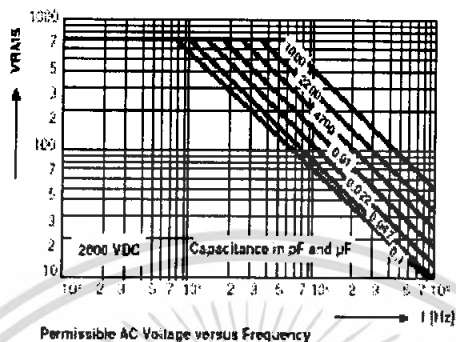
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MKP 1845

Metallized Polypropylene Film Capacitor
Related Document: IEC 60384-16

Vishay Roederstein



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้