

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุอัดก๊าซเพื่อใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับ

Design and Construction of a Gas pressurized Capacitor
for Measuring AC High Voltage



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

รพ.
กท 637
2550

เลขที่.....

เลขทะเบียน..... 82968

วัน,เดือน,ปี..... 30 ก.ค. 2551

b. 11๑58 273

i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุอัดก๊าซ
เพื่อใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับ

Design and Construction of a Gas pressurized Capacitor
for Measuring AC High Voltage



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. อนันท์วัฒน์ คุณากร

อ. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

อ. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

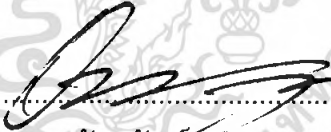
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

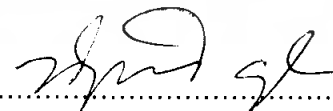
เรื่อง การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุดีทักซ์เพื่อใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับ

ผู้จัดทำ

นาย เกริก	แซ่เลื่อง	รหัส 48015091
นาย จิรายุ	จันทร์ชู	รหัส 48015097
นาย จูติพงศ์	เจียงสุใส	รหัส 48015104
นาย สุชาติ	มณฑปใหญ่	รหัส 48015139


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ พีรวุฒิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุอัดก๊าซเพื่อใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับ

นาย เกริก	แช่เลื่อง	
นาย จิรายุ	จันทร์ชู	
นาย ฐิติพงศ์	เจียงสุขใส	
นาย สุชาติ	มณฑปใหญ่	
รศ.ดร. อนันท์วัฒน์	คุณากร	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. พีรภูมิ	ยุทธโกวิท	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุอัดก๊าซเพื่อใช้ในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันสูงอิมพัลส์ ตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับด้วยหลักการโวลเตจดีไวเดอร์ และหลักการชับและโพเทสตีวและสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การออกแบบได้ใช้การจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยศึกษาพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนตัวเก็บประจุ ก่อนที่มีการสร้าง และทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งใน ส่วนการทดลองความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับและอัตราส่วนลดทอนแรงดันที่คงที่ เมื่อใช้ตัวเก็บประจุนี้ในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับและวัดแรงดันอิมพัลส์

Design and Construction of a Gas pressurized Capacitor for Measuring AC High Voltage

Mr. Krirk	Saeluang	
Mr. Jiraju	Chunchoo	
Mr. Thitipong	Changsuksai	
Mr. Suchat	Mondopyai	
Assoc.Prof.Dr.Anantawat	Kunakorn	Adviser
Lecturer Norasage	Pattanadech	Adviser
Lecturer Peerawut	Yutthagowith	Adviser

2007

ABSTRACT

This project presents design and construction of a gas pressurized capacitor for measuring AC and impulse high voltage. This capacitor can be applied for measuring alternating current voltage with voltage divider and chubb and fortescue method and also measuring impulse voltage with voltage divider. Computer simulation was employed to study the electric field stress and voltage distribution of designed capacitor. Then it was constructed and tested in high voltage laboratory. The test results show the satisfied characteristics of this capacitor both withstand voltage and constant scale factor when it is used as a AC voltage measuring system and impulse voltage measuring system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือ สนับสนุนจาก
หลายๆ ท่านโดยเฉพาะ รศ.ดร.อนันท์วัฒน์ คุณากร ,อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่
ปรึกษา อาจารย์ พีรวุฒิ ยุทธโกวิท ที่คอยกรุณาให้คำปรึกษาและแนวคิดอย่างใกล้ชิดทั้ง
ภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ อีกทั้งยังช่วยเหลือแก้ไขปัญหามากมายให้กับคณะผู้จัดทำ โดยมี
เห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อยและรำคาญใจ และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญาานิพนธ์นี้ให้เป็นที่ย
เรียบร้อย ขอขอบคุณ พี่ ๆ นิสิตปริญญาโท และเพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือด้วยดี
ตลอดมา รวมทั้งบุคคลอีกหลายๆท่านที่ยังมีได้เอ่ยถึงที่ให้คำแนะนำกับผู้จัดทำ

อนึ่งโครงการชิ้นนี้สำเร็จด้วยดีเนื่องจากความตั้งใจและมีน้ำใจของทุกท่านที่ได้
กล่าวมาข้างต้น และคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและเป็น
กำลังใจที่ดีเสมอมา

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	IV
ABSTRACT.....	IV
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	IV
สารบัญตาราง.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีการวัดแรงดันสูงและการฉนวน.....	5
2.1 การวัดแรงดันสูงกระแสตรงและแรงดันสูงกระแสสลับ.....	5
2.1.1 การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ.....	5
2.1.1.1 ความต้านทานต่ออันดับ (High ohmic series resistors).....	6
2.1.1.2 วิธีขับโพเทนเชียล.....	7
2.1.2 หลักการโวลเตจดีไวเดอร์.....	8
2.1.2.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ.....	9
2.1.2.2 โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน.....	11
2.1.3 แกปทรงกลม.....	13
2.1.3.1 ลักษณะสมบัติของช่องว่างทรงกลม.....	14
2.1.3.2 ข้อพึงปฏิบัติในการใช้ช่องว่าง ระหว่างทรงกลม.....	15
2.2 ฉนวนก๊าซ.....	20
2.2.1 ก๊าซ SF ₆	20
2.2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF ₆	20
2.2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	2.2.1.3 คุณสมบัติการระบายความร้อนของก๊าซ SF ₆ ...	24
บทที่ 3	การออกแบบเครื่องมือวัดแรงดันกระแสสลับ.....	25
	3.1 การออกแบบตัวเก็บประจุอัดก๊าซ.....	25
	3.2 ส่วนประกอบของตัวเก็บประจุอัดก๊าซ.....	27
	3.3 การออกแบบระบบวัดแรงดันด้วยวิธีโวลเตจดีไวเดอร์.....	31
	3.4 การออกแบบระบบวัดแรงดันด้วยวิธีชั้บโพเทสคิว.....	32
	3.5 ส่วนประกอบของภาคแรงดันต่ำของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ ด้วยวิธีโวลเตจดีไวเดอร์และชั้บโพเทสคิว.....	33
	3.5.1 ตัวต้านทาน.....	33
	3.5.2 ไดโอดเรียงกระแส (Diode).....	34
	3.5.3 สปาร์กแก๊ป.....	35
	3.5.5 ตัวเก็บประจุชนิด Polypropylene.....	35
	3.5.6 หัวต่อสายเคเบิล(หัวUHF).....	36
	3.5.7 หัวต่อเครื่องมือวัด (หัวBanana).....	37
	3.5.8 หัวต่อเครื่องมือวัดของโวลเตจดีไวเดอร์.....	37
	3.5.9 กล้องโลหะ.....	38
	3.6 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	38
	3.6.1 การทดสอบจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า.....	38
บทที่ 4	ผลการทดสอบและประเมินผล.....	41
	4.1 การทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์.....	41
	4.1.1 การทดสอบผลตอบแทนรูปชั้บ.....	41
	4.1.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันของ โวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ.....	44
	4.1.2.1 ผลการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันสูง กระแสสลับ.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.3 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันของ โวลเตจติไวเคอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์.....	49
4.1.3.1 ผลการทดสอบโวลเตจติไวเคอร์ด้วยแรงดัน อิมพัลส์ชั่ววอก.....	51
4.1.3.2 ผลการทดสอบโวลเตจติไวเคอร์ด้วยแรงดัน อิมพัลส์ชั่วลบ.....	52
4.1.4 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันของซิปไฟ เทสคิว.....	53
4.1.4.1 ผลการทดสอบซิปไฟเทสคิวทางด้านช่วงวอก...	54
4.1.4.2 ผลการทดสอบซิปไฟเทสคิวทางด้านช่วงลบ.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	63
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	63
5.2 ปัญหาและวิธีการแก้ไข.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก เอกสาร EECON 30 th	65
ภาคผนวก ข มาตรฐานการทดสอบ.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ.....	5
รูปที่ 2.2	การวัดแรงดันสูงด้วยความต้านทานต่ออันดับ.....	6
รูปที่ 2.3	การวัดค่ายอดแรงดันกระแสลับด้วยตัวเก็บประจุต่ออันดับ.....	7
รูปที่ 2.4	ระบบการวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจติไวเดอร์.....	8
รูปที่ 2.5	โวลเตจติไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ.....	10
รูปที่ 2.6	โวลเตจติไวเดอร์แบบความต้านทาน.....	12
รูปที่ 2.7	การติดตั้งช่องว่างทรงกลมวัดแรงดัน.....	15
รูปที่ 2.8	วงจรที่ใช้แกปทรงกลมในการสอบเทียบ.....	16
รูปที่ 2.9	กราฟความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์กับความดันไอน้ำใน บรรยากาศ.....	18
รูปที่ 2.10	เส้นกราฟแบ่งเทียบมาตรฐาน.....	19
รูปที่ 2.11	โมเลกุลของ SF ₆	21
รูปที่ 2.12	สถานะ SF ₆ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน.....	22
รูปที่ 2.13	ไดอะแกรมความดัน – อุณหภูมิของ SF ₆ พร้อมกับเส้นความ หนาแน่น (g / dm ³).....	23
รูปที่ 2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเบรกดาว์กับความดันของน้ำมัน หม้อแปลง อากาศ และ SF ₆	24
รูปที่ 2.15	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศและ SF ₆ เปรียบเทียบ กับน้ำมันหม้อแปลง.....	24
รูปที่ 3.1	ตัวเก็บประจุอัดก๊าซ.....	25
รูปที่ 3.2	การแบ่งลักษณะของการคำนวณ.....	26
รูปที่ 3.3	แท่งอิเล็กโตรด.....	27
รูปที่ 3.4	ฝาครอบแท่งอิเล็กโตรด.....	28
รูปที่ 3.5	ฝาปิดฐาน.....	29
รูปที่ 3.6	ลักษณะของแท่งอิเล็กโตรดที่ติดฝาแล้ว.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 ท่อ PVC.....	30
รูปที่ 3.8 ตัวเก็บประจุอัดก๊าซที่ประกอบสร้างเสร็จแล้ว.....	30
รูปที่ 3.9 ตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ.....	31
รูปที่ 3.10 ตัวลวดทองแดงตันใช้สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์.....	31
รูปที่ 3.11 วงจรการวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับ.....	32
รูปที่ 3.12 ชับโพเทสคิว.....	33
รูปที่ 3.13 ตัวต้านทาน.....	34
รูปที่ 3.14 ไซโอดเรียงกระแสชนิดพื้นตัวเร็ว.....	34
รูปที่ 3.15 สปาร์กแกป.....	35
รูปที่ 3.16 ตัวเก็บประจุชนิด Polypropylene	35
รูปที่ 3.17 หัวต่อสายเคเบิล.....	36
รูปที่ 3.18 หัวต่อเครื่องมือวัด.....	37
รูปที่ 3.19 หัวต่อเครื่องมือวัดของโวลเตจดีไวเดอร์.....	37
รูปที่ 3.20 กล้องโลหะ.....	38
รูปที่ 3.21 การกระจายของเส้นสมตักย์ที่ระดับแรงดัน 200 kV _{rms}	39
รูปที่ 3.22 การกระจายแรงดันบริเวณผิวฉนวนท่อ.....	39
รูปที่ 3.23 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ระดับแรงดัน 200 kV _{rms}	40
รูปที่ 3.24 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณผิวฉนวนท่อ.....	40
รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบผลตอบสนองของรูปชั้นของโวลเตจดีไวเดอร์.....	41
รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลย์การทดสอบผลตอบสนองของรูปชั้น.....	42
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบผลตอบสนองของรูปชั้นของระบบวัด.....	44
รูปที่ 4.4 วงจรการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ.....	45
รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลย์การทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันสูง กระแสสลับ.....	45
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 10 kV.....	46
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 20 kV.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.8	ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสลับที่ระดับแรงดัน 30 kV.....	47
รูปที่ 4.9	ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสลับที่ระดับแรงดัน 40 kV.....	47
รูปที่ 4.10	ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสลับที่ระดับแรงดัน 50 kV.....	48
รูปที่ 4.11	ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสลับที่ระดับแรงดัน 60 kV.....	48
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสลับ.....	49
รูปที่ 4.13	วงจรการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์.....	50
รูปที่ 4.14	วงจรสมมูลย์การทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์.....	50
รูปที่ 4.15	ผลการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว.....	51
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว.....	52
รูปที่ 4.17	ผลการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ.....	52
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทดสอบแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ.....	53
รูปที่ 4.19	วงจรการทดสอบชั้ไฟเทสคิว.....	54
รูปที่ 4.20	ผลการทดสอบทดสอบชั้ไฟเทสคิวทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 10 kV.....	54
รูปที่ 4.21	ผลการทดสอบทดสอบชั้ไฟเทสคิวทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 20 kV.....	55
รูปที่ 4.22	ผลการทดสอบทดสอบชั้ไฟเทสคิวทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 30 kV.....	55
รูปที่ 4.23	ผลการทดสอบทดสอบชั้ไฟเทสคิวทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 40 kV.....	56
รูปที่ 4.24	ผลการทดสอบทดสอบชั้ไฟเทสคิวทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 50 kV.....	56
รูปที่ 4.25	ผลการทดสอบทดสอบชั้ไฟเทสคิวทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 60 kV.....	57
รูปที่ 4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของชั้ไฟเทสคิวทางด้านช่วงบวก.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของสำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา กระทรวงยุติธรรม
 ไม่ควรตีพิมพ์หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบซัพไฟเทสคิวทางด้านช่วงลบที่ระดับแรงดัน 10 kV....	58
รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบซัพไฟเทสคิวทางด้านช่วงลบที่ระดับแรงดัน 20 kV....	59
รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบซัพไฟเทสคิวทางด้านช่วงลบที่ระดับแรงดัน 30 kV....	59
รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบซัพไฟเทสคิวทางด้านช่วงลบที่ระดับแรงดัน 40 kV....	60
รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบซัพไฟเทสคิวทางด้านช่วงลบที่ระดับแรงดัน 50 kV....	60
รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบซัพไฟเทสคิวทางด้านช่วงลบที่ระดับแรงดัน 60 kV....	61
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของซัพไฟเทสคิวทางด้านช่วงลบ.....	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำปริญญานิพนธ์.....	3
ตารางที่ 2.1	ขนาดแกปทรงกลม ระยะช่องว่างแกป และแรงดันสูงสุดที่วัดได้.	20
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติทั่วไปของ SF ₆	21
ตารางที่ 4.1	ผลการทดสอบแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออก ของโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ.....	43
ตารางที่ 4.2	ผลการทดสอบแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออก ของโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั้วบวก.....	45
ตารางที่ 4.3	ผลการทดสอบแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออก ของโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั้วลบ.....	46
ตารางที่ 4.4	ผลการทดสอบแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออก ของของขับไฟเทสคิวทางด้านช่วงบวก.....	51
ตารางที่ 4.5	ผลการทดสอบแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออก ของของขับไฟเทสคิวทางด้านช่วงลบ.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

จากโครงการวิศวกรรมไฟฟ้าที่ผ่านมา ปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ.2549 ได้มีการออกแบบหม้อแปลงทดสอบ พิกัด 200 kV 10 kVA และชุดควบคุมการป้องกันแรงดัน เพื่อใช้ในการเรียนการสอน และการวิจัยของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แต่เนื่องจากระบบวัดแรงดันกระแสสลับที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง มีพิกัดสูงสุดเพียง 100 kV ซึ่งไม่เพียงพอต่อหม้อแปลงทดสอบที่ได้สร้างขึ้น เพื่อเป็นการรองรับกับระบบสร้างแรงดันกระแสสลับ 200 kV จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบและสร้างระบบวัดแรงดันกระแสสลับ พิกัด 200 kV ซึ่งเป็นที่มาของโครงการวิศวกรรมปี พ.ศ. 2550 นี้

ระบบวัดแรงดันกระแสสลับพิกัด 200 kV นี้ประกอบด้วย โวลต์เดจิติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับซึ่งเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม อัดก๊าซฉนวน(SF₆) ที่ความดัน 3 bar ซึ่งทำให้ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กแต่สามารถทนแรงดันได้สูงซึ่งจะไม่มีผลจากค่าเก็บประจุสแตตีย์ และตัวเก็บประจุต่ออันดับวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับซึ่งเป็นวิธีการวัดแรงดันจากค่ากระแสเฉลี่ยครึ่งคลื่นที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุแรงสูง ซึ่งได้พัฒนาปรับปรุงวงจรการวัดของตัวเก็บประจุต่ออันดับวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นซึ่งสามารถอ่านค่ากระแสได้ทั้งด้านบวกและลบได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ
2. เพื่อนำไปใช้ในงานทดสอบที่ต้องใช้แรงดันกระแสสลับทดสอบ
3. เพื่อปรับปรุงวงจรการวัดแรงดันกระแสสลับให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาหลักการวัดแรงดันสูงที่เป็นแรงดันกระแสสลับด้วยโวลต์เดจิติไวเตอร์
2. จำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อดูการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในตัวเก็บประจุอัดก๊าซ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ
3. ทำการออกแบบและสร้างระบบวัดแรงดันกระแสสลับ
4. ทดสอบและสอบเทียบระบบวัดแรงดันกระแสสลับที่สร้างขึ้น
5. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดแรงดันสูงกระแสสลับแรงดันสูง
2. ทำการออกแบบและสร้างระบบวัดแรงดันกระแสสลับ
3. ทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อดูการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอัดก๊าซที่ออกแบบสร้างขึ้น
4. ทำการทดสอบงานจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงกับอุปกรณ์ใช้งานจริง
5. เก็บผลและสรุปผลการทดลอง
6. ทำคู่มือการใช้และเอกสารประกอบการปฏิบัติการเพื่อให้นักศึกษารุ่นถัดไปใช้ในการปฏิบัติการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำปฏิญาณนิพนธ์

การทำงาน	พ.ศ. 2550					พ.ศ. 2551				
	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดแรงดันสูง กระแสสลับแรงดันสูง										
2. ทำการออกแบบและสร้างระบบวัดแรงดัน กระแสสลับ										
3. ทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อดูการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอัดก๊าซที่ออกแบบสร้างขึ้น										
4. ทำการทดสอบงานจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงกับอุปกรณ์ใช้งานจริง										
5. เก็บผลและสรุปผลการทดลอง										
6. ทำคู่มือการใช้และเอกสารประกอบการปฏิบัติการ เพื่อให้ นักศึกษารุ่นถัดไปใช้ในการปฏิบัติการ										



วางแผน



ดำเนินงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถนำระบบแรงดันกระแสสลับไปใช้ในงานวิจัยต่างๆ ที่ต้องใช้แรงดันกระแสสลับทดสอบได้
2. สามารถปรับปรุงระบบการวัดแรงดันสูงที่เป็นแรงดันกระแสสลับให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงให้มีคุณสมบัติตรงตามที่ต้องการได้
4. ได้ฝึกทักษะการแก้ปัญหาในการทำงานเป็นทีม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการวัดแรงดันสูงและการฉนวน

การวัดแรงดันสูงมีข้อแตกต่างจากการวัดแรงดันต่ำที่สำคัญ คือ อุปกรณ์แสดงผล (Indicators) และผู้สังเกตจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการวัดมากพอที่จะไม่เกิดอันตราย และต้องอาศัยการฉนวนที่ถูกต้องเหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่วัด ถ้าแรงดันสูงมากขึ้น ระยะเวลาการฉนวนและระยะห่างของผู้วัดจะต้องมากขึ้น การวัดแรงดันสูงจึงต้องใช้เทคนิคพิเศษบางประการ โดยอาศัยอุปกรณ์และเครื่องวัดช่วย ลักษณะสมบัติที่ต้องการของอุปกรณ์และเครื่องวัดที่สำคัญ ได้แก่ ความถูกต้องเที่ยงตรง ความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดแรงดันที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้นเช่น แรงดันอิมพัลส์ เป็นต้น

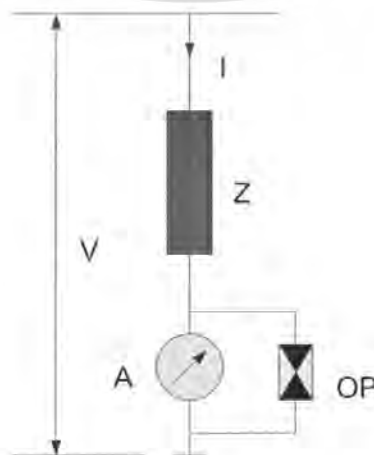
เทคนิคการวัดแรงดันสูงขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันกระแสสลับ แรงดันกระแสดตรง และแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสองชนิดหลังนี้มักจะหมายถึงแรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการทดลอง ส่วนชนิดแรก คือ แรงดันกระแสสลับนั้น จะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการ และในระบบส่งจ่าย [1]

2.1 การวัดแรงดันสูงกระแสตรงและแรงดันสูงกระแสสลับ

การวัดแรงดันกระแสสลับในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการสามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์ ดังนี้ แกปทรงกลม (Sphere gap) อิมพีแดนซ์ต่ออันดับ (Series impedance) และโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุหรือแบบความต้านทาน (Resistive voltage divider or capacitive voltage divider)

2.1.1 การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ

การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ เป็นวิธีการวัดที่อาศัยกฎของโอห์มคือ $V = IZ$ ดังวงจรรูปที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

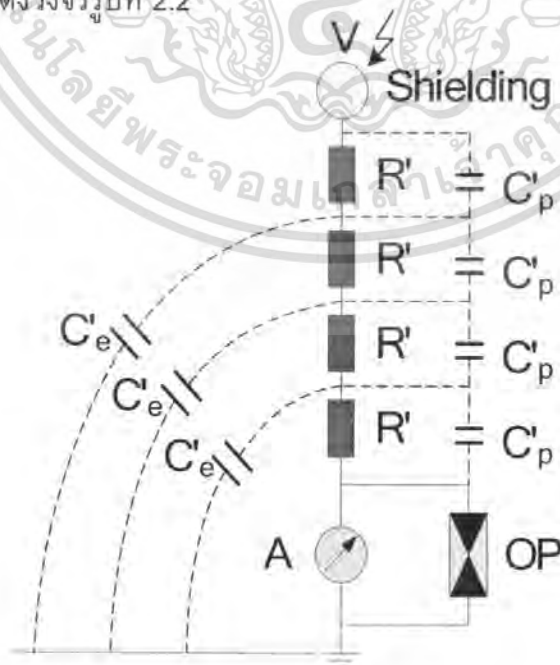
รูปที่ 2.1 การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ

เมื่อ V คือ แรงดันสูงที่ต้องการวัด
 I คือ กระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ Z ซึ่งวัดด้วยแอมป์มิเตอร์ A
 Z คือ อิมพีแดนซ์ที่ทราบค่าและมีค่าสูงมากพอ เพื่อจำกัดกระแส
 ไม่ให้มากเกินไป ซึ่งอาจจะเป็นความต้านทานหรือค่าเก็บประจุได้
 OP คือ อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน เช่น ไดโอด สปาร์กแกป

ความถูกต้องขึ้นอยู่กับแอมป์มิเตอร์ และความคงตัวของอิมพีแดนซ์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับ
 อุณหภูมิ ปรากฏจากโคโรนา และกระแสรั่วตามผิวของฉนวนรองรับต้องน้อยที่สุด

2.1.1.1 ความต้านทานต่ออันดับ (High ohmic series resistors)

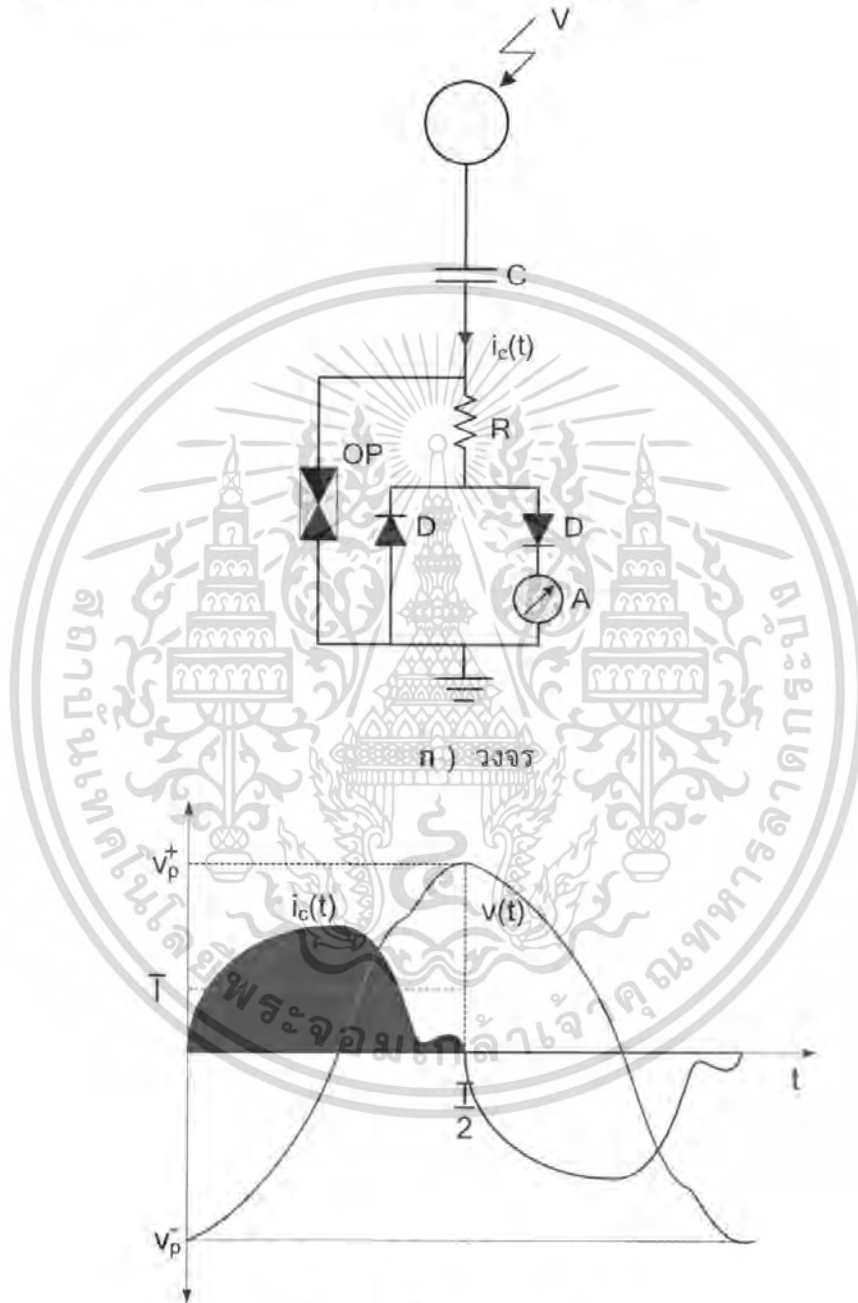
ความต้านทานต่ออันดับ จะเป็นการใช้ความต้านทานย่อยมาต่ออนุกรม ซึ่งจะทำให้มี
 โห้้มสูงมาก เพื่อจำกัดการผ่านของกระแส I ซึ่งในทางปฏิบัติอาจใช้ความต้านทานย่อยที่ทำ
 จากคาร์บอน หรือฟิล์มโลหะมาต่ออันดับกัน หรือใช้ลวดความต้านทานความร้อนสูง เช่น เส้น
 ลวด Ni - Cr มาพันแบบไร้ค่าความเหนียวนำ ยึดอยู่บนฉนวนจุ่มน้ำมันหม้อแปลง เพื่อช่วย
 ระบายความร้อน และเพิ่มการฉนวนตามผิวของฉนวนยึด หรือความต้านทานย่อยแต่ละตัวให้มี
 ความคงทนของฉนวนมากขึ้น มิฉะนั้นจะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวได้ กล่าวคือต้องออกแบบให้
 แรงดันตกคร่อมไม่เกิน 2 kV/cm ในอากาศ และ 15 kV/cm ในน้ำมัน และมีผลของค่าประจุรั่ว ทำ
 ให้เกิดความผิดพลาดของมุม และขนาดที่วัด เมื่อวัดแรงดันกระแสสลับ จะมีลักษณะ
 เป็นแบบ R ผสม C จึงมีใช้กันน้อย ผลกระทบนี้จะมีผลน้อยลงเมื่อความต้านทานน้อยลง ถ้า C_p
 มากกว่า C_e มากๆ จะทำให้ความผิดพลาดของมุมลดลง ซึ่งทำได้โดยใช้ซิลต์อิเล็กโตรด หรือ
 ซิลต์ความต้านทาน ดังวงจรรูปที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.2 การวัดแรงดันสูงด้วยความต้านทานต่ออันดับ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 วิธีชับโฟเทสคิว

วิธีชับโฟเทสคิว เป็นวิธีวัดแรงดันจากค่ากระแสเฉลี่ยครึ่งคลื่นที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุแรงสูง C ฉะนั้นแอมป์มิเตอร์ที่วัดต้องสามารถวัดกระแสค่าเฉลี่ยได้ โดยค่าเฉลี่ยกระแสที่วัดได้จะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับค่ายอดของแรงดันที่วัดได้ ดังวงจรรูปที่ 2.3



ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแส

รูปที่ 2.3 การวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับด้วยตัวเก็บประจุต่ออันดับ

เมื่อ C คือ ตัวเก็บประจุแรงสูง

D คือ ไดโอดเรียงกระแส

OP คือ อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน

A คือ แอมป์มิเตอร์แบบวัดค่าเฉลี่ยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสเฉลี่ยที่แอมป์มิเตอร์วัดได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-1 และ 2-2

$$\bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{C}{T} \int_{V_p^-}^{V_p^+} dV \quad (2-1)$$

$$= fC(V_p^+ - V_p^-) = fCV_{pp} \quad (2-2)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของแรงดันที่วัด

V_p^+ คือ ค่ายอดบวก

V_p^- คือ ค่ายอดลบ

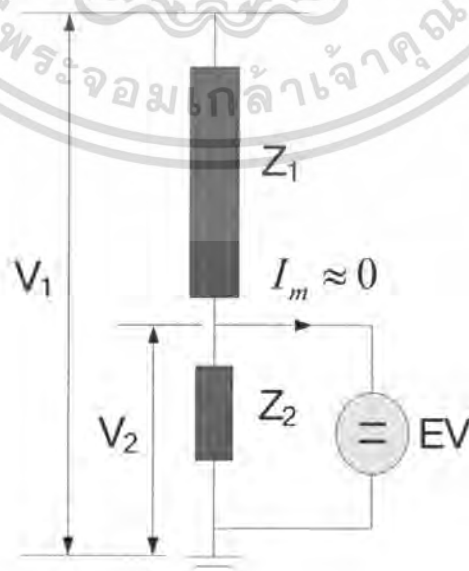
ในกรณีที่ค่ายอดทางบวกและทางลบเท่ากัน ค่ายอดแรงดันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-3

$$V_p = \frac{\bar{i}}{2fc} \quad (2-3)$$

ในรูปที่ 2.3 (ข) แสดงให้เห็นว่าถึงแม้รูปคลื่นที่วัดไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ค่าที่วัดได้ก็ยังถูกต้องราวเท่าที่รูปคลื่นแรงดันไม่มีค่ายอดขึ้นอีกในระหว่างครึ่งคาบ ($T/2$) มิฉะนั้นจะผิดพลาด เพราะแอมป์มิเตอร์วัดกระแสไหลทางเดียว ความถูกต้องของการวัดขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของแอมป์มิเตอร์ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ และค่าความถี่

2.1.2 หลักการโวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์แบบเฉื่อยงาน (Passive component) ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูง ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำอยู่ในระดับที่สามารถใช้โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำวัดได้ ด้วยการใช้อิมพีแดนซ์แรงสูง (Z_1) ต่อร่วมกับอิมพีแดนซ์แรงต่ำ (Z_2) ดังรูปที่ 2.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ 24 ระบบการวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เดจดีไวเดอร์ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	V_1	คือ แรงดันสูงขาเข้า
	V_2	คือ แรงดันต่ำขาออก
	Z_1	คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง
	Z_2	คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

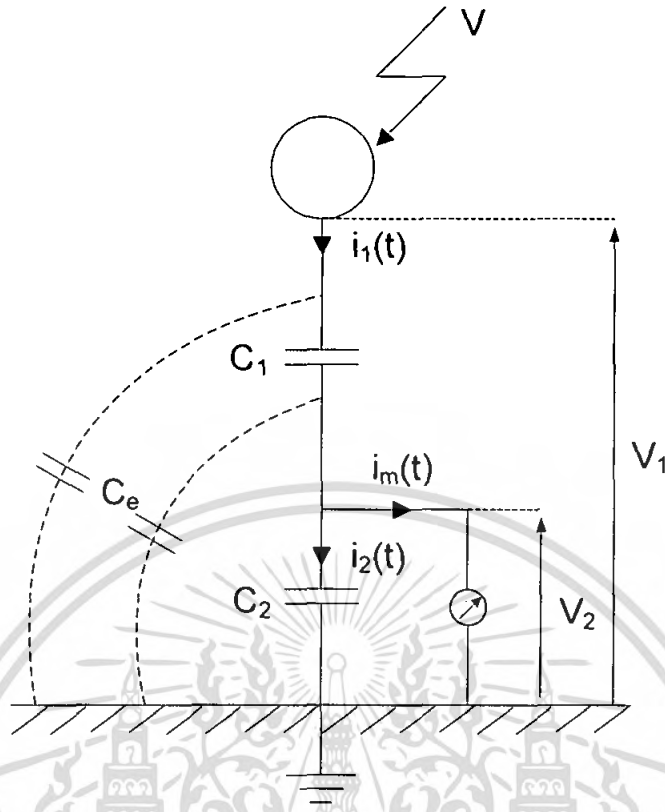
ขนาดแรงดันสูงจริงที่ต้องการวัด (V_1) จะเป็นสัดส่วนกับแรงดันขาออกทางด้านแรงต่ำที่วัดได้ (V_2) ดังสมการที่ 2-4

$$V_1 = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} V_2 \quad (2-4)$$

โวลเตจดีไวเดอร์ที่มีใช้งานทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ แบบความต้านทาน (R), แบบตัวเก็บประจุ (C) และแบบผสม (R-C) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอิมพีแดนซ์ที่ใช้ ทั้งนี้โวลเตจดีไวเดอร์ทั้ง 3 แบบมีคุณสมบัติการตอบสนองต่อชนิดแรงดันที่วัดแตกต่างกัน ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดแรงดันสูงที่ต้องการวัด เพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดขึ้น

2.1.2.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ สามารถวัดได้เฉพาะแรงดันกระแสสลับ เนื่องจากเมื่อนำโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุไปวัดแรงดันกระแสดตรง ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำจะคายประจุให้กับอุปกรณ์วัด ทำให้แรงดันที่วัดได้มีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเป็นศูนย์ในที่สุด โดยวงจรของดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุแสดงดังรูปที่ 2.5 ประกอบด้วย C_1 เป็นตัวเก็บประจุภาคแรงสูง C_2 เป็นตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ โดยหลักการแล้ว กระแสที่เข้าเครื่องวัด I_m นั้น ต้องมีค่าน้อยมากเกือบเป็นศูนย์ นั่นคือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำจะต้องเท่ากันคือ



รูปที่ 2.5 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

$$I_1 = \omega C_1 V_1 = \frac{\omega C_1 C_2}{C_1 + C_2} V_1 \tag{2-5}$$

$$I_2 = \omega C_2 V_2 = I_1 \text{ เมื่อ } I_m \sim 0 \tag{2-6}$$

ฉะนั้น
$$V_1 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} V_2 \tag{2-7}$$

เมื่อ $C_2 \gg C_1$
$$V_1 \approx \frac{C_2}{C_1} V_2 \tag{2-8}$$

การที่จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุทั้งสองมีค่าเท่ากัน ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงจะต้องมีค่าความจุไฟฟ้าสูงมีค่าสูงกว่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ C_e (Stray capacitance) มากๆ โดยค่า C_e สามารถประมาณจากความสูงของดีไวเดอร์ คือ 10-15 pF/m ค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ C_e เมื่อนำมาคิดรวมกับค่าความจุไฟฟ้า C_1 เป็นความจุไฟฟ้ารวม C_1 มีค่าประมาณ $C_1(1 - \frac{C_e}{6C_1})$ และมีเตอร์หรืออุปกรณ์วัดแรงดันจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูงพอที่จะไม่เป็นโหลดเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของ C_2

คาปาซิเตอร์แรงสูงที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป มีใช้กันอยู่ 2 ชนิด คือ ตัวเก็บประจุอัดเอกส คว้ามัดัน และตัวเก็บประจื่อย่อยๆ มาต่อกันอันดับกันศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาปาซิเตอร์แรงสูงแบบก๊าซอัดความดันนี้ ได้จากสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วม (Coaxial cylinder configuration) เพื่อให้มีขนาดเล็กๆ แต่สามารถทนแรงดันได้สูงๆ จึงจำเป็นต้องมีการฉนวนด้วยก๊าซอัดความดันสูงขึ้น ก๊าซที่ใช้กันได้แก่ N_2 , CO_2 ที่ความดัน 10-20 บาร์ หรือก๊าซ SF_6 ที่ความดันในช่วง 1 - 3 bar

2.1.2.2 โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

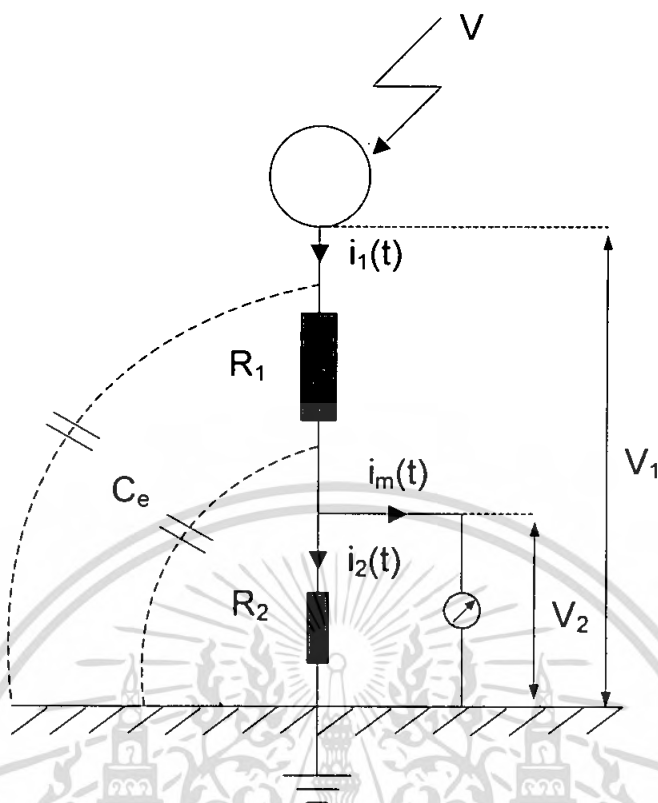
โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานสามารถวัดได้ทั้งแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับ ประกอบด้วยความต้านทานภาคแรงสูง R_1 และความต้านทานภาคแรงต่ำ R_2 ดังในรูปที่ 2.6 จะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของกระแสที่ไหลผ่าน และต้องคำนึงถึงความจุไฟฟ้าสแตตริคลงดิน การฉนวน เป็นต้น

ความจุไฟฟ้าสแตตริคจะมีผลต่อค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันแล้วยังมีผลโดยตรงต่อแบนด์วิดท์ของดีไวเดอร์โดยตรงด้วย โดยค่าความถี่คัทออฟ (Cut off frequency) เป็นไปตามสมการที่ 2-9

$$f_c \approx \frac{1}{RC_e} \quad (2-9)$$

สารที่ใช้ทำเป็นความต้านทาน R_1 และ R_2 ควรเป็นสารชนิดเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเนื่องจากอุณหภูมิ นั่นคือแรงดันที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความต้านทานทั้งสองตามสมการที่ 2-10

$$V_1 = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) V_2 \quad (2-10)$$



รูปที่ 2.6 โวลต์จติไวเตอร์แบบความต้านทาน

ความถูกต้องก็จะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าความต้านทานและขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดแรงดันคร่อมความต้านทานภาคแรงต่ำ R_2 ซึ่งจะต้องเป็นโวลต์มิเตอร์ชนิดอิเล็กทรอนิกส์ ปัญหาสำคัญที่ควรให้ความสนใจประการหนึ่งคือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว เนื่องจากศักย์แรงสูง ฉะนั้นฉนวนที่หุ้มความต้านทานจะต้องทนต่อแรงดันสูงได้ ในขณะเดียวกันกระแสรั่วที่ไหลตามผิวอาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ ถ้าหากความต้านทานแรงสูงนั้นมีค่าสูงเกินไป ฉะนั้นค่าความต้านทานจึงมีขีดจำกัดบน คือ จะต้องไม่สูงจนเกินไป กล่าวคือ กระแสที่วัดจะต้องไม่ต่ำจนเกินไป ฉะนั้นการเลือกฉนวนที่จะนำมาใช้ยึดความต้านทาน หรือบรรจุความต้านทานต้องเลือกให้เหมาะสม

การจัดวางความต้านทาน และการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในบริเวณล้อมรอบความต้านทาน ซึ่งอาจใช้ความต้านทานย่อยมาต่ออันดับบนแท่งฉนวนในและต่อกันในลักษณะหักล้างกันทางสนามแม่เหล็กเพื่อให้ได้ความเหนี่ยวนำน้อยที่สุดจุ่มในน้ำมัน หรือใช้ก๊าซอัดความดัน เช่น ก๊าซ SF_6 เป็นต้น

2.1.3 แยกทรงกลม

การวัดแรงดันสูงด้วยแยกทรงกลม เป็นวิธีที่ง่ายและมีความแน่นอนเชื่อถือได้ สามารถวัดแรงดันได้ทั้ง แรงดันกระแสตรง แรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ การวัดแรงดันอาศัยการเกิดสปาร์ก หรือเบรกดาวนระหว่างทรงกลมโลหะที่วางอยู่ในอากาศ ซึ่งเป็นไปตามกฎการเกิดดีสชาร์จของก๊าส คือ สปาร์กหรือเบรกดาวนจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง นั่นก็คือจะเกิดเบรกดาวนขึ้นเมื่อแรงดันสูงถึงค่าหนึ่ง นั่นหมายถึงการวัดแรงดันแบบนี้จะทราบกันเฉพาะค่ายอดเท่านั้น ซึ่งเป็นค่าแรงดันเบรกดาวนสถิติ (Statistic breakdown voltage) ที่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนแน่นอน ทำซ้ำเดิมได้ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์ก หรือเบรกดาวนนั่นขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ ระยะห่างระหว่างทรงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมและความชื้นของอากาศตามสมการที่ 2-11

$$U_b = f(d, D, \delta, h) \quad (2-11)$$

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์ก
 d คือ ระยะช่องว่างระหว่างทรงกลม
 D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม
 δ คือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ
 h คือ ความชื้นของอากาศ

ตามมาตรฐานสากล IEC No.60052 จะกำหนดค่าแรงดันเบรกดาวนของอากาศระหว่างแยกทรงกลมที่สภาวะมาตรฐาน คือ ความดันบรรยากาศ 760 mmHg และอุณหภูมิ 20°C ความชื้น 8.5 g/m³ ฉะนั้นค่าแรงดันเบรกดาวนที่วัดได้ที่ความดัน อุณหภูมิ และความชื้นที่ห้องทดสอบ เมื่อจะต้องปรับเทียบสู่สภาวะมาตรฐานตามสมการที่ 2-12

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k \times k_d} \quad (2-12)$$

เมื่อ U_{bn} คือ ค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะมาตรฐาน
 U_b คือ ค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิและความดันห้อง
 k_d คือ ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ

ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ δ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2-13

$$\delta = \frac{p}{760} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} = 0.386 \left(\frac{p}{273 + t} \right) \quad (2-13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ p คือ ความดันของอากาศอ่านจากบาโรมิเตอร์เป็น mm.Hg

t คือ อุณหภูมิของห้องในขณะที่วัดได้ เป็น $^{\circ}\text{C}$

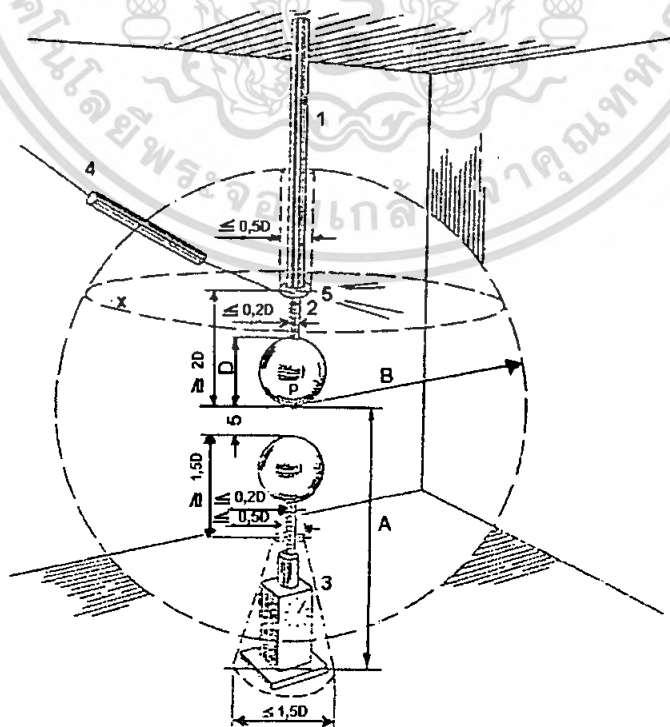
k_d คือ ตัวประกอบแปลงผันจะเท่ากับ δ เมื่อ δ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 – 1.05

K คือ ค่าองค์ประกอบแก้ค่าความชื้นในอากาศโดยสมการที่ 2-14

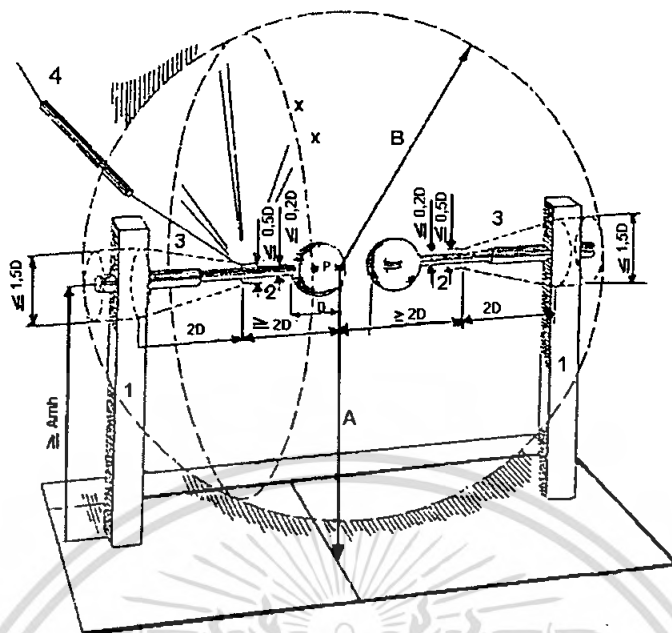
$$K = 1 + 0.002 \left(\frac{h}{\delta} - 8.5 \right) \quad (2-14)$$

2.1.3.1 ลักษณะสมบัติของช่องว่างทรงกลม

- สนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลมที่เท่ากันจะมีลักษณะเกือบสม่ำเสมอถ้าระยะแคบ d น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลาง D ($d < D/2$)
- เป็นการวัดค่ายอด เพราะการเกิดเบรกดาวนในอากาศ จะเกิดขึ้นที่ค่ายอดของแรงดันกระแสสลับ
- เป็นอุปกรณ์วัดที่ไม่มีตัวชี้ จะสังเกตได้จากการเกิดสปาร์กหรือเบรกดาวน เวลาใช้จึงต้องทำการปรับเทียบมาตรฐาน
- วัดได้ทั้ง แรงดันกระแสตรง แรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์
- ความถูกต้องเที่ยงตรง $\pm 3\%$
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐานตั้งแต่ 2 cm ถึง 200 cm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนก) ทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 25 cm นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) ทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 25 cm

รูปที่ 2.7 การติดตั้งช่องว่างทรงกลมวัดแรงดัน

- โดยที่
- 1 คือ ฉนวนรองรับ
 - 2 คือ ก้านยึดทรงกลม
 - 3 คือ เกียร์ขับเคลื่อนทรงกลมเพื่อปรับระยะ
 - 4 คือ สายแรงสูงต่ออนุกรมกับความต้านทานหนึ่ง
 - 5 คือ ที่ต่อสายแรงสูง
 - P คือ จุดที่เกิดสปาร์กของทรงกลม
 - A คือ ความสูงของ P เหนือพื้นดิน
 - B คือ รัศมีของย่านปลอดภัยจากวัดดูอื่นใดขณะนั้น

ความต้านทานหนึ่งจะต้องอยู่เหนือระนาบ X

2.1.3.2 ข้อพึงปฏิบัติในการใช้ช่องว่างระหว่างทรงกลม

- การติดตั้งและยึด ควรปฏิบัติตามที่ IEC 60052 แนะนำไว้ ถ้าทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ≤ 25 cm มักจะติดตั้งในแนวนอน ถ้าโตกว่า 25 cm มักจะติดตั้งในแนวตั้ง
- ในรัศมี 3.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม (D) โดยวัดจากจุดบนพื้นผิวทรงกลมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะต้องไม่มีโลหะหรือตัวนำใดๆ
- ระยะห่างระหว่างทรงกลม จะต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม

($d \leq D/2$)

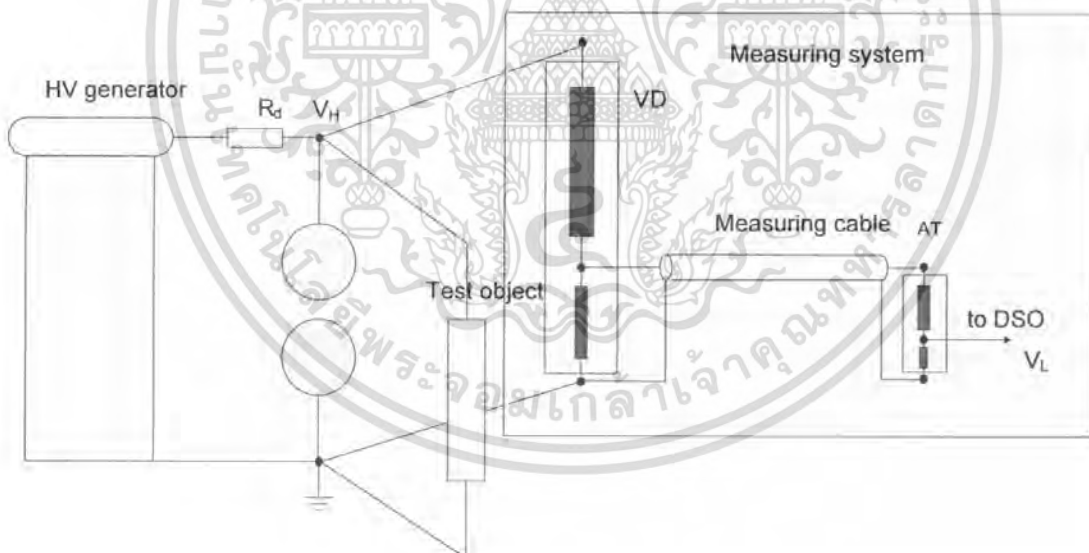
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระแสที่เกิดจากการสปาร์ก ไม่ควรเกิน 1 แอมแปร์ โดยต่อความต้านทานต่ออนุกรมไว้กับทรงกลม เพื่อจำกัดกระแส และความต้านทานตัวนี้จะทำหน้าที่หน่วง ความถี่สูงอันเกิดจากมี L และ C ในวงจรวัดแรงดัน AC,DC ค่าความต้านทาน $R_d = 100 - 1000 \text{ k}\Omega$ และแรงดันอิมพัลส์ $R_d \leq 500 \Omega$

- ควรจะตัดวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับทรงกลมทันทีหลังจากเกิดสปาร์ก เพื่อป้องกันผิวทรงกลมเสีย

- ค่าที่ถือว่าถูกต้อง ได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากการวัดหลายๆ ครั้ง (ประมาณ 5 ครั้ง) ค่าที่วัดได้ครั้งแรกมักจะมีค่าต่ำ อันเนื่องมาจากมีฝุ่นละอองที่ผิวของทรงกลม ดังนั้นก่อนใช้ควรทำความสะอาดพื้นผิวของทรงกลมก่อนเสมอ

การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม เป็นการวัดด้วยอุปกรณ์ที่ไม่มีตัวชี้ คือ ไม่ทราบว่าจะขณะนี้ แรงดันที่ป้อนเข้าไปนั้นมีค่าเท่าใด จนกว่าจะเกิดสปาร์กขึ้นในช่องว่าง ดังนั้นเพื่อให้สามารถทราบค่าแรงดันที่ป้อนได้ตลอดเวลา จึงต้องทำการสอบเทียบกับแรงดันที่วัดได้ทางด้านแรงดันต่ำ ดังวงจรสอบเทียบในรูปที่ 2.8 ที่ระยะช่องว่างหนึ่งจะได้แรงดันสปาร์กทางแรงสูง V_H ค่าหนึ่ง ซึ่งขณะนั้นอ่านแรงดันด้านแรงดันต่ำเป็น V_L เมื่อเปลี่ยนระยะช่องว่างหลายๆ ค่า ก็จะทำให้ได้เส้นกราฟสอบเทียบ (Calibration curve) ระหว่าง V_H และ V_L



รูปที่ 2.8 วงจรที่ใช้แกปทรงกลมในการสอบเทียบ

- เมื่อ V_L คือ แรงดันด้านแรงต่ำ
 V_H คือ แรงดันด้านแรงสูง
 R_d คือ ความต้านทานจำกัดกระแสลัดวงจร
 AT คือ ตัวลวดทอง
 VD คือ โวลต์เจดีไวเดอร์
 DSO คือ ออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า V_H ที่ระยะช่องว่างทรงกลมใดๆ ที่สภาวะมาตรฐานหาได้จากตารางในมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกรวดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลม เช่น มาตรฐาน IEC 60052 V_H ที่อ่านได้โดยตรงจากตารางมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน (20 °C 760 mmHg) ถ้าต้องการทราบค่าแรงดันที่สภาพห้องจะต้องใช้ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ k_d ตัวแก้ความชื้น k ซึ่งค่าแรงดันที่สภาวะมาตรฐานได้จากสมการที่ 2-15

$$V_b = k k_d V_{bn} \quad (2-15)$$

เมื่อ V_{bn} คือ แรงดันที่สภาวะมาตรฐาน
 V_b คือ แรงดันที่สภาวะของห้อง

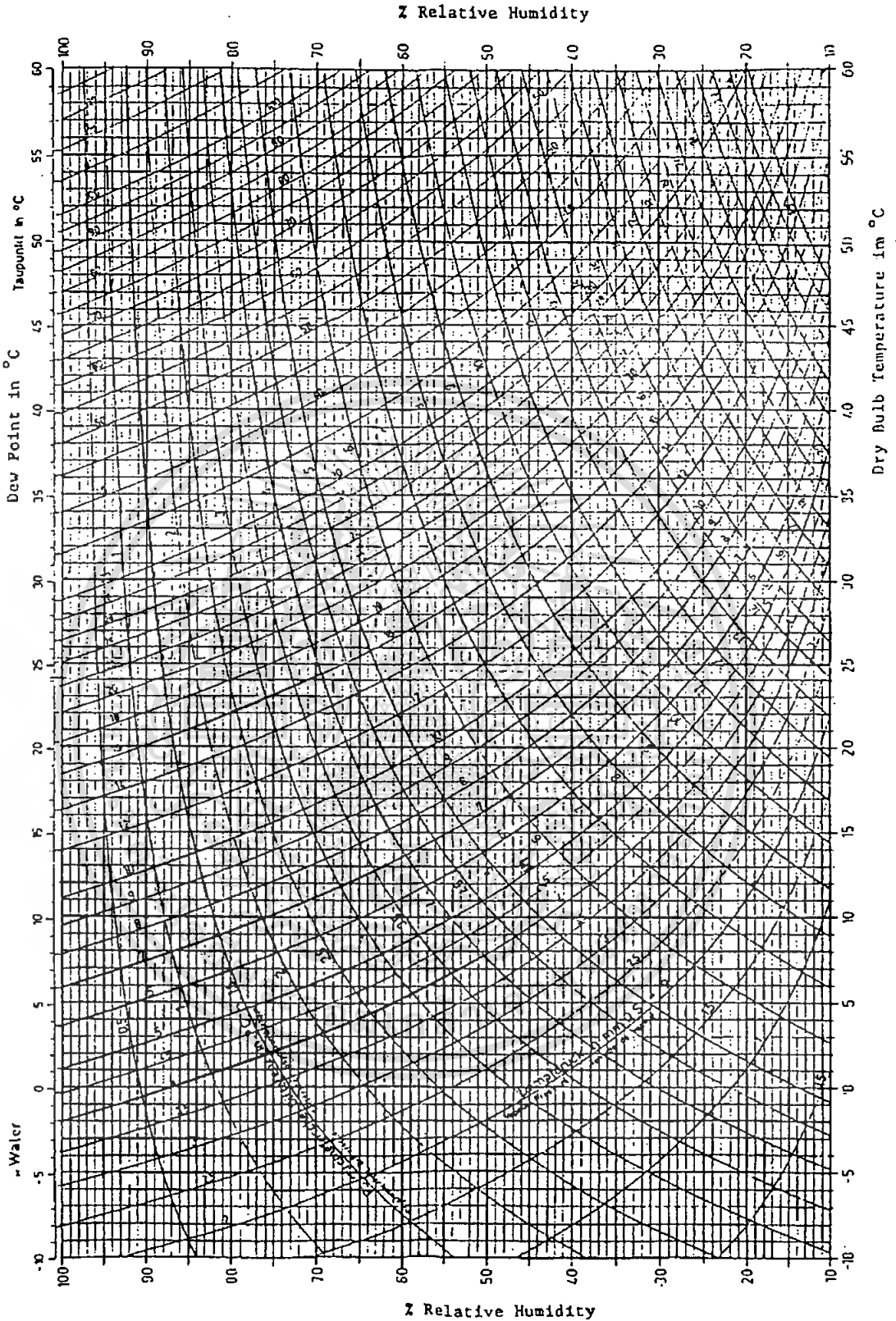
ตัวแก้ความชื้น k สามารถหาค่าความชื้นซึ่งมักอ่านค่าเป็นความชื้นสัมพัทธ์ แต่ค่าความชื้นตามสมการ เป็นความชื้นสมบูรณ์ ซึ่งอาจแปลงค่าความชื้นนี้จากรูปที่ 2.9



82968

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Psychrometertafel Nr. 760b for Psychrometer with glass thermometers, velocity of air 2.2 m/sec
 nach U. Sonntag



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์กับความดันไอน้ำในบรรยากาศ

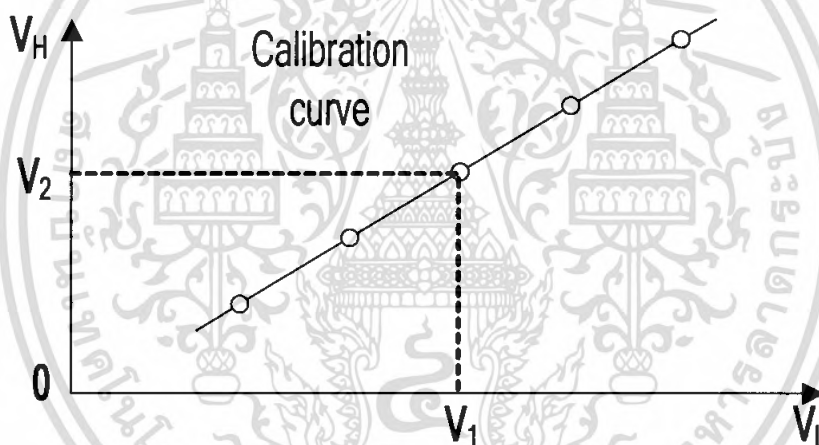
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรสอบเทียบด้วยสปาร์กแกปทรงกลม จะมีความต้านทาน R_d ต่ออันดับกับลูกทรงกลมที่ป้อนแรงดันสูง ความต้านทานนี้ทำหน้าที่สองประการ คือ

- 1) จำกัดกระแสที่ไหลผ่านช่องว่างลูกทรงกลมเมื่อเกิดสปาร์ก ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะทำให้ผิวลูกทรงกลมหลอมละลายจากกระแสสปาร์ก
- 2) เมื่อเกิดสปาร์กที่ช่องว่างของลูกทรงกลม อาจทำให้เกิดการแกว่งที่ความถี่สูงซึ่งได้บนรูปคลื่นแรงดัน ความต้านทาน R_d จะทำหน้าที่หน่วงหรือลดการแกว่ง

ในวงจรวัดแรงดันสูงกระแสสลับ หรือกระแสตรงค่าความต้านทาน R_d ควรจะอยู่ในย่าน 0.1 ถึง 1 $M\Omega$ แต่ในวงจรวัดแรงดันอิมพัลส์ไม่ควรเกิน 500 Ω มิฉะนั้นจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานมากเกินไปในการวัดแรงดันอิมพัลส์ ความต้านทาน R_d ควรจะต้องมีค่าความเหนี่ยวนำน้อยที่สุด ($\leq 30 \mu H$)

การหาค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดัน (Scale factor) ของอุปกรณ์วัดทำโดยการเขียนเส้นกราฟแบ่งเทียบ V_H หลังจากแก้ค่าสู่สภาวะห้องเทียบกับ V_L ตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เส้นกราฟแบ่งเทียบมาตรฐาน

เมื่อ V_L คือ แรงดันด้านแรงต่ำ

V_H คือ แรงดันสูงที่ใช้ทดสอบ

ค่าแรงดันที่วัดด้วยสปาร์กแกปทรงกลม จะมีความถูกต้องตามเกณฑ์ดังกล่าว เมื่อระยะช่องว่าง d ไม่เกินครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลาง D คือ $d < D/2$ ฉะนั้นการเลือกขนาดทรงกลมจึงขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่ต้องการวัดทรงกลมแต่ละขนาดวัดแรงดันได้สูงสุดดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดแกปทรงกลม ระยะช่องว่างแกป และแรงดันสูงสุดที่วัดได้

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D ตามมาตรฐาน (cm)	ระยะช่องว่างแกป d ห่างไม่เกิน (cm)	วัดแรงดันให้สูงสุด (kV)
2	1	30.7
5	2.4	65.5
6.25	3	79.5
10	5	123
12.5	6	146
15	7.5	177
25	12	275
50	25	515
75	36	750
100	50	1010
150	75	1440
200	100	1840

2.2 ฉนวนก๊าซ

ฉนวนก๊าซ มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยใช้เป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าก็ใช้อากาศคั่นระหว่างสายตัวนำ โดยที่อากาศเป็นฉนวนที่ดี และมีราคาถูก ในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเช่นหม้อแปลง สายอันเดอร์กราวด์เคเบิล หรือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็ยังนิยมใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน หม้อแปลงบางประเภทก็ยังมีการใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นฉนวนร่วมกับน้ำมันหม้อแปลงอีกด้วย [2]

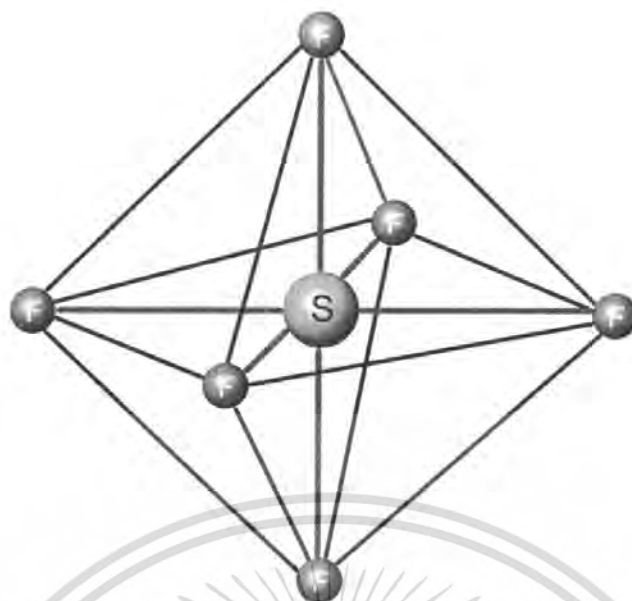
2.2.1 ก๊าซ SF₆

SF₆ เป็นฉนวนประเภทฉนวนก๊าซ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อเทคโนโลยีในการฉนวน เพราะมีคุณสมบัติการฉนวนทางไฟฟ้าอย่างดี ทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่ความดันค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับฉนวนก๊าซชนิดอื่นๆ มีเสถียรภาพมั่นคงต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี

2.2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF₆

โครงสร้างทางเคมีของก๊าซ SF₆ ประกอบด้วย โมเลกุลของกำมะถันและฟลูออรีน ดังรูป 2.11 เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟและไม่ช่วยให้ไฟติด เป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น และจะคงสภาพเดิมแม้ว่าจะถูกทำให้ร้อนถึง 500°C คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF₆ สรุปได้ดังตารางที่ 2.2

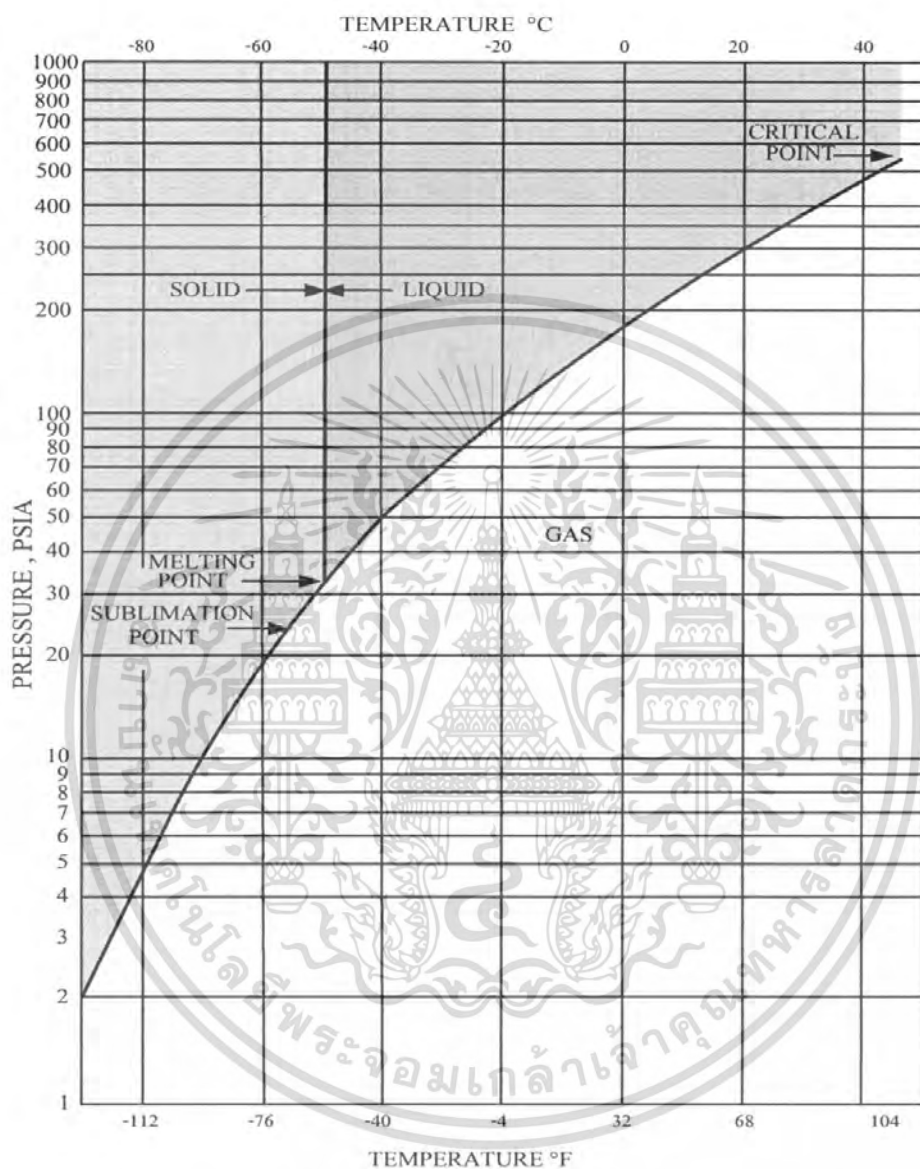
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.11 โมเลกุลของ SF₆ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของ SF₆

น้ำหนักโมเลกุล	146.06
จุดหลอมที่ 2.29 atm	-50.8 °c
อุณหภูมิของจุด Sublimation ที่ 1 atm	-69.9 °c
อุณหภูมิวิกฤติ	45.6 °c
ความดันวิกฤติ	36.75 atm
ความหนาแน่นวิกฤติ	0.73 กิโลกรัมต่อลิตร
ความหนาแน่นไอที่ 20 °c	6.16 กรัมต่อลิตร
ความหนาแน่นของ ของเหลวที่ 0 °c	1.56 กิโลกรัมต่อลิตร
ความดันไอที่ 20 °c	20.74 atm
สภาพนำความร้อนที่ 25 °c	7.1×10^{-5} cal/cm ² /c/sec
ค่าไดอิเล็กตริกคงตัวที่ 27.5 °c	1.00191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

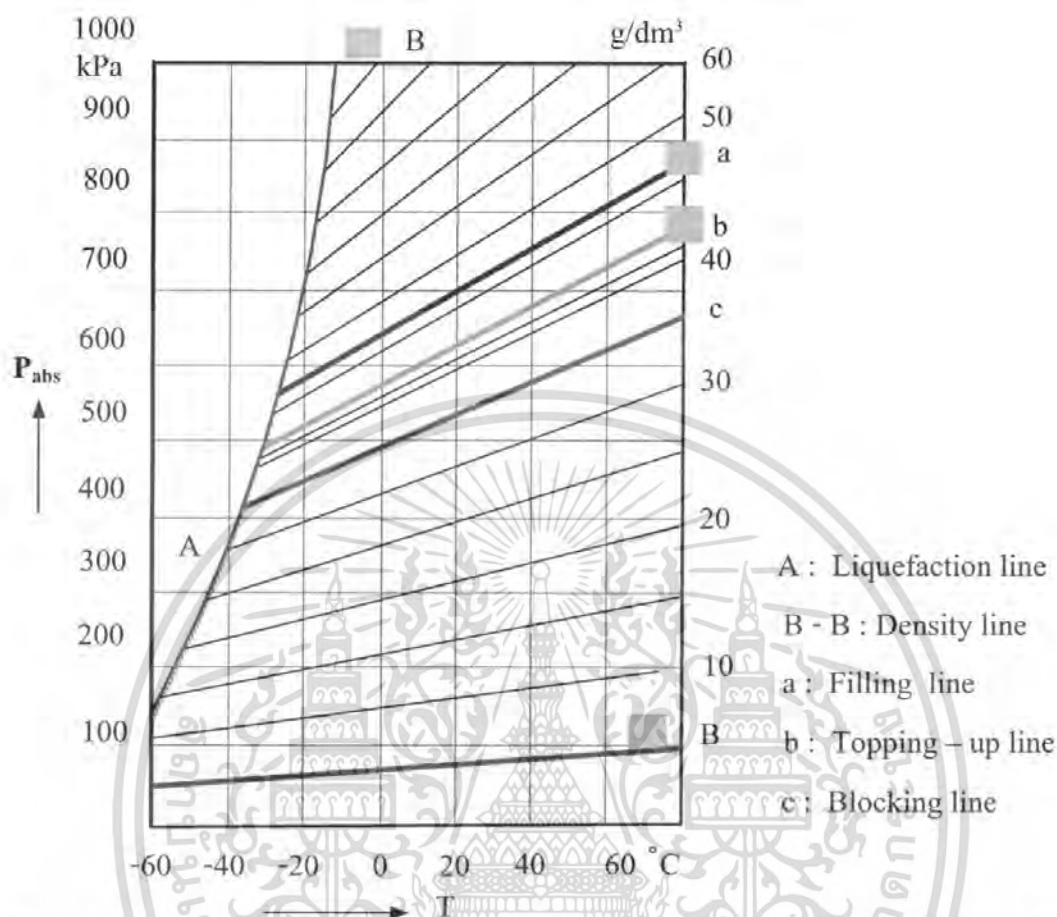
SF₆ จะอยู่ในสถานะของแข็ง, ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิของ SF₆ ดังแสดงรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สถานะ SF₆ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งาน SF_6 ในทางฉนวนจะใช้งาน SF_6 ในสถานะก๊าซดังรูป 2.13

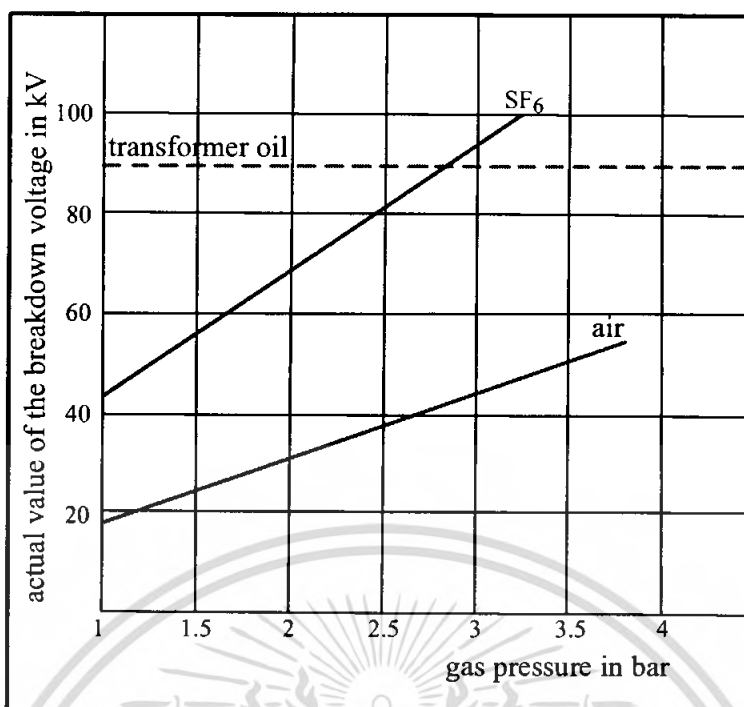


รูปที่ 2.13 ไดอะแกรมความดัน – อุณหภูมิของ SF_6 พร้อมกับเส้นความหนาแน่น (g / dm^3) โดยเส้น a เป็นเส้นที่ใช้เป็นข้อกำหนดในการเติม SF_6 ให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เมื่อก๊าซมีการรั่วออกไปจากระบบการฉนวน ก๊าซ SF_6 จะต้องมีความหนาแน่นเหนือเส้น b และอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับระบบการฉนวนดังกล่าว จะต้องทำงานเมื่อระบบการฉนวนอยู่ภายใต้เส้น c

2.2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF_6

ก๊าซ SF_6 มีความหนาแน่นหนักประมาณ 5 เท่าของอากาศ ซึ่งนับว่าเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักมากที่สุดในบรรดาก๊าซที่รู้จักกันในปัจจุบัน จึงทำให้ก๊าซ SF_6 มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซอื่นๆ ที่ใช้เป็นฉนวนกัน เช่น อากาศ ไนโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ก๊าซ SF_6 จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2.5 เท่าของอากาศและจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้เท่าๆ กับน้ำมันหม้อแปลงเมื่อ SF_6 มีความดันอัดประมาณ 3 bar (1bar = 750 mmHg) ดังเส้นกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 2.14

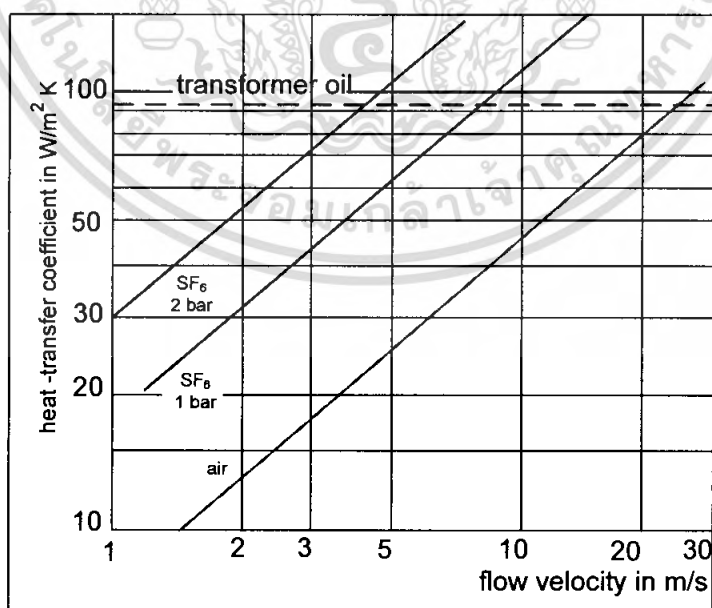
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเบรกดาวน์กับความดันของน้ำมันหม้อแปลง อากาศ และ SF₆

2.2.1.3 คุณสมบัติการระบายความร้อนของก๊าซ SF₆

SF₆ จะมีคุณสมบัติระบายความร้อนได้ดีกว่าอากาศแต่ได้เพียงครึ่งหนึ่งของน้ำมันหม้อแปลงดังแสดงในรูป 2.15



รูปที่ 2.15 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศและ SF₆ เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลง

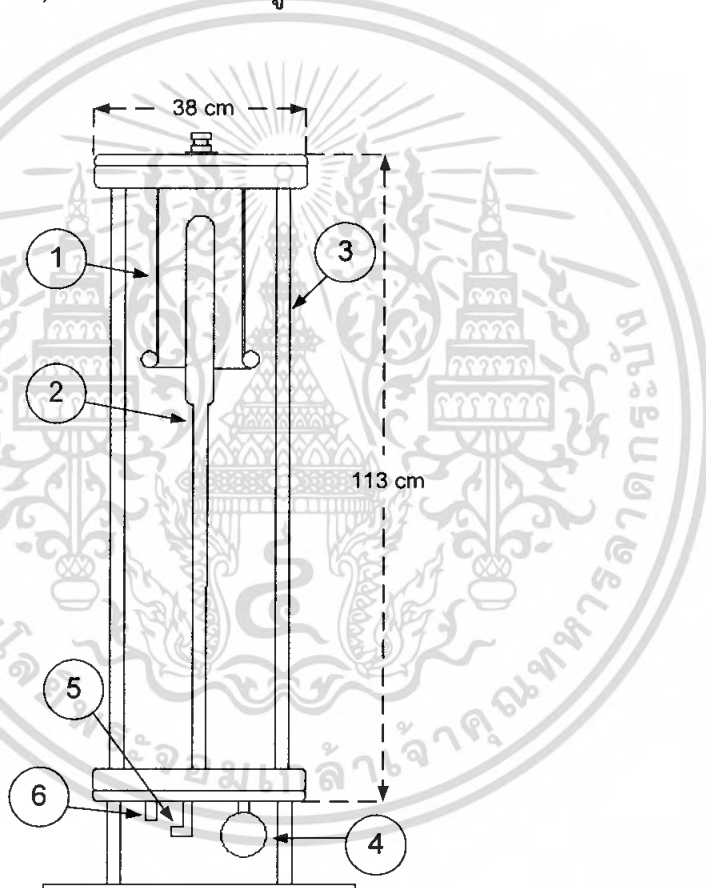
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องมือวัดแรงดันกระแสสลับ

3.1 การออกแบบตัวเก็บประจุอัดก๊าซ

ตัวเก็บประจุแรงดันสูงลักษณะดังกล่าวนี้ ได้จากสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกัน (Coaxial cylinder configuration) อัดก๊าซฉนวน (SF_6) ที่ความดัน 3 bar ซึ่งทำให้ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กแต่ทนแรงดันได้สูง ตัวเก็บประจุประเภทนี้จะไม่ผลต่อระบบวัดแรงดันจากค่าเก็บประจุ stray (Stray capacitance) โดยทั่วไปแล้วใช้เป็นตัวเก็บประจุมาตรฐาน (Standard capacitor) มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.1

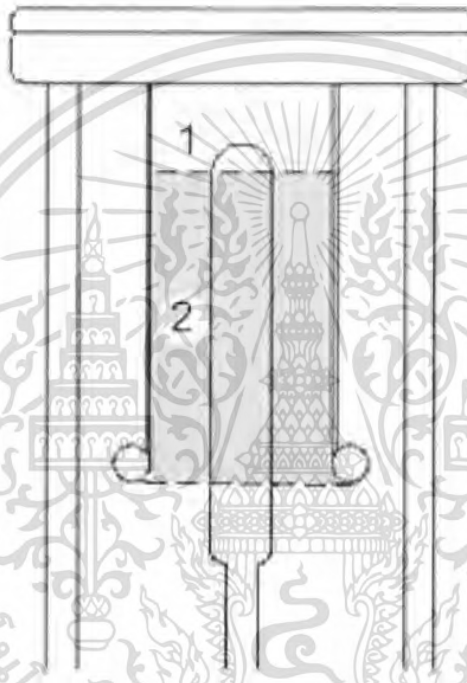


รูปที่ 3.1 ตัวเก็บประจุอัดก๊าซ

- 1) อิเล็กโทรดแรงสูง
- 2) อิเล็กโทรดวัดแรงดัน
- 3) ท่อฉนวน
- 4) มาตรฐานวัดความดัน
- 5) ขั้วต่อสายเคเบิล
- 6) วาล์วอัด-ดูดก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวเก็บประจุอัดก๊าซนี้ทำตามข้อกำหนดในมาตรฐาน อีเล็กโทรดด้านแรงดันสูงทำจากโลหะเป็นรูปทรงกระบอกสูง 34.8 cm ขนาดรัศมี 7.3 cm สวมทับกับอีเล็กโทรดทรงกระบอกภายในด้านกราวด์มีขนาดรัศมี 2.54 cm ทั้งหมดบรรจุภายในท่อฉนวน PVC ซึ่งแรงดันสูงสุดที่สามารถทำการลัดทอน 200 kV และจากค่าแรงดันเบรกดาวน์ตามผิว 2 kV/cm จึงได้ระยะท่อสูง 113 cm ภายในฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ ที่ความดัน 3 bar ซึ่งสามารถทนระดับแรงดัน 200 kV_{rms} (283 V_p) โดยไม่เกิดโคโรนาระหว่างอีเล็กโทรด การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าแยกเป็น 2 ส่วนตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การแบ่งลักษณะของการคำนวณ

ส่วนที่ 1 พิจารณาลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมซ้อนกันแนบร่วม ซึ่งทำการคำนวณดังสมการที่ 3-1 ซึ่งมีรัศมีภายใน 2.54 cm และรัศมีภายนอก 7.3 cm ได้ค่าความเก็บประจุ 2.17 pF

$$c_{11} = \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi\epsilon r_1 r_2}{r_2 - r_1} \right) \quad (3-1)$$

ส่วนที่ 2 พิจารณาเป็นทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วมยาว 27.5 ซม.รัศมีภายใน 2.54 cm รัศมีภายนอก 7.3 cm ซึ่งคำนวณดังสมการที่ 3-2 ได้ค่าความเก็บประจุ 14.48 pF

$$c_{12} = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3-2)$$

ดังนั้นได้ค่าความเก็บประจรรวมประมาณ 17 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

ส่วนที่ 1

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \left[1 - \frac{r_1}{r_2} \right]}$$

$$= 132 \text{ kV/cm}$$

ส่วนที่ 2

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \left[\ln \frac{r_2}{r_1} \right]}$$

$$= 82.04 \text{ kV/cm}$$

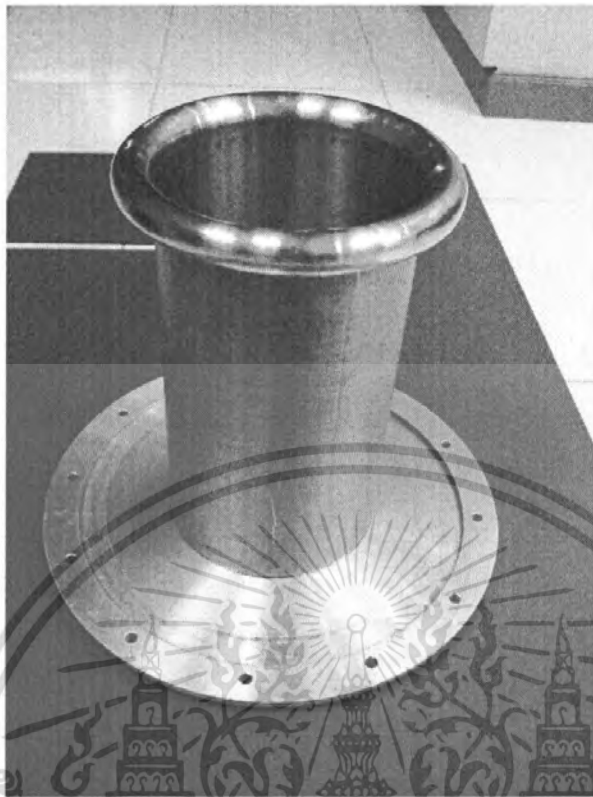
ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าที่ SF₆ 3 bar สามารถทนได้ 267 kV/cm

3.2 ส่วนประกอบของตัวเก็บประจุอัดก๊าซ

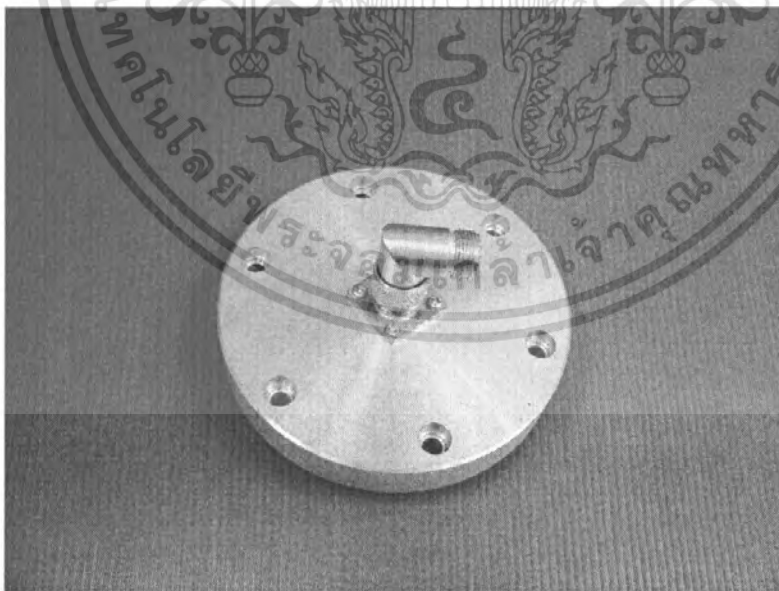


รูปที่ 3.3 แท่งอิเล็กโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

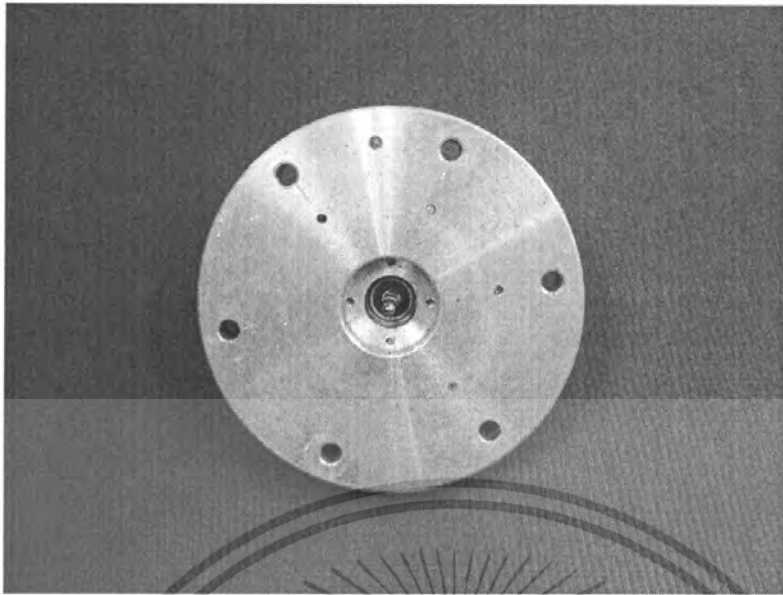


รูปที่ 3.4 ฝาครอบแท่งอิเล็กทรอนิกส์



(ก) ด้านนอกของฝาปิดด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

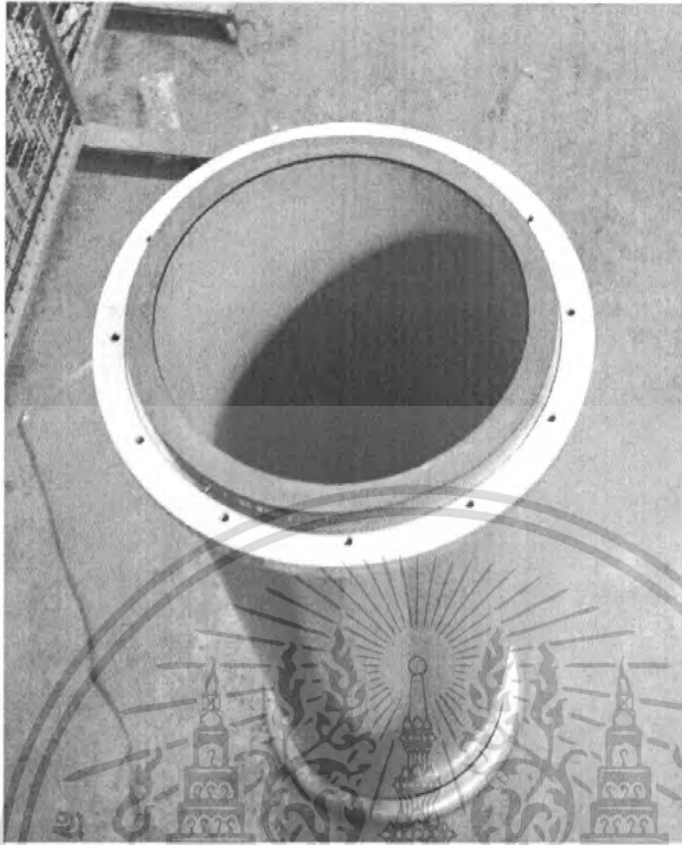


(ข) ด้านในของฝาปิดด้านล่าง
รูปที่ 3.5 ฝาปิดฐาน



รูปที่ 3.6 ลักษณะของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดฝาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



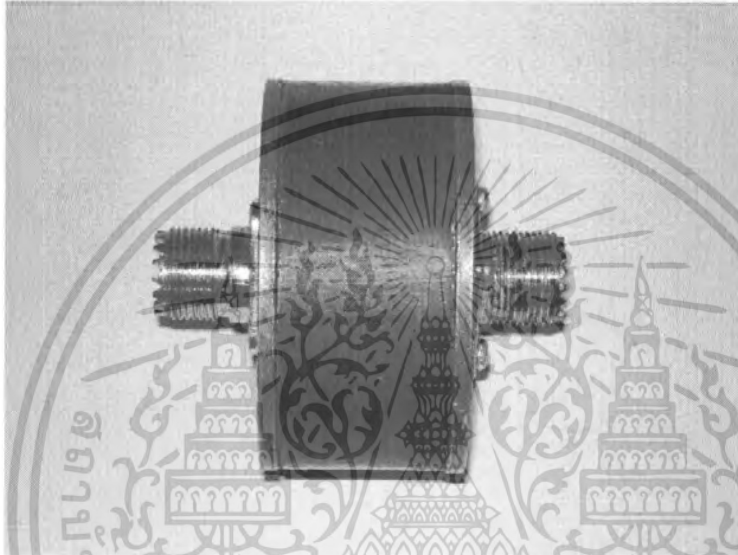
รูปที่ 3.7 ท่อ PVC



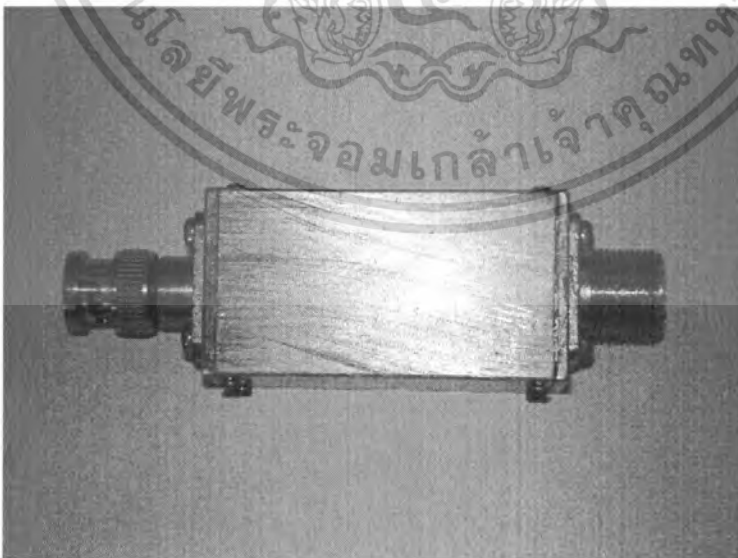
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.8 ตัวเก็บประจุตก๊าซที่ประกอบสร้างเสร็จแล้ว
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบระบบวัดแรงดันด้วยวิธีโวลเตจดิไวเดอร์

การออกแบบสร้างระบบวัดแรงดันด้วยวิธีโวลเตจดิไวเดอร์กำหนดให้ตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำมีค่า 25.5 nF ใช้เป็นตัวเก็บประจุสำหรับแบ่งแรงดันต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุอัดก๊าซ และได้ทำให้ค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันประมาณ $1500:1$ ส่วนในการวัดแรงดันอิมพัลส์จะต้องมีตัวลดทอนแรงดันต่อ (Attenuation) เพื่อลดระดับแรงดันให้น้อยลงอีกครั้งก่อนเข้าอุปกรณ์เครื่องมือวัดซึ่งกำหนดอัตราส่วนลดระดับแรงดันประมาณ $16:1$ ดังรูปที่ 3.9 ถึง รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ



รูปที่ 3.10 ตัวลดทอนแรงดันใช้สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบระบบวัดแรงดันด้วยวิธีชั้บโพเทสคิว

การออกแบบระบบวัดด้วยวิธีชั้บโพเทสคิว เพื่อต้องการทราบค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ โดยวงจรที่สามารถอ่านค่ากระแสตรงเลยนั้นไม่ได้ เพราะกระแสที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อย แอมป์มิเตอร์ไม่สามารถอ่านค่าได้ ดังนั้นจึงทำการออกแบบวงจรที่วัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่ทราบค่าแน่นอนโดยสามารถอ่านค่ากระแสได้ทั้งด้านบวกและลบดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรการวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับ

- V คือ แรงดันสูงขาเข้า
- C คือ ตัวเก็บประจุแรงสูง
- OP คือ อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน
- D คือ ไดโอดสำหรับเรกติฟายเออร์
- R คือ ตัวต้านทาน
- V_R คือ แรงดันตกคร่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดค่าแรงดันสูงสุดคือ $200 \text{ kV}_{\text{rms}}$ (283 kV_p) ดังนั้นจึงทราบค่ายอดของกระแสได้จากสมการที่ 3-3

$$I_p = \omega CV_p \quad (3-3)$$

นอกจากนี้ยังทำการติดตั้งตัวป้องกันแรงดันเกินขนาด 230 V_p เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เกิดการเสียหาย ดังนั้นจึงได้ค่าความต้านทานเป็น $150 \text{ k}\Omega$ จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน ลักษณะวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.11 และลักษณะการสร้างของอุปกรณ์วัดภาคแรงดันต่ำและซับและโพเทสคิวดังแสดงในรูปที่ 3.12



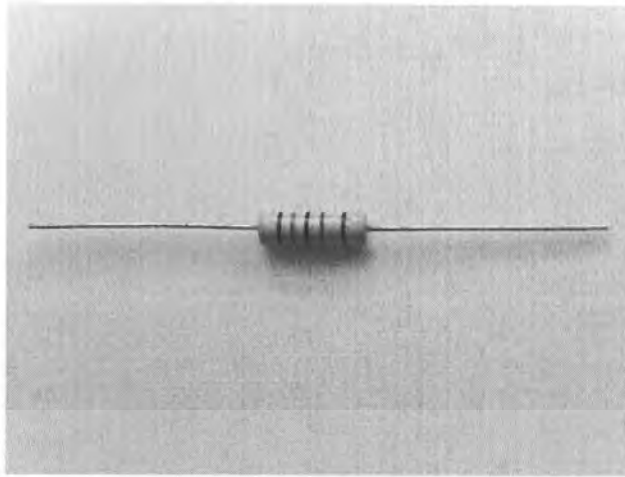
รูปที่ 3.12 ซับโพเทสคิว

3.5 ส่วนประกอบของภาคแรงดันต่ำของระบบวัดแรงดันกระแสสลับด้วยวิธีโวลเตจดีไวเดอร์และซับโพเทสคิว

3.5.1 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรซับและโพเทสคิวเป็นตัวต้านทานชนิดเมทัลฟิล์ม (Metal-Film Resistors) โครงสร้างของตัวต้านทานชนิดนี้ประกอบด้วยแกนทรงกระบอกเล็กๆ ทำจากเซรามิกเคลือบผิวเซรามิกด้วยโลหะบางๆ พวกนี้เกล็ดหรือโครเมียม โดยเคลือบในสุญญากาศ การเคลือบบนแกนเซรามิกเป็นแบบพันรอบแกนแบบต่อเนื่องจากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง และมีโลหะเคลือบปลายทั้งสองต่อออกมาเป็นขาตัวต้านทาน ลักษณะตัวต้านทานชนิดเมทัลฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

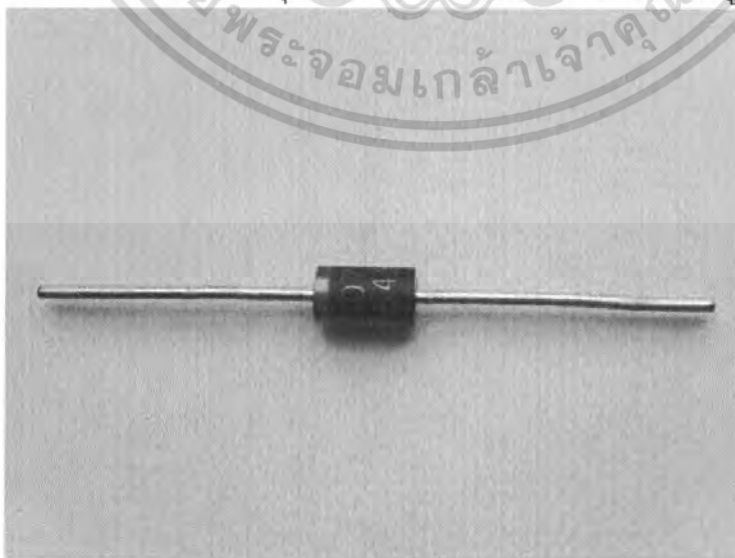


รูปที่ 3.13 ตัวต้านทาน

ข้อดีของตัวต้านทานชนิดนี้คือมีค่าความต้านทานผิดพลาดต่ำกว่า $\pm 1\%$ จนถึง $\pm 0.001\%$ เพราะใช้แสงเลเซอร์เจาะตัดเอาโลหะส่วนเกินออก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำ ($0.001\%/^{\circ}\text{C}$) มีการรบกวนของสัญญาณต่ำกว่าพิกัดกำลัง 0.1 - 1W อยู่ในย่านการทำงานที่ 0.1Ω -1.5M Ω ความคลาดเคลื่อน 0.1-2% แต่มีราคาแพงมาก [3]

3.5.2 ไดโอดเรียงกระแส (Diode)

ไดโอดที่ใช้จะเป็นชนิดฟื้นตัวเร็ว (Fast – Recovery Diode หรือ High – Speed Diode) มักจะใช้ในวงจรสวิตซ์ซึ่ง ความถี่สูงสำหรับวงจรแปลงผันกำลัง และใช้คู่กับสวิตซ์แบบควบคุมได้ที่ต้องการเวลาฟื้นตัวย้อนกลับน้อย ๆ ไดโอดกำลังขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้า 6,000 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 1,100 แอมป์ จะมีความเร็วฟื้นตัวย้อนกลับประมาณ 0.1-5 ไมโครวินาที ซึ่งจะใช้เป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของกระแส แสดงดังรูปที่ 3.14 [4]



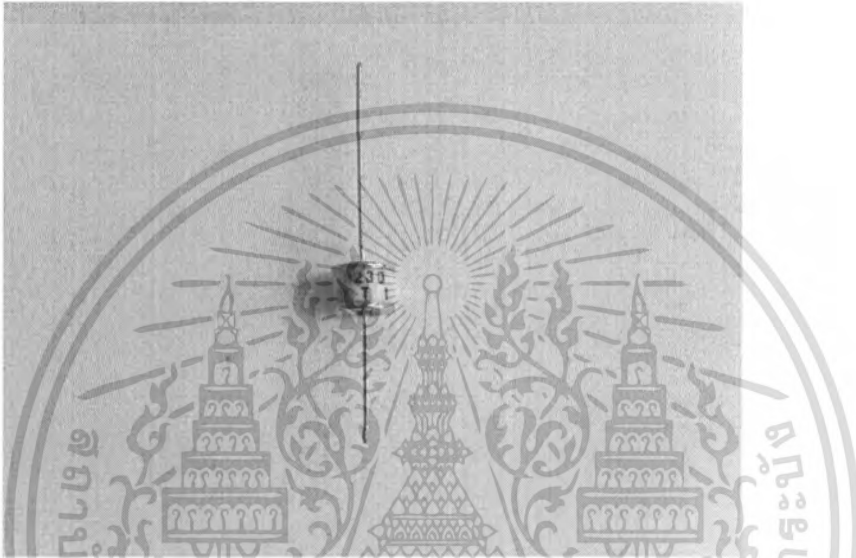
รูปที่ 3.14 ไดโอดเรียงกระแสชนิดฟื้นตัวเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 สปาร์กแก๊ป

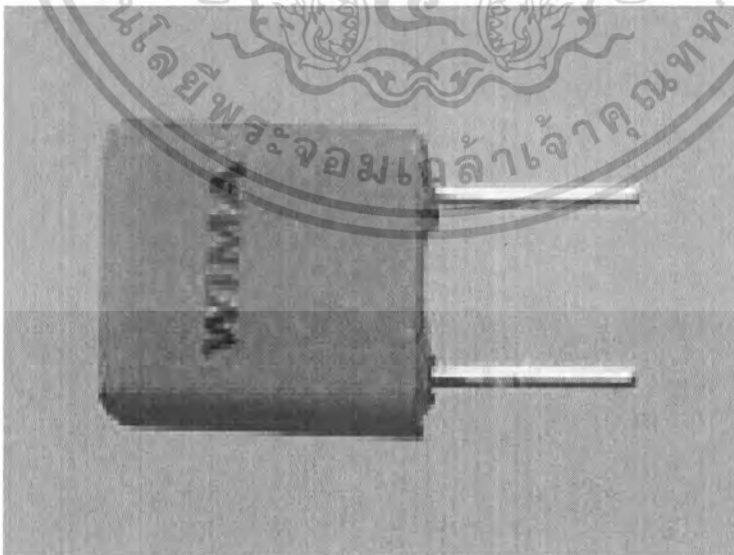
ใช้สำหรับป้องกันแรงดันเกินที่ตกคร่อมโวลต์มิเตอร์โดยมีข้อดีและข้อเสียดังนี้

- ข้อดี
1. ไม่สะสมพลังงานเอาไว้แต่จะส่งพลังงานลงสู่กราวด์
 2. V-I Curve สมมาตรทั้งขั้วบวกและลบ
- ข้อเสีย
1. เวลาตอบสนองช้า
 2. มีปัญหาของกระแสไฟฟ้าตามมา
 3. แรงดันขาออกไม่เรียบ มีการแกว่ง



รูปที่ 3.15 สปาร์กแก๊ป

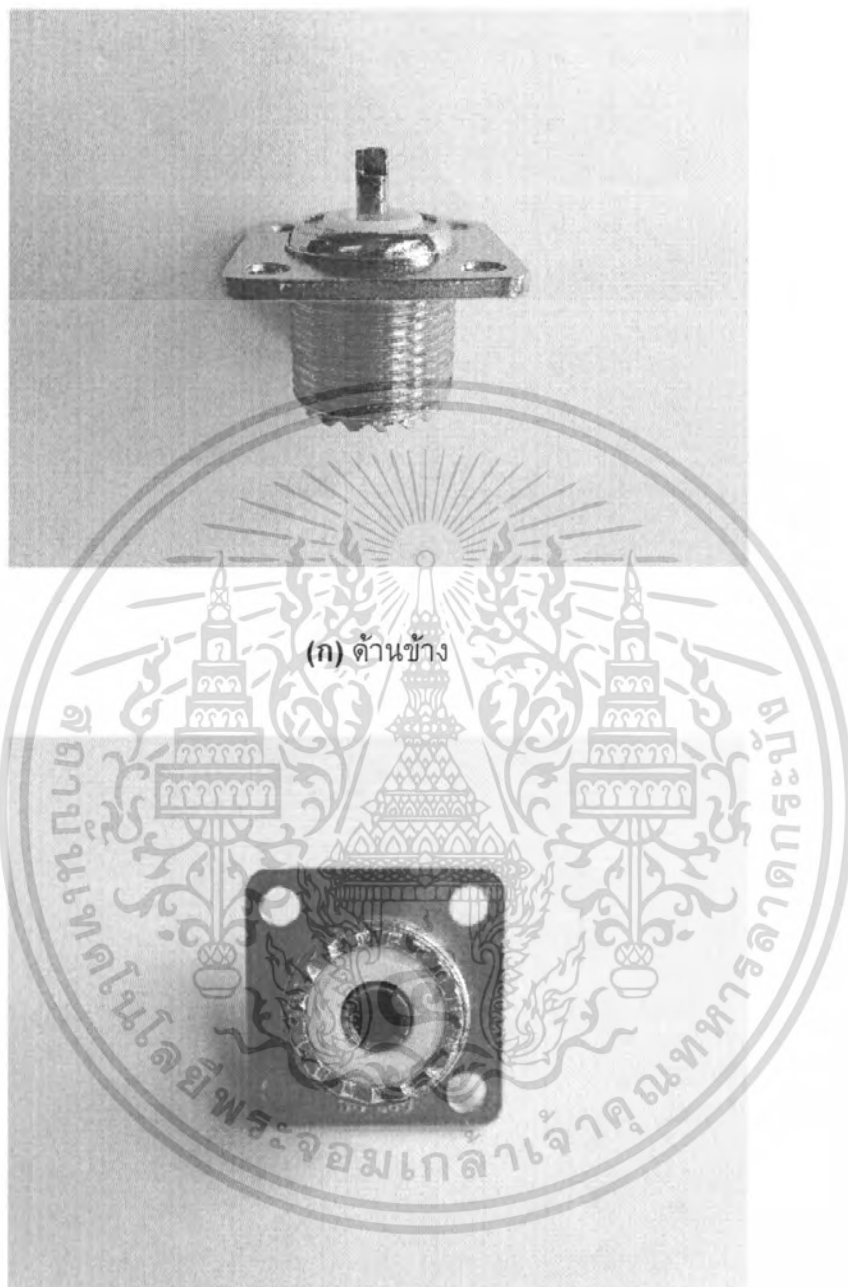
3.5.5 ตัวเก็บประจุชนิด Polypropylene



รูปที่ 3.16 ตัวเก็บประจุชนิด Polypropylene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.6 หัวต่อสายเคเบิล(หัวUHF)

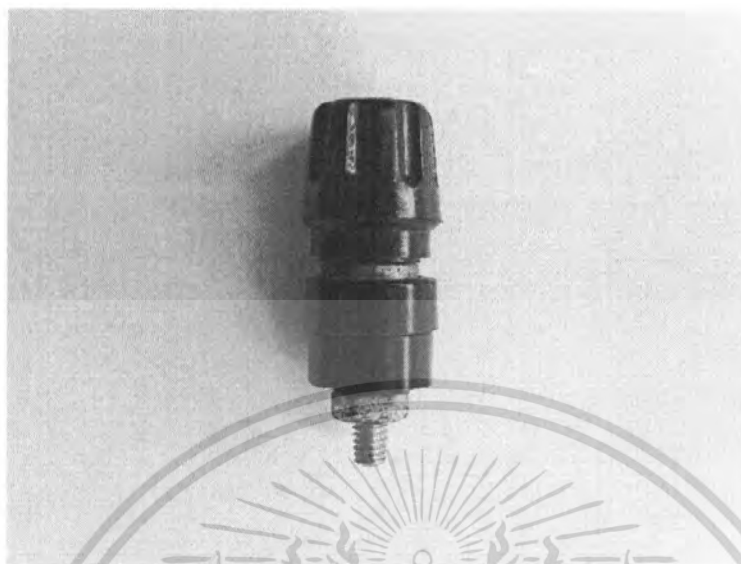


(ข) ด้านหน้า

รูปที่ 3.17 หัวต่อสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.7 หัวต่อเครื่องมือวัด (หัวBanana)



รูปที่ 3.18 หัวต่อเครื่องมือวัด

3.5.8 หัวต่อเครื่องมือวัดของโวลเตจดีไวเดอร์



รูปที่ 3.19 หัวต่อเครื่องมือวัดของโวลเตจดีไวเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.9 กล่องโลหะ

กล่องโลหะจะใช้ขนาด 2x4" กล่องโลหะจะมีคุณสมบัติคือ กราวด์ของวงจรจะถึงกันหมด



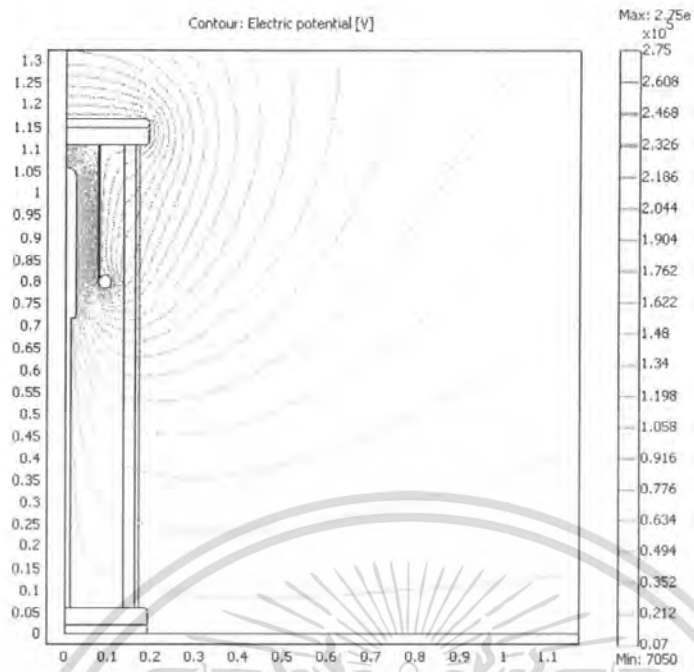
รูปที่ 3.20 กล่องโลหะ

3.6 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

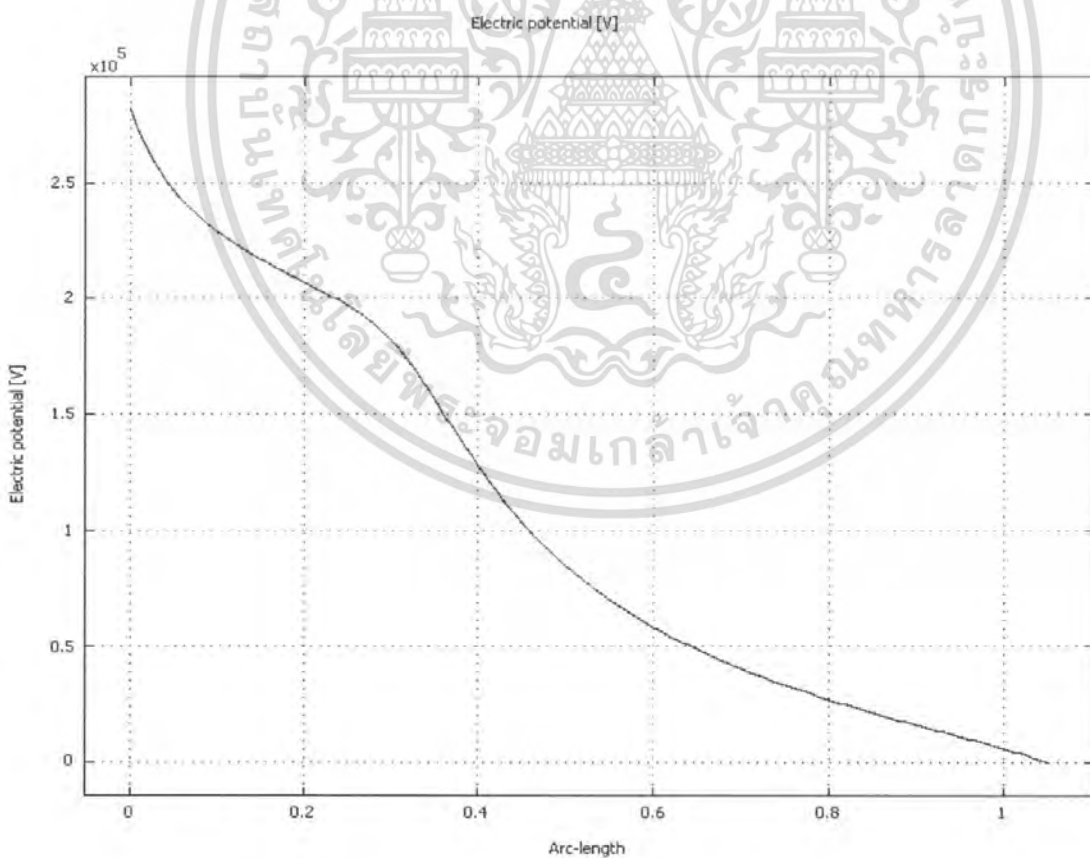
3.6.1 การทดสอบจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

การจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตัวเก็บประจุอัดก๊าซที่ได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณหาค่ากระจายของเส้นสมตักย์ การกระจายของแรงดันบริเวณผิวท่อ PVC ซึ่งใช้เป็นตัวห่อหุ้ม (housing) ของตัวเก็บประจุรวมทั้งความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด เมื่อทำการป้อนแรงดัน $200\text{kV}_{\text{rms}}$ (283 kV_p) ให้กับตัวเก็บประจุที่ออกแบบ ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงในรูปที่ 3.21 ถึง รูปที่ 3.24 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

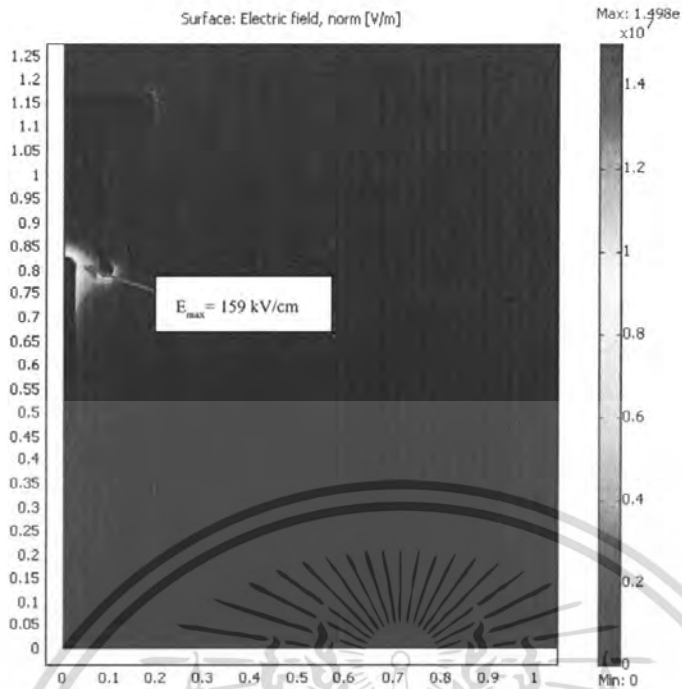


รูปที่ 3.21 การกระจายของเส้นสมศักย์ที่ระดับแรงดัน 200 kV_{rms}

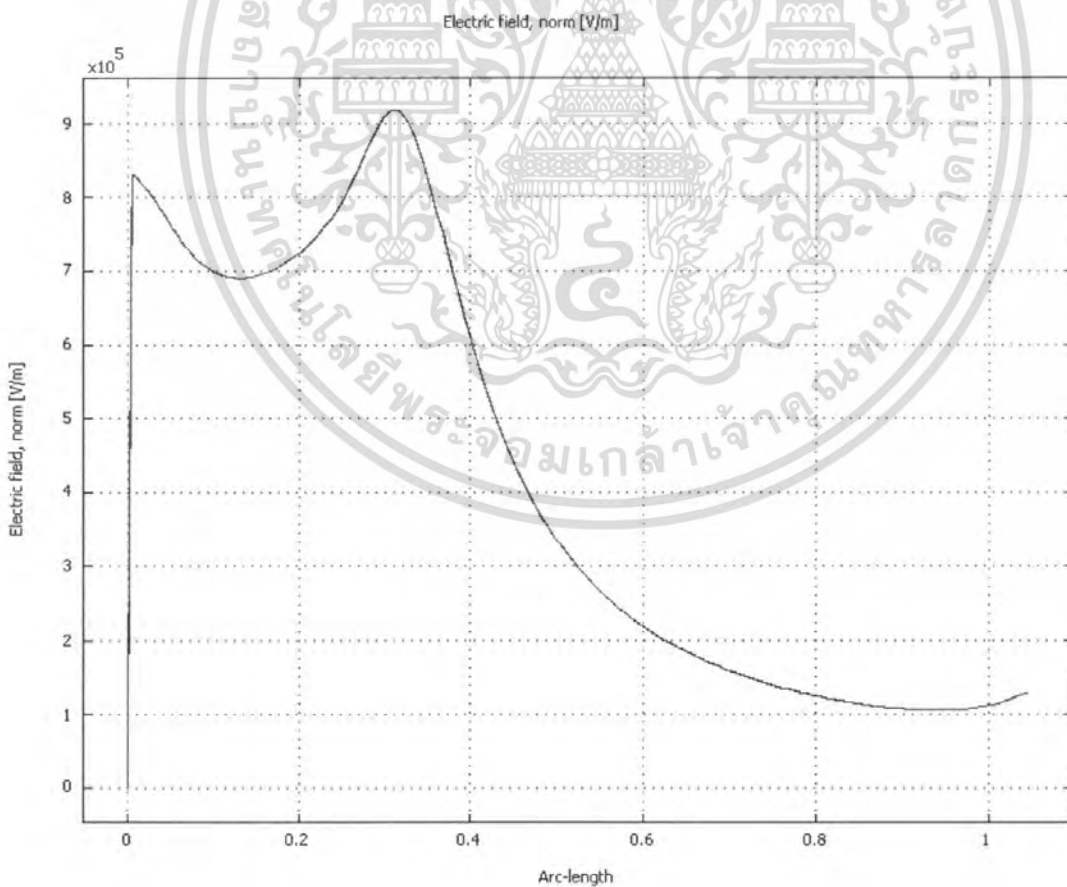


รูปที่ 3.22 การกระจายแรงดันบริเวณผิวฉนวนท่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ระดับแรงดัน 200 kV_{rms}



รูปที่ 3.24 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณผิวฉนวนท่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

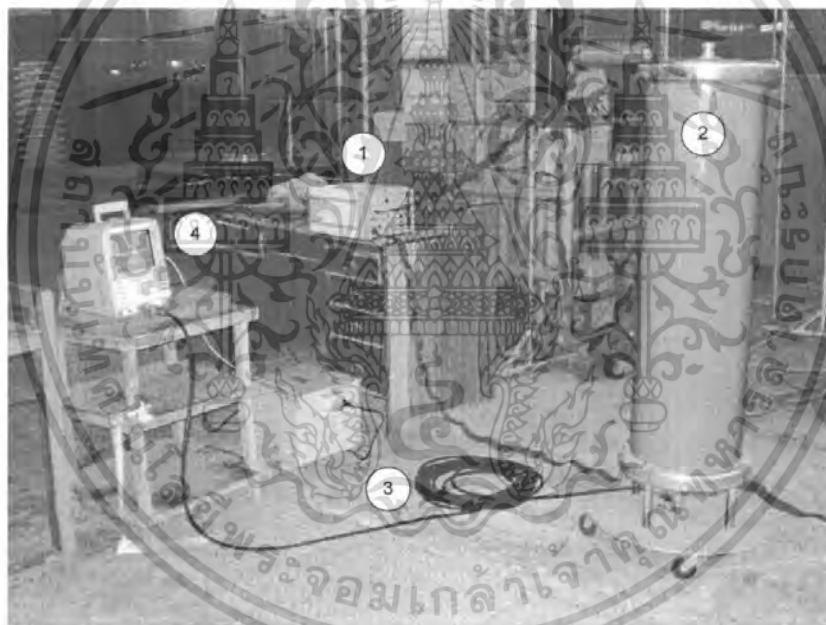
ผลการทดสอบและประเมินผล

4.1 การทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้ออกแบบสร้างเสร็จสิ้นแล้วจะต้องได้รับการทดสอบทางไฟฟ้าตามเกณฑ์ที่มาตรฐาน [6] กำหนดเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถวัดแรงดันสูงได้และมีความปลอดภัยในขณะใช้งาน ซึ่งในการทดสอบจะประกอบด้วยการทดสอบหาค่าสเกลแฟคเตอร์ คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น และการหาค่าประกอบของรูปคลื่นอิมพัลส์

4.1.1 การทดสอบผลตอบสนองรูปขั้น

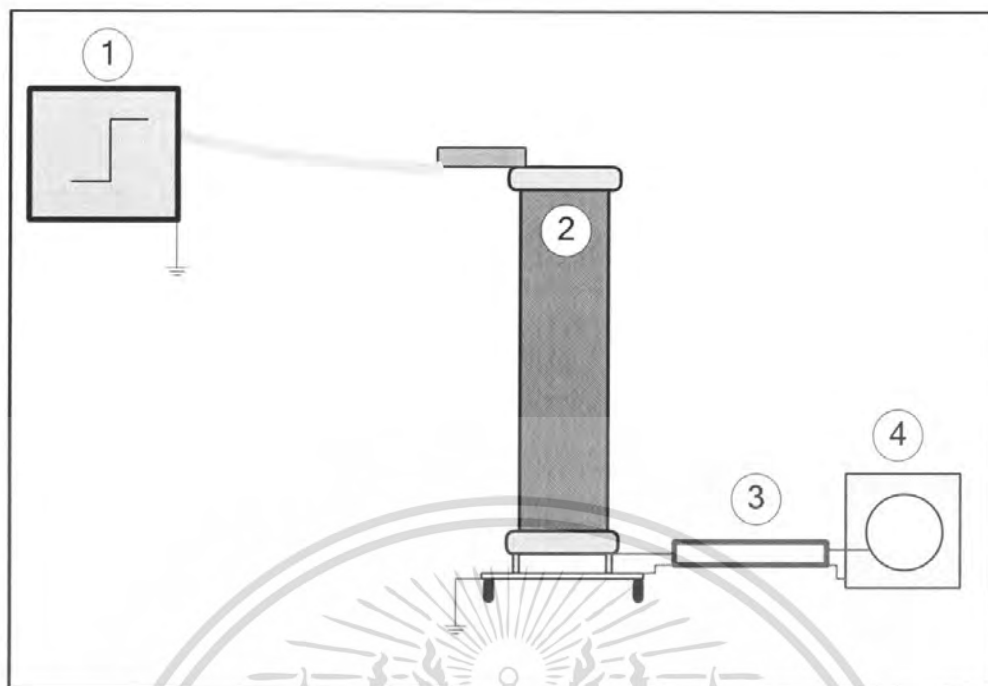
ผลตอบสนองรูปขั้นเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของโวลเตจดีไวเดอร์ที่จะบอกให้ทราบว่าจะนำไปใช้วัดแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆได้อย่างเหมาะสมหรือไม่



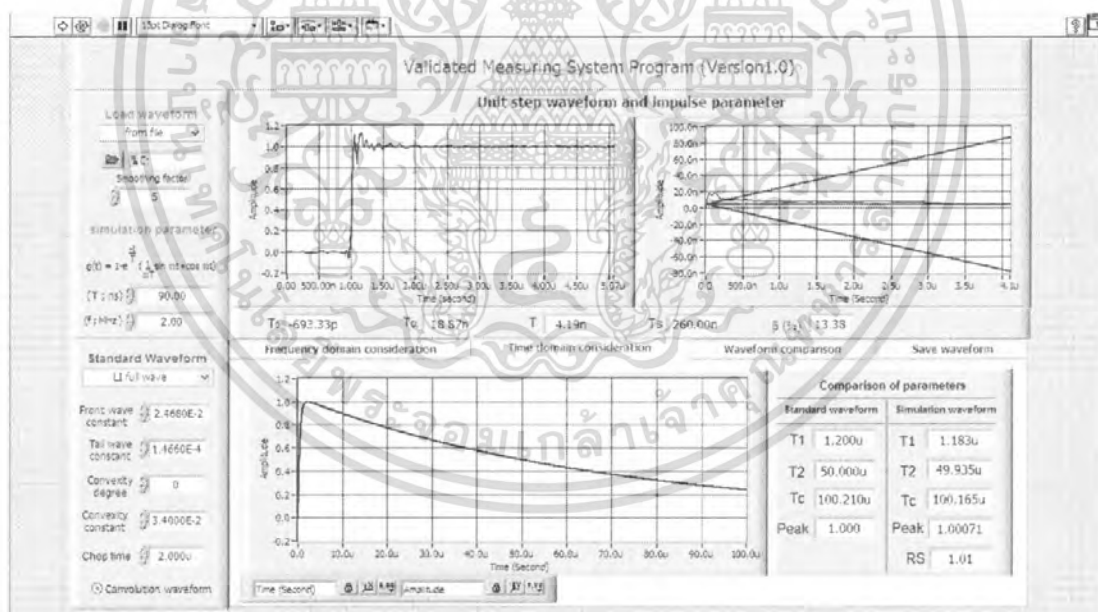
รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์

- โดย
- 1) เครื่องกำเนิดแรงดัน Unit Step
 - 2) โวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้าง
 - 3) สายเคเบิล
 - 4) ออสซิลอสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

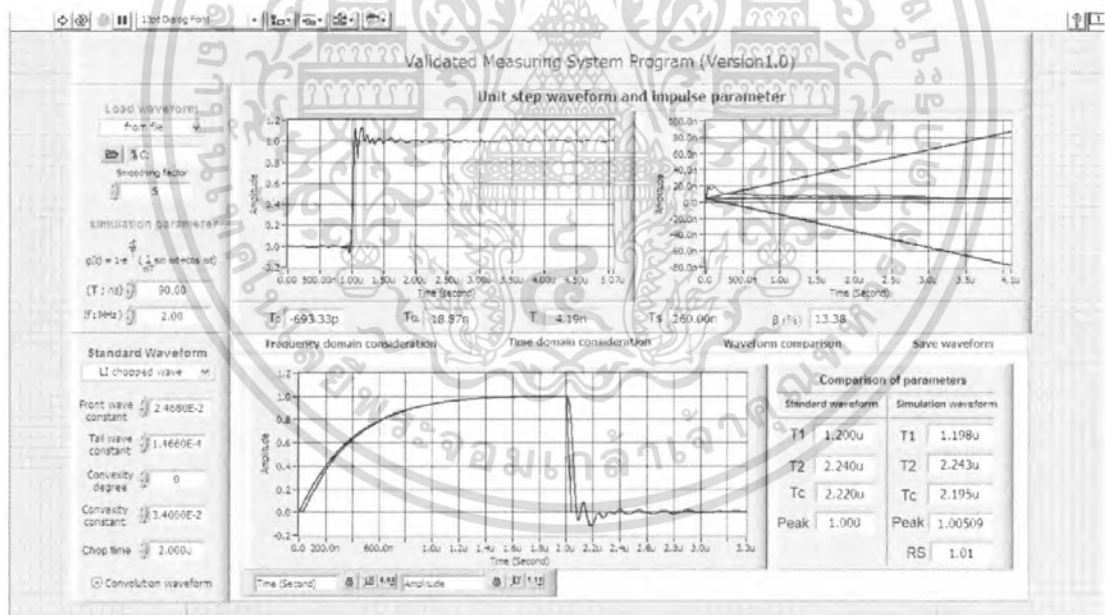
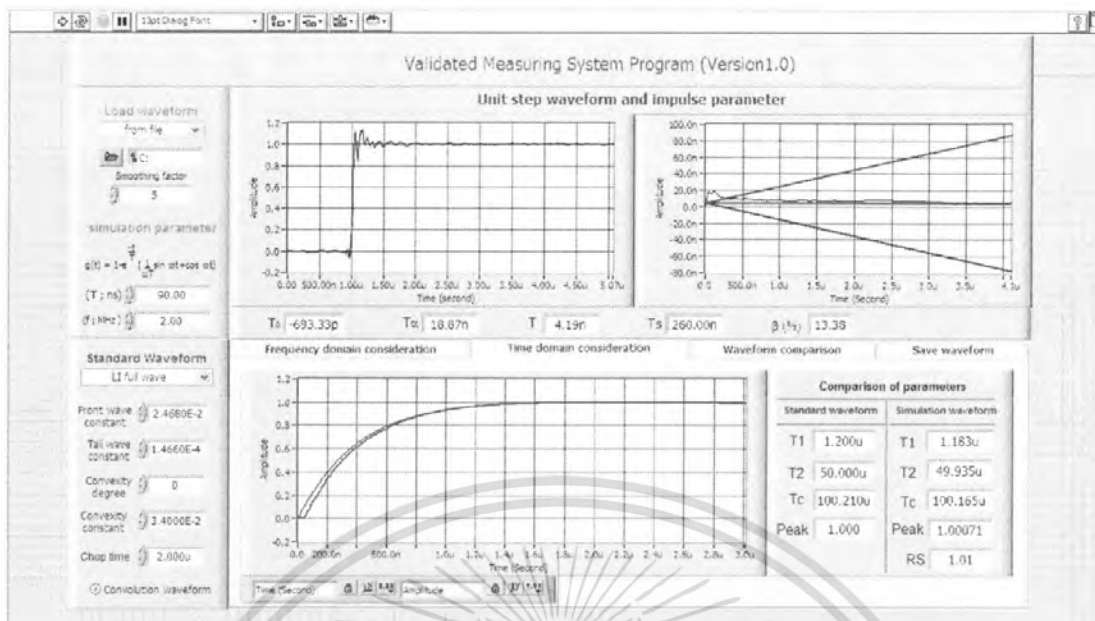


รูปที่ 4.2 วงจรสมมุติการทดสอบผลตอบสนองรูปขั้น



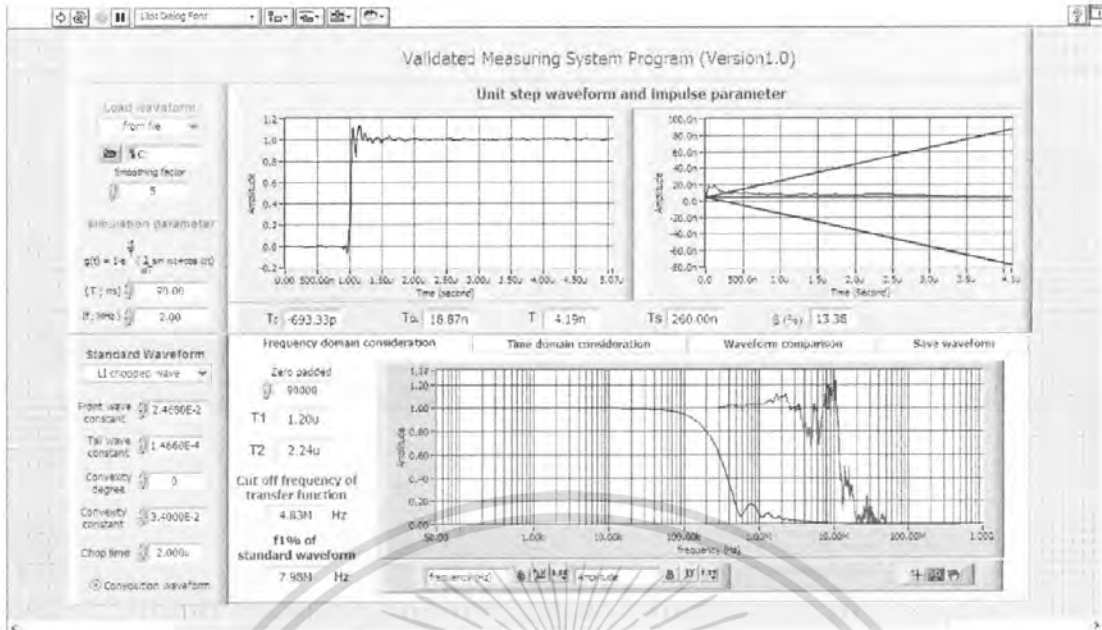
(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

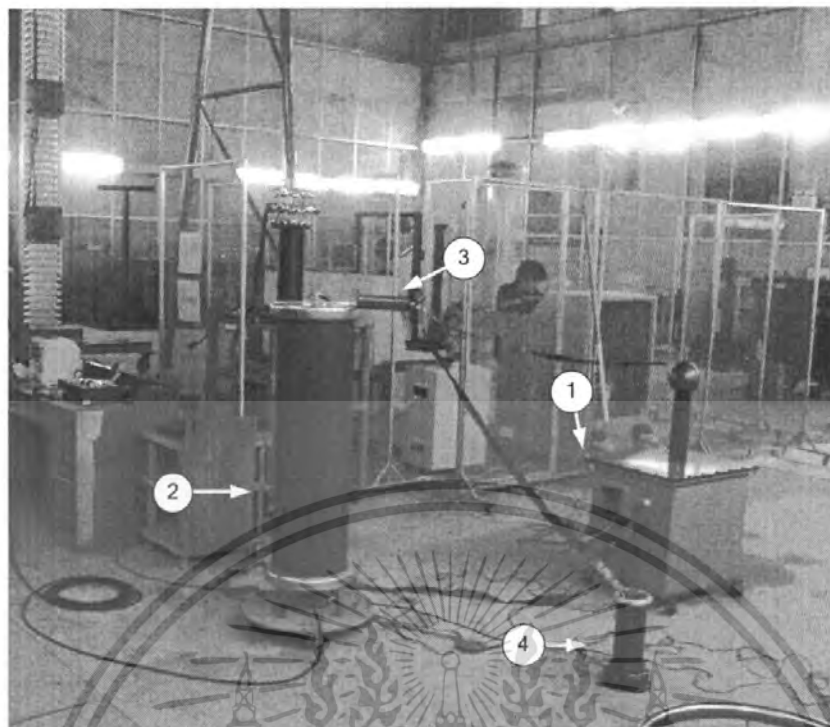
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบผลตอบสนองของรูปขั้นของระบบวัด

4.1.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันสูง กระแสสลับ

ในการทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ สามารถหาได้จากวิธีดังต่อไปนี้

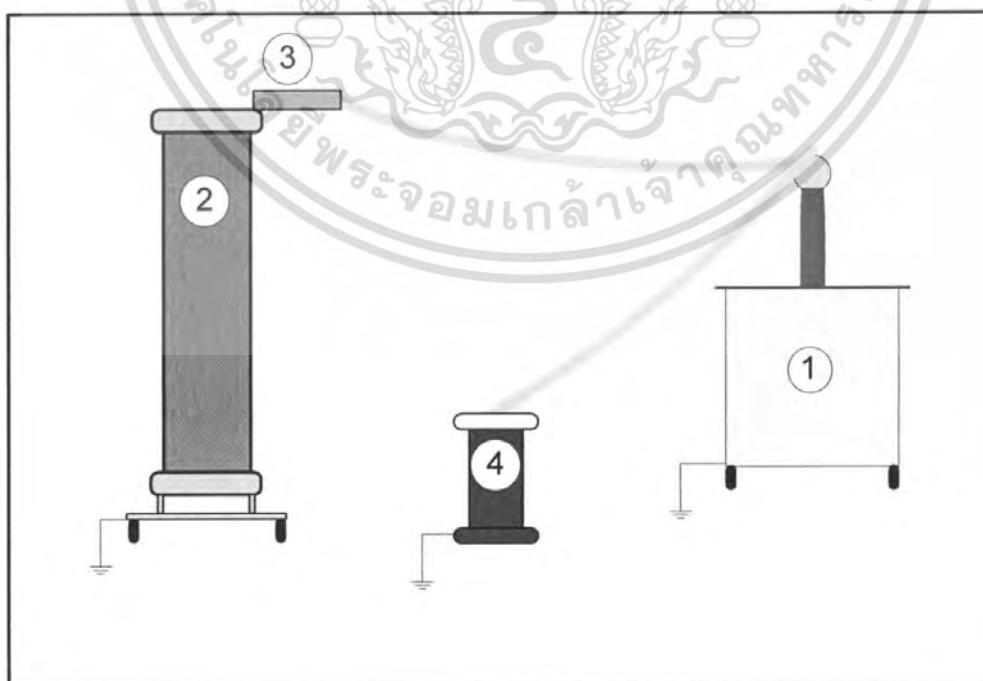
- 1) วัดแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกพร้อมกันเทียบกับอุปกรณ์อ้างอิง
- 2) ใช้วงจรบริดจ์
- 3) คำนวณจากอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

ซึ่งวิธีที่ได้เลือกใช้ในการหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันเป็นแบบการวัดแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกันเทียบกับอุปกรณ์อ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 4.4



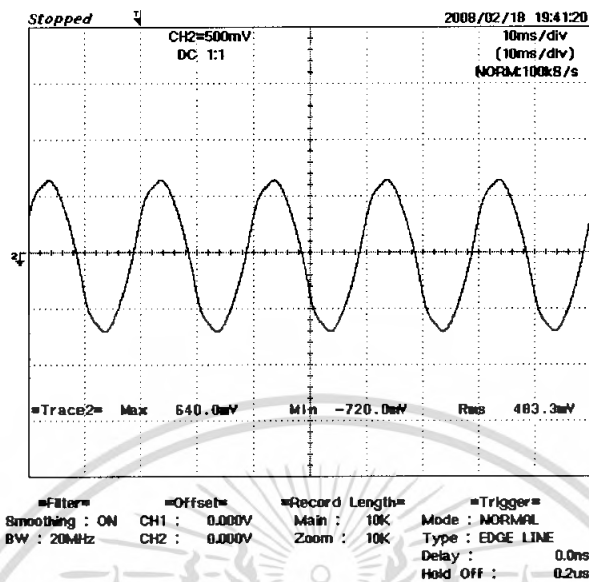
รูปที่ 4.4 วงจรการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ

- โดย
- 1) หม้อแปลงแรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV
 - 2) โวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้ออกแบบสร้าง
 - 3) ตัวต้านทานหน่วง
 - 4) โวลเตจดีไวเดอร์ของระบบอ้างอิง

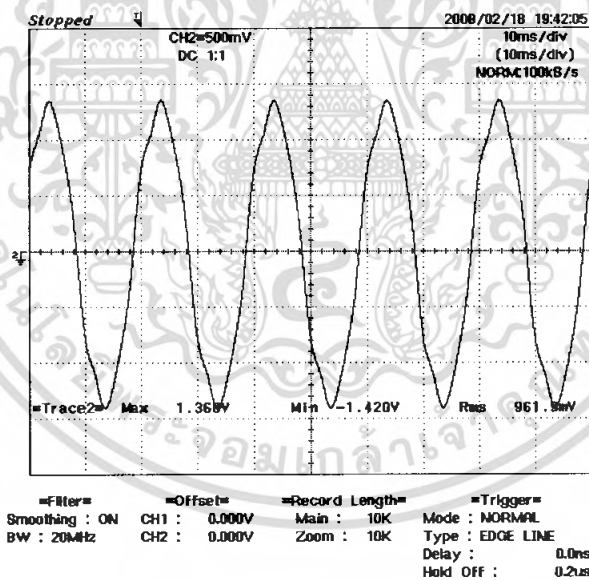


เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รูปที่ 4.5 วงจรสมมุติของการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.1 ผลการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันสูงกระแสลับ

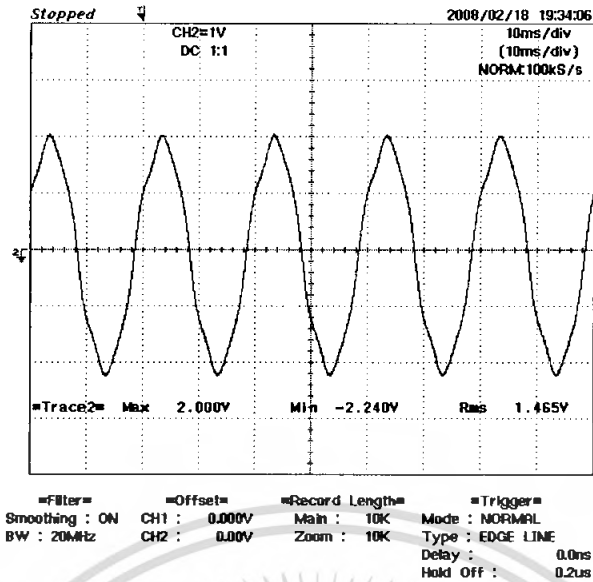


รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสลับที่ระดับแรงดัน 10 kV

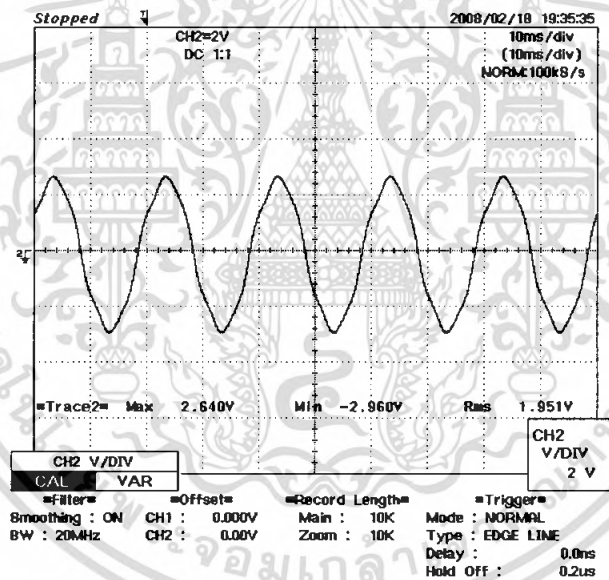


รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสลับที่ระดับแรงดัน 20 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

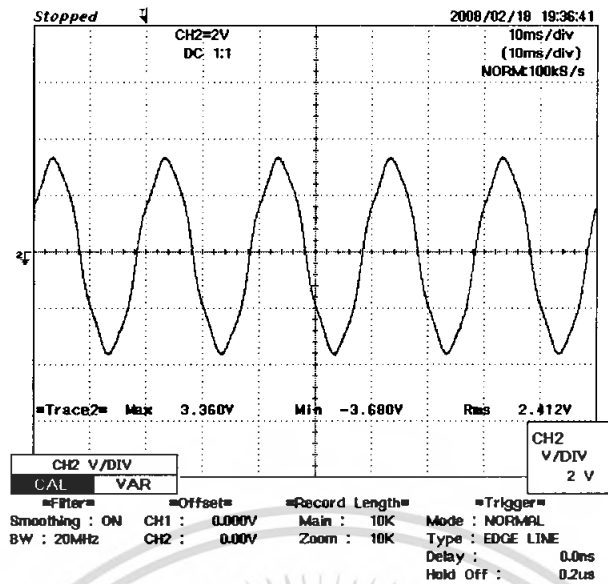


รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 30 kV

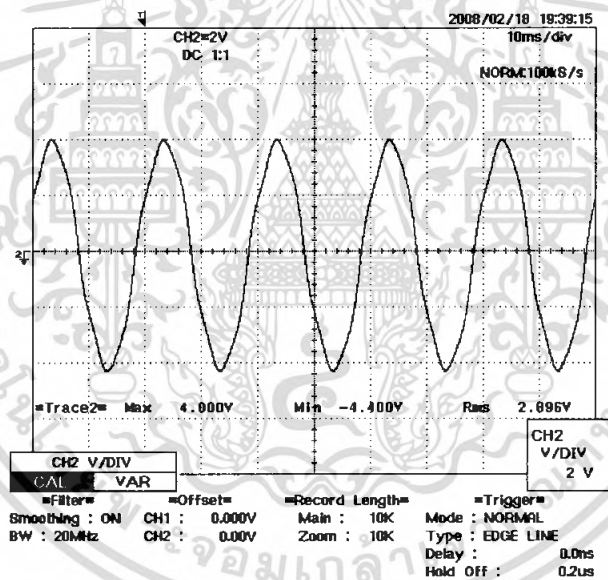


รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 40 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 50 kV



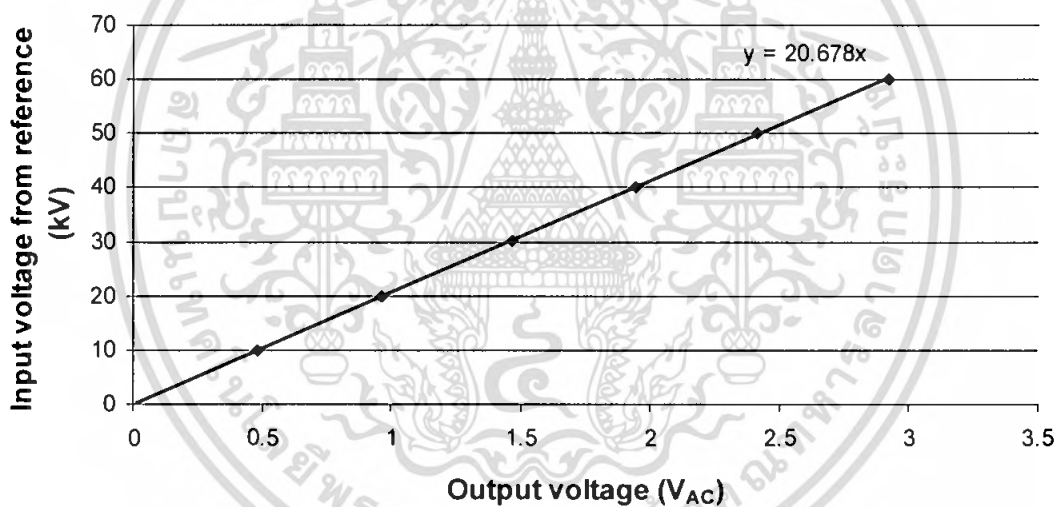
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 60 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ

Ref (kV)	Min (V)	Max (V)	Rms (V)
10	0.64	0.70	0.483
20	1.368	1.42	0.961
30.3	2	2.28	1.464
40.1	2.64	2.96	1.936
50.2	3.32	3.68	2.415
60.4	4.08	4.4	2.924

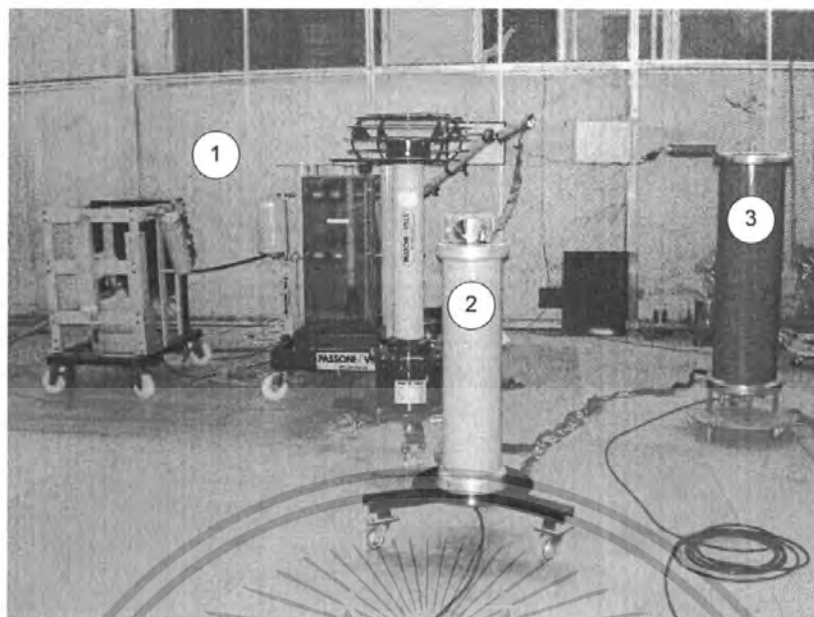
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ รูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ

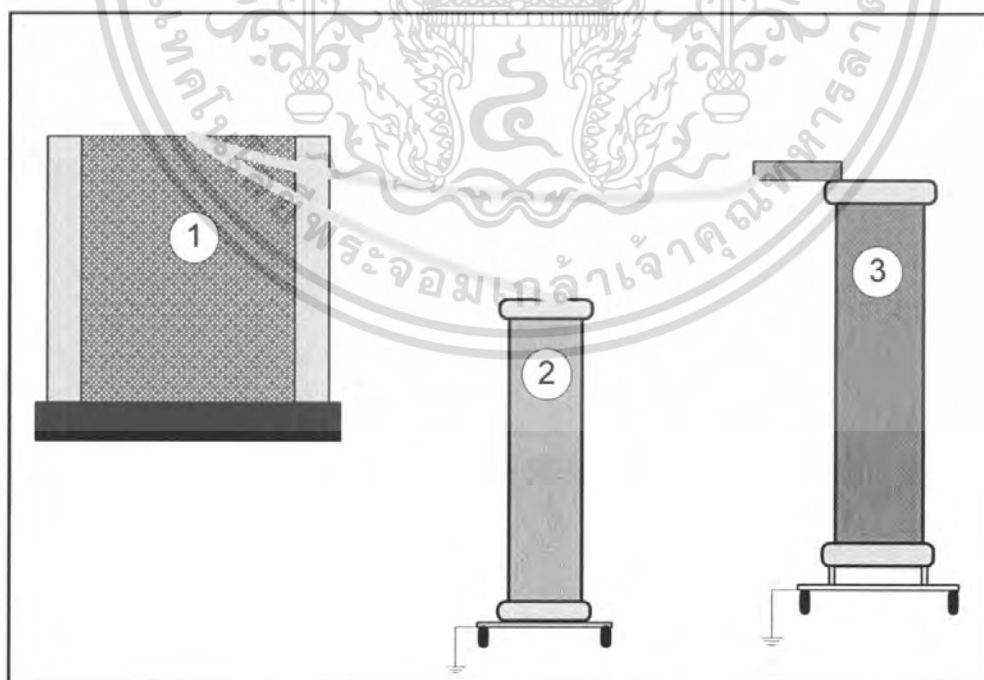
4.1.3 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์

ในการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์จะใช้โวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้รับการปรับเทียบแล้ว เป็นตัวอ้างอิงเปรียบเทียบกับโวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้ออกแบบสร้างเสร็จแล้ว ซึ่งการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนซึ่งส่วนแรกจะเป็นการวัดแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว และส่วนที่สองจะเป็นการวัดแรงดันอิมพัลส์ชั่วนิจนิรันดร์ วงจรการทดลองตามรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 วงจรการทดสอบโวลเตจติไวเตอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์

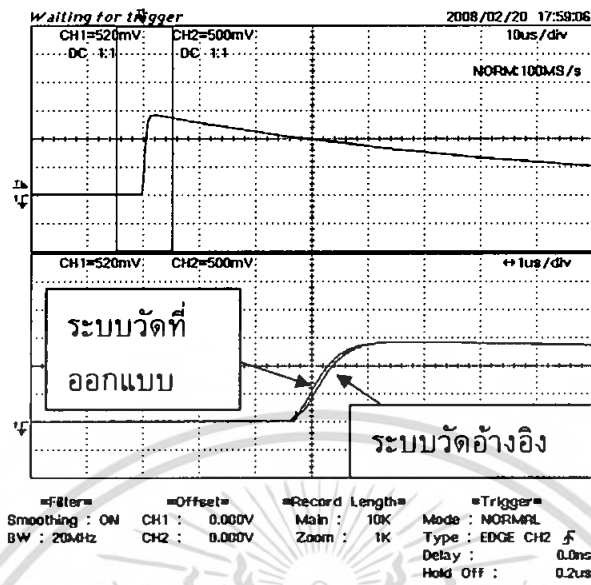
โดย 1) โวลเตจติไวเตอร์ที่ได้ออกแบบสร้าง
2) โวลเตจติไวเตอร์ของระบบอ้างอิง



รูปที่ 4.14 วงจรสมมุติการทดสอบโวลเตจติไวเตอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.1 ผลการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว

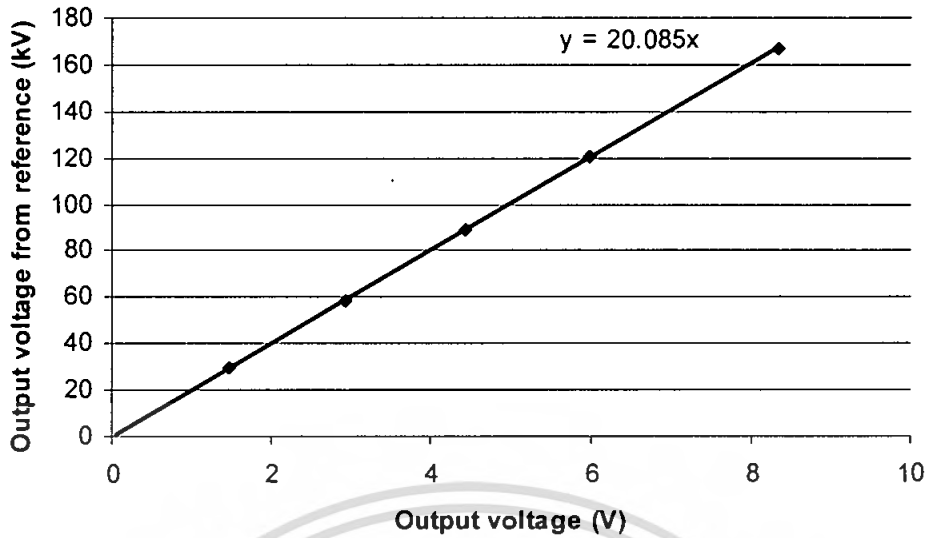


รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว

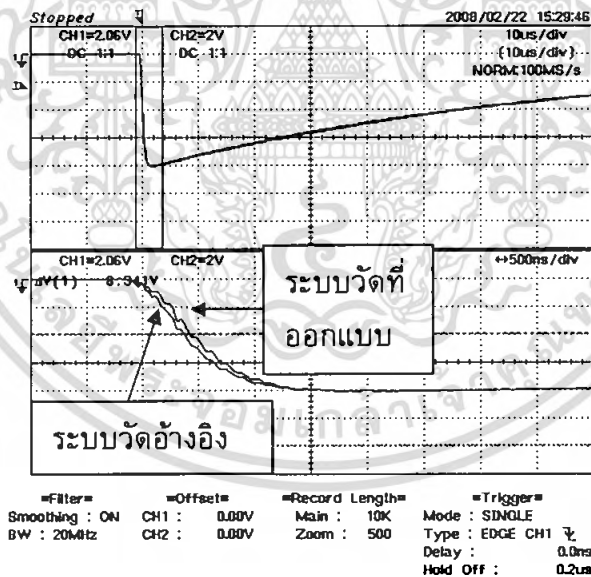
Divider (V)	Reference (kV)
1.476	29.357
2.934	57.816
4.438	89.366
5.986	120.686
8.341	167.311

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ รูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั้วบวก

4.1.3.2 ผลการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั้วลบ



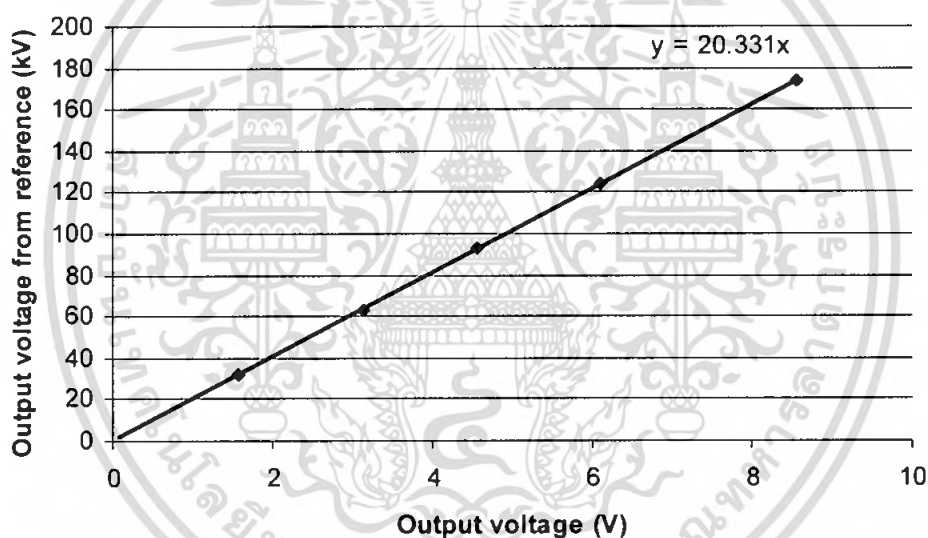
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั้วลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั้วลบ

Divider (V)	Reference (kV)
1.56	33.825
3.13	62.64
4.553	92.978
6.093	124.444
8.56	173.721

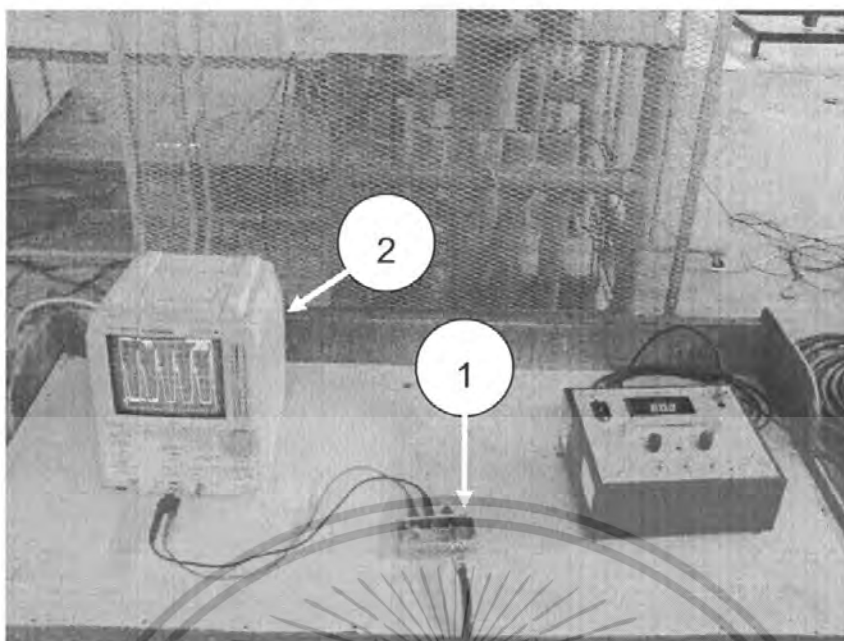
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ รูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทดสอบแรงดันอิมพัลส์ชั้วลบ

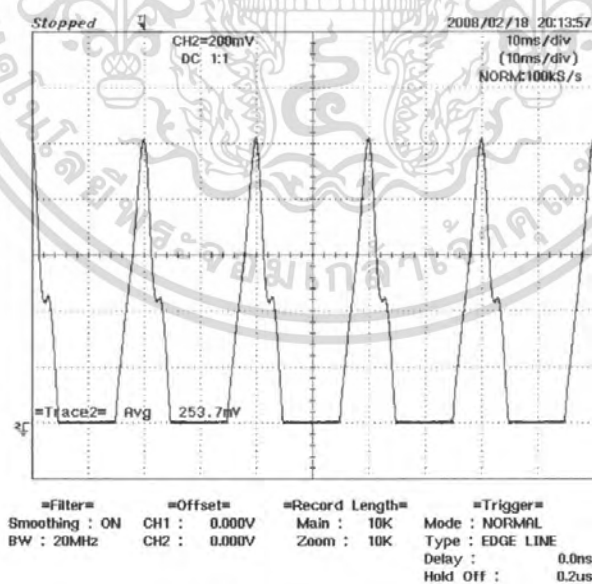
4.1.4 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันของซิปโฟเทสคิว

ในการทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันของซิปโฟเทสคิว จะมีลักษณะเหมือนกับโวลเตจดีไวเดอร์ จะเป็นแบบการวัดแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกันเทียบกับอุปกรณ์อ้างอิง ซึ่งในการหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันของซิปโฟเทสคิวจะแบ่งเป็น 2 กรณี โดยจะแบ่งเป็นการหาทางด้านช่วงบวกและทางด้านช่วงลบ แสดงดังรูปที่ 4.18



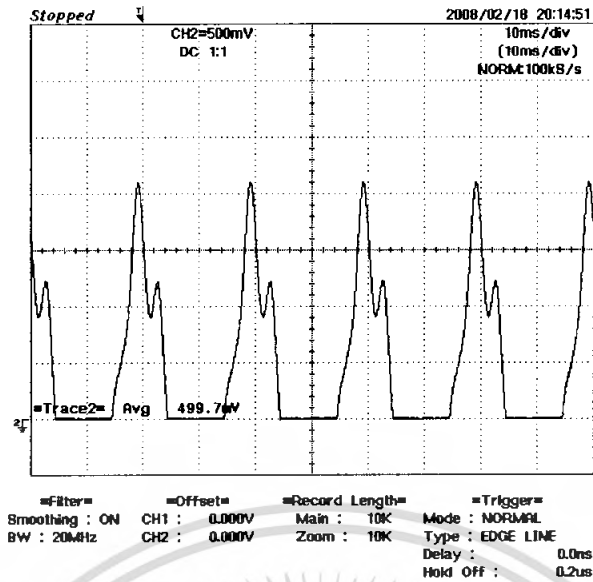
รูปที่ 4.18 วงจรการทดสอบชั้ไฟเทสคิว
โดย 1) ชั้ไฟเทสคิวที่ได้ออกแบบสร้าง
2) ออสซิลโลสโคป

4.1.4.1 ผลการทดสอบชั้ไฟเทสคิวทางด้านช่วงบวก

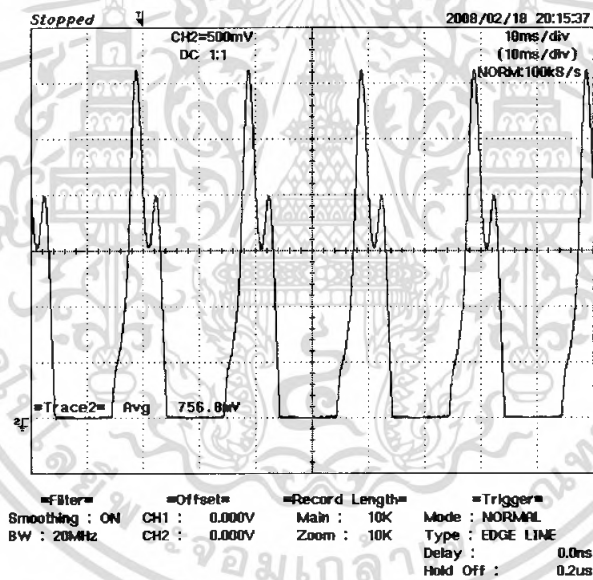


รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบทดสอบชั้ไฟเทสคิวทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 10 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

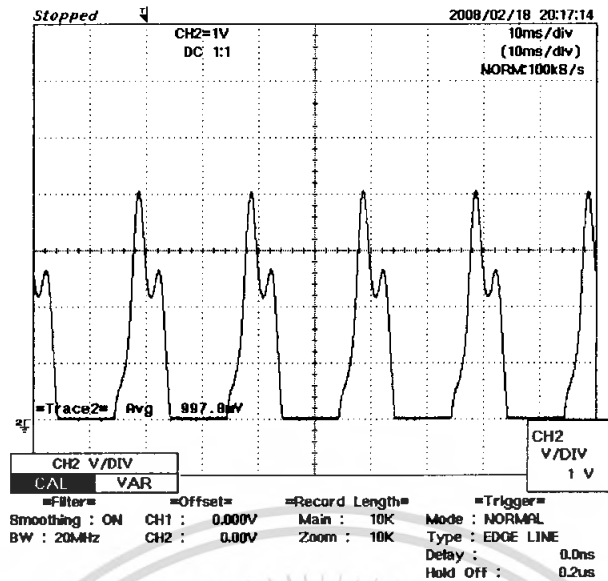


รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบทดสอบซ้ำไฟทดสอบทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 20 kV

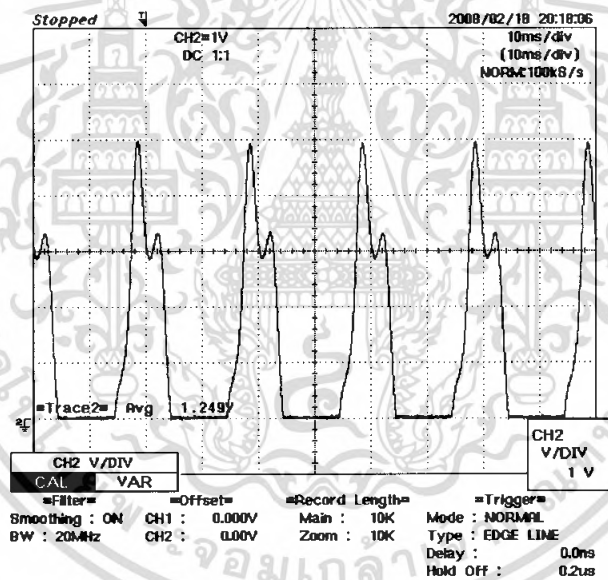


รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบทดสอบซ้ำไฟทดสอบทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 30 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

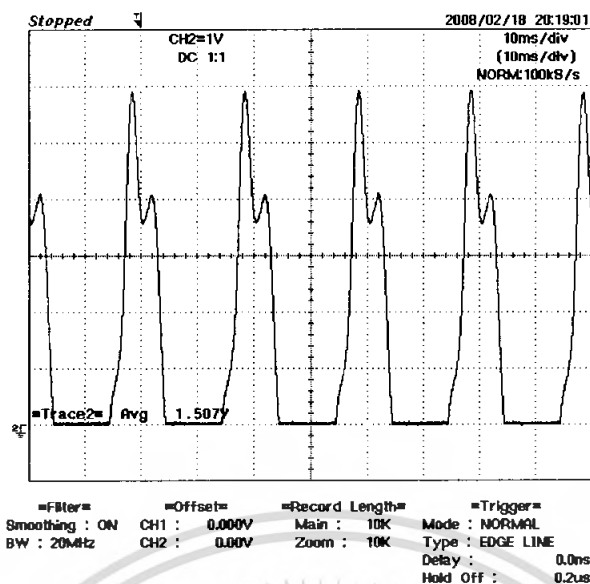


รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบทดสอบขั้วไฟทดสอบทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 40 kV



รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบทดสอบขั้วไฟทดสอบทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 50 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



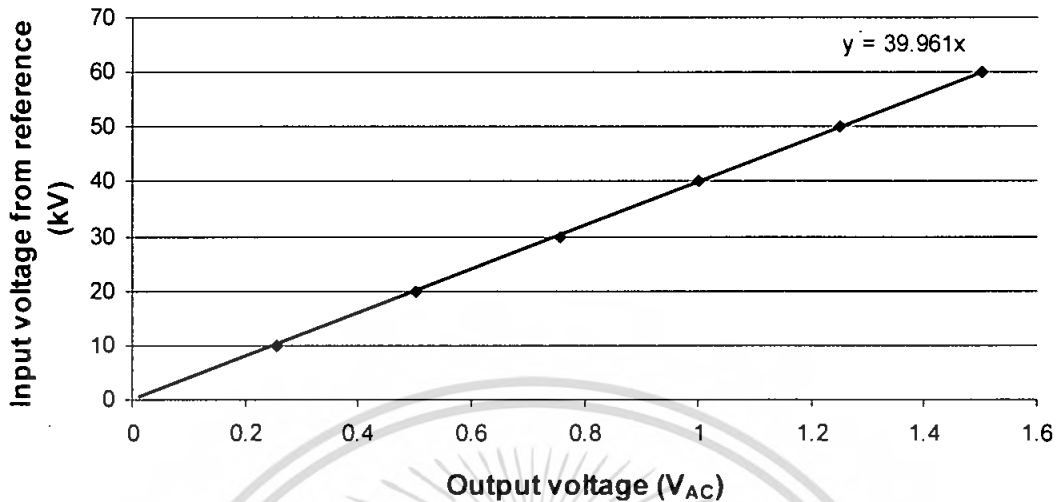
รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบทดสอบชัฟไฟทดสอบทางด้านช่วงบวกที่ระดับแรงดัน 60 kV

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดันที่วัดจากระบบวัดอย่างอิงกับแรงดันขาออกของของชัฟไฟทดสอบทางด้านช่วงบวก

Ref (kV)	ช่วงบวก (V)
10.2	0.254
20	0.5
30.2	0.756
40	1
50	1.25
60.2	1.506

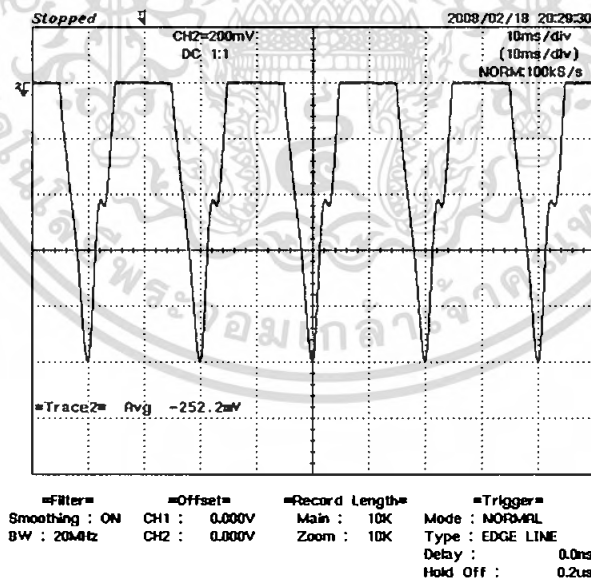
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของซิปไฟเทส
คิวทางด้านช่วงบวก ดังรูปที่ 4.25



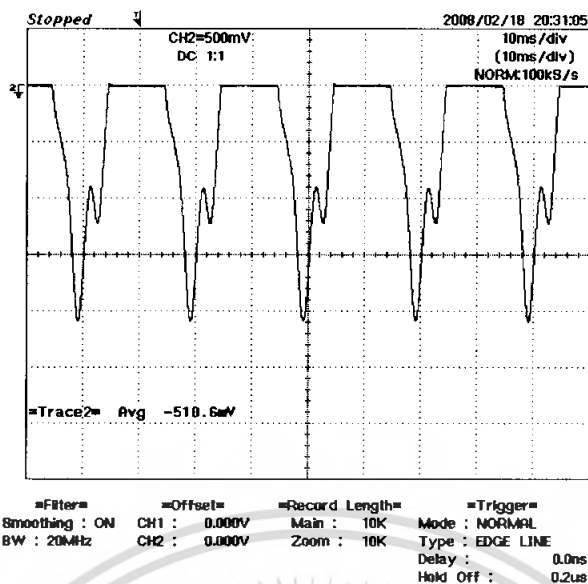
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของซิปไฟเทส
คิวทางด้านช่วงบวก

4.1.4.2 ผลการทดสอบซิปไฟเทสคิวทางด้านช่วงลบ

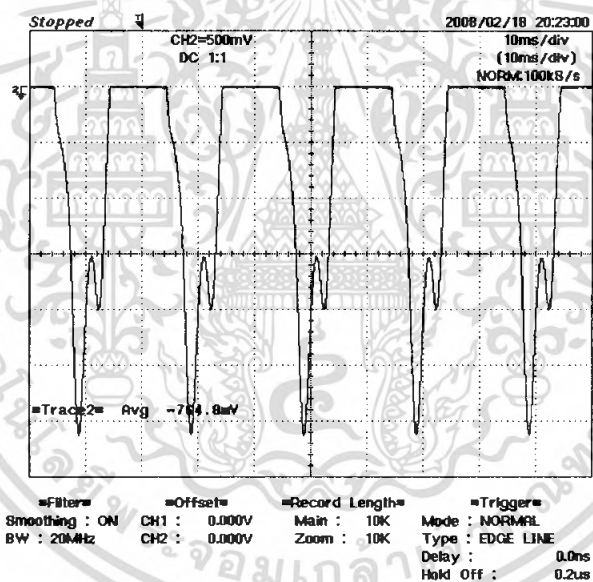


รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบซิปไฟเทสคิวทางด้านช่วงลบที่ระดับแรงดัน 10 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

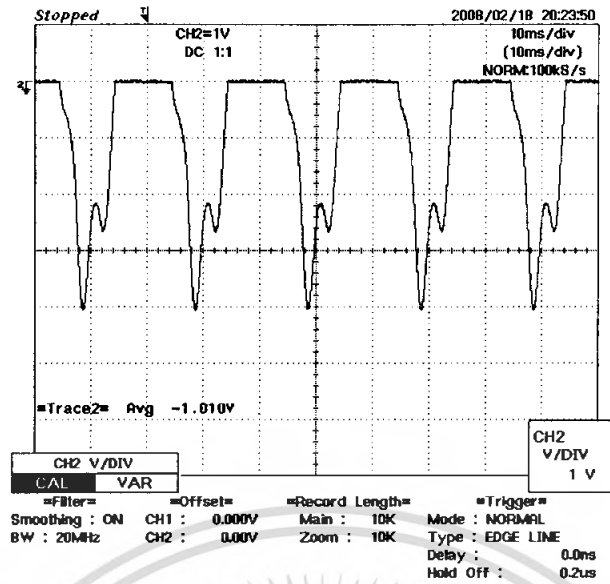


รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบขับไฟทดสอบทางด้านช่วงลบที่ระดับแรงดัน 20 kV

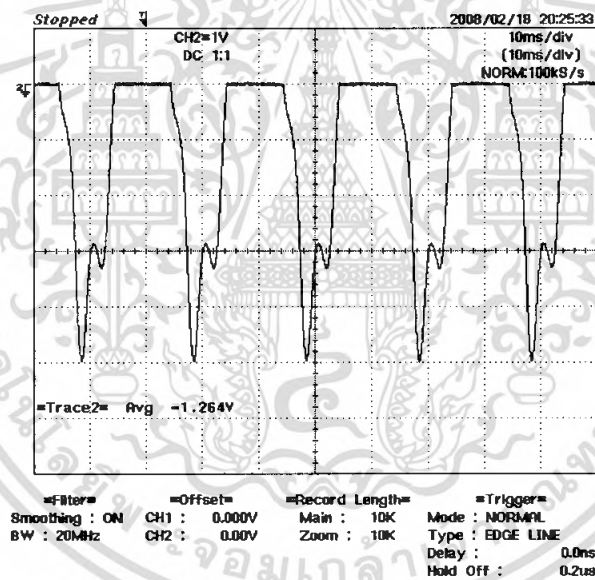


รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบขับไฟทดสอบทางด้านช่วงลบที่ระดับแรงดัน 30 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

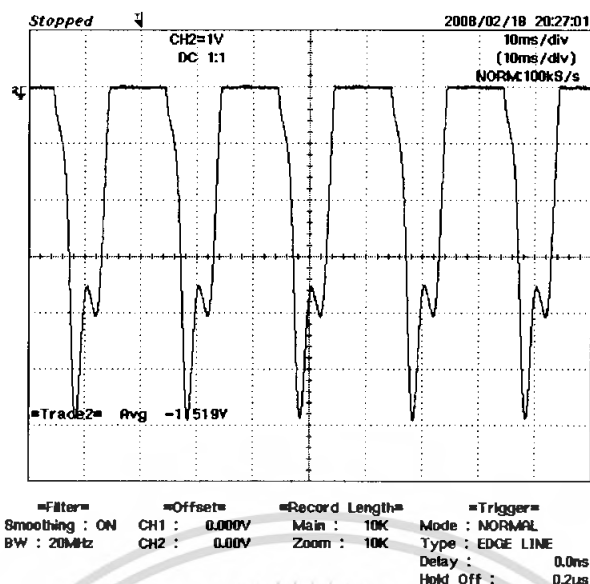


รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบชั้ไฟฟ้าแรงดันทางด้านช่วงลบที่ระดับแรงดัน 40 kV



รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบชั้ไฟฟ้าแรงดันทางด้านช่วงลบที่ระดับแรงดัน 50 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

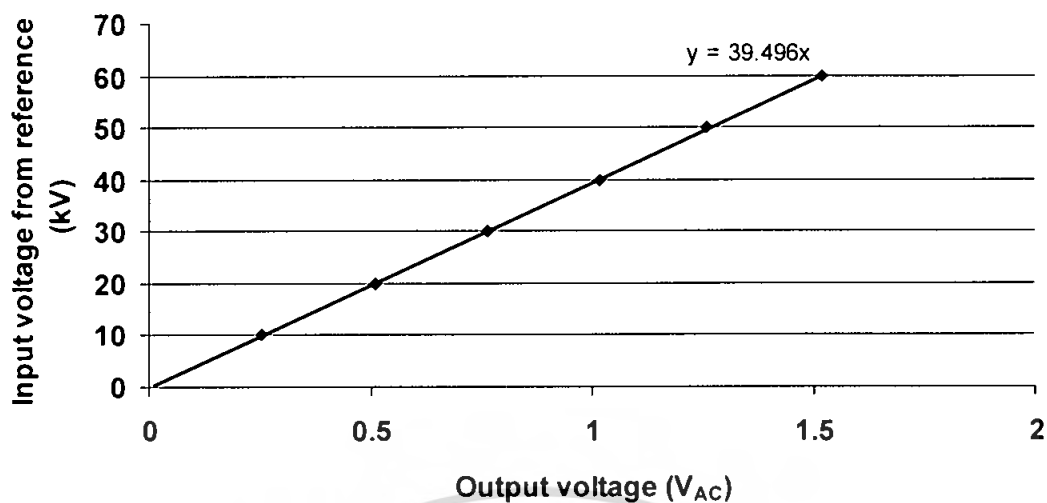


รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบชั้ไฟฟ้าทดสอบทางด้านช่วงลบบที่ระดับแรงดัน 60 kV

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของของชั้ไฟฟ้าทดสอบทางด้านช่วงลบบ

Ref (kV)	ช่วงลบบ (V)
10.1	0.252
20	0.51
30.2	0.765
40.3	1.016
50.2	1.259
60	1.519

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของของชั้ไฟฟ้าทดสอบทางด้านช่วงลบบ ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของซับไฟ
ทดสอบทางด้านช่วงลบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการการทดสอบ

ในการออกแบบตัวเก็บประจุอัดก๊าซนี้ ได้ใช้หลักการของทรงกระบอกซ้อนกันร่วม ซึ่งจะบรรจุในท่อ PVC ภายในจะบรรจุก๊าซ SF₆ ไว้ 3 bar ซึ่งค่าแรงดันสูงสุดที่สามารถลดทอนได้เมื่อใช้เป็นโวลเตจดีไวเดอร์คือ 200 kV จากค่าแรงดันที่สามารถลดทอนได้ จากค่าแรงดันเบรกดาว์นตามผิวของอากาศ 2 kV/cm. จึงได้ความยาวท่อ PVC สูง 113 cm.

จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อดูการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณตัวเก็บประจุอัดก๊าซ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองคือการกระจายแรงดันจะมีค่าสูงสุดอยู่บริเวณหัวอิเล็กโทรดด้านแรงสูง ส่วนค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ใกล้กับหัวอิเล็กโทรดด้านแรงสูงจะมีค่าความเครียดสูง ซึ่งถ้าความยาวท่อมากขึ้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง ซึ่งจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้ว ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในตัวเก็บประจุอัดก๊าซจะไม่ทำให้เกิดการเบรกดาว์นภายใน

ค่าเก็บประจุของตัวเก็บประจุอัดก๊าซมีค่าเท่ากับ 17 pF โดยการคำนวณจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะพิจารณาเป็นลักษณะครึ่งทรงกลมซ้อนกันร่วมและส่วนที่สองจะพิจารณาเป็นทรงกระบอกซ้อนกันร่วม ส่วนตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำของตัวเก็บประจุอัดก๊าซมีค่าความเก็บประจุเท่ากับ 25.5 nF ซึ่งจะทำให้ได้ค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันประมาณ 1500:

1

ในการออกแบบระบบวัดแรงดันด้วยวิธีชัฟโฟเทสคิวนี ได้ทำการออกแบบสร้างใหม่โดยนำตัวต้านทานมาต่ออนุกรมกับไดโอดเรียงกระแสโดยวัดค่ากระแสจากค่าความต้านทานเพราะการวัดกระแสโดยตรงเลยนั้นไม่ได้เพราะกระแสที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อย แอมป์มิเตอร์ไม่สามารถอ่านค่าได้

ในการทดสอบตัวเก็บประจุอัดก๊าซและชัฟโฟเทสคิวนีจะเป็นการทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดัน (Scale factor) ซึ่งจะทำให้การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันอิพัลส์ ซึ่งจากผลการทดสอบค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันที่ได้คือ 20,331 ซึ่งในการทดสอบจะใช้มาตรฐาน IEC 60-2 เป็นมาตรฐานรองรับการทดสอบ ส่วนในการทดสอบชัฟโฟเทสคิวนีได้ค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันที่ได้คือ 39,961

5.2 ปัญหาและวิธีการแก้ไข

ในการทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันของตัวเก็บประจุอัดก๊าซและชัฟโฟเทสคิวนี ใช้แรงดันที่ต่ำกว่าพิกัดที่ตั้งไว้ทดสอบเพราะ ไม่มีแหล่งจ่ายที่สามารถจ่ายแรงดันที่ต้องการได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุอัดก๊าซเพื่อใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับ

Design and Construction of a pressurized Capacitor for Measuring AC High Voltage

สุชาติ มณฑปใหญ่ เกริก แซ่เลื่อง จูติพงษ์ เจียงสุไซ จิราขุ จันทร์ชู ณัฐพันธ์ บุญแสน

ที่รูดิ ขุทธโกวิท นรเศรษฐ พัฒนเดช และอานันท์วัฒน์ คุณากร

*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

(E-mail : s8015139@kmitl.ac.th, pearawut@yahoo.com)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุอัดก๊าซ พิกัด 17 pF 200 kV_{rms} ซึ่งตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับด้วยหลักการ โวลเตจดีไวเดอร์ และหลักการจับและโพเทสคิวและสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การออกแบบได้ใช้การจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยศึกษาพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนตัวเก็บประจุก่อนที่มีการสร้าง และทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งในส่วนการทดลองความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับและอัตราส่วนลดทอนแรงดันที่คงที่ เมื่อใช้ตัวเก็บประจุนี้ในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับและสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

คำสำคัญ: จับโพเทสคิว, ตัวเก็บประจุอัดก๊าซ, โวลเตจดีไวเดอร์

Abstract

This paper presents design and construction of a gas pressurized capacitor of 17 pF, 200 kV_{rms}. This capacitor can be applied for measuring alternating current voltage with voltage divider and chubb and fortescue theorem and also measuring impulse voltage with voltage divider. Computer simulation was employed to study the electric field stress and voltage distribution of designed capacitor. Then it was constructed and tested in high voltage laboratory. The test results show the satisfied characteristic of this capacitor both withstand voltage and constant scale factor when it is used as a AC voltage measuring system and impulse voltage measuring system.

Keywords: Chubb and Fortescue, Gas Pressurized Capacitor, Voltage Divider

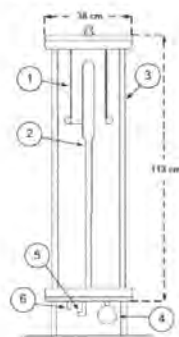
1. บทนำ

อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงสูงจะต้องมีการทดสอบในด้านของคุณภาพ และขีดความสามารถในการใช้งานตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ [1-3] ซึ่งในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละครั้ง

จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง ซึ่งแต่เดิมจำเป็นต้องสั่งนำเข้าเครื่องมือวัดจากบริษัทผู้ผลิตในต่างประเทศด้วยราคาที่แพงมาก ซึ่งเป็นการสูญเสียเงินตราของประเทศนับมูลค่าปีละหลายล้านบาท ด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและความสามารถของบุคลากรทำให้ปัจจุบันเราสามารถออกแบบสร้างเครื่องมือวัดแรงดันสูงขึ้นใช้งานเองได้ ซึ่งเครื่องมือวัดทางด้านไฟฟ้าแรงสูงที่สำคัญ และทุกห้องปฏิบัติการทดสอบจำเป็นต้องมีไว้ใช้งานคือ โวลเตจดีไวเดอร์ ในประเทศไทยมีข้อมูลรายงานผลการศึกษาวีจียออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันสูงหลายฉบับ [4-5] แสดงถึงศักยภาพทางด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของประเทศที่สามารถพัฒนาการสร้างเครื่องมือวัดที่มีราคาแพงให้มีราคาถูกลง โดยเน้นการใช้วัสดุภายในประเทศเป็นองค์ประกอบหลัก และมีคุณภาพทัดเทียมกับของต่างประเทศ โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาการนำเข้าอีกต่อไป

2. ตัวเก็บประจุอัดก๊าซ

ตัวเก็บประจุแรงดันสูงลักษณะดังกล่าวนี้ ได้จากสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วม(coaxial cylinder configuration) อัดก๊าซเฉื่อย(SF₆) ที่ความดัน 3 bar ซึ่งทำให้ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กลงทนแรงดันได้สูง ตัวเก็บประจุประเภทนี้จะไม่มีผลต่อระบบวัดแรงดันจากค่าเก็บประจุเศษ (stray capacitance) โดยทั่วไปแล้วใช้เป็นตัวเก็บประจุมาตรฐาน (standard capacitor) มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวเก็บประจุอัดก๊าซ

- 1) อิเล็กโตรดแรงสูง
- 2) อิเล็กโตรดวัดแรงดัน
- 3) ท่อฉนวน
- 4) มาตรวัดความดัน
- 5) ขั้วต่อสายเคเบิล
- 6) ราวยึด-ชุดก๊าซ

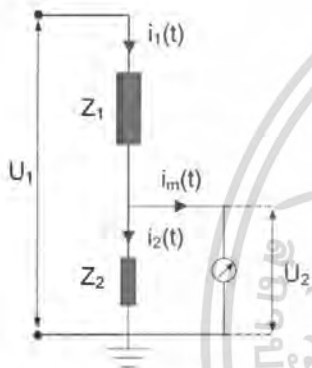
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวัดแรงดันสูงกระแสลับ

3.1 วิธีวัดแรงดันด้วยโวลต์มิเตอร์ [6]

โวลต์มิเตอร์เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงให้ต่ำลงพอที่จะสามารถใช้โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำวัดได้ ด้วยการใช้อิมพีแดนซ์แรงสูง (Z_1) ต่ออนุกรมกับอิมพีแดนซ์แรงต่ำ (Z_2) โดยที่อิมพีแดนซ์แรงสูง (Z_1) ต่อกับแรงดันที่ต้องการวัดแล้วเกิดการแบ่งแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์แรงต่ำ (Z_2) เพียงส่วนน้อย ซึ่งเป็นแรงดันตกคร่อมเครื่องวัดดังแสดงในรูปที่ 2 ขนาดของแรงดันสูงจริงที่ต้องการวัด (U_1) จะเป็นสัดส่วนกับแรงดันขาออกทางด้านแรงต่ำที่วัดได้ (U_2) ดังสมการที่ (1)

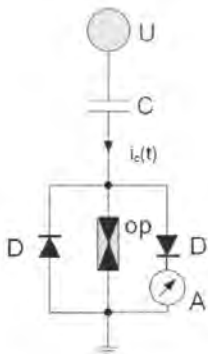
$$U_1 = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} U_2 \quad (1)$$



รูปที่ 2 โวลต์มิเตอร์สำหรับวัดแรงดันสูง

3.2 วิธีขับและโพเทสคิว [6]

วิธีขับและโพเทสคิว เป็นวิธีการวัดแรงดันจากค่ากระแสเฉลี่ยที่ครั้งคลื่นที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุแรงสูง C ฉะนั้นแอมป์มิเตอร์ที่ใช้วัดต้องเป็นมิเตอร์กระแสตรง โดยค่ากระแสเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับค่ายอดของแรงดันที่วัดได้ดังแสดงในรูปที่ 3

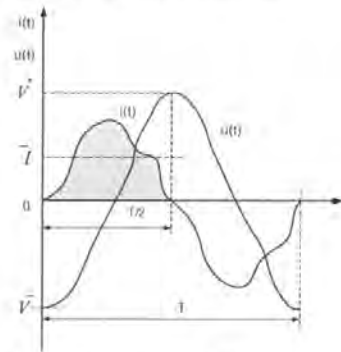


รูปที่ 3 วงจรการวัดค่ายอดแรงดันกระแสลับ

รูปคลื่นแรงดันและกระแสสามารถคำนวณหาค่ากระแสเฉลี่ยได้จากสมการที่ (2) และ (3) ในกรณีที่ค่ายอดทั้งบวกและลบเท่ากัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ายอดแรงดันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แรงดันและกระแสที่ผ่านแอมป์มิเตอร์

$$i_c(t) = C \frac{du}{dt} \quad (2)$$

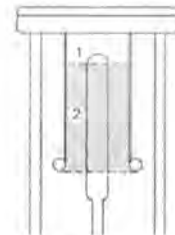
$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = fC(U_p^+ - U_p^-) \quad (3)$$

$$U_p = \frac{\bar{I}}{2fC} \quad (4)$$

4. การออกแบบ

4.1 การออกแบบตัวเก็บประจุดีบุก

การออกแบบตัวเก็บประจุดีบุกนี้ทำตามข้อกำหนดในมาตรฐาน [2-3] อิเล็กโตรดด้านแรงดันสูงทำจากโลหะเป็นรูปทรงกระบอกสูง 34.8 ซม. ขนาดรัศมี 7.3 ซม. สวมทับกับอิเล็กโตรดทรงกระบอกภายในด้านกราวด์มีขนาดรัศมี 2.54 ซม. ทั้งหมดบรรจุภายในท่ออลูมิเนียม PVC สูง 113 ซม. ภายในฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ ที่ความดัน 3 bar ซึ่งสามารถทนระดับแรงดัน 200 kV_{max} (283 V) โดยไม่เกิดโคโรนา ระหว่างอิเล็กโตรด การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าแยกเป็น 2 ส่วนตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 การแบ่งลักษณะของการคำนวณ

ส่วนที่ 1 พิจารณาลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมซ้อนกัน ซึ่งทำการคำนวณดังสมการที่ (5) ซึ่งมีรัศมีภายใน 2.54 ซม. และรัศมีภายนอก 7.3 ซม. ได้ค่าความเก็บประจุ 2.17 pF

$$C_{11} = \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi\epsilon_1 r_2}{r_1 r_2} \right) \quad (5)$$

ส่วนที่ 2 พิจารณาเป็นทรงกระบอกซ้อนกันรวมยาว 27.5 ซม. รัศมีภายใน 2.54 ซม. รัศมีภายนอก 7.3 ซม. ซึ่งคำนวณดังสมการที่ (6) ได้ค่าความเก็บประจุ 14.48 pF

$$C_{12} = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (6)$$

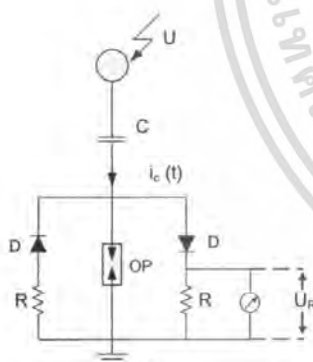
ดังนั้นได้ค่าความเก็บประจรรวมประมาณ 17 pF

4.2 การออกแบบระบบวัดแรงดันด้วยวิธีโวลเตจดีไวเดอร์

การออกแบบสร้างระบบวัดแรงดันด้วยวิธีโวลเตจดีไวเดอร์ กำหนดให้ตัวเก็บประจุด้านแรงดันมีค่า 25.5 nF ใช้เป็นตัวเก็บประจุสำหรับแบ่งแรงดันต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุอัตราค่าและได้อัตราส่วนลดทอนแรงดันประมาณ 1500: 1

4.3 การออกแบบระบบวัดแรงดันด้วยวิธีชั่งและโฟเทสกีว

การออกแบบระบบวัดด้วยวิธีชั่งและโฟเทสกีว เพื่อต้องการทราบค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ โดยวงจรที่สามารถอ่านค่ากระแสตรงเลขนั้นไม่ได้ เพราะกระแสที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อย แอมป์มิเตอร์ไม่สามารถอ่านค่าได้ ดังนั้นจึงทำการออกแบบวงจรที่วัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่ทราบค่าแน่นอน โดยสามารถอ่านค่ากระแสได้ทั้งด้านบวกและลบดังแสดงในรูปที่ 6

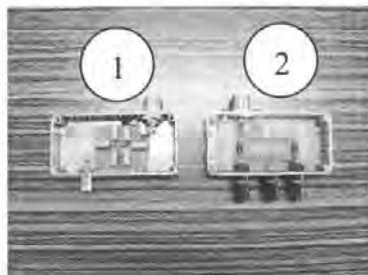


รูปที่ 6 วงจรการวัดค่าขดแรงดันกระแสสลับ

โดยกำหนดค่าแรงดันสูงสุดคือ 200 kV_{max} (283 kV_p) ดังนั้นจึงทราบค่าขดของกระแสได้จากสมการที่ (7)

$$I_p = \omega C V_p \quad (7)$$

นอกจากนี้ ยังทำการติดตั้งตัวป้องกันแรงดันเกินขนาด 230 V_p เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์วัดเกิดการเสียหาย ดังนั้นจึงได้ค่าความต้านทานเป็น 150 kΩ จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันลักษณะวงจรดังแสดงในรูปที่ 6 และลักษณะการสร้างของอุปกรณ์วัดภาคแรงดันต่ำและชั่งและโฟเทสกีวดังแสดงในรูปที่ 7



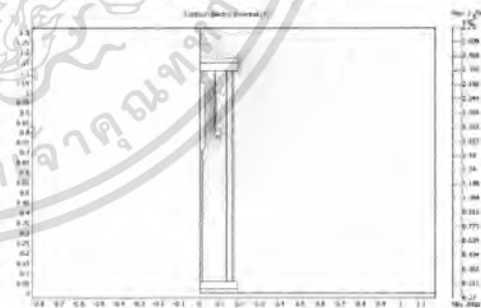
รูปที่ 7 ภาคแรงดันต่ำของระบบวัดแรงดันกระแสสลับด้วยวิธีโวลเตจดีไวเดอร์(1) และชั่งและโฟเทสกีว(2)

5.ผลการทดลอง

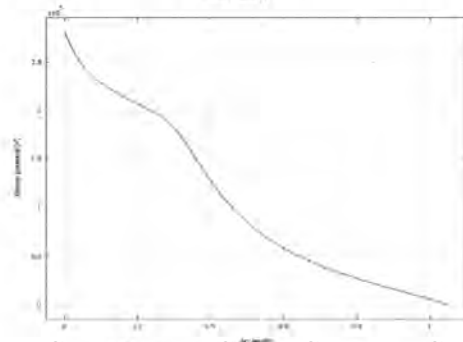
การทดสอบได้แบ่งขั้นตอนการทดสอบออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ 1) ทดสอบจากการจำลองแบบคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า 2) ทดสอบ Withstand และ Scale factor ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง

5.1 การวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

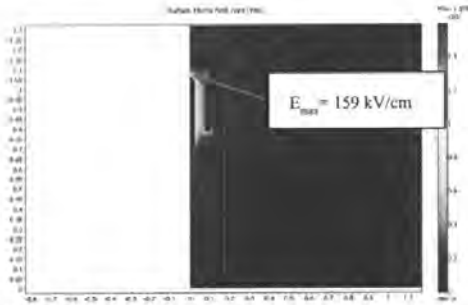
การจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตัวเก็บประจุอัตราค่าที่ได้ออกแบบ โดยใช้โปรแกรม FEMLAB กำหนดค่ากระแสของเส้นสมลักษ์ การกระจายของแรงดันบริเวณผิวท่อ PVC ซึ่งใช้เป็นตัวห่อหุ้ม (housing) ของตัวเก็บประจรรวมทั้งความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เมื่อทำการป้อนแรงดัน 200 kV_{max} (283 kV_p) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุอัตราค่า มีค่าน้อยกว่า 24 kV/cm ซึ่งจะไม่ทำให้เกิด Corona และดีสชาร์จบางส่วน แสดงในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 11



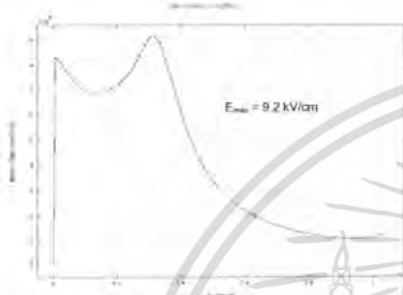
รูปที่ 8 การกระจายของเส้นสมลักษ์ที่ระดับแรงดัน 200 kV_{max}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น รูปที่ 9 การกระจายแรงดันความถี่ลดขนาดก่อนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ระดับแรงดัน 200 kV_{rms}



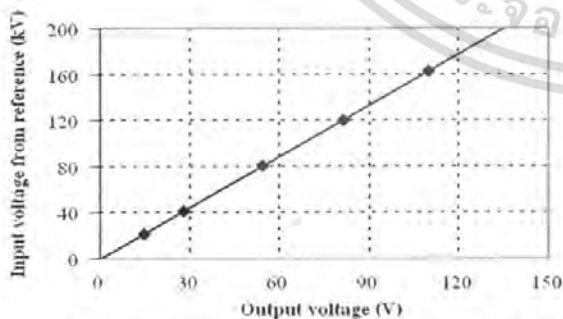
รูปที่ 11 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณบริเวณหัวท่อน

5.2 การทดสอบแรงดัน Withstand Voltage Test

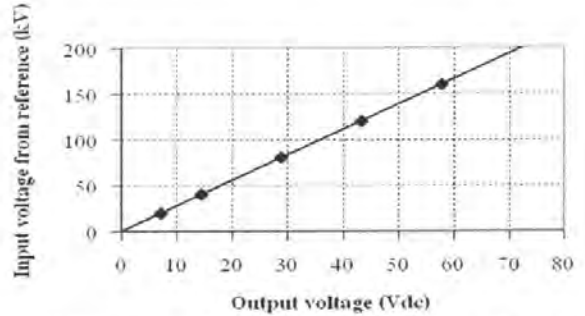
เพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นได้ในการนำตัวเก็บประจุดังกล่าวไปใช้งาน จึงได้ทำการทดสอบความทนต่อแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ระดับแรงดันทดสอบ 110% ของแรงดันที่กักที่ออกแบบเป็นเวลา 1 นาที พบว่าสามารถทนต่อแรงดันทดสอบตามมาตรฐานกำหนดได้

5.3 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดัน

การหาค่าอัตราส่วนลดทอนแรงดันของระบบวัดแรงดันด้วยวิธีโวลเตจดีไวเดอร์และวิธีชัมและโพเทสคิวทดสอบตลอดช่วงแรงดัน 0-200 kV_{rms} ได้ผลตามรูปที่ 12 และ 13



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ (อัตราส่วนลดทอนแรงดัน 1495:1)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันขาออกจากวิธีชัมและโพเทสคิว (อัตราส่วนลดทอนแรงดัน 2770:1)

6. สรุป

ในการออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุดังกล่าวเพื่อใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับนั้น จากผลการทดสอบพบว่าคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์มีคุณสมบัติตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน [2-3] กำหนด การประกอบสร้างเป็นการใช้วัสดุภายในประเทศ จึงทำให้มีราคาที่ถูกลงกว่าการนำเข้าจากต่างประเทศมาก เป็นการช่วยให้ภาคอุตสาหกรรมประหยัดเงินลงทุน และยังช่วยพัฒนาองค์ความรู้ของนักศึกษาส่งเสริมให้เกิดทักษะและกระบวนการคิด อย่างมีระบบมีเหตุผล ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Publication 60-1, "High-Voltage Test Techniques, Part 1: General definitions and test requirements", Geneva, 1989.
- [2] IEC Publication 60-2, "High-Voltage Test Techniques, Part 2: General definitions and test requirements", Geneva, 1994.
- [3] IEEE Std. 4, "Standard Techniques for High-Voltage Testing", IEEE Standard Board, March 1995.
- [4] คุณพล ชีพดำรง และคณะ, "การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ สำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ", ปรียญธานีพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- [5] รัชกร ปานทอง และคณะ, "โวลเตจดีไวเดอร์แบบวงจรร่วมราคาประหยัดสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับกระแสตรงและแรงดันอิมพัลส์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, พ.ศ. 2549.
- [6] ดร.ดำรง สันต์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2547.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
60-2**

Deuxième édition
Second edition
1994-11

Techniques des essais à haute tension

**Partie 2:
Systèmes de Mesure**

High-voltage test techniques

**Part 2:
Measuring Systems**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60-2: 1994

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTENTS

	Page
FOREWORD	9
Clause	
1 Scope	11
2 Normative references	13
3 Definitions and symbols	15
3.1 Measuring Systems	15
3.2 Converting devices	17
3.3 Transmission system	17
3.4 Indicating or recording instrument	17
3.5 Scale factors	19
3.6 Definition related to the dynamic behaviour of a Measuring System	19
3.7 Response parameters	21
3.8 Overall uncertainty e	23
3.9 Rated values	25
3.10 Definitions related to tests	25
4 Procedures for qualification and use of measuring systems	27
4.1 General principles	27
4.2 Schedule of Performance Tests	27
4.3 Schedule of Performance Checks	29
4.4 Requirements for the Record of Performance	29
4.5 Operating conditions	31
5 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System	33
5.1 Applicability	33
5.2 Determination of the scale factor	33
5.3 Linearity test	33
5.4 Short-term stability test	35
5.5 Long-term stability of single elements	35
5.6 Temperature effect	35
5.7 Proximity effect	35
5.8 Dynamic behaviour of a component	37
5.9 Withstand tests	37
6 Performance Tests on Measuring Systems	39
6.1 General requirements	39
6.2 Determination of the Assigned Scale Factor	41
6.3 Dynamic behaviour test (for Impulse Measuring Systems)	43
6.4 Interference test (for Impulse Measuring Systems)	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Clause	Page
7 Measurement of direct voltage	45
7.1 Requirements for an Approved Measuring System	45
7.2 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System	45
7.3 Performance Test on Measuring Systems	49
7.4 Performance Check	49
7.5 IEC Standard Measuring Device	49
7.6 Measurement of ripple amplitude	49
8 Measurement of alternating voltage	53
8.1 Requirements for an Approved Measuring System	53
8.2 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System	53
8.3 Performance Test on Measuring Systems	57
8.4 Performance Check	57
8.5 IEC Standard Measuring Device	57
9 Measurement of lightning impulse voltage	59
9.1 Requirements for an Approved Measuring System	59
9.2 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System	61
9.3 Performance Test on Measuring Systems	65
9.4 Performance Check	69
9.5 IEC Standard Measuring Device	71
10 Measurement of switching impulse voltage	73
10.1 Requirements for an Approved Measuring System	73
10.2 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System	73
10.3 Performance Test on Measuring Systems	77
10.4 Performance Check	81
10.5 IEC Standard Measuring Device	81
11 Measurement of impulse current	83
11.1 Requirements for an Approved Measuring System	83
11.2 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System	83
11.3 Performance Test on Measuring Systems	85
11.4 Performance Check	87
12 Reference Measuring Systems	91
12.1 Requirements for Reference Measuring Systems	91
12.2 Calibration of a Reference Measuring System	91
12.3 Interval between successive Certifications of Reference Measuring Systems	93

Clause	Page
Figures	94
Annexes	
A Accreditation Systems	99
A.1 National accreditation systems	99
A.2 Bibliography	101
B Structure of a Record of Performance	103
B.1 General structure	103
B.2 General description of the system (Chapter A)	103
B.3 Acceptance test results on components (Chapter B)	107
B.4 Routine test results on the complete Measuring System (Chapter C)	107
B.5 Performance Test results (Chapter D)	107
B.6 Performance Check (Chapter E)	107
B.7 Minimal form of the Record of Performance	109
C Step response measurements	111
C.1 Circuits for step response measurements	111
D Temperature rise of measuring resistors	115
E Reference Measuring Systems and Comparison Measurements for Impulse Measurements – Bibliography	117
E.1 Comparison measurements	117
E.2 Some examples of dividers for Reference Measuring Systems	117
E.3 IEC Standard Measuring Devices	117
F Summary of tests	119
F.1 Tests on a direct voltage Measuring System	121
F.2 Tests on an alternating voltage Measuring System	123
F.3 Tests on a lightning impulse Measuring System	125
F.4 Tests on a switching impulse Measuring System	127
F.5 Tests on an impulse current Measuring System	129
G Areas where special care is needed	131
G.1 Measurement of the scale factor of a divider	131
G.2 Probes and external attenuators	131
G.3 Probe scale factor	133
G.4 Use of appropriate levels	133
G.5 Accuracy of time measurements	133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES -

Part 2: Measuring Systems

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.

International Standard IEC 60-2 has been prepared by IEC technical committee 42: High-voltage testing techniques.

This second edition cancels and replaces IEC 60-3, Measuring devices, published in 1976, and IEC 60-4, Application guide for measuring devices, published in 1977. This second edition constitutes a technical revision.

The text of this standard is based on the following documents:

DIS	Report on voting
42(CO)54	42(CO)57

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

IEC 60 consists of the following parts, under the general title: *High-voltage test techniques*:

- Part 1: 1989, General definitions and test requirements
- Part 2: 1994: Measuring Systems

Annex A forms an integral part of this standard and provides normative requirements for countries choosing to use accreditation systems.

Annexes B to G are for information only.

HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES – Part 2: Measuring Systems

1 Scope

This part of IEC 60 is applicable to complete Measuring Systems, and to their components, used for the measurement of high-voltages and currents during tests with direct voltage, alternating voltage, lightning and switching impulse voltages and for tests with impulse currents, or with combinations of them as specified in IEC 60-1.

The limits on measurement uncertainties stated in this International Standard apply to test levels stated in IEC 71-1. The principles of this International Standard apply also to higher levels but the uncertainty may be greater.

This standard:

- defines the terms used,
- states the requirements which the Measuring Systems shall meet,
- describes the methods for approving a Measuring System and checking its components,
- describes the procedure by which the user will show that a Measuring System meets the requirements of this standard.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 60. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 60 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 50(301, 302, 303): 1983, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 301: General terms on measurements in electricity; Chapter 302: Electrical measuring instruments; Chapter 303: Electronic measuring instruments*

IEC 50(321): 1986, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 321: Instrument transformers*

IEC 51, *Direct acting indicating analogue electrical-measuring instruments and their accessories*

IEC 52: 1960, *Recommendations for voltage measurement by means of sphere-gaps (one sphere earthed)*

IEC 60-1: 1989, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

IEC 71-1: 1993, *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*

IEC 790: 1984, *Oscilloscopes and peak voltmeters for impulse tests*

IEC 833: 1987, *Measurement of power-frequency electric fields*

IEC 1083-1: 1991, *Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests – Part 1: Requirements for digital recorders*

3 Definitions and symbols

For the purposes of this part of IEC 60, the following apply.

3.1 Measuring Systems

3.1.1 Measuring System: Complete set of devices suitable for performing a high-voltage or impulse-current measurement.

NOTES

1 A Measuring System usually comprises the following components: a converting device with the leads required for connecting this device to the test object or into the current circuit and the connections to earth, a transmission system connecting the output terminals of the device to the indicating or recording instruments with its attenuating, terminating and adapting impedances or networks, and indicating or recording instruments together with any connections to the power supply. Measuring Systems which comprise only some of the above components or which are based on non-conventional principles are acceptable if they meet the accuracy requirements specified in this standard. Components may be made of many elements or a single element, for example, a high-voltage capacitor of a capacitor divider may consist of many low-voltage capacitors or it may consist of a single gas capacitor.

2 The environment in which a Measuring System functions, its clearances to live and earthed structures and the presence of electric or magnetic fields may significantly affect its accuracy.

3.1.2 Record of Performance of a Measuring System: Detailed record, established by the user, describing the system and containing evidence that the requirements given in this standard have been met. This evidence shall include the results of the initial Performance Test and the schedule and results of each subsequent Performance Test and Performance Check.

3.1.3 Approved Measuring System: Measuring System which is shown to comply with one or more of the sets of requirements set out in this standard by:

- an initial Performance Test,
- successive Performance Checks and Performance Tests,
- inclusion of the results of these tests in the Record of Performance.

The system is approved only for the arrangements and operating conditions included in its Record of Performance.

3.1.4 Reference Measuring System: Measuring System having sufficient accuracy and stability for use in the approval of other systems by making simultaneous comparative measurements with specific types of waveform and ranges of voltage or current.

NOTE - A Reference Measuring System (maintained according to the requirements of this standard) can be used as an Approved Measuring System but the converse is not true.

3.1.5 IEC Standard Measuring Device: Device that can be used for measuring high-voltage with the specified accuracy (for example a sphere-gap or a rod/rod gap used according to IEC 60-1).

3.2 *Converting devices*

3.2.1 converting device: Device for converting the quantity to be measured into another quantity, compatible with the indicating or recording instrument.

3.2.2 voltage divider: Converting device consisting of a high-voltage and a low-voltage arm such that the input voltage is applied across the complete device and the output voltage is taken from the low-voltage arm. [IEV 301-05-13, modified]

NOTE – The elements of the two arms are usually resistors or capacitors or combinations of these and the device is described by the type and arrangement of its elements (for example, resistor, capacitor or resistor-capacitor).

3.2.3 voltage transformer: Step-down transformer for the measurement of the parameters of high alternating voltages. [IEV 321-03-01, modified]

3.2.4 high-voltage measuring impedance: Device which carries a current proportional to the applied voltage.

3.2.5 current-measuring shunt: Resistor across which the voltage is proportional to the current to be measured. [IEV 301-06-05, modified]

3.2.6 compensated current-measuring device: Current-measuring device which includes a compensating circuit.

3.2.7 current transformer: Transformer which produces an output proportional to the input current. [IEV 321-02-01, modified]

NOTE – A Rogowski coil used with an integrating circuit is a wide-band current transformer.

3.2.8 electric-field probe: Converting device for the measurement of the amplitude and waveform of an electric field.

NOTE – An electric-field probe may be used to measure the waveform of the voltage producing the field provided that the measurement is not affected by corona.

3.3 transmission system: Set of devices which transfers the output signal of a converting device to an indicating and/or recording instrument.

NOTES

1 A transmission system generally consists of a coaxial cable with its terminating impedance, but it may include attenuators or other devices connected between the converting device and the instrument. For example, an optical link includes the transmitter, the optical cable and the receiver as well as related amplifiers.

2 A transmission system may be partially or completely included in the converting device.

3.4 indicating or recording instrument: Device intended to display or provide a record of the value of a measurand or a related value. [IEV 301-02-11 and 12, modified]

3.5 Scale factors

3.5.1 scale factor of a Measuring System: Factor by which the value of the instrument reading is to be multiplied to obtain the value of the input quantity.

NOTES

- 1 A Measuring System may have more than one scale factor, for example, it may have different scale factors for different frequency ranges or waveforms (see 3.6.1).
- 2 For some Measuring Systems the value of the input quantity is displayed directly (i.e., the scale factor of the Measuring System is unity).

3.5.2 scale factor of a converting device: Factor by which the output of the converting device is to be multiplied to obtain its input quantity.

NOTE – The scale factor of a converting device may be dimensionless (for example, the ratio of a divider) or may have dimensions (for example, the impedance of a high-voltage measuring impedance).

3.5.3 scale factor of a transmission system: Factor by which the output of a transmission system is to be multiplied to obtain its input quantity.

3.5.4 scale factor of an indicating or recording instrument: Factor by which the instrument reading is to be multiplied to obtain its input quantity.

3.5.5 Assigned Scale Factor: Scale factor of a Measuring System determined at the most recent Performance Test.

NOTE – A Measuring System may have more than one Assigned Scale Factor, for example, it may have several Nominal Epochs each with a different value (see 3.6.1)

3.6 Definitions related to the dynamic behaviour of a Measuring System

3.6.1 Nominal Epoch τ_N (Impulse measurements, front part of impulse only): Range of values between the minimum (t_{\min}) and the maximum (t_{\max}) of the relevant time parameter of impulses for which the Measuring System is to be approved. The relevant time parameter is:

- the front time T_1 for full lightning and tail-chopped impulses and for current impulses
- the time to chopping T_c for front-chopped impulses
- the time to peak T_p for switching impulses

NOTES

1 A Measuring System may have one, two or more Nominal Epochs for different waveforms. For example, a particular Measuring System might be approved:

- for full lightning impulses with an Assigned Scale Factor F_1 over a Nominal Epoch τ_{N1} from $T_1 = 0,8 \mu\text{s}$ to $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$
- for front-chopped lightning impulses with an Assigned Scale Factor F_2 over a Nominal Epoch τ_{N2} from $T_c = 0,5 \mu\text{s}$ to $T_c = 0,9 \mu\text{s}$
- for switching impulses with an Assigned Scale Factor F_3 over a Nominal Epoch τ_{N3} from $T_p = 200 \mu\text{s}$ to $T_p = 300 \mu\text{s}$.

2 "Front-chopped impulse" is used to designate a chopped impulse with a time to chopping in the range $0,5 \mu\text{s}$ to $2 \mu\text{s}$ as distinct from a "tail-chopped impulse" which has a time to chopping greater than $2 \mu\text{s}$.

3.6.2 response of a Measuring System G: Output, as a function of time or frequency, when a specified voltage or current is applied to the input of the system.

3.6.3 amplitude/frequency response $G(f)$: Ratio of the output to the input of a Measuring System as a function of frequency f , when the input is sinusoidal (see figure 1).

3.6.4 step response $G(t)$: Output of a Measuring System as a function of time when the input is a step function.

3.7 Response parameters

3.7.1 response parameters: Parameters which are derived from the measured amplitude/frequency response or the measured step response by applying the specified procedure.

3.7.2 limit frequencies f_1 and f_2 : Lower and upper limits of the range within which the amplitude/frequency response is nearly constant. These limits are where the response first deviates by ± 3 dB from the constant value (see figure 1).

3.7.3 Reference Level I_R (impulse measurements only): Mean value of the step response taken over a Nominal Epoch (see figure 2).

NOTE – A Measuring System may have more than one Reference Level, for example, it may have different scale factors for different waveforms (see 3.6.1 and figure 2).

3.7.4 virtual origin of a step response O_1 : Intersection with the time axis of a straight line drawn as a tangent to the steepest portion of the front of the step response. In the case of a response with oscillations on the front, a mean curve is drawn through the oscillations and used to determine the tangent line. Any initial distortion is neglected when drawing the tangent line (see figure 3a).

NOTES

1 All time values are measured from the virtual origin O_1 .

2 For a smooth response, or for a smooth curve drawn through oscillations, the steepest portion will occur near the beginning of the response.

3.7.5 normalized step response $g(t)$: Step response normalized such that a Reference Level becomes unity.

NOTE – A Measuring System has a normalized step response for each Reference Level.

3.7.6 step response integral $T(t)$: Integral from O_1 to t of one minus the normalized step response $g(t)$, but with the initial portion of $g(t)$ replaced by the straight line drawn to determine O_1 (see 3.7.4).

$$T(t) = \int_{O_1}^t (1 - g(\tau)) d\tau$$

3.7.7 experimental response time T_N : Value of the step response integral at t_{\max} (see 3.6.1):

$$T_N = T(t_{\max})$$

3.7.8 partial response time T_α : Maximum value of the step response integral (see figure 3b).

NOTE - Usually $T_\alpha = T(t_1)$ where t_1 is the time when $g(t)$ first reaches unit amplitude.

3.7.9 residual response time $T_R(t_i)$: Experimental response time minus the value of the step response integral at some specific time t_i where $t_i < t_{\max}$.

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i)$$

3.7.10 overshoot β : Amount by which the maximum value of the normalized step response $g(t)$ exceeds unity.

3.7.11 initial distortion time T_O : Area bounded by the zero line, the normalized step response $g(t)$ and the straight line used to determine O_1 (see figure 3a).

3.7.12 settling time t_s : Shortest time for which the residual response time $T_R(t)$ becomes and remains less than 2 % of t :

$$|T_N - T(t)| < 0,02 t_s$$

for all values of t in the epoch from t_s to t_{\max} (see figure 3b).

3.7.13 Equivalent Time T_E : Time parameter of calibration waveforms that:

- for direct voltage T_E is equal to 100 ms (arbitrary),
- for alternating voltage T_E is equal to one quarter of the period,
- for impulses T_E is equal to the time to peak T_p (for lightning impulses, use definition of T_p for switching impulses).

3.8 overall uncertainty θ : Estimate characterizing the range of values around the result of a measurement within which the true value of the measurand could lie; it is the combination of many individual uncertainties due to the presence of many influence quantities.

NOTE - It is assumed that most of the sources of uncertainty considered in this standard have a random character and can be regarded as independent; the preferred estimate for the overall uncertainty θ is:

$$\theta = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2}$$

where θ and each e_i are expressed at the same confidence level.

3.9 *Rated values*

3.9.1 Rated Measuring Voltage or Rated Measuring Current: Maximum level of voltage or current of specified frequency or waveform at which a Measuring System can be used within the uncertainty limits given in this part of IEC 60.

3.9.2 operating voltage or current range: Range of voltage or current of specified frequency or waveform in which a Measuring System can be used within the uncertainty limits given in this part of IEC 60.

NOTE – The limits of the operating range are chosen by the user and verified by the Performance Tests specified in this part of IEC 60.

3.9.3 operating time (for direct or alternating voltages): Time during which the Measuring System can operate at its Rated Measuring Voltage within the uncertainty limits given in this part of IEC 60.

3.9.4 maximum rate of application (for impulses): Maximum rate of application of impulses with a specified waveform, at which the Measuring System can operate within the uncertainty limits given in this part of IEC 60 for a specified time at its Rated Measuring Voltage or Rated Measuring Current.

3.10 *Definitions related to tests*

3.10.1 acceptance test: Test on a device or Measuring System before it is accepted for use. The acceptance test includes type tests (performed on a device of the same design) and routine tests (performed on every device) to assess its specific characteristics, for example, measurement of temperature coefficient of an element, withstand test, etc. In addition, the acceptance test on a Measuring System includes the first Performance Test.

3.10.2 Performance Test: Test on a complete Measuring System to characterize it under operating conditions.

3.10.3 Performance Check: Simple procedure to ensure that the most recent Performance Test is still valid.

3.10.4 Reference Record (impulses measurements only): Record taken under specified conditions in a Performance Test and retained for comparison with records to be taken in future tests or checks under the same conditions (see 9.3.2, 10.3.2, and 11.3.2).

4 Procedures for qualification and use of Measuring Systems

4.1 General principles

Approved Measuring Systems are required to undergo acceptance tests followed by tests and checks throughout their service lives.

The following are usually necessary:

- acceptance tests on system components (required once only),
- Performance Tests on the system (periodic, see 4.2),
- Performance Checks on the system (periodic, see 4.3).

A major requirement for converting devices, transmission systems and measuring instruments used in Measuring Systems is stability within their specified range of operating conditions so that the scale factor of the Measuring System remains constant over long periods.

The scale factor is determined in the Performance Tests.

Test facilities shall use the tests given in this part of IEC 60 to qualify their Measuring System(s). Alternatively, any test facility may choose to have the Performance Tests made by a National Laboratory or by an Accredited Calibration Laboratory: in this case the period of validity of each calibration is set by the National Laboratory or by the Accrediting Body.

Countries which choose to employ accreditation procedures to provide certified traceability in the implementation of this standard, shall meet the requirements given in annex A. Annex A is not applicable to the countries which do not choose to employ accreditation procedures.

Tables summarizing the tests to be performed on each type of Measuring System are given in annex F.

4.2 Schedule of Performance Tests

To maintain the quality of a Measuring System its Assigned Scale Factor(s) shall be determined by the Performance Tests of clause 6 repeated periodically: it is recommended that the tests of clause 6 should be repeated annually and in any case it shall be repeated at least once every five years.

Performance Tests shall be made after major repairs to the Measuring System and whenever a circuit arrangement which is beyond the limits already given in the Record of Performance is to be used.

When Performance Tests are required because a Performance Check shows that the Assigned Scale Factor has changed significantly, the cause of this change shall be investigated before the Performance Tests are made.

4.3 *Schedule of Performance Checks*

Performance Checks shall be made at intervals based on the recorded stability of the Measuring System as shown in the Record of Performance.

Initially Performance Checks shall be made at short intervals to determine this stability.

Performance Checks are described in 7.4, 8.4, 9.4, 10.4, and 11.4.

No reference method is identified for the Performance Checks because the required accuracy is less than that required for Performance Tests: users requiring higher accuracies should repeat the Performance Test more frequently.

4.4 *Requirements for the Record of Performance*

4.4.1 *Contents of the Record of Performance*

The results of all tests and checks with the conditions under which the results were obtained shall be kept in the Record of Performance established and maintained by the user.

An outline of the Record of Performance is given in 4.4.3, the full format of the recommended Record of Performance is given in annex B (informative), clauses B.1 to B.6 and a minimal form is given in clause B.7.

4.4.2 *Exceptions*

In the case of apparatus or equipment manufactured before the date of issue of this standard, if the evidence required in some of the acceptance tests (for example, 5.6 and 5.9) is not available, then Performance Tests (in accordance with clause 6) and checks made in accordance with earlier standards are deemed to be adequate provided they show the scale factor is stable. The results of these previous checks shall also be entered in the Record of Performance.

Approved Measuring Systems comprising several pieces of equipment used interchangeably, may be covered by a single Record of Performance including all the combinations possible with the least amount of duplication possible. Specifically, each converting device shall be covered individually, but transmission systems and instruments may be covered generically so that a range of cable lengths or similar instruments which meet the requirements of the relevant IEC standard may be indicated.

4.4.3 *Outline of a Record of Performance*

It is recommended that the format of each Record of Performance be as follows:

Chapter A: General descriptions of the Measuring System (see clause B.2)

Chapter B: Results of acceptance tests on converting devices, transmission systems and measuring instruments (see clause B.3)

Chapter C: Results of routine tests on the Measuring System, when performed (see clause B.4)

Chapters D: Results of Performance Tests on the Measuring System (see clause B.5)

Chapters E: Results of Performance Checks on the Measuring System (see clause B.6)

The successive chapters are identified by an ordinal number when needed (for example, Chapter A1 is the first general description of the system, Chapter A2 the description of the system after the first significant change, etc., Chapter D1 the initial Performance Test of the system, Chapter D2 the second one, etc. but Chapter B and Chapter C will not need repetition). For details see annex B.

The Assigned Scale Factor to be used shall be the one determined at the latest Performance Test and shall be filed under the latest Chapters D.

4.5 Operating conditions

An Approved Measuring System for voltages shall be connected directly to the terminals of the test object. The parasitic coupling between the test and measuring circuits should be minimized.

An Approved Measuring System for currents shall be connected in series with the test object.

An Approved Measuring System is usually designed for operating within the required limits of uncertainty in dry service conditions and in the absence of pollution.

Unless otherwise specified, Measuring Systems for direct and alternating voltages shall be designed for continuous operation.

Unless otherwise specified, the maximum rate of application for Measuring Systems for impulses shall be two per minute.

5 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System

5.1 *Applicability*

The tests described in this clause are required for components of Measuring Systems. However these tests are not required for transmission systems which consist only of cables nor for instruments which meet the requirements of the relevant standard referenced in clause 2. Some of these tests cannot be performed on existing equipment (see 5.6 and 5.9); for these cases see 4.4.2.

For some of the tests described in this clause it is necessary to include the component in an appropriate Measuring System (whose other components have been shown to be linear), for example, the linearity test of 5.3.

5.2 *Determination of the scale factor*

The determination of the scale factor of a component may be made by one of the following methods:

- simultaneous measurements of its input and output quantities,
- a bridge method,
- calculation based on measured impedances.

The scale factor of a current-measuring shunt shall be measured by direct current methods.

5.3 *Linearity test*

Values of the scale factor of the Measuring System shall be measured at the minimum and maximum voltages (or currents) of the operating range and at three approximately equally spaced voltages or currents between these extremes. These five values shall not differ by more than ± 1 % from their mean value.

The reference method is by comparison with a Reference Measuring System according to 6.2 a).

Alternative methods are:

either comparison with an Approved Measuring System, the linearity of which has been established by the reference method

or one of the additional methods described in the relevant clauses of this standard.

These additional methods are provided to allow users alternative tests which may be economic. However, failure to meet the requirements of these tests does not necessarily show that a Measuring System is non-linear.

In such a case either the reference method or the method of comparison with an Approved Measuring System shall be used.

5.4 *Short-term stability test*

The full rated voltage or current shall be applied to the device continuously (or in the case of impulses, at the maximum rate) for a period appropriate to the anticipated use.

The scale factor shall be measured before and immediately after (within 10 min) the application of the voltage or current. The two values shall not differ by more than 1 %.

5.5 *Long-term stability of single elements*

The stability characteristics, voltage and current effects and temperature effects of each type of element, shall be such that the scale factor of a converting device does not change by more than 1 % between successive Performance Tests.

These characteristics may be taken from manufacturer's data or demonstrated by successive Performance Tests.

5.6 *Temperature effect*

The variations of the scale factor or of a parameter (for example, resistance or capacitance) of a device due to changes of the ambient temperature are determined by computation using the temperature coefficients of single elements or by making measurements at different temperatures.

The temperature coefficients shall be listed in the Record of Performance and may be taken from manufacturer's data.

Temperature correction factors may be used in cases where the ambient temperature varies over a wide range. Any temperature corrections to be used shall be listed in the Record of Performance.

In each case, it shall be shown that the scale factor is within 1 %, taking into account any temperature correction (see annex D).

5.7 *Proximity effect*

Variations of the scale factor or of a parameter of a device, due to proximity effects, can be determined by measurements performed for different distances of the device from an earthed wall or an energized structure, the distances from other earthed walls or energized structures remaining constant or so large there is no effect.

For each range of distances listed in the Record of Performance, it shall be shown that the scale factor is within 1 %.

For current measurements, the effects of off-centre paths (when relevant) and the effects of nearby paths for high currents can be determined by measurements performed for different paths and distances to current-carrying conductors.

NOTE – Some test facilities may choose to approve their Measuring Systems for only a single set of distances, or for a few sets or ranges of distances.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8 *Dynamic behaviour of a component*

The response of the component shall be determined in a Measuring System representative of its operating conditions, particularly clearances to earthed and energized structures. Either the amplitude/frequency response or the step response shall be measured.

5.8.1 *Determination of the amplitude/frequency response*

The system is subjected to a sinusoidal input of known amplitude, usually at low level, and the output is measured. This measurement is repeated for an appropriate range of frequencies.

5.8.2 *Determination of the step response*

The system is subjected to a voltage or current step and its output is measured (see annex C). The rise time of the applied step should be less than $1/10$ of the partial response time T_{α} .

5.9 *Withstand tests*

A converting device shall pass a dry withstand test performed with a voltage or current of the required frequency or shape at a level of 110 % of the Rated Measuring Voltage or Rated Measuring Current. For the procedures of withstand tests see IEC 60-1.

Wet tests and pollution tests, when specified, are performed as type tests.

The withstand tests shall be performed at the polarity or polarities at which the system is to be used.

NOTE - Design and construction of any component of an Approved Measuring System should be such that it can withstand a disruptive discharge at the test object without any change in its characteristics.

6 Performance Tests on Measuring Systems

6.1 General requirements

The Assigned Scale Factor of the Measuring System is determined by calibration using the specified Performance Tests. For an Impulse Measuring System, the Performance Tests also show that its dynamic performance is adequate for the specified measurements and that the level of any disturbance is less than the specified limits.

In high-voltage tests, the size of the apparatus, the levels of voltage and current used, and the interaction between the test and measuring circuits often make it necessary to perform calibration tests in the test facility of the user.

However, Measuring Systems or their components may be transported to another laboratory for calibration in an arrangement which simulates the operating conditions, provided that the interference test, when specified, is performed in the test facility of the user. The simulated arrangement shall represent the operating conditions described in the Record of Performance and this simulated arrangement shall also be described in the Record of Performance.

Unless type tests show a converting device is not sensitive to proximity effects over a specified range of clearances the Assigned Scale Factor of any Measuring System based on that converting device shall be measured for each condition of use. Each set of clearances or range of clearances shall be entered in the Record of Performance.

The input voltage or current used for calibration should be of the same type, frequency or waveform as voltages or currents to be measured. When this condition is not fulfilled, evidence shall be given of the validity of the Assigned Scale Factor in the range of frequency or waveforms to be used.

The reference method of determining the Assigned Scale Factor is comparison with a Reference Measuring System at the Rated Measuring Voltage or Rated Measuring Current whenever possible. However, as Reference Measuring Systems are not always available at the highest voltages and currents, the comparison may be made at voltages or currents as low as 20 % of the Rated Measuring Voltage or Rated Measuring Current (see 6.2 a)).

For lightning impulses with peak values over 1 MV, it may be made at 200 kV. Alternatively, the Assigned Scale Factor may be determined by measuring the scale factor of each component, usually at low voltage, and taking the product of the scale factors of the components (see 6.2 b)).

The voltage or current used to determine the Assigned Scale Factor shall be included in the range covered by the linearity test.

All equipment used in establishing the scale factors of Measuring Systems and all instruments used in Measuring Systems shall have calibrations traceable to National Measurement Standards (Etalons).

The conditions under which the calibration has been performed shall be included in the Record of Performance.

6.2 Determination of the Assigned Scale Factor

a) Reference method: comparison with a Reference Measuring System

A Reference Measuring System shall be connected in parallel (voltage) or in series (current) with the Measuring System to be calibrated. Simultaneous readings shall be taken on both systems; the value of the input quantity obtained for each measurement by the Reference Measuring System is divided by the corresponding reading of the instrument in the system under test to obtain a value F_i of its scale factor. The procedure is repeated to obtain n independent readings ($n \geq 10$) and the mean value F_m is taken as the Assigned Scale Factor of the system under test, provided that the experimental standard deviation s as calculated from:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)^2}{n-1}}$$

is less than 1 % of F_m .

NOTES

- 1 A rounded value F_0 may be taken as the Assigned Scale Factor if, introduced in place of F_m in the formula for s , it gives the value of s less than 1 % of F_m .
- 2 For measurement of direct and alternating voltages, independent readings may be obtained either by applying the test voltage and taking n readings or by applying the test voltage n times and taking a reading each time. For impulses, n impulses are applied.

The test shall be performed at a single voltage or current level (see 6.1). The setting of the measuring instrument may be changed or a different instrument may be used to achieve a suitable sensitivity, provided that this change does not alter the rest of the Measuring System and that the settings used on each instrument have been calibrated.

If only one measuring instrument is available (this measuring instrument is the instrument to be used in the Approved Measuring System and shall meet the relevant IEC standard) the test may be made by the repeated alternate connection of the instrument to each system to provide the n values F_i . A termination equivalent to the instrument shall be connected in the place of the instrument in the other system. All other parts of both systems shall remain unchanged.

A Measuring System with several scale factors (for example, the use of different low-voltage arms for a voltage divider) shall be calibrated for each scale factor. Measuring Systems with secondary voltage dividers may be calibrated on one setting only, provided that the load on the output of the converting device can be shown to be constant for all settings by other tests. For such cases the full range of settings of the secondary divider shall be calibrated separately.

NOTE - For the use of oscilloscope probes see annex G.

b) *Alternative Method: component calibration*

The Assigned Scale Factor shall be determined as the product of the scale factors of its converting device, its transmission system and its measuring instrument.

For the converting device and the transmission system or their combination, the scale factor shall be measured by one of the methods given in 5.2 to assure a total uncertainty not larger than 1 % (care should be taken to ensure the appropriate "stray" capacitance or coupling and the mutual influence of the components are included in the measurement).

The scale factor of an instrument is determined according to the relevant IEC standard (see clause 2) or by performing the relevant tests given in this part of IEC 60.

6.3 *Dynamic behaviour test (for Impulse Measuring Systems)*

a) *Reference method: comparison with a Reference Measuring System*

The same records taken in the test of 6.2 a) can be used and the relevant time parameters of the measured impulses evaluated for each system and:

- the value of each time parameter shall be within ± 10 % of the corresponding value measured by the Reference Measuring System,
- for each time parameter, the experimental standard deviation of the ratio of the corresponding readings of the system under test and the Reference Measuring System shall be less than 5 % of the mean value of the ratio.

b) *Alternative Method: step response measurement*

The step response of the Measuring System shall be measured according to 5.8.2. The relevant response parameters shall be determined and shall meet the requirements given in the relevant clause of this part of IEC 60.

6.4 *Interference test (for Impulse Measuring Systems)*

The test shall be made on the Measuring System, with its cable or transmission system short-circuited at its input terminals without changing the earth connections of the cable or transmission system. An interfering condition shall be produced at the input of the Measuring System (for voltage measurements – by a disruptive discharge with an impulse representative of the waveform to be applied; for current measurements – by operation of an appropriate device) and the output shall be recorded. The test shall be made at the Rated Measuring Voltage or Rated Measuring Current.

The amplitude of the measured interference shall be less than 1 % of the output of the Measuring System when measuring the test voltage or current. Interference greater than 1 % is permitted provided it is shown that it does not affect the measurement.

7 Measurement of direct voltage

7.1 Requirements for an Approved Measuring System

The general requirement is to measure the value (arithmetic mean) of the test voltage with an overall uncertainty within $\pm 3\%$.

The uncertainty limits shall not be exceeded in the presence of ripple, the magnitude of which is within the limits given in IEC 60-1.

NOTE - Attention is drawn to the possible presence of alternating voltages coupled to the Measuring System and affecting the reading of the measuring instrument.

7.1.1 Stability of the scale factors

The scale factors of the converting device and the transmission system shall not vary by more than $\pm 1\%$ within the ranges of the ambient temperature and humidity given in the Record of Performance.

A converting device for direct voltage shall be constructed so as to conduct directly to earth all leakage current on its external surfaces and to keep internal leakage current negligible relative to the measuring current.

NOTE - To maintain a low ratio between the leakage and measuring currents, a measuring current as high as 0,5 mA at the rated voltage may be necessary.

Measuring instruments shall comply with the requirements of class 0,5 of IEC 51 or shall be tested according to this standard.

7.1.2 Dynamic behaviour for measuring rising voltages

The experimental response time T_N of an Approved Measuring System shall not be larger than 0,5 s. This will permit measurement with the accuracy required by 7.1 when the voltage is increased at the rate specified for dielectric tests in IEC 60-1.

NOTES

1 In some cases the response time of a converting device is kept much lower than 0,5 s to improve its behaviour in case of flashover in the test circuit. However, to avoid ripple on the high-voltage source affecting the measured value, the response time of the Measuring System (which includes the measuring instrument) should be greater than $5/f$ where f is the fundamental frequency of the ripple.

2 In certain cases, for example, in pollution tests, it may be necessary to detect and measure transient components. No requirements for this are given here, but some guidance may be obtained from clause 9.

7.2 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System

The requirements of the type tests can be met by tests on a unit of the same type or sometimes from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each unit. See clause 5 for details and 4.4.2 for exceptions.

The components of a Measuring System shall meet the requirements of the following type and routine tests:

Type tests:

- temperature effect on the converting device and the transmission system and on their Scale Factors (5.6),
- long-term stability (5.5),
- wet or polluted withstand test on the converting device (if required) (5.9),
- dynamic behaviour (5.8).

Routine tests:

- determination of the scale factors (5.2),
- linearity test (5.3, additional alternative methods 7.2.1),
- short-term stability (5.4),
- dry withstand test on the converting device (5.9).

7.2.1 Linearity test: requirements and additional alternative methods

The linearity test shall be made according to 5.3 using each polarity with which the system is to be approved.

Additional alternative methods are:

a) Comparison with a rod/rod gap

The Measuring System shall be checked against a rod/rod gap, as shown in figure 19 of IEC 60-1, and within the limits of gap spacing and humidity given in clause C.2 of the same publication. The test shall be made with gap spacings corresponding to the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced gap settings between these extremes.

The complete linearity test shall be made in a short time so that atmospheric conditions do not change and hence no corrections need be applied.

The procedure given in clause C.3 of IEC 60-1 is used except that no atmospheric corrections need be applied. If each of the five ratios of the disruptive discharge voltage of the gap to the corresponding output of the system under test is within ± 1 % of their mean value then the system can be considered linear.

b) Specific test for multi-section devices

For a converting device made of several identical high-voltage units, the test shall be made by first checking the linearity of each unit as described in 5.3 and then by checking the assembled units at Rated Measuring Voltage by comparing the current into the high-voltage end of the device with that out of its low-voltage end. The measured values shall not differ by more than ± 1 %.

c) *Comparison with input voltage of a linear a.c./d.c. converter*

The output of the Measuring System shall be checked against the peak value of the alternating voltage input to the rectifier network. Tests shall be made at the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced voltages between these extremes.

If each of the five ratios of the measured voltage to the corresponding peak value of the alternating voltage input to the rectifier is within ± 1 % of their mean value then the Measuring System can be considered linear.

7.3 *Performance Test on Measuring Systems*

The Assigned Scale Factor shall be determined according to 6.2.

7.4 *Performance Check*

The scale factor of an Approved Measuring System shall be checked by one of the following methods.

a) *Check of the scale factors of its components*

The scale factor(s) of each component shall be checked, using internal or external calibrators having an uncertainty within ± 1 %. If the difference of each scale factor from its previous value is not larger than ± 1 %, the Assigned Scale Factor is taken as still valid. If any difference exceeds 1 %, then a new value of the Assigned Scale Factor shall be determined (see third paragraph of 4.2).

b) *Check of the scale factor of the Measuring System*

A comparison shall be made with another Approved Measuring System with the procedure of 6.2 a) or with an IEC Standard Measuring Device used according to appendix C of IEC 60-1. When the difference between the two measured values is within ± 3 %, the Assigned Scale Factor is taken as valid. When the difference is larger, then a new value of the Assigned Scale Factor shall be determined (see third paragraph of 4.2).

7.5 *IEC Standard Measuring Device*

The rod/rod gap, designed and used in accordance with appendix C of IEC 60-1, is an IEC Standard Measuring Device for direct voltage with an uncertainty within ± 3 % (see E.3).

7.6 *Measurement of ripple amplitude*

7.6.1 *Requirements for an Approved Measuring System*

The ripple amplitude shall be measured with an overall uncertainty within ± 10 % of the ripple amplitude or ± 1 % of the arithmetic mean value of the direct voltage, whichever is larger.

Separate Measuring Systems may be used to measure the mean value of the voltage and the ripple amplitude, or the same converting device can be used with two separate instruments.

The tests specified in 7.6.2 and 7.6.3 shall be applied only to systems used to measure the ripple amplitude and are Performance Tests.

7.6.2 *Measurement of the scale factor at the ripple frequency*

The scale factor of the Measuring System shall be determined at the fundamental frequency f of the ripple, with an uncertainty within $\pm 3\%$. This scale factor may be determined as the product of the scale factors of the components.

7.6.3 *Dynamic behaviour*

The upper limit frequency f_2 of the amplitude/frequency response of the Measuring System shall be greater than 10 times the fundamental frequency f of the ripple.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8 Measurement of alternating voltage

8.1 Requirements for an Approved Measuring System

The general requirement is to measure the peak or the r.m.s. value of a test voltage at its rated frequency with an overall uncertainty within $\pm 3\%$.

8.1.1 Stability of the scale factor

The scale factors of the converting device and the transmission system shall not vary by more than $\pm 1\%$ for the ranges of the ambient temperature and clearances given in the Record of Performance.

Measuring instruments shall comply with the requirements of class 0,5 of IEC 51 or shall be tested according to this standard. If a peak voltmeter is used, its uncertainty shall be within $\pm 1\%$.

8.1.2 Dynamic behaviour

The amplitude/frequency response of the Measuring System shall not vary by more than $\pm 2\%$ between 0,2 times and seven times the frequency of the test voltage. When the presence of the test object enhances the harmonic content above the seventh harmonic the amplitude/frequency response shall not vary by more than $\pm 2\%$ up to the frequency of the highest significant harmonic. Special requirements may be specified by the relevant technical committee.

NOTES

- 1 In certain cases, it may be necessary to measure voltage transients superimposed on an alternating voltage. No requirements for this are given here but some guidance may be obtained from clause 9.
- 2 Some sources do not generate harmonics (for example, series resonant test sets).

8.2 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System

The requirements of the type tests can be met by tests on a unit of the same type or sometimes from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each unit. See clause 5 for details and 4.4.2 for exceptions.

The components of a Measuring System shall meet the requirements of the following type and routine tests:

Type tests:

- temperature effect on the converting device and the transmission system and on their scale factors (5.6),
- long-term stability (5.5),
- proximity effect (if required) (5.7),
- wet or polluted withstand test on the converting device (if required) (5.9),
- dynamic behaviour (5.8).

Routine tests:

- determination of the scale factors (5.2),
- linearity test (5.3, additional alternative methods 8.2.1),
- short-term stability (5.4),
- dry withstand test on the converting device (5.9).

8.2.1 Linearity test: requirements and additional alternative methods

The linearity test shall be made according to 5.3.

Additional alternative methods are:

a) Comparison with a sphere-gap

The Measuring System shall be checked against a sphere-gap used according to 8.5 of IEC 52. Tests shall be made with gap spacings corresponding to the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced gap settings between these extremes.

The complete linearity test shall be made in a short time so that atmospheric conditions do not change and hence corrections need not be applied. If each of the five ratios of the disruptive discharge voltage of the gap to the corresponding output of the system under test is within ± 1 % of their mean value then the system can be considered linear.

b) Method for multi-section capacitor converting devices

For a converting device consisting of several identical high-voltage units a test consisting of the following three steps shall be made:

- a type test on an equivalent complete converting device (equipped with its electrodes) as specified in 5.3,
- measurement of the capacitance of each high-voltage unit at the five voltages specified in 5.3. The capacitance of each unit shall not change over the voltage range by more than ± 1 %,
- the assembled converting device shall be free from visible and audible corona at the Rated Measuring Voltage.

c) Comparison with the input voltage of a transformer or a transformer cascade

The Measuring System shall be connected to measure the output of the transformer. The output of the Measuring System shall be checked against the input voltage of the transformer. Tests shall be made at the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced voltages between these extremes. If each of the five ratios of the measured voltage to the corresponding input voltage is within ± 1 % of their mean value then the Measuring System is considered linear.

NOTE - Attention should be paid to the possible variation of the voltage ratio of the transformer because of the load and non-linear characteristics of the magnetic circuit.

d) *Comparison with the output of an electric-field measuring instrument*

The Measuring System shall be checked against an electric-field measuring instrument which is so located that it measures a field proportional to the voltage being measured. The electric-field measuring instrument is used according to the relevant requirements of IEC 833. The test shall be made at the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced voltages between these extremes. If each of the five ratios of the measured voltage to the corresponding measured electric field is within $\pm 1\%$ of their mean value then the Measuring System is considered linear.

8.2.2 *Determination of the scale factor of a peak voltmeter*

The scale factor shall be determined using a known sinusoidal voltage of rated frequency.

NOTE – Indicating instruments other than peak voltmeters are calibrated according to IEC 51.

8.3 *Performance Test on Measuring Systems*

The Assigned Scale Factor shall be determined according to 6.2.

8.4 *Performance Check*

The scale factor(s) of an Approved Measuring System can be checked by one of the following methods.

a) *Check of the scale factors of the components*

The scale factor(s) of each component can be checked using internal or external calibrators having an uncertainty within $\pm 1\%$. If each scale factor differs from its previous value by not more than $\pm 1\%$, the Assigned Scale Factor is taken as still valid. If any difference exceeds $\pm 1\%$ then a new value of the Assigned Scale Factor shall be determined (see third paragraph of 4.2).

b) *Check of the scale factor of the Measuring System*

A comparison shall be made with another Approved Measuring System with the procedure of 6.2 a) or with an IEC Standard Measuring Device according to IEC 52.

When the difference between the two measured values is within $\pm 3\%$, the Assigned Scale Factor is taken as still valid. When the difference is larger, then the Assigned Scale Factor shall be determined again (see third paragraph of 4.2).

8.5 *IEC Standard Measuring Device*

The sphere-gap, used according to IEC 52, is an IEC Standard Measuring Device for the peak value with an uncertainty within $\pm 3\%$.

9 Measurement of lightning impulse voltage

9.1 Requirements for an Approved Measuring System

The general requirements are:

- to measure the peak value of full impulses with an overall uncertainty within $\pm 3\%$,
- to measure the peak value of chopped impulses with an overall uncertainty e which is dependent on the time to chopping T_c as follows:

for front-chopped impulses $e \leq \pm 5\%$
($0,5 \mu\text{s} \leq T_c < 2 \mu\text{s}$)

for tail-chopped impulses $e \leq \pm 3\%$
(for $T_c \geq 2 \mu\text{s}$)

- to measure the time parameters which define the waveform with an overall uncertainty within $\pm 10\%$,
- to measure oscillations which may be superimposed on an impulse to ensure that they do not exceed the permitted levels given in IEC 60-1.

NOTES

- 1 Chopped impulses with $T_c < 0,5 \mu\text{s}$ are under consideration.
- 2 No recommendations are given for the measurement of voltage collapse since no IEC apparatus committee has yet specified a requirement.

9.1.1 Stability of the scale factor

The scale factors of the converting device and the transmission system shall not vary by more than $\pm 1\%$ for the ranges of the ambient temperature and clearances given in the Record of Performance.

The measuring instrument shall comply with IEC 790 or IEC 1083-1.

9.1.2 Dynamic behaviour

The dynamic behaviour of a Measuring System is adequate for the measurement of peak voltage and time parameters over the range of waveforms specified in the Record of Performance when:

- the scale factor is constant within the following limits:
 - within $\pm 1\%$ for full and tail-chopped impulses
 - within $\pm 3\%$ for front-chopped impulses
- the uncertainty of the time parameters measured by the system is within $\pm 10\%$.

To reproduce oscillations that may be superimposed on an impulse, the relevant limits on the upper limit frequency f_2 of the Measuring System or on the partial response time T_α should be:

for oscillations on the peak: $f_2 > 5 \text{ MHz}$ or $T_\alpha < 30 \text{ ns}$

for oscillations on the front: $f_2 > 10 \text{ MHz}$ or $T_\alpha < 15 \text{ ns}$

Historically, one Measuring System has been used to measure all of the required quantities, i.e. the peak value, the time parameters, and oscillations. However, many systems which could be approved for measurements of peak value and time parameters cannot be approved for measurements of oscillations. In this case a Measuring System may be approved for measurements of peak voltage and time parameters while an auxiliary system is approved for measurements of oscillations (at a lower voltage if necessary).

9.1.3 *Connection to the test object*

The converting device shall be connected directly to the terminals of the test object. The converting device shall not be connected between the voltage source and the test object. The lead to the converting device shall carry only the current to the Measuring System. The converting device should be placed so that coupling between the test and measuring circuits is negligible.

9.2 *Acceptance tests on components for an Approved Measuring System*

The requirements of the type tests can be met by tests on a unit of the same type or sometimes from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each unit. See clause 5 for details and 4.4.2 for exceptions.

The components of a Measuring System shall meet the requirements of the following type and routine tests:

Type tests:

- temperature effect on the converting device and the transmission system and on their scale factors (5.6),
- long-term stability (5.5),
- proximity effect (if required) (5.7),
- wet or polluted withstand test on the converting device (if required) (5.9),
- interference test on a transmission system with active elements (6.4),
- dynamic behaviour (5.8).

Routine tests:

- determination of the scale factors (5.2),
- linearity test (5.3, additional alternative methods 9.2.1),
- short-term stability (5.4),
- dry withstand test on the converting device (5.9).

9.2.1 *Linearity test: requirements and additional alternative methods*

Linearity tests shall be made according to 5.3 using each polarity for which the system is to be approved and lightning impulses with a single waveform. Full lightning impulses may be used to establish the linearity of Measuring Systems for chopped lightning impulses.

Additional alternative methods:

a) *Comparison with a sphere-gap*

The Measuring System shall be checked against a sphere-gap used according to 9.5. The test shall be made with gap spacings corresponding to the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced gap settings between these extremes.

The complete linearity test shall be made in a short time so that no atmospheric changes occur and hence no corrections need be applied. If each of these five ratios of the disruptive discharge voltage of the sphere-gap to the corresponding output of the system under test is within ± 1 % of their mean value then the system can be considered linear.

b) *Method for multi-section converting devices*

For a converting device consisting of several identical high-voltage units a test consisting of the following three steps shall be made:

- a type test on an equivalent complete converting device (equipped with its electrodes) according to 5.3,
- a linearity test of each unit according to 5.3,
- the assembled converting device shall be free from visible corona at the Rated Measuring Voltage.

c) *Comparison with charging voltage of the impulse generator*

The Measuring System shall be checked against the charging voltage of the impulse generator. Tests shall be made at the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced voltages between these extremes. If each of these five ratios of the measured voltage to the corresponding charging voltage is within ± 1 % of their mean value then the system can be considered linear.

NOTE - In this method the charging conditions at the instant of firing the impulse generator should be the same.

d) *Comparison with the output of an electric-field measuring instrument*

The Measuring System shall be checked against an electric-field measuring instrument which is so located that it measures a field proportional to the voltage being measured. The test shall be made at the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced voltages between these extremes. If each of the ratios of the measured voltage to the corresponding measured electric field is within ± 1 % of their mean value then the Measuring System is considered linear.

9.3 Performance Test on Measuring Systems

The following tests shall be made:

- determination of the Assigned Scale Factor (9.3.1),
- dynamic behaviour (9.3.1),
- interference test (6.4).

9.3.1 Determination of the Assigned Scale Factor and Nominal Epoch(s) (dynamic behaviour)

a) Reference method

The Assigned Scale Factor and dynamic behaviour of the Measuring System shall be determined by comparison with a Reference Measuring System, using the procedure given in 6.2 a) and 6.3 a). The Nominal Epoch shall be determined by using impulses with two different waveforms such that:

For full and tail-chopped impulses:

- the shorter front time gives t_{\min} (see 3.6.1),
- the longer front time gives t_{\max} (see 3.6.1),
- both these waveforms should have the longest time to half-value (approximately) for which the Measuring System is to be approved.

For front-chopped impulses

- the shorter time to chopping gives t_{\min} (see 3.6.1),
- the longer time to chopping gives t_{\max} (see 3.6.1).

Alternatively, one of the following tests may be used:

b) Comparative Measurement using impulses with a single waveform supplemented by a measurement of the step response

A comparative measurement shall be made against a Reference Measuring System according to 6.2 a) and 6.3 a) using full impulses with a front time $T_{1\text{cal}}$ and a time to half-value approximately equal to the longest time to half-value $T_{2\text{max}}$ for which the Measuring System is to be approved.

In addition the step response of the Measuring System shall be measured according to 5.8.2. The Reference Level(s) of the Nominal Epoch(s) for which the system is to be approved shall not differ from the value of the step response at the time $T_{1\text{cal}}$ by more than:

- $\pm 1\%$ for full and tail-chopped impulses
- $\pm 3\%$ for front-chopped impulses

or if there are high-frequency oscillations on the step response in the Nominal Epoch, then it shall be shown that:

- the settling time t_s is less than t_{\min} for full and chopped impulses,
- the residual response time $T_R(t)$ is less than $t/200$ throughout the Nominal Epoch for front-chopped impulses.

The step response shall not change by more than 5 % in the range t_{\min} to $T_{2\text{max}}$ where $T_{2\text{max}}$ is the longest time to half-value for which the system is to be approved.

c) Measurement of the scale factors of the components and determination of the response parameters from the step response

The Assigned Scale Factor of the Measuring System shall be determined according to 6.2 b).

The step response of the Measuring System shall be measured according to 5.8.2. The step response shall be constant within $\pm 1\%$ from t_{\min} up to the Equivalent Time T_E of the waveform used for the measurement of the Assigned Scale Factor (see 3.7.13).

For full and tail-chopped impulses the step response shall be constant within $\pm 1\%$ for the Nominal Epoch. Alternatively, if there are high-frequency oscillations on the step response, it is sufficient to show that the settling time t_s is less than t_{\min} . For front-chopped impulses the step response shall be constant within $\pm 3\%$ in this Nominal Epoch. Alternatively, if there are high-frequency oscillations on the step response, it is sufficient to show that the absolute value of the Residual Response Time $T_R(t)$ is less than $t/200$ throughout this Nominal Epoch.

In addition, the step response shall not deviate from the reference level by more than 5 % for the longest time to half-value for which approval is sought.

NOTE – The following recommendations are provided to assist laboratories in their assessment of Measuring Systems. It is emphasized that compliance with these recommendations is not always sufficient (and may not always be necessary) to ensure adequate dynamic characteristics of a Measuring System.

When measuring a full and tail-chopped impulses with a front time T_1 , the overshoot β and the partial response time T_α should be such that β and T_α/T_1 are within the shaded area of figure 4.

When measuring impulses chopped on the front in the range of chopping time T_c to be considered, the following conditions should be met:

- the settling time should be such that:

$$t_s \leq T_c$$

- the experimental response time T_N and partial response time T_α should be such that:

$$T_\alpha - 0,03 T_c \leq T_N \leq 0,03 T_c$$

- and the initial distortion time T_0 should be small so that:

$$T_0 \leq 0,005 T_c$$

When the step response is used for assessing the characteristics of the Measuring System, the Record of Performance shall include:

- the record of the unit step response, with the indication of O_1 and the horizontal line corresponding to each Reference Level,
- the values of T_α , T_N , t_s and β .

9.3.2 *Reference Record (optional)*

When wanted for use in Performance Checks, the step response of the Measuring System shall be recorded using the method of 5.8.2. This shall be included in the Record of Performance for use as a Reference Record ("fingerprint") to permit detection of changes in the dynamic behaviour at subsequent Performance Checks (see 9.4.1).

9.4 *Performance Check*

9.4.1 *Check of scale factor and dynamic behaviour*

The scale factor(s) and dynamic behaviour of an Approved Measuring System can be checked by one of the following methods.

a) *Check of the scale factors of the components and the step response of the Measuring System*

The scale factor(s) of each component shall be checked using internal or external calibrators having an uncertainty within $\pm 1\%$. If the scale factors differ from their previous values by not more than 1 %, the Assigned Scale Factor is taken as valid. If any difference exceeds $\pm 1\%$ then a new value of the Assigned Scale Factor shall be determined in a Performance Test (see third paragraph of 4.2).

In each check the step response shall be recorded in the same manner and in the same circuit as was used to obtain the Reference Record (see 9.3.2). The step response record shall be compared with those from previous checks. Small variations can be expected from check to check and the extent of acceptable variations shall be established by the early checks. Any large variations shall be investigated and a Performance Test shall be made.

b) *Comparison with an Approved Measuring System*

A comparison shall be made with another Approved Measuring System (or Reference Measuring System) using the procedure given in 6.2 a) and 6.3 a) with a single waveform but the number of impulses used may be chosen. When the difference between the two measured values of the scale factor is less than 3 %, the Assigned Scale Factor is taken as still valid.

When the difference is larger, then a new value of the Assigned Scale Factor shall be determined in a Performance Test (see 4.2). The value of each time parameter shall be within $\pm 10\%$ of the corresponding value measured by the other Measuring System. When any difference is larger than 10 % then new values of the limits of the Nominal Epoch shall be determined in a Performance Test (see third paragraph of 4.2).

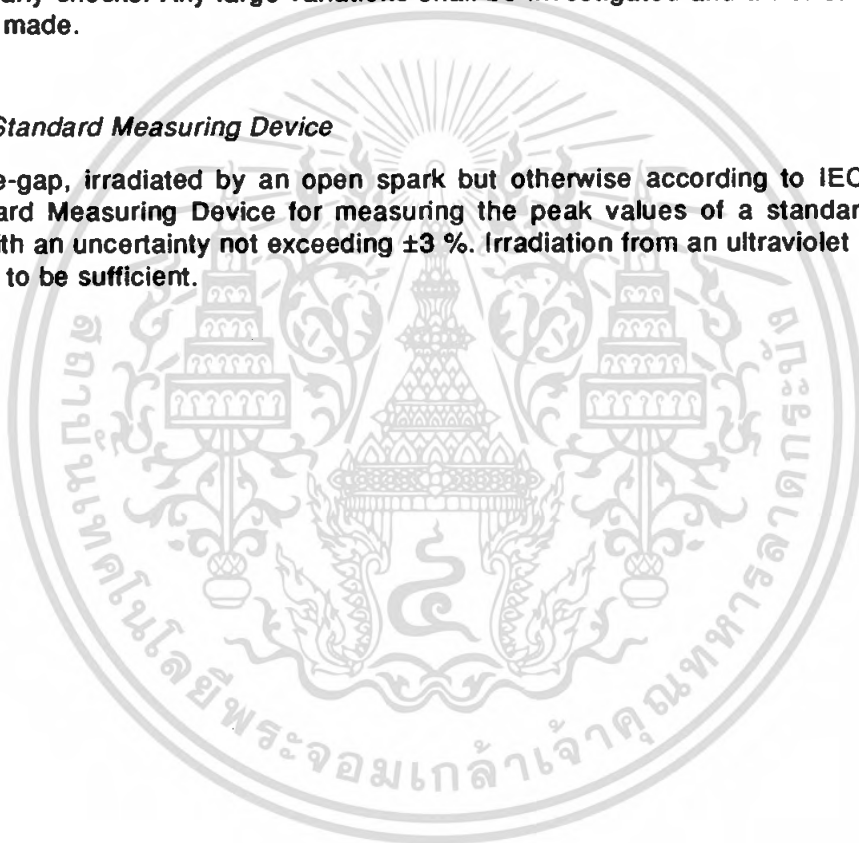
c) Check of the scale factor with a sphere gap and measurement of the step response of the Measuring System

A comparison is made with a sphere gap according to 9.5. When the difference between the two measured values of the scale factor is not larger than 3%, the Assigned Scale Factor is taken as valid. When the difference is larger, then a new value of the Assigned Scale Factor shall be determined in a Performance Test (see third paragraph of 4.2).

In each check the step response shall be recorded in the same manner and in the same circuit as was used to obtain the Reference Record (see 9.3.2). The step response record shall be compared with those from previous checks. Small variations can be expected from check to check and the extent of acceptable variations shall be established by the early checks. Any large variations shall be investigated and a Performance Test shall be made.

9.5 IEC Standard Measuring Device

The sphere-gap, irradiated by an open spark but otherwise according to IEC 52, is an IEC Standard Measuring Device for measuring the peak values of a standard lightning impulse, with an uncertainty not exceeding $\pm 3\%$. Irradiation from an ultraviolet lamp is not considered to be sufficient.



10 Measurement of switching Impulse voltage

10.1 Requirements for an Approved Measuring System

The general requirements are:

- to measure the peak value of switching impulses with an overall uncertainty within $\pm 3\%$,
- to measure the time parameters which define the waveform with an overall uncertainty within $\pm 10\%$.

10.1.1 Stability of the scale factor

The scale factors of the converting device and the transmission system shall not vary by more than $\pm 1\%$ for the ranges of ambient temperature and clearances given in the Record of Performance.

The measuring instrument shall comply with IEC 790 or IEC 1083-1.

10.1.2 Dynamic behaviour

The dynamic behaviour of a Measuring System is adequate when:

- the scale factor is constant within $\pm 1\%$ over the range of impulse waveforms specified in the Record of Performance,
- the overall uncertainty of the measured time parameters is within $\pm 10\%$.

10.1.3 Connection to the test object

The Approved Measuring System shall be connected directly to the terminals of the test object. In contrast to measurements of Lightning Impulses (see 9.1.3), the Measuring System may be interposed between the voltage source and the test object. The coupling between the test and measuring circuits should be negligible.

10.2 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System

The requirements of the type tests can be met by tests on a unit of the same type or sometimes from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each unit. See clause 5 for details and 4.4.2 for exceptions.

The components of a Measuring System shall meet the requirements of the following type and routine tests:

Type tests:

- temperature effect on the converting device and the transmission system and on their scale factors (5.6),
- long-term stability (5.5),
- proximity effect (if required) (5.7),
- wet or polluted withstand test on the converting device (if required) (5.9),
- interference test on a transmission system with active elements (6.4),
- dynamic behaviour (5.8).

Routine tests:

- determination of the scale factors (5.2),
- linearity test (5.3, additional alternative methods 10.2.1),
- short-term stability (5.4),
- dry withstand test on the converting device (5.9).

10.2.1 Linearity test: requirements and additional alternate methods

The linearity test shall be made according to 5.3 using each polarity for which the system is to be approved and switching impulses with a single waveform.

Additional alternative methods are:

a) Comparison with a sphere-gap

The Measuring System shall be checked against a sphere-gap according to 10.5. The test shall be made with gap spacings corresponding to the minimum and maximum values of the operating voltage range of the system and at three equally-spaced gap settings between these extremes. The complete linearity test shall be made in a short time so that no atmospheric changes occur and hence no corrections need be applied. If each of the five ratios of the disruptive discharge voltage of the sphere-gap to the corresponding output of the system under test is within $\pm 1\%$ of their mean value then the system can be considered linear.

b) Method for multi-section converting devices

For a converting device consisting of several identical units a test consisting of the following three steps shall be made:

- a type test on an equivalent complete converting device (equipped with its electrodes) as specified in 5.3,
- measurement of the scale factor of each unit at the five voltages specified in 5.3. The scale factor of each unit shall not change over the voltage range by more than $\pm 1\%$,
- the assembled converting device shall be free from visible corona at the Rated Measuring Voltage.

c) Comparison with charging voltage of the impulse generator

The Measuring System shall be checked against the charging voltage of the impulse generator. Tests shall be made at the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced voltages between these extremes. If each of these five ratios of the measured voltage to the corresponding charging voltage is within $\pm 1\%$ of their mean value then the system can be considered linear.

NOTE - In this method the charging conditions at the instant of firing the impulse generator should be the same.

d) *Comparison with the output of an electric-field measuring instrument*

The Measuring System shall be checked against an electric-field measuring instrument which is so located that it measures a field proportional to the voltage being measured. The test shall be made at the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced voltages between these extremes. If each of these five ratios of the measured voltage to the corresponding measured electric field is within $\pm 1\%$ of their mean value then the Measuring System is considered linear.

10.3 Performance Test on Measuring Systems

The following tests shall be made:

- determination of the Assigned Scale Factor (see 10.3.1),
- dynamic behaviour (see 10.3.1),
- interference test (see 6.4).

10.3.1 Determination of the Assigned Scale Factor and Nominal Epoch(s) (dynamic behaviour)

a) Reference method

The Assigned Scale Factor and dynamic behaviour of the Measuring System shall be determined by comparison with a Reference Measuring System using the procedure in 6.2 a) and 6.3 a). The Nominal Epoch shall be determined by using impulses with two different waveforms such that:

- the shorter time to peak (or front time) gives t_{\min} (see 3.6.1),
- the longer time to peak (or front time) gives t_{\max} (see 3.6.1),
- both these impulses should have the longest time to half-value (or time above 90 % or time to zero) (approximately) for which the Measuring System is to be approved.

Alternatively, one of the following tests may be used:

b) Comparative measurement using impulses with a single waveform supplemented by a step response measurement

A comparative measurement with a single waveform shall be made against a Reference Measuring System according to 6.2 a) and 6.3 a) using full impulses with a time to peak value T_{Pcal} (or front time T_{1cal}) and a time to half-value (or time above 90 % or time to zero) approximately equal to the longest time to half-value (or time above 90 % or time to zero) for which the Measuring System is to be approved.

In addition the step response of the Measuring System shall be recorded according to 5.8.2. The Reference Level(s) of the Nominal Epoch(s) for which the Measuring System is to be approved shall not differ from the value of the step response at T_{Pcal} (or T_{1cal}) by more than $\pm 1\%$. Alternatively, when there are high-frequency oscillations on the step response in the Nominal Epoch, then it is sufficient to show that the settling time t_s is less than t_{\min} .

The step response shall not change by more than 5 % for times up to the longest time to half-value (or time above 90 % or time to zero) for which the Measuring System is to be approved.

c) Measurement of the scale factors of the components and determination of the response parameters from the step response

The Assigned Scale Factor of the Measuring System shall be determined according to 6.2 b). The range of working conditions covered by the test shall be given in the Record of Performance.

The step response of the Measuring System shall be recorded according to 5.8.2. The step response shall be constant within ± 1 % from t_{\min} up to the Equivalent Time T_E (see 3.7.13) of the waveform used for the measurement of the Assigned Scale Factor. In addition, the step response shall be constant within ± 1 % throughout the Nominal Epoch and not change by more than 5 % for times up to the longest time to half-value (or time above 90 % or time to zero) for which the Measuring System is to be approved.

The settling time t_s shall be less than 10 μs .

d) Measurement of the Assigned Scale Factor with high alternating voltage supplemented with a step response measurement.

The scale factor of the Measuring System shall be determined using the procedure of 6.2 a) using a high alternating voltage and the step response of the Measuring System shall be measured according to 5.8.2. The step response shall settle to within ± 1 % and remain within ± 1 % from t_{\min} up to the Equivalent Time T_E of the waveform used to determine the scale factor.

The settling time t_s shall be less than 10 μs .

When the step response is used for assessing the characteristics of the Measuring System, the Record of Performance shall include:

- the record of the unit step response, with the indication of O_1 and the horizontal line corresponding to each Reference Level,
- the value of t_s .

10.3.2 Reference Record (optional)

When wanted for use in Performance Checks, the step response of the Measuring System shall be recorded using the method of 5.8.2. This shall be included in the Record of Performance for use as a Reference Record ("fingerprint") to permit detection of changes in the dynamic behaviour at subsequent Performance Checks (see 10.4.2).

10.3.3 Interference test

A test shall be made according to 5.5.4.

10.4 Performance Check

10.4.1 Scale factor check

The scale factor of an Approved Measuring System can be checked by one of the following methods.

a) Checking the scale factors of the components

The scale factor(s) of each component shall be checked using internal or external calibrators having uncertainties within $\pm 1\%$. If the scale factors differ from their previous values by not more than $\pm 1\%$ the Assigned Scale Factor is taken as still valid. If any difference exceeds $\pm 1\%$ a new value of the Assigned Scale Factor shall be determined (see third paragraph of 4.2).

b) Check of the scale factor of the Measuring System

A comparison is made with another Approved Measuring System (or Reference Measuring System) with the procedure of 6.2 a) or with a sphere gap according to 10.5 (scale factor only).

When the difference between the two measured peak values is not larger than 3 % (5 % when using the sphere gap), the Assigned Scale Factor is taken as still valid. If it is larger, then a new value of the Assigned Scale Factor shall be determined in a Performance Test (see third paragraph of 4.2).

The value of each time parameter shall be within $\pm 10\%$ of the corresponding value measured by the other Measuring System. When any difference is larger than 10 % then the Nominal Epoch shall be determined in a Performance Test (see third paragraph of 4.2).

10.4.2 Dynamic behaviour check

In each check the step response shall be recorded in the same manner and in the same circuit as was used to obtain the Reference Record (see 10.3.2 and annex C). The step response record shall be compared with those from previous checks. Small variations can be expected from check to check and the extent of acceptable differences shall be established by the early checks. Any large variations shall be investigated and a Performance Test shall then be made.

Alternatively the dynamic behaviour may be checked by comparison with another Approved Measuring System (or Reference Measuring System) using the procedure of 6.3.

10.5 IEC Standard Measuring Device

The sphere-gap irradiated with an open spark but otherwise according to IEC 52 is an IEC Standard Measuring Device for measuring the peak value of a standard switching impulse, with an uncertainty not exceeding $\pm 5\%$. Irradiation from an ultraviolet lamp is not considered to be sufficient.

The disruptive discharge voltage (50 % values) of a sphere-gap for switching impulses is taken from the table for lightning impulses of the same polarity given in IEC 52.

11 Measurement of Impulse current

11.1 Requirements for an Approved Measuring System

The general requirements are:

- to measure the peak value with an overall uncertainty within $\pm 3\%$,
- to measure the time parameters (which define the waveform) with an overall uncertainty within $\pm 10\%$,
- to permit the detection of oscillations superimposed on a current impulse.

NOTE - In impulse voltage tests the resolution and reproducibility of the shape of the current through the test object may be of high importance. In these cases the requirements on the parameters to be measured should be stated by the relevant Technical Committee.

11.1.1 Stability of the scale factors

The scale factors of the converting device and the transmission system shall not vary by more than $\pm 1\%$ for the range of ambient temperature given in the Record of Performance.

Measuring instruments shall meet the requirements of IEC 790 or IEC 1083-1.

11.1.2 Dynamic behaviour

The dynamic behaviour of a Measuring System is adequate for its range of waveforms specified in the Record of Performance when:

- the scale factor is constant within $\pm 1\%$ over each range of waveforms,
- the uncertainty of the measured time parameters is within $\pm 10\%$.

11.2 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System

The requirements of the type tests can be met by tests on a unit of the same type or sometimes from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each unit. See clause 5 for details and 4.4.2 for exceptions.

The components of a Measuring System shall meet the requirements of the following type and routine tests:

Type tests:

- temperature effect on the converting device and the transmission system and on their scale factors (5.6),
- long-term stability (5.5),
- proximity effect (if required) (5.7),
- wet or polluted withstand test on the converting device (if required) (5.9),
- interference test on a transmission system with active elements (6.4),
- dynamic behaviour (5.8).

Routine tests:

- determination of the scale factors (5.2),
- linearity test (5.3, additional alternative methods 11.2.1),
- short-term stability (5.4),
- dry withstand test on the converting device (5.9).

11.2.1 *Linearity test: requirements and additional alternative method*

The linearity test shall be made according to 5.3 using a current impulse with a single waveform.

Additional alternative method

The impulse currents carried by a shunt raise the temperature of its resistance element and this can alter its scale factor significantly. The extent of this effect and its dependence on current can be established by calculation if the temperature coefficient of the resistance element is known (see annex D).

11.3 *Performance Test on Measuring Systems*

The following tests shall be performed:

- determination of the Assigned Scale Factor (11.3.1),
- dynamic behaviour (11.3.1),
- interference test (6.4).

11.3.1 *Determination of the Assigned Scale Factor and Nominal Epoch(s) (dynamic behaviour)*

a) *Reference method for shunts with monotonic step response*

For shunts with monotonic step response, the scale factor is determined by the measurement of the resistance to direct voltage using a calibrated bridge and the step response is recorded according to 5.8.2. When the step response is essentially monotonic (i.e. overshoot less than 5 % and oscillations less than 1 %) and the experimental response time T_N ($\approx T_\alpha$) is less than $0,2 \cdot T_1$, then the shunt is adequate.

NOTE - T_1 is the front time of the current impulse for which approval of the Measuring System, based on the shunt, is sought.

b) *Reference method for other converting devices*

The Assigned Scale Factor and dynamic behaviour of the Measuring System shall be determined according to 6.2 a) and 6.3 a). The Nominal Epoch shall be determined by using impulses with two different waveforms such that:

- the shorter front time gives t_{\min} (see 3.6.1),
- the longer front time gives t_{\max} (see 3.6.1),
- both these waveforms should have the longest time to half-value (approximately) for which the Measuring System is to be approved.

Alternatively, the following test may be used:

c) Measurement of the scale factors of the components and determination of the response parameters from the step response

The Assigned Scale Factor of the Measuring System shall be determined using the procedure given in 6.2 b).

The step response of the Measuring System shall be recorded according to 5.8.2. The step response shall be constant within $\pm 1\%$ from t_{\min} up to the Equivalent Time T_E (see 3.7.13) of the waveform used for the measurement of the Assigned Scale Factor.

The step response shall be constant within $\pm 1\%$ for the Nominal Epoch.

Alternatively, if there are high-frequency oscillations on the step response, it is sufficient to show that the settling time t_s is less than t_{\min} .

In addition, the step response shall not deviate from the Reference Level by more than 5 % for the longest time to half-value for which approval is sought.

When measuring a standard impulse current with front time T_1 , the overshoot β and the first partial response time T_α should be such that β and T_α/T_1 are within the shaded area of figure 4.

When the step response is used for assessing the characteristics of the Measuring System, the Record of Performance shall include:

- the record of the unit step response, with the indication of O_1 and the horizontal line corresponding to each Reference Level,
- the values of T_α , T_N , t_s and β .

11.3.2 Reference Record (optional)

When wanted for use in Performance Checks, the step response of the Measuring System shall be recorded using the method of 5.8.2. This shall be included in the Record of Performance for use as a Reference Record ("fingerprint") to permit detection of changes in the dynamic behaviour at subsequent Performance Checks (see 11.4.2).

11.4 Performance Check

11.4.1 Scale factor check

The scale factor of an Approved Measuring System can be checked by one of the following methods.

a) Check of the scale factors of its components

The scale factor(s) of each component can be checked using internal or external calibrators having an uncertainty not exceeding $\pm 1\%$. If the scale factors differ from their previous values by not more than $\pm 1\%$, the Assigned Scale Factor of the Measuring System is taken as still valid. If any difference exceeds $\pm 1\%$ then a new value of the Assigned Scale Factor shall be determined in a Performance Test (see third paragraph of 4.2).

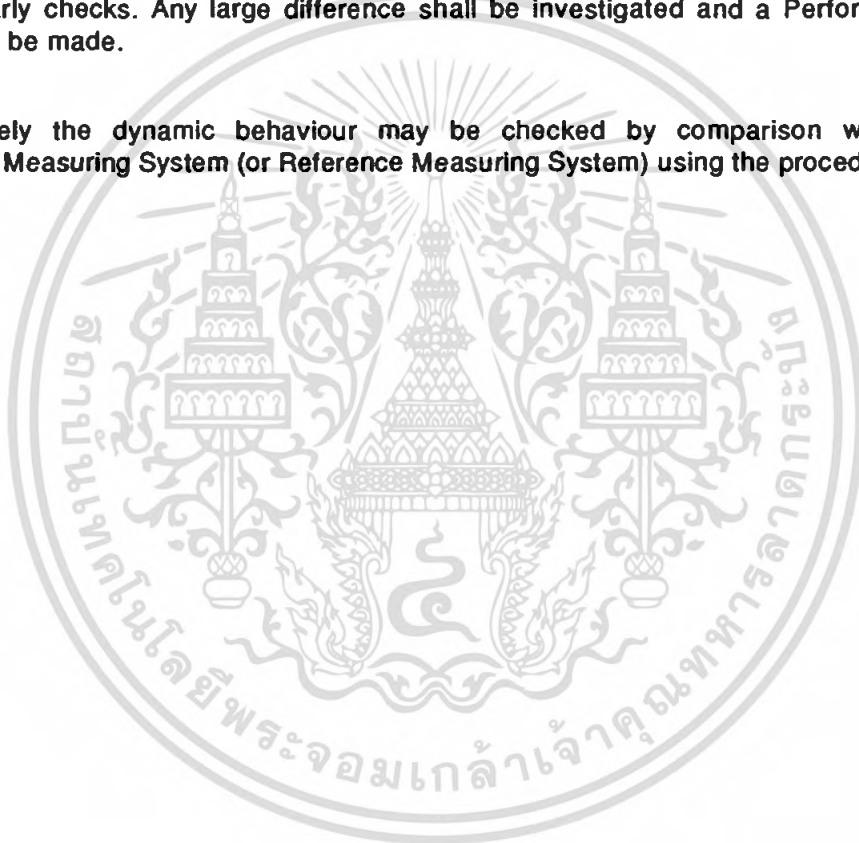
b) *Check of the scale factor of the Measuring System.*

A comparison is made with another Approved Measuring System with the procedure of 6.2 a). When the difference between the two measured values is not larger than $\pm 3\%$, the Assigned Scale Factor is taken as still valid. If it is larger, then the Assigned Scale Factor shall be determined in a Performance Test (see third paragraph of 4.2).

11.4.2 *Dynamic behaviour check*

In each check the step response shall be recorded in the same manner and in the same circuit as were used to obtain the Reference Record (see 11.3.2). The step response record shall be compared with those from previous checks. Small variations can be expected from check to check and the extent of acceptable variations shall be established by the early checks. Any large difference shall be investigated and a Performance Test shall then be made.

Alternatively the dynamic behaviour may be checked by comparison with another Approved Measuring System (or Reference Measuring System) using the procedure of 6.3.



12 Reference Measuring Systems

12.1 Requirements for Reference Measuring Systems

12.1.1 Direct voltage

A Reference Measuring System for direct voltage shall have an overall uncertainty within ± 1 % in its range of use. The accuracy shall not be influenced by a ripple factor up to 3 %.

12.1.2 Alternating voltage

A Reference Measuring System for alternating voltage shall have an overall uncertainty within ± 1 % in its range of use.

12.1.3 Full and tail-chopped lightning and switching impulse voltages

A Reference Measuring System for full and tail-chopped impulse voltages shall have an overall uncertainty within ± 1 % for the peak values of full impulses, ± 5 % for the time parameters in its range of use, and oscillations and/or overshoot shall be recorded adequately (see IEC 60-1).

12.1.4 Front-chopped lightning impulses

A Reference Measuring System for front-chopped impulses shall have an overall uncertainty within ± 3 % for peak values and within ± 5 % for time parameters.

12.1.5 Impulse current

A Reference Measuring System for impulse currents shall have an overall uncertainty within ± 1 % for the peak value and ± 5 % for the time parameters in its range of use.

12.2 Calibration of a Reference Measuring System

The compliance of a Reference Measuring System with the relevant requirements given in 12.1 of this part of IEC 60 shall be shown by the test of 12.2.1. Alternatively the test of 12.2.2 may be used.

12.2.1 Reference method: comparative measurement

The satisfactory performance of a Reference Measuring System shall be shown by comparative measurements at high voltage or high current against a Reference Measuring System which is itself traceable through national or international comparisons.

The scale factor of a Reference Measuring System shall be established with an uncertainty within $\pm 0,5$ %.

12.2.2 *Alternative method: Measurement of scale factor and evaluation of response parameters*

The scale factor of a Reference Measuring System shall be established within an uncertainty of $\pm 0,5\%$ according to the procedure given in 6.2 b). The response parameters should satisfy the following requirements:

Parameters	Requirements for			
	Full and tail-chopped lightning impulses	Front-chopped lightning impulses	Switching impulses	Current impulses
Experimental response time T_N	≤ 15 ns	≤ 10 ns	—	—
Settling time t_s	≤ 200 ns	≤ 150 ns	≤ 10 μ s	—
Partial response time T_α	≤ 30 ns	≤ 20 ns	—	$0,1 T_1$
Initial distortion time T_o		$\leq 2,5$ ns	—	—

12.3 *Interval between successive Certifications of Reference Measuring Systems*

In the absence of evidence to the contrary, the Certification shall be repeated at least once every five years.

It is recommended that Reference Measuring Systems are used only for comparative measurements in Performance Tests. However, Reference Measuring Systems may be used for other measurements, including routine daily use, if it is shown that such use does not affect their performance. (The Performance Checks specified in this International Standard are sufficient to verify this.) In addition, the substitution of an equivalent indicating or recording instrument, which satisfies the relevant IEC standard, shall be accepted.

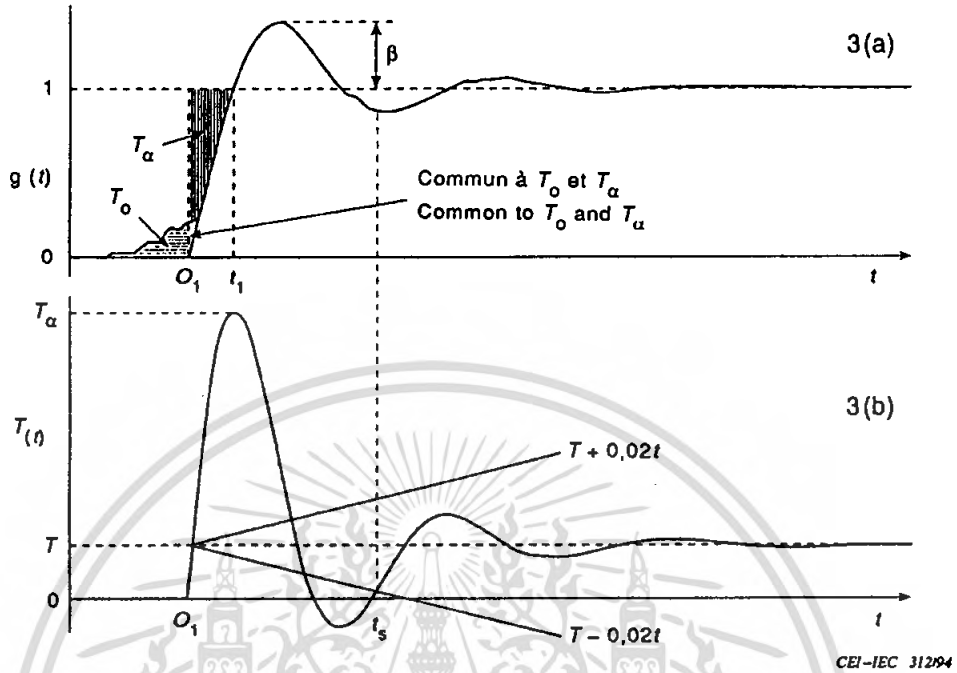


Figure 3a – Définition des paramètres de la réponse indicielle $g(t)$
 Figure 3b – Définition des paramètres de l'intégrale de la réponse indicielle $T(t)$.
 Figure 3a – Definition of Response Parameters with respect to $g(t)$
 Figure 3b – Definition of Response Parameters with respect to $T(t)$

CEI-IEC 31294

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Page blanche -

- Blank page -



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Annex A (normative)

Accreditation Systems

A.1 National accreditation systems

When countries having national accreditation systems choose to use them for the implementation of this International Standard, the following requirements apply:

A.1.1 Classification of accredited laboratories

Two classes of accredited laboratories can be recognized, according to ISO/IEC Guide 25:

- a) *Accredited calibration laboratories* possessing the necessary Reference Measuring Systems and expertise to calibrate other Reference Measuring Systems and Approved Measuring Systems in or for other laboratories.
- b) *Accredited testing laboratories* possessing Approved Measuring Systems and expertise to perform measurements in accordance with the requirements of this International Standard.

A.1.2 Requirements for accredited calibration laboratories

The accreditation systems shall require that accredited calibration laboratories use measuring apparatus having calibrations traceable to national measurement standards and compliance with this requirement shall be certified.

A.1.3 Accreditation for Performance Tests

For complying with the requirements of this International Standard, the first Performance Test on a Measuring System for which approval is sought shall be made under the supervision of an accredited calibration laboratory.

NOTE - The size and sensitivity of some high-voltage Measuring Systems to their environments will require that Performance Tests be carried out under operating conditions and in the user's laboratory.

A national accrediting body may authorize an accredited testing laboratory to carry out successive Performance Tests on its own Measuring System.

In countries without an accreditation system but which plan to have one in the future, it is suggested that laboratories should be accredited on an interim basis.

A.2 Bibliography

A.2.1 ISO/IEC Documents on Accreditation

ISO/IEC Guide 2: 1991, *General terms and their definitions concerning standardization and related activities*

ISO/IEC Guide 16: 1978, *Code of principles on third-party certification systems and related standards*

ISO/IEC Guide 23: 1982, *Methods of indicating conformity with standards for third-party certification systems*

ISO/IEC Guide 25: 1990, *General requirements for the competence of calibration testing laboratories*

ISO/IEC Guide 39: 1988, *General requirements for the acceptance of inspection bodies*

ISO/IEC Guide 40: 1983, *General requirements for the acceptance of certification bodies*

ISO/IEC Guide 42: 1984, *Guidelines for a step-by-step approach to an international certification system*

ISO/IEC Guide 43: 1984, *Development and operation of laboratory proficiency testing*

ISO/IEC Guide 44: 1985, *General rules for ISO or IEC international third-party certification schemes for products*

ISO/IEC Guide 45: 1985, *Guidelines for the presentation of test results*

ISO/IEC Guide 58: 1993, *Calibration and testing laboratory accreditation systems – General requirements for operation and recognition*

A.2.2 *Information on Accreditation Systems already established, or being established in various countries.*

International Directory of Laboratory Accreditation Systems and other schemes for assessment of testing laboratories, third edition, 1985. International Laboratory Accreditation Conference, International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.

A.2.3 General reference

Locke J.W., "Measurement Assurance and Accreditation", *Proc. IEEE*, Vol. 74, No. 1, January 1986, pp 21-23.

Annex B (informative)

Structure of a Record of Performance

An outline of the Record of Performance is given in 4.4.3, the full format of the recommended Record of Performance is given in B.1 to B.6. and a minimal form is given in B.7.

B.1 General structure

The detailed structure of a Record of Performance is

Chapter A1:	General description of the system
Chapter B:	Results of acceptance tests on components
Chapter C:	Results of routine tests on components
Chapter D1:	Results of first Performance Test on the Measuring System
Chapter E1:	Results of first Performance Check
Chapter E2 to EM:	Results of the 2nd to Mth Performance Check
Chapter D2:	Results of second Performance Test
Chapter E(M+1) to EN:	Results of the (M+1) th to Nth Performance Check
Chapter A2:	Description of the system after a significant change, etc.

Documents issued by a manufacturer or others shall be annexed to the Record of Performance and clearly referred to in the appropriate chapter.

B.2 General description of the system (Chapter A)

The description of a system shall include all the information that is necessary for its identification. It should include the items in B.2.1 to B.2.9.

B.2.1 Characteristics of the Measuring System

For voltage Measuring Systems: type of voltage divider (composed of resistors, capacitors or combination of these), transformer, high-voltage impedance, field-probe arrangement, etc.

For current Measuring Systems: type of shunt, current transformer, etc.

Types of voltage or current which can be measured by the system (for example, power-frequency alternating voltage, standard lightning impulse, etc.) and the corresponding ranges specified by their maximum and minimum values.

B.2.2 Description of the converting device

- indoor or outdoor use,
- range of atmospheric conditions,
- precautions needed to avoid mechanical stresses,
- drawing and main dimensions.

The range of clearances, for which the variations of the scale factor or of the dynamic behaviour are negligible, shall be indicated.

B.2.3 Principle electrical circuit diagram

- electrical circuit diagram of the complete Measuring System.

B.2.4 Name-plate values of the converting device

The values, copied from the manufacturer's name-plate that include:

- serial number,
- voltage or current rating,
- nominal value(s).

B.2.5 Description of the transmission system

For a cable transmission system:

- type of cable,
- characteristic impedance (for impulse measurement),
- lengths of the cable used,
- cable matching impedances (for impulse measurement).

For other transmission systems (for example, an optical link):

- type and connections,
- input characteristics,
- output characteristics.

B.2.6 Description of the measuring instrument

- type of indicating or recording instrument or oscilloscope,
- rated voltage or current,
- input characteristics,
- the Record of Performance of the instrument (if specified by an IEC publication) should be included, appended or at least clearly referenced.

B.2.7 High-voltage connections

Dimensions of high-voltage leads and location and parameters of any series resistance or impedance.

B.2.8 Earthed-side connections

Dimensions and layout of all conductors connecting the earthed side of the converting device to the earthed side of the test object.

NOTE - It may include the connections to the measuring instrument and back to the earthing system.

B.2.9 Earthing system

Dimensions and layout of the earthing system of the test area, including position and characteristics of the connections to generating circuit and remote earth point.

B.3 Acceptance test results on components (Chapter B)

Information should be given by the manufacturer and transferred to the Record of Performance by the user on the results of the type tests and the routine tests.

Specific requirements and test procedures are given in the appropriate clauses of this standard, according to the type of voltage or current to be measured.

B.4 Routine test results on the complete Measuring System (Chapter C)

When a complete Measuring System is supplied, the method used and the results of the following tests should be reported:

- scale factor measurements,
- dynamic behaviour (if required).

This determination of the scale factor of the complete Measuring System can not be substituted for the Performance Test made in the user's laboratory.

B.5 Performance Test results (Chapter D)

The results of the Performance Tests made according to the procedures described in the appropriate sections of this International Standard. For each set of test conditions, the latest value of the Assigned Scale Factor is the value to be used.

B.6 Performance Check (Chapter E)

The method used and the results should be reported.

B.7 Minimal form of the Record of Performance

Description of the converting device:

- Type
- Manufacturer
- Serial number
- Waveform(s)
- Nominal voltage(s)
- Nominal ratio(s).

Description of the system:

- Transmission system
- Earthing arrangement
- Instrument.

Performance Tests (Calibrations):

- Date
- Assigned Scale Factor (for example, measured ratio(s))
- Dynamic behaviour
- Linearity
- Period of validity.

Method of traceability:

- a) By calibration service
 - Name of company/laboratory.
- b) In-house
 - Method
 - Instrument serial numbers
 - Instrument calibration documents.

Performance Checks:

- Date
- Scale factor(s) (for example, ratios).

Annex C (informative)

Step response measurements

C.1 Circuits for step response measurements

The circuit arrangement used for determining the step response should be described and should be as near as possible to the operating conditions.

C.1.1 *Circuit for Measuring Systems for voltage*

Suitable circuits are shown in figure C.1. The preferred circuit is shown in figure C.1a where the step generator is placed at a metallic wall or at a metallic strip conductor at least 1 m wide which serves as the earth return.

To generate the step the Measuring System is supplied by either a slowly rising impulse or a direct voltage which is chopped by a relay or a gap (figure C.1d). The following methods of chopping have been found acceptable:

- by a relay with mercury-wetted contacts: this gives steps up to some hundreds of volts,
- by a uniform field gap in air at atmospheric pressure with a spacing up to some millimetres: this gives steps up to several kilovolts,
- by a uniform gap with a spacing up to some millimetres under increased gas pressure: this gives steps up to some tens of kilovolts.

When the step is generated using a repetitive generator, the duration of the step, and of the interval between steps shall be chosen such that no additional errors are introduced with respect to a single pulse.

C.1.2 *Circuit for Measuring Systems for current*

An approximate step current is injected into the input terminals of the converting device. The output current or voltage is measured using a digital recorder or oscilloscope (usually with amplifiers).

Two methods to generate the step current are shown in figure C.2. In figure C.2a, a coaxial cable is used to store the energy necessary for the step while in figure C.2b, a capacitor is used. A gap and a resistance between the storage and the measuring device are also shown. Any of the gaps used for generating a step voltage (see C.1.1) can be used to generate a step current.

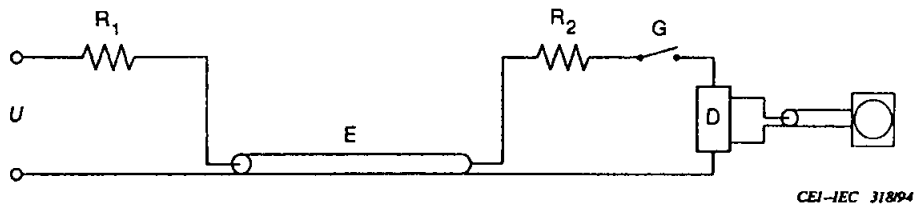


Figure C.2a

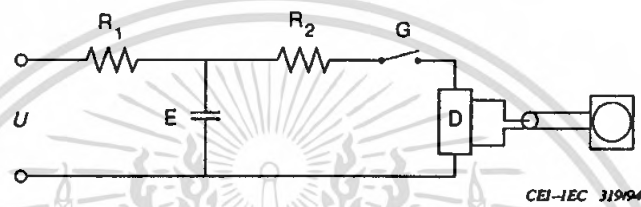


Figure C.2b

Figure C.2 – Mesure de la réponse indicielle de systèmes de mesure de courant.
 E est le système de stockage d'énergie, G, l'éclateur qui permet la réalisation de l'échelon, D le dispositif de mesure du courant
 Step response measurement for current measurement system.
 E energy storage device, G gap to generate the step,
 D current-measuring device

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Annex D (informative)

Temperature rise of measuring resistors

It is recognized that, under normal operating conditions, voltage divider resistors and current shunts must dissipate considerable amounts of energy in a time so short that the heating conditions of the resistor material would be virtually adiabatic. Under these circumstances, temperature rise may be calculated as follows:

$$\Delta t = \frac{W}{Ms}$$

with

- Δt the temperature rise in kelvins (K),
- W the energy dissipated in the resistor or shunt expressed in joules,
- M the mass of resistance material in kilograms,
- s the specific heat of the resistance material in joules per kilogramme kelvin.

In the event of failure of a test object undergoing impulse current tests, the stored energy of the impulse generator will be dissipated mainly in the shunt. It is suggested that the characteristics of the shunt should be such that under this condition the temperature rise does not exceed 200 K.

For the progressive temperature rise associated with repeated voltage or current applications, the permissible rise depends on the temperature coefficient of the resistor material and the temperature class of the insulating material employed.

Annex E (informative)

Reference Measuring Systems and Comparison Measurements for Impulse Voltages – Bibliography

E.1 Comparison measurements

The International Research Group Renardieres on impulse Measuring Systems, "Facing UHV measuring problems", *Electra* 35, pp 157-254, July 1974.

A. Bonamy, F. Deschamps, A.W. van Boetzelaer, R.C. Hughes, H.A. Lightfoot, A. Vaz, A. doVale, F. Garnacho, P. Simon, K. Schon and R. Schulte, "International comparison of HV Impulse Dividers" Seventh Int. Symp. on HV Eng. Dresden, Aug 26-30, 1991, Paper 61.07.

F.C. Creed, T. Kawamura and G. Newi. "The step response of Measuring Systems for high impulse voltages", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-86 No.11, pp 1408-1420, Nov 1967.

R.E. Hebner and S. Annestrand, "Evaluation of calibration techniques for multimegavolt impulse dividers", Third International High-Voltage Symposium, Milan, Aug 1979, Vol. 2, Paper 42.18.

T.R. McComb, F.A. Chagas, K. Feser, B.I. Gururaj, R.C. Hughes, and G. Rizzi, "Comparative measurements of HV impulses to evaluate different sets of response parameters" (90WM 056-2); T-PWRD Jan 91, pp 70-77. Disc. by G. Carrara.

T.R. McComb, M.M.C. Collins and W.J. Sarjeant, "A comparison of three different designs of resistor divider" in NBS Special Publication 628, Measurement of Electrical Quantities in Pulse Power Systems, June 1982, pp 34-45.

T.R. McComb, R.C. Hughes, H.A. Lightfoot, K. Schon, R. Schulte, H. McKnight and Y. Zhang, "International comparison of HV impulse Measuring Systems" (88SM 635-5); T-PWRD Apr 89, p. 906-915.

E.2 Some examples of dividers for Reference Measuring Systems

G.W. Bowdler, "Measurements in High-voltage Test Circuits", Pergamon Press, Oxford C1973, Chapter 3 Impulse Voltage Dividers, pp 41-67.

F.C. Creed, and M.M.C. Collins, "The Measurement of Short-Duration Impulse Voltages", AIEE Trans. Commun. Electron., CE 69, pp 621-630, 1963.

R.E. Hebner, D.L. Hillhouse and R.A. Bullock, "Evaluation of a multi-megavolt impulse measurement system" Nat. Bur. Stand. (U.S.) NBSIR 79-1933, 1979.

E.3 IEC Standard Measuring Devices

K. Feser and R.C. Hughes of WG 33.03 of SC 33, Overvoltages and Insulation Coordination, "Measurement of direct voltage by rod-rod gap", *Electra* 117, March 1988, pp 23-34.

E. Gockenbach, Working Group 03 of Study Committee 33. "Measurement of standard switching impulse voltages by means of sphere gaps (one sphere earthed)", *Electra* 136 June 1991, pp 91-95.

Annex F (informative)

Summary of tests

The following five tables summarize the tests required for measurements of direct voltage, alternating voltage, and impulse voltages and current respectively.

A number gives the applicable clause of this part of IEC 60 and a dash (-) indicates no test is required.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table F.1 – Tests on a direct voltage Measuring System

	Type tests				Routine tests			Performance test	Performance check
	Converting device		transmission system ¹⁾	instrument ²⁾	converting device	transmission system ¹⁾	instrument ²⁾		
	elements	device						system	system
Scale factor	—	—	—	—	5.2 7.2	5.2 7.2	5.2 7.2	6.2 7.3	7.4
Scale factor at the ripple frequency	—	—	—	—	—	—	—	7.6.2 (if required)	—
Linearity	—	—	—	—	5.3 7.2.1	5.3 7.2.1	5.3 7.2.1	—	—
Short-term stability	—	—	—	—	5.4 7.2	5.4 7.2	5.4 7.2	—	—
Long-term stability	5.5 7.2	5.5 7.2	5.5 7.2	5.5 7.2	—	—	—	—	—
Temperature effect	5.6 7.2	5.6 7.2	5.6 7.2	5.6 7.2	—	—	—	—	—
Proximity effect	—	5.7, 7.2 (if required)	—	—	—	—	—	—	—
Dynamic behaviour ³⁾	—	5.8, 7.2 (if required)	—	—	—	—	—	7.6.3 (if required)	—
Withstand test ⁴⁾	—	5.9, 7.2 (if required)	—	—	5.9 7.2	—	—	—	—
Repetition rate of the test	From data or single test on prototype				Once			Once/year ⁵⁾ (recommended)	According to experience

1) Other than a cable
 2) Measuring instruments shall comply with relevant IEC standards or shall be tested
 3) Step response or amplitude/frequency response
 4) Dry withstand test. Wet or pollution test if required (type test)
 5) Once per year if possible or at least once every five years; after every repair, if test disposal is out of the Record of Performance, or if the results of Performance Check are out of the specified values of the Record of Performance

Table F.2 – Tests on an alternating voltage Measuring System

	Type tests				Routine tests			Performance test	Performance check
	Converting device		transmission system ¹⁾	instrument ²⁾	converting device	transmission system ¹⁾	instrument ²⁾		
	elements	device						system	system
Scale factor	—	—	—	—	5.2 8.2	5.2 8.2	5.2 8.2	6.2 8.3	8.4
Linearity test	—	—	—	—	5.3 8.2.1	5.3 8.2.1	5.3 8.2.1	—	—
Short-term stability	—	—	—	—	5.4 8.2	5.4 8.2	5.4 8.2	—	—
Long-term stability	5.5 8.2	5.5 8.2	5.5 8.2	5.5 8.2	—	—	—	—	—
Temperature effect	5.6 8.2	5.6 8.2	5.6 8.2	5.6 8.2	—	—	—	—	—
Proximity effect	—	5.7, 8.2 (if required)	—	—	—	—	—	—	—
Dynamic behaviour ³⁾	—	5.8, 8.2 (if required)	—	—	—	—	—	—	—
Withstand test ⁴⁾	—	5.9, 8.2 (if required)	—	—	5.9 8.2	—	—	—	—
Repetition rate of the test	From data or single test on prototype				Once			Once/year ⁵⁾ (recommended)	According to experience
¹⁾ Other than a cable ²⁾ Measuring instruments shall comply with relevant IEC standards or shall be tested ³⁾ Step response or amplitude/frequency response ⁴⁾ Dry withstand test. Wet or pollution test if required (type test) ⁵⁾ Once per year if possible or at least once every five years; after every repair, if test disposal is out of the Record of Performance, or if the results of Performance Check are out of the specified values of the Record of Performance									

Table F.3 – Tests on a lightning impulse Measuring System

	Type tests				Routine tests			Performance test	Performance check
	Converting device		transmission system ¹⁾	instrument ²⁾	converting device	transmission system ¹⁾	instrument ²⁾		
	elements	device						system	system
Scale factor	—	—	—	—	5.2 9.2	5.2 9.2	5.2 9.2	6.2 9.3	9.4
Linearity test	—	—	—	—	5.3 9.2.1	5.3 9.2.1	5.3 9.2.1	—	—
Short-term stability	—	—	—	—	5.4 9.2	5.4 9.2	5.4 9.2	—	—
Long-term stability	5.5 9.2	5.5 9.2	5.5 9.2	5.5 9.2	—	—	—	—	—
Temperatura effect	5.6 9.2	5.6 9.2	5.6 9.2	5.6 9.2	—	—	—	—	—
Proximity effect	—	5.7, 9.2 (if required)	—	—	—	—	—	—	—
Dynamic behaviour ³⁾	—	5.8, 9.2 (if required)	5.8 9.2	5.8 9.2	—	—	—	6.3 9.3	9.4
Interference test	—	—	6.4, 9.2 (active)	—	—	—	—	6.4 9.3	—
Withstand test ⁴⁾	—	5.9, 9.2 (if required)	—	—	5.9 9.2	—	—	—	—
Repetition rate of the test	From data or single test on prototype				Once			Once/year ⁵⁾ (recommended)	According to experience

1) Other than a cable

2) Measuring instruments shall comply with relevant IEC standards or shall be tested

3) Step response, amplitude/frequency response or comparison measurement

4) Dry withstand test. Wet or pollution test if required (type test)

5) Once per year if possible or at least once every five years; after every repair, if test disposal is out of the Record of Performance, or if the results of Performance Check are out of the specified values of the Record of Performance

Table F.4 – Tests on a switching impulse Measuring System

	Type tests				Routine tests			Performance test	Performance check
	Converting device		transmission system ¹⁾	instrument ²⁾	converting device	transmission system ¹⁾	instrument ²⁾	system	system
	elements	device							
Scale factor	—	—	—	—	5.2 10.2	5.2 10.2	5.2 10.2	6.2 10.3	10.4
Linearity test	—	—	—	—	5.3 10.2.1	5.3 9.2.1	5.3 9.2.1	—	—
Short-term stability	—	—	—	—	5.4 10.2	5.4 10.2	5.4 10.2	—	—
Long-term stability	5.5 10.2	5.5 10.2	5.5 10.2	5.5 10.2	—	—	—	—	—
Temperature effect	5.6 10.2	5.6 10.2	5.6 10.2	5.6 10.2	—	—	—	—	—
Proximity effect	—	5.7, 10.2 (if required)	—	—	—	—	—	—	—
Dynamic behaviour ³⁾	—	5.8, 10.2 (if required)	5.8 10.2	5.8 10.2	—	—	—	6.3 10.3	10.4
Interference test	—	—	6.4, 10.2 (active)	—	—	—	—	6.4 10.3	—
Withstand test ⁴⁾	—	5.9, 10.2 (if required)	—	—	5.9 10.2	—	—	—	—
Repetition rate of the test	From data or single test on prototype				Once			Once/year ⁵⁾ (recommended)	According to experience
<p>1) Other than a cable</p> <p>2) Measuring instruments shall comply with relevant IEC standards or shall be tested</p> <p>3) Step response, amplitude/frequency response or comparison method</p> <p>4) Dry withstand test (routine). Wet or pollution test if specified</p> <p>5) Once per year if possible or at least once every five years; after every repair, if test disposal is out of the Record of Performance, or if the results of Performance Check are out of the specified values of the Record of Performance</p>									

Table F.5 – Tests on an impulse current Measuring System

	Type tests				Routine tests			Performance test	Performance check
	Converting device		transmission system ¹⁾	instrument ²⁾	converting device	transmission system ¹⁾	instrument ²⁾		
	elements	device						system	system
Scale factor	—	—	—	—	5.2 11.2	5.2 11.2	5.2 11.2	6.2 11.3	11.4.1
Linearity test	—	—	—	—	5.3 11.2.1	—	—	—	—
Short-term stability	—	—	—	—	5.4 11.2	5.4 11.2	5.4 11.2	—	—
Long-term stability	5.5 11.2	5.5 11.2	5.5 11.2	5.5 11.2	—	—	—	—	—
Temperature effect	5.6 11.2	5.6 11.2	5.6 11.2	5.6 11.2	—	—	—	—	—
Proximity effect	—	5.7 (if required)	—	—	—	—	—	—	—
Dynamic behaviour ³⁾	—	5.8, 11.2 (if required)	5.8 11.2	5.8 11.2	—	—	—	6.3 11.3	11.4.2
Interference test	—	—	6.4 (active)	—	—	—	—	6.4 11.3	—
Withstand test ⁴⁾	—	—	—	—	5.9 11.2	—	—	—	—
Repetition rate of the test	From data or single test on prototype				Once			Once/year ⁵⁾ (recommended)	According to experience
<p>1) Other than a cable</p> <p>2) Measuring instruments shall comply with relevant IEC standards or shall be tested</p> <p>3) Step response, amplitude/frequency response or comparison measurement</p> <p>4) Dry withstand test (routine). Wet or pollution test if required (type test)</p> <p>5) Once per year if possible or at least once every five years; after every repair, if test disposal is out of the Record of Performance, or if the results of Performance Check are out of the specified values of the Record of Performance</p>									

Annex G (informative)

Areas where special care is needed

G.1 Measurement of the scale factor of a divider (see 5.2)

Divider ratios can be determined by measuring the impedances of the high-voltage and low-voltage arms separately. The ratio is then obtained by dividing the sum of the impedances by the impedance of the low-voltage arm. An alternative technique consists of applying a voltage to the divider and simultaneously measuring the input and output voltages. The ratio is determined by dividing the input voltage by the output voltage.

For resistor dividers, the resistance of the high-voltage and low-voltage arms are often measured with a low direct voltage by means of a Wheatstone bridge or by means of an ohmmeter providing it has sufficient accuracy.

The ratios of capacitor-type dividers are affected by stray capacitance, therefore, their ratios should be determined with the high-voltage arms positioned in the locations normally occupied during the tests. For capacitor or series resistor/capacitor dividers, the capacitance of the high-voltage arms may be measured by means of a Schering bridge or a transformer ratio-arm bridge. The use of a low-voltage general purpose RLC bridge is not recommended because lead and stray capacitances can be included in the measurements and the resulting ratio may be in error.

For parallel resistor/capacitor dividers, the resistance and capacitance of the high-voltage arms may be measured by temporarily removing the resistors from the high-voltage arm and measuring the capacitance of the remaining column using the technique described above. The resistance of the high-voltage arm is measured either *in situ* or when the resistors have been temporarily removed from the capacitor column. The ratios of the resistance and capacitances in the two branches of the divider should be equal. If the resistors cannot be removed from the high-voltage arm, the ratio may be determined by measuring the ratio of the resistive branch with direct voltage and subsequently checking the response of the completed divider to a square wave. The rise-time of the square wave should be such that the divider response is not oscillatory. The output and input waveforms should be the same without any evidence of overshoot. This method is less accurate than the others.

G.2 Probes and external attenuators

Special precautions should be taken to avoid accidental changes when an oscilloscope probe is used in conjunction with the voltage divider in order to reduce the signal to a level suitable for the digital recorder or oscilloscope. It is essential that the probe compensation be properly adjusted before making any measurement. The compensation is made by applying a square-wave voltage signal and altering the adjustable components of the probe or attenuator circuits while observing the output signal from the probe on the oscilloscope screen.

It should be noted that the built-in square-wave generators in most oscilloscopes do not have rise times which are fast enough or top levels which are long enough for compensation purposes if the probe is to be used for the measurement of standard lightning impulses. It is therefore recommended that an external signal generator be used which has a rise time less than 0,1 μ s and a top level of at least 1 ms duration. If the probe is to be used in the determination of the step response of the Measuring System, then the rise time of the square wave should be < 2 ns.

G.3 Probe scale factor

The scale factor of some oscilloscope probes cannot be determined from impedance measurements; in these cases the scale factor can be determined by applying a voltage to the probe which can be accurately measured by means of an external voltmeter and measuring the output voltage by the oscilloscope (calibrated according to relevant IEC standards).

The probe compensation must be adjusted for optimum response before making these measurements. A single-shot step generator can be used and the d.c. level before the application of the step is the input signal to be measured.

Alternatively, an a.c. signal may be used providing its frequency is within the measuring capability of the external voltmeter. Another technique is to use a standard pulse generator (IEC 1083-1) providing it has adequate accuracy. Whichever technique is used, the probe signal should agree with the external voltmeter or the impulse calibrator to within 1 %.

When two similar probes are being used during comparative measurements, a useful check can be performed by connecting both probes to the same input signal. The resulting waveforms should agree to within 0,5 % for measurements of amplitude and to within 1 % for measurements of time parameters.

G.4 Use of appropriate levels

In order to achieve the required accuracy during impulse measurements, the scale factor of the Measuring System should be adjusted so that the signal deflection occupies almost the full screen. On an 8-bit digital recorder this will result in an amplitude uncertainty of approximately 0,5 %. If only half-full screen deflection is used, the uncertainty will increase to 1 % and if smaller deflections are used the uncertainties will be even greater.

These uncertainties may be reduced by using a 10-bit or a 12-bit digital recorder, provided the sampling rate is fast enough to measure the front time of a standard lightning impulse. A minimum sampling rate of 60 million samples per second (sampling time = 17 ns) is required in order to measure the fastest lightning impulses.

The digital recorder or oscilloscope including any internal attenuator should be checked for accuracy, preferably by means of a standard pulse generator. When two channels are used during comparative measurements, the check described above for probes should also be used for the channels being used. The measured waveforms should agree to within 0,5 % for measurements of amplitude and to within 1 % for measurements of time parameters.

G.5 Accuracy of time measurements

Internal clocks in modern digital recorders are often sufficiently accurate and stable for errors from this source to be negligible. However it is necessary (and sufficient) to demonstrate that the instrument meets the requirements of IEC 1083-1.



ICS 17.220.20 19.080

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้