

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาความพร้อมห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบทางด้านแรงสูง
HIGH VOLTAGE LABORATORY PREPARATION FOR HIGH VOLTAGE TESTING



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **61751**
วัน,เดือน,ปี. **21 ก.ค. 2549**

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรม ไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การพัฒนาความพร้อมห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบทางด้านแรงสูง

HIGH VOLTAGE LABORATORY PREPARATION FOR HIGH VOLTAGE TESTING

ผู้จัดทำ

- | | | |
|-----------------|------------|-----------------------|
| 1. นายกิตติพงษ์ | พิบูลย์ | รหัสประจำตัว 45015090 |
| 2. นายชานนท์ | อบแสงทอง | รหัสประจำตัว 45015093 |
| 3. นายณัฐพันธุ์ | บุญเสนอ | รหัสประจำตัว 45015096 |
| 4. นายชูชาติ | พิมพ์พันธ์ | รหัสประจำตัว 45015141 |




(รศ. ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาความพร้อมห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบทางด้านแรงสูง

นายกิตติพงษ์ พิบูลย์ 45015090
 นายชานนท์ ออบแสงทอง 45015093
 นายณัฐพันธ์ บุญเสนอ 45015096
 นายชูชาติ พิมพ์พันธ์ 45015141
 รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

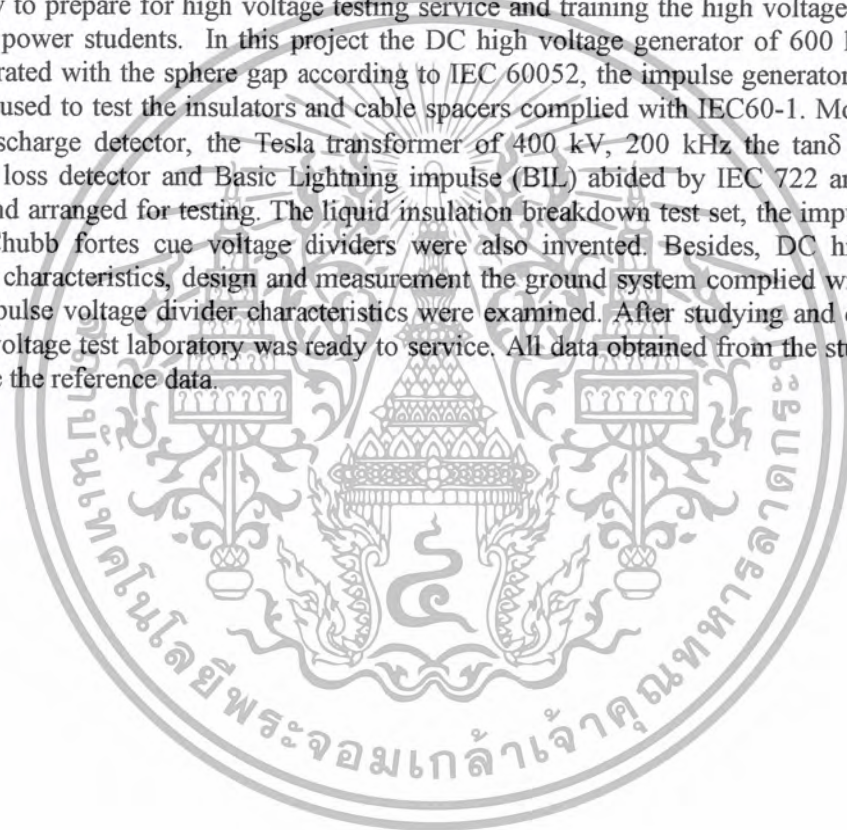
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการศึกษาและพัฒนาห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง เพื่อเตรียมความพร้อมของห้องปฏิบัติการให้สามารถรองรับการบริการ การทดสอบและฝึกทักษะทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของนักศึกษา โดยที่โครงการนี้เป็นการศึกษาถึงวิธีการใช้งานและปรับปรุงซ่อมแซมเครื่องมือทดสอบทางด้านแรงดันสูงให้อยู่ในสถานะพร้อมใช้งาน ได้แก่ การปรับเทียบและทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง 600 กิโลโวลต์, 10 มิลลิแอมป์ ด้วยช่องว่างทรงกลม ตามมาตรฐาน IEC 60052, ทำการจัดเตรียมและทดสอบลูกถ้วยฉนวนและเคเบิลสเปซเซอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 กิโลโวลต์, 5 กิโลจูล ตามมาตรฐาน IEC 60-1 รวมทั้ง เครื่องวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน, หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง 400 กิโลโวลต์, 200 กิโลแอมป์, เครื่องวัดพลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริกและการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยแรงดันอิมพัลส์ (BIL) ตามมาตรฐาน IEC 722 พร้อมทั้งจัดทำชุดทดสอบการเกิดเบรคคววน์ในฉนวนน้ำมัน, อุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์สำหรับการทดสอบ BIL, อุปกรณ์วัดแรงดันสูงแบบซิปฟอร์มทสควิว, ศึกษาการกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง, การออกแบบและการวัดระบบกราวด์ ตามมาตรฐาน IEEE 80-1986, คุณสมบัติของอิมพัลส์โวลต์เดจดีไวเดอร์, จากผลการศึกษาและพัฒนาทำให้เครื่องมือทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงสูงของห้องปฏิบัติการอยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน ข้อมูลผลการศึกษาและพัฒนาโรงประลองไฟฟ้าแรงสูงแห่งใหม่สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูล พื้นฐานการทดสอบอุปกรณ์ทางด้านแรงสูงต่อไป

High Voltage Laboratory Preparation for High Voltage Testing

Kittipong Pibool
Chanon Obsangthong
Nuttaphan Boonsaner
Choochit Pimpapanh
Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul Advisor

ABSTRACT

This thesis presents the results of the study and development of the high voltage laboratory to prepare for high voltage testing service and training the high voltage skill of the electrical power students. In this project the DC high voltage generator of 600 kV, 10 mA was calibrated with the sphere gap according to IEC 60052, the impulse generator of 200 kV 5 kJ was used to test the insulators and cable spacers complied with IEC60-1. Moreover, the partial discharge detector, the Tesla transformer of 400 kV, 200 kHz the $\tan\delta$ and power dielectric loss detector and Basic Lightning impulse (BIL) abided by IEC 722 arrange were studied and arranged for testing. The liquid insulation breakdown test set, the impulse current device, Chubb fortes cue voltage dividers were also invented. Besides, DC high voltage generator characteristics, design and measurement the ground system complied with IEC 80-1986, Impulse voltage divider characteristics were examined. After studying and developing, the high voltage test laboratory was ready to service. All data obtained from the study may be used to be the reference data.



กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงการเรื่อง การพัฒนาความพร้อมห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบทางด้านแรงสูง คงจะสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีไม่ได้ ถ้าขาดบุคคลและองค์กรต่างๆดังต่อไปนี้ คือ ท่านอาจารย์ รศ.ศิริวัฒน์ โภชิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้การสนับสนุนด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเงินทุนในการจัดทำโครงการและเครื่องมือต่างๆ ท่านอาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ได้ให้ความรู้และคอยแนะนำดูแลอย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด ท่าน ผศ.ดร. อานันท์ วัฒน คุณากร ที่ได้ให้ยืมสโคปและมิเตอร์ อาจารย์พีรวุฒิ ยุทธโกวิท จากศูนย์เชี่ยวชาญฯ (จุฬา) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือนำเครื่องยูนิตสแต็บจากศูนย์เชี่ยวชาญมาทำการทดสอบ และ พี่ ภานุพงษ์ พินภฤษ นักศึกษาปริญญาโทที่ได้ให้คำปรึกษาต่างๆ และคอยช่วยเหลือในงานต่างๆ บริษัท จรุงไทย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการนำรถมาเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ต่างๆ การไฟฟ้าบางพลีที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบปรับเทียบดีไวเซอร์ และคุณลุงแสง ปานบ้านแพ้ว จาก ส.กมล เทรคดิ่ง ที่ได้มอบเครื่องมือต่างๆ ให้กับห้องปฏิบัติการ ทางคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของทุกท่านอย่างที่สุด

นอกจากนี้ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ พี่สมศักดิ์ ที่อำนวยความสะดวกในการให้ยืมเครื่องมือ และรุ่นน้องทุกๆคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านแรงกายในการช่วยย้ายของต่างๆ รวมทั้งบุคคลต่างๆ ที่ได้เอื้อเฟื้อ ว่าง ทุ่ม ทุ่ม ทุ่ม ด้วย

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านทุนการศึกษา มาโดยตลอด ขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงครับ

นายกิตติพงษ์ พิบูลย์

นายชานนท์ อบแสงทอง

นายณัฐพันธ์ บุญแสน

นายชูชาติ พิมพาพันธ์

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	X
สารบัญภาพ	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของ โครงการงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 สิ่งที่ได้ศึกษาและลงมือปฏิบัติใน โครงการงาน	2
1.5 สิ่งที่ได้ศึกษาและลงมือปฏิบัติที่อยู่นอกเหนือขอบเขต โครงการงานที่กำหนดไว้	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการงาน	5
บทที่ 2 เทคนิคการวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเบรคดาวน์ของช่องว่างทรงกลม	6
2.2.2 มาตรฐานแก๊ปทรงกลม	8
2.2.3 เส้นใยข้อกำหนดของรูปร่างและพื้นผิวทรงกลม	9
2.2.4 ข้อกำหนดของช่องว่างทรงกลมเพื่อสำหรับการวัด	9
2.2.5 การต่อลงดินและการต่อสายต้านแรงสูง	11
2.2.6 ตัวต้านทานป้องกันในการวัดแรงดันกระแสสลับ กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์	12
2.2.7 การใช้งานแก๊ปทรงกลม	12
2.2.8 ผิวของทรงกลม	12
2.2.9 การวัดค่าของแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน	12
2.2.10 การวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม	13
2.2.11 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยช่องว่างทรงกลม	13
2.2.12 การเปรียบเทียบระบบวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม	13
2.3 ชุดทดสอบ เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง 600 kV, 10 mA ของ สจล.	15
2.3.1ขนาดพิกัดเครื่อง	16
2.3.2 แก๊ปทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	2.3.3 ผู้ควบคุม	19
	2.4 การทดลอง	21
	2.5 สรุปผลการทดสอบและวิจารณ์ผล	30
บทที่	3 การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์	31
	3.1 บทนำ	31
	3.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	31
	3.2.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์	31
	3.2.2 ข้อกำหนดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	32
	3.2.3 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	35
	3.2.4 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น	37
	3.2.5 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์	39
	3.2.6 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ	43
	3.3 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของ สจล.	47
	3.3.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	52
	3.3.2 เครื่องอัดประจุ	55
	3.3.3 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน	57
	3.3.4 ผู้ควบคุม	57
	3.4 การทดลอง	61
	3.4.1 ผลการทดสอบ	64
	3.4.2 สรุปผลการทดสอบ	70
บทที่	4 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยแรงดันอิมพัลส์	71
	4.1 บทนำ	71
	4.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	71
	4.2.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	72
	4.2.2 การคำนวณของหม้อแปลงไฟฟ้า	72
	4.2.3 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	72
	4.2.4 พฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงต่อแรงดันเสิร์จ	76
	4.3 ข้อกำหนดการทดสอบ BIL	81
	4.3.1 แรงดันทดสอบ	81
	4.3.2 การเลือกค่าพิกัดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	84
	4.3.3 การจัดวางอุปกรณ์และการต่อลงดิน	86
	4.3.4 ระบบวัดแรงดัน	87
	4.3.5 ชั้นที่บันทึกรูปคลื่นกระแส	89
	4.3.6 เเบบวัด	

	4.3.7 แกปตัดคลื่น	94
	4.4 การทดสอบ	97
	4.4.1 วงจรการทดสอบ	97
	4.4.2 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ	98
	4.4.3 การเทียบระบบวัดแรงดัน	99
	4.4.4 วิธีทำการทดสอบ	99
	4.4.5 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของห้องปฏิบัติการ	102
	4.4.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	104
	4.4.7 การเปรียบเทียบออสซิลโลแกรมแรงดันทดสอบเต็มคลื่น	104
	4.4.8 ออสซิลโลแกรมกระแส (แรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็ม)	105
	4.4.9 สรุปผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าของห้องปฏิบัติการ	105
บทที่	5 การตรวจจับผิดสหาร์จางส่วนและวิเคราะห์ผิดสหาร์จางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง	106
	5.1 บทนำ	106
	5.2 ผลกระทบของการเกิดผิดสหาร์จางส่วน	107
	5.3 โครนาผิดสหาร์จาง	107
	5.4 ผิดสหาร์จางตามผิว	109
	5.5 ผิดสหาร์จางส่วนภายใน	111
	5.6 วงจรสมมูลย์การเกิดผิดสหาร์จางภายใน	111
	5.7 ธรรมชาติของการเกิดผิดสหาร์จางส่วน	113
	5.8 หลักการตรวจจับ PD	114
	5.9 หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบ	115
	5.10 การแสดงผลของผิดสหาร์จางส่วน	116
	5.11 การต่อระบบวงจรวัด PD ในวงจรทดสอบ	117
	5.12 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน	119
	5.13 ตัวอย่างวงจรวัด PD	122
	5.14 วิธีทำการทดสอบ	123
	5.15 ตัวอย่างผลการทดสอบการเกิดผิดสหาร์จางส่วน	126
	5.16 ลักษณะก่อนการเกิด PD	129
	5.17 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดสอบ	134
บทที่	6 การทดสอบฉนวนด้วยแรงดันสูงความถี่สูง โดยใช้หม้อแปลงเตสลา	135
	6.1 บทนำ	135
	6.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	135
	6.2.1 หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	135
	6.2.2 การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม	139

	6.3การทดลอง	142
	6.3.1การทดลองหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงสูงของหม้อแปลงเตสลา	142
	6.3.2สรุปผลการทดลอง	145
	6.3.3การทดสอบหาความบกพร่องของอุปกรณ์ฉนวนคยใช้หม้อแปลงเตสลา	146
	6.3.4สรุปผลการทดสอบ	149
บทที่	7เครื่องวัดพลังงานสูญเสียโคอีเลคทริก	150
	7.1ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	150
	7.1.1กำลังสูญเสียโคอีเลคทริก	150
	7.1.1.1วงจรสมมูลย์ของโคอีเลคทริก	150
	7.1.1.2แฟกเตอร์กำลังสูญเสียโคอีเลคทริก	151
	7.1.1.3การคำนวณกำลังสูญเสียโคอีเลคทริก	153
	7.1.2การวัดค่าเก็บประจุ C และแฟกเตอร์ tg δ	155
	7.1.2.1 Schering bridge	155
	7.1.2.2 Glynne bridge	158
	7.1.3 การวัดแรงดัน	160
	7.1.4 รายละเอียดของส่วนต่างๆ ของเครื่อง Tettex AG 2805	161
	7.1.5 รายละเอียดของตัวเก็บประจุมาตรฐานที่ใช้ในชุดทดสอบ	163
	7.1.6 รายละเอียดของหม้อแปลงที่ใช้ในชุดทดสอบ	164
	7.2 การทดลอง	164
	7.3 ลูกถ้วยแขวนชนิดต่างๆ	165
	7.2.1 ผลการทดลอง	167
	7.2.2สรุปผลและวิจารณ์การทดสอบ	169
บทที่	8การเกิดเบรคดาวน์และการนำไฟฟ้าในฉนวนเหลว	170
	8.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	170
	8.1.1 กลไกการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์	173
	8.1.2 กลไกการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวไม่บริสุทธิ์	173
	8.2 การนำไฟฟ้าและเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์	177
	8.3 กลไกทางอุณหภูมิจากการเกิดเบรคดาวน์	178
	8.4 การออกแบบชุดภาชนะทดสอบการเบรคดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลง	179
	8.4.1 ตัวภาชนะ	179
	8.4.2 ช่องเติมน้ำมัน	180
	8.4.3 อิเล็กโตรดแบบทรงกลมและครึ่งวงกลม	180
	8.4.4 ปลอกฉนวนไฟฟ้าแรงสูง	181
	8.4.5 ปลายต่อไฟฟ้าแรงสูง	181
	8.4.6 ปลอกฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์	182

	8.4.7	ปลายด้านต่อกราวด์	182
	8.4.8	ตัววัดระยะ gap ข้างในอุปกรณ์ทดสอบ	183
	8.4.9	ชุดเหล็กวัดระยะ	183
	8.5	ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด(แกป) กับผลของการเกิดเบรคดาวน์	184
	8.6	ตัวอย่างการทดลองเบรคดาวน์	185
	8.7	ลักษณะของแรงดันกับผลของการเกิดเบรคดาวน์	186
	8.8	การเกิดเบรคดาวน์และการนำไฟฟ้าในฉนวนแข็ง	187
	8.9	ลักษณะสมบัติของฉนวนแข็งที่ต้องการ	188
	8.10	กลไกการเบรคดาวน์ของฉนวนแข็ง	189
	8.11	การเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนของแข็ง	189
	8.12	การเกิดเบรคของฉนวนของแข็งในทางปฏิบัติจริง	190
	8.13	การทดลองการเบรคดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลง	193
	8.14	สรุปผลการทดลอง	202
บทที่	9	การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง	203
	9.1	ทฤษฎี	203
	9.2	การทดลอง	205
	9.3	สรุปผลการทดลอง	208
บทที่	10	การต่อลงดิน	209
	10.1	ขั้นตอนการคำนวณการออกแบบ	209
	10.2	ตัวอย่างในการคำนวณและการออกแบบ	212
	10.3	ตัวอย่างการคำนวณและการออกแบบระบบการต่อลงดิน	216
	10.4	ผลการออกแบบระบบการต่อลงดิน	220
	10.5	ตัวอย่างสถานีไฟฟ้าขนาด 115 kV	220
	10.6	ตัวอย่างสถานีไฟฟ้าขนาด 115 kV ในกรณีใส่แผ่นพลาสติก	225
	10.7	ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	232
	10.8	สรุปผลของการวิจัยและข้อเสนอแนะ	234
	10.9	มาตรฐานการต่อลงดินและค่าความต้านทานของการต่อลงดิน	234
	10.10	วิธีลดค่าความต้านทานดิน	235
	10.11	งานวิจัยที่ผ่านมา	236
บทที่	11	การศึกษาผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลต์เทจดีไวเซอร์	244
	11.1	บทนำ	244
	11.2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	245
	11.2.1	ผลตอบสนองรูปคลื่น	245
	11.2.2	วงจรมูลย์ทั่วไปของโวลต์เทจดีไวเซอร์	249

11.2.3	โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานล้วน	250
11.2.4	โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ	251
11.3	การทดลองและประเมินผล	254
11.3.1	ขั้นตอนการทดลอง	254
11.3.2	ผลการทดลอง	254
11.3.3	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	262
บทที่ 12	การวัดค่าขดแรงดันกระแสสลับ	263
12.1	บทนำ	263
12.2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	263
12.3	การออกแบบและการสร้าง	264
12.4	การทดสอบและการประเมินผล	266
12.4.1	ผลการทดลอง	267
12.4.2	สรุปผลการทดลอง	269
บทที่ 13	สรุปและวิจารณ์การดำเนินงาน	270
13.1	สรุปผลการดำเนินงานทั้งหมดที่ผ่านมา	270
13.2	วิจารณ์การดำเนินงานทั้งหมดที่ผ่านมา	270
13.3	ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงต่อไป	271
ภาคผนวก		272
ภาคผนวก ก	กราฟการแปลงผัน	273
ภาคผนวก ข	กราฟการแปลงผัน	274
ภาคผนวก ค	ตารางแรงดันเบรคดาวน้ำมันสูง	277
ภาคผนวก ง	การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการทดสอบ	281
ภาคผนวก จ	การออกแบบความต้านทานชั้นที่	282
ภาคผนวก ฉ	วิธีการจัดเตรียมรายงานผลการทดสอบ PD และวิธีการวัด PD	284
ภาคผนวก ช	การเปรียบเทียบค่าเก็บประจุในวงจรวัด PD	299
ภาคผนวก ซ	การจ่ายแรงดันทดสอบ	304
ภาคผนวก ฌ	รูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	309
ภาคผนวก ญ	ตัวต้านทานห่วง	312
บรรณานุกรม		317

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_d กับ δ	8
ตารางที่ 2-2 ความสูงของแถบทรงกลมเหนือพื้นดิน(A)และระยะปลดค้วนำ(B)	11
ตารางที่ 2-3 ผลการทดลองตอนที่ 1.1	26
ตารางที่ 2-4 ผลการทดลองการปรับเทียบระบบวัด	26
ตารางที่ 2-5 ผลการทดลองตอนที่ 1.2 ค่าที่อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์แรงต่ำ	29
ตารางที่ 2-6 ผลการทดลองตอนที่ 1.2 ค่าที่อ่านได้จากโวลท์เตจดีไวเซอร์	29
ตารางที่ 2-7 เปรียบเทียบค่าแรงดันที่ได้จากการปรับเทียบด้วยแถบทรงกลมและ โวลท์เตจดีไวเซอร์	30
ตารางที่ 3-1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นต่างๆที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน	39
ตารางที่ 3-2 สูตรการคำนวณหาค่าเวลาช่วงหัวคลื่นและเวลาช่วงหางคลื่น โดยประมาณ	41
ตารางที่ 3-3 ระบบแรงดันสูงสุดและค่าแรงดันทดสอบ BIL	43
ตารางที่ 3-4 ตารางมาตรฐานการคำนวณระดับแรงดันต่างๆ	45
ตารางที่ 3-5 ค่ามาตรฐานเครื่อง	60
ตารางที่ 3-6 ค่ามาตรฐานปัจจุบัน (โดยประมาณ)	60
ตารางที่ 4-1 ค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงชนิดน้ำมันแบบติดตั้งภายนอก	75
ตารางที่ 4-2 ค่าแรงดันทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	86
ตารางที่ 4-3 ลำดับขั้นการป้อนแรงดันขนาดและลักษณะของแรงดันตามมาตรฐานต่างๆ	101
ตารางที่ 6-1 ค่าความเหนียวนำของขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทางด้านทุติยภูมิ	139
ตารางที่ 6-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_d กับ δ	141
ตารางที่ 6-3 ผลการทดลอง	144
ตารางที่ 6-4 ผลการทดสอบลูกถ้วยฉนวนแบบแขวน	148
ตารางที่ 6-5 ผลการทดสอบลูกถ้วยฉนวนแบบก้านตรง	149
ตารางที่ 7-1 เปรียบเทียบค่า $\sin \delta$ กับ $\tan \delta$ เมื่อ $\delta = 0 - 20^\circ$	152
ตารางที่ 7-2 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนแก้วเหนียวลูกที่หนึ่ง	167
ตารางที่ 7-3 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนแก้วเหนียวลูกที่สอง	168
ตารางที่ 7-4 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนปอร์ซเลนสีน้ำตาล	168
ตารางที่ 7-5 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนปอร์ซเลนสีขาว	168
ตารางที่ 7-6 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนปอร์ซเลนสีน้ำตาลลูกเล็ก	168
ตารางที่ 7-7 ผลการทดสอบลูกถ้วยแขวนแบบแก้ว (อุณหภูมิ 20° , ความชื้น 72%)	169
ตารางที่ 8-1 คุณสมบัติของไดอิเล็กทริกของเหลวที่นิยมใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า	175
ตารางที่ 8-2 คุณสมบัติของฉนวนน้ำมันชนิดต่างๆที่สำคัญ	176
ตารางที่ 8-3 ความคงทนต่อแรงดันเบรคความถี่สูงสุดของฉนวนเหลวบางชนิด	177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8-4 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนแข็ง	191
ตารางที่ 9-1 ตารางบันทึกผลการทดลอง (5ชั้น)	208
ตารางที่ 10-1 การทดสอบหาค่าความต้านทานดิน	216
ตารางที่ 10-2 Test of Record ความต้านทานจำเพาะของดิน โดยเฉลี่ย	231
ตารางที่ 10-3 Changing Conductor Size	233
ตารางที่ 10-4 Changing De of Ground Grid	233
ตารางที่ 10-5 Changing Number of rods	233
ตารางที่ 11-1 ผลของการ Simulate ด้วยโปรแกรม LABVIEW	261
ตารางที่ 12-1 ผลการทดลอง	267
ตารางที่ ผค-1 แรงดันคายอด (ค่า $U_{50\%}$ ในการทดสอบ Impulse) หน่วยเป็น kV สำหรับแรงดัน กระแส สลับความถี่กำลัง แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตชิงชั่วคราวและแรงดันกระแสตรง ของทั้งสองขั้ว	278
ตารางที่ ผค-2 แรงดันคายอด (ค่า $U_{50\%}$ ในการทดสอบอิมพัลส์) หน่วยเป็น kV สำหรับแรงดัน อิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตชิงชั่วคราว	280



สารบัญภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2-1	แถบแนวตั้ง (เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 25 เซนติเมตร)	10
รูปที่ 2-2	แถบแนวอน (ผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 25 เซนติเมตร)	10
รูปที่ 2-3	วงจรถ่วงช่องว่างทรงกลมแบ่งเทียบ	14
รูปที่ 2-4	เส้นกราฟแบ่งเทียบมาตรฐาน	15
รูปที่ 2-5	เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง	16
รูปที่ 2-6	วงจรถ่วงของเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง	17
รูปที่ 2-7	วงจรถ่วงโทลลของเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง	18
รูปที่ 2-8	ทรงกลมมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร	19
รูปที่ 2-9	ผู้ควบคุมการป้อนแรงดันให้กับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง	19
รูปที่ 2-10	วงจรถ่วงปรับเทียบระบบวัดแรงดันสูง	21
รูปที่ 2-11	การต่อวงจรถ่วงปรับเทียบระบบวัดแรงดันสูง	21
รูปที่ 2-12	วงจรวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม	23
รูปที่ 2-13	การต่อวงจรวัดแรงดันกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม	23
รูปที่ 2-14	กราฟแสดงวิธีการหาความชื้นสัมพัทธ์	25
รูปที่ 2-15	เส้นกราฟแบ่งเทียบมาตรฐาน	28
รูปที่ 3-1	แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะเต็มคลื่น	32
รูปที่ 3-2	แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หลังคลื่น	33
รูปที่ 3-3	แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หน้าคลื่น	33
รูปที่ 3-4	แรงดันอิมพัลส์สวิตซ์	34
รูปที่ 3-5	วงจรถ่วงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1 ชั้น วงจร A และ วงจร B	35
รูปที่ 3-6	วงจรถ่วงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น	37
รูปที่ 3-7	วงจรถ่วงสร้างแรงดันอิมพัลส์มีไกสวิต	38
รูปที่ 3-8	แรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอกซ์โปเนนเชียล 2 เทอม	39
รูปที่ 3-9	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรถ่วงสร้างแรงดันอิมพัลส์	41
รูปที่ 3-10	ผลของค่าความเหนี่ยวนำต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	42
รูปที่ 3-11	วงจรถ่วงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ของ สจล.	49
รูปที่ 3-12	เปรียบเทียบวงจรถ่วงจริงกับวงจรถ่วงสมมูล	49
รูปที่ 3-13	ชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV, 5 kJ	52
รูปที่ 3-14	ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV, 5 kJ	54
รูปที่ 3-15	ชุดเครื่องอัดประจุ	55
รูปที่ 3-16	ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอัดประจุ	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3-17 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน	57
รูปที่ 3-18 ตู้ควบคุม	58
รูปที่ 3-19 ตำแหน่งชุด Control Unit	58
รูปที่ 3-20 ชุด Control Unit	59
รูปที่ 3-21 วงจรการทดสอบลูกถ้วยฉนวน	61
รูปที่ 3-22 การต่อลูกถ้วยในการทดสอบจริง	62
รูปที่ 3-23 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มที่แรงดัน 50 kV	64
รูปที่ 3-24 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มที่แรงดัน 50 kV ในขณะขยายภาพ	64
รูปที่ 3-25 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่ขนาดแรงดันต่างๆ	65
รูปที่ 3-26 v-t Curve ของรูปคลื่นตัดที่ได้จากการทดสอบลูกถ้วยฉนวนที่ขั้วบวก	66
รูปที่ 3-27 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มที่แรงดัน 45 kV	67
รูปที่ 3-28 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มที่แรงดัน 45 kV ในขณะขยายภาพ	67
รูปที่ 3-29 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่ขนาดแรงดันต่างๆ	68
รูปที่ 3-30 คลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิดซ์แรงดันอัดประจุ 60 kV	69
รูปที่ 3-31 คลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิดซ์แรงดันอัดประจุ 60 kV	70
รูปที่ 4-1 ขดลวดหม้อแปลงและวงจรสมมูลจ่ายที่มีการกระจายขดลวดอย่างสม่ำเสมอเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์	77
รูปที่ 4-2 แรงดันกระจายในช่วงเริ่มต้นบนขดลวดหม้อแปลงที่พันแบบสม่ำเสมอเมื่อได้รับแรงดันเสีรีง	80
รูปที่ 4-3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า	82
รูปที่ 4-4 ตัวอย่างรูปคลื่นฟ้าผ่าที่มีออกซิเดชัน	83
รูปที่ 4-5 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	84
รูปที่ 4-6 ลักษณะแถบทองแดงบาง	87
รูปที่ 4-7 คาปาซิเตอร์โวลต์เตจดีโวลเตอร์ที่ใช้วัดขนาดแรงดันของโครงการนี้	87
รูปที่ 4-8 การต่อระบบวัดแรงดันสำหรับโวลต์เตจดีโวลเตอร์แบบความต้านทาน	88
รูปที่ 4-9 การต่อวงจรระบบวัดแรงดันสำหรับโวลต์เตจดีโวลเตอร์แบบตัวเก็บประจุ	89
รูปที่ 4-10 ลักษณะของสโคปสำหรับวัดและบันทึกรูปคลื่นแรงดันกับกระแส	89
รูปที่ 4-11 ชั้นที่วัดกระแส	90
รูปที่ 4-12 รูปคลื่นกระแสผ่านขดลวดหม้อแปลง	90
รูปที่ 4-13 ผลของความจุไฟฟ้า C_{sh} ที่ต่อขนานเพิ่มเข้าไปในชั้นที่มีต่อความสามารถในการตรวจจับความผิดพร้อมในรูปคลื่นกระแส	92
รูปที่ 4-14 ลักษณะภายนอกของตัวต้านทานแบบลวดพัน	93
รูปที่ 4-15 ลักษณะภายนอกของชั้นที่วัดกระแส	93
รูปที่ 4-16 ลักษณะของเคเบิลวัด	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-17 ลักษณะของมัลติเปิ้ลช็อบปิ้งแก๊ป	95
รูปที่ 4-18 แก๊ปตัดคลื่นที่ม้วนขึ้นมาเอง	96
รูปที่ 4-19 วงจรการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า	97
รูปที่ 4-20 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบของหม้อแปลงเฟสเดียว	98
รูปที่ 4-21 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบของหม้อแปลงสามเฟส	98
รูปที่ 4-22 การต่อขั้วหม้อแปลงสามเฟสรับการทดสอบจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV, 5 kJ	99
รูปที่ 4-23 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ BIL	100
รูปที่ 4-24 ออสซิลโลแกรมแรงดันและกระแสจากการทดสอบ BIL หม้อแปลง 3 เฟส 500 kVA, 33 kV- 400/230 V	102
รูปที่ 4-25 วงจรทดสอบ BIL ของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบจริง	104
รูปที่ 5-1 การดิสชาร์จบางส่วน	106
รูปที่ 5-2 การเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยแขวน ตรวจสอบด้วยกล้องโคโรนา	107
รูปที่ 5-3 ลักษณะอิลคโคโรนและลักษณะโคโรนาดิสชาร์จ	108
รูปที่ 5-4 ลักษณะรูปแบบฉนวนที่ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวและการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิว	109
รูปที่ 5-5 ดิสชาร์จภายในและตัวอย่างการเกิดความเสียหายของการเกิดดิสชาร์จภายในสายเคเบิล	111
รูปที่ 5-6 วงจรสมมูลย์ของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน	112
รูปที่ 5-7 วงจรสมมูลย์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดิสชาร์จและดิสชาร์จตามผิว	112
รูปที่ 5-8 แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD	113
รูปที่ 5-9 ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแก๊ปเล็กๆ	114
รูปที่ 5-10 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD	115
รูปที่ 5-11 การแสดงผลของ PD (เครื่องตรวจวัด PD ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล)	116
รูปที่ 5-12 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบตรง	117
รูปที่ 5-13 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบสมมูล	118
รูปที่ 5-14 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ	120
รูปที่ 5-15 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน	121
รูปที่ 5-16 วิธีลดสัญญาณรบกวน	122
รูปที่ 5-17 วงจรตรวจวัด	122
รูปที่ 5-18 วงจรการทดลอง a) วงจรสมมูลย์ b) วงจรทดสอบจริง	123
รูปที่ 5-19 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ PD และ เวลาทดสอบ	128
รูปที่ 5-20 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน และ เวลาที่ใช้การทดสอบ PD	128
รูปที่ 5-21 ลักษณะก่อนการเกิด PD	129
รูปที่ 5-22 ลักษณะการเกิด PD ขณะเริ่มเกิด	131

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6-1 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงเตสลา	135
รูปที่ 6-2 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงเตสลา 212 kHz ($5 \mu\text{s} / \text{div}$)	136
รูปที่ 6-3 วงจรทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงเตสลา	142
รูปที่ 6-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ	144
รูปที่ 6-5 วงจรการทดสอบลูกถ้วย	146
รูปที่ 6-6 การวาวไฟตามผิวลูกถ้วยแวนที่มีสภาพดีที่แรงดัน 100 kV	147
รูปที่ 6-7 การทดสอบลูกถ้วยแวนที่บกพร่องที่แรงดัน 100 kV	147
รูปที่ 6-8 การทดสอบการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยก้านตรงที่แรงดัน 100 kV	148
รูปที่ 7-1 กระแสไหลผ่าน ไดโอดเลกทริก	150
รูปที่ 7-2 วงจรสมมูลย์ของ ไดโอดเลกทริก	151
รูปที่ 7-3 วงจรสมมูลย์ของ ไดโอดเลกทริกที่แทนกำลังการสูญเสีย ไดโอดเลกทริกเนื่องจากสภาพไฟฟ้า โพลาริเซชันและคิสซาร์จบางส่วน	153
รูปที่ 7-4 วงจร Schering bridge	155
รูปที่ 7-5 เฟสเซอร์ ไดอะแกรมของวงจร Schering bridge	157
รูปที่ 7-6 Glynne bridge	158
รูปที่ 7-7 High-Voltage bridge with Farady cade	159
รูปที่ 7-8 Fully screened bridge	160
รูปที่ 7-9 เครื่องวัดพลังงานสูญเสียไดโอดเลกทริกแบบดิจิทัล	160
รูปที่ 7-10 วงจรการต่อเพื่อวัดค่าและผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้น	161
รูปที่ 7-11 ลักษณะของเครื่องและจุดต่อต่างๆ	161
รูปที่ 7-12 ด้านหน้าของ Tettex AG 2805	162
รูปที่ 7-13 คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tetter รุ่น 3370	163
รูปที่ 7-14 หม้อแปลงกระแสสลับ 50 Hz, 10 kV	164
รูปที่ 7-15 Monogram	165
รูปที่ 7-16 วงจรการทดสอบ	166
รูปที่ 8-1 สายเคเบิลที่ใช้น้ำมันเป็นฉนวน	170
รูปที่ 8-2 ฉนวนเหลวประเภทต่างๆ	172
รูปที่ 8-3 มีหยดน้ำเจือปนในฉนวนเหลว	174
รูปที่ 8-4 อุปกรณ์ทดสอบการเบรคดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลง	179
รูปที่ 8-5 ตัวภาชนะ	179
รูปที่ 8-6 ช่องเติมน้ำมัน	180
รูปที่ 8-7 หัวอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม	180
รูปที่ 8-8 หัวอิเล็กทรอนิกส์แบบวงรี	181
รูปที่ 8-9 ปลอกฉนวนไฟฟ้าแรงสูง	181

รูปที่ 8-10	ปลายต่อไฟฟ้าแรงสูง	181
รูปที่ 8-11	ปลอกฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์	182
รูปที่ 8-12	ปลายด้านต่อกราวด์	182
รูปที่ 8-13	ตัววัดระยะ gap ข้างในอุปกรณ์ทดสอบ	183
รูปที่ 8-14	ฟุตเหล็กวัดระยะ	183
รูปที่ 8-15	ร่างสำหรับติดตั้งฟุตเหล็กวัดระยะ	183
รูปที่ 8-16	กราฟแสดงค่าแรงดันเบรคดาวนเป็นฟังก์ชันของระยะห่างของ ขั้วอิเล็กโตรดจากข้อมูล	185
รูปที่ 8-17	กราฟแสดงแรงดันดับเบรคดาวนกับเวลาที่จ่ายแรงดันของน้ำมันหม้อแปลง ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	187
รูปที่ 8-18	ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบเชิงในอากาศที่มีแรงทางกลและมีสนามไฟฟ้าสูง	188
รูปที่ 8-19	กราฟแสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวนเมื่อจ่ายแรงดันคร่อมฉนวน ของแข็งระยะเวลาต่างกัน	189
รูปที่ 8-20	วงจรการทดลองการเบรคดาวนในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ ระหว่างแคปทรวงกลมกับแคปทรวงกลม	194
รูปที่ 8-21	กราฟผลการทดสอบการเบรคดาวนในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลง บริสุทธิ์ระหว่างแคปทรวงกลมกับแคปทรวงกลม	195
รูปที่ 8-22	การทดลองการเบรคดาวนในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์แคป วงกลมกับแคปครึ่งวงกลม	196
รูปที่ 8-23	กราฟผลการทดสอบการเบรคดาวนในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ ระหว่างระหว่างแคปครึ่งวงกลมกับแคปครึ่งวงกลม	197
รูปที่ 8-24	การเบรคดาวนในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแคป ทรวงกลมกับแคปทรวงกลม	198
รูปที่ 8-25	กราฟผลการทดสอบการเบรคดาวนในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมี สิ่งเจือปนระหว่างแคปทรวงกลมกับแคปทรวงกลม(ผงลูมิเนียมเจือปนอยู่ในน้ำมัน หม้อแปลงประมาณ 30 g)	199
รูปที่ 8-26	การทดสอบการเบรคดาวนในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมี สิ่งเจือปน ระหว่างแคปครึ่งทรวงกลมกับแคปครึ่งทรวงกลม	200
รูปที่ 8-27	กราฟผลการทดสอบการเบรคดาวนในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่ง เจือปนระหว่างแคปครึ่งทรวงกลมกับแคปครึ่งทรวงกลม (ผงลูมิเนียมเจือปนอยู่ในน้ำมัน หม้อแปลงประมาณ 30 g)	201
รูปที่ 9-1	วงจรแรงดันสองเท่า	203
รูปที่ 9-2	วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงแบบแรงดันสองเท่า	204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 9-3 วงจรชั้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรงตามวงจรของ COCKROFT-WALTON	204
รูปที่ 9-4 รูปคลื่นแรงดันของวงจร Cascade ขณะมีโหลด	205
รูปที่ 9-5 DC HIGH VOLTAGE GENERATION MODEL	206
รูปที่ 9-6 วงจรการทดลอง DC HIGH VOLTAGE GENERATION MODEL (4 ชั้น)	207
รูปที่ 10-1 ลักษณะการฝังกราวด์กริดและกราวด์รีด	220
รูปที่ 10-2 ลักษณะการฝังแผ่นพลาสติก, กราวด์กริดและกราวด์รีด	225
รูปที่ 10-3 กราฟ Function $F(X)$ Versus X and Reflecion Factor K	227
รูปที่ 11-1 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์	244
รูปที่ 11-2 ข่ายวงจร 4 ขั้วเขียนแทนระบบวัด	245
รูปที่ 11-3 วงจรวัดผลสนองรูปขึ้นสำหรับระบบวัดแรงดัน	246
รูปที่ 11-4 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง	248
รูปที่ 11-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_o/T_x	248
รูปที่ 11-6 วงจรสมมูลของโวลเตจดีโวลเตอร์	249
รูปที่ 11-7 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบความต้านล้น	251
รูปที่ 11-8 ออสซิลแกรมผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบตัวเก็บประจุ เมื่อ $R_1 = 0$	252
รูปที่ 11-9 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณ	253
รูปที่ 11-10 วงจรหาผลตอบสนองรูปขึ้น	254
รูปที่ 11-11 การปรับค่าความต้านทานหน่วง	255
รูปที่ 11-12 การใช้ออสซิลโลสโคปวัดรูปคลื่นสัญญาณการตอบสนองรูปขึ้น	255
รูปที่ 11-13 ซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบผสม	256
รูปที่ 11-14 ซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 250Ω	256
รูปที่ 11-15 ซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 500Ω	257
รูปที่ 11-16 ซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 750Ω	257
รูปที่ 11-17 ซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 1000Ω	258
รูปที่ 11-18 ผลการ Simulate หาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองของ โวลเตจดีโวลเตอร์แบบผสมด้วยโปรแกรม LABVIEW	258
รูปที่ 11-19 ผลการ Simulate หาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนอง โวลเตจดีโวลเตอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 250Ω ด้วยโปรแกรม LABVIEW	259

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 11-20 ผลการ Simulate หาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองของ โวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 500 Ω ด้วยโปรแกรม LABVIEW	259
รูปที่ 11-21 ผลการ Simulate หาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองของ โวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 750 Ω ด้วยโปรแกรม LABVIEW	260
รูปที่ 11-22 ผลการ Simulate หาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองของ โวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 1000 Ω ด้วยโปรแกรม LABVIEW	260
รูปที่ 11-23 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_{∞}/T_x โดยที่ T_x คือ เวลาหน้าคลื่น(1.2 μ s)ของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด	262
รูปที่ 12-1 การวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับด้วยตัวเก็บประจุต่ออันดับ	263
รูปที่ 12-2 วงจรที่ทำการจำลองด้วยโปรแกรม Orcad	265
รูปที่ 12-3 ผลของการ Simulate ของวงจร	265
รูปที่ 12-4 การต่อวงจรทดสอบ Chubb – Fortes cue	266
รูปที่ 12-5 สัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 50 Ω	269
รูปที่ ผก-1 ความชื้นสัมบูรณ์อากาศในทอมของอุณหภูมิเทอร์โมมิเตอร์กะเปาะแห้งและเปียกและความชื้นสัมพัทธ์	273
รูปที่ ผข-1 กราฟการแปลงผันเพื่อหาค่าความดันไอ	274
รูปที่ ผข-2 ตัวประกอบแก้ความชื้นสำหรับแรงดันทดสอบกระแสสลับความถี่ต่ำ	275
รูปที่ ผข-3 ตัวประกอบแก้ความชื้นสำหรับแรงดันทดสอบอิมพัลส์	276
รูปที่ ผจ-1 โครงสร้างภายนอก	282
รูปที่ ผจ-2 โครงสร้างภายใน	283
รูปที่ ผฉ-1 เครื่อง PD Detector DDX-9101	284
รูปที่ ผฉ-2 Computer ที่ใช้แสดงผล	284
รูปที่ ผฉ-3 หน้าจอเครื่อง PD Detector DDX-9101	285
รูปที่ ผฉ-4 หน้าจอ Computer	285
รูปที่ ผฉ-5 โปรแกรม Remote 9101	286
รูปที่ ผฉ-6 หน้าจอ Computer โปรแกรม Remote 9101	286
รูปที่ ผฉ-7 หน้าจอกรณีที่มิข้อมูลยังค้างอยู่	287
รูปที่ ผฉ-8 หน้าจอกรณีที่เกิดจากการเปิดโปรแกรม Computer ก่อนเปิดเครื่องตรวจจับ PD	287
รูปที่ ผฉ-9 คลิกที่ Search and Connect	288
รูปที่ ผฉ-10 หน้าจอ โปรแกรมปกติ	288
รูปที่ ผฉ-11 การตั้งค่ารายละเอียดข้อมูลของรายงานผลการวัด PD	289
รูปที่ ผฉ-12 การเลือกที่ Edit	289
รูปที่ ผฉ-13 General	290
รูปที่ ผฉ-14 Test Info	290

รูปที่ ผฉ-15 HTML Report	291
รูปที่ ผฉ-16 การคลิกที่ General	291
รูปที่ ผฉ-17 การคลิกที่คำว่า PD Detector	292
รูปที่ ผฉ-18 หลังจากคลิกคำว่า PD Detector แล้ว	292
รูปที่ ผฉ-19 การคลิกที่ Test Info	293
รูปที่ ผฉ-20 หลังจากการตั้งค่ารายงานเสร็จ	294
รูปที่ ผฉ-21 แถบบาร์ Set System Characteristics	294
รูปที่ ผฉ-22 การส่งรายงานไปที่ Save	295
รูปที่ ผฉ-23 การตั้งค่า	295
รูปที่ ผฉ-24 การตั้งชื่อเสร็จแล้วคลิก OK	296
รูปที่ ผฉ-25 ช่องการปรับความถี่สูงและต่ำ	297
รูปที่ ผฉ-26 ช่องสัญญาณ PD ที่จะทำการวัด	297
รูปที่ ผฉ-27 C ปรับค่าได้มีค่า 1nF- 1000nF	298
รูปที่ ผฉ-28 ค่า C ค่าคงที่มีค่า 100 pF	298
รูปที่ ผช-1 วงจรการปรับเทียบ	299
รูปที่ ผช-2 การต่อวงจรปรับเทียบโดยใช้แบบค่า C ค่าคงที่ (100 pF)	299
รูปที่ ผช-3 การต่อวงจรแบบค่า C ปรับค่าได้ (C ปรับค่าได้มีค่า 1 nF- 1000nF)	300
รูปที่ ผช-4 การเลือกจำนวนทลส์ (ที่ไอคอนตามลูกศรเท่านั้น)	300
รูปที่ ผช-5 การเลือกค่าที่ใช้ในการปรับเทียบระบบวัด PD	300
รูปที่ ผช-6 การเลือก Calibrator is on	301
รูปที่ ผช-7 การ RUN Calibration	301
รูปที่ ผช-8 ขณะทำการ RUN Calibration	301
รูปที่ ผช-9 ทำการ Calibration เสร็จแล้ว	302
รูปที่ ผช-10 ขณะ กด Calibrate of เพื่อดู Back-Ground Noise	303
รูปที่ ผช-1 ผู้ควบคุมการจ่ายแรงดันทดสอบ	304
รูปที่ ผช-2 Main Power Breaker	305
รูปที่ ผช-3 การปิดหน้าต่างรายงาน	307
รูปที่ ผช-4 กราฟการเกิด PD	308
รูปที่ ผฉ-1 รูปแบบการเกิดโคโรนา	309
รูปที่ ผฉ-2 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จตามผิว	309
รูปที่ ผฉ-3 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จภายใน	310
รูปที่ ผฉ-4 สัญญาณรบกวนแบบต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด	311
รูปที่ ผฉ-1 การพันความต้านทานเส้นลวดแบบไร้ความเหนียว	313

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของภาควิศวกรรมไฟฟ้า ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง หลังจากที่ได้ย้ายจากห้องปฏิบัติการเก่ามายัง อาคารปฏิบัติการรวมวิศวกรรมศาสตร์ 2 แต่ที่ผ่านมาการพัฒนาห้องปฏิบัติการ ก็ยังไม่เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งยังมีอุปกรณ์บางตัวที่ยังชำรุดเสียหาย ถึงแม้บางตัวใช้งานได้ แต่ก็ใช้งานไม่ได้ไม่เต็มประสิทธิภาพมากนักและยังขาดอุปกรณ์ป้องกันในชุดทดสอบบางชุดรวมทั้งยังขาดคู่มือการใช้งาน ดังนั้นจึงได้มีโครงการนี้ เพื่อเตรียมความพร้อมของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ให้สามารถรองรับการลงปฏิบัติการของนักศึกษา และรองรับการทดสอบอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าแรงสูงรวมทั้งความร่วมมือและการบริการทางด้านวิชาการกับหน่วยงานต่างๆทั้งภาครัฐและเอกชน เพราะฉะนั้น โครงการนี้จึงเป็นโครงการเพื่อจัดเตรียมความพร้อมของชุดทดสอบต่างๆ ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการให้สามารถใช้งานได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อให้ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง มีความพร้อมในการรองรับการปฏิบัติการต่างๆ รวมทั้งการให้บริการทางด้านวิชาการ ทั้งภาครัฐและเอกชนให้ได้มากที่สุด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เป็นการศึกษาพัฒนาและทำการทดสอบเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งแบ่งออกเป็น ดังนี้

- 1) ศึกษาการใช้งานของเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง 600 kV, 10 mA พร้อมทั้งทำการทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบตามมาตรฐาน IEC รวมทั้งการปรับเปลี่ยนวงจรการทดสอบ
- 2) ศึกษาการใช้งานและทำการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV รวมทั้งจัดทำชุดทดสอบเคเบิลสเปเซอร์และลูกถ้วยฉนวน
- 3) ศึกษาการใช้งานและเตรียมความพร้อมของชุดทดสอบ $C \tan \delta$ เพื่อให้มีความพร้อมในการลงปฏิบัติการของนักศึกษาต่อไป
- 4) ศึกษาการใช้งานของชุดทดสอบ PD และจัดทำแบบจำลองการเกิด PD แบบต่างๆ พร้อมทั้งทำการทดสอบเพื่อหาค่า PD ในแบบจำลองการเกิด PD แบบต่างๆ
- 5) ศึกษาการใช้งานของหม้อแปลงทดสอบและทำการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันเอาท์พุทว่ามีค่าตามพิกัดเครื่องหรือไม่รวมทั้งทำการทดสอบหาความบกพร่องของฉนวนลูกถ้วย
- 6) ศึกษาเทคนิคการทดสอบ BIL (Basic Impulse Insulation Level) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
- 7) ศึกษาและจัดทำชุดทดสอบการเกิดเบรคดาวน์ในน้ำมัน
- 8) ศึกษาการกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง

- 9) ศึกษาการออกแบบและการ วิศวกรรมบราวน์
- 10) ศึกษาผลตอบแทนของรูปปั้นของ โวลท์เตจดีไวเซอร์
- 11) ศึกษาการวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับ
- 12) จัดทำคู่มือการใช้งานและเอกสารประกอบการลงปฏิบัติการของชุดทดสอบต่างๆ

1.4 สิ่งที่ได้ศึกษาและลงมือปฏิบัติในโครงการ ซึ่งแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้

1.4.1 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง 600 kV, 10 mA

- 1) ศึกษาการใช้งานและหลักการของเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง 600 kV, 10 mA
- 2) จัดเตรียมความพร้อมของชุดเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง 600 kV, 10 mA เพื่อให้มีความพร้อมในการลงปฏิบัติการของนักศึกษาชั้นปีที่ 2 W และ 3 B พร้อมกับเป็นผู้ช่วยอาจารย์สาธิตการทดลองในการลงปฏิบัติการของนักศึกษาปริญญาตรีทุกครั้ง
- 3) ทำการทดสอบการปรับเทียบระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม
- 4) ทำการทดสอบการวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม
- 5) ปรับเปลี่ยนวงจรการทดสอบ โดยการต่อความต้านทานน้ำเข้าไปในวงจรการทดสอบ เพื่อช่วยจำกัดกระแสที่จะไหลผ่านแคปทรวงกลม ในขณะที่เกิดการเบรคความถี่ที่แคปทรวงกลม
- 6) จัดทำคู่มือการใช้งานประวัติการใช้งานเครื่องทดสอบและเอกสารประกอบการลงปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง

1.4.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV, 5 kJ

- 1) ศึกษาการใช้งานและหลักการของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- 2) จัดทำชุดทดสอบสำหรับใช้ในการทดสอบสเปซเซอร์และถูกด้วยฉนวน
- 3) ทดสอบเคเบิ้ลสเปซเซอร์และถูกด้วยฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตซ์ตามมาตรฐาน IEC พร้อมกับเก็บผลการทดสอบมาทำการวิเคราะห์หาผลแตกต่าง
- 4) จัดเตรียมความพร้อมของชุด เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV เพื่อให้มีความพร้อมในการลงปฏิบัติการของนักศึกษาชั้นปีที่ 2 W และ 3 B พร้อมกับเป็นผู้ช่วยอาจารย์สาธิตการทดลองในการลงปฏิบัติการของนักศึกษาปริญญาตรีทุกครั้ง
- 5) จัดทำคู่มือการใช้งาน ประวัติการใช้งานเครื่องทดสอบและเอกสารประกอบการลงปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

1.4.3 เครื่องวัดพลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริก

- 1) ศึกษาการใช้งานและหลักการของเครื่องวัดพลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริก
- 2) จัดเตรียมความพร้อมของชุด เครื่องวัดพลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริก เพื่อให้มีความพร้อมในการลงปฏิบัติการของนักศึกษาชั้นปีที่ 2 W และ 3 B พร้อมกับเป็นผู้ช่วยอาจารย์สาธิตการทดลองในการลงปฏิบัติการของนักศึกษาปริญญาตรีทุกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) จัดทำคู่มือการใช้งานประวัติการใช้งานเครื่องทดสอบและเอกสารประกอบการลงปฏิบัติการของเครื่องวัดพลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กทริก

1.4.4 ชุดทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD)

- 1) ศึกษาการใช้งานและหลักการของชุดทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
- 2) จัดทำแบบจำลองการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ
- 3) ทำการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ของแบบจำลองการเกิด PD แบบต่างๆ
- 4) ทำการทดสอบเพื่อหาค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในแบบจำลองการเกิด PD แบบต่างๆ
- 5) จัดเตรียมความพร้อมของชุดทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เพื่อให้มีความพร้อมในการลงปฏิบัติการของนักศึกษาชั้นปีที่ 2 W และ 3 B พร้อมกับเป็นผู้ช่วยอาจารย์สาธิตการทดลองในการลงปฏิบัติการของนักศึกษาปริญญาตรีทุกครั้ง
- 6) จัดทำคู่มือการใช้งานประวัติเครื่องทดสอบและเอกสารประกอบการลงปฏิบัติการของชุดทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

1.4.5 หม้อแปลงเตสลา

- 1) ศึกษาการใช้งานและหลักการของหม้อแปลงเตสลา
- 2) ทำการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าตามพิกัดเครื่องหรือไม่ รวมทั้งทำการทดสอบหาความบกพร่องของฉนวนลูกถ้วยว่าอยู่ในสภาพใด (ดีหรือเสีย)
- 3) จัดทำคู่มือการใช้งาน ประวัติการใช้งานเครื่องทดสอบและเอกสารประกอบการลงปฏิบัติการของหม้อแปลงเตสลา

1.4.6 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยแรงดันอิมพัลส์ (BIL)

- 1) ศึกษาหลักการทดสอบหม้อแปลงกำลังด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า
- 2) ศึกษาและจัดทำความต้านชั้นที่ใช้ในการวัดกระแสอิมพัลส์ ที่จะใช้ในทดสอบ BIL
- 3) ศึกษาและจัดทำขอบปั้งแกป (Chopping Gap) เพื่อช่วยให้เกิดรูปคลื่นตัดในการทดสอบ BIL
- 4) ทำการย้ายหม้อแปลงจากห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง ตึกเก่า มายังห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงแห่งใหม่ รวมทั้งอุปกรณ์อื่นๆ โดยได้รับความอนุเคราะห์รถยกจากบริษัท จรุงไทย ไวท์แอนด์เคเมิล
- 5) ทำการทดสอบหม้อแปลงเก็บผลข้อมูลมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบว่าเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่
- 6) จัดทำคู่มือการทดสอบ BIL

1.4.7 การเกิดเบรคดาวน์ในน้ำมัน

- 1) ศึกษาหลักการการเกิดเบรคดาวน์ในน้ำมัน
- 2) จัดทำชุดทดสอบการเกิดเบรคดาวน์ในน้ำมัน เป็นจำนวน 4 ชุด มี 2 แบบ ตามลักษณะหัว

อิเล็กโตรด คือ แบบทรงกลม และแบบครึ่งทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ทำการทดสอบการเกิดเบรคความถี่ในน้ำมัน
- 4) จัดทำคู่มือการทดสอบ การเกิดเบรคความถี่ในน้ำมัน

1.4.8 ศึกษาการกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง

- 1) ศึกษาเรื่องการสร้างแรงดันสูงกระแสตรง
- 2) ทำการทดลองเก็บผลข้อมูลเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลทดสอบ
- 3) จัดทำคู่มือการทดสอบ

1.4.9 ศึกษาการออกแบบและการวัดระบบกราวด์

- 1) ศึกษาระบบการต่อลงดิน และศึกษาโปรแกรม ETAP 4.0.0 (Electrical transient analyzer program) ตามมาตรฐาน IEEE 80 - 1986
- 2) จัดทำคู่มือการใช้งาน โปรแกรม ETAP 4.0.0 (เรื่อง Ground grid system) และวิเคราะห์สนามไฟฟ้า FEM (Finite Element Method)

1.4.10 จัดทำชุดเครื่องมือวัดเพื่อใช้ทดสอบคุณสมบัติของโวลต์เตจดีไวเซอร์

- 1) ศึกษาหลักการและจัดทำเครื่องวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับของ โวลต์เตจดีไวเซอร์
- 2) ศึกษาคุณสมบัติผลตอบสนองรูปคลื่นของ โวลต์เตจดีไวเซอร์
- 3) จัดทำคู่มือการทดสอบ

1.5 สิ่งที่ได้ศึกษาและลงมือปฏิบัติที่อยู่นอกเหนือขอบเขตโครงการที่กำหนดไว้

- 1) จัดเตรียมความพร้อมของชุดทดสอบต่างๆ เพื่อเผยแพร่ความสามารถของห้องปฏิบัติการวิชาการ ให้กับ การไฟฟ้านครหลวง, บริษัท PRECISE, นักศึกษามหาวิทยาลัยเซนจอร์น, นักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครและบุคลากรดูงานจากประเทศญี่ปุ่น
- 2) นำโวลต์เตจดีไวเซอร์ไปทำการสอบเทียบที่การไฟฟ้าฯ บางพลีเป็นจำนวน 2 ตัว
- 3) จัดทำแก๊ป (หัวอิเล็กโตรด) ในรูปทรงต่างๆ คือ รีอดแก๊ปทรงสี่เหลี่ยมหัวตัด, รีอดแก๊ปทรงกระบอกหัวตัด, รีอดแก๊ปทรงกระบอกหัวมน, รีอดแก๊ปทรงกระบอกปลายแหลม และ ได้นำแก๊ปรูปทรงกลมขนาดต่างๆ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มาไว้ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ของ สจล.
- 4) ทำการปรับปรุงซ่อมแซมทำความสะอาดชิ้นส่วนของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 kV
- 5) ทำการทดสอบเพื่อนำรูปคลื่นมาวิเคราะห์เปรียบเทียบหาสาเหตุของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์
- 6) จัดทำโฮมเพจของห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง ขนาดพื้นที่ 200 MB เพื่อเป็นข้อมูลต่อผู้สนใจทางด้านไฟฟ้าแรงสูง
- 7) จัดทำป้ายของห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการงาน

- 1) สามารถทำการทดสอบอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าแรงสูงชนิดต่างๆด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงได้
- 2) สามารถใช้งานชุดทดสอบต่างๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงและมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ
- 3) สามารถนำความรู้ที่ได้จากการทำโครงการงานนี้ไปประยุกต์ใช้ในการทำงานในอนาคตได้



บทที่ 2

เทคนิคการวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม

2.1 บทนำ

การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลมเป็นวิธีการวัดค่ายอดของ แรงดันสูงกระแสสลับกระแสตรงหรือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มและอิมพัลส์แบบสวิตซ์ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและมีความแน่นอนเชื่อถือได้ การวัดแรงดันสูงด้วยแก๊ปทรงกลม ได้มีใช้กันแพร่หลายเป็นเวลามากกว่า 75 ปี แล้วโดยอาศัยการเกิดสปาร์กหรือการเกิดเบรกดาวน เมื่อแรงดันถึงค่าที่ทำให้อากาศภายในช่องว่างแก๊ป ระหว่าง อิเล็กโตรดเกิดการเบรกดาวน ซึ่งเป็นไปตามกฎการคิซซาร์จของก๊าส คือ สปาร์กหรือเบรกดาวนจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าแรงดันเบรกดาวนสถิติ (Statistic Breakdown Discharge Voltage) ที่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนที่แน่นอนทำซ้ำเดิมได้ มาตรฐานการวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม ฉบับปัจจุบัน IEC 60052: 2002 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาวนในตารางด้วยค่าความคลาดเคลื่อน (Uncertainty) 3% ที่ระดับความเชื่อมั่น (Confidence level) 95% สำหรับการวัดแรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ ในขณะที่มาตรฐาน IEEE Std 4 ; 1995 และ IEC 50:1960 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาวนในตารางมาตรฐานด้วยความถูกต้อง 5% สำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง และ 3% สำหรับแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวนของช่องว่างทรงกลม

การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลมนั้นอาศัยการเกิดเบรกดาวน ของฉนวนอากาศที่อยู่ระหว่างแก๊ปทรงกลม โดยที่การเกิดเบรกดาวนจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางมิติของอิเล็กโตรดอันได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของแก๊ปทรงกลม (D) และระยะห่างของแก๊ปทรงกลม (s) โดยที่ในการวัดค่าแรงดันเบรกดาวนนั้นระยะ s จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ D/2 และนอกจากนี้แล้วค่าแรงดันเบรกดาวนยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และความชื้นของอากาศ โดยที่มาตรฐานฉบับก่อน IEC 52: 1960 และ IEEE Std 4: 1995 ได้ละเลยผลของความชื้นในอากาศที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน มาตรฐานฉบับปัจจุบัน IEC 60052 ได้มีการคำนึงถึงผลของความชื้นในอากาศ พบว่าทำให้แรงดันเบรกดาวนของช่องว่างทรงกลม จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมบูรณ์ 0.2% ต่อ gm^{-3} ดังนั้นจะได้ว่า

$$U_b = f(D, S, \delta, h) \quad (2-1)$$

เมื่อ	U_b	คือ	แรงดันที่ทำให้เกิดการสปาร์กหรือเบรกดาวน
	D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม
	S	คือ	ระยะช่องว่างระหว่างแก๊ปทรงกลม
	δ	คือ	ความหนาแน่นอากาศขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ
	h	คือ	ความชื้นของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน IEC 60052 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาว์นของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ (t_0) 20 °C และความดันบรรยากาศ (b_0) 101.3 kPa หรือ 760 mmHg หรือ 1013 mbar ความชื้นสัมบูรณ์จะอยู่ระหว่าง 5 gm^{-3} - 12 gm^{-3} ที่ค่าเฉลี่ย 8.5 gm^{-3} สำหรับมาตรฐาน IEEE std 4:1995 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาว์นของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ (t_0) 20 °C และความดันบรรยากาศ (b_0) 101.3 kPa หรือ 1013 mbar หรือ 760 mmHg โดยที่ความชื้นสัมบูรณ์ 11 gm^{-3} ถ้า b เป็นความดันบรรยากาศ (kPa) และ H เป็นความสูงของบารอมิเตอร์ (mmHg) จะได้

$$b = 0.1333H \quad (2-2)$$

ดังนั้นค่าแรงดันเบรกดาว์นที่วัดได้ที่ความดัน, อุณหภูมิและความชื้นใดๆ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจะต้องแปลงค่าที่วัดได้ไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$U_0 = \frac{U}{\delta \times k} \quad (2-3)$$

เมื่อ U_0 คือ ค่าแรงดันเบรกดาว์นที่สภาวะมาตรฐาน
 U คือ ค่าแรงดันเบรกดาว์นที่สภาวะห้องทดสอบ
 δ คือ ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ
 k คือ ตัวประกอบแปลงผันเนื่องจากความชื้น

$$\delta = \frac{b}{b_0} \times \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (2-4)$$

$$k = 1 + (0.002 \times (h/\delta - 8.5)) \quad (2-5)$$

เมื่อ b คือ ความดันของอากาศที่สภาวะห้องทดลอง เป็น kPa หรือ mmHg หรือ mbar
 t คือ อุณหภูมิของอากาศที่สภาวะห้องทดลอง เป็น °C
 h คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศที่สภาวะห้องทดลองเป็น gm^{-3}

ในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงบางแห่งได้วัดค่าของความชื้นของบรรยากาศในสภาวะของความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถที่จะแปลงเป็นความชื้นสัมบูรณ์ได้โดยใช้กราฟการแปลงผันดังแสดงในภาคผนวก ก เมื่อพิจารณาถึงสภาวะแวดล้อมในห้องทดสอบของประเทศไทยพบว่า ค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศมีค่าอยู่นอกเหนือขอบเขตที่กำหนดตามสภาวะมาตรฐานของ IEC โดยที่การหาค่าแฟคเตอร์แก้ความชื้นในอากาศ (k_h) ได้มีมาก่อนแล้วในกรณีของการทดสอบอุปกรณ์ฉนวน โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d} \times kh \quad (2-6)$$

เมื่อ	U_{bn}	คือ	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน
	U_b	คือ	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะห้องทดลอง
	k_d	คือ	แฟคเตอร์แก้ความหนาแน่นอากาศ
	kh	คือ	แฟคเตอร์แก้ความชื้นในอากาศ

k_d จะมีค่าเท่ากับ δ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ) เมื่อ δ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.95 - 1.05 และกรณีอื่นๆ สามารถหาค่า k_d ได้จากตารางที่ 2-1 ค่า δ นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

ความหนาแน่นอากาศ (δ)	ค่าแก้ (k_d)
0.70	0.72
0.75	0.77
0.80	0.82
0.85	0.86
0.90	0.91
0.95	0.95
1.00	1.00
1.05	1.05
1.10	1.09
1.15	1.13

ตารางที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_d กับ δ

สำหรับค่า k_h นั้นสามารถหาได้จากเส้นกราฟในภาคผนวก ข กรณีรายละเอียดการหาค่าแฟคเตอร์แก้ไขตามมาตรฐาน IEEE std สามารถดูได้จากมาตรฐานฉบับดังกล่าว

IEC 60052 กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐานของแคปทรงกลมได้ 12 ขนาด เริ่มต้นตั้งแต่ 20 มิลลิเมตร จนถึง 2000 มิลลิเมตร โดยที่ IEEE ได้กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมไว้ตั้งแต่ 62.5 มิลลิเมตรจนถึง 2000 มิลลิเมตรและค่าแรงดันมาตรฐานที่กำหนดไว้เริ่มตั้งแต่ 17.5 กิโลโวลต์พีคจนถึงประมาณ 2 ล้านกิโลโวลต์พีค ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่กำหนดในตารางมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ค

ค่าในตารางเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน IEC 60052 หากโครงสร้างการติดตั้ง การฉายรังสี (irradiation) เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

2.2.2 มาตรฐานแคปทรงกลม

มาตรฐานช่องว่างทรงกลม เป็นการคิดตั้งอุปกรณ์วัดค่าพีคของแรงดันโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60052 และ IEEE std 4 มาตรฐานนี้เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป และมาตรฐานเหล่านี้ได้กล่าวถึงข้อ

เอกสารกำหนดของอุปกรณ์วัดค่าแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลมซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 เงื่อนไขข้อกำหนดของรูปร่างและพื้นผิวทรงกลม

แกปทรงกลมประกอบด้วยโลหะทรงกลม 2 ลูก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D เท่ากันทั้ง 2 ลูก และประกอบด้วย ก้านยึดแกปทรงกลม เกียร์ขับเคลื่อนปรับระยะจนวนรองรับ โครงรองรับแกปทรงกลม โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลาง D คือ 2 – 5 – 6.25 – 10 – 12.5 – 15 – 25 – 50 – 75 – 100 – 150 และ 200 เซนติเมตร ระยะทางระหว่างแกปทรงกลมทั้งสองแทนด้วย S ทรงกลมควรจะทำขึ้นด้วยความประณีต คือ ผิวต้องเรียบและส่วนโค้งจะต้องเท่ากันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ความคลาดเคลื่อนของขนาดและรูปร่างจะต้องผ่านการตรวจสอบก่อนที่จะใช้งานครั้งแรก ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยเครื่องมือที่เหมาะสม เช่น Spherometer

เส้นผ่านศูนย์กลางของแกปทรงกลมแต่ละลูกขนาดควรจะทำกันไม่ควรแตกต่างกันเกิน 2 % ในบริเวณที่จุดเกิดการเบรคควาน์ จะต้องเป็นผิวเรียบ ไม่เป็นผิวขรุขระ (ความขรุขระต้องไม่มากกว่า $10 \mu\text{m}$) เมื่อใช้งานช่องว่างทรงกลมแล้วโดยทั่วไปจะต้องทำการตรวจสอบและทำความสะอาดผิวของทรงกลมอยู่เสมอ โดยการสัมผัสและการสังเกต

2.2.4 ข้อกำหนดของช่องว่างทรงกลมเพื่อสำหรับการวัด

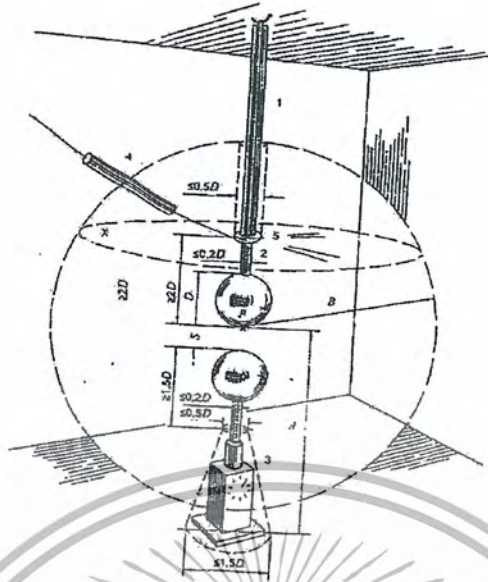
2.2.4.1 แกปแนวตั้ง (Vertical gap)

เมื่อจัดให้ทรงกลมอยู่ในแนวตั้ง แกนของทรงกลมแรงสูงไม่ควรจะเป็นขอบคมหรือมุมและเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนไม่ควรเกิน $0.2D$ ข้อกำหนดนี้ทำขึ้นภายใต้ระเบียบข้อบังคับ เพื่อลดผลกระทบของแกนทรงกลมแรงสูงต่อแรงดันเบรคควาน์ของแกปทรงกลมและถ้าหากมีการใช้ โคโรนาซีลด์ ที่ด้านปลายของแกนทรงกลมแรงสูง โดยจะยึดตั้งฉากกับแกนของทรงกลมขนาดของโคโรนาซีลด์จะต้องไม่เกิน $0.5D$ และห่างจากจุดสปาร์กของแกปทรงกลมไม่น้อยกว่า $2D$

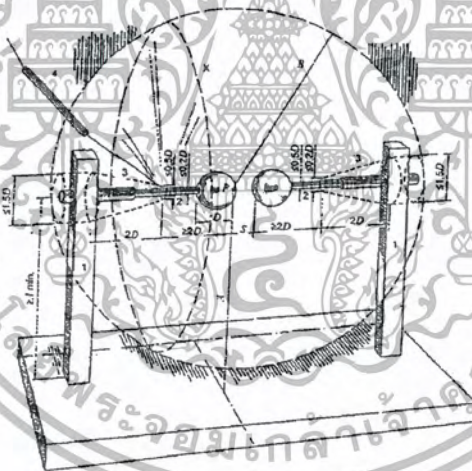
ส่วนที่ต่อลงดินและเกียร์ขับเคลื่อนมีผลกระทบน้อยมากดังนั้นขนาดเหล่านั้นจึงมีความสำคัญน้อยรูปที่ 2-1 ข้อกำหนดของขนาดของส่วนประกอบของตัวอย่างแกปทรงกลมแนวตั้งก้านของแกปทรงกลมทั้งสองต้องสมมาตรกัน แกปแนวตั้งปกติจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 25 เซนติเมตร

2.2.4.1 แกปแนวนอน (Horizontal gap)

แกปแนวนอนมีข้อกำหนดของขนาดของส่วนประกอบต่างๆ เหมือนกับแกปแนวตั้ง ปกติแล้ว แกปแนวนอนจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 25 เซนติเมตร แกปแนวนอนแสดงดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-1 แกบแนวตั้ง (เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 25 เซนติเมตร)



รูปที่ 2-2 แกบแนวนอน (เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 25 เซนติเมตร)

จากรูปที่ 2-1 และ 2-2 เมื่อ

1 คือ ฉนวนรองรับ

3 คือ เกียร์ขับเคลื่อนทรงกลมเพื่อปรับระยะ

5 คือ ที่ต่อสายแรงสูง

B คือ รัศมีย่านปลอดภัยจากวัตถุอื่น

2 คือ ก้านยึดแกบทรงกลม

4 คือ สายแรงสูงอันดับกับความต้านทาน

A คือ ความสูง P เหนือพื้นดิน

P คือ จุดเกิดการเบรคควาน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูงของทรงกลมเหนือพื้นดิน (Height of the spheres above the horizontal earthed plane) ระยะ A ของจุดที่เกิดเบรกควาน์เหนือพื้นที่ห้องปฏิบัติการจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 2-2 ถ้าติดตั้งแถบทรงกลมแล้วส่วนที่ต่อลงดินใกล้กับเพดาน โดยที่พื้นผิวอื่นๆ เช่นผนังห้อง และพื้นห้อง มีระยะทางค่อนข้างห่างไกลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางจากเพดานไปยังส่วนที่ต่อลงดิน เพดานจะถูกพิจารณาเป็นระนาบที่จะวัดไปหาจุดสปาร์กเป็นระยะ A

ระยะปลอดภัยวัตถุอื่นใดของทรงกลมวัดแรงดัน (Clearance around the spheres) คือระยะจากจุดเบรกควาน์ไปยังวัตถุแปลกปลอมอื่นๆ เช่น เพดาน ผนังและตัวนำต่างๆ รวมทั้งอุปกรณ์ใดๆ ที่ต่อลงดิน เช่นเดียวกับตัวรองรับ โครงสร้างสำหรับทรงกลม ถ้าเป็นวัตถุตัวนำจะต้องมีระยะห่างน้อยที่สุดเป็นระยะ B ดังตารางที่ 2-2 ในกรณีนี้ยอมให้ต่ำกว่า B ได้ แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 2D

ตัวรองรับ โครงสร้างสำหรับทรงกลมที่ทำจากวัสดุฉนวน โดยมีเงื่อนไขว่าต้องสะอาดและแห้งและทรงกลมนี้ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์เท่านั้น ระยะ B ระหว่างจุดเกิดเบรกควาน์และโครงสร้างรองรับทรงกลมอาจจะน้อยกว่าตามข้อกำหนดในตารางที่ 2-2 ได้ แต่อย่างไรก็ตามต้องไม่น้อยกว่า 1.6D

ค่าพีคของแรงดันเบรกควาน์ใน ตาราง ค (ภาคผนวก) ใช้ได้กับที่ระยะปลอดภัยวัตถุอื่นได้ รอบทรงกลม ภายในข้อกำหนดที่ให้ไว้ในตารางที่ 2-2

เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม (D), cm	ค่าต่ำสุดของ A	ค่าสูงสุดของ A	ค่าต่ำสุดของ B
Up to 6.25	7D	9D	14S
10 -15	6D	8D	12S
25	5D	7D	10S
50	4D	6D	8S
75	4D	6D	8S
100	3.5D	5D	7S
150	3D	4D	6S
200	3D	4D	6S

ตารางที่ 2-2 ความสูงของแถบทรงกลมเหนือพื้นดิน (A) และระยะปลอดภัยตัวนำ (B)

2.2.5 การต่อลงดินและการต่อสายต้านแรงสูง

ทรงกลมต้านแรงต่ำจะต้องต่อลงดินโดยอาจผ่านความต้านทาน เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น วัดกระแส สำหรับทรงกลมต้านแรงสูงตัวนำที่ต่อรวมทั้งความต้านทานอนุกรมเข้ากับก้านยึดทรงกลมจะต้องห่างจากจุดที่เกิดการเบรกควาน์อย่างน้อยที่สุด 2D โดยจะต้องอยู่เหนือระนาบ X

2.2.6 ตัวต้านทานป้องกันในการวัดแรงดันกระแสสลับ กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์

ในการวัดแรงดันกระแสสลับและกระแสตรง ค่าความต้านทานด้านแรงสูงควรมีค่าระหว่าง 100 กิโลโอห์ม ถึง 1 เมกะโอห์ม เพื่อป้องกันการเกิดออสซิลเลชัน อันอาจจะเป็นสาเหตุของการเกิดเบรกดาวน์ที่ผิดปกติในวงจรที่ทำการทดสอบ โดยที่ค่าความต้านทานดังกล่าวทำให้สามารถละลายผลของแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานได้ แต่ถ้าในวงจรทดสอบหรือวัสดุทดสอบไม่เกิดการดิซชาร์จชนิดนี้ ค่าความต้านทานสามารถลดค่าลงได้ แต่จะต้องเพียงพอแก่การป้องกันการเกิดความร้อนสูงที่ทรงกลม ในกรณีการวัดแรงดันอิมพัลส์ ตัวต้านทานที่ใช้จะมีค่าไม่เกิน 500 โอห์มและควรจะเป็นประเภทตัวนำที่ปราศจากความเหนี่ยวนำ (ไม่ควรมีความเหนี่ยวนำเกิน 30 ไมโครเฮนรี)

2.2.7 การใช้งานแถบทรงกลม

แถบทรงกลมจะถือว่าเป็นเครื่องมือวัดที่ถูกต้องตามมาตรฐานเมื่อค่าเบี่ยงเบน (Conventional deviation; Z) คูได้จาก IEC 60 - 1 น้อยกว่า 1% ในการวัดแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า และ Z มีค่าน้อยกว่า 1.5% ในการวัดแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิง ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีผลจากลักษณะผิวทรงกลม ความสามารถในการหาอิเล็กทรอนิกส์ (อาจจะมีกรวยรังสี) ผ่นระอองในอากาศ รวมทั้งกระบวนการวัด

2.2.8 ผิวของทรงกลม

ผิวของทรงกลมจะต้องเรียบแห้งและสะอาดจะต้องไม่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวชนิดต่างๆ หลังจากใช้งานไปแล้ว ผิวของทรงกลมจะมีลักษณะขรุขระให้ใช้กระดาษทรายละเอียด (fine abrasive paper) ขัดให้เรียบ บริเวณที่มีความขรุขระ ความขรุขระอาจจะความแน่นที่ผิวของทรงกลมซึ่งให้การวัดผิดพลาดได้ เพราะว่าการเกิดเบรกดาวน์ของแถบทรงกลมจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการหาอิเล็กทรอนิกส์ในช่องว่างทรงกลม ในขณะเวลาที่ป้อนแรงดัน ซึ่งถ้าหากว่าในการทดลองค่าเบี่ยงเบน มากกว่าค่าที่กำหนดจะต้องมีการฉายรังสีเข้าไป

การฉายรังสีโดยปกติแล้วจะใช้ในการวัดค่าแรงดันที่ต่ำกว่า 50 กิโลโวลท์พีค สำหรับแถบทรงกลมทุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและใช้ในกรณีที่แถบทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร

2.2.9 การวัดค่าของแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน

1) ทำการปรับเทียบระดับวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลมจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านที่อ่านจากโวลท์มิเตอร์กับแรงดันสูงที่ใช้ทดสอบ

2) ป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ ค่อยๆ เพิ่มแรงดันอย่างช้าๆ เพื่อให้สามารถอ่านค่าแรงดันจากเครื่องมือวัดแรงดันค่าได้

3) ป้อนแรงดันจนเกิดเบรกดาวน์ บันทึกค่าแรงดันทางด้านแรงดันต่ำและจากตารางมาตรฐานก็จะสามารถรู้ค่าแรงดันสูงได้ทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การป้อนแรงดันแต่ละครั้งจะต้องไม่น้อยกว่า 30 วินาที เพื่อให้อิเล็กทรอนิกส์คลายตัว

5) ค่าที่ถือว่าถูกต้องสำหรับการทดลองต่อเนื่อง 10 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยออกมา โดยที่ค่า (Conventional deviation) จะต้องน้อยกว่า 1% ของค่าเฉลี่ย

หมายเหตุ: ค่าในตารางมาตรฐานที่ระยะแกปอยู่ในช่วง $0.5D - 0.7D$ ซึ่งเป็นค่าอยู่ในวงเล็บจะเป็นค่าที่ไม่รู้ระดับความเชื่อมั่นสำหรับการวัดแรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์และในกรณีการวัดแรงดันสูงกระแสตรงไม่สามารถที่จะหาค่าความแน่นอนได้

2.2.10 การวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม

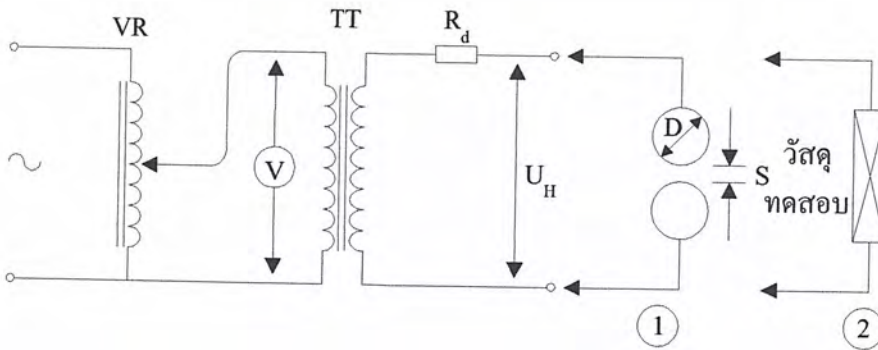
การวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม มาตรฐาน IEC 60052 ไม่ได้แนะนำให้ใช้เพราะอาจเกิดความผิดพลาดของการเกิดประกายไฟที่ระดับแรงดันต่ำได้เนื่องจากอนุภาคไฟ-เบอร์ในอากาศ (fibrous particle) และในกรณีที่ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศอยู่ในช่วง $1 \text{ gm}^{-3} - 13 \text{ gm}^{-3}$ ได้แนะนำให้ใช้ช่องว่าง ร็อด – ร็อด (rod – rod gap) ในการวัดแรงดันสูงกระแสตรง แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ไม่สามารถวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่าง ร็อด – ร็อด ได้ ก็แนะนำให้ใช้แกปทรงกลมในการวัดโดยที่อากาศที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างทรงกลมจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไม่น้อยกว่า 3 m/s และวิธีการวัดก็ใช้วิธีเดียวกับการวัดแรงดันกระแสสลับ

2.2.11 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยช่องว่างทรงกลม

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยช่องว่างทรงกลมสามารถจะทำได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตชิง รายละเอียดดูได้จากมาตรฐาน

2.2.12 การปรับเทียบระบบวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม

การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลมเป็นการวัดด้วยอุปกรณ์ที่ไม่มีตัวชี้ คือไม่ทราบว่าจะขณะนี้แรงดันที่ป้อนเข้าไปในนั้นมีค่าเท่าใดจนกว่าจะเกิดสปาร์กขึ้นในช่องว่าง ดังนั้นเพื่อให้ทราบค่าแรง-ดันที่ป้อนได้ตลอดเวลาจึงต้องทำการแบ่งเทียบ โวลท์มิเตอร์ที่วัดค่าแรงต่ำก่อนดังวงจรแบ่งเทียบในรูปที่ 2-3 ที่ระยะช่องว่างหนึ่ง จะได้แรงดันสปาร์กทางแรงสูง U_H ค่าหนึ่ง ซึ่งขณะนั้น โวลท์มิเตอร์ด้านแรงต่ำจะอ่านค่า U_L เมื่อเปลี่ยนระยะช่องว่างหลายๆค่าก็จะให้ได้เส้นกราฟแบ่งเทียบ (calibration curve) U_H ในเทอมของ U_L ดังแสดงในรูปที่ 2-4

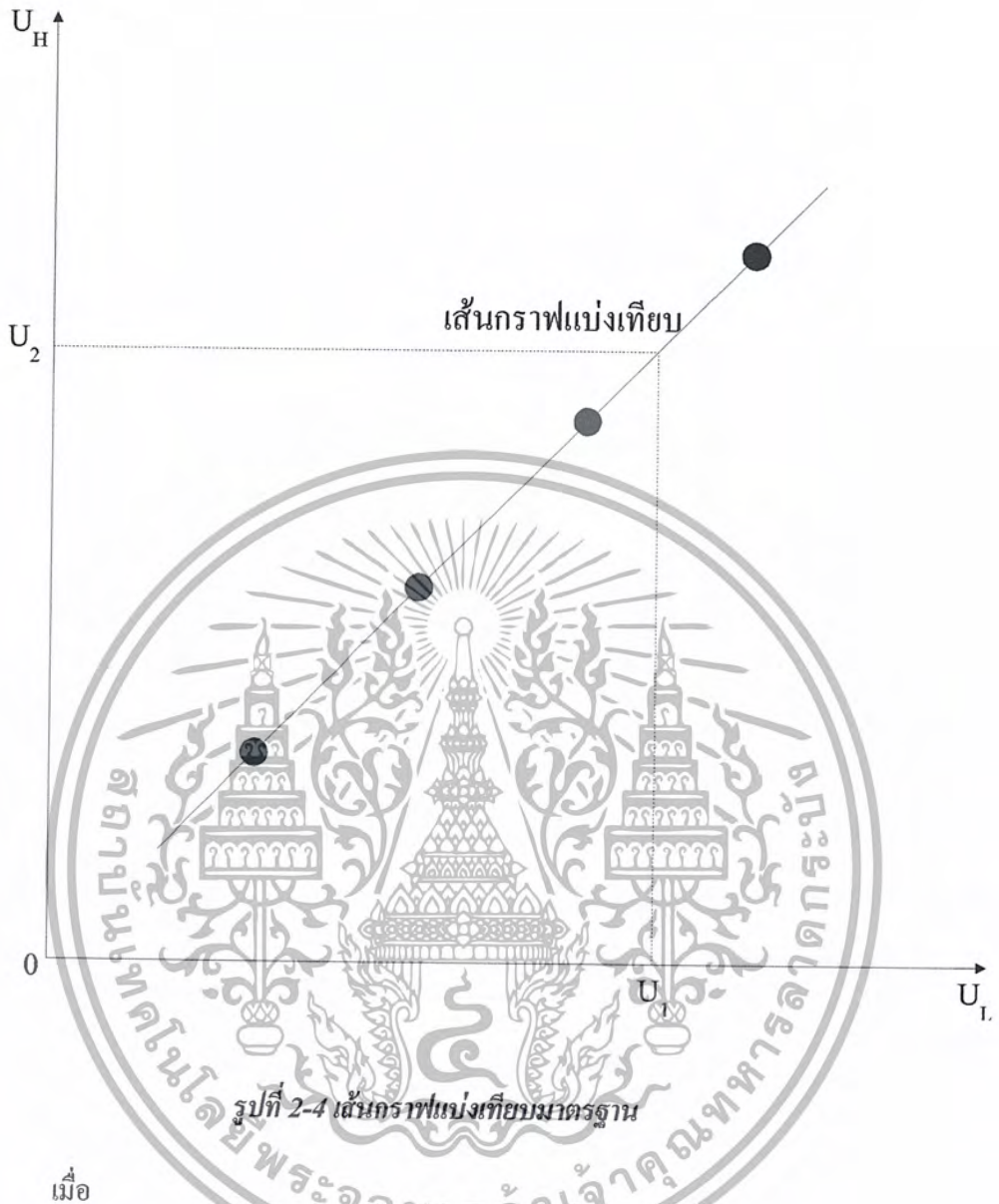


รูปที่ 2-3 วงจรใช้ช่องว่างทรงกลมแบ่งเทียบ

เมื่อ

- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| VR คือ ตัวปรับแรงดัน | TT คือ หม้อแปลงทดสอบแรงสูง |
| U_L คือ แรงดันด้านแรงต่ำ | U_H คือ แรงดันด้านแรงสูง |
| R_d คือ ความต้านทานหน่วง | D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม |
| S คือ ระยะเวลาช่องว่าง | |

ค่า U_H ที่ระยะเวลาช่องว่างทรงกลมใดๆ ที่สภาวะมาตรฐานหาได้จากตารางในมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลม เช่น มาตรฐาน IEC 60052 ดังที่ได้นำมาแสดงไว้ในภาคผนวก ค ถ้านำค่า U_H ในเทอมของ U_L เส้นกราฟแบ่งเทียบที่ได้จะเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐานดังรูปที่ 2-4 ฉะนั้นเมื่อนำเอาเส้นกราฟนี้ไปใช้ประกอบกับช่องว่างทรงกลมวัดแรงดัน ถ้าต้องการทราบค่าแรงดันที่สภาพห้องจะต้องใช้ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศและตัวประกอบแปลงผันความชื้นดังแสดงไว้ในสมการที่ 2-3



U_L คือ แรงดันต้นแรงต่ำอ่านจาก โวลต์มิเตอร์ (V)

U_H คือ แรงดันสูงที่ใช้ทดสอบ (kV)

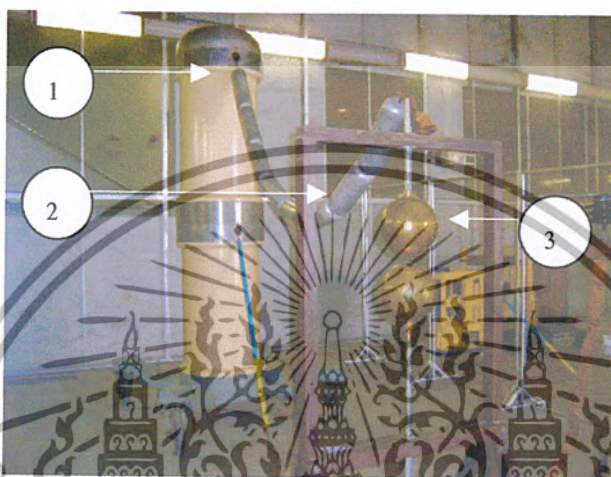
2.3 ชุดทดสอบ เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง 600 kV, 10mA ของ สจล.

แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสตรง (DC High-Voltage) ขนาดพิกัด 600 kV, 10 mA พร้อมด้วยชุดควบคุมการทำงานและชุดเครื่องมือวัด เครื่องมือชุดนี้ได้รับการสนับสนุนจากรัฐบาลญี่ปุ่น ในยุคเริ่มก่อตั้งห้องปฏิบัติการ ปัจจุบันเครื่องมือนี้ได้รับการดูแลรักษาเป็นอย่างดีและยังสามารถใช้งานได้ตามปกติ ใช้งานสำหรับการศึกษาวิจัยและการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ขนาดพิกัดของเครื่อง

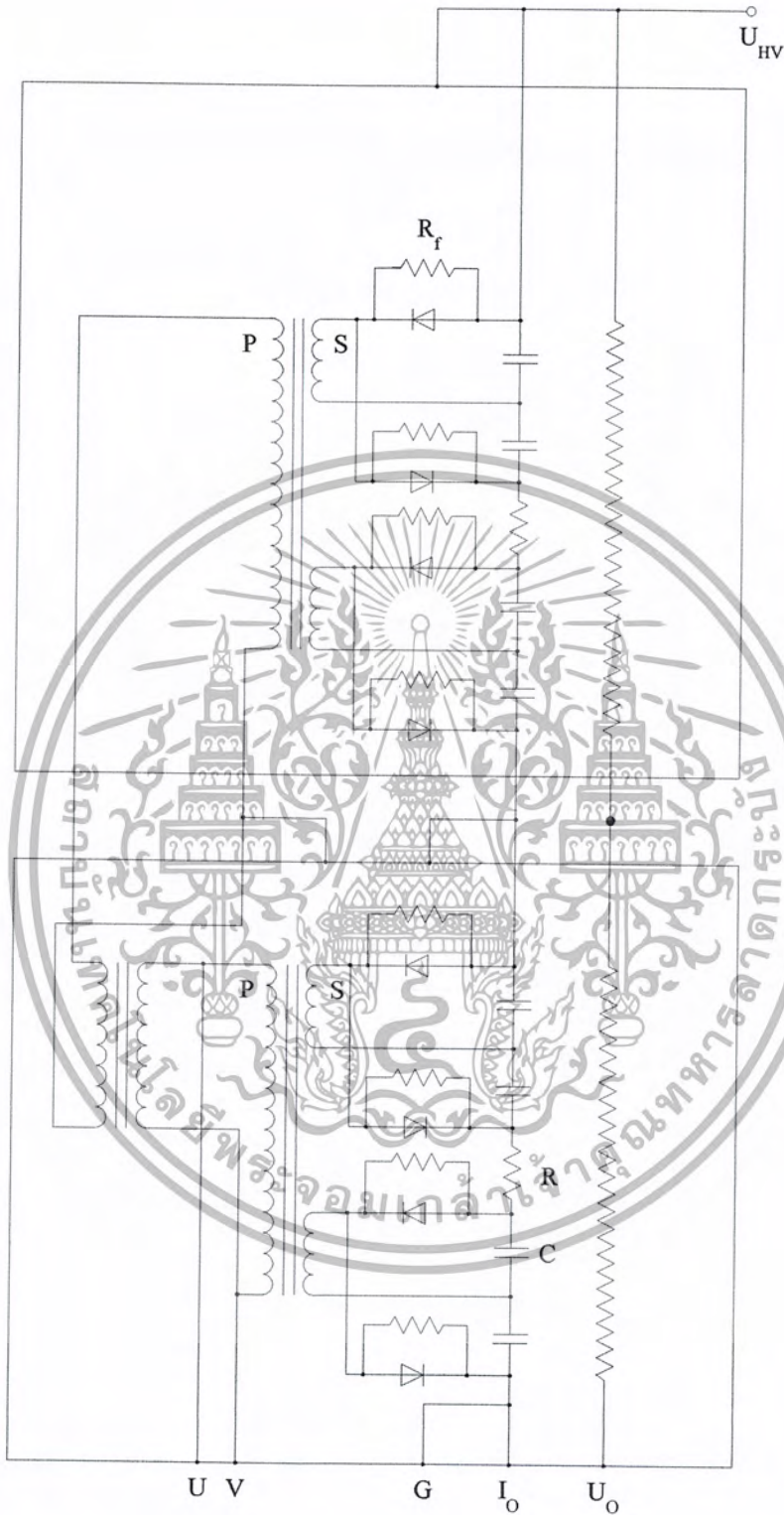
- อินพุทแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 0 - 220 V
- เอาท์พุทแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0 - 600 kV
- กระแสเอาท์พุทสูงสุด 10 mA
- ชนิดของแรงดันเอาท์พุทเป็นแบบ Negative



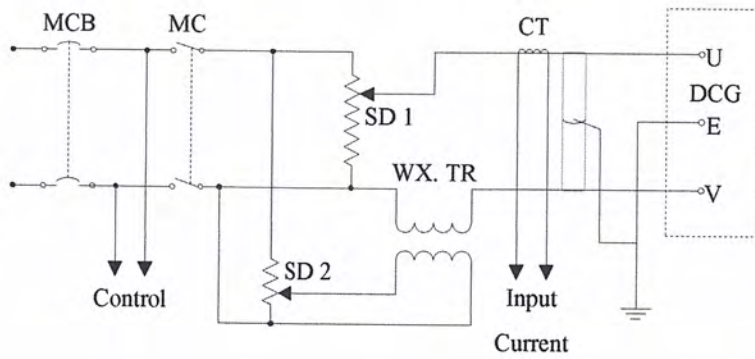
รูปที่ 2-5 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง

เมื่อ

- 1 คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
- 2 คือ สายตัวนำโคทริงกระบอกกลวงช่วยลดการเกิดโคโรนา
- 3 คือ แกบทรงกลมมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 เซนติเมตร



รูปที่ 2-6 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง



รูปที่ 2-7 วงจรคอนโทรลของเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง

NAME PLATE

TECHNICAL COOPERATION BY THE GOVERNMENT OF JAPAN.
DC HIGH VOLTAGE GENERATOR
TYPE DCT - 600 IN DOOR USE

INPUT	
PHASE NUMBER	1
FREQUENCY	50 Hz
VOLTAGE	220 V
CAPACITY	12 kVA
OUTPUT	
RATED VOLTAGE	DC-600 kV
TEST VOLTAGE	DC-660 kV
CURRENT	10 mA
RATING	30 min

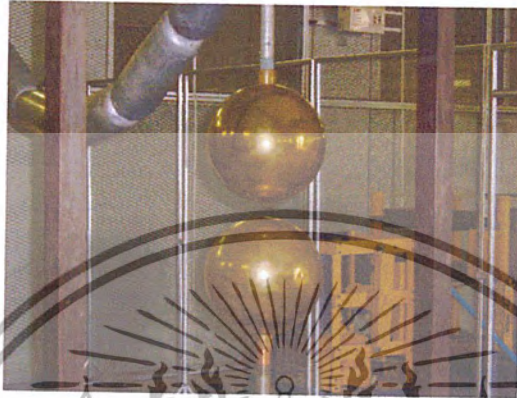
P	PRIM. WIND'G	Rf	RECTIFIER
S	SEC. WIND'G	C	SMOOTHING GAP
T	TERT. WIND'G	R	RESISTOR

OIL 740 1 WEIGHT 1400 kg
 AMBIENT TEMP. -10 ~+ 40 C°
 SERIAL NO. 607494
 DATE MAR.1980
 NISSIN ELECTRIC CO.LTD KYOTO JAPAN NTT-3684

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

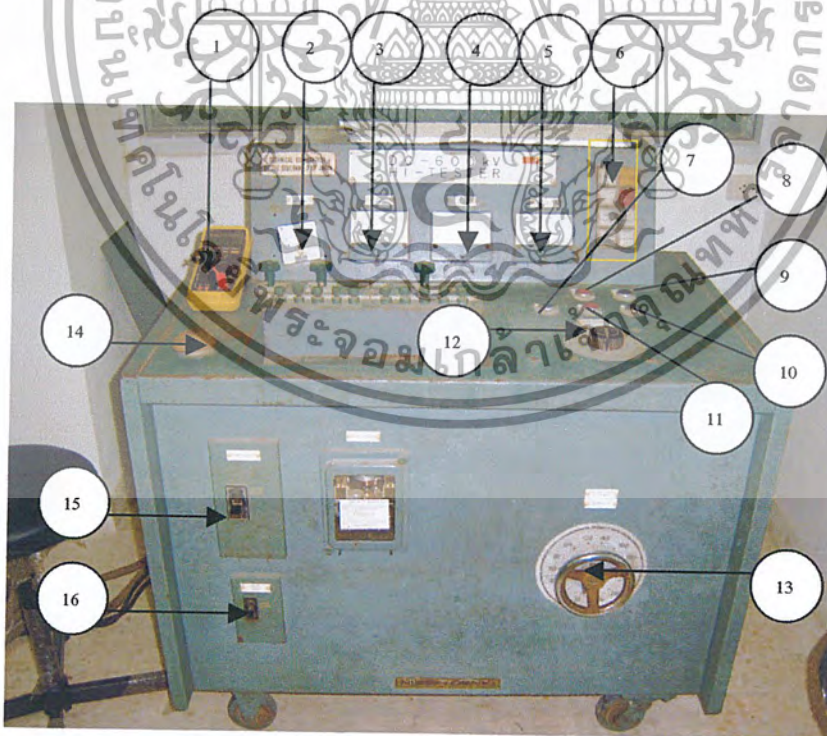
2.3.2 แยกทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร

แยกทรงกลม ได้มาพร้อมกันกับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง แยกทรงกลมที่ใช้อยู่เป็นแยกทรงกลมแนวตั้ง ซึ่งยังสามารถใช้งาน ได้แต่มีปัญหาเรื่องรอยบุบมุม ซึ่งอาจจะทำให้การทดสอบที่ได้ผิดพลาดไปบ้าง



รูปที่ 2-8 แยกทรงกลมมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร

2.3.3 ตู้ควบคุม



รูปที่ 2-9 ตู้ควบคุมการป้อนแรงดันให้กับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2-9 เมื่อ

- | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 คือ มิเตอร์สำหรับวัดแรงดันอินพุท | 9 คือ ปุ่ม INDICATOR RESET |
| 2 คือ Input Voltage Meter | 10 คือ ปุ่ม PREPARE |
| 3 คือ Input Current Meter | 11 คือ ปุ่ม ON |
| 4 คือ Output Voltage Meter | 12 คือ ชุดปรับขนาดแรงดันแบบละเอียด |
| 5 คือ Output Current Meter | 13 คือ ชุดปรับขนาดแรงดันแบบหยาบ |
| 6 คือ หลอดแสดงสถานะ การทำงาน | 14 คือ EMERGENCY STOP |
| 7 คือ ปุ่ม OFF | 15 คือ Power Source Circuit Breaker |
| 8 คือ ปุ่ม ALARMS STOP | 16 คือ Control Source Circuit Breaker |

ขั้นตอนและวิธีการควบคุมชุดควบคุมเพื่อทำการทดสอบ

1. เปิดไฟให้สัญญาณว่าจะทำการทดสอบ และกดกริ่งเพื่อให้ผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้นทราบ
2. เปิดสวิตเซอร์กิตเบรกเกอร์เมน
3. เปิดสวิตเซอร์กิตเบรกเกอร์ของวงจรกำลัง
4. เปิดสวิตเซอร์กิตเบรกเกอร์ของวงจรชุดคอนโทรล
5. ทำการหมุนชุดปรับขนาดแรงดันแบบปรับละเอียดให้อยู่ในตำแหน่งศูนย์ทุกครั้งก่อนทำการทดสอบ จนกระทั่งปุ่ม Low Limit มีไฟสว่างขึ้น
6. กดปุ่ม Prepare
7. กดปุ่ม ON
8. เพิ่มแรงดันที่ชุดควบคุมด้วยชุดปรับแรงดันแบบปรับหยาบ จนถึงค่าประมาณ 75% ของค่าแรงดันที่คาดหวัง แล้วจึงทำการปรับละเอียดจนเกิดเบรกควาน์
9. เมื่อเกิดเบรกควาน์ที่ช่องว่างทรงกลม ให้รีบกดปุ่ม EMERGENCY STOP แล้วรีบลดแรงดันลง โดยการหมุนชุดปรับขนาดแรงดันแบบปรับหยาบและแบบปรับละเอียดให้กลับสู่ตำแหน่งศูนย์จนกระทั่งปุ่ม Low Limit มีไฟสว่างขึ้น
10. กดปุ่ม OFF และกดปุ่ม Indicator reset

2.4 การทดลอง

การทดลองตอนที่ 1 การปรับเทียบระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร)

1. สภาพบรรยากาศการทดลอง

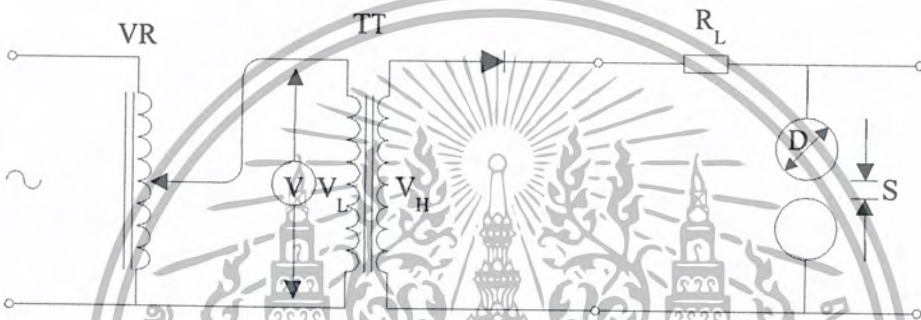
อุณหภูมิ 30 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 77 %

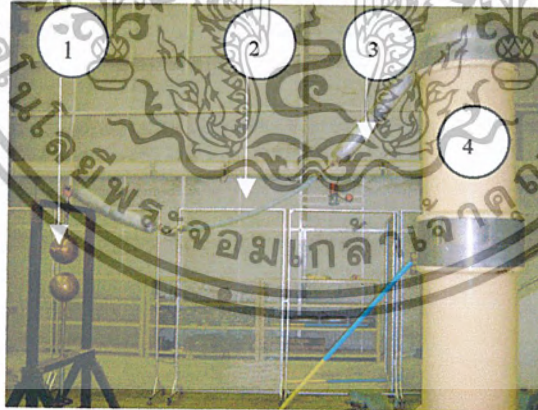
ความดันบรรยากาศ 750 mmHg

ความชื้นสัมบูรณ์ 22 gm⁻³

2. ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 2-10 และ 2-11



รูปที่ 2-10 วงจรการปรับเทียบระบบวัดแรงดันสูง



รูปที่ 2-11 การต่อวงจรการปรับเทียบระบบวัดแรงดันสูง

จากรูปที่ 2-11 เมื่อ

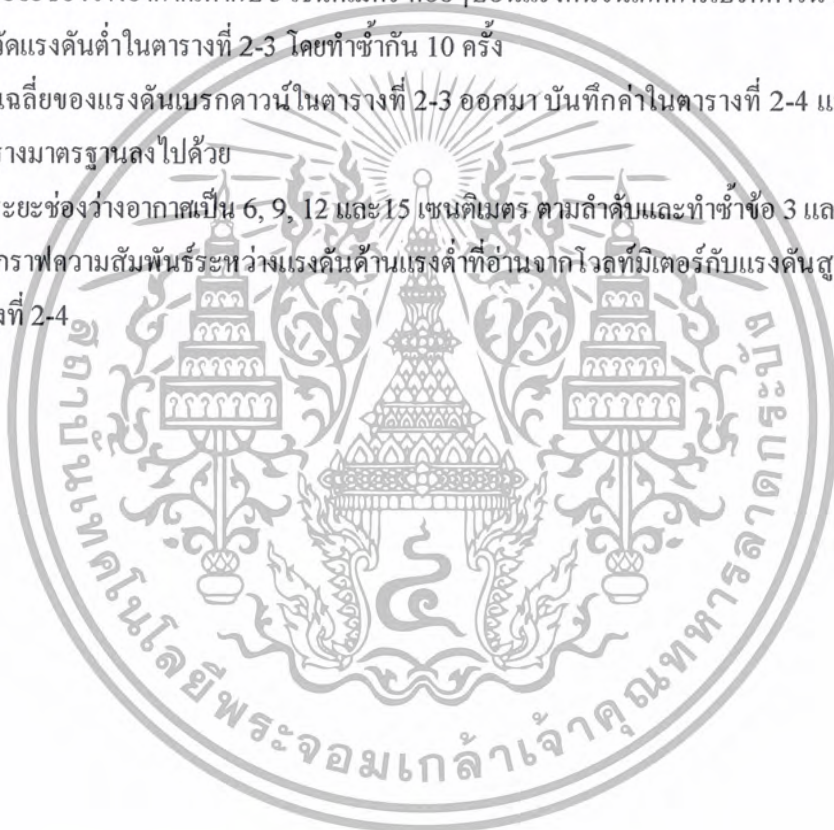
- 1 คือ แกบทรงกลมมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร
- 2 คือ ตัวด้านทานน้ำ
- 3 คือ ตัวนำโตะทรงกระบอกกลวง ช่วยลดการเกิดโคโรนา
- 4 คือ ตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

3. ปรับระยะช่องว่างอากาศเท่ากับ 3 เซนติเมตร ค่อยๆป้อนแรงดันจนเกิดการเบรกควาน์ บันทึกค่าแรงดันจากเครื่องมือวัดแรงดันค่าในตารางที่ 2-3 โดยทำซ้ำกัน 10 ครั้ง

4. หาค่าเฉลี่ยของแรงดันเบรกควาน์ในตารางที่ 2-3 ออกมา บันทึกค่าในตารางที่ 2-4 และบันทึกค่าแรงดันสูงจากรางมาตรฐานลงไปด้วย

5. ปรับระยะช่องว่างอากาศเป็น 6, 9, 12 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับและทำซ้ำข้อ 3 และ 4

6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านแรงดันที่อ่านจากโวลต์มิเตอร์กับแรงดันสูงที่ใช้ในการทดสอบจากรางที่ 2-4



การทดลองที่ 2 การวัดแรงดันกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม

1. สภาพบรรยากาศการทดลอง

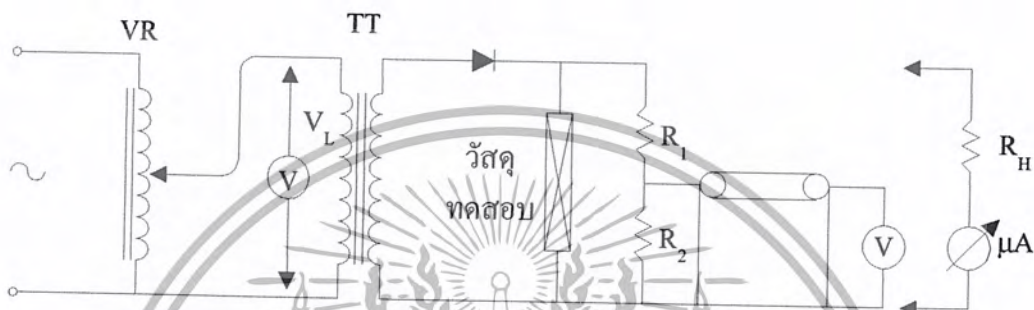
อุณหภูมิ _____ 30 _____ °C

ความชื้นสัมพัทธ์ _____ 77 _____ %

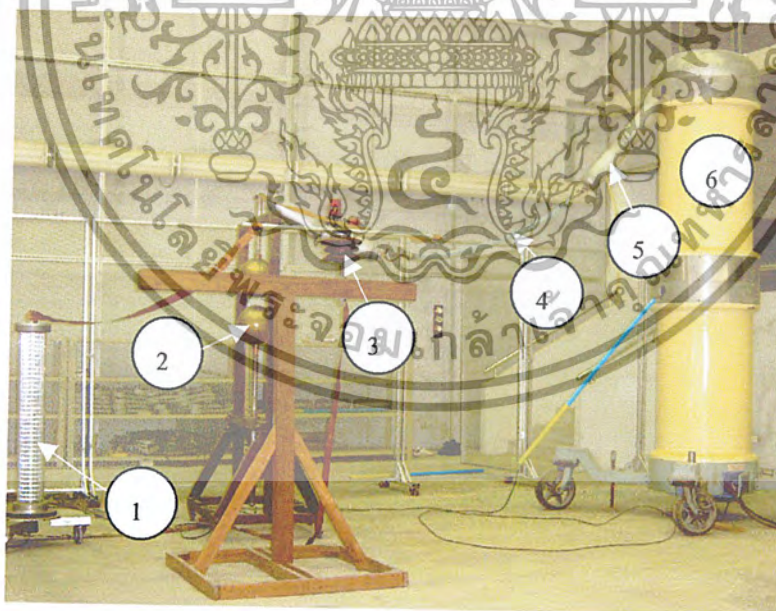
ความดันบรรยากาศ _____ 750 _____ mmHg

ความชื้นสัมบูรณ์ _____ 22 _____ gm⁻³

2. ตัวอย่างการทดลองดังรูปที่ 2-12 และ 2-13 โดยให้ใช้วัสดุทดสอบเป็นลูกถ้วยฉนวนแบบพินโพส



รูปที่ 2-12 วงจรวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม



รูปที่ 2-13 การต่อวงจรวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2-13 เมื่อ

- 1 คือ โวลต์เตจดีไอเคอร์
- 2 คือ แกปทรงกลมมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 เซนติเมตร
- 3 คือ ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ทดสอบ
- 4 คือ ตัวต้านทานน้ำ
- 5 คือ ทรงกระบอกกลวง ช่วยลดการเกิดโคโรนา
- 6 คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

3. ป้อนแรงดันจนเกิดความไวตามผิวลูกถ้วยฉนวนบันทึกค่าแรงดันทางด้านแรงต่ำในตารางที่ 2-5 และบันทึกค่าแรงดันที่อ่านได้จาก โวลต์เตจดีไอเคอร์แบบตัวต้านทานในตารางที่ 2-6 โดยที่โวลต์เตจ ดีไอเคอร์ มีอัตราส่วนเท่ากับ 1500:1

4. ทำจนครบ 5 ครั้งหาค่าแรงดันความไวตามผิวเฉลี่ย

5. คำนวณหาค่าแรงดันความไวตามผิวของลูกถ้วยฉนวนที่สถานะห้องทดสอบ

วิธีการหาความชื้นสัมบูรณ์จากกราฟ

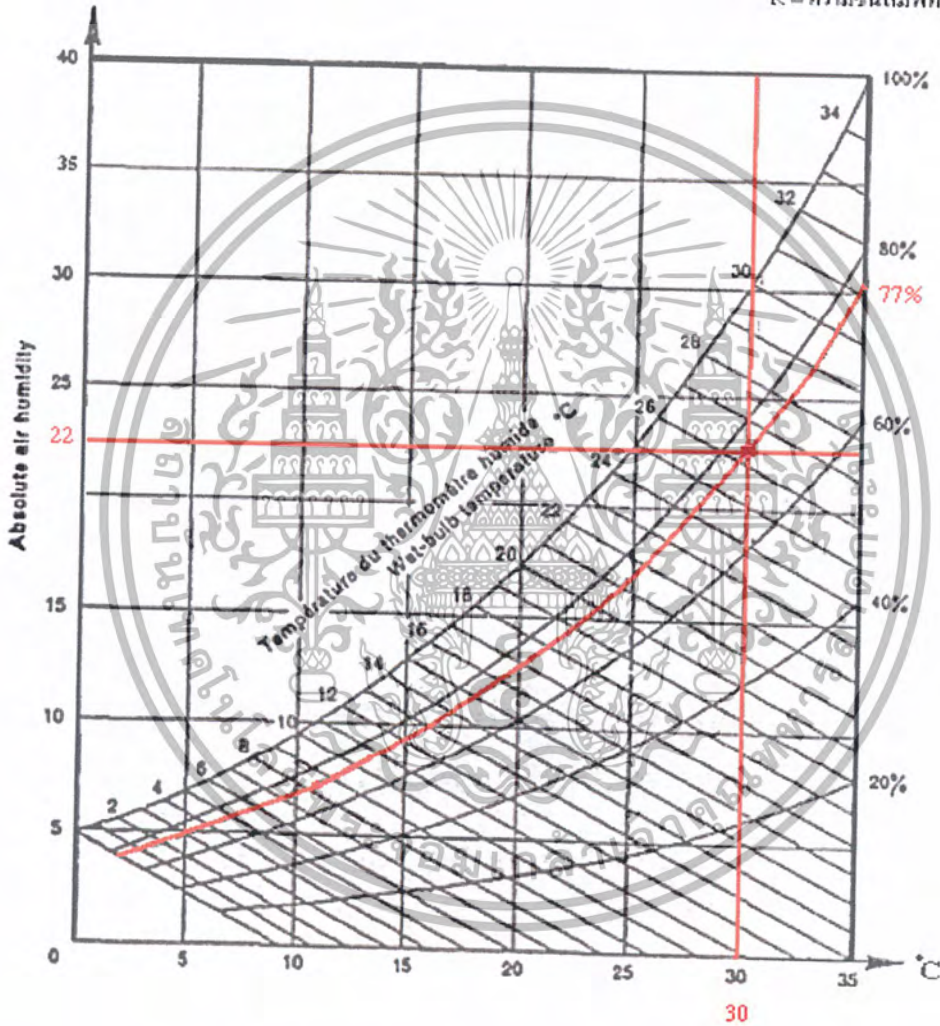
เมื่อสภาวะแวดล้อมในห้องทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ความชื้นสัมพัทธ์ ได้ 77 %

อุณหภูมิ ได้ 30 °C

h = ความชื้นสัมบูรณ์

R = ความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ 2-14 กราฟแสดงวิธีการหาความชื้นสัมบูรณ์

∴ จากรูปที่ 2-14 จะได้ความชื้นสัมบูรณ์ประมาณ 22 gm³ #

ผลการทดลองทำการทดลองวันที่ 5 มิถุนายน 2547

ระยะแกป (ซ.ม.)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากด้านแรงดันต่ำ (V)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
3	24.6	25.6	25.8	27.1	26.5	25.92
6	46.3	50.4	50.7	47.2	50.8	49.08
9	62.3	60.9	56.7	56.6	63.4	59.98
12	75.5	80	84	79.4	80.5	79.88

ตารางที่ 2-3 ผลการทดลองตอนที่ 1.1

ระยะแกป (ซ.ม.)	ค่าแรงดันเบรคความ	
	$V_{Lv}(V)$	V_b (สถานะมาตรฐาน) (kV)
3	25.92	85
6	49.08	161
9	59.98	226
12	79.88	275

ตารางที่ 2-4 ผลการทดลองการปรับเทียบระบบวัด

วิธีการคำนวณหาค่าแรงดันเบรคความที่สถานะมาตรฐานโดยยกตัวอย่างจากข้อมูลทดสอบ

วิธีทำ

ที่ $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

$b = 750\text{ mmHg}$

ตามมาตรฐาน IEC 60052 $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $b_0 = 760\text{ mmHg}$

จากสมการที่ (2-4)

$$\delta = \frac{b}{b_0} \times \frac{273 + t_0}{273 + t}$$

แทนค่า b , b_0 , t , t_0 ลงใน สมการ (2-4) จะได้

$$\delta = \frac{750}{760} \times \frac{273 + 20}{273 + 30} = 0.954$$

จากสมการที่ (2-5)

$$k = 1 + (0.002 \times (h / \delta - 8.5))$$

แทนค่า h และ δ ลงในสมการ (2-5) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = 1 + [0.002 \times (22/0.954 - 8.5)] = 1.029$$

แทนค่า δ และ k ลงในสมการ (2-3)

$$U_0 = \frac{U}{0.98}$$

\therefore ที่ระยะแกป 3 cm.

$$U_0 = \frac{25.92}{0.98} = 26.45$$

$$V_b \text{ (ที่สภาวะมาตรฐาน) (kV)} = 26.45 \times 3 = 79.35 \text{ kV}$$

ที่ระยะแกป 6 cm.

$$V_b \text{ (ที่สภาวะมาตรฐาน) (kV)} = 105.24 \text{ kV}$$

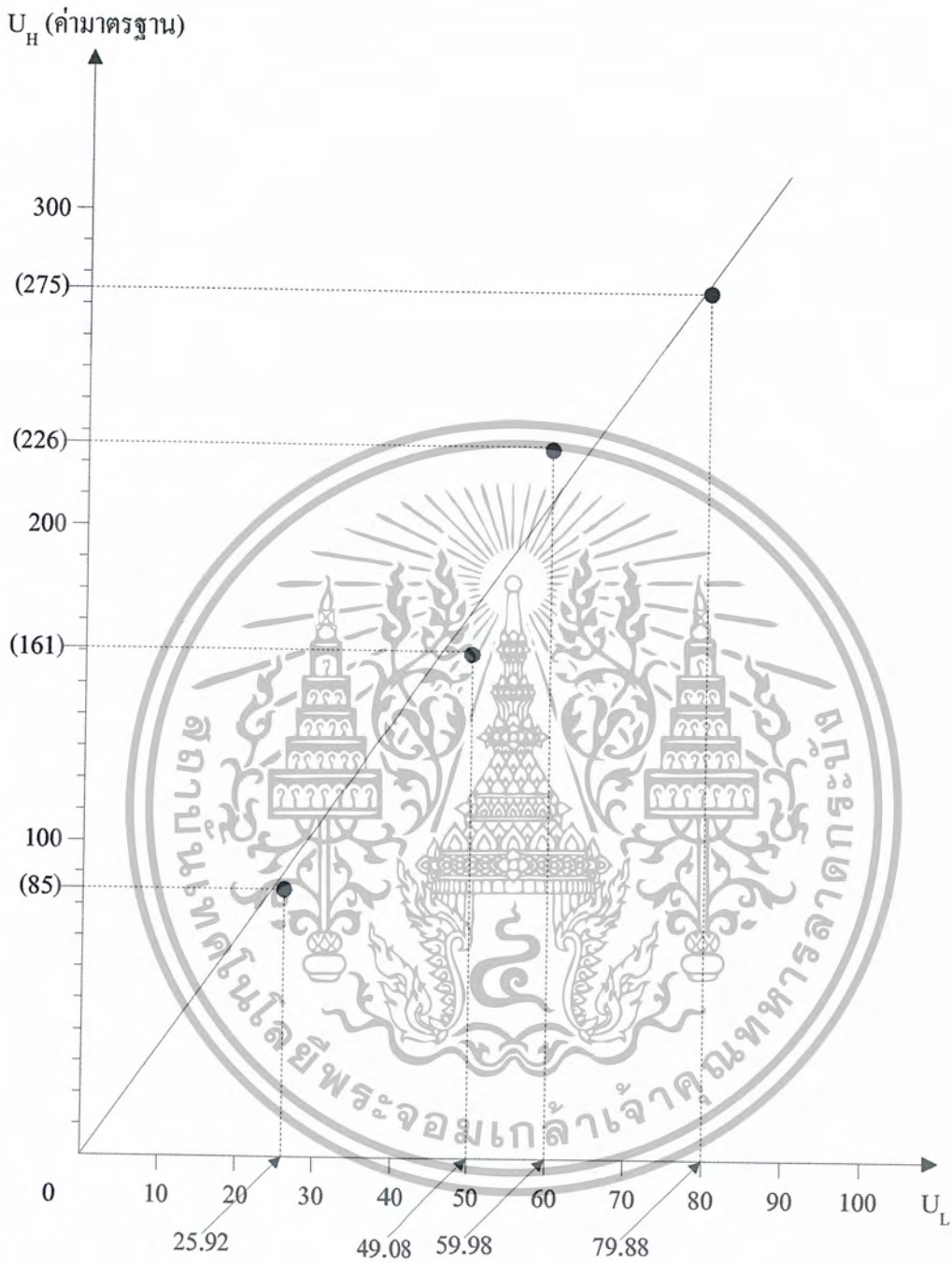
ที่ระยะแกป 9 cm.

$$V_b \text{ (ที่สภาวะมาตรฐาน) (kV)} = 183.61 \text{ kV}$$

ที่ระยะแกป 12 cm.

$$V_b \text{ (ที่สภาวะมาตรฐาน) (kV)} = 244.53 \text{ kV}$$





รูปที่ 2-15 เส้นกราฟแบ่งเทียบมาตรฐาน

U_L คือ แรงดันด้านแรงดันต่ำอ่านจากโวลท์มิเตอร์ (V)

U_H คือ แรงดันสูงที่ใช้ทดสอบ (ค่ามาตรฐานในภาคผนวก ค) (kV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกถ้วย ลูกที่	ระยะแกป (เซนติเมตร)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากค่านแรงดันต่ำ (V)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
1	9	61.1	61.1	60.5	60.5	60.9	60.82
	12	60.4	61.3	62.4	60.7	61.2	61.20
2	9	62.3	60.8	62.3	60.2	60.7	61.26
	12	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 2-5 ผลการทดลองตอนที่ 1.2 ค่าที่อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์แรงต่ำ

ลูกถ้วย ลูกที่	ระยะแกป (เซนติเมตร)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากค่านแรงดันต่ำ (V)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
1	9	108	108	108	108	108	108
	12	110	110	110	108	108	109
2	9	113	113	113	112	112	112.6
	12	← ไม่ได้ทดสอบเพราะเวลาเลย 3 ชั่วโมงแล้ว →					

ตารางที่ 2-6 ผลการทดลองตอนที่ 1.2 ค่าที่อ่านได้จากโวลท์เตจดีไวเดอร์

แสดงวิธีการคำนวณการปรับเทียบด้วยแกปทรงกลมและโวลท์เตจดีไวเดอร์

วิธีทำ

ที่ลูกถ้วยลูกที่ 1

ที่ระยะ 9 เซนติเมตร โดยวิธีการปรับเทียบ

ค่าแรงดันเฉลี่ยที่อ่านได้จากค่านแรงดันต่ำ 60.28 V

จากกราฟรูปที่ 2-12 จะได้ $U_p \approx 230 \text{ kV}_p$

∴ ค่าแรงดันที่อ่านได้ โดยวิธีการปรับเทียบจะได้

$$230/\sqrt{2} = 162.66 \text{ kV}$$

ที่ระยะ 9 เซนติเมตร โวลท์เตจดีไวเดอร์

ค่าแรงดันเฉลี่ยค่านแรงดันต่ำที่อ่านได้จากโวลท์เตจดีไวเดอร์ คือ 108 V

Ratio : 1500 : 1

∴ ค่าแรงดันที่อ่านได้ จากโวลท์เตจดีไวเดอร์ คือ $108 \times 1500 = 162 \text{ kV}$

ลูกถ้วย ลูกที่	ค่าแรงดันที่อ่านได้ (kV)	
	วิธีการเปรียบเทียบ	โวลต์เตจดีไวเดอร์
1	162.66	162
2	162.66	$112.6 \times 1500 = 168.90$

ตารางที่ 2-7 เปรียบเทียบค่าแรงดันที่ได้จากการเปรียบเทียบด้วยแถบทรงกลม และโวลต์เตจดีไวเดอร์

2.5 สรุปผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

จากการทดสอบการเปรียบเทียบแรงดันเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง 600 kV, 10 mA ตามมาตรฐาน IEC 60052 ด้วยวิธีการเปรียบเทียบด้วยช่องว่างทรงกลม แรงดันเอาท์พุทที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่ปัญหาก็มีในเรื่องทรงกลมมีรอยบุบ ซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้ผิดพลาดไปบ้างเล็กน้อยซึ่งก็อาจจะแก้ปัญหาก็ได้โดยจัดทำช่องว่างทรงกลมใหม่เพื่อให้อยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานกำหนด



บทที่ 3

การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์

3.1 บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม เพื่อการพัฒนาประเทศ ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้านั้นจำเป็นที่จะต้องส่งจ่ายกันในลักษณะของไฟฟ้าแรงสูง เพื่อที่จะให้เพียงพอต่อความต้องการ โดยที่อุปกรณ์ต่างๆที่นำมาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจำเป็นที่จะต้องได้รับการทดสอบก่อนที่จะนำมาใช้งานจริง เพื่อความมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบและเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงส่วนใหญ่จะติดตั้งอยู่กลางแจ้งจึงมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกินที่อาจจะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า เรียกว่าแรงดันเกินฟ้าผ่าและอีกสาเหตุหนึ่งเกิดขึ้นจากการทำงานของสวิตช์ตัดคอนวจรในระบบเนื่องจากมีผู้ปฏิบัติงานเป็นผู้กระทำหรือกระทำเอง โดยอัตโนมัติเนื่องจากเกิดความผิดพลาดในระบบเรียกว่าแรงดันเกินสวิตช์ ดังนั้นจึงมีข้อกำหนดให้มีการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในหัวข้อการทดสอบเนื่องจากแรงดันเกินฟ้าผ่า ซึ่งเป็นการทดสอบความคงทนอยู่ได้ของความเป็นฉนวนเมื่อได้รับแรงดันเกินจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและสวิตช์

การทดสอบความคงทนอยู่ได้ ของความเป็นฉนวนเมื่อได้รับแรงดันเกินจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่าการทดสอบ BIL (Basic Impulse Insulation Level) เป็นการเลียนแบบแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระยะสั้นซึ่งคล้ายกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่านั่นเอง โดยในการทดสอบจะทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์เข้าไปในอุปกรณ์ที่ทดสอบแล้วนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ เพื่อจะตัดสินได้ว่าอุปกรณ์ที่ทำการทดลองนี้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานหรือไม่ โดยที่แรงดันอิมพัลส์นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันสูงสุดที่ทดสอบแล้วยังขึ้นอยู่กับกระแสของแรงดัน ไปตามเวลาด้วย ดังนั้นเพื่อให้การทดสอบเป็นไปในมาตรฐานเดียวกันจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานของแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบขึ้นมา

3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจาก แรงดันเกินที่เกิดจากเหตุภายนอก คือ เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่า เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าและแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือ เกิดจากการทำงานของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ ความมุ่งหมายของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นในห้องทดลองก็เพื่อที่จะนำไปทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนที่จะนำไปใช้งาน เพื่อที่จะดูว่าทนต่อแรงดันเกินเหล่านี้ได้ไหม ความคงทนต่อแรงดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์ของฉนวนมีใช้ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันสูงสุดเท่านั้น หากแต่ยังขึ้นอยู่กับกระแสของแรงดันไปตามเวลาอีกด้วย ฉะนั้น เพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการ

ทดสอบ จึงมีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานขึ้น โดยยึดเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์

รูปลักษณะของคลื่นอิมพัลส์อาจกำหนดด้วย

1. ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดันในกรณีที่มิคลื่นระลอกซ้อนซึ่งเกิดจากออสซิลเลชันใกล้ๆ ยอดรูปคลื่นให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
2. ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
3. เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด
4. เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

3.2.2 ข้อกำหนดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ทั้งสองที่เกิดขึ้นจะมีรูปคลื่นและคาบเวลาที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบขึ้นมา คือ มาตรฐาน IEC 60-1

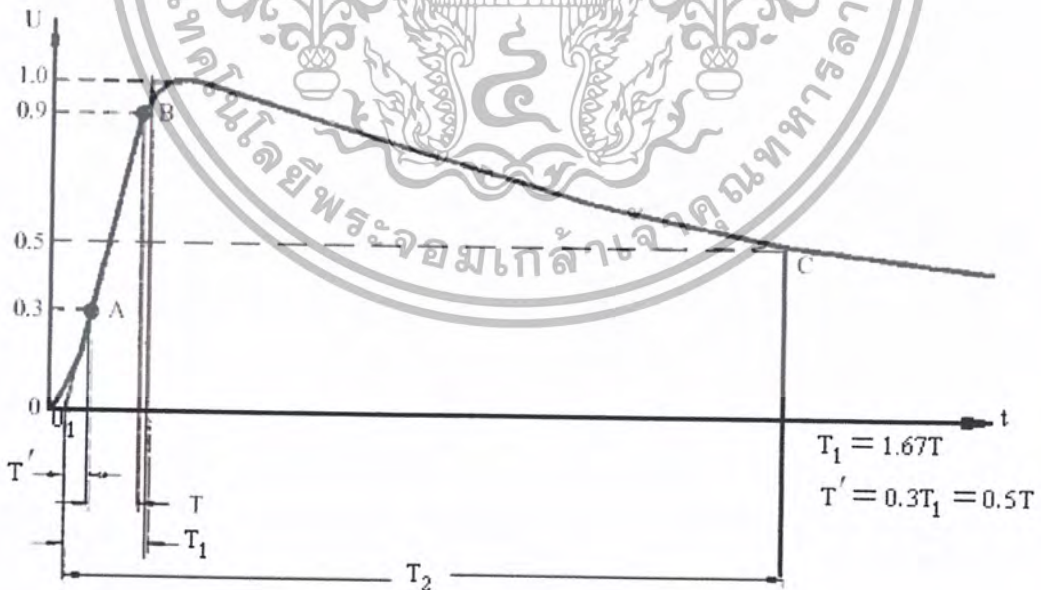
3.2.2.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะเต็มคลื่น (Lighting Impulse Full Wave)

$$T_1/T_2 = 1.2/50 \text{ } \mu\text{sec}$$

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \text{ } \mu\text{sec} \pm 30\%$

เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 50 \text{ } \mu\text{sec} \pm 20\%$

ค่ายอดแรงดันทดสอบ $U_m \pm 3\%$



รูปที่ 3-1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะเต็มคลื่น

จากรูปที่ 3-1 เมื่อ

จุด A คือ จุดที่ 30 % ของค่ายอด

จุด B คือ จุดที่ 90% ของค่ายอดขาขึ้น

จุด C คือ จุดที่ 50% ของค่ายอดขาลง

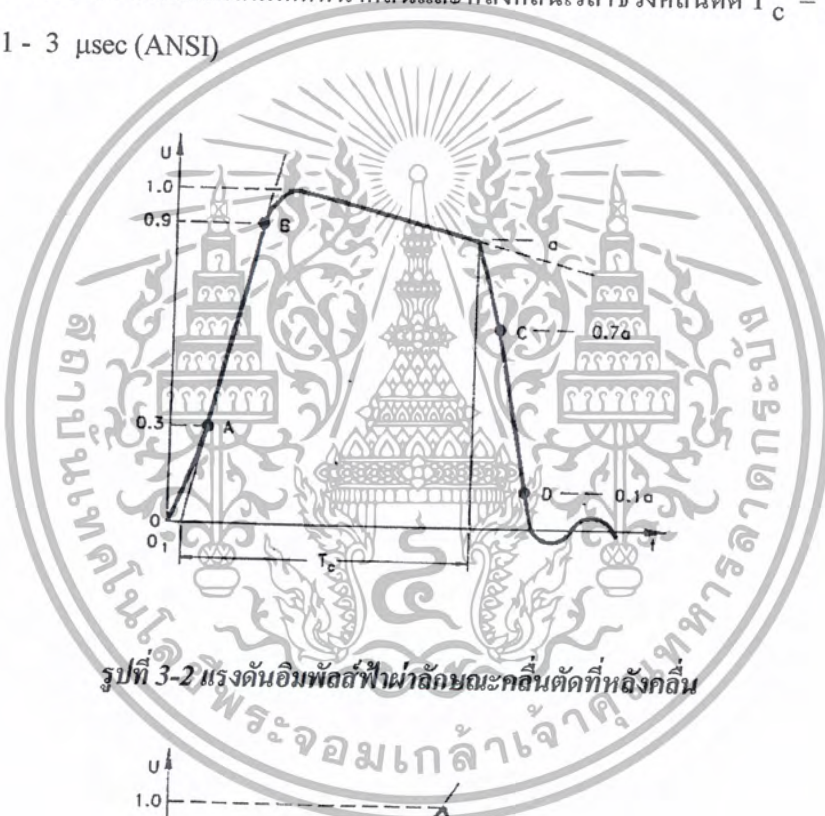
จุด O_1 คือ จุดที่เส้นตรง AB ตัดกับแกน t (จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นอิมพัลส์)

T_1 คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น

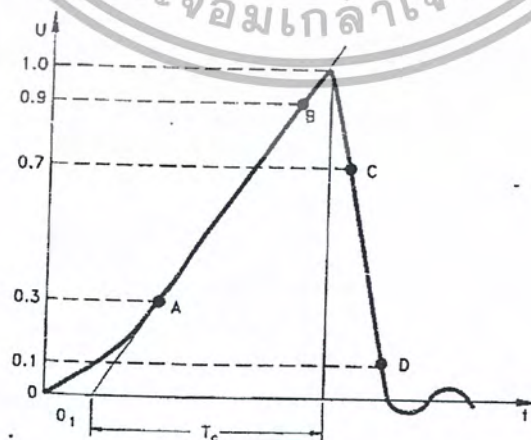
T_2 คือ เวลาช่วงหลังคลื่น

3.2.2.2 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด (Lightning Impulse chopped Wave)

มีได้ 2 แบบ คือ ลักษณะคลื่นตัดที่หน้าคลื่นและหลังคลื่นเวลาช่วงคลื่นตัด $T_c = 2 - 6 \mu\text{sec}$ (IEC) หรือ $1 - 3 \mu\text{sec}$ (ANSI)



รูปที่ 3-2 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หลังคลื่น

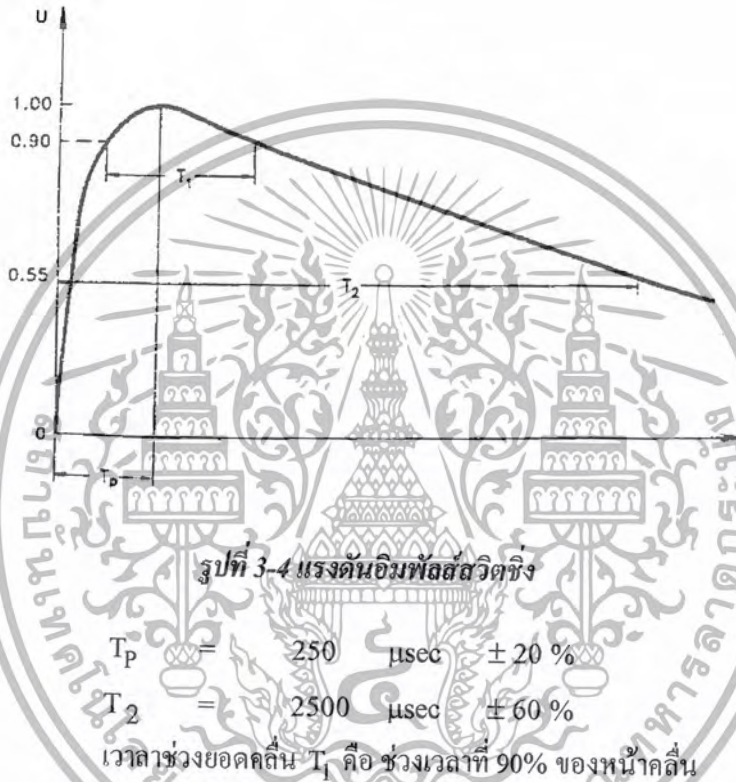


รูปที่ 3-3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.3 แรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ (Switching Impulse)

แรงดันอิมพัลส์แบบสวิตซ์ ซึ่งแตกต่างไปจากแรงดันรูปคลื่นฟ้าผ่าก็คือ ช่วงหน้าคลื่นจะยาวกว่า ความหมายของเวลาช่วงหางคลื่น T_2 จะมีนิยามเหมือนอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าส่วนเวลาช่วงหน้าคลื่นจะ กำหนดเป็น T_p ซึ่งหมายถึงช่วงเวลาที่นับจากจุดที่แรงดันเริ่มจากศูนย์จริงไปจนถึงเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นจนถึงค่ายอด รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตซ์ โดยทั่วไปจะมีรูปคลื่น 250/2500 μsec และกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนได้อยู่ในเกณฑ์ดังนี้



จากรูปที่ 3-1 เป็นลักษณะของรูปคลื่นอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นเต็ม (Full Wave) หมายถึงรูปคลื่นที่มีลักษณะที่ขนาดของแรงดันเพิ่มขึ้นจนถึงค่ายอด (Peak) แล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งค่าแรงดันเป็นศูนย์ โดยที่แรงดันรูปคลื่นเต็มนี้อาจจะเกิดเป็นรูปคลื่นตัด (Chopped Wave) คือรูปคลื่นที่มีลักษณะของแรงดันลดลงอย่างกะทันหัน ซึ่งช่วงที่แรงดันลดลงอย่างกะทันหันนี้อาจจะเกิดหลังจากที่แรงดันผ่านช่วงค่ายอดไปแล้วหรือเกิดก่อนที่แรงดันจะถึงค่ายอดก็ได้ โดยจะเรียกลักษณะของรูปคลื่นแบบนี้ว่ารูปคลื่นตัดช่วงหลังคลื่น (รูปที่ 3-2) และรูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น (รูปที่ 3-3) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามลักษณะของรูปคลื่นตัดดังกล่าวนี้จะมีข้อกำหนดที่สำคัญคือ เวลาช่วงคลื่นตัด (Chopped time) T_c ตามมาตรฐาน โดยทั่วไปจะกำหนดเวลาช่วงคลื่นตัด T_c ให้อยู่ระหว่าง

2 - 6 μsec โดยที่สาเหตุของการเกิดคลื่นตัดนี้อาจมีสาเหตุมาจากการป้อนแรงดันรูปคลื่นเต็มเข้าไปที่ วัสดุทดสอบแล้วการฉนวนของวัสดุทดสอบทนต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปไม่ได้จึงเกิดการสปาร์กผ่าน เกิด

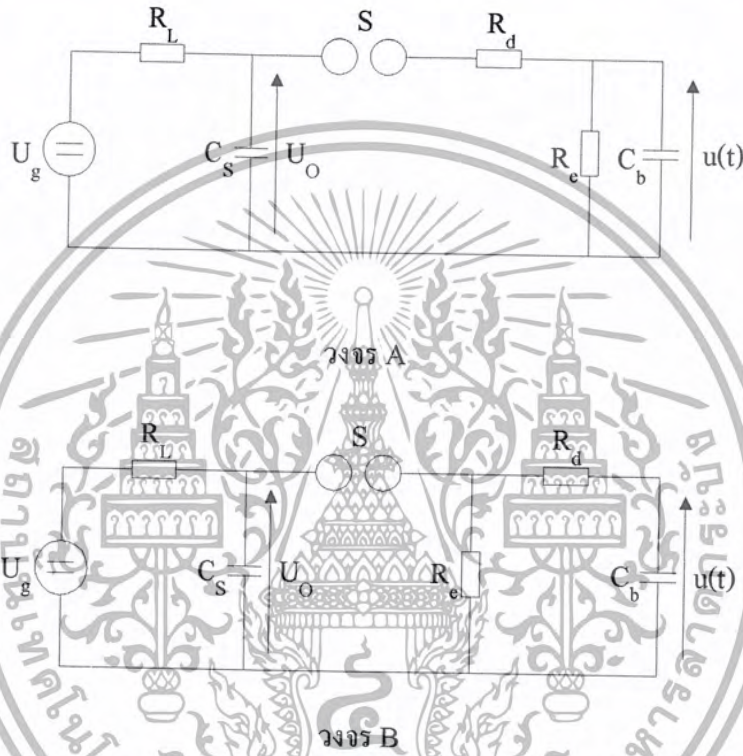
วาทไฟตามผิวหรือเกิดเบรกควาน์ผ่านทะลุทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์อาจสร้างขึ้นโดยอาศัยวงจรทรานเซียน RC หรือวงจรทรานเซียนRLC โดยทั่วไปแรงดันรูปคลื่นฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นใช้กันมากมักได้จากวงจร RC โดยอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ ($U = \frac{Q}{C}$) แล้วปล่อยให้คลายประจุหรือคายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้ได้รูปคลื่นตามที่ต้องการได้

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบดังแสดงในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หนึ่งชั้น วงจร A และ วงจร B

ความหมายในรูปวงจร A และ B

U_g	คือ	แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย
U_o	คือ	แรงดันอัดประจุกระแสตรง
C_s	คือ	ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
C_b	คือ	โหนดตัวเก็บประจุ (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่อง- วัดและอื่นๆ)
R_L	คือ	ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
R_d	คือ	ความต้านทานหน่วง
R_e	คือ	ความต้านทานปล่อยประจุ
$u(t)$	คือ	แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจรคือ แรงดันกระแสตรง U_g เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์จนกระทั่งได้แรงดันที่ต้องการ U_0 การอัดประจุนี้จะผ่านความต้านทาน R_L ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการอัดประจุเร็วหรือช้า (ปกติ 2-3 วินาที) ค่าแรงดันอัดประจุได้ U_0 นี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของสปาร์กแกป S ที่ปรับได้ เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้มากน้อยตามต้องการ สปาร์กแกปนอกจากจะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุแล้วยังทำหน้าที่เหมือนกับสวิทหรือไก (trigger) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ C_s ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดสปาร์กในช่องสปาร์กแกปจะดำเนินไปด้วยความรวดเร็ว คือ ใช้เวลาน้อยกว่า 100 μsec ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์กเมื่อกำหนดระยะห่างช่องสปาร์กแกปอาจจะแตกต่างกันไปบ้างแต่ไม่มากนักประมาณน้อยกว่า 1% ถ้าหากอากาศสะอาดปราศจากฝุ่นละอองช่วงระยะเวลาระหว่างการเกิดสปาร์กต่อเนื่องจะถี่หรือห่างขึ้นอยู่กับแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้กับ C_s ถ้าปรับ U_g ให้สูงมากก็จะเกิดสปาร์กง่ายหรือสปาร์กถี่ขึ้น เมื่อเกิดสปาร์กที่ S แรงดันอัดประจุ U_0 จะพร้อม R_d และ C_b ประจุจะถ่ายเทต่อไปยังวัสดุทดสอบ ซึ่งแทนด้วย C_b การถ่ายเทหรือปล่อยประจุนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ R_d และ C_b นับเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่า R_d และ C_b นี้จะเป็นตัวกำหนดเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายประจุให้กับ C_b จนเต็มที่แล้วประจุก็จะดิซชาร์จหรือปล่อยประจุออกไปสู่ R_c จึงกล่าวได้ว่า R_c ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหางคลื่น T_2 คือถ้า R_c มีค่าสูง T_2 ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย (ค่าคงตัวเวลาคายประจุวงจร A เท่ากับ $C_s \cdot (R_d + R_c)$ และวงจร B เท่ากับ $C_s \cdot R_c$)

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ปลายแรงสูง \hat{U} จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ U_0 เพราะประจุจะกระจายให้กับ C_s และ C_b ฉะนั้นอัตราส่วนของ \hat{U} ต่อ U_0 จะน้อยกว่า 1 เสมอและเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ นั่นคือ

$$\text{ประสิทธิภาพของวงจร} \quad \eta = \frac{\hat{U}}{U_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (3-1)$$

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูงๆ ควรเลือกให้ C_s มีค่าสูงกว่าโหลด C_b มากๆ ($C_s \gg C_b$)

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดโดย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด U_n (kV)
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด U_0 (kV)
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_s (μF)
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด W_c (kJ)
- อัตราการดิซชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่าแบบสวิทชิง

ค่าแรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ BIL หรือ SIL ตามมาตรฐานกำหนดตามระดับแรงดันของระบบที่จะนำเอาอุปกรณ์ไปใช้ ซึ่งมีหลักการเลือกและการกำหนดทำนองเดียวกับการกำหนดขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เป็นลักษณะสำคัญประการหนึ่งที่จะต้องกำหนด พลังงานของเครื่องกำเนิดขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า C_s และแรงดันอัดประจุ U_0 ซึ่งคำนวณได้จาก

$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \tag{3-2}$$

$$= \frac{1}{2} C_s U_0^2 \times 10^{-9} \text{ kJ} \tag{3-3}$$

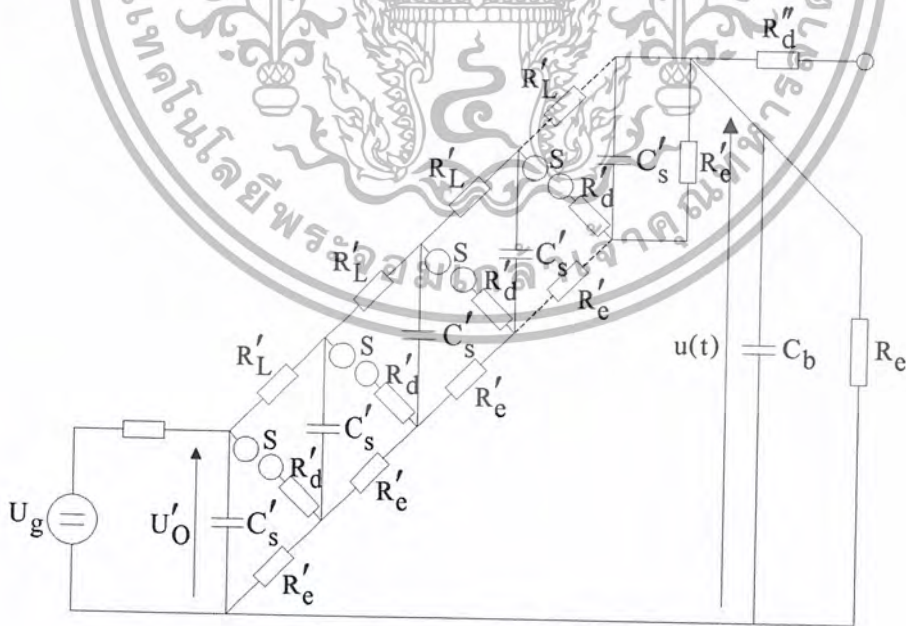
เมื่อ

W คือ พลังงานอัดประจุเป็น kJ

C_s คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็น pF

3.2.4 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้นประกอบด้วยวงจรอิมพัลส์พื้นฐานหลายๆขั้นมาต่อซ้อนกันตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ (Marx's Circuit) คือ ใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์หลายๆตัวมาต่อขนานกันเพื่ออัดประจุดังรูปที่ 3-6 เมื่อได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการแล้วให้ตัวเก็บประจุเหล่านั้นปล่อยประจุผ่านสปรັกร์แกป ตัวเก็บประจุที่อัดประจุไว้จะต่อกันแบบอนุกรม จึงได้แรงดันเป็นทวีคูณของแต่ละขั้น วงจรของมาร์กซ์จะจัดให้สปรັกร์แกปปรับระยะได้ และจะปรับตั้งให้สปรັกร์แกปล่างมีระยะน้อยที่สุด เพื่อจะให้เริ่มเกิดสปรັกร์ก่อน และสปรັกร์แกปถัดไปค่อยเกิดสปรັกร์ตามลำดับ



รูปที่ 3-6 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น

ความหมายของสัญลักษณ์ในวงจรจะเหมือนกับวงจรขั้นพื้นฐาน เครื่องหมาย (') แสดงถึงเป็น

ค่าต่อขั้น และเครื่องหมาย (") แสดงถึงองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นเพื่อปรับรูปคลื่น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่ระบุไว้ ไม่สามารถนำออกจากรายการนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ปกติ $R_d'' \gg R_d'$ (นั่นคือ $R_d = R_d''$ เมื่อ R_d คือ ความต้านทานหน่วงรวมทั้งหมด)

เมื่อสปาร์กแก๊ปเกิดสปาร์กหมดทุกอัน C_s' จะต่อกันเป็นอันดับ ฉะนั้น C_b จะได้รับอค์ประจุผ่านความต้านทานหน่วง R_d' ต่อกันแบบอันดับ และในที่สุดทั้ง C_s' และ C_b ต่างก็จะดิสชาร์จปล่อยประจุผ่าน R_e' และ R_d' ต่อไป

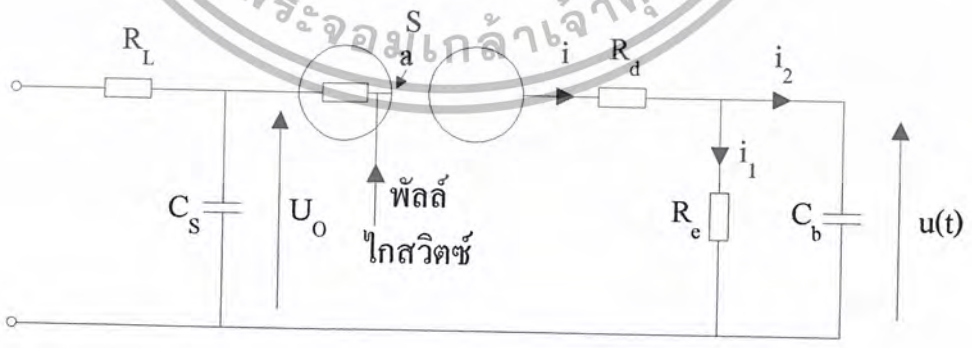
ในกรณีที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มี n ชั้น และถ้า $R_e = \infty$ ความต้านทานปล่อยประจุรวม R_e อาจคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$R_e = \frac{(n-1)R_e' \cdot (n-1)R_L'}{(n-1)(R_e' + R_L')} + R_e' \tag{3-4}$$

โดยปกติมักจะออกแบบสร้างให้ $R_L' \gg R_e'$ ฉะนั้น R_e รวม = nR_e' ถ้าคิดเทียบให้เป็นวงจรชั้นเดียว ดังวงจรชั้นพื้นฐานจะได้ค่ารวมต่างๆดังนี้



แรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นควรจะต้องกำหนดหรือควบคุมได้ ทั้งนี้เพื่อให้ค่าแรงดันที่ป้อนเข้าไปที่วัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบหลายๆครั้งนั้นมีค่าคงที่ ซึ่งควบคุมได้โดยใช้ไกสวิตเป็นตัวเริ่มให้เกิดดิซชาร์จในสปาร์กแก๊ปช่วงที่อยู่ในสปาร์กแก๊ปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ด้วยสัญญาณอิมพัลส์ไก โดยการบังคับระยะไกล ดังรูปที่ 3-7 การใช้ไกสวิตบังคับให้เกิดสปาร์ก ตามที่กำหนดนี้จะช่วยให้การกระจายของแรงดันที่จ่ายออกน้อยลง นั่นคือจะได้ค่าแรงดันทดสอบมีค่าคงที่ตามที่ต้องการ และยังช่วยให้สามารถบังคับออสซิลโลสโคปเริ่มต้นบันทึกภาพรูปคลื่นอิมพัลส์ $u(t)$ ได้ด้วย

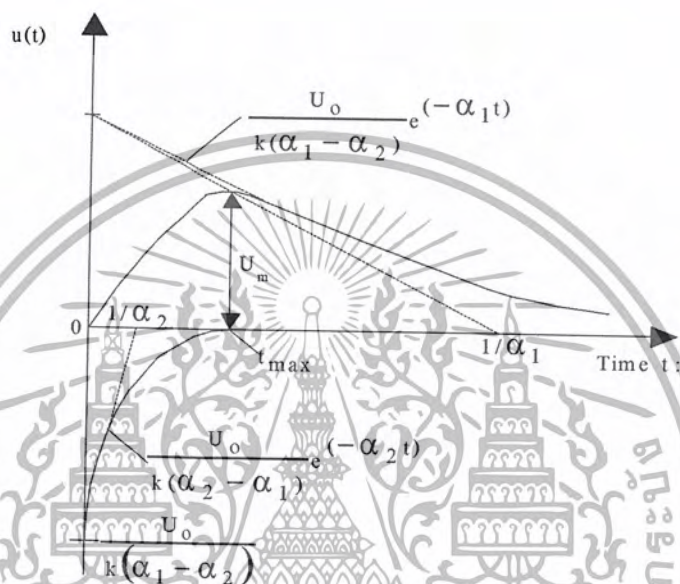


รูปที่ 3-7 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์มีไกสวิตซ์

3.2.5 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์

3.2.5.1 การแปรของแรงดันในเทอมของเวลา

พิจารณาจากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของเวลา ประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลา (time constant) เท่ากับ $\frac{1}{\alpha_1}$ และ $\frac{1}{\alpha_2}$ ดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 แรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม

ตามนิยามของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน ที่กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่นและหลังคลื่น T_1 และ T_2 ตามลำดับ มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา $\frac{1}{\alpha_1}$ และ $\frac{1}{\alpha_2}$ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1/T_2 อันเป็นตัวแทนถึงรูปลักษณะของรูปคลื่น ค่า T_1 และ T_2 อาจหาได้ดังนี้

$$T_1 = \frac{k_2}{\alpha_1} \quad (3-5)$$

$$T_2 = \frac{k_1}{\alpha_2} \quad (3-6)$$

T_1/T_2	k_1	k_2	$1/\alpha_1$ (μsec)	$1/\alpha_2$ (μsec)
1.2/5	1.44	1.49	3.47	0.805
1.2/50	0.73	2.96	68.5	0.405
1.2/200	0.70	3.15	286	0.381
250/2500	0.87	2.41	2875	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
 ตารางที่ 3-1 ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นต่างๆที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5.2 คำนวณค่าองค์ประกอบวงจร

เมื่อทราบว่าต้องสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นใด กำหนดด้วยค่า T_1 และ T_2 ปกติเราจะเริ่มต้นมาจากค่าความจุไฟฟ้าของโหลด C_b ก่อนเลือกตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s ให้สอดคล้องกับ C_b กล่าวคือ C_s เป็นตัวเก็บพลังงานได้มากพอที่จะจ่ายถ่ายเทให้กับ โหลด ดังนั้นเมื่อทราบค่า C_b และ C_s แล้ว องค์ประกอบที่เหลือต้องคำนวณ คือ ความต้านทาน R_d และ R_e ซึ่งอาจหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงตัวเวลา

วงจร A

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s} \right]} \right\} \quad (3-7)$$

$$R_d = \frac{1}{2C_s} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s} \right]} \right\} \quad (3-8)$$

วงจร B

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_b} \right]} \right\} \quad (3-9)$$

$$R_d = \frac{1}{2C_b} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_b} \right]} \right\} \quad (3-10)$$

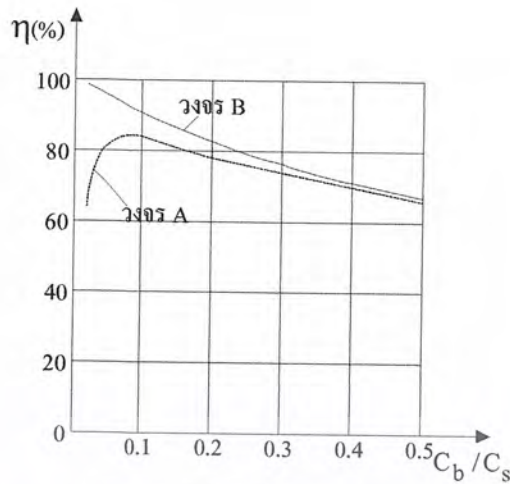
3.2.5.3 ประสิทธิภาพของวงจร

เมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หมายถึงอัตราส่วนค่ายอดของแรงดันที่สร้างขึ้นออกมาได้ต่อค่าแรงดันอัดประจุปกติจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอทั้งวงจร A หรือวงจร B

$$\eta = \frac{U_m}{U_o} < 1 \quad (3-11)$$

เมื่อ U_m คือ ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์
 U_o คือ แรงดันอัดประจุให้กับ C_s

ในกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (1.2/50 μsec) ประสิทธิภาพของวงจรอิมพัลส์ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า C_b ต่อ C_s มีค่าดังรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

3.2.5.4 คำนวณหาค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงเวลาหางคลื่น

ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่างๆของวงจรอิมพัลส์ ถ้าจำเป็นต้องทราบค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงหางคลื่น อาจคำนวณค่าโดยประมาณได้จากค่า k_1 และ k_2 ดังนี้

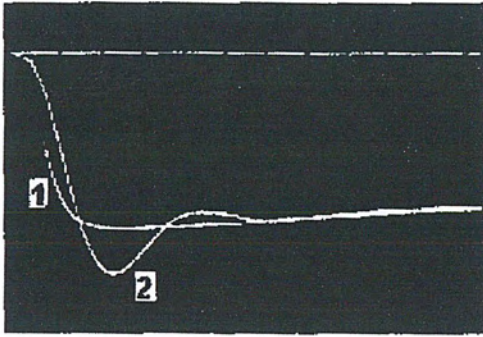
	วงจร A	วงจร B
T_1	$k_2 \frac{R_d R_e}{R_d + R_e} \frac{C_b C_s}{C_b + C_s}$	$k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s}$
T_2	$k_1 (R_d + R_e) (C_b + C_s)$	$k_1 R_e (C_b + C_s)$
η	$\frac{R_e C_s}{(R_d + R_e) (C_b + C_s)}$	$\frac{C_s}{C_s + C_b}$

ตารางที่ 3-2 สูตรการคำนวณหาค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและเวลาช่วงหางคลื่นโดยประมาณ

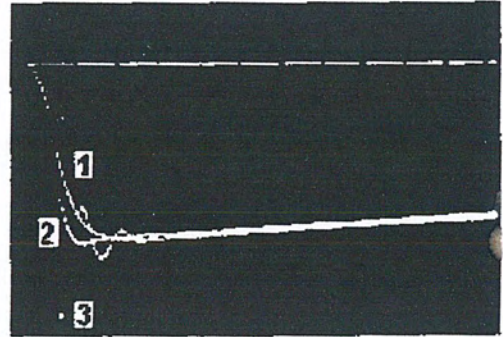
การคำนวณที่กล่าวแล้วข้างต้นนั้น ถือว่าวงจรที่ใช้คำนวณไม่มีค่าความเหนี่ยวนำ ในทางปฏิบัติรูปคลื่นที่ได้มักจะแตกต่างไปจากทฤษฎี โดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและค่ายอดของแรงดันคั้นทั้งนี้เนื่องจากในวงจรมีความเหนี่ยวนำซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ อาจทำให้เกิดออสซิลเลชันได้ เพื่อขจัดคลื่นระลอกซ้อนจึงจำเป็นต้องใส่ความต้านทานหน่วง R_d การพิจารณาให้ความเหนี่ยวนำต่ออันดับกับความต้านทาน R_d และสมมุติว่าผลของ R_e มีน้อย ($R_e = \infty$) ความต้านทาน R_d ที่ใส่เข้าไปจะต้องมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ คือ

$$R_d \geq 2 \cdot \sqrt{L \frac{(C_b + C_s)}{C_b \cdot C_s}} \quad (3-12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a)



b)

ตัวอย่างผลของ L และ R_d ในวงจรสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ $1.2/50 \mu\text{sec}$

วงจร B : $C_s = 67 \text{ nF}$, $C_b = 2 \text{ nF}$, $R_e = 996 \Omega$

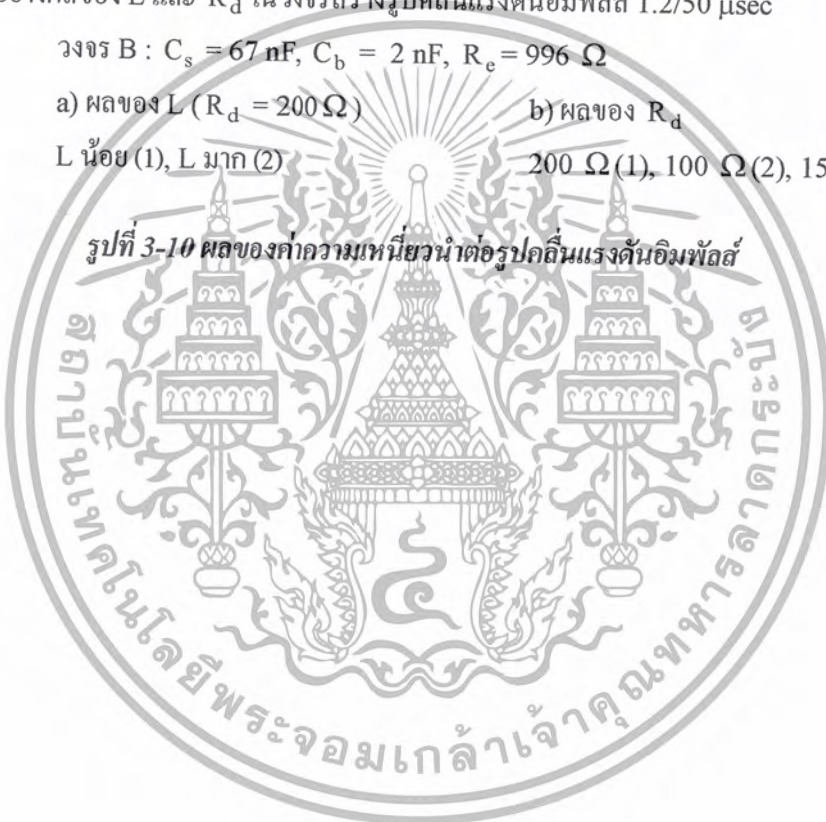
a) ผลของ L ($R_d = 200 \Omega$)

b) ผลของ R_d

L น้อย (1), L มาก (2)

200Ω (1), 100Ω (2), 15Ω (3)

รูปที่ 3-10 ผลของค่าความเหนี่ยวนำต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์



3.2.6 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ

อุปกรณ์แรงสูงทุกชนิดต้องผ่านการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์โดยที่ข้อกำหนดมาตรฐาน IEC สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า BIL (Basic Impulse Level) และแรงดันอิมพัลส์ สวิตชิง SIL (Switching Impulse Level) ได้กำหนดพิสัยค่าแรงดันทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3

System Highest Voltage (kV)						Impulse Test Voltage (kv) (Full Wave)					
IEC	BS	AS	VDE	CSA	ANSI (Insulation) (Class)	IEC 1.2*50	BS 1.2*50	AS 1.2*50	VDE 1.2*50	CSA 1.2*40	ANSI 1.2*50
			1.15						20		
				1.3	1.2A 1.2					45	30 45
				2.75	2.5A 2.5					60	45 60
3.6	3.6	3.6	3.6			45	45	50	45		
				5.5	5.0A 5.0					75	60 75
7.2	7.2	7.2				60	60	75			
				9.52	8.7A 8.7					95	75 95
12	12	12	12			75	75	95	75		
				15.5	15A 15					110	95 110
17.5	17.5	(17.5)			18	95	95	110			125
24	24	24	24	25.8	25	125	125	150	125	150	150
36	36	36	36	38	34.5	170	170	200	170	200	200
52	52	(52)	52	48.3	46	250	250	250	250	250	250
					60						300
72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	69	325	325	350	325	350	350
100	100	(100)		100	92	450 (380)	450 (380)	450 (380)(450)		450	450
123	123	123	123	123	115	550 (450)	550 (450)	550 (450)(550)	550 (450)	550	550
145	145	145		145	138	650 (550)	650 (550)	650 (550)(650)		650	650
170	170	170	170	170	161	750 (650)	750 (650)	750 (650)(750)	750 (650)	750	750
					180						825
					196						900
					215						975
245	245	245	245	245	230	1050 (900)	1050 (900)	(900) (825)	1050 (900)	1050	1050
					260						1175
300	300	300		300	287	(1050)	(1050)	(1175) (1050)		1300	1300
					315						1425
			(330)		345				(1175)		1550
	362	362		362			(1175)	(3000) (1175)		1425	
					375						1675
					400						1800
420	420	(420)	(420)	420	430	1425	(1425)	(1150) (1425)	(1425)	1150	1925
					460						2050
		525		525	490			(1800) (1675)		1800	2175
					520						2300
					545					2300	2425

ตารางที่ 3-3 ระบบแรงดันสูงสุดและค่าแรงดันทดสอบ BIL (Lightning impulse withstand voltage)

เอกสารนี้เผยแพร่ภายใต้ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6.1 ขนาดแรงดันทดสอบ

ขนาดแรงดันทดสอบขึ้นอยู่กับระดับฉนวน(Insulation level) นั่นคือขึ้นอยู่กับระบบแรงดันที่จะนำเอาอุปกรณ์หรือวัสดุนั้นๆ ไปใช้งาน แต่ละประเทศอาจจะกำหนดมาตรฐานการทดสอบของตนเอง อย่างไรก็ตามอาจใช้มาตรฐานสากล IEC (International standard) ซึ่งเป็นที่ยอมรับของนานาประเทศ เป็นค่าอ้างอิงหรือตกลงกันระหว่างประเทศ IEC Pub1.71-1993: Insulation Co-ordination Part 1 ได้กำหนดระดับแรงดันทดสอบตามช่วงระบบแรงดันสูงสุด (highest voltage) U_m ออกเป็น 3 ช่วง ดังตารางที่ 3-4 (a), (b), และ (c) ตามลำดับ

Highest voltage for equipment U_m kV _{rms}	Rated lightning impulse withstand Voltage kV _{peak}		Rated power-frequency short Duration withstand voltage kV _{rms} 2N) 3N)
	List 1 3N)	List 2 2N)	
3.6	20	40	10
7.2	40	60	20
12.0	60	75	28
17.5	75	95	38
24.0	95	125	50
36.0	145	170	70

(a) มาตรฐานการฉนวนระดับ $1 \text{ kV} < U_m < 52 \text{ kV}$

1	2	3	4
Highest voltage for equipment U_m kV _{rms}	Bses for p.u. values $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ kV _{peak}	Rated lightning impulse withstand voltage kV _{peak}	Rated power-frequency short duration withstand voltage kV _{rms}
52	42.5	250	95
72.5	59	325	140
123	100	450 ^{3N) 4N) 2NE)}	185 4N) 2NE) 3NE)
145	118	550 ^{2N) 1NE)}	230 2N) 3N)
170	139	650 ^{4N)}	275 4N)
245	200	750 ^{3NE) 2SE) 3SE)}	325 2SE) 3SE)
		850 ^{2NE)}	360 2NE) 3NE)
		950 ^{3N) 1SE)}	395
		1050 ^{2N) 1NE)}	460 2N) 3N)

(b) มาตรฐานการฉนวนระดับ $52 \leq U_m \leq 300 \text{ kV}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่ผูกมัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1	2	3	4	5	6
Highest voltage for equipment U_m (r.m.s.)	Base for p.u. values $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_m$ peak	Rated switch impulse with voltage (peak)		Ratio between rated lightning and switching impulse withstand voltage	Rated Lighting impulse withstand voltage (peak)
kV	kV	p.u.	kV		kV
300	245	3.06	750	1.13	850
		3.47		1.27	950
362	296	2.86	850	1.12	
		3.21		1.24	1050
300	343	2.76	950 ^{2SE) 3SE)}	1.11	
		3.06		1.24	1175 ^{2SE) 3SE)}
		2.45	1050 ^{2NE) 3NE)}	1.12	
525	429	2.74	1175	1.24	1300 ^{3NE)}
		2.08		1.11	
		2.74	1300 ^{2SE) 3SE)}	1.36	1425 ^{2NE) 1SE)}
		2.08		1.21	
765	625	2.28	1425 ^{2NE) 3NE)}	1.10	
		2.48		1.32	1550 ^{3SE)}
		2.28	1550 ^{2NE) 3NE)}	1.19	
		2.48		1.09	1800 ^{2SE) 3NE)}
		2.28	1800 ^{2NE) 3NE)}	1.38	
		2.48		1.26	1950 ^{3NE)}
		2.48	1950 ^{2NE) 3NE)}	1.16	
		2.48		1.26	2100 ^{2NE) 1SE)}
		2.48	2100 ^{2NE) 1SE)}	1.47	
		2.48		1.55	2400 ^{2NE) 1NE)}
		2.48	2400 ^{2NE) 1NE)}		

ตารางที่ 4 (c) มาตรฐานการฉนวนระดับ $U_m \geq 300$ kV

ตารางที่ 3-4 ตารางมาตรฐานการฉนวนระดับแรงดันต่างๆ

หมายเหตุ :

1) ถ้าระบบแรงดันใช้งานไม่ตรงกับ U_m ที่ระบุในตาราง ให้เลือกที่ U_m ค่าสูงกว่า เช่น ระบบ

115 kV ก็ต้องดูที่ระดับ $U_m = 123$ kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ค่าแรงดันทดสอบของแต่ละระดับ U_m มีหลายค่า จะเลือกค่าทดสอบใด ขึ้นอยู่กับระบบ ต่อลงดิน ว่าเป็น solidly grounded ค่าแรงดันทดสอบจะต่ำสุดเป็น reduced insulation ถ้าไม่ต่อลงดิน (ungrounded) จะทดสอบด้วยแรงดันสูงสุดเรียกว่า full insulation ส่วนค่าอื่นระหว่างค่าต่ำสุดกับค่าสูงสุด จะพิจารณาจากค่าโอห์มของอิมพีแดนซ์ ที่คอนนิวตรอนลงดิน และอัตราเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น ในการใช้งานระบบ แรงดันกระแสสลับซึ่งบางครั้งก็มีบ้างที่เป็นแรงดันกระแสตรงและแรงดันเกินประเภทต่างๆ เช่น แรงดันเกินเนื่องจากการเสิร์จสวิตซ์ชิ่งและแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า ดังนั้นจึงจะต้องมีการจัดประสานสัมพันธ์การฉนวนขึ้น เพื่อจุดประสงค์

1. จัดให้เหมาะสมกับคุณสมบัติการฉนวนของฉนวน เพื่อที่จะสามารถทนแรงดันที่คาดว่าจะต้องเกิดขึ้นในระบบ
2. เพื่อที่จะลดค่าแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้น
3. เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการประสานสัมพันธ์ของฉนวนแบบต่างๆ

การแบ่งชนิดของฉนวน (Type of insulation) ออกเป็นกลุ่มจะแบ่งตามลักษณะความสำคัญของการฉนวนในระบบ ไฟฟ้ากำลัง ยกตัวอย่าง เช่น การฉนวนระหว่างแรงดันเฟสกับดินหรือการฉนวนแรงดันระหว่างเฟสต่อเฟส หรือการฉนวนของช่องว่างอากาศ ในกรณีนี้จะแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 ได้แก่ Isolating clearances, fuse holders, between networks

กลุ่มที่ 2 ได้แก่ insulators, bushings, switching devices (apart from isolating gaps), power transformers, instrument transformers, cables และอื่นๆ

กลุ่มที่ 3 ได้แก่ prefabricated switchgear with individual items of gear assigned to insulation group 2 (i.e. consideration of enlargement effects; see Section 6)

กลุ่มที่ 4 ได้แก่ neutral-point insulation

กลุ่มที่ 5 ได้แก่ insulation of rotating machines

สำหรับการแบ่งประเภทของการฉนวน (insulation class) จะขึ้นอยู่กับลักษณะพฤติกรรมของจุดนิวตรอนกับความเสียหายของการเกิดแรงดันเกิน โดยกำหนดให้ NE คือ effectively earthed, N คือ not effectively earthed และ SE คือ effectively earthed ที่ไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดแรงดันเกิน ซึ่งการแบ่งชนิดและประเภทของฉนวนนั้นจะสอดคล้องกับระดับการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3-4 (a) - (c)

3.2.6.2 การเลือกขนาดแรงดันทดสอบ

การทดสอบแรงสูงนอกจากจะเลือกมาตรฐานใดเป็นเกณฑ์อ้างอิงแล้วยังต้องพิจารณาเลือกระดับแรงดันทดสอบด้วย เช่น แรงดันทดสอบตามมาตรฐาน IEC ดังแสดงในตารางที่ 3-4 (a)-(c) การเลือกระดับแรงดันทดสอบก่อนอื่นจะต้องทราบว่าวัสดุหรืออุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบนั้น จะนำไปติดตั้งใช้งานกับแรงดันเท่าใดซึ่งหมายถึงแรงดันระบบ คือแรงดันระหว่างเฟส (line to line voltage) โดยทั่วไปแรงดันระบบใช้งานจะต่ำกว่าแรงดันระบบสูงสุดที่กำหนดไว้ในคอลัมน์แรก U_m นั่นคือแรงดันใช้งานจะเปลี่ยนแปลงไปเท่าใดด้วยเหตุใดก็ตามจะต้องไม่เกินค่าแรงดันสูงสุด (highest voltage) ที่มาตรฐานกำหนด ฉะนั้นจะต้องเลือกแรงดันทดสอบตามระดับแรงดันระบบสูงสุด U_m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง เช่น แรงดันใช้งานระบบจำหน่าย 33 kV ค่านี้ไม่ปรากฏในตารางที่ 3-4 (a) ให้เลือกที่แรงดันระบบสูงสุดค่าถัดไปคือ $U_m = 36 \text{ kV}$ จะได้ค่าแรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดัน AC - 1 นาที (power frequency short duration withstand voltage $kV_{rms} - 1 \text{ min}$) เท่ากับ 70 kV มีค่าเดียว ส่วนแรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (lightning impulse withstand voltage kV_{peak}) ซึ่งเรียกว่าค่าแรงดัน BIL (Basic Impulse Insulation Level) จะมีสองค่า คือ 145 kV และ 170 kV ถ้ามองว่าจะเลือกค่า BIL ไດ กรณี เช่นนี้ให้พิจารณาว่าอุปกรณ์ที่จะนำไปติดตั้งใช้งานนั้นมีโอกาสได้รับแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่ารุนแรงมากหรือน้อย มีโอกาสฟ้าผ่าหรืออัตราเสี่ยงมากหรือน้อย ต้องการการคำนวณมีความแข็งแรงมากหรือน้อย

ในตารางที่ 3-4 (b) ค่ากำหนดแรงดันทดสอบความคงทนสำหรับแรงดันระบบสูงสุดในช่วง $52 \leq U_m < 300 \text{ kV}$ ด้วยแรงดัน AC - 1 min. ความถี่พลังงานและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (BIL) แต่จะไม่มีการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง ทั้งนี้เพราะว่า การออกแบบการคำนวณ BIL ในช่วงนี้จะครอบคลุมความคงทนต่อแรงดันเสิร์จสวิตชิงอยู่แล้วส่วนที่ระดับแรงดัน $U_m \geq 123 \text{ kV}$ จนถึง 245 kV จะพบว่าค่าแรงดันทดสอบทั้ง AC และ BIL มีหลายค่าถามว่าทำไมจึงมีหลายค่าและจะเลือกค่าใดแต่ละระดับแรงดัน U_m มีค่าแรงดันทดสอบหลายค่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับการคำนวณ คือ ขึ้นอยู่กับการต่อลงดินของจุดนิวตรอนของระบบว่าเป็นแบบใด ถ้านิวตรอนไม่ต่อลงดิน การคำนวณของนิวตรอนจะได้รับแรงดัน ไม่ใช่ศูนย์ ถือว่าการคำนวณต้องทนแรงดันได้เต็มที่ (full insulation) ฉะนั้นแรงดันทดสอบจะเลือกที่ระดับสูงสุด แต่ถ้านิวตรอนต่อลงดินโดยตรงโดยไม่ผ่านค่าอิมพีแดนซ์ใดๆ เรียกว่า solidly grounded ค่าแรงดันทดสอบจะเลือกที่ระดับค่าสุดท้ายที่นิวตรอนต่อลงดินโดยตรง สำหรับ AC - 1 min. เท่ากับ 275 kV และสำหรับ BIL เท่ากับ 650 kV ถ้านิวตรอนไม่ต่อลงดินค่าแรงดันทดสอบสูงสุดสำหรับ AC เท่ากับ 460 kV และ BIL เท่ากับ 1050 kV

ในตารางที่ 3-4 (c) เป็นค่าแรงดันทดสอบในช่วงที่ $U_m \geq 300 \text{ kV}$ จะมีการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ สวิตชิงเพิ่มเติมจากตารางที่ 3-4 (b) ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันเสิร์จสวิตชิงจะมีค่าเพิ่มตามระดับแรงดันระบบ คือจะมีค่าถึง 2 เท่าหรือมากกว่า 2 เท่าของค่ายอดแรงดันระบบ ถ้าแรงดันระบบยิ่งสูงขึ้น ค่าเสิร์จสวิตชิงก็ยิ่งสูงมากขึ้นทำให้ค่าแรงดันทดสอบ BIL มีความหมายน้อยลง ฉะนั้นการออกแบบการคำนวณระบบแรงดันสูง EHV หรือ UHV จะถือเอาความคงทนต่อแรงดันเสิร์จสวิตชิงเป็นเกณฑ์

3.3 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงอิมพัลส์ที่ใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของ สจส.

ชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนั้น จะแบ่งส่วนประกอบออกเป็นระบบต่างๆดังต่อไปนี้

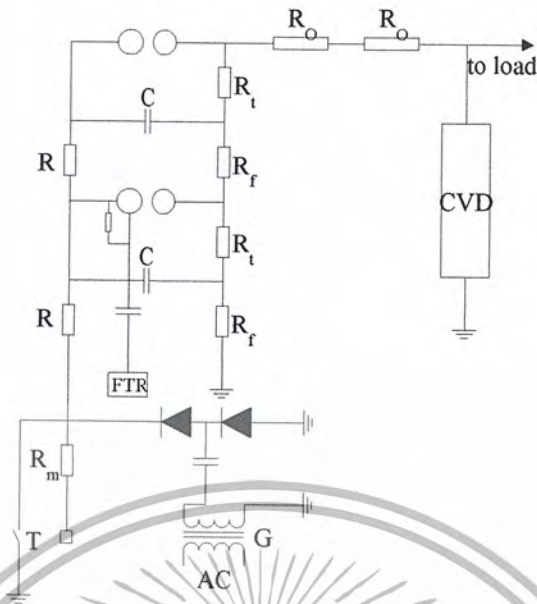
- ระบบ AC. Low voltage
- ระบบ AC. High voltage
- ระบบ DC. High voltage
- ระบบ Impulse circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

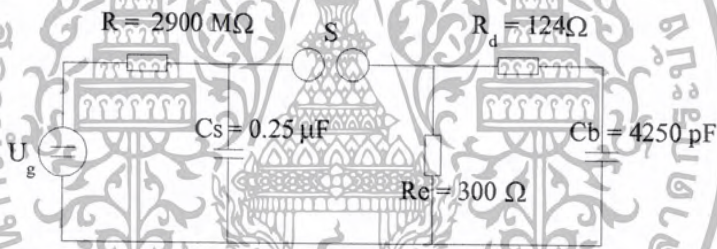
การทำงานของชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ของห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง เริ่มต้นจากแหล่งจ่ายไฟจากภายนอกธรรมดาซึ่งเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำ 220 V นำเข้าหม้อแปลง Step up transformer เพื่อทำการยกระดับแรงดันขึ้นมาเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง หลังจากนั้นจะนำเข้ามาในระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยที่ภายในระบบนี้จะประกอบด้วยวงจร Double เพื่อทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า วงจร Rectifier เพื่อทำให้แรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง และวงจร Cascade เพื่อจะทำให้ค่าแรงดันที่ได้เพิ่มขึ้นได้หลายๆเท่า แต่ถ้าต้องการที่จะเปลี่ยนขั้วที่ทำการทดสอบก็จะทำได้โดยการกลับขั้วของไดโอดที่อยู่ภายนอก ซึ่งหลังจากนั้นก็เข้าสู่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานสร้างขึ้น โดยอาศัยวงจรทรานเซียน RC โดยอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ แล้วคายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวของเวลาให้ได้รูปคลื่นตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานเพียงขั้นเดียวไม่สามารถที่จะสร้างแรงดันได้สูงมากพอซึ่งวิธีที่จะทำให้สร้างแรงดันอิมพัลส์ได้สูงๆ คือนำเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานหลายๆขั้นมาต่อซ้อนกันตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ ซึ่งก็คือการนำตัวเก็บประจุของแรงดันอิมพัลส์หลายๆ ตัวมาต่อขนานกัน วิธีการก็คือเมื่อตัวเก็บประจุได้รับแรงดันอัดประจุตามที่ต้องการแล้วก็ปล่อยคายประจุหรือดีสชาร์จผ่านสปาร์กแกป โดยที่ตัวเก็บประจุที่ใช้อัดประจุจะต่อกันแบบอนุกรม เพราะฉะนั้นจึงได้แรงดันอิมพัลส์เป็นทวีคูณในแต่ละขั้น ซึ่งเราสามารถที่จะกำหนดระดับแรงดันที่ต้องการได้ โดยทำการเพิ่มหรือลดจำนวนขั้นภายในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ อย่างไรก็ตามเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ของห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง จะมีจำนวนขั้นทั้งหมด 2 ขั้น ซึ่งแต่ละขั้นจะสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ 100 kV เพราะฉะนั้นรวมแล้วจะสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้สูงสุด 200 kV และมีพลังงาน 5 kJ

อย่างไรก็ตามแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นควรที่จะควบคุมได้เพื่อที่จะทำให้ค่าแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนเข้าไปที่อุปกรณ์ทดสอบนั้น มีค่าคงที่ในทุกๆครั้งที่ทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์เข้าไป ซึ่งอุปกรณ์นั้นก็คือทรานซิสเตอร์แกป สำหรับวงจรภายในชุดกำเนิดของห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงลาดกระบังนั้นจะเป็นชนิดวงจร B และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ของ สจล.



รูปที่ 3-12 เปรียบเทียบวงจรจริงกับวงจรสมมูลย์ 1 ชั้น

โดยที่

G	คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	200 kV, 5 kJ
T	คือ ระบบกราวน์	
R_f (R_d)	คือ ความต้านทานหน้าคลื่น	12 Ω (Lightning), 6000 Ω (Switching)
R_t (R_e)	คือ ความต้านทานหลังคลื่น	150 Ω (Lightning), 6000 Ω (Switching)
R_m	คือ ความต้านทานวัดแรงดันอิมพัลส์กระแสตรง	200 MΩ
R	คือ ความต้านทานอิมพัลส์	1450 Ω
R_o	คือ ความต้านทานเอาต์พุต	100 = (65+35) Ω
C (C_s)	คือ คาปาซิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	0.5 μF
C_t	คือ ทริกเกอร์คาปาซิเตอร์	850 pF
CVD (C_b)	คือ คาปาซิเตอร์โวลเตจดีไวเดอร์	4200 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : จากรูปที่ 3-12 เป็นการยุบวงจรจริงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จาก 2 ชั้น เป็น 1 ชั้น โดยการเปรียบเทียบกับวงจรสมมูลย์พื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ B โดยที่ค่าองค์ประกอบต่างๆ จะสามารถคำนวณได้ดังนี้ดังนี้

จาก

$$R_d = nR'_d = R_f$$

จะได้

$$R_d = 2 \times 12 \Omega = 24 \Omega$$

แต่ว่าค่า R_d ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ของ สจล. ตัวนี้ คือ ผลรวมของ R_f กับ R_o เพราะฉะนั้นค่า R_d ตัวใหม่จะคำนวณได้ดังนี้

$$R_d = R_f + R_o = 24 \Omega + 100 \Omega = 124 \Omega$$

จาก

$$R_e = nR'_e = R_t$$

จะได้

$$R_e = 2 \times 150 \Omega = 300 \Omega$$

จาก

$$C_s = \frac{C'_s}{n}$$

จะได้

$$\frac{0.5 \mu F}{2} = 0.25 \mu F$$

และ

$$R = 2 \times 1450 \Omega = 2900 \Omega$$

ส่วนค่า C_b คือ ค่าผลรวมของค่าคาปาซิเตอร์โวลต์เตจดีไวเดอร์และค่าคาปาซิเตอร์ของลูกถ้วย ฉนวนคาปาซิเตอร์ของลูกถ้วยฉนวนมีค่าประมาณ 50 pF เพราะฉะนั้นค่า C_b ตัวใหม่จะหาได้ดังนี้

$$C_b = 4200 \text{ pF} + 50 \text{ pF} = 4250 \text{ pF}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าองค์ประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่คำนวณได้นี้จะแสดงอยู่ในวงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ แบบ B ดังรูปที่ 3-12 ซึ่งสามารถคำนวณหา T_1 และ T_2 ได้ดังนี้

หา T_1 จากสูตรในตารางที่ 3-2 เมื่อ

$$T_1 = k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s}$$

และจากตารางที่ 3-1, k_2 มีค่าเท่ากับ 2.96

แทนค่าต่างๆลงในสูตร จะได้

$$T_1 = 2.96 \times 124 \times \left[\frac{4250 \times 10^{-12} \times 0.25 \times 10^{-6}}{(4250 \times 10^{-12}) + (0.25 \times 10^{-6})} \right]$$

$$T_1 = 1.53 \text{ } \mu\text{sec}$$

หา T_2 จากสูตรในตารางที่ 2 เมื่อ

$$T_2 = k_1 R_c (C_b + C_s)$$

และจากตารางที่ 2-1 k_1 มีค่าเท่ากับ 0.73

แทนค่าต่างๆลงในสูตร จะได้

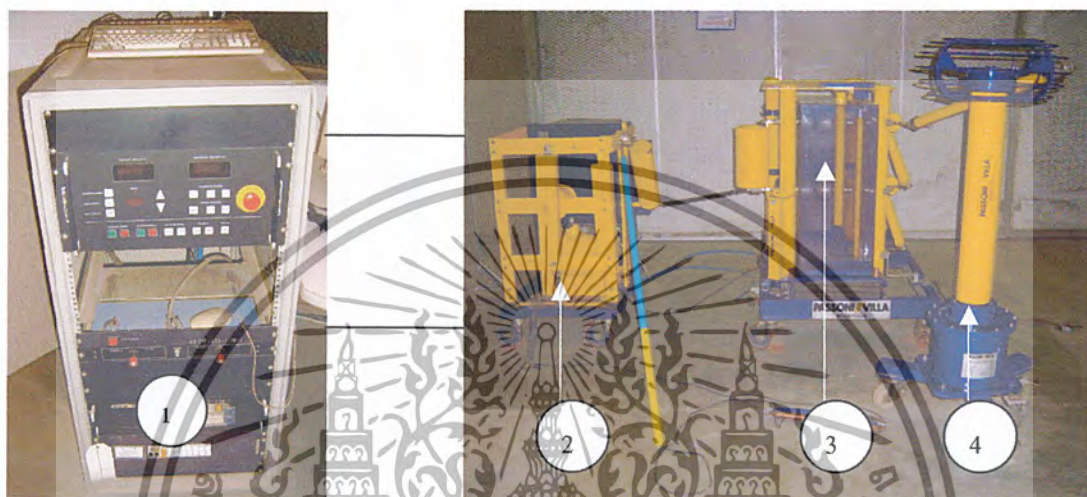
$$T_2 = 0.73 \times 300 \times [(4250 \times 10^{-12}) + (0.25 \times 10^{-6})]$$

$$T_2 = 55.68 \text{ } \mu\text{sec}$$

ซึ่งจากการคำนวณหา T_1 และ T_2 โดยประมาณ ค่าที่ได้จะอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \text{ } \mu\text{sec} \pm 30\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง 0.84-1.56 μsec และเวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 50 \text{ } \mu\text{sec} \pm 20\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง 40-60 μsec

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเป็นของ PASSION VILLA โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
2. เครื่องอัดประจุ
3. ตู้ควบคุม
4. ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน



รูปที่ 3-13 ชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV, 5 kJ

- เมื่อ
- 1 คือ ตู้ควบคุม
 - 2 คือ เครื่องอัดประจุ
 - 3 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 - 4 คือ ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน

3.3.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ มีข้อกำหนดดังนี้

- Type	GTU 2-2.5
- Charging Rate Voltage :	200 kV
- Max. Output Voltage 1.2/50 μ s (depending on the load) :	180 kV
- Max. Output Voltage 250/2500 μ s (depending on the load) :	155 kV
- Rate Energy :	5 kJ
- Number of Stages :	2 Stages
- Charging Voltage per Stage :	100 kV
- Stages Rates Capacitance :	0.5 μ F
- Rated Recurrence Frequency :	30 sec.
Between Following Impulses :	
- Generator Inductance :	15 μ H
- Related Humidity :	35 – 95 %
- Working Temperature :	-10 to + 40 C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์

1) **Main Capacitors**

- Rated Voltage :	100	kV-DC
- Rated Capacitance :	0.5	μF
- Tolerance on the Capacitance :	+10% -5%	
- Deviation from the Average Value :	5	%
- Rated Voltage A.C. Continuous Duty :	25	kV_{rms}
- Loss Factor (Tand) at 25 kV rms :	about	5/1000
- Partial Discharge Level at 10 kV rms	about	0.5 pC
- Max. Inductance :	about	0.5 μH
- Working Temperature :	-10 to	+40 C

The Quantity Supplied is 1 capacitor for Stage.

2) **Charging Resistor for L.I. and S.I. Wave**

- Rated Value :	25000	Ω
- Resistor Inductance :	5	μH
- Thermal Capacitance for an Impulse each 30 s :	2.5	kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor.

3) **Front Resistor for L.I. Wave**

- Rate Value :	12	$\Omega \pm 5\%$
- Resistor Inductance	1.5	μH
- Thermal Capacitance for an Impulse each 30 s :	2.5	kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor for Stage.

4) **Tail Resistor for L.I. Wave**

- Rate Value :	150	$\Omega \pm 5\%$
- Resistor Inductance	2	μH
- Thermal Capacitance for an Impulse each 30 s :	2.5	kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor for Stage.

5) **Output Resistor for L.I. Wave (2 sections)**

- Total Rate Value :	100	$\Omega \pm 10\%$
- Resistor Inductance	about	5 μH
- Thermal Capacitance for an Impulse each 30 s :	12.5	kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor for Stage.

6) **Front Resistor for S.I. Wave**

- Rate Value :	6000	Ω
- Thermal Capacitance for an Impulse each 30 s :	2.5	kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor for Stage.

7) **Tail Resistor For S.I. Wave**

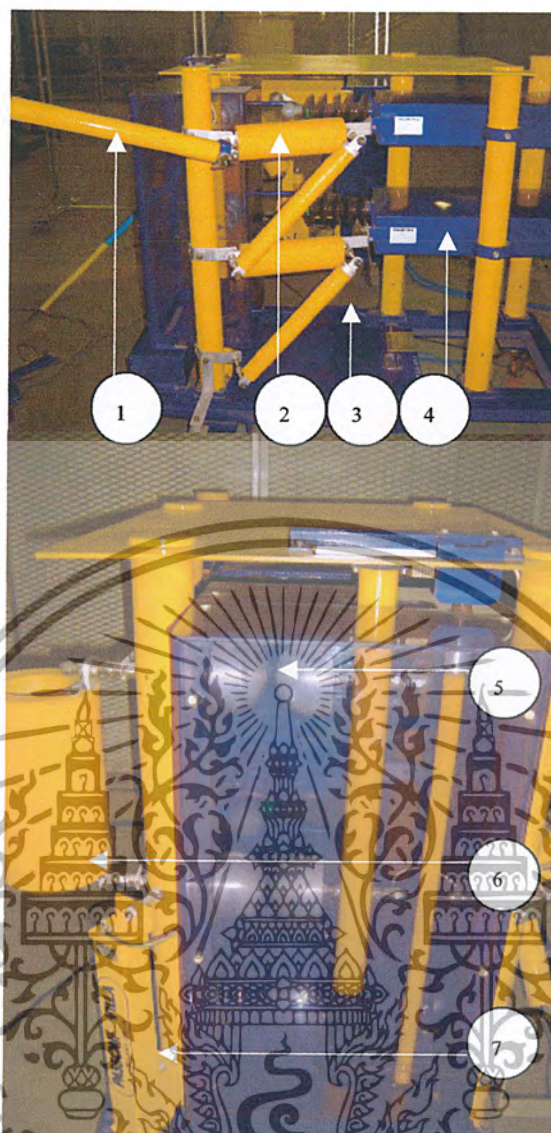
- Rate Value :	6000	Ω
- Thermal Capacitance for an Impulse each 30 s :	2.5	kJ

The Quantity Supplied is 1 Resistor for Stage.

8) **Trigger Capacitor**

- Rated Voltage :	100	kV-DC
- Rated capacitance :	850	μF
- Rated Resistance :	900	Ω

The Quantity Supplied is 1 Capacitor.



รูปที่ 3-14 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV, 5kJ

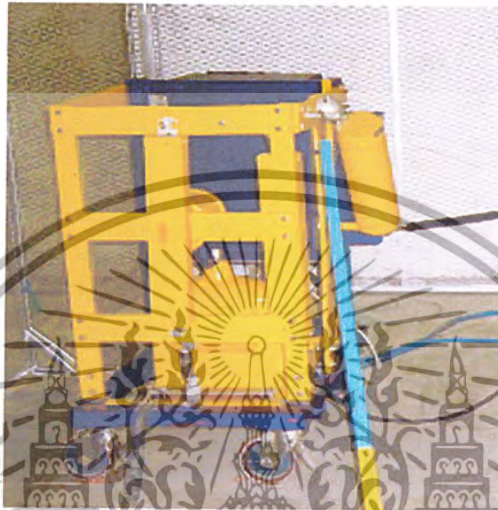
- เมื่อ
- 1 คือ ความต้านทานเอาต์พุต (R_o)
 - 2 คือ ความต้านทานปรับหางคลื่น (R_t)
 - 3 คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_f)
 - 4 คือ คาปาซิเตอร์หลัก (C_s)
 - 5 คือ สปาร์กแกป
 - 6 คือ ความต้านทานอัดประจุ (R)
 - 7 คือ ทริกเกอร์คาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 เครื่องอัดประจุ (Charging)

เครื่องอัดประจุเป็นตัวสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเพื่อทำการอัดประจุให้กับ Unicapacitor ทั่วๆ ตัวในแต่ละสแตท โดยเครื่องอัดประจุมีข้อกำหนดดังนี้

- Feeding Voltage at 50 Hz :	220	V
- Output Voltage :	± 100	kV-DC
- Output Current :	100	mA

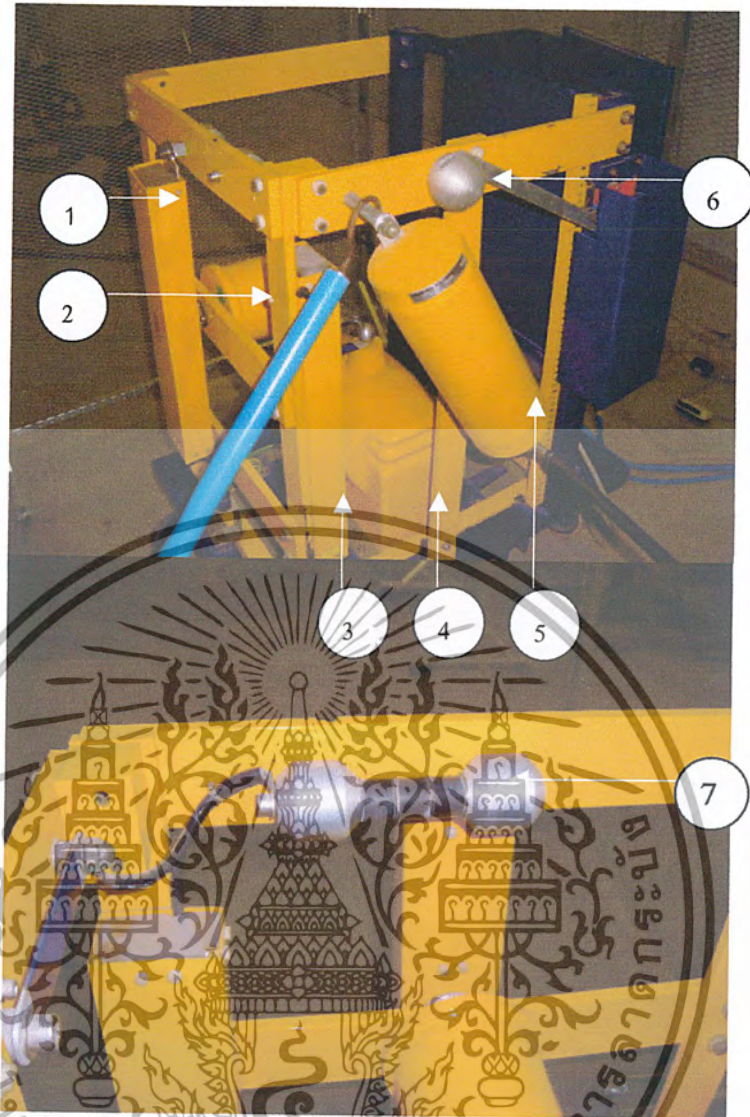


รูปที่ 3-15 ชุดเครื่องอัดประจุ

ส่วนประกอบของเครื่องอัดประจุ

1) Transformer		
- Primary Voltage :	220	V
- secondary Voltage :	48	kV
- Rated Power :	600	VA
4) Rectifying Sections		
- Rated Voltage :	150	kV-DC
- Rated Current :	225	mA
5) Diode Protection Resistors		
- Rated Voltage :	100	kV-DC
- Rated Resistance :	15	kΩ
6) Doubling Capacitor		
- Rated Voltage :	50	kV
- Rated Capacitance :	2.5	nF
5) Measuring Resistor		
- Continuous Rated Voltage :	1000	kV-DC
- Rated Resistance :	200	MΩ
- Tolerance on the Rated Voltage :	±5%	
- Connector Type :	AMPHENOL	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-16 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอัดประจุ

- เมื่อ
- 1 คือ Rectifying Sections
 - 2 คือ Doubling Capacitor
 - 3 คือ Measuring Resistor
 - 4 คือ Transformer
 - 5 คือ Charging Resistor
 - 6 คือ Grounding device
 - 7 คือ Diode Protection Resistors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน (Capacitor Voltage Divider)

คาปาซิเตอร์โวลเตจดีไวเดอร์ทำหน้าที่เป็นตัววัดขนาดและรูปร่างของแรงดันที่เกิดขึ้นด้านขาออกของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยสัญญาณที่ได้จะถูกส่งไปยังออสซิลโลสโคป อีกที่หนึ่ง เพื่อแสดงรูปคลื่นสัญญาณและขนาดแรงดัน โดยในการออกแบบใช้งานจะออกแบบให้เหมาะสมกับการวัดแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานที่ 1.2/50 μsec สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และที่ 250/2500 μsec สำหรับแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ ซึ่งการต่อจะต่อขนานอยู่ระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบด้วย กล่าวคือ ค่าที่พิกัดตัวเก็บประจุของ ดีไวเดอร์ สำหรับอุปกรณ์วัดแรงดันอิมพัลส์จะมีค่า 4200 pF ถ้าค่าตัวเก็บประจุของอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบนั้นมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4200 pF จะทำให้ค่าที่วัดได้มีค่าที่ผิดเพี้ยนไป ซึ่งวิธีแก้ก็คือ จะต้องเปลี่ยนตัวต้านทานของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ที่มีผลกับช่วงเวลาหน้าคลื่นและช่วงเวลาหางคลื่นให้มีค่าที่เหมาะสมสำหรับที่จะใช้กับอุปกรณ์ทดสอบนั้นๆ



รูปที่ 3-17 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน

คาปาซิเตอร์โวลเตจดีไวเดอร์ มีพิกัดดังนี้

- Rated Capacitance :	4200 pF
- Rated Voltage L.I. :	200 kV
- Rated Voltage to 50 Hz :	50 kV
- Rated Ratio :	230.5
- Connector Type :	LEMO RA 4250

3.3.4 ผู้ควบคุม

ผู้ควบคุม มีข้อกำหนดดังนี้

- Voltage :	220 V-60 Hz
- Phase :	Single
- Power :	1 kVA

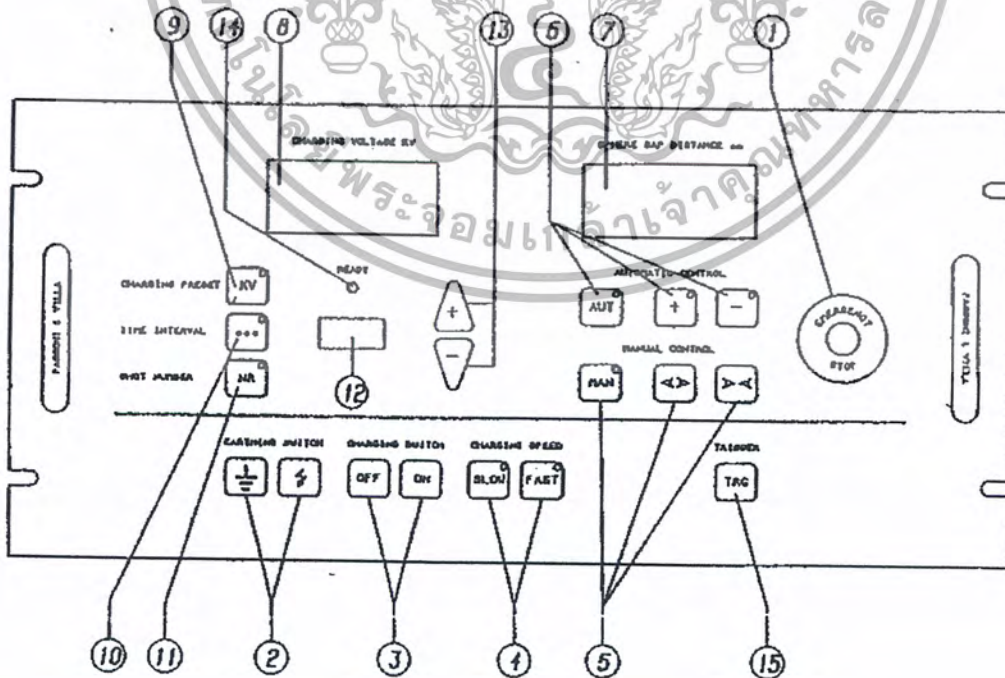
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-18 ตู้ควบคุม

3.3.4.1 อุปกรณ์สำหรับการควบคุม

Control unit ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จะมีลักษณะดังรูป ซึ่งออสซิลโลสโคปของชุดคอนโทรลได้เกิดชำรุดเสียหายดังนั้นจึงไม่มีออสซิลโลสโคปติดตั้งอยู่ในตู้ควบคุมนี้ ส่วนต่างๆและหน้าที่ของชุดควบคุมจะแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3-19



รูปที่ 3-19 ตำแหน่งชุด Control unit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-20 ชุด Control unit

จากรูปที่ 3-19 เมื่อ

1. EMERGENCY STOP คือ เป็นตัวป้องกันเพื่อความปลอดภัยจะใช้ในกรณีที่ต้องการที่จะหยุดการทำงานอย่างฉุกเฉินหรือต้องการหยุดการทำงานชั่วคราว
2. EARTHING SWITCH คือ เป็นการควบคุมระบบกราวด์
3. CHARGING SWITCH คือ เป็นการควบคุมการชาร์จประจุของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ถ้าหลอดไฟสีแดงสว่างแสดงว่าอยู่ในสถานะ ON ถ้าหลอดไฟสีเขียวสว่างแสดงว่าอยู่ในสถานะ OFF
4. CHARGING SPEED คือ เป็นการควบคุมระยะเวลาการชาร์จประจุ ปุ่ม SLOW คือ ช้าและ FAST การชาร์จประจุจะเร็ว
5. MANUAL CONTROL คือ การกำหนดการปรับตั้งระยะแกป
6. AUTOMATIC CONTROL คือ การกำหนดการปรับตั้งระยะแกปโดยอัตโนมัติซึ่งสามารถที่จะปรับตั้งได้ $\pm 7\%$ ของการปรับตั้งโดยอัตโนมัติ
7. SPHERE GAP DISTANCE คือ ตัวแสดงระยะของแกปภายในเครื่องกำเนิดอิมพัลส์
8. CHARGING VOLTAGE kV คือ ตัวแสดงค่าแรงดันที่ใช้ได้จริง
9. CHARGING PRESET คือ การกำหนดค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบ
10. TIME INTEVAL คือ การกำหนดระยะเวลาการเริ่มอัดประจุใหม่ในกรณีที่ป้อนแรงดันหลายลูก
11. SHOT NUMBER คือ การกำหนดจำนวนลูกของแรงดันที่จะป้อน
12. เป็นตัวแสดงค่าของ CHARGING PRESET, TIME INTEVAL และ SHOT NUMBER
13. เป็นปุ่มกดเพื่อแสดงสถานะจะเปลี่ยนเพิ่มหรือลดของค่า CHARGING PRESET, TIME INTEVAL และ SHOT NUMBER
14. READY คือ แสดงไฟสถานะ การทำงานพร้อมกับแสดงค่าที่กำหนดด้านล่าง
15. TRIGGER คือ เป็นการควบคุมการทริกของแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อแนะนำ ในการกำหนดค่าแรงดัน (kV) ที่ใช้ทดสอบที่ CHARGING PRESET แสดงเป็นสูตรได้ว่าแรงดันที่ป้อน CHARGING PRESET = จำนวนแรงดันที่ต้องการ/(2*0.96)

เมื่อ 2 คือ จำนวนชั้นของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์

0.96 คือ ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

3.3.4.2 การปรับระยะห่างของแกปทรงกลมของชุดอิมพัลส์ที่เหมาะสม

ค่ามาตรฐานเครื่อง													
Voltage (kV)	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	95	98
Sphere (mm)	2.7	4.5	6.3	8.1	10	15. 6	19. 8	24	30. 7	35. 3	39. 8	42. 1	43.3

ตารางที่ 3-5 ค่ามาตรฐานเครื่อง

ค่าปัจจุบัน (โดยประมาณ)													
Voltage (kV)	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	95	98
Sphere (mm)	2.7	4.0	5.6	7.3	8.9	12. 4	16. 7	19. 7	25. 2	30. 2	34. 1	36. 5	38.1

ตารางที่ 3-6 ค่าปัจจุบัน (โดยประมาณ)

*หมายเหตุ ค่าที่แสดงในปัจจุบันเป็นค่าโดยประมาณเพราะฉะนั้นค่านี้อาจจะเพิ่มหรือลดลงก็ได้

3.4 การทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2 Stage 200 kV, 5 kJ
- 2) ลูกถ้วยฉนวน
- 3) ออสซิลโลสโคป
- 4) แผ่นพรีอบปีติสขนาด 1.44 MB

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) บันทึกสภาพบรรยากาศห้องทดลอง

วันที่ทดสอบ 15 สิงหาคม 2547 เวลา 12.00-18.00 น.

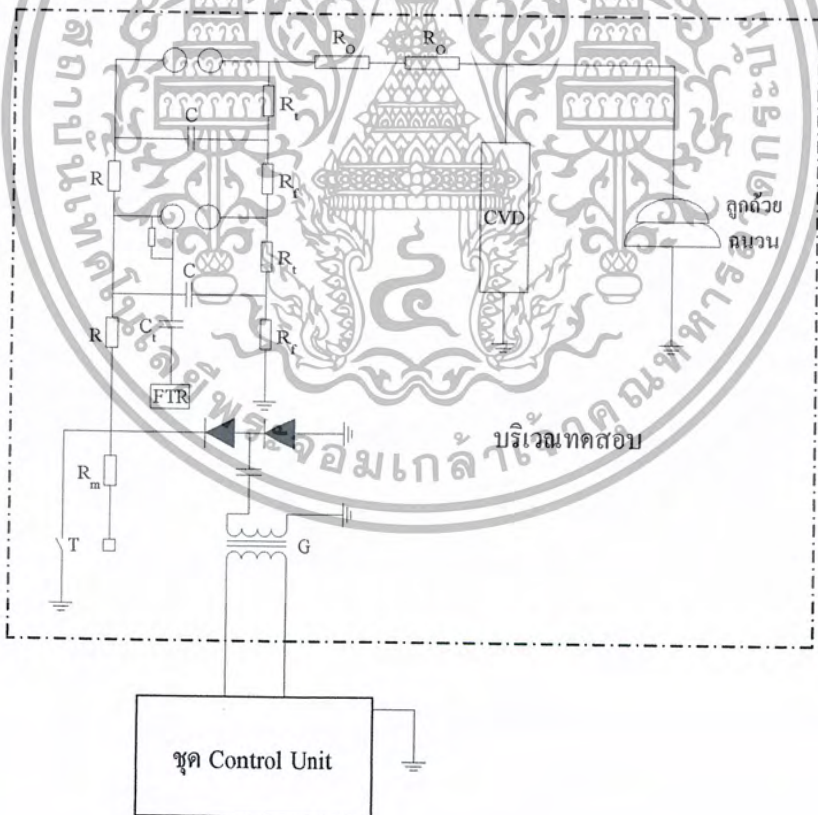
สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 30 เซลเซียส

ความดันบรรยากาศ 750 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ 77 %

ความชื้นสัมบูรณ์ 22 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

- 2) ค่อวงจรตามรูปที่ 3-21 หรือ 3-22



รูปที่ 3-21 วงจรการทดสอบลูกถ้วยฉนวน



รูป 3-22 การต่อลูกถ้วยในการทดสอบจริง

3.1 การศึกษาผลของตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d)

- 1) ปรับ $R_0 = 35 \Omega$ ป้อนแรงดัน 50 kV ให้กับลูกถ้วยฉนวน บันทึกรูปคลื่นที่ได้ พร้อมกับคำนวณหา T_1 และ T_2
- 2) ปรับ $R_0 = 65 \Omega$ ป้อนแรงดัน 50 kV ให้กับลูกถ้วยฉนวน บันทึกรูปคลื่นที่ได้ พร้อมกับคำนวณหา T_1 และ T_2
- 3) ปรับ $R_0 = 100 \Omega$ ป้อนแรงดัน 50 kV ให้กับลูกถ้วยฉนวน บันทึกรูปคลื่นที่ได้ พร้อมกับคำนวณหา T_1 และ T_2

3.2 การหาคุณลักษณะ โวลต์ที่ตก - เวลา (v - t Curve) ของลูกถ้วยฉนวน

- 1) ต่อยุทธตามรูปที่ 3-21
- 2) ทดสอบที่ระดับแรงดันประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ของค่าแรงดันที่คาดว่าจะเกิดเบรกดาวน์คร่อมลูกถ้วย ในกรณีลูกถ้วยแขวนใช้ค่าประมาณ 40-50 kV เพื่อคว่ำรูปคลื่นให้คาบเวลาได้ตามมาตรฐานหรือไม่ ถ้าไม่ได้ให้ปรับแต่งวงจรจนได้แรงดันตามข้อกำหนด ในสภาวะมาตรฐาน บันทึกรูปคลื่นทดสอบ
- 3) เพิ่มแรงดันและระยะแกปที่ผู้ควบคุมจนถึงค่าแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดลูกคลื่นตัดครั้งละ 5 kV
- 4) เมื่อรู้แรงดันที่เริ่มเกิดลูกคลื่นตัดก็เพิ่มแรงดันและระยะแกปแล้วทำการทดสอบหาลูกคลื่นที่ตัด ที่แรงดันสูงขึ้นอีกประมาณ 5 ลูกคลื่น เช่น สมมุติ เริ่มเกิดลูกคลื่นตัดที่แรงดัน 50 kV ก็เพิ่มแรงดันเป็น 55 kV, 60kV, 65kV, 70 kV หรือ เริ่มที่ 50kV, 60kV, 70kV, 80kV, 90kV เป็นต้น ไม่ควรทำการทดสอบเกิน 90 kV
- 5) บันทึกลูกคลื่นที่ได้ทั้ง 5 ลูกคลื่นจากออสซิลโลสโคปลงแผ่นดิสก์
- 6) ทำการสลับขั้วของแรงดันที่ตัวเครื่องกำเนิด จากบวกเป็นลบหรือจากลบเป็นบวกแล้วแต่ว่าเริ่มทำการทดสอบที่ขั้วไหนและทำตามลำดับที่ 5-1
- 7) การทำ v-t Curve ของลูกถ้วยฉนวน โดยการนำลูกคลื่นตัดที่ได้จากการทดสอบลูกถ้วยฉนวนในแต่ละขั้ว มาเขียน v-t Curve

3.3 การศึกษาการกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิ่ง

1) ต่อวงจรตามรูปที่ 3-21 แต่ปรับเปลี่ยนการต่อวงจรภายในของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยการเปลี่ยน R_d และ R_c จากเดิม ให้เป็นขนาด 6000Ω ทุกตัว

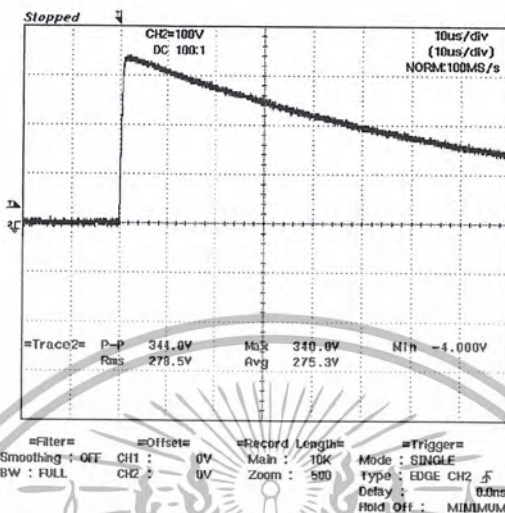
2) ป้อนแรงดัน 50 kV ให้กับลูกถ้วยฉนวนทั้งขั้วบวกและขั้วลบ บันทึกรูปคลื่นที่ได้ พร้อมกับคำนวณหา T_1 และ T_2



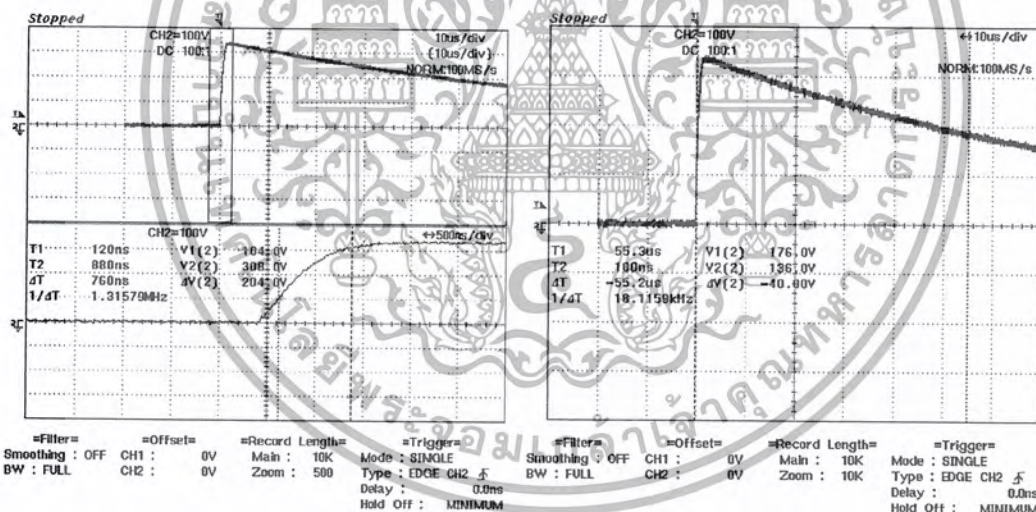
3.4.1 ผลการทดสอบ

3.4.1.1 ผลการทดสอบลูกถ้วยฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (ข้าววก)

1) รูปคลื่นเต็ม



รูปที่ 3-23 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มที่แรงดัน 50 kV



ก)

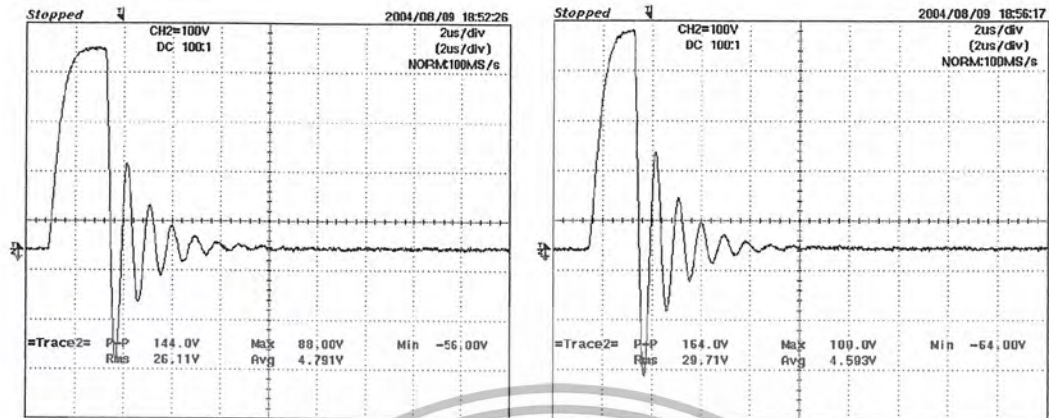
ข)

รูปที่ 3-24 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มที่แรงดัน 50 kV ในขณะขยายภาพ

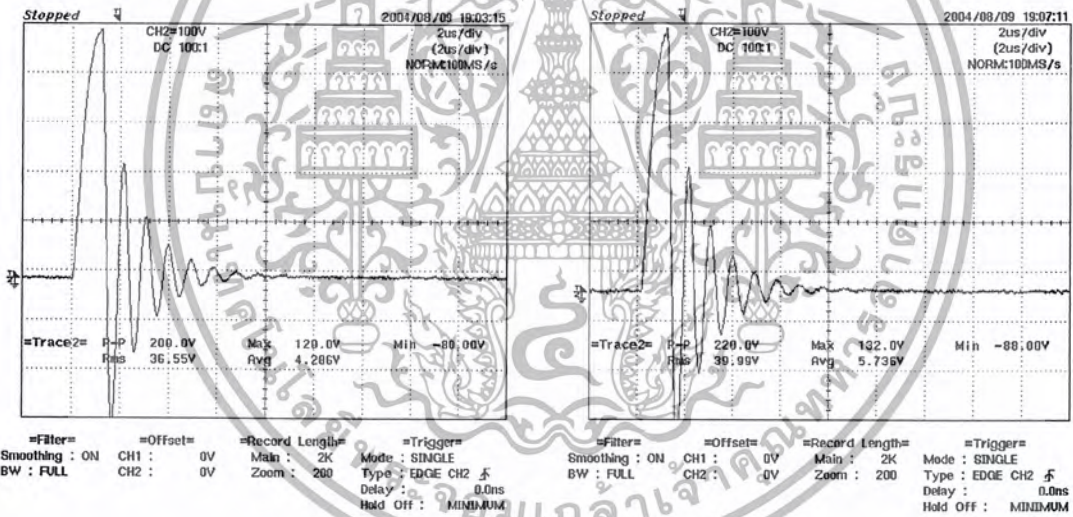
ก) เวลาหน้าคลื่น T_1 = 1.183 μ s

ข) เวลาหางคลื่น T_2 = 57.995 μ s

2) รูปคลื่นตัด



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= =Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
 Smoothing : ON CH1 : 0V Main : 2K Mode : SINGLE Smoothing : ON CH1 : 0V Main : 2K Mode : SINGLE
 BW : FULL CH2 : 0V Zoom : 200 Type : EDGE CH2 ฝ Delay : 0.0ns BW : FULL CH2 : 0V Zoom : 200 Type : EDGE CH2 ฝ Delay : 0.0ns
 Hold Off : MINIMUM Hold Off : MINIMUM



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger= =Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
 Smoothing : ON CH1 : 0V Main : 2K Mode : SINGLE Smoothing : ON CH1 : 0V Main : 2K Mode : SINGLE
 BW : FULL CH2 : 0V Zoom : 200 Type : EDGE CH2 ฝ Delay : 0.0ns BW : FULL CH2 : 0V Zoom : 200 Type : EDGE CH2 ฝ Delay : 0.0ns
 Hold Off : MINIMUM Hold Off : MINIMUM

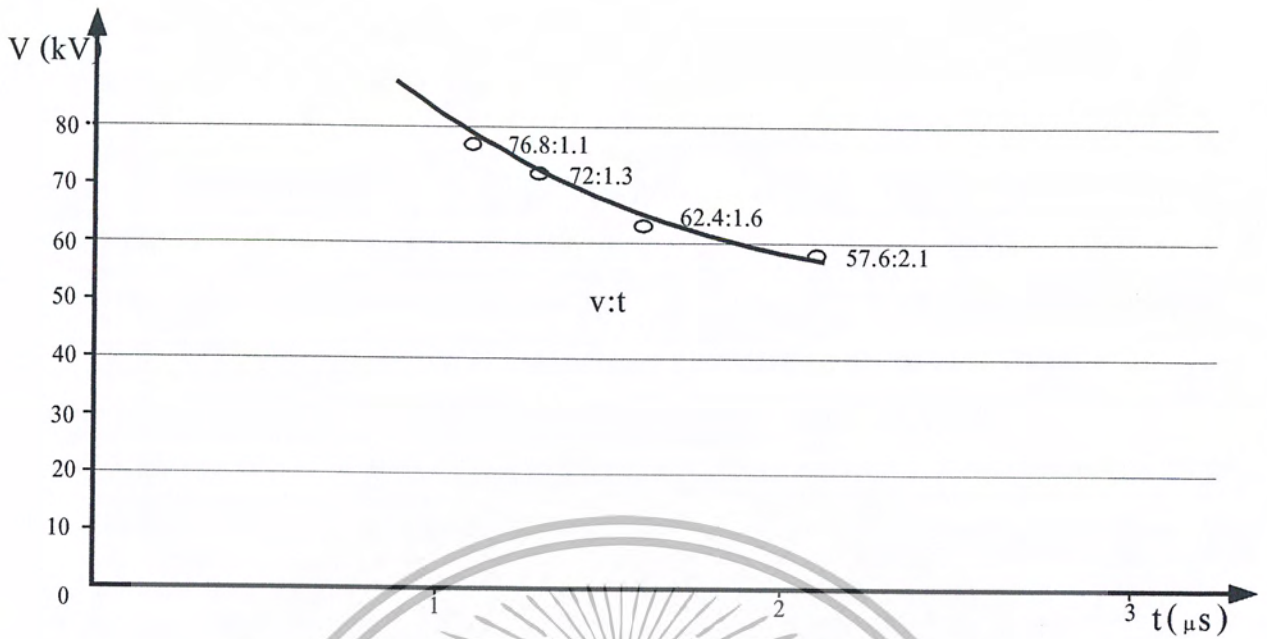
รูปที่ 3-25 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่ขนาดแรงดันต่างๆ

ก) แรงดันอัดประจุขนาด 60 kV

ข) แรงดันอัดประจุขนาด 65 kV

ค) แรงดันอัดประจุขนาด 75 kV

ง) แรงดันอัดประจุขนาด 80 kV



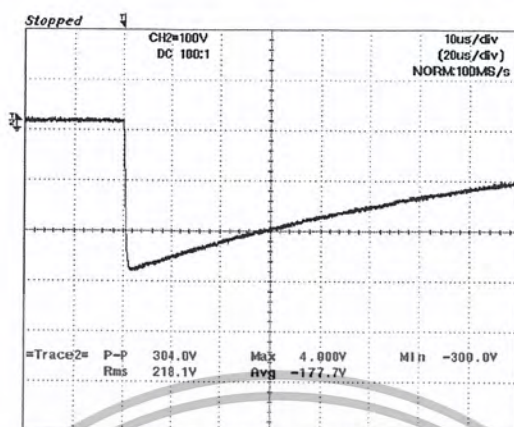
รูปที่ 3-26 v-t Curve ของรูปปลั๊กดินตัดที่ได้จากการทดสอบถูกด้วยจำนวนที่ชั่ววอก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

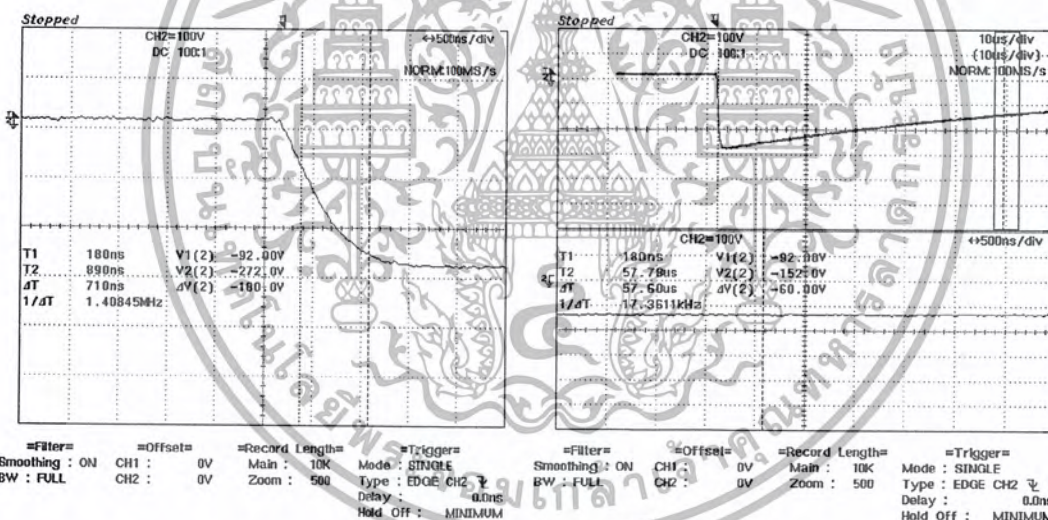
3.4.1.2 ผลการทดสอบลูกถ้วยฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (ชั่วลบ)

1) รูปคลื่นเต็ม



Filter= Smoothing : ON CH1 : 0V CH2 : 0V Record Length= Main : 10K Zoom : 500 Trigger= Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 3-27 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มที่แรงดัน 45 kV



ก)

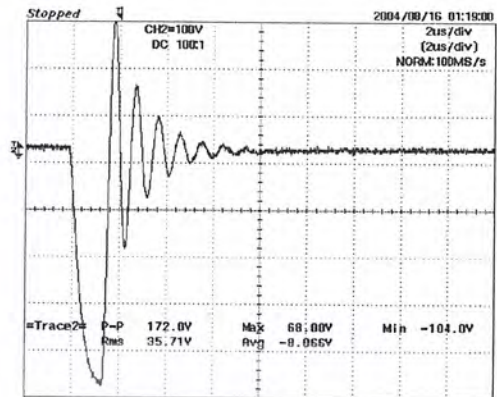
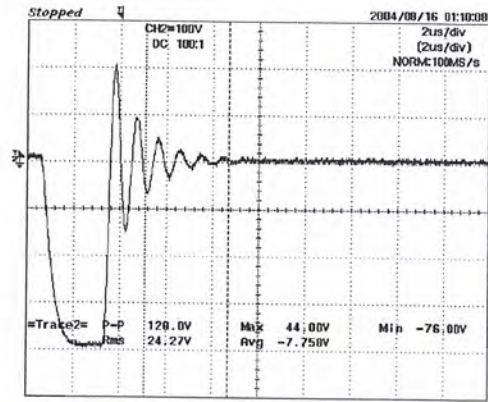
ข)

รูปที่ 3-28 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มที่แรงดัน 45 kV ในขณะขยายภาพ

ก) เวลาหน้าคลื่น $T_1 = 1.183 \mu s$

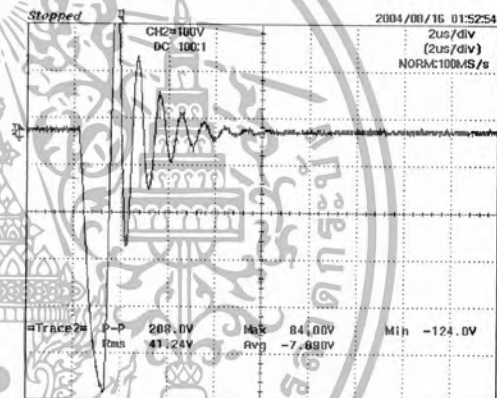
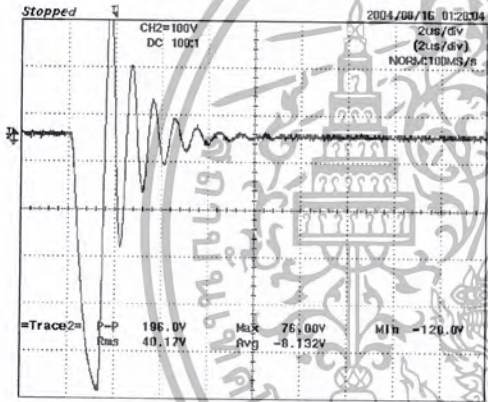
ข) เวลาหางคลื่น $T_2 = 57.995 \mu s$

2) รูปคลื่นตัด



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : 0V Main : 2K Mode : SINGLE
BW : FULL CH2 : 0V Zoom : 200 Type : EDGE CH2
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM

=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : 0V Main : 2K Mode : SINGLE
BW : FULL CH2 : 0V Zoom : 200 Type : EDGE CH2
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : 0V Main : 2K Mode : SINGLE
BW : FULL CH2 : 0V Zoom : 200 Type : EDGE CH2
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM

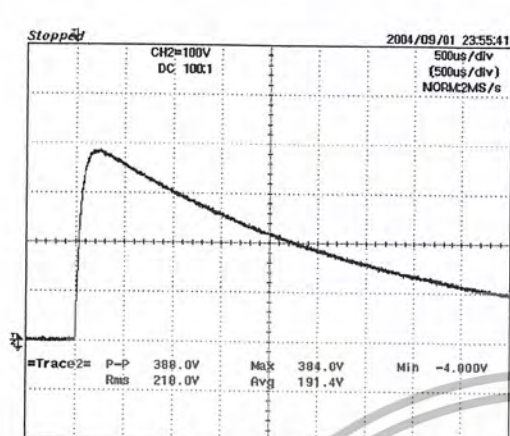
=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : 0V Main : 2K Mode : SINGLE
BW : FULL CH2 : 0V Zoom : 200 Type : EDGE CH2
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 3-29 คลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่ขนาดแรงดันต่างๆ

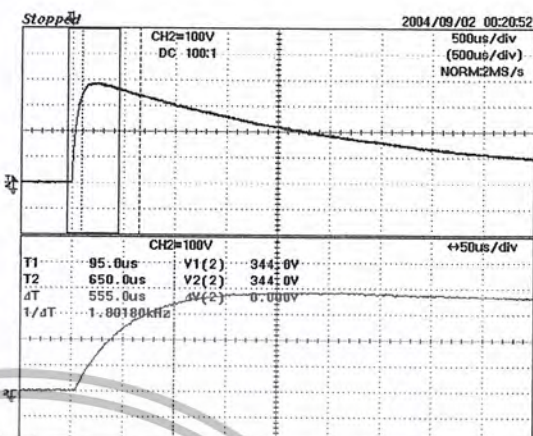
- ก) แรงดันอัดประจุขนาด 65 kV
- ข) แรงดันอัดประจุขนาด 75 kV
- ค) แรงดันอัดประจุขนาด 80 kV
- ง) แรงดันอัดประจุขนาด 85 kV

3.4.1.3 ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิง

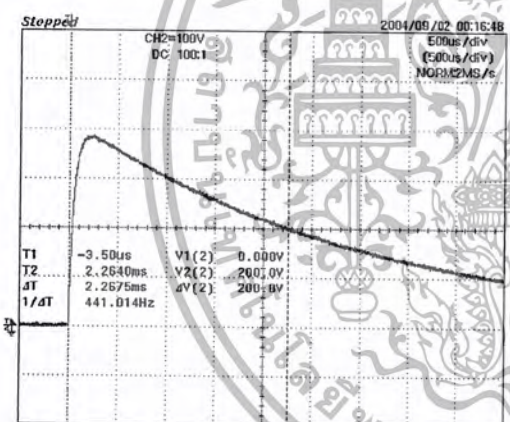
1) ทำการทดสอบที่ขั้วบวกที่แรงดันอัดประจุ ขนาด 60 kV



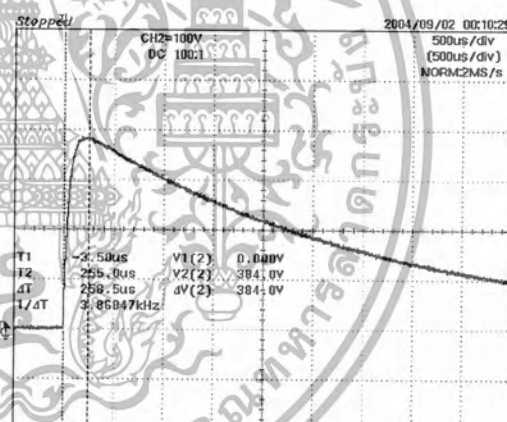
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
=Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0V
=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
=Trigger= Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
=Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0V
=Record Length= Main : 10K Zoom : 1K
=Trigger= Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
=Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0V
=Record Length= Main : 10K Zoom : 1K
=Trigger= Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
=Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0V
=Record Length= Main : 10K Zoom : 1K
=Trigger= Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 3-30 คลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง แรงดันอัดประจุ 60 kV

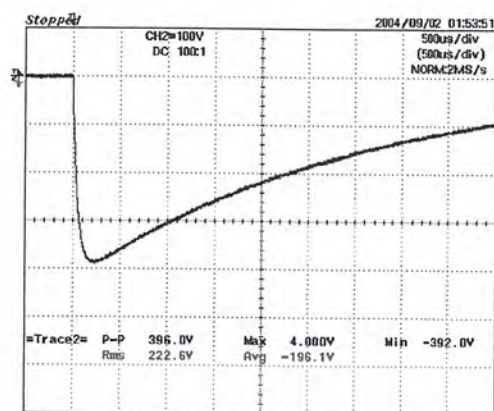
ก) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

ข) เวลาช่วงยอดคลื่น T_1 มีค่าเท่ากับ 555 μ s

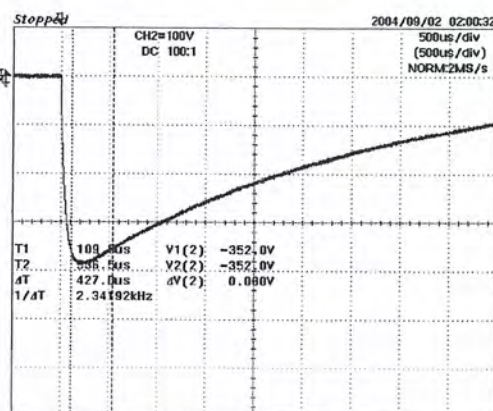
ค) เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 มีค่าเท่ากับ 2267 μ s

ง) เวลาช่วงหน้าคลื่น T_p มีค่าเท่ากับ 258 μ s

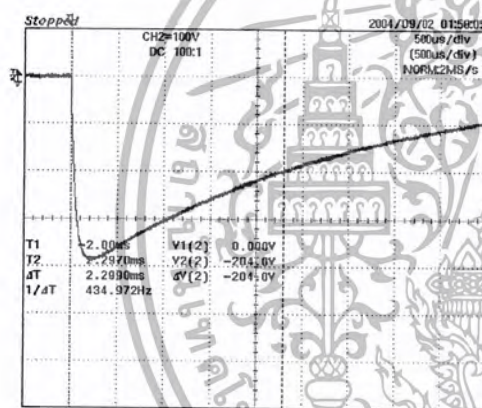
2) ทำการทดสอบที่ขั้วลบ ที่แรงดันอัดประจุขนาด 60 kV



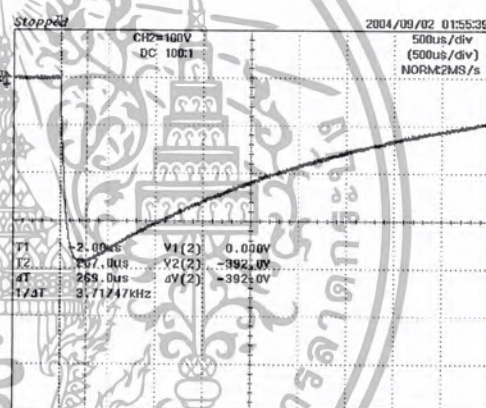
=Filter= Smoothing : ON CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ms Hold Off : MINIMUM
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0V
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
 =Trigger= Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ms Hold Off : MINIMUM



=Filter= Smoothing : ON CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ms Hold Off : MINIMUM
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0V
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
 =Trigger= Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ms Hold Off : MINIMUM



=Filter= Smoothing : ON CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ms Hold Off : MINIMUM
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0V
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
 =Trigger= Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ms Hold Off : MINIMUM



=Filter= Smoothing : ON CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ms Hold Off : MINIMUM
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0V
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
 =Trigger= Mode : SINGLE Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ms Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 3-31 คลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง แรงดันอัดประจุ 60 kV

ก) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

ข) เวลาช่วงยอดคลื่น T_1 มีค่าเท่ากับ 427 μs

ค) เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 มีค่าเท่ากับ 2300 μs

ง) เวลาช่วงหน้าคลื่น T_p มีค่าเท่ากับ 270 μs

3.4.2 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และที่แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงเวลาหลังคลื่นและหลังคลื่นก็อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เพราะฉะนั้น เครื่อง

เอกสารนี้เป็นการดำเนินงานที่ได้โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ใดๆ ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ไซซันด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

4.1 บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นและสำคัญในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง โดยทำหน้าที่เพิ่มหรือลดระดับแรงดันในระดับที่แตกต่างกัน โดยในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นด้วยอัตราสูงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นั้นหมายถึงความต้องการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายมีจำนวนมากขึ้น ฉะนั้นเพื่อให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่มีความเชื่อถือได้และมีประสิทธิภาพสูง หม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาใช้ในระบบจึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงที่มีคุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนด

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อนำไปใช้ติดตั้งในระบบส่งจ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบส่งจ่ายกำลังแรงดันสูงแบบสายชิงในอากาศกลางแจ้ง จึงมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกิน จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า เฮอร์จี้ฟ้าผ่า (Lightning surge) ซึ่งอาจจะเป็นการผ่าโดยตรงบนสายส่ง หรือในบริเวณใกล้เคียงแล้วเกิดแรงดันเหนี่ยวนำทำให้เกิดคลื่นจรของแรงดันเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และแรงดันเกินที่เกิดจากการทำงานของสวิตต์ตัดคอนแอคโทรมัดหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เรียกว่า (Switching surge) ดังนั้นในมาตรฐานต่างๆ เช่น IEC, IEEE รวมทั้งมาตรฐานไทย (TIS) จึงได้กำหนดให้มีการทดสอบผลิตภัณฑ์หม้อแปลงไฟฟ้าก่อนนำไปติดตั้งใช้งาน ในระบบที่มีแรงดันต่ำกว่า 300 kV ด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (BIL) ที่จำลองรูปคลื่นแรงดันเกินฟ้าผ่า ที่เกิดขึ้นในระบบ และในระบบที่มีแรงดันสูงกว่า 300 kV ด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิง (SIL) เพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่าการฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) ที่เกิดจากแรงดันเกินเหล่านี้ โคนไม่ทำให้เกิดความเสียหายหรือมีอายุการใช้งานสั้นลง

4.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบแบบทำลาย และการทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งการทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถแบ่งออกได้อีก 3 กรณี

1) การทดสอบความทนทาน (Endurance test) การทดสอบแบบนี้จะเป็นการทดสอบอายุการใช้งานของการฉนวน โดยจะทำการทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ

2) การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเกิน (Withstand voltage test) เป็นการทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์เมื่อได้รับแรงดันเกิน ซึ่งแยกออกได้เป็น 2 ชนิด คือ การทดสอบความคงทนระยะสั้นความถี่ต่ำ โดยเป็นการเลียนแบบแรงดันเกินอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันในระบบ และอีกชนิดหนึ่งคือการทดสอบความคงทนด้วยแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในการทดสอบในปริณญาณพนธ์นี้

3) การทดสอบแตกสลาย (Disruptive test) การทดสอบแบบนี้ เป็นการทดสอบการเสียหายของการฉนวนเนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้า รวมทั้งลักษณะการวาบไฟตามผิว ซึ่งจะทำให้ทราบว่าอุปกรณ์สามารถทนแรงดันสูงสุดได้เท่าใด

การทดสอบ BIL (Basic Impulse Insulation Level) หรือการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ จัดอยู่ในการทดสอบแบบไม่ทำลาย ชนิดการทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันเกิน

4.2.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงส่วนใหญ่เป็นหม้อแปลง 3 เฟส ซึ่งเป็นการนำหลักการของหม้อแปลงเฟสเดียว จำนวน 3 ตัวมาต่อรวมแกนเดียวกัน ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังปกติแกนเหล็กจะต่อลงดิน โดยที่ขดลวดแรงดันต่ำจะพันติดอยู่กับแกนเหล็ก ส่วนขดลวดแรงสูงจะพันอยู่รอบนอกคือจะอยู่ห่างจากแกนเหล็กมากกว่าขดลวดแรงต่ำ ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์ในการฉนวน ซึ่งหลักการทำงานโดยละเอียดสามารถศึกษาได้จากหนังสือที่เกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป

4.2.2 การฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า

ขดลวดภายในของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละรอบของขดลวดจะคั่นด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการเกิดเบรคดาวน์ โดยใช้ผ้าฝ้ายหรือแผ่นไมก้า (Mica) หุ้มเป็นฉนวน โดยเฉพาะขดลวดรอบคั่นๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าต้องทำการฉนวนอย่างดีเป็นพิเศษ เนื่องจากจะได้รับความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงซึ่งเกิดจากแรงดันเสิร์จ จึงจำเป็นต้องมีการฉนวนภายในระหว่างขดลวดแรงสูง ขดลวดแรงต่ำ และแกนเหล็กเป็นอย่างดี

การฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ส่วนใหญ่ในปัจจุบันมักเป็นการผสมกันระหว่างน้ำมันหม้อแปลงกับกระดาษอัดซึ่งมีวัตถุประสงค์หลัก คือ

- เพื่อเป็นฉนวนทางไฟฟ้าระหว่างรอบขดลวดและระหว่างชั้นขดลวด
- เพื่อรองรับน้ำหนักของโครงสร้างและแรงกล ไดนามิกส์ที่เกิดจากการลัดวงจร
- เพื่อระบายความร้อน

4.2.3 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC หรือ ANSI จะแบ่งการทดสอบได้ออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ

- 1) การทดสอบแบบเฉพาะ (Routine test)
- 2) การทดสอบแบบเฉพาะ (Type test)
- 3) การทดสอบพิเศษ (Special test)

การทดสอบจะแบ่งการทดสอบออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ตามมาตรฐาน IEC 60-1 มีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.1 ตรวจสอบด้วยสายตา (Visual check)

การตรวจสอบด้วยวิธีนี้เป็นการตรวจสอบทางกายภาพ โดยใช้สายตาซึ่งแต่ละบุคคลอาจมองแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ประสบการณ์ของผู้ทำการทดสอบ สภาพแวดล้อม รวมถึงความละเอียดความรอบคอบของผู้ทำการทดสอบ เป็นต้น จึงจำเป็นต้องอาศัยผู้มีประสบการณ์สูงมีความละเอียดรอบคอบทางด้านนี้โดยตรง เพราะไม่เช่นนั้นอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้

4.2.3.2 การทดสอบอัตราส่วนแรงดัน (Voltage ratio test)

เป็นการตรวจสอบเพื่อวัดความถูกต้องของระดับแรงดัน อีกทั้งยังเป็นการตรวจสอบด้วยว่าขดลวดจำนวนรอบทางด้านแรงสูงและแรงต่ำมีความถูกต้องหรือไม่ โดยการวัดอัตราส่วนแรงดันสามารถทำได้ดังนี้

1) วัดด้วย Ratio meter

มิเตอร์วัดค่าอัตราส่วน ประกอบด้วยหม้อแปลงขนาดเล็กเครื่องหนึ่ง ซึ่งขดลวดปฐมภูมิจะถูกปรับให้มีค่าตายตัว ส่วนขดลวดทุติยภูมิจะมีหลายแท็บ และปรับเปลี่ยนค่าได้ การปรับเปลี่ยนแรงดันหรือค่าความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิสามารถทำได้โดยการเลื่อนที่ตัวสวิตช์

2) วัดโดยใช้หม้อแปลงแรงดัน

เป็นการทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดันจากการหาค่าแรงดันที่วัดได้จากทั้งด้านแรงดันสูงและแรงต่ำโดยวัดแรงดันผ่านหม้อแปลงแรงดัน

4.2.3.3 การทดสอบขั้วและเวกเตอร์กรุป (Polarity and Vector group test)

การทดสอบชนิดขั้วและเวกเตอร์กรุปของหม้อแปลงมีความสำคัญในกรณีที่ต้องการขนานหม้อแปลงเพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลด ซึ่งขั้วของหม้อแปลงที่นำมาขนานจะต้องเหมือนกันกับหม้อแปลงที่ใช้อยู่ก่อนแล้ว ไม่เช่นนั้นอาจทำให้แรงดันที่จ่ายโหลดไม่ถูกต้องหรืออาจลัดวงจรเสียหายได้ การทดสอบชนิดขั้วของหม้อแปลงสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

- ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง
- ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ

สำหรับการทดสอบเวกเตอร์กรุปจะทำการทดสอบเพื่อทราบผลต่างของมุมระหว่างแรงดันทางด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำ รวมทั้งการเรียงลำดับเฟสของหม้อแปลงซึ่งในการขนานหม้อแปลงต้องคำนึงถึงสิ่งเหล่านี้มีเช่นนั้นในการต่อขนานหม้อแปลงอาจมีความเสียหายได้ การทดสอบทำได้โดยการอ่านค่าผลรวมทางเฟสเซอร์ของแต่ละเฟสจาก โวลท์มิเตอร์แล้วนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันที่ป้อนให้กับหม้อแปลง

4.2.3.4 การทดสอบค่าความสูญเสียของขดลวด (Resistance of winding test)

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียของขดลวดในหม้อแปลงซึ่งจะทำการพิจารณาค่าความต้านทานของขดลวดเพื่อหาอุณหภูมิเพิ่มโดยวิธี Kelvin double bridge เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบ

ไปคำนวณเปรียบเทียบกับอุณหภูมิมาตรฐาน 75 องศาเซลเซียส จากมาตรฐาน IEC 76-1980 แต่เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบในสภาพจริงไม่ได้ จึงจำเป็นต้องทดสอบในห้องทดสอบ การทดสอบในหัวข้อนี้ ไม่ใช่ตัวตัดสินว่าหม้อแปลงที่นำมาทดสอบผ่านเกณฑ์หรือไม่ แต่จะนำผล ไปประกอบการหาประสิทธิภาพดังนั้นผลการทดสอบจะต้องมีความถูกต้อง โดยการต่อวงจรจะต้องตรวจสอบให้ถูกต้องและอุปกรณ์ที่ใช้จะต้องเหมาะสมกับขนาดหม้อแปลงที่นำมาทดสอบ

4.2.3.5 การทดสอบวัดค่าความต้านทานของฉนวน (Insulation resistance test)

เป็นการทดสอบหาค่าความต้านทานของฉนวนเป็นการทดสอบนำค่าที่ได้จากการวัดของเมกกะโอห์ม โดยวัดขดลวดเทียบกับกราวด์ แล้วนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ตรวจสอบ ว่าสภาพความเป็นฉนวนของหม้อแปลงมีความเป็นฉนวน ได้ตามมาตรฐานหรือไม่ ซึ่งเราสามารถตรวจสอบจากตารางมาตรฐาน ซึ่งค่าความต้านทานของฉนวนต้องมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่กำหนดในมาตรฐาน

4.2.3.6 การทดสอบค่าสูญเสียในขณะไร้โหลด (No-load loss test)

การสูญเสียส่วนใหญ่ของหม้อแปลงขณะ ไร้โหลดจะอยู่ในรูปของการสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงและขดลวด ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss) การทดสอบนี้จะป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับให้เท่ากับแรงดันที่กักทางด้านแรงดัน และใช้ความถี่ที่กำหนดป้อนให้กับขดลวดแรงดันแล้วบันทึกค่ากำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสเพื่อนำมาตรวจสอบตามมาตรฐาน

4.2.3.7 การทดสอบความคงทนของฉนวน (Dielectric insulation test)

เป็นการทดสอบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อทดสอบว่ามีความคงทนของฉนวนที่เพียงพอหรือไม่ เช่น ฉนวนระหว่างเฟสของขดลวด, ระหว่างรอบ, ระหว่างขด, จุดต่อแยกและขั้วต่อจุดแยก ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง ซึ่งการทดสอบนี้จะแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) การทดสอบจากแหล่งจ่ายไฟภายนอก (Separate source test)

การทดสอบวิธีนี้เป็นการป้อนแรงดันเข้าที่ขดลวดทางค้ว้นแรงดันสูงและวัดค่าต่างๆที่ขดลวดด้านแรงดันต่ำ และกราวด์ โดยปกติการทดสอบวิธีนี้จะป้อนแรงดันอย่างน้อย 2 เท่า ของแรงดันพิกัดของขดลวด โดยขนาดของแรงดันขึ้นอยู่กับ

- ชนิดของฉนวนหม้อแปลง
- คุณภาพของฉนวน
- วัตถุประสงค์ของการใช้งาน (ภายในหรือภายนอกอาคาร)

ในกรณีที่หม้อแปลงถูกใช้ภายนอกอาคาร ต้องมีการป้องกันแรงดันที่เกิดจากฟ้าผ่าด้วย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป สำหรับมาตรฐานที่ใช้ทดสอบจะตามตารางที่ 4-1 ซึ่งจะใช้สำหรับหม้อแปลงที่ติดตั้งสูงไม่เกิน 1000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล

แรงดันระบบสูงสุด $kV_{r.m.s.}$	แรงดันทดสอบที่ความถี่พิกัด $kV_{r.m.s.}$
น้อยกว่า 1.1	2.5
1.1	3
3.6	8
7.2	15
12	25
17.5	30

ตารางที่ 4-1 ค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันแบบติดตั้งภายนอก

2) การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำ (Induced Over voltage test)

ในการทดสอบจะป้อนแรงดัน 2 เท่าของพิกัดเข้าทางด้านแรงดันต่ำ โดยจะเริ่มการทดสอบจ่ายแรงดันเริ่มต้นไม่เกิน 1 ใน 3 เท่าของแรงดันทดสอบ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าแรงดันที่กำหนด สำหรับความถี่ที่ใช้ในการทดสอบคือ 2 เท่าของความถี่พิกัด และเวลาที่ใช้ในการทดสอบจะต้องไม่น้อยกว่า 15 วินาที การทดสอบนี้จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟแรงสูงที่มีความถี่สูง

4.2.3.8 การทดสอบน้ำมัน (Oil test)

เนื่องจากกรใช้น้ำมันหม้อแปลงในการระบายความร้อนและเป็นฉนวนภายในหม้อแปลง จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องมีมาตรฐานในการผลิตน้ำมันหม้อแปลงให้มีคุณสมบัติที่ดี เพื่อใช้เป็นฉนวนและระบายความร้อนให้กับหม้อแปลงอย่างดีที่สุด

การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงจะทำการทดสอบโดยการนำน้ำมันหม้อแปลงไปทำการทดสอบจนเบรคความแล้วเปลี่ยนน้ำมันใหม่ทั้งหมด 5 ครั้ง แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย ซึ่งถ้าผลเฉลี่ยที่ได้มีค่าไม่ต่ำกว่า 30 kV ให้ถือว่าน้ำมันหม้อแปลงผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156 ซึ่งการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงจะกล่าวโดยละเอียดอีกครั้งในหัวข้อการเบรคความในน้ำมัน

4.2.3.9 การทดสอบแรงดันอิมพัลส์ (Impulse voltage test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของหม้อแปลงดังที่กล่าวไว้ในบทนำ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ามีโอกาสได้รับแรงดันเกินหรือฟ้าผ่า ซึ่งถ้าหม้อแปลงไฟฟ้ามีการฉนวนไม่ดีพอจะทำให้เกิดความเสียหายแก่หม้อแปลงรวมถึงระบบจำหน่าย จึงจำเป็นมากในการทดสอบ BIL ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้จะทำการทดสอบ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะเน้นศึกษาและวิเคราะห์เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบ BIL มาวิเคราะห์ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันฟ้าผ่า โดยเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งได้อ้างอิงถึงมาตรฐาน IEC 722 (1980)

เนื่องจากการทดสอบแรงดันฟ้าผ่าจำเป็นต้องสร้างลูกคลื่นในการทดสอบให้ได้ตามมาตรฐานนั้นๆ ซึ่งการสร้างขั้นตอนและการทดสอบอย่างละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

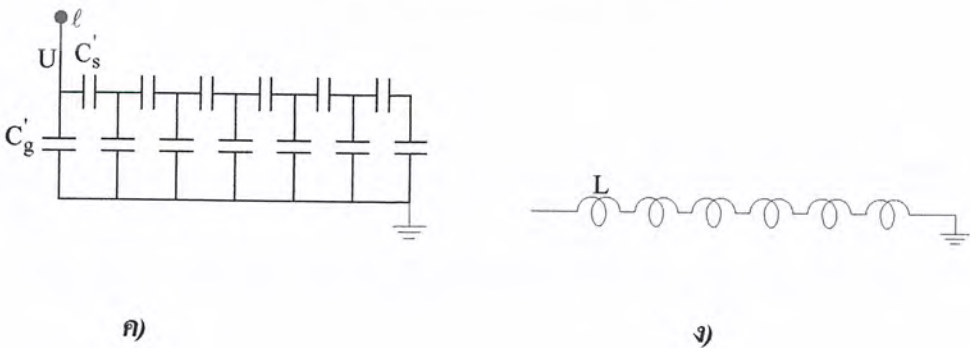
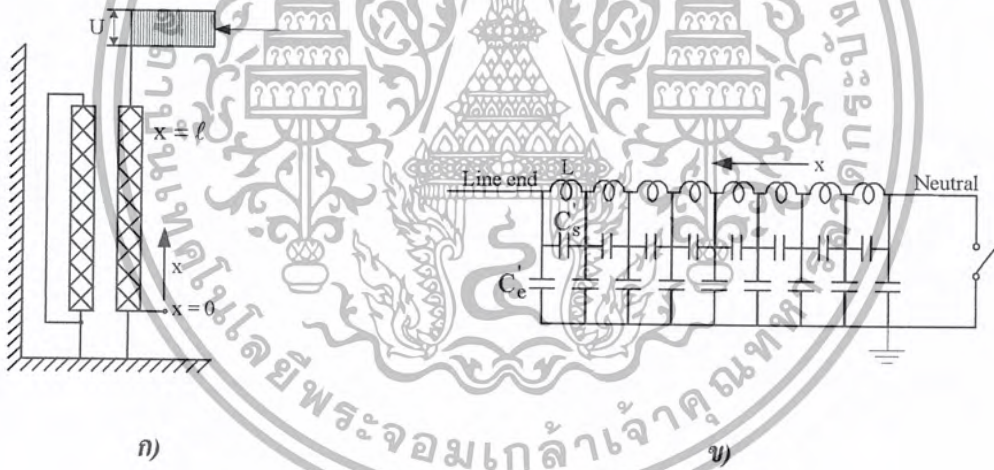
4.2.4 พฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงต่อแรงดันเสิร์จ

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในแรงดันสูงนั้น โดยส่วนใหญ่เป็นแบบตัวเก็บประจุ ดังนั้นเมื่อมีแรงดันเสิร์จเกิดขึ้น จะทำให้เกิดเกรเดียนต์ความแตกต่างของแรงดันตามความยาวของตัวเก็บประจุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตอนต้นของการฉนวนจะได้รับแรงดันมากที่สุด ซึ่งถ้าการฉนวนในบริเวณดังกล่าวไม่ดีพอก็จะทำให้เกิดความเสียหายในการฉนวนและนำไปสู่การเกิดความผิดปกติได้ในที่สุด

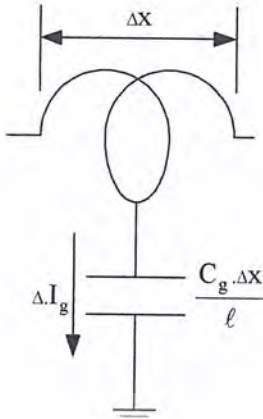
ดังนั้น การฉนวนของขดลวดในรอบต้นๆ จึงจำเป็นต้องมีมากพอเพื่อให้สามารถทนต่อเกรเดียนต์ของแรงดันเกินได้ ค่าแรงดันเกรเดียนต์จะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับการจัดวางของขดลวด และการพิจารณาว่าฉนวนของหม้อแปลงจะมีคุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนดไว้นั้น ต้องทำการพิจารณาจากผลการทดสอบ BIL โดยดูรูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสที่ได้จากผลการทดสอบ

4.2.4.1 แรงดันกระจายเริ่มต้นเมื่อมีเสิร์จแรงดันรูปขั้นกระทบต่อขดลวดหม้อแปลง

ในเวลาที่หม้อแปลงทำงานเป็นปกติ ขดลวดของหม้อแปลงที่มีการกระจายขดลวดแบบสม่ำเสมออาจเขียนแทนด้วยวงจรตาข่ายที่ประกอบด้วยความเหนี่ยวนำ L และความจุไฟฟ้า C_s' และ C_g' ดังแสดงในรูปที่ 4-1 ข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$C_g / l = C'_g$ คือ ค่าเก็บประจุต่อหน่วยความยาว

$C_s l = C'_s$ คือ ค่าเก็บประจุอนุกรมต่อหน่วยความยาว

l คือ ความยาวของขดลวด

I_g คือ กระแสไหลผ่าน C'_g ทั้งหมด

I_s คือ กระแสไหลผ่าน C'_s ทั้งหมด

จ)

รูปที่ 4-1 ขดลวดหม้อแปลงและวงจรสมมูลย์ตาข่ายที่มีการกระจายขดลวดอย่างสม่ำเสมอเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์

ในขณะที่แรงดันอิมพัลส์เข้าสู่หม้อแปลง ขดลวดที่พันแบบสม่ำเสมอในช่วงเวลาเริ่มต้นที่ได้รับแรงดันเล็กรัง วงจรของขดลวดหม้อแปลงจะเหลือเพียงตาข่ายค่าเก็บประจุของค่า C'_s และ C'_g ซึ่งทำให้แรงดันกระจายบนขดลวดไม่สม่ำเสมอ ส่วนความเหนี่ยวนำ L มีลักษณะเสมือนเป็นอิมพีแดนซ์ค่าสูงมากต่อแรงดันอิมพัลส์ วงจรสมมูลย์จึงเป็นดังรูปที่ 4-1 ค) ในช่วงทางคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ ค่า C มีลักษณะเสมือนเปิดวงจรจึงเป็นดังรูปที่ 4-1 ง)

จากรูปที่ 4-1 ข) แสดงให้เห็นว่าในขดลวดจะมีค่าความจุไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอ ตามความยาวของขดลวด และในแต่ละช่วงสั้นๆ ของขดลวดจะมีค่าความจุเทียบกับดิน และเทียบกับขดลวดที่อยู่ใกล้กัน (อนุกรม) ขั้วนิวเคลอรอนของขดลวดจะต่อหรือไม่ต่อสามารถเขียนแทนได้ด้วยสวิตช์

การศึกษาผลกระทบของแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อขดลวดของหม้อแปลง สามารถศึกษาได้จากผลตอบสนองที่มีต่อแรงดันรูปขึ้นของหม้อแปลงที่มีขดลวดเพียงขดเดียว และมีการกระจายของขดลวดอย่างสม่ำเสมอซึ่งเป็นกรณีศึกษาอย่างง่าย การวิเคราะห์ผลกระทบหลังจากที่เสร็จกระทบต่อขดลวดออกเป็นสามช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาแรกเป็นช่วงเวลาที่น้อยที่สุด (ประมาณน้อยกว่า 1 ไมโครวินาที) ในช่วงเวลานี้ปริมาณกระแสเนื่องจากเล็กรังของแรงดัน ยังไม่สามารถสังเกตได้เนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำของขดลวดในตัวถึงหม้อแปลง กระแสที่ไหลผ่านจะเป็นกระแสกระจัด (Displacement current) ที่ไหลผ่านทางความจุที่เทียบกับดินและความจุที่เกิดจากขดลวดที่อยู่ติดกัน (อนุกรม) ของขดลวด ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้เกิดแรงดันกระจายเริ่มต้น (Initial distribution voltage) ขึ้น สำหรับในช่วงเวลาที่สอง ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงจากสภาพเริ่มต้น ไปสู่สภาพอยู่ตัว

ในการวิเคราะห์หาค่าแรงดันกระจายเริ่มต้น ตามที่ Allan Greenwood ได้แสดงการวิเคราะห์ไว้ดังต่อไปนี้ ในช่วงแรกจะไม่มีกระแสไหลผ่านขดลวดเนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำในขดลวด ดังนั้นในช่วงระยะเวลาดังกล่าวจะทำให้วงจรสมมูลย์ในรูปที่ 4-1 ข) ลดรูปลงเหลือเพียงแค่วงจรตาข่ายของค่า

ความจุเท่านั้น ถ้าให้ค่าความจุที่เทียบกับดินของขดลวดเป็น C'_g และให้ค่าความจุอนุกรมเป็น C'_s ดังในรูปที่ 4-1 ค)

แรงดันกระจายบนขดลวด เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงดันเสิร์จอาจวิเคราะห์ได้จากวงจรรูปที่ 4-1 ค) ความไม่สม่ำเสมอของแรงดันกระจายบนขดลวดนอกจากจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ค่าเก็บประจุ C'_g และ C'_s แล้วยังขึ้นอยู่กับความชันของรูปคลื่นแรงดันเสิร์จ กรณีที่เลวที่สุดก็คือแรงดันเสิร์จรูปคลื่นรูปซันพิจารณาในช่วงระยะ Δx ดังรูปที่ 4-1 จ) กระแสไหลลงสู่กราวด์ คือ

$$\Delta I_g = \frac{C_e \Delta x \omega U}{l} \quad (4-1)$$

แต่

$$\Delta I_g = \frac{dI_s}{dx} \Delta x \quad (4-2)$$

$$\frac{dI_s}{dx} = \frac{\omega C_e U}{l} \quad (4-3)$$

ในช่วงระยะ Δx ความจุไฟฟ้าอนุกรม $= \frac{C_s l}{\Delta x}$ (4-4)

และแรงดันตกคร่อมช่วง Δx $= \frac{du}{dx} \Delta x$ (4-5)

ปกติกระแสอัดประจุจะได้จาก $\omega C U$

ฉะนั้นกระแสประจุอนุกรมในที่นี้คือ $I_s = \omega C_s l \frac{du}{dx}$ (4-6)

เมื่อดิฟเฟอเรนเชียล $\frac{dI_s}{dx} = \omega C_s l \frac{d^2 u}{dx^2}$ (4-7)

จากสมการ (4-3) และ (4-7) จะได้ $\frac{\omega C_e U}{l} = \omega C_s l \frac{d^2 u}{dx^2}$ (4-8)

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{1}{l} \frac{C_e U}{C_s} = 0$$

ผลลัพธ์อาจเขียนได้เป็น $U = A_1 e^{px} + A_2 e^{-px}$ (4-9)

โดยที่

$$p = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{C_e}{C_s}}$$

A_1 และ A_2 เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงที่ต่อนิวตรอนลงกราว์ และที่ไม่ต่อนิวตรอนลงกราว์ จะมีแรงดันกระจายต่างกัน ในกรณี α มีค่าไม่สูง ($\alpha < 5$) โดยเฉพาะแรงดันที่จุดนิวตรอน การวิเคราะห์จึงแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

1) ในกรณีที่ขั้วนิวตรอนต่อลงกราว์

$$\begin{array}{l} \text{ที่ } x = 0 \quad U = 0 \\ \text{ที่ } x = \ell \quad U = V \end{array}$$

เมื่อ V คือขนาดแรงดันเต็ม

จาก (4-9) จะได้ $A_1 + A_2 = 0$

$$\begin{aligned} A_1 e^{p\ell} + A_2 e^{-p\ell} &= V \\ A_1 &= -A_2 = \frac{V}{e^{p\ell} - e^{-p\ell}} \end{aligned} \quad (4-10)$$

ให้

$$\begin{aligned} p\ell &= \alpha \\ A_1 &= -A_2 = \frac{V}{2 \sinh \alpha} \end{aligned} \quad (4-11)$$

แทนขอบเขตเงื่อนไขเหล่านี้ ทำให้ได้แรงดันกระจายตามแนวความยาวของขดลวดเป็น

$$U = \frac{V}{2 \sinh \alpha} [e^{\alpha x / \ell} - e^{-\alpha x / \ell}] \quad (4-12)$$

จากสมการที่ (4-1) จะได้

$$U = V \frac{\sinh(\alpha x / \ell)}{\sinh \alpha} \quad (4-13)$$

2) กรณีนิวตรอนไม่ต่อลงกราว์

$$\begin{array}{l} \text{ที่ } x = \ell \quad U = V \\ \text{ที่ } x = 0 \quad I_s = 0 \quad \text{หรือ } \frac{du}{dx} = 0 \end{array}$$

$$P(A_1 - A_2) = 0$$

$$A_1 e^{p\ell} + A_2 e^{-p\ell} = V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

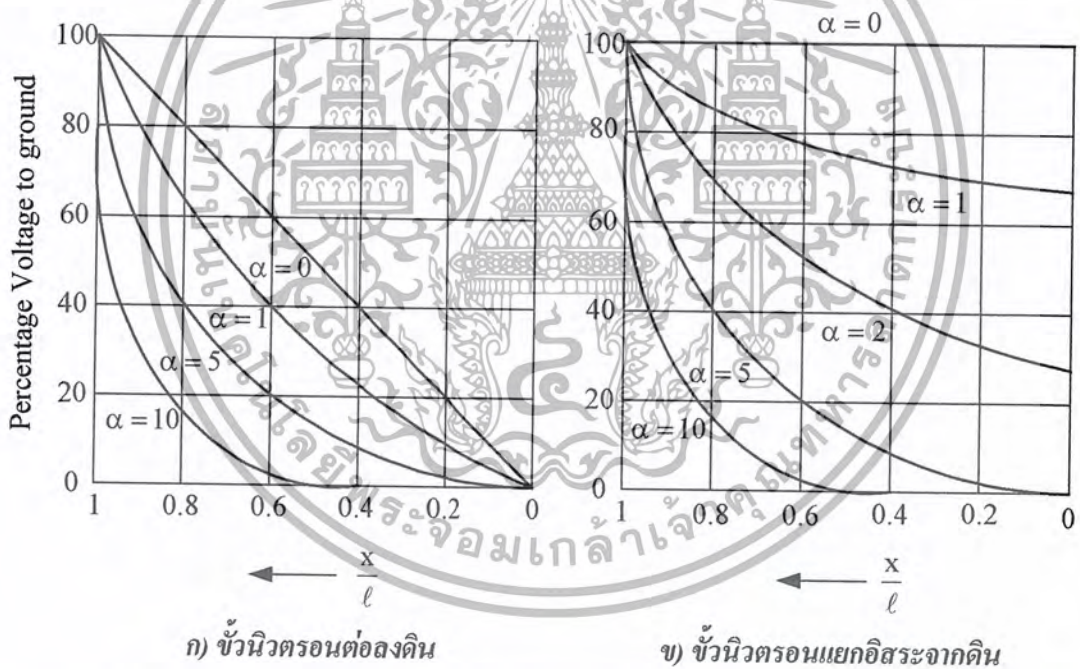
แทนขอบเขตเงื่อนไขเหล่านี้ ทำให้ได้แรงดันกระจายตามแนวความยาวของขดลวดเป็น

$$U = \frac{V}{2 \cosh \alpha} \left[e^{\alpha x / \ell} + e^{-\alpha x / \ell} \right] \quad (4-15)$$

จากสมการที่ (4-2) จะได้

$$U = V \frac{\cosh(\alpha x / \ell)}{\cosh \alpha} \quad (4-16)$$

จากสมการที่ (4-1) และสมการที่ (4-2) สามารถอธิบายค่าแรงดันกระจายเริ่มต้นในขดลวดหม้อแปลง คือ ทันทันที่แรงดันหน้าคลื่นชั้น เช่น แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าวิ่งมากระทบขดลวด กระแสส่วนใหญ่จะไหลผ่าน C'_g และ C'_s ทำให้แรงดันกระจายเริ่มต้นตลอดแนว L ไม่เป็นเชิงเส้นหรือแรงดันกระจายที่ขดลวดไม่สม่ำเสมอ นั่นเอง ความไม่เป็นเชิงเส้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ $\alpha = \sqrt{C'_g / C'_s}$ ถ้า α ยังมีค่ามากขึ้นจะทำให้แรงดันกระจายไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นตาม ดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 แรงดันกระจายในช่วงเวลาเริ่มต้นบนขดลวดหม้อแปลงที่พันแบบสม่ำเสมอ เมื่อได้รับแรงดันเลี้ยว

จากเส้นโค้งแรงดันกระจายอิมพัลส์เริ่มต้น สมมุติที่ $\alpha = 10$ ในรูปที่ 4-2 แสดงให้เห็นว่า ทันทันที่แรงดันอิมพัลส์ช่วงหน้าคลื่นชั้นวิ่งมาถึงขดลวด แรงดันส่วนใหญ่จะตกคร่อมขดลวดรอบต้นๆ ซึ่งหมายถึงว่าจำนวนของขดลวดส่วนต้นๆ ใกล้กับขั้วต่อ (terminal) จะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมาก การออกแบบที่ดีจะต้องหลีกเลี่ยงโดยการเพิ่มการฉนวนของขดลวดรอบต้นๆ ให้มากเป็นพิเศษ หรือแก้ไขโดยการใส่ฉนวนไว้ที่ขั้วแรงสูงบนสุดของขดลวด เพื่อให้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากขึ้น ถ้าหากการฉนวน

ไม่เท่ากันทุกขดลวด หรือถ้าขดลวดรอบต้นๆ มีจำนวนน้อยกว่าขดลวดรอบอื่นๆ ก็จะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ถ้าหากการฉนวนไม่เท่ากันทุกขดลวด หรือถ้าขดลวดรอบต้นๆ มีจำนวนน้อยกว่าขดลวดรอบอื่นๆ ก็จะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ถ้าหากการฉนวนไม่เท่ากันทุกขดลวด หรือถ้าขดลวดรอบต้นๆ มีจำนวนน้อยกว่าขดลวดรอบอื่นๆ ก็จะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากขึ้น

ขดลวดไม่ดีพอ ก็จะเป็นเหตุนำไปสู่ความผิดพลาดและเสียหายแก่หม้อแปลง เราสามารถสังเกตได้ทันทีว่า ค่าแรงดันกระจายมีความไม่สม่ำเสมอสูงมากขึ้น เมื่อค่า α มีค่ามากขึ้นเช่นที่ $\alpha = 10$ ค่าแรงดันประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ตกคร่อมอยู่กับขดลวดประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ตอนต้น ค่าความชันที่ถูกต้อง ณ จุดขั้วต่อไฟ สามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (4-13) และ (4-16) จะได้ดังสมการที่ (4-17) และ (4-18) ตามลำดับ ดังนั้นการออกแบบโครงสร้าง การวางขดลวด การฉนวนของขดลวด จึงต้องคำนึงถึงแรงดันกระจายอิมพัลส์เริ่มต้นเป็นเรื่องสำคัญยิ่งประการหนึ่ง และเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าว่ามีคุณสมบัติทนต่อแรงดันเกินหน้าคลื่นชั้นได้ จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบความคงทนด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนด เรียกว่าการทดสอบ BIL จัดเป็นการทดสอบเฉพาะแบบชนิดไม่ทำลาย ซึ่งจะต้องทำการทดสอบทุกระดับแรงดันสูงใช้งาน

จากสมการที่ (4-16) (กรณีขั้วนิวตรอนต่อลงกราวด์) หาอนุพันธ์ จะได้

$$\frac{du}{dx} = \frac{\alpha}{\ell} V \frac{\cosh(\alpha x / \ell)}{\sinh \alpha}$$

ถ้า $x = \ell$, $\frac{dV}{dx} = \frac{\alpha V}{1} \coth \alpha$ (4-17)

จากสมการที่ (4-17) (กรณีขั้วนิวตรอนไม่ต่อลงกราวด์) หาอนุพันธ์ จะได้

$$\frac{du}{dx} = \frac{\alpha}{\ell} V \frac{\sinh(\alpha x / \ell)}{\cosh \alpha}$$

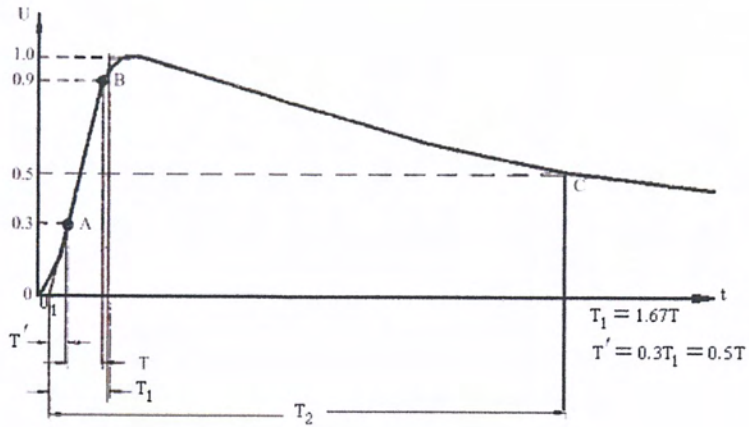
ถ้า $x = \ell$, $\frac{du}{dx} = \frac{\alpha V}{1} \tanh \alpha$ (4-18)

สำหรับค่า α ที่มีค่ามากๆ นั้น ทำให้ $\cosh \alpha \approx \sinh \alpha \approx 1$ ดังนั้นที่ต้นขดลวดจะได้รับแรงดันกระจายมีค่าเท่ากับ $du/dx = \alpha V/\ell$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ α เท่าของค่าแรงดันกระจายโดยเฉลี่ยทั้ง 2 กรณี

4.3 ข้อกำหนดการทดสอบ BIL

4.3.1 แรงดันทดสอบ

การทดสอบ BIL เป็นการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เวลาช่วงหางคลื่น T_2 ขนาดแรงดัน U_m ขั้วของแรงดันบวกหรือลบ รูปคลื่นเต็มหรือรูปคลื่นตัด ซึ่งมาตรฐานนานาชาติ เช่น มาตรฐาน IEC หรือ ANSI ได้กำหนดไว้ดังในรูปที่ 4-3 เป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μsec ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC, ANSI



ก)



ข)

รูปที่ 4-3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

ก) รูปคลื่นเต็ม

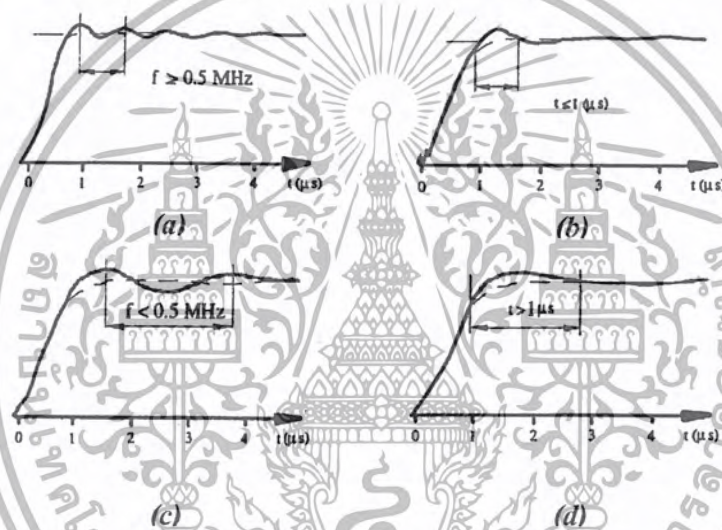
ข) รูปคลื่นตัดช่วงหางคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาค ก) รูปคลื่นตัดช่วงที่นำคลื่น นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างแรงดันอิมพัลส์ทดสอบบางกรณีก็เป็นการยากที่จะปรับให้ได้รูปคลื่นเหมือนในมาตรฐาน เพราะในวงจรการทดสอบจะมีค่าความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ที่มักจะทำให้เกิดออสซิลเลชันหรือเกิดความคลาดเคลื่อนในรูปคลื่น เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่ต้องการทดสอบ มาตรฐานจึงได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้คือ

$$\begin{aligned} \text{เวลาช่วงหน้าคลื่น } T_1 &= 1.2 \quad \mu\text{sec} \pm 30\% \\ \text{เวลาช่วงหางคลื่น } T_2 &= 50 \quad \mu\text{sec} \pm 20\% \\ \text{ค่ายอดแรงดัน } U_m &\pm 3\% \end{aligned}$$

ขนาดออสซิลเลชันในบริเวณค่ายอดยอมให้ $\pm 5\%$ ของค่ายอดขนาดออสซิลเลชันในช่วงหน้าที่ต่ำกว่า 50% ของค่ายอดยอมให้ $\pm 25\%$ ของค่ายอด รูปคลื่นแรงดันที่มีออสซิลเลชัน การหาค่ายอดแรงดันขึ้นอยู่กับความถี่หรือช่วงออสซิลเลชันดังในรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 ตัวอย่างรูปคลื่นไฟฟ้าที่มีออสซิลเลชัน

a, b ค่าแรงดันทดสอบหาจากการเฉลี่ยคลื่นระลอก (---)

c, d ค่าแรงดันทดสอบหาจากค่ายอด

ค่าแรงดันทดสอบ BIL ขึ้นอยู่กับการเลือกทดสอบตามมาตรฐานใด เช่น IEC, BS, ANSI หรือ VDL ดังแสดงในตารางที่ 3-3

เนื่องจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงมีพิกัดเพียงแค่ 200 kV ดังนั้นจากตารางที่ 3-3 สำหรับการทดสอบ BIL จะให้ทดสอบกับหม้อแปลงที่มีระบบแรงดันสูงสุดได้เพียงแค่ 33 kV ถ้าเป็นระบบ 52 kV หรือสูงกว่า ค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ จะไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ BIL สำหรับระบบนี้

ในการทดสอบ BIL นี้จะป้อนแรงดันอิมพัลส์เพื่ออ้างอิงค่าหนึ่งก่อน เรียกว่า แรงดันลดระดับ (Reduce voltage) ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 50% ถึง 75% ของแรงดันอิมพัลส์ที่พิกัด เช่น หม้อแปลงแรงดันระบบ

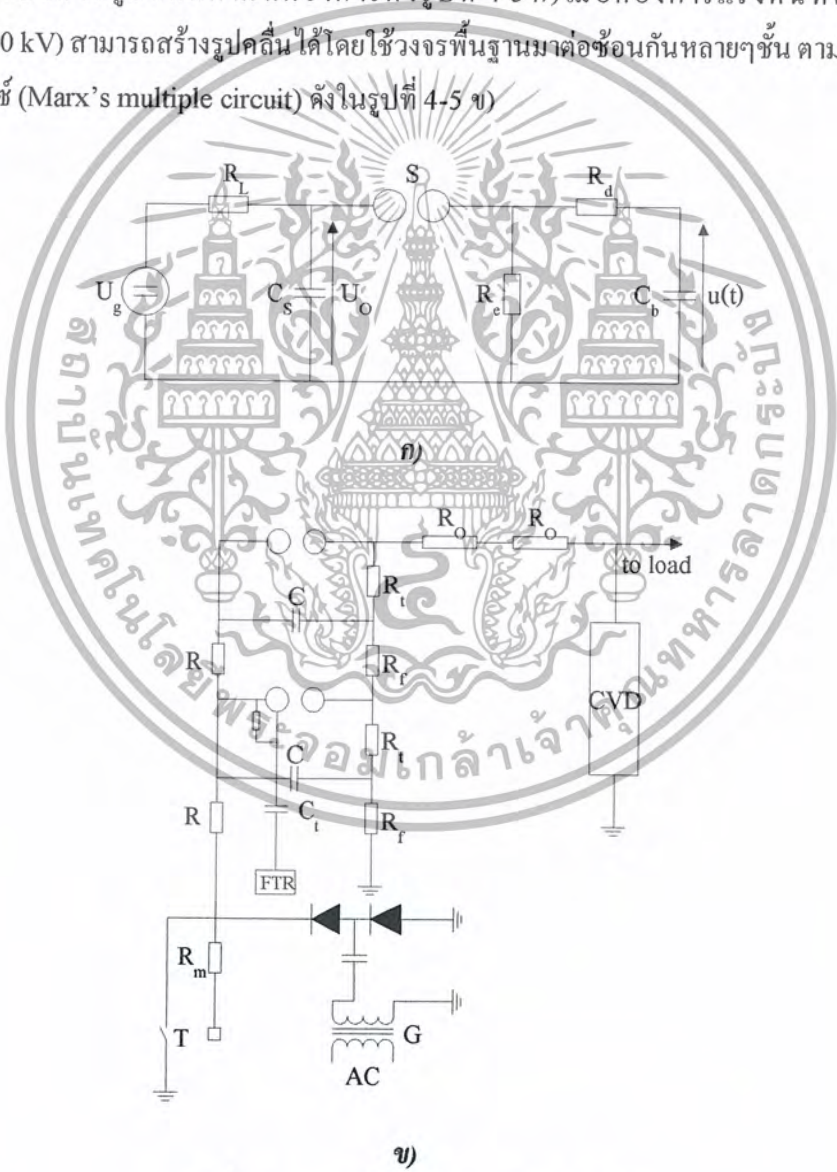
33 kV จะมีค่าแรงดันทดสอบ BIL อยู่ที่ 170 kV เพราะฉะนั้นการทดสอบที่แรงดันลดระดับจะมีค่าอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตาดำเนินไปขอประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่าง 85 kV ถึง 127.5 kV แล้วบันทึกรูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคปที่ได้ลงแผ่นเก็บข้อมูล จากนั้นจึงป้อนแรงดันอิมพัลส์ตามที่มาตรฐานกำหนดเข้าไปแล้วบันทึกค่าไว้ จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ โดยผลที่ได้ทั้งสองครั้งจะต้องเหมือนกันทุกประการ แต่ถ้าผลที่ออกมาไม่เหมือนกันทุกประการแล้ว แสดงว่าหม้อแปลงไม่ผ่านการทดสอบอิมพัลส์ ในการต่อวงจรเพื่อทดสอบจะต่อแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ขั้วด้านปฐมภูมิ และต่อขั้วทางด้านทุติยภูมิลงดิน

4.3.2 การเลือกค่าพิกัดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์สำหรับทดสอบ BIL ได้จากวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุให้กับตัวเก็บประจุแล้วปล่อยให้คายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าตัวองค์ประกอบให้ได้รูปคลื่นตามที่ต้องการดังรูปที่ 4-5 ก) เมื่อต้องการแรงดันทดสอบสูงๆ (มากกว่า 200 kV) สามารถสร้างรูปคลื่นได้โดยใช้วงจรพื้นฐานมาต่อซ้อนกันหลายๆชั้น ตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ (Marx's multiple circuit) ดังในรูปที่ 4-5 ข)



รูปที่ 4-5 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 ก. วงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายใน **ข. วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-5 เป็น วงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV/2 Stage, 5 kJ ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับข้อมูลข้อกำหนดของเครื่องดูได้ที่หัวข้อ 3.3

การเลือกเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับทดสอบ BIL จะกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ แรงดันอัดประจุ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ และพลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

$$W = \frac{1}{2} C_g U_0^2 \times 10^{-9} \quad \text{kJ} \quad (4-19)$$

เมื่อ

U_0 คือ แรงดันอัดประจุมีหน่วยเป็น kV

C_g คือ ความจุไฟฟ้ารวมของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีหน่วยเป็น pF

W คือ พลังงานอัดประจุมีหน่วยเป็น kJ

ค่าแรงดัน U_0 จะหาค่าจากค่าแรงดันทดสอบ BIL และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิด η^* คือ

$$U_0 = \frac{\text{BIL}}{\eta^*} \quad (4-20)$$

โดยที่ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ η^* คือ อัตราส่วนแรงดันที่สร้างได้ U_t ต่อแรงดันที่ป้อนอัดประจุรวม คือ $\eta^* = U_t / U_0$ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความจุ C_g และ C_b การเลือกค่า C_g จะกำหนดด้วยค่าความจุไฟฟ้าโหลดรวม $C_b = C_L + C_T$ ที่มีผลต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้รูปคลื่นตามมาตรฐานกำหนดและมีประสิทธิภาพสูงค่าความจุไฟฟ้า C_g จะเลือกโดยเงื่อนไขขึ้นอยู่กับ C_b คือ

$$C_g \geq 10C_b \quad (4-21)$$

ในกรณีโหลดเป็นประเภทความเหนี่ยวนำเช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ความจุไฟฟ้า C_g จะต้องมีค่ามากยิ่งขึ้น เพื่อป้องกันการเกิดออสซิลเลชันในส่วนหางคลื่น นั่นคือค่าความจุไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ควรมีค่าเป็น

$$C_g \geq \frac{2T_2^2}{L} \quad (4-22)$$

เมื่อ

T_2 คือ เวลาช่วงหางคลื่นมีหน่วยเป็น μsec

L คือ ความเหนี่ยวนำของวัสดุทดสอบมีหน่วยเป็น H

ในกรณีของการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลง 3 เฟส จะทำการทดสอบทีละเฟส โดยที่ อีก 2 เฟส ที่เหลือและทางด้านจ่ายออก(Secondary)จะต่อลงดิน ความจุไฟฟ้า C_g ค่าต่ำสุดอาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้ คือ

$$C_g \geq \frac{P_n 10^8}{U_n^2 \epsilon_{sc}} \quad (4-23)$$

เมื่อ

P_n คือ ค่ากำลังที่กำหนดของหม้อแปลงมีหน่วยเป็น MVA

U_n คือ แรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงมีหน่วยเป็น kV

ϵ_{sc} คือ แรงดันลัดวงจรมีหน่วยเป็น %

ค่า ϵ_{sc} ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอาจหาได้จากตาราง

U_n (kV)	6-20	30	60	110	200
ϵ_{sc} %	3.5-8.8	6-8.8	7-10	10-12	11-14

ตารางที่ 4-2 ค่าแรงดันลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

4.3.3 การจัดวางอุปกรณ์และการต่อลงดิน

การจัดวางวัสดุทดสอบและอุปกรณ์ทดสอบจะต้องคำนึงผลกระทบจากสิ่งที่อยู่ใกล้เคียง บริเวณทดสอบควรจะต้องมีที่ว่างมากพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดหม้อแปลงที่จะนำมาทดสอบ และขนาดแรงดันทดสอบ เกี่ยวกับการต่อลงดินก็เป็นเรื่องสำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องของผลการทดสอบ เนื่องจากแรงดันทดสอบและกระแสเป็นรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว ฉะนั้น ในทางปฏิบัติจะ ใช้ระบบสายดินของห้องทดสอบเป็นศักย์ดินอ้างอิง โดยจุดที่ใกล้วัสดุทดสอบคือ หม้อแปลงมากที่สุด

สายต่อลงดินและสายป้อนแรงดันระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์กับวัสดุทดสอบหรือจากหม้อแปลงกับชั้นที่วัดกระแส ควรจะมีค่าความเหนี่ยวนำและค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมากๆ โดยทั่วไปมักใช้แถบทองแดงบางซึ่งมีความกว้างและหนาประมาณ 120 มม. และ 0.5 มม. ตามลำดับ เพื่อลดผลของอินดักแตนซ์จากภายในสายไฟเนื่องจากว่าค่าอินดักแตนซ์จะมีผลต่อความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 ลักษณะแถบทองแดงบาง

4.3.4 ระบบวัดแรงดัน

ระบบวัดแรงดันประกอบด้วยโวลต์เตจดีไวเดอร์ ซึ่งอาจจะเป็นแบบความต้านทาน ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าฟ้าที่มีขนาดไม่เกิน 2000 kV ถ้าแรงดันสูงกว่านั้นมักจะใช้โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่มีความต้านทานหน่วง (damped capacitive voltage divider) คุณสมบัติของโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ใช้วัดแรงดันทดสอบจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด เช่น เวลาตอบสนอง T ต้องน้อยกว่า $0.2 \mu\text{sec}$ และความคลาดเคลื่อนของการวัดแรงดันค่ายอด $\Delta U \leq 3\%$ และต้องไม่เป็นโหลดแก่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ แต่ระบบวัดแรงดันในโครงการนี้จะใช้คาปาซิเตอร์โวลต์เตจดีไวเดอร์ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแสดงในรูปที่ 4-7 ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับตัวเครื่องดูได้จากหัวข้อที่ 3.3.3



รูปที่ 4-7 คาปาซิเตอร์โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ใช้วัดขนาดแรงดันของโครงการนี้

อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่นแรงดันด้านภาคแรงต่ำของโวลต์เตจดีไวเซอร์จะประกอบด้วยโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด และออสซิลโลสโคปที่มีอิมพีแดนซ์ด้านป้อนเข้ามีค่าสูง คือ ไม่เป็นโหลดของโวลต์เตจดีไวเซอร์ ออสซิลโลสโคปจะต้องเป็นแบบที่มีชิลด์ป้องกันคลื่นรบกวน อัตราการบันทึกภาพสูง พิกัดแรงดันป้อนเข้าสูง ไม่มีแอมพลิฟายเออร์ วัดความถี่สูงๆ มากได้ และเวลาตอบสนองต้องน้อย สัญญาณที่ออกจากภาคแรงต่ำของโวลต์เตจดีไวเซอร์เข้าโวลต์มิเตอร์หรือออสซิลโลสโคปต้องใช้เคเบิลมีชิลด์ จึงต้องใช้ความต้านทานสมมูลกัน (Matching Resistor) และต่อให้ถูกต้องดังรูปที่ 4-8

$$\text{เมื่อ } U = \frac{R_1 + R_2^*}{R_2^*} \cdot U_2$$

$$R_2^* = \frac{R_2 \cdot Z_w}{R_2 + Z_w}$$



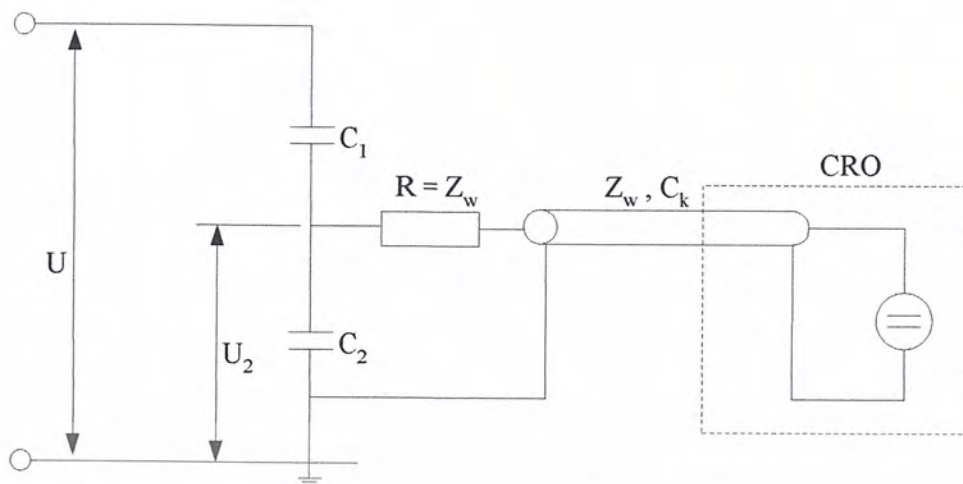
รูปที่ 4-8 การต่อระบบวัดแรงดันสำหรับโวลต์เตจดีไวเซอร์แบบความต้านทาน

ความถี่สูง

$$U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_2$$

ความถี่ต่ำ

$$U = \frac{C_1 + C_2 + C_k}{C_1} U_2$$



รูปที่ 4-9 การต่อวงจรระบบวัดแรงดันสำหรับโวลต์เตอร์แบบตัวเก็บประจุ

ออสซิลโลสโคปที่ใช้วัดและบันทึกรูปคลื่นแรงดันและกระแสในโครงการนี้จะเป็นของ YOGOGAWA ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4-10



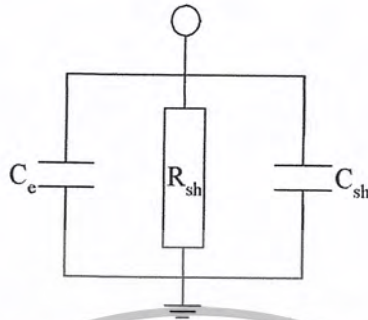
รูปที่ 4-10 ลักษณะของสโคปสำหรับวัดและบันทึกรูปคลื่นแรงดันกับกระแส

4.3.5 ชั้นดับบันทึกรูปคลื่นกระแส

ชั้นดับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประการหนึ่ง ของวงจรทดสอบ BIL ของหม้อแปลงไฟฟ้า การตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเมื่อได้รับแรงดันทดสอบ อาจสังเกตได้จากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนถ้าหากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปมาก เช่น เกิดการลัดวงจรลงดิน เป็นต้น แต่ในกรณีที่เกิดผิดพลาดเล็กน้อย เช่น เกิดผิดพลาดระหว่างรอบขดลวด เกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน เป็นต้น การตรวจจับ โดยสังเกตจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทำได้ยาก ความผิดพลาดเล็กน้อยเช่นนี้ ต้องตรวจจับ โดยดูการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านชั้นดับที่อยู่ระหว่างปลายขดลวดที่ไม่ได้ป้อนแรงดันทดสอบกับดินดังแสดงในรูปที่ 4-11

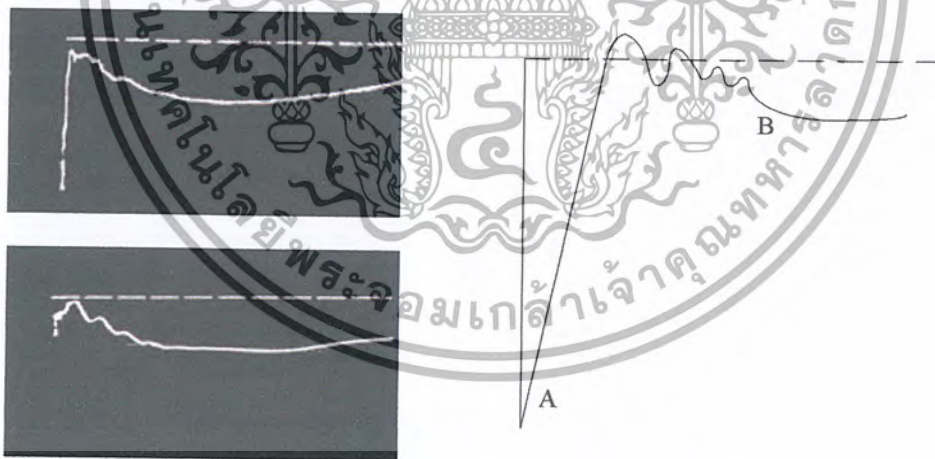
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	C_e	คือ	ความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับดิน
	C_{sh}	คือ	ความจุไฟฟ้าที่อาจต่อเพิ่มขนานกับความต้านทานชั้นที่
	R_{sh}	คือ	ความต้านทานชั้นที่



รูปที่ 4-11 ชั้นที่วัดกระแส

รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านชั้นที่จากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้กับขดลวดหม้อแปลงแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ ส่วนคลื่นรูปคลื่นจะเป็นกระแสแบบประจุ (Capacitive current) มีลักษณะเป็นพัลส์ความถี่สูง คือ ส่วน A ในรูปที่ 9 เรียกว่า กระแสสไปค์ ต่อจากสไปค์ก็เป็นส่วนที่สองมีลักษณะเป็นออสซิลเลชัน มีความถี่ธรรมชาติค่าสูง เกิดความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำของขดลวดหม้อแปลง ในส่วนที่สามเป็นกระแสเหนี่ยวนำ ตามรูปคือส่วน B



รูปที่ 4-12 รูปคลื่นกระแสผ่านขดลวดหม้อแปลง

ลักษณะสมบัติของชั้นที่วัดกระแสสำหรับตรวจจับความผิดปกติที่ควรพิจารณามี 2 ประการ คือ

1) เวลาคงตัวของชั้นที่ คือ $\tau_0 = R_{sh} C_e$ ซึ่งเป็นตัวกำหนดขีดความสามารถของชั้นที่ว่าจะตรวจจับความผิดปกติได้ดีและละเอียดเพียงใด ถ้าเกิดผิดปกติขึ้นในขดลวดจะทำให้เกิดออสซิลเลชัน ที่มีความถี่สูงเป็นเมกะเฮิรตซ์ ซึ่งสูงกว่าความถี่ธรรมชาติของกระแสที่ไหลผ่านขดลวด แต่มีขนาดเล็ก

มีลักษณะเป็นเพียงจุดกระตุ้น ในรูปคลื่นกระแส จุดที่เกิดผิดปกติ รูปภาพของกระแสผิดปกติจะแสดง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาให้เห็นได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันคร่อมชั้นที่ จะติดตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากความผิดพลาด
ได้มากน้อยเพียงใด ชั้นที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ทันทีต้องเป็นชั้นที่มีเวลาคงตัว τ_0
น้อยกว่า 1 ใน 4 ของคาบออสซิลเลชันของกระแสผิดพลาด คือ

$$\tau_0 < \frac{T}{4}$$

เมื่อ T คือ คาบของออสซิลเลชันของกระแสผิดพลาด
 τ_0 นี้จะลดลงได้ด้วยการลดค่า R_{sh} เพราะ C_e ลดลงไม่ได้

2) ความไวของชั้นที่ (Sensitivity) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงค่าในแนวความสูงของรูปคลื่นต่อ
การเปลี่ยนกระแส 1 หน่วย นั่นก็คือ การเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของแรงดันต่อการเปลี่ยนแปลงกระแส 1
หน่วย ความไวนี้แปรค่าตามความต้านทานชั้นที่ ถ้าเพิ่มความต้านทานของชั้นที่จะเพิ่มความไวสูงขึ้น รูป
คลื่นกระแสจะโตขึ้น ทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้ชัดเจนขึ้น แต่การเพิ่มความต้านทานชั้นที่จะ
ทำให้เวลาคงตัวของชั้นที่เพิ่มขึ้นด้วย

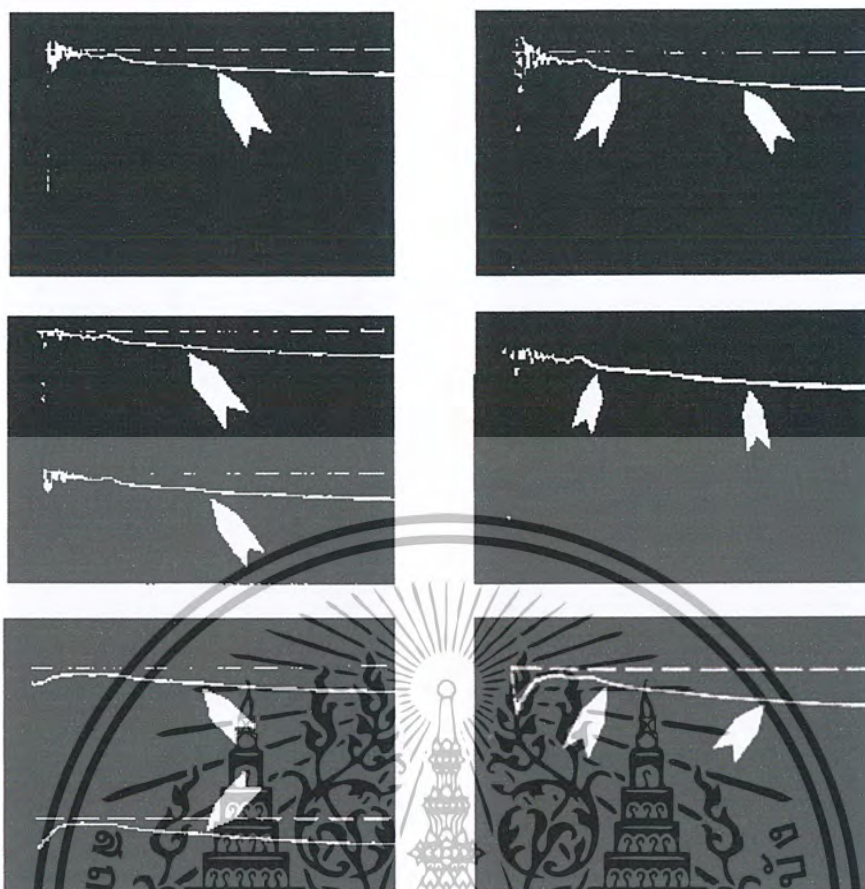
การต่อความจุไฟฟ้า C_{sh} ขนานเพิ่มเข้าไปกับ R_{sh} ดังรูปที่ 4-11 เพื่อลดขนาดกระแสไปค้
(ปกติจะลดลงให้เหลือไม่เกิน 4 เท่าแต่ไม่น้อยกว่า 1 เท่าของกระแสเหนี่ยวนำส่วน B ในรูปที่ 4-12 จะทำ
ให้เวลาคงตัวของชั้นที่เพิ่มขึ้นด้วย คือ

$$\tau_1 = R_{sh} (C_e + C_{sh}) > \tau_0$$

การเพิ่มเวลาคงตัวของชั้นที่ย่อมทำให้ความสามารถในการตรวจจับความผิดพลาดลดน้อยลงไป
ความผิดพลาดเล็กๆ น้อยๆ อาจซ่อนตัวหายไป ไม่ปรากฏออกมาให้เห็นในรูปคลื่นของกระแส ผลของ
ความจุไฟฟ้า C_{sh} ที่ใส่เพิ่มเข้าไปดังแสดงในรูปที่ 4-13

ฉะนั้นการเลือกขนาดความต้านทาน R_{sh} และความจุไฟฟ้าชั้นที่ C_{sh} ควรให้พอเหมาะเพื่อให้
สามารถตรวจจับความผิดพลาดเล็กน้อยได้ ขณะเดียวกันให้สามารถขจัดคลื่นรบกวนจากภายนอกได้ด้วย

การบันทึกรูปคลื่นกระแสควรเลือกสเกลเวลาของออสซิลโลสโคปให้พอเหมาะที่สังเกตเห็นช่วง
หน้าออสซิลเลชันได้ชัดเจนรวมทั้งสไปค์ด้วย มีเวลานานพอที่จะสังเกตเห็นความผิดพลาดที่อาจเกิดใน
ช่วงท้ายของรูปคลื่นด้วย ปกติจะเลือกเวลาให้เห็นรูปคลื่นกระแสส่วนที่เป็นแบบกระแสเหนี่ยวนำขึ้นไป
ถึงค่าสูงสุด

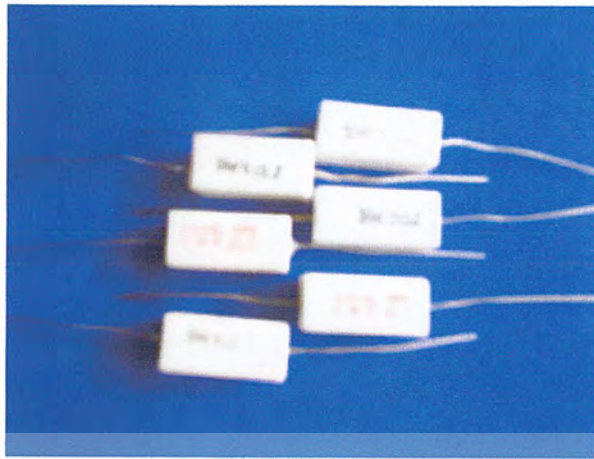


รูปที่ 4-13 ผลของความจุไฟฟ้า C_{sh} ที่ต่อขนานเพิ่มเข้าไปในชั้นที่มีต่อความสามารถในการตรวจจับ ความผิดปกติในรูปแบบคลื่นกระแส

ชั้นที่วัดกระแสที่ใช้ในโรงงานนี้จะเป็นตัวต้านทานแบบลวดพัน (Wire wound resistor) เป็นตัวต้านทานที่ทำจากเส้นลวดโลหะผสม 2 ชนิด หรือ 3 ชนิด ขึ้นไปเช่น ทองแดง, นิกเกิล, โครเมียม, สังกะสี และแมงกานีส พันอยู่บนแกนฉนวนเซรามิกที่มีกระจายความร้อนได้สูง และที่ปลายทั้งสองข้างของขดลวด จะต่อขาลโลหะออกมาเพื่อนำไปใช้งาน แล้วเคลือบผิวด้วยน้ำยาเคลือบ, ซีเมนต์, ปะดอกแก้ว หรือซิลิโคนเพื่อเป็นฉนวน และป้องกันความชื้น

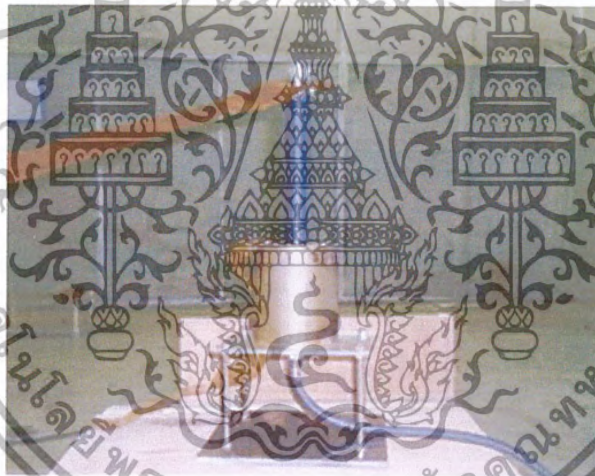
ถ้าใช้ลวดโลหะผสมแมงกานีสในการทำตัวต้านทาน จะให้ค่าความต้านทานที่แน่นอนมากกว่าลวดโลหะผสมชนิดอื่น ๆ ไวร้าวานด์ รีซิสเตอร์จะมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.1 โอห์ม ถึง 800 กิโลโอห์ม มีอัตราทนกำลังสูงถึง 15 วัตต์ และมีค่าความคลาดเคลื่อน 0.01% ถึง 1%

ตัวต้านทานชนิดนี้ เหมาะกับงานที่ต้องการความละเอียดและความเที่ยงตรงสูง จะเป็นตัวต้านทานที่มีขนาดใหญ่ ส่วนมากค่าความต้านทานของมันจะเขียนบอกไว้ที่ตัวของมัน นิยมใช้ในวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า เช่น เป็นตัวต้านทานแบ่งแรงดันในภาคจ่ายไฟ หรือใช้ในวงจรเครื่องไฟฟ้าที่กินกระแสสูง ๆ และอื่น ๆ ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-14 ลักษณะภายนอกของตัวต้านทานแบบสวดพัน

ชั้นที่วัดกระแสที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วซึ่งตัวต้านทานจะติดตั้งอยู่ในท่อทรงกระบอกที่ทำจากทองเหลืองจะมีลักษณะดังรูปที่ 4-15



รูปที่ 4-15 ลักษณะภายนอกของชั้นที่วัดกระแส

ชั้นที่วัดกระแสที่ใช้ในโครงงานนี้จะไม่มีความจุไฟฟ้า C_{sh} ในกรณีที่ขนาดกระแสสไปค์มีค่าสูง จึงจะต่อความจุไฟฟ้า C_{sh} ขนานกับความต้านทาน R_{sh} เพื่อลดขนาดกระแสสไปค์ให้มีขนาดต่ำลง เพราะฉะนั้น C_{sh} จะต่อหรือไม่ต่อเข้าไปในวงจร จึงขึ้นอยู่กับขนาดความสูงของกระแสสไปค์ตามที่มาตรฐานกำหนด

4.3.6 เคเบิลวัด

เคเบิลวัด ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของ โวลต์เตจดีไวเซอร์มายังอุปกรณ์วัด เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และลดการลบกวอนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปเป็นแบบแกนร่วม (coaxial cable) ที่มีกรวดทอนสัญญาณต่ำ มีลักษณะดังรูปที่ 4-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-16 ลักษณะของเคเบิลวัด

ความยาวของเคเบิลยังมีผลต่อการวัดแรงดัน คือ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม การวัดแรงดันอิมพัลส์ โดยเฉพาะที่มีการตัดช่วงหน้าคลื่นจะต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ เพราะจะทำให้ค่ายอดที่วัดได้ผิดพลาด โดยทั่วไป สายเคเบิลแกนร่วมที่ยาวไม่เกิน 10 เมตร อาจจะไม่ถึงถึงผลกระทบจากแรงดันตกคร่อมได้ถ้าต้องใช้เคเบิล สายยาวๆจึงควรเลือกที่มีความต้านทานและอิมพีแดนซ์ลักษณะที่มีค่าต่ำ เคเบิลวัดที่ใช้ในโครงการนี้มี 2 ขนาด คือ RG 8 อิมพีแดนซ์มีค่า 50 โอห์ม และ RG 11 อิมพีแดนซ์มีค่า 75 โอห์ม

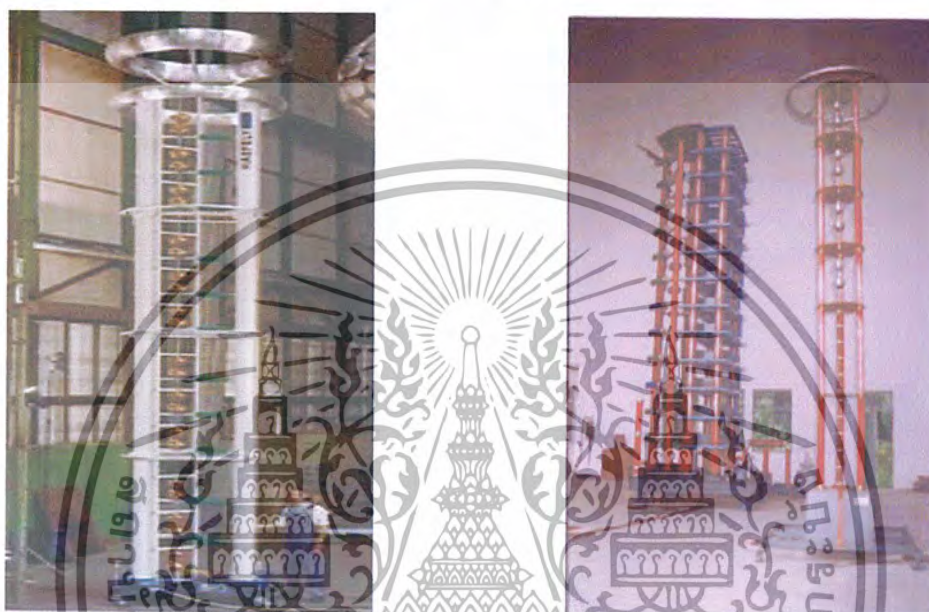
4.3.7 แกบตัดคลื่น

ตามสภาพการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงนั้นส่วนมากจะอยู่กลางแจ้ง อาจจะได้รับทั้งแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม และแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด แรงดันอิมพัลส์ อิมพัลส์รูปคลื่นตัดนี้ มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม เพราะเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เกิดคลื่นตัด จึงต้องทำการทดสอบด้วยคลื่นตัดเพื่อให้เกิดความมั่นใจในเรื่องการฉนวนมากยิ่งขึ้น ก่อนที่จะนำไปใช้งาน การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด มาตรฐานได้กำหนดไว้ว่าขนาดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดจะต้องไม่น้อยกว่าขนาดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม และเวลาช่วงคลื่นตัด ต้องอยู่ระหว่าง 2 – 6 μsec จากจุดเริ่มต้นของคลื่นตัด

การสร้างแรงดันอิมพัลส์คลื่นตัดทำได้โดยทำให้เกิดการตัดคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ด้วยสปาร์กแกป เช่น ใช้โอเลค ไตรดแบบทรงกลม (Sphere gap) หรือใช้โอเลค ไตรดแท่งกลมปลายมน ปลายแหลม ปลายตัด (rod – rod gap) แต่การทำให้เกิดคลื่นตัดโดยใช้แท่งกลม ปลายมนหรือแท่งกลมปลายแหลมและปลายตัดนั้น จะใช้ได้ผลถึงค่าแรงดันระดับหนึ่ง ถ้าแรงดันสูงมากกว่านั้นจะทำให้เกิดโคโรนาหรือพรีดิสชาร์จ (Predischarge) ที่ปลายโอเลค ไตรด เป็นเหตุให้การวัดแรงดันผิดพลาดได้ หากทำให้เกิดคลื่นตัดโดยใช้โอเลค ไตรดทรงกลมขนาดของทรงกลมจะต้องมีขนาดโตขึ้นเมื่อขนาดของแรงดันสูงมากขึ้น อาจจะไม่สะดวกต่อการใช้งาน ข้อเสียที่สำคัญอีกประการหนึ่งของสปาร์กแกปเหล่านี้คือ ไม่สามารถควบคุมเวลาช่วงคลื่นตัดได้แน่นอน ทำให้การสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดได้ไม่ถูกต้องตามความต้องการ ปัญหาที่ตามมาคือจะทำให้ต้องป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหม่หลายๆครั้ง จนกว่าจะได้ระยะเวลาตามมาตรฐานที่ระบุของช่วงคลื่นตัด แต่การป้อนแรงดันอิมพัลส์แต่ละครั้งนั้น ย่อมหมายถึงการฉนวนนั้นย่อมได้รับความบอบช้ำ อันอาจเป็นสาเหตุให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงนั้นสั้นลง ฉะนั้นการจะลองป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้เกิดรูปคลื่นตัดด้วยสปาร์กแกป เพื่อให้ได้เวลาช่วงคลื่นตัดได้ตามที่กำหนดนั้นย่อมทำได้ยาก เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ ในปัจจุบันนี้ สปาร์กแกปที่เหมาะสมในการทำให้เกิดคลื่นตัดได้ถูกต้องแน่นอน โดยไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันทำได้โดยใช้มัลติเปิลช้อปปิงแกป (Multiple chopping gap) ดังแสดงในรูปที่ 4 – 17



รูปที่ 4-17 ลักษณะของมัลติเปิลช้อปปิงแกป

ในกรณีแรงดันทดสอบไม่สูงมากนักเช่น ทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงในระบบจำหน่ายซึ่งมีระบบแรงดันไม่เกิน 52 kV หรือ BIL ไม่เกิน 250 kV อาจสร้างคลื่นตัดได้ โดยใช้ช่องว่างของแท่งกลมปลายมน (rod – rod gap) ปรับระยะช่องว่างให้พอเหมาะที่จะได้ช่วงคลื่นตัด T_c อยู่ในช่วง 2 – 6 μ sec ตามที่มาตรฐานกำหนด กรณีที่แรงดันสูงมากขึ้นต้องใช้ระยะแกปมากขึ้น การเกิดคลื่นตัดจะไม่แน่นอนเพราะขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศ จึงใช้แกปตัดคลื่นที่มีไกสวิตซ์ที่สามารถควบคุมเวลาคลื่นตัดได้ จะเป็นการลดอัตราเสี่ยงของหม้อแปลงอันเนื่องมาจากการลองผิดลองถูกเพื่อให้ได้เวลาคลื่นตัดตามมาตรฐานกำหนด



รูปที่ 4-18 แกบตัดคลื่นที่สร้างขึ้นเอง

แต่ในโครงการนี้เพื่อความสะดวก, ง่ายและรวดเร็วกว่าการสร้างมัลติเปิดช้อปปี้งแกบขึ้นมาเอง อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในกรณีที่จะสั่งซื้อชุดมัลติเปิดช้อปปี้งแกบสำเร็จรูปจากต่างประเทศที่มีราคาค่อนข้างสูงมาก ในการจัดทำชุดสปาร์คแกบเพื่อสร้างคลื่นตัดจึงได้มีการจัดทำขึ้นเองมีลักษณะดังรูปที่ 4-18 โดยใช้วัสดุที่หาง่ายราคาถูก ทำได้ง่าย โดยการใช้น้ำสแตนเลสรูปทรงมนเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร มาจัดทำแกบตัดคลื่น ถึงแม้จะมีข้อดีอย่างดั่งที่กล่าวมาข้างต้น แต่เนื่องจากการทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์ที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งในการทดสอบในโครงการนี้ใช้แรงดันอิมพัลส์ไม่เกิน 180 kV เพราะฉะนั้นแกบตัดคลื่นที่สร้างขึ้นเอง จึงสามารถใช้ได้อยู่ ซึ่งอาจจะมีปัญหาเล็กน้อยอยู่บ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบ

4.4.1 วงจรการทดสอบ

วงจรทดสอบความคงทนด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ของหม้อแปลงประกอบด้วย เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีองค์ประกอบปรับรูปคลื่น ระบบวัดแรงดันทดสอบและกระแสอิมพัลส์ที่ไหลผ่านขดลวดที่ทดสอบ อุปกรณ์สร้างคลื่นตัด หรือที่เรียกว่า ซอปปิงแก๊ป(ช่องว่างห้วงนรูปขั้นน้ำสแตนเลส) อุปกรณ์ต่างๆเหล่านี้จะต่อเป็นวงจรที่สำคัญ 3 วงจร คือ วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ วงจรวัดแรงดันทดสอบ และวงจร สร้างคลื่นตัด ดังแสดงในรูปที่ 4-19



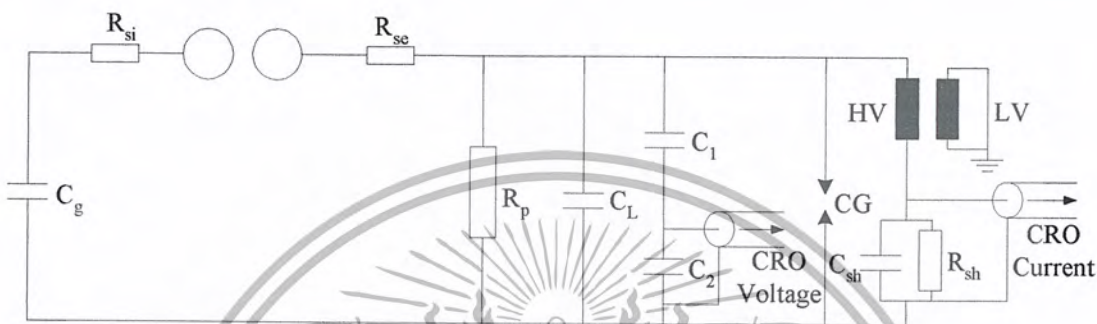
รูปที่ 4-19 วงจรการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า

C_g	คือ	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอิมพัลส์
C_L	คือ	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโหลด
C_t	คือ	ความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ
L_t	คือ	ความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงทดสอบ
R_{si}	คือ	ความต้านทานภายในอนุกรมของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
R_{sc}	คือ	ความต้านทานภายนอกต่ออนุกรมสำหรับปรับหน้าคลื่น
R_p	คือ	ความต้านทานต่อแบบขนาน
Z_1, Z_2	คือ	อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำตามลำดับของ โวลต์เตจดีไวเดอร์
CG	คือ	แก๊ปตัดคลื่น
R_{sh}	คือ	ชั้นตัววัดกระแส

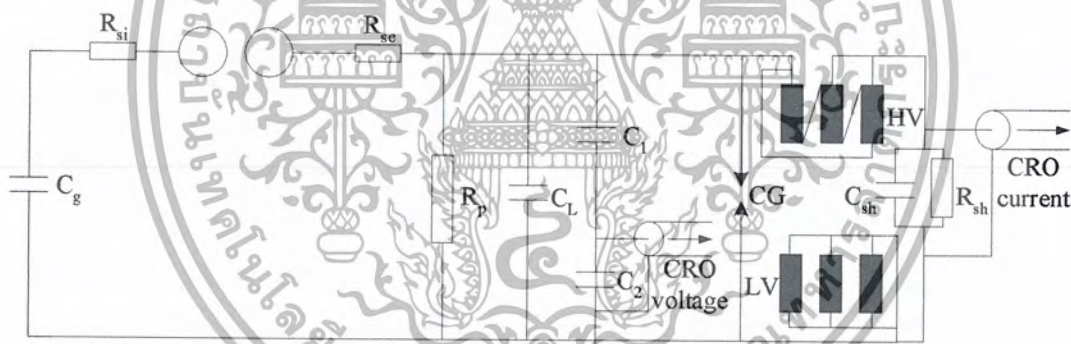
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ

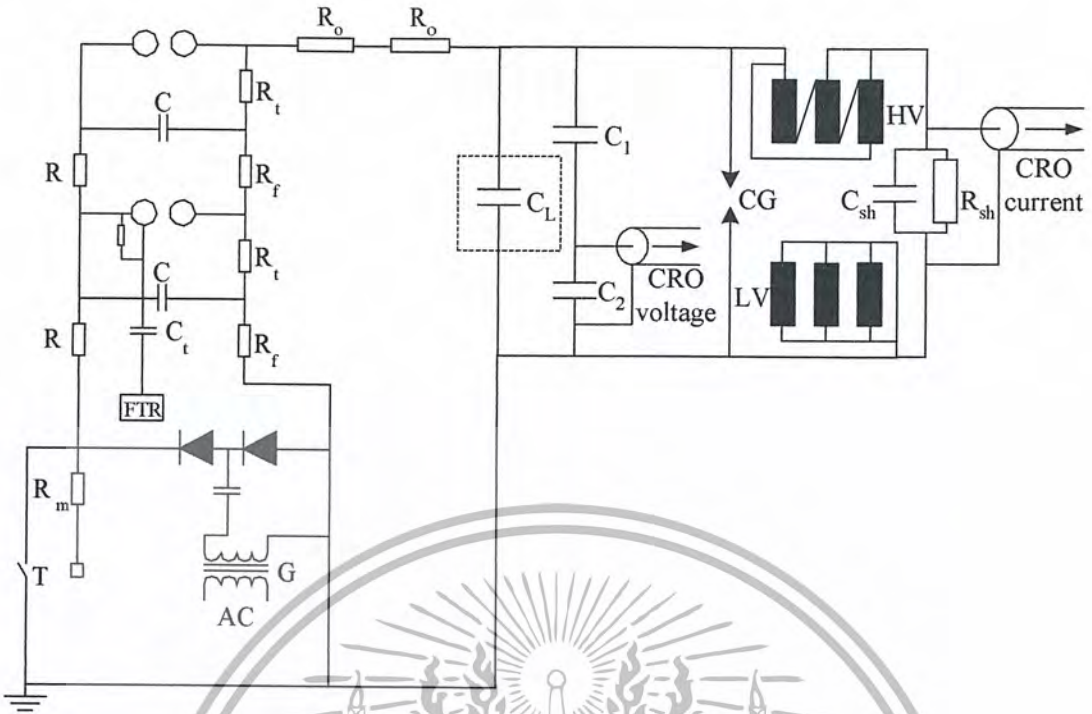
หม้อแปลงที่นำมาทำการทดสอบ BIL อาจเป็นเฟสเดียวหรือสามเฟส การต่อวงจรทดสอบคล้ายกัน คือ ทดสอบทีละเฟส ปลายขั้วข้างหนึ่งของขดลวดเฟสที่จะรับการทดสอบเป็นที่ป้อนแรงดัน อีกปลายขั้วหนึ่งของขดลวดจะต่อลงดินผ่านชั้นที่สำหรับวัดกระแสแอมป์ลีสที่ไหลผ่านขดลวดนั้น ส่วนขั้วขดลวดหรือเฟสที่ไม่ได้รับการทดสอบจะต่อลงดิน ดัง ในรูปที่ 4-20 และ 4-21 แสดงการต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบสำหรับหม้อแปลงเฟสเดียวและสามเฟสตามลำดับ



รูปที่ 4-20 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบของหม้อแปลงเฟสเดียว



รูปที่ 4-21 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบของหม้อแปลงสามเฟส



รูปที่ 4-22 การต่อขั้วหม้อแปลงสามเฟสรับการทดสอบจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV, 5kJ

4.4.3 การเทียบระบบวัดแรงดัน

เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าระบบวัดแรงดันทดสอบนั้นมีความถูกต้อง จำเป็นต้องมีการตรวจสอบ โดยการเทียบระบบวัดแรงดันในช่วงแรงดันที่จะทดสอบก่อนเริ่มต้นทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการทดสอบเพื่อตรวจรับปกติทั่วไป จะทำการเทียบระบบวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลม (Sphere gap) ตามข้อกำหนด IEC 60052

4.4.4 วิธีทำการทดสอบ

หลังจากทำการปรับเทียบระบบวัดแรงดันเรียบร้อยแล้ว ก็จะถึงขั้นลำดับขั้นการป้อนแรงดันซึ่งขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้ทดสอบ ฉะนั้นจะต้องทราบแน่ชัดก่อนว่าจะทดสอบตามมาตรฐานอะไร อย่างไรก็ตามวิธีการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงจะประกอบด้วย

- 1) ตรวจสอบและปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ให้ได้ตามเกณฑ์กำหนด คือ รูปคลื่น $1.2 \pm 30\% / 50 \pm 20\%$ μsec การตรวจปรับรูปคลื่นจะทำในขณะที่มีหม้อแปลงรับการทดสอบต่ออยู่ด้วย และป้อนแรงดันไม่ควรเกิน 75 % ของค่า BIL โดยปรับค่าองค์ประกอบของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- 2) ทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์ลดระดับ (Reduced level full wave = RF) มีค่าระหว่าง 50 กับ 75 % ของแรงดันทดสอบ บันทึกรูปคลื่นแรงดันและกระแสผ่านขดลวดทดสอบไว้เป็นรูปคลื่นอ้างอิง
- 3) ป้อนแรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็ม 100 % (Full wave = F) 2 ครั้ง บันทึกแรงดัน

และกระแสไว้เช่นกัน

- 4) ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด (Chopped wave = C) ที่ส่วนหางคลื่น 2 ครั้ง ขนาดและช่วงเวลาคลื่นตัดขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้ทดสอบ บันทึกภาพไว้

การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดโดยทั่วไปจะถือว่าเป็นการทดสอบพิเศษ คือ จะทดสอบเมื่อระบุให้ทดสอบเท่านั้น ลำดับขั้นการป้อนแรงดันและจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันตามมาตรฐานที่นิยมใช้กันทั่วไปแสดงไว้ในตารางที่ 4-3

ตัวอย่างออสซิลโลแกรมรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่บันทึกตามลำดับจากการทดสอบหม้อแปลง 3 เฟส 500 kVA 33 kV ซึ่งมีค่า BIL = 170 kV (IEC) แสดงไว้ดังในรูปที่ 4-24

ในกรณีหม้อแปลง 3 เฟสขนาดใหญ่ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ และตัวเก็บประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีขนาดจำกัด มักจะมีปัญหาความยุ่งยากในการที่จะปรับรูปคลื่นแรงดันทดสอบให้ได้เกณฑ์ที่กำหนด คือ รูปคลื่นมักจะมีออสซิลเลชัน และช่วงหางคลื่นมักจะสั้น การแก้ปัญหาอาจทำได้โดยต่อขั้วหรือเฟสที่ได้รับการทดสอบผ่านความต้านทานลงดิน โดยที่ขั้วคลวดที่มีได้ทดสอบนั้นจะต้องมีแรงดันไม่เกิน 75 % ของแรงดันทดสอบ ดังการต่อในรูปที่ 4-23



a) หม้อแปลง 3 เฟส ต่อแบบ Δ-Y

b) หม้อแปลง 3 เฟส จุดนิวตรอนต่อลงดิน

รูปที่ 4-23 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ BIL

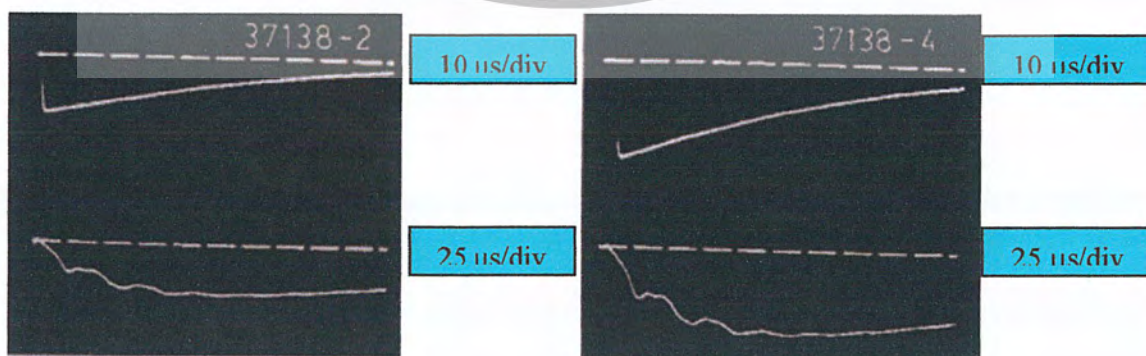
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน	ลำดับชั้นการป้อนแรงดัน ทดสอบ 1.2/50 μsec	ช่วงเวลาค้นคืน T_c (μsec)	ค่ายอดแรงดันรูปคลื่น ตัดเป็น % ของค่า BIL
IEC 76-1980	1. 1 \times RF	2 – 6	≥ 100
	2. 1 \times F		
	3. 2 \times C		
	4. 1 \times F		
BS 171-1970	1. 1 \times RF	2 – 6	≥ 100
	2. 1 \times F		
	3. 2 \times C		
	4. 1 \times F		
ANSI C57-12.00-1973	1. 1 \times RF	1 – 3	100 – 115
	2. 2 \times C		
	3. 1 \times F		
AS C61-1970	1. 1 \times F	2 – 6	≥ 100
	2. 2 \times C		
	3. 2 \times F		
VDE 0532/11.71	1. 1 \times RF	2 – 6	≈ 115
	2. 2 \times C		
	3. 2 \times F		

ตารางที่ 4-3 ลำดับชั้นการป้อนแรงดัน ขนาดและลักษณะของแรงดันทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ



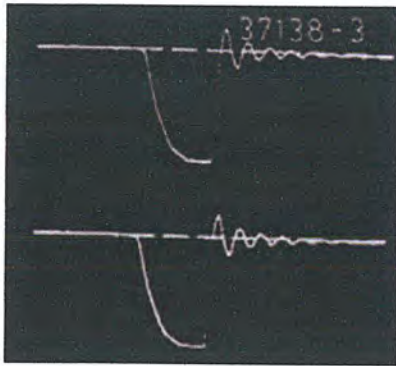
1) WF Calibrated voltage 75kV



2) RFWV 102 kV

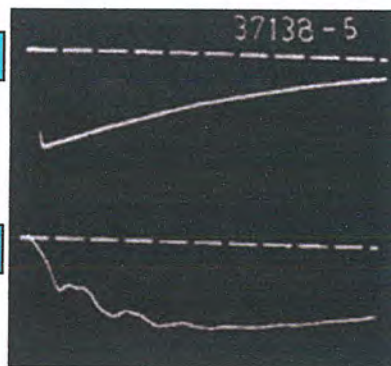
3) FWV 170 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1 us/div

1 us/div



10 us/div

25 us/div

4) Two – CWV 170 kV

5) FWV 170 kV

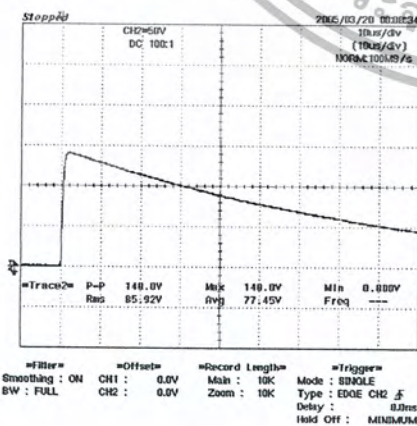
จากตารางที่ 4-3 เมื่อ

- RF คือ แรงดันรูปคลื่นเต็มแบบลดระดับ (Reduced level of full wave)
- F คือ แรงดันรูปคลื่นเต็ม (Full wave)
- C คือ แรงดันรูปคลื่นตัด (Chopped wave)
- T_c คือ เวลาคลื่นตัด (Chopping time)

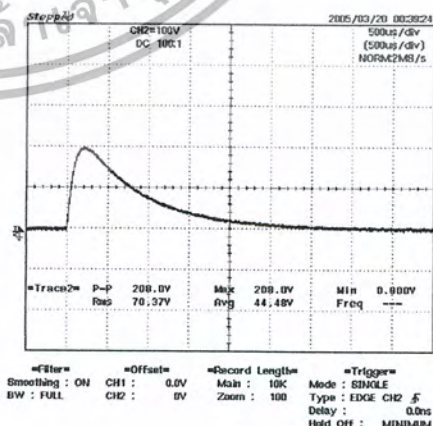
รูปที่ 4-24 ออกซิไลโดแกรมแรงดันและกระแสจากการทดสอบ BIL หม้อแปลง 3 เฟส 500 kVA, 33 kV – 400/230V

4.4.5 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของห้องปฏิบัติการ

หม้อแปลงของห้องปฏิบัติการเป็นชนิดแห้ง มีพิกัด 12 kV/400 V, 75 kVA เพราะฉะนั้นจากตารางที่ 3-3 แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ BIL คือ 75 kV ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 76-1980 ตามตารางที่ 4 - 3 และแรงดันทดสอบที่อยู่ในช่วง 50 – 75 % คือ 37.5 – 56.25 kV ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4-25

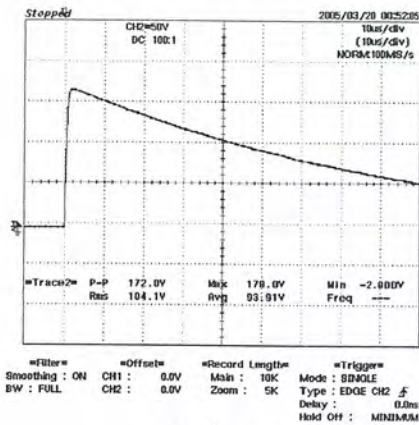


รูปคลื่นแรงดัน

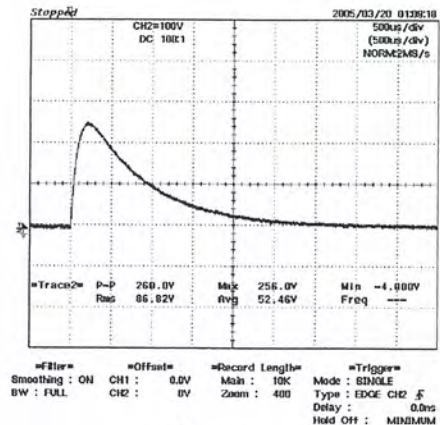


รูปคลื่นกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเพียงการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

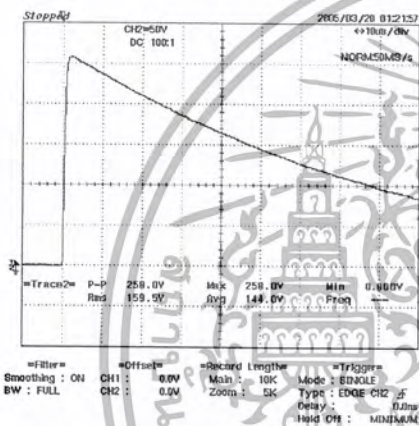


รูปคลื่นแรงดัน

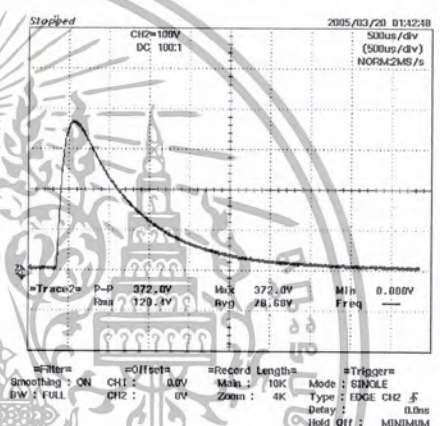


รูปคลื่นกระแส

2) RFWV 50 kV

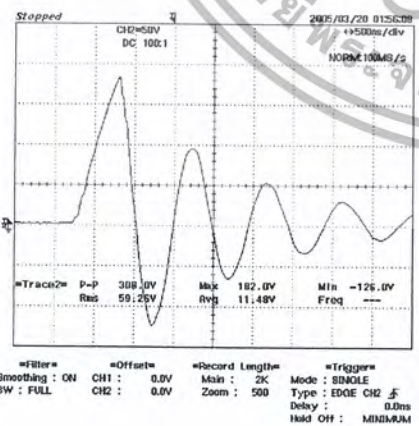


รูปคลื่นแรงดัน

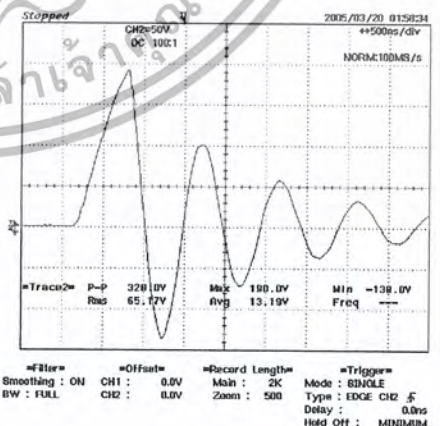


รูปคลื่นกระแส

3) FWV 75 kV



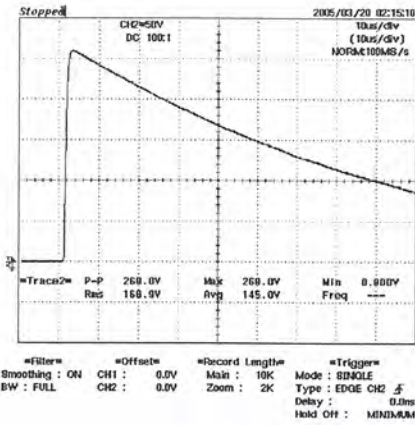
รูปคลื่นตัดครั้งที่ 1



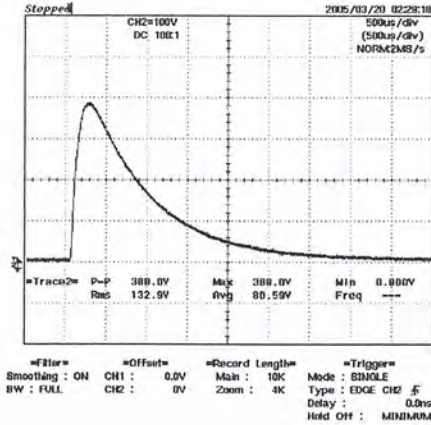
รูปคลื่นตัดครั้งที่ 2

4) CWV 75 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปคลื่นแรงดัน



รูปคลื่นกระแส

5) FWV 75 kV

รูปที่ 4-25 วงจรทดสอบ BIL ของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบจริง

4.4.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL เพื่อวินิจฉัยว่าหม้อแปลงนั้นมีคุณภาพได้แก่ตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ จะอาศัยพิจารณาจากออสซิลโลแกรมของแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดสอบขณะป้อนแรงดันอิมพัลส์ โดยการเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันและกระแสระหว่างรูปคลื่นที่ได้จากแรงดันทดสอบลดระดับ (RF) กับรูปคลื่นที่ได้จากแรงดันทดสอบที่กำหนด 100 % (F) หรือเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นที่ระดับแรงดันที่กำหนด หลายครั้งต่อเนื่องกัน คือ เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสกับรูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นแรงดันกับรูปคลื่นแรงดัน โดยมีเกณฑ์ว่ารูปคลื่นจะต้องเหมือนกันทุกประการ ไม่มีข้อแตกต่างกันแม้แต่จุดเล็กๆ ในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนหรือมีความแตกต่างเกิดขึ้น การวินิจฉัยตัดสินการทดสอบลักษณะนี้ต้องอาศัยทักษะและประสบการณ์สูงเป็นพิเศษ เพราะความแตกต่างนั้นอาจเนื่องมาจากการรบกวนต่างๆ ได้มากมายหลายประการ ซึ่งจะต้องตรวจสอบให้แน่ชัด

การค้นหาสาเหตุความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเช่นนี้ กอนอื่นควรจะตรวจสอบวงจรทดสอบ วงจรวัด และการต่อลงดินว่าไม่เป็นต้นเหตุให้เกิดการรบกวน หากวงจรทดสอบเป็นต้นเหตุจะต้องหาทางแก้ไขให้หมดไปหรือมีน้อยที่สุด

ต่อจากนั้นจะต้องตรวจสอบการต่อลงดิน องค์ประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่อยู่ภายในหม้อแปลงรับการทดสอบว่าเป็นต้นเหตุหรือไม่

4.4.7 การเปรียบเทียบออสซิลโลแกรมแรงดันทดสอบเต็มคลื่น

ออสซิลโลแกรมของรูปคลื่นแรงดันทดสอบ มักจะไม่ค่อยมีความไวต่อการตรวจจับความผิดพร่อง ฉะนั้นการตรวจจับ โดยดูจากรูปคลื่นแรงดันคลาดเคลื่อนไป จะใช้สำหรับกรณีที่เกิดผิดพร่องในฉนวนสำคัญและค่อนข้างมาก

- ความผิดปกติของลงดิน ในฉนวนสำคัญที่ใกล้ขั้วขดลวดที่ป้อนแรงดัน จะทำให้เกิดการหักหรือคลื่นตัดอย่างกะทันหัน ดังรูปที่ 14 b) เกิดเบรคความถี่ที่ปลอกฉนวนนำสายลงดิน
- เกิดความไวข้ามขดลวดหรือลัดวงจรบางส่วน จะทำให้อิมพีแดนซ์ของขดลวดลดลง จะเป็นผลให้เวลาช่วงห่างคลื่นสั้นลง กระแสจะเพิ่มขึ้นมาก

4.4.8 ออสซิลโลแกรมกระแส (แรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็ม)

ออสซิลโลแกรมรูปคลื่นกระแสจะมีความไวมากที่สุดสำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง อย่างไรก็ตามการตรวจจับนี้ก็ไวต่อสิ่งรบกวน จึงต้องใช้ความละเอียดในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสจะเป็นสิ่งชี้บอกถึงการเกิดการเสียหายฉนวนของขดลวด และลักษณะของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจใช้เป็นชี้แนะถึงชนิดและตำแหน่งของการเกิดความผิดปกติ ดังตัวอย่างออสซิลโลแกรม รูปคลื่นแรงดันและกระแส

4.4.9 สรุปผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของห้องปฏิบัติการ

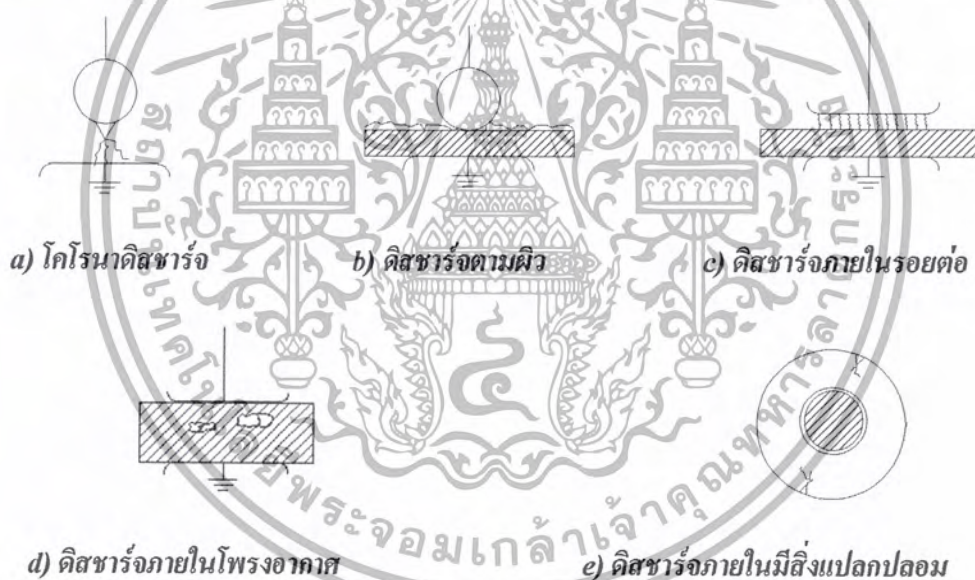
จากผลการทดสอบรูปคลื่นที่ได้เหมือนกันทุกประการเพราะฉะนั้น ผลการทดสอบหม้อแปลงผ่านการทดสอบ แต่เนื่องจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์หลายๆครั้งเพื่อที่จะให้ได้รูปคลื่นตัดตามมาตรฐานต้องเสียเวลาในการปรับเทียบระยะแกมเพื่อให้ได้รูปคลื่นตัดตามมาตรฐานและอาจเป็นสาเหตุให้ฉนวนเสื่อมสภาพได้ เพราะฉะนั้นถ้ามีชุดมัลติเบิ้ลหรือบับเบิ้ลแกมจะทำให้การทดสอบมีความสะดวกและง่ายมากขึ้น

บทที่ 5

การตรวจับดิสชาร์จบางส่วนและวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วน ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

5.1 บทนำ

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge, PD) คือการเกิดการเสียหายการเป็นฉนวนเพียงบางส่วนจากระบบการฉนวน เป็นการเกิดเบรกดาวน์หรือดิสชาร์จที่ไม่ได้เชื่อมโยงถึงกันระหว่างอิเล็กโตรด ไม่ได้เป็นการเสียหายการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่เนื้อเดียวกันหรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ 1) โครโนดิสชาร์จ 2) ดิสชาร์จตามผิว และ 3) ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน แสดงในรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 การดิสชาร์จบางส่วน

5.2 ผลกระทบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆและเกิดความคิดพรัองขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนสายแรงสูงแบบชิงอากาศ เรียกว่าโคโรนา ย่อมหมายถึงการเกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลา และยิ่งกว่านั้นการเกิดโคโรนาพัลส์ดังกล่าว ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ (Radio interferent voltage; RIV) เรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ

5.3 โคโรนาดิสชาร์จ

โคโรนาดิสชาร์จ(Corona discharge) จะเกิดตรงบริเวณรอบๆอิเล็กโทรดปลายแหลมหรือขอบคมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เช่น สายตัวนำแรงสูงที่มีขนาดเล็กเกินไป หรือผิวสายตัวนำไม่เรียบพอ ทำให้อากาศรอบๆบริเวณนั้นเกิดไอออนในเชิงลบ รูปที่ 5-2 แสดงการเกิดโคโรนาที่ทวงลูกถ้วยแขวน 3 ลูก และที่ขอบคมของสายนำไฟฟ้าแรงสูง (บันทึกภาพด้วยกล้องตรวจจับโคโรนา)



a) การเกิดโคโรนาที่ระดับแรงดันที่ 30 kV

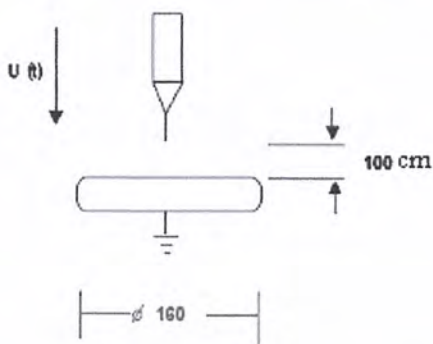
b) การเกิดโคโรนาที่ระดับแรงดันที่ 70 kV

รูปที่ 5-2 การเกิดโคโรนาของทวงลูกถ้วยแขวน ตรวจสอบด้วยด้วยกล้องตรวจจับโคโรนา

เมื่อ 1 คือ การเกิดโคโรนาที่สาย

2 คือ การเกิดโคโรนาที่ลูกถ้วย

การทดลองเพื่อศึกษาการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในอากาศเริ่มต้นโดยใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมกับ
 ระนาบดิ่งรูปที่ 5-3 a) และผลการวัดรูปคลื่นแรงดันจากออสซิลโลสโคปแสดงดังรูปที่ 5-3 b)



รูปที่ 5-3 ลักษณะอิเล็กโทรดและลักษณะโคโรนาดีสชาร์จ
 a) อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองโคโรนาดีสชาร์จ
 b) ลักษณะโคโรนาดีสชาร์จ

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่เกิดจากอิเล็กโทรดปลายแหลม เมื่อป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง ถ้าพิจารณารูปคลื่นแรงดันจากออสซิลโลสโคป จะสังเกตเห็นพัลส์ซึ่งเริ่มเกิดขึ้นก่อนที่ยอดครึ่งคลื่นลบของรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ มีขนาดและช่วงห่างพัลส์สม่ำเสมอเท่าๆ กัน เรียกว่า “Tracheal Pulses” ดังรูปที่ b) มีช่วงกว้างของคลื่นเพียงสิบล้านนาโนวินาที ความถี่อาจถึง 0.5 MHz ถ้าเพิ่มแรงดันสูงขึ้นอีก จะสังเกตเห็นพัลส์ขึ้นที่ยอดครึ่งคลื่นบวกแต่จะไม่สม่ำเสมอทั้งยอดบวกและยอดลบพัลส์อาจจะหายไปหากเพิ่มแรงดันอีก เรียกลักษณะโคโรนาเช่นนี้ว่าโคโรนาต่อเนื่อง (Continuous Corona) ดังรูปที่ b) คลื่นรบกวนวิทยุจึงลดลง แต่พลังงานสูญเสียโคโรนากลับยิ่งเพิ่มมากขึ้นต่อจากนั้นก็สังเกตเห็นพัลส์หนาแน่นมากขึ้นที่ยอดคลื่นบวกเรียกว่า ดิสชาร์จขนแปรง (Brush Discharge)

ดังรูปที่ b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ดิสชาร์จตามผิว

ดิสชาร์จตามผิวอาจเกิดขึ้นตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน เช่น ของแข็งกับก๊าซ หรือของแข็งกับของเหลว เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤต ตัวอย่างเช่น ปลอกฉนวนนำสายปลายสายเคเบิล หรือดิสชาร์จภายนอกกระทบเข้ากับฉนวนซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดประกายไฟได้ เช่น แผ่นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรด หรือปลอกฉนวนนำสายดังรูปที่ 5-4



รูปที่ 5-4 ลักษณะรูปแบบฉนวนที่ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวและการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิว

ในรูปที่ 5-4 a) และ 5-4 b) ดิสชาร์จตามผิวจะเกิดขึ้นที่บริเวณแท่งรีดหรือทรงกลมสัมผัสหรือใกล้กับแผ่นฉนวนหรือแผ่นแก้วเพราะความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณนั้นจะสูงกว่าบริเวณอื่น เมื่อเพิ่มแรงดันหรือความเครียดสูงขึ้นดิสชาร์จจะขยายตัวกว้างยาวขึ้นห่างออกไปจากแท่งรีดหรือทรงกลมสู่ขอบแผ่นฉนวนหรือแผ่นแก้ว ถ้าแผ่นฉนวนหรือแผ่นแก้วหนามากพอและแผ่นไม่กว้างเกินไปก็จะเกิดวบไฟข้ามผ่านแผ่นแก้วไปหาอิเล็กโตรดระนาบได้ ถ้าแผ่นแก้วไม่หนามากและแผ่นกว้างใหญ่ การเกิดดิสชาร์จตามผิวก็จะกว้างไประดับหนึ่งแล้วก็จะเกิดเบรกควอนท์เจาะทะลุแผ่นแก้วได้

ในรูปที่ 5-4 c) ดิสชาร์จบางส่วนตามผิวจะเริ่มเกิดที่อิเล็กโตรดแหวนยึดต่อลงดินและวิ่งขยายตัวออกไปทางปลายปลอกฉนวนนำสายเข้าหาคำนำ ทั้งนี้เพราะความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น

ในรูปที่ 5-4 d) เป็นรูปแบบการเกิดดิสชาร์จตามผิวบนแผ่นฉนวนเมื่อรูปแบบอิเล็กโตรดดังแสดงในรูป a) และทำการป้อนแรงดันพัลส์ชั่วคราวให้กับแท่งรีด การเกิดดิสชาร์จแบบนี้มีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า Gliding Discharge

ดิสชาร์จบางส่วนตามผิวที่เริ่มต้นเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าวอาจอธิบายได้ด้วยลักษณะของสมศักย์หรือศักย์ไฟฟ้าทำในรูปทั้งสามกรณีค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนแข็งจะมีค่าสูงกว่าอากาศหลายเท่าค่าความจุไฟฟ้า C_2 ย่อมมีค่ามากกว่า C_1 ฉะนั้นตามหลักของโวลต์ไจเคอร์ แรงดันตกคร่อมส่วนใหญ่จะอยู่ที่ C_1 หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนนั้นจะมีค่าสูงกว่าเมื่อป้อนแรงดันถึงค่าหนึ่ง จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวมีค่าเกินค่าวิกฤต ดิสชาร์จบางส่วนก็เริ่มเกิดขึ้น เมื่อแรงดันเพิ่มสูงกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ดิสชาร์จจะเปลี่ยนจากโคโรนาไปเป็นดิสชาร์จแบบขนแปรงวิ่งคืบหน้าไปตามผิวฉนวนแข็ง ความเข้มของดิสชาร์จบางส่วนตามผิวจะขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้าของฉนวนแข็ง C_2 ถ้าค่า C_2 ยิ่งมากดิสชาร์จบางส่วนตามผิวจะยิ่งเข้มแรงมากขึ้น

ในกรณีของแรงดันกระแสสลับ กระแสดิสชาร์จที่ไหลจากปลายดิสชาร์จขนแปรงผ่านเนื้อฉนวนเป็นกระแสประจุ (Displacement Current) ซึ่งจะทำให้ดิสชาร์จตามผิวขยายตัวคืบหน้ามากขึ้นได้ในกรณีแรงดันกระแสตรงซึ่งค่าแรงดันที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา ดิสชาร์จตามผิวจะเกิดได้ยาก หรือไม่เกิดเลย เพราะไม่มีกระแสประจุ การดิสชาร์จบางส่วนตามผิวจะขึ้นอยู่กับสภาพนำไฟฟ้าของผิวและฉนวนสำหรับแรงดันอิมพัลส์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงรวดเร็วของแรงดันต่อเวลา dv/dt นี้เป็นผลให้กระแสประจุมีค่าสูง ด้วยเหตุนี้เองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์จึงมีพลังงานสูง จากรูปลักษณะและดิสชาร์จบางส่วนตามผิว ทำให้สามารถทราบขีดและขนาดของแรงดันอิมพัลส์ได้

5.5 ดิสชาร์จบางส่วนภายใน

ดิสชาร์จบางส่วนภายในหมายถึง ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ที่ซึ่งมีโพรงหรือฟองก๊าซ หรือสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลัก อันทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบๆ ซึ่งอาจพิสูจน์ได้จากการวิเคราะห์ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกันวางซ้อนกัน ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเมื่อชั้นฉนวนซ้อนได้รับแรงดันถึงระดับหนึ่งแล้วจะทำให้ฉนวนโดยรอบเสียหาย เกิดการกักคร่อน การฉนวนเสื่อมสภาพ อายุการใช้งานจะสั้นลงและในบางกรณีอาจนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ได้ในที่สุด การวัดและประเมินค่าดิสชาร์จบางส่วนภายในจะใช้วิธีวิเคราะห์จากวงจรสมมูลดังหัวข้อ 5.6



a) การเกิดดิสชาร์จภายในสายเคเบิลแบบ Treeing b) ฉนวนในสายเคเบิลเกิดเบรคดาวน์ตามเส้นทางของการเกิด Treeing c) การเกิดดิสชาร์จภายในสายเคเบิล treeing อีกรูปแบบหนึ่ง

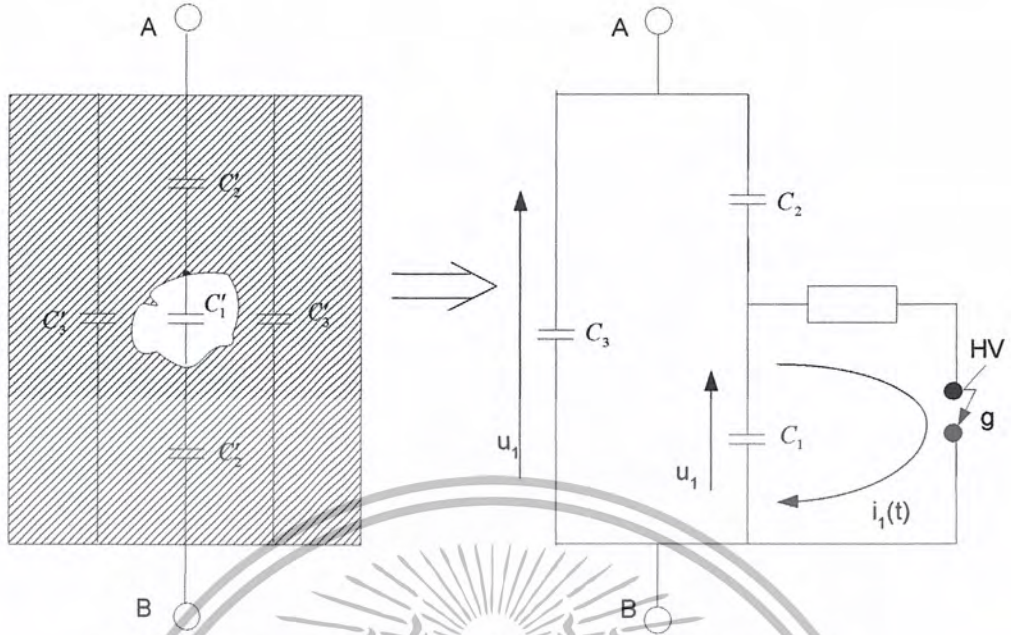
รูปที่ 5-5 ดิสชาร์จภายในและตัวอย่างการเกิดความเสียหายของการเกิดดิสชาร์จภายในสายเคเบิล

5.6 วงจรสมมูลการเกิดดิสชาร์จภายใน

วัสดุฉนวนมีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวนและฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด A-B แสดงในรูปที่ 6 a) โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_2' ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ C_2' เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_1 นี้จะรวมกันได้เป็น C_2 ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ที่อยู่โดยรอบของ C_2' จะให้ค่าเป็น C_3' และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_3 ดังรูปที่ 6 b) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_1 จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ C_3 ซึ่งมีค่ามากกว่า C_2 มากๆ

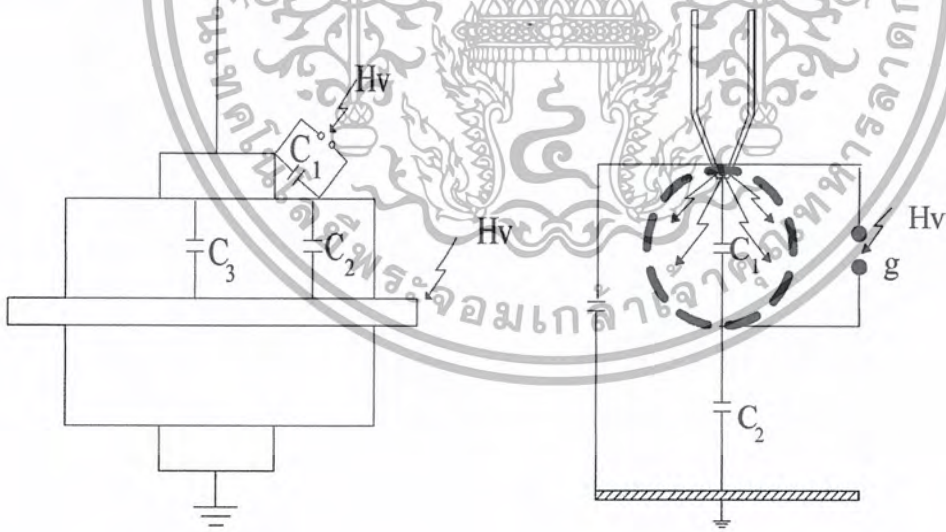
ถ้าแรงดันที่ป้อนทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรคดาวน์ของโพรงก๊าซที่แทนด้วย C_1 ก็จะเกิดเบรคดาวน์ในโพรงก๊าซ ซึ่งแทนด้วยแกป g โดยมีความต้านทาน $R1$ ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสดิสชาร์จ $i_d(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์กว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก Δu_1 ที่โพรงก๊าซเกิดการปล่อยประจุออกมาเป็น Δq_1 กระแส $i_d(t)$ นี้ไหลอยู่ภายในซึ่งไม่สามารถวัดได้ แต่การดิสชาร์จของ C_1 ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ C_2 และ C_3 ของวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A-B เท่ากับ Δu_1 ซึ่งหาได้จากประจุที่อัดไว้ที่ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-6 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิซชาร์จบางส่วนภายใน

วงจรสมมูลในรูปที่ 5-6 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ PD แบบโคโรนาและดิซชาร์จตามผิว แสดงดังรูปที่ 5-7



a) โคโรนาดิซชาร์จ

b) ดิซชาร์จตามผิว

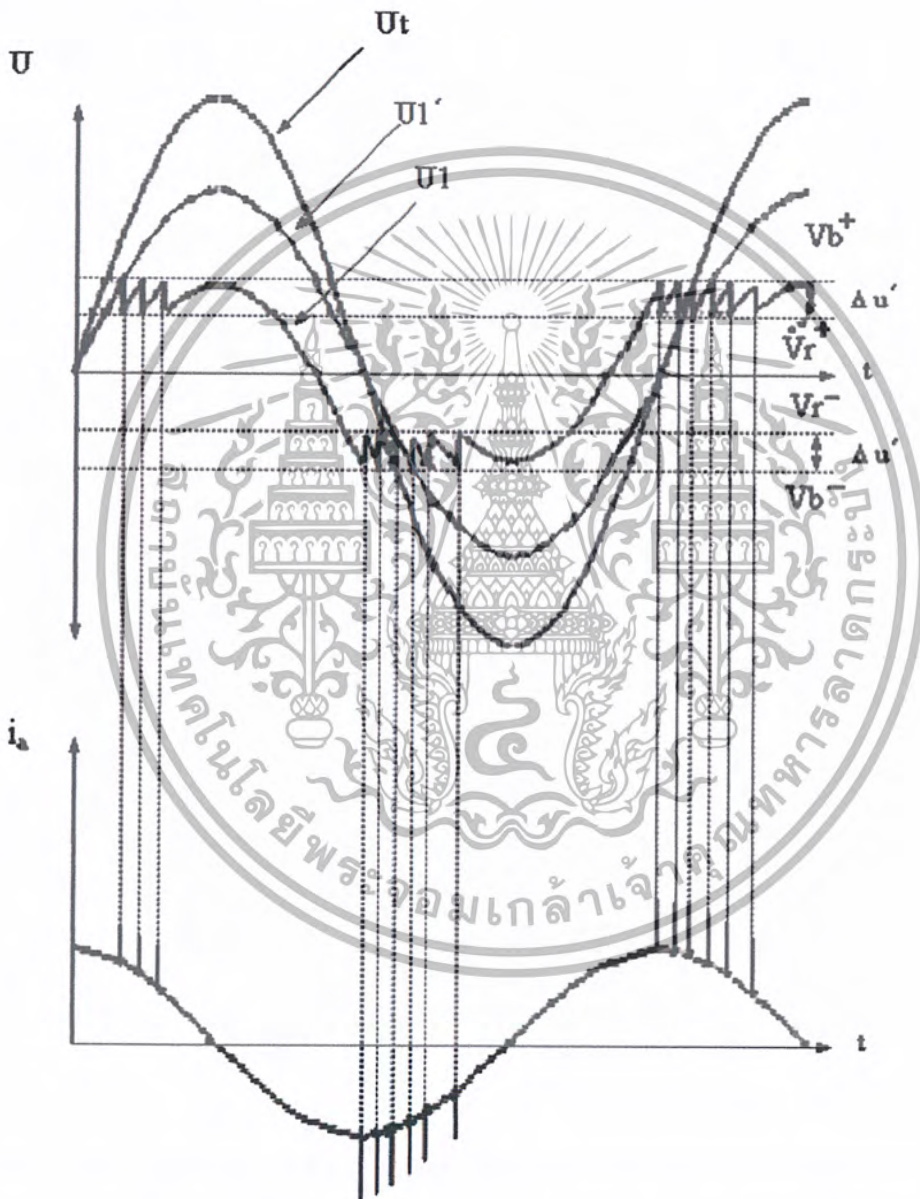
รูปที่ 5-7 วงจรสมมูลของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดิซชาร์จและดิซชาร์จตามผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 ธรรมชาติของการเกิดดิสราร์จบางส่วน

5.7.1 ลักษณะการเกิดดิสราร์จซ้ำ

ในทางปฏิบัติ PD อาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังรูปที่ 5-8 โดยที่ U_t คือ แรงดันตกคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์ U_b คือแรงดันเบรกดาวนของ โพรงก๊าส U_r คือแรงดันหลัง เบรกดาวนของ โพรงก๊าส U_1 คือแรงดันคร่อมโพรงก๊าส U_1' คือแรงดันคร่อมโพรงก๊าสถ้าไม่มีการเกิด PD และ i_a คือ กระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ตามลำดับ



รูปที่ 5-8 แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าสและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD

5.7.2 ลักษณะรูปร่างของกระแสพิสัยขารังบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแก๊สหรือโพรงก๊าซเล็กๆ ในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 5-9 ขณะเกิด PD กระแสที่ไหลผ่านแก๊สจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแก๊สสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแก๊สหมดกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว และกระแสที่ลดลงนี้จะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ จะพบว่าความกว้างของกระแสพัลส์ที่เกิดจาก PD ในฉนวนจะอยู่ในช่วงเวลา 1.5 นาโนวินาที ถึงช่วงเวลาเป็นหลัก 100 นาโนวินาที ดังนั้นกระแสพัลส์ดังกล่าวจึงมีสเปกตรัมของความถี่ที่มีแบนด์วิดท์กว้าง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไป และอาจจะมีความกว้างถึง 200 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งการเกิด PD จากลักษณะการเกิดทรีอิง (treeing) ในเนื้อฉนวนจะมีช่วงเวลาของกระแสพัลส์กว้างที่สุด



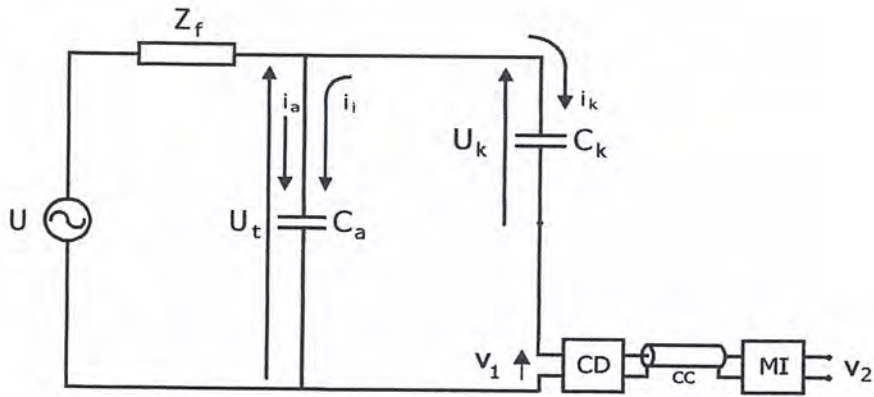
รูปที่ 5-9 ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแก๊สเล็กๆ

5.8 หลักการตรวจจับ PD

การตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธี โดยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่างๆ ของ PD การวัดผลของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์

5.8.1 วงจรพื้นฐานและการวิเคราะห์วงจรตรวจจับพิสัยขารังบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 602270:1998 จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงหรือแรงดันทดสอบ U ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่ายหรืออิมพีแดนซ์ Z_f วัสดุทดสอบ (Test object) C_c ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling capacitor) C_k อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling device) CD สายเคเบิลนำสัญญาณ (Connecting cable) CC และเครื่องมือวัด (Measuring instrument) MI ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 5-10



รูปที่ 5-10 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

5.9 หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง U ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบซึ่งควรเป็นหม้อแปลงทดสอบที่ปลอดภัย PD ที่แรงดันทดสอบเป็นต้น

2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์ Z_f ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์ และ PD ที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายเป็นต้นและหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกัน PD จากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่าย ตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้และปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรอง เช่น ตัวเหนี่ยวนำ (High voltage inductor) หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ (High voltage low-pass filter) เป็นต้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองอีก เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทดสอบมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว โดยเฉพาะหม้อแปลงปลอดภัย PD

3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง C_a , C_k และ CD ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับ PD ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีความเหนี่ยวนำภายในต่ำ ปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ

4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์ i_i ที่ไหลในวงจรทดสอบ เนื่องจากการเกิด PD โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD กับ MI อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) และฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบมิให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่สำคัญอีก 3 ประการ คือเป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplified) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ และเป็นอุปกรณ์แสดงผล PD

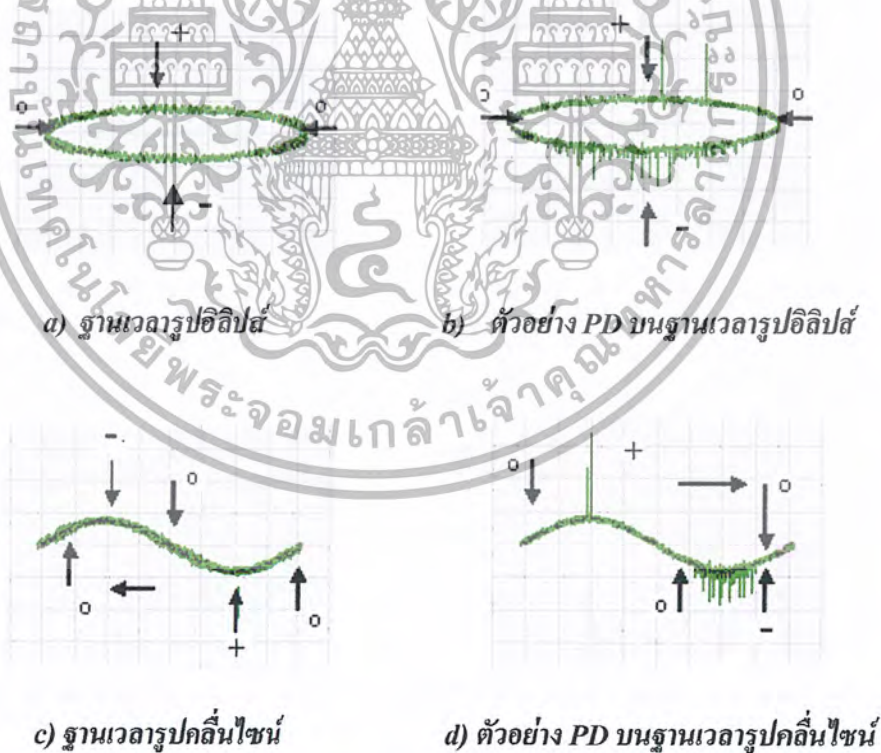
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทํางานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจํา PD เริ่มจากคํอยๆป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย U ผ่านตัวกรอง Z_f ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิด PD ที่วัสดุทดสอบ C_a (ถ้าฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นมีความบกพร่อง) ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ C_a ทำให้ C_k จะคายประจุประจุไปที่ C_a เพื่อชดเชยแรงดันตกนั้น ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์ i_i ไหลวนครบวงจรซึ่งประกอบด้วย C_k, C_a และ CD ดังนั้น CD และ MI วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง C_a กับ C_k โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์ i_i เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

5.10 การแสดงผลคิซาร์จบางส่วน

การวัด PD อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น micro-volt (μV), picocolomb (pC) ได้ แต่จะทราบเพียงขนาดของ PD เท่านั้น วิธีที่นิยมใช้แสดงผลวัด PD ในปัจจุบัน คือ การแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป ซึ่งอาจแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลิปส์ ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งขดขยอคลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 5-11a และ 5-11b หรือแสดงให้รูปคลื่นพัลส์ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 5-11c และ 5-11d

การแสดงผล PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้องและสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน การแสดงผลบนฐานเวลารูปอิลิปส์ มีข้อดี คือ แยกได้ว่า PD เกิดจากสาเหตุอะไร

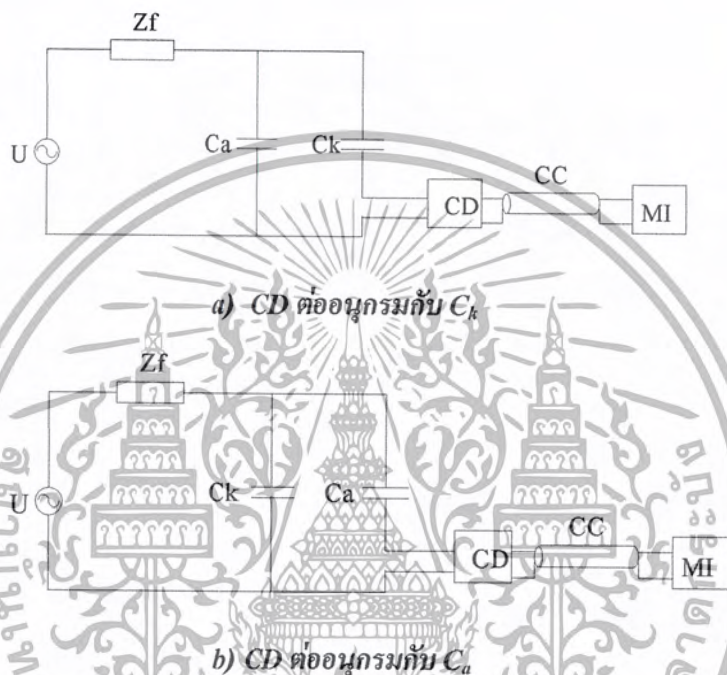


รูปที่ 5-11 การแสดงผลของ PD (เครื่องตรวจวัด PD ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจต)

5.11 การต่อระบบวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ

5.11.1 การต่อระบบวงจรระบบวัด PD

การต่อระบบวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ จะมีความแตกต่างตรงที่การต่ออิมพีแดนซ์วัด z_m ซึ่งมาตรฐานการวัด PD ฉบับใหม่คือ IEC 60270 เรียกว่า อุปกรณ์คาบเกี่ยว (coupling device) CD ประกอบเป็นอิมพีแดนซ์ z_{mi} ต่อที่ต้นระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบดังในรูปที่ 5-12a) และ 5-12 b) ซึ่งเป็นวงจรตรวจจับ PD วิธีตรง (straight detection circuit)

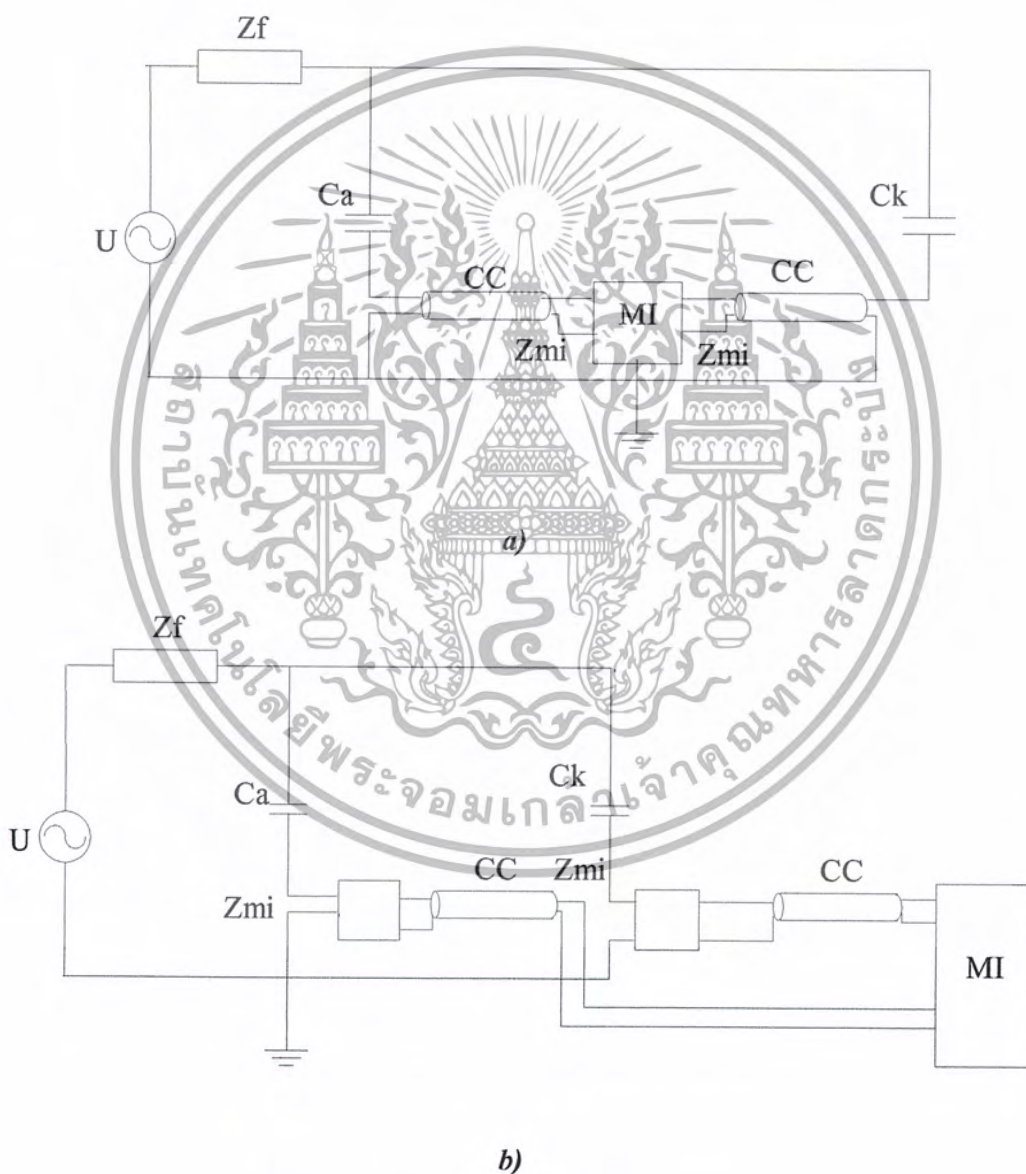


รูปที่ 5-12 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบตรง

ในวงจร	$U \sim$: แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ
	Z_f	: ตัวกรอง
	Z_{mi}	: อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ
	CC	: เคเบิลวัด
	C_a	: ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ
	C_k	: ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยว
	CD	: อุปกรณ์คาบเกี่ยว

ความแตกต่างของวงจรแบบ a) และแบบ b) คือแบบ a) ตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมกับ Ck ที่มีศักย์เป็นดิน เป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ ไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกควาน์ เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ Ck แต่ความไวในการวัดจะน้อยกว่าแบบ b) เพราะ PD ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในวัสดุทดสอบ Ca แบบ b) จะมีความไวสูงกว่าเพราะตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมโดยตรงกับวัสดุทดสอบ Ca ค่าเก็บประจุทดสอบสเตรย์ทั้งหลายด้านแรงสูงกับดินจะเพิ่มค่า Ck ทำให้ความไวของวงจรวัด PD สูงขึ้น แต่มีข้อเสียที่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกควาน์ที่วัสดุทดสอบ จะทำให้เครื่องวัด PD เสียหายได้

นอกจาก 2 วิธีดังกล่าวแล้วการวัด PD อาจจะต้องวงจรวัดได้อีก 2 แบบดังรูปที่ 5-13



รูปที่ 5-13 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุลดังรูปที่ 5-13 a) วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบคอมมอนโหมด (Common mode) ในรูปที่ 5-13 b) เป็นวงจรทดสอบแยกขั้วสัญญาณได้ (Polarity discrimination) มีข้อดีเช่นเดียวกับวงจรทดสอบแบบสมดุล แต่มีความสามารถเพิ่มเติมในการแยกขั้วสัญญาณรบกวนจากภายนอกออกจาก PD ภายในวงจรได้ แต่มีข้อเสียของวงจรในรูปที่ 5-13 คือ อาจทำให้เครื่องวัดได้รับความเสียหายในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดเบรคความถี่และไม่เหมาะในการทดสอบวัสดุที่มีขีดคั่นขนาดใหญ่ เนื่องจากขีดคั่นไม่ได้ต่อลงกราวด์โดยตรง ดังนั้นถ้ามีสัญญาณรบกวนที่ขีดคั่นจะทำให้ความไวในการวัด PD ลดลง

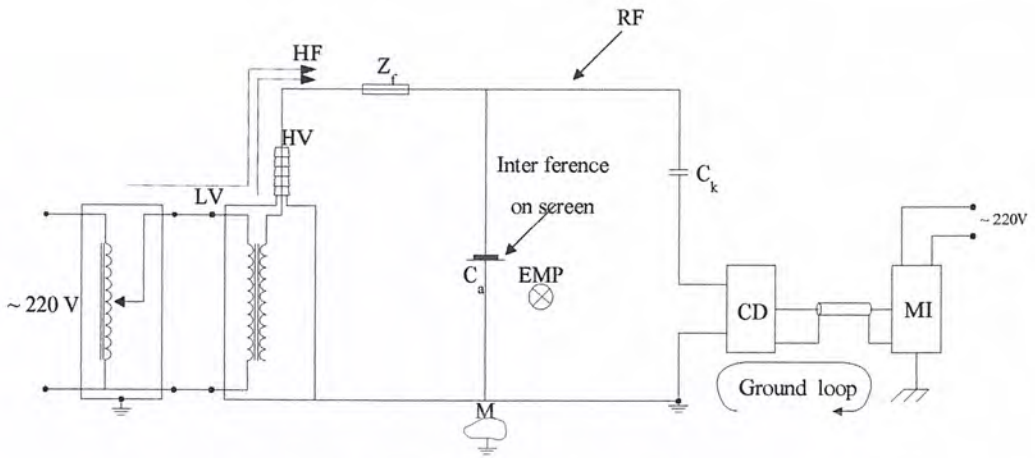
การเปรียบเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบคิสซาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ (q_{cal}) ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ถ้าเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่า PD ได้ a_1 ดังนั้น Scale factor $K_1 = q_{cal} / a_1$ หลังจากทำการปรับเทียบเสร็จแล้วต้องเอาเครื่องปรับเทียบคิสซาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ และในขณะที่ทำการทดสอบที่แรงดันตามมาตรฐานกำหนด ถ้าในขณะนั้นเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่าได้ a_2 ดังนั้นประจุที่ปรากฏของ PD คือ $q = K_1 a_2$ และความไวของวงจรทดสอบ $q_{min} = 2 K_1 h_n$ เมื่อ h_n คือค่าสูงสุดของระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ที่อ่านจากเครื่องตรวจจับ PD หลังการปรับเทียบก่อนการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบ

5.12 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน

เนื่องจากสัญญาณ PD มีขนาดเล็ก ดังนั้นในการทดสอบ PD สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นย่อมมีผลต่อค่าที่วัดได้ แต่เราสามารถลดสัญญาณรบกวนให้เหลือน้อยลงเพื่อให้วงจรทดสอบมีความไวสูงขึ้นได้ โดยมีรายละเอียดของสัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบ และวิธีการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ดังต่อไปนี้

5.12.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดคิสซาร์จบางส่วน

สัญญาณรบกวนประกอบด้วย สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางอากาศ และทางแหล่งจ่าย นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการคิสซาร์จของอุปกรณ์ที่เป็นโลหะและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบหรือกราวด์ไม่ดี การเกิดกราวด์ลูป (Ground loop) และเกิดสัญญาณออสซิลเลทเนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ไม่ดีหรือหลวม เป็นต้น รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 5-14



รูปที่ 5-14 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ

โดยที่

HF คือ สัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายได้แก่ ฮาร์มอนิกส์สูงๆ จากเมนโดยตรง จากอุปกรณ์พวกไทรสเตอร์ และ PD จากหม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น

RF คือ คลื่นรบกวนวิทยุซึ่งอาจจะเป็นคลื่นวิทยุโดยตรง คลื่นรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้า แรงดันสูง หรือหลอดคาโทดออสเซนส์ที่อยู่ใกล้เคียง

EMP คือ สัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการทำงานของ สวิตช์หรือไทรสเตอร์

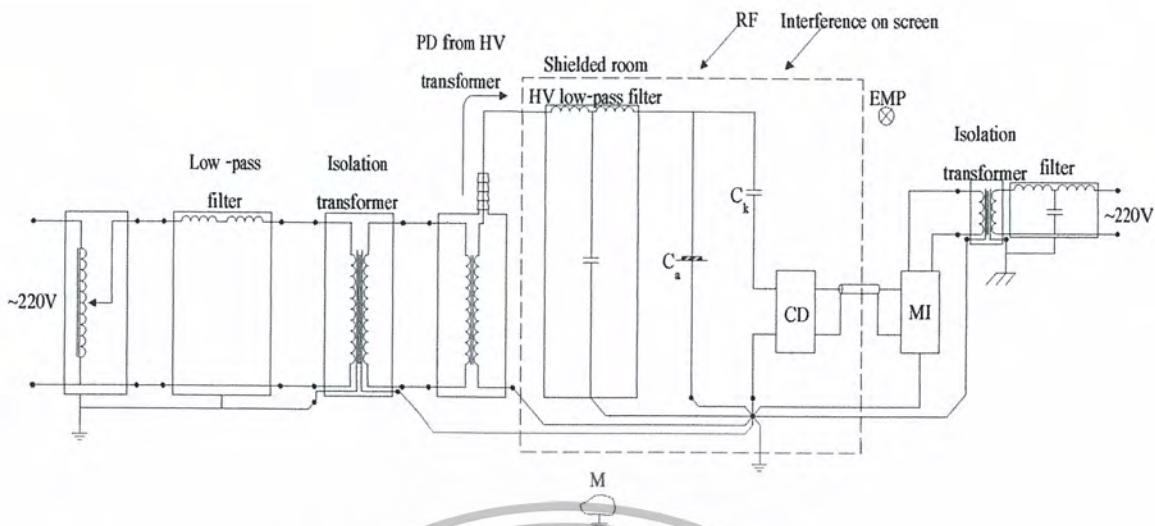
Interference on screen คือ สัญญาณรบกวนที่ซิลด์ หรือสกรีน หรือที่ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบที่มีซิลด์ขนาดใหญ่ เช่น โคมเบ็ด เป็นต้น

Ground loop คือ การเกิดวงจรรอบของสายดิน

M คือ โลหะที่ไม่ได้ต่อลงดินและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ

5.12.2 การลดสัญญาณรบกวน

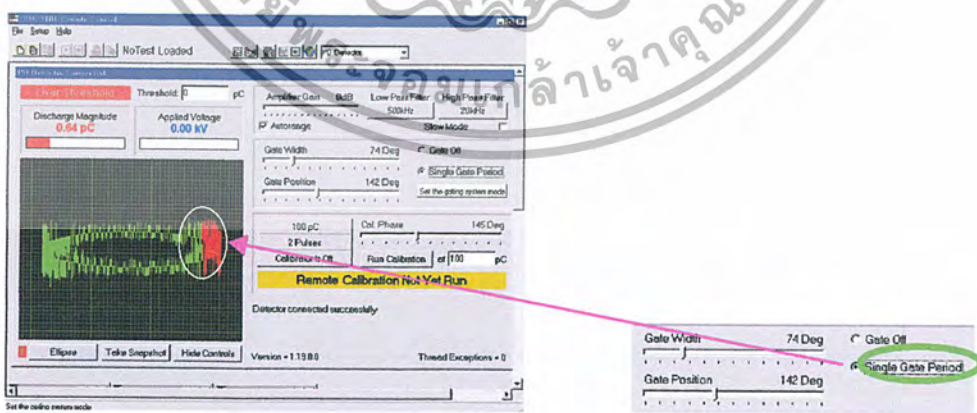
การลดสัญญาณความถี่สูง เช่น พวกรังสีสูงๆ จะใช้ตัวกรองแรงดันต่ำ และอาจจะเพิ่มหม้อแปลงขดลวดแยก (Isolation Transformer) ช่วยก็ได้ โดยต่อไว้ทางด้านขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดสอบ ในกรณีที่เกิด PD ในหม้อแปลงทดสอบจะต้องใช้ตัวกรองแรงดันสูงต่อทางด้านขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงทดสอบ การลดสัญญาณรบกวน RF และ EMP ซึ่งเข้ามาทางอากาศ ทำได้โดยการทดสอบในห้องซิลด์ การแก้ปัญหาเรื่องกราวนด์รูปทำได้โดยการต่อกราวนด์รวมกันเพียงจุดเดียว ตัวอย่างการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวน แสดงในรูปที่ 5-15



รูปที่ 5-15 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน

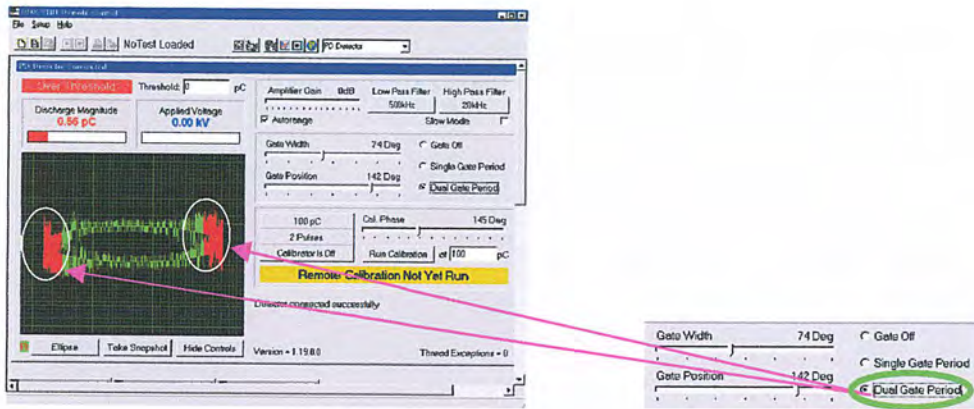
นอกจากการลดสัญญาณรบกวน โดยตรงแล้ว ยังมีวิธีการลดสัญญาณรบกวนทางอ้อมอีกหลายวิธีด้วยกัน ที่นิยมใช้กันมากคือ

- 1) วงจรทดสอบแบบสมมูล ใช้ลดสัญญาณรบกวนแบบคอมมอนโหมด เช่น สัญญาณรบกวน ที่เข้ามาทางแหล่งจ่าย เป็นต้น
- 2) การลดสัญญาณรบกวนโดยวิธี “หน้าต่างเวลา” (Time window method) วิธีนี้เป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน โดยจะลดสัญญาณรบกวนที่หึ่งโครโนซ์กับความเร็วของแหล่งจ่ายเท่านั้นเช่น สัญญาณรบกวนเนื่องจากการทำงานของทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ด้วยการใส่สวิตช์ตัดหรือเปิด วงจรตรงตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวน เพื่อไม่ให้ไปปรากฏที่เอาต์พุตของเครื่องจับ PD แสดงในรูปที่ 5-16ก) และ 5-16ข)



ก)การลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี “หน้าต่างเวลาแบบช่วง”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



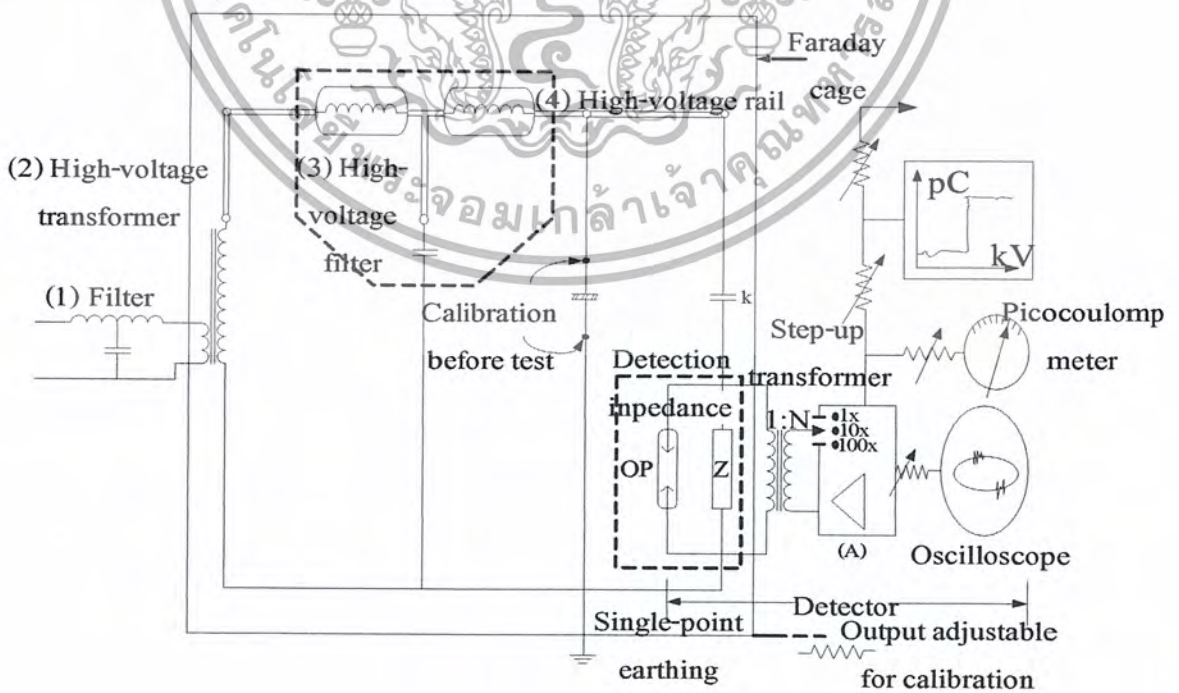
(ข) การลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี “หน้าต่างเวลาแบบ 2 ช่วง”

รูปที่ 5-16 วิธีการลดสัญญาณรบกวน

หมายเหตุ: บริเวณที่เลือกไว้ คือ บริเวณสีแดงเป็นบริเวณที่สัญญาณรบกวนมากจึงมีการบังสัญญาณไว้ และ จะไม่นำค่าไปพิจารณา

3) การลดสัญญาณรบกวน โดยการใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital signal processing, DSP) วิธีนี้นิยมใช้ในการลดสัญญาณรบกวนแบบแถบความถี่แคบ (narrow-band noise) เช่นสัญญาณวิทยุ AM (แบนด์วิดท์ของแต่ละสถานีประมาณ 9 กิโลเฮิรตซ์) ออกจากสัญญาณ PD ซึ่งมีแถบความถี่กว้างหลายร้อยกิโลเฮิรตซ์

5.13 ตัวอย่างวงจรวัด PD



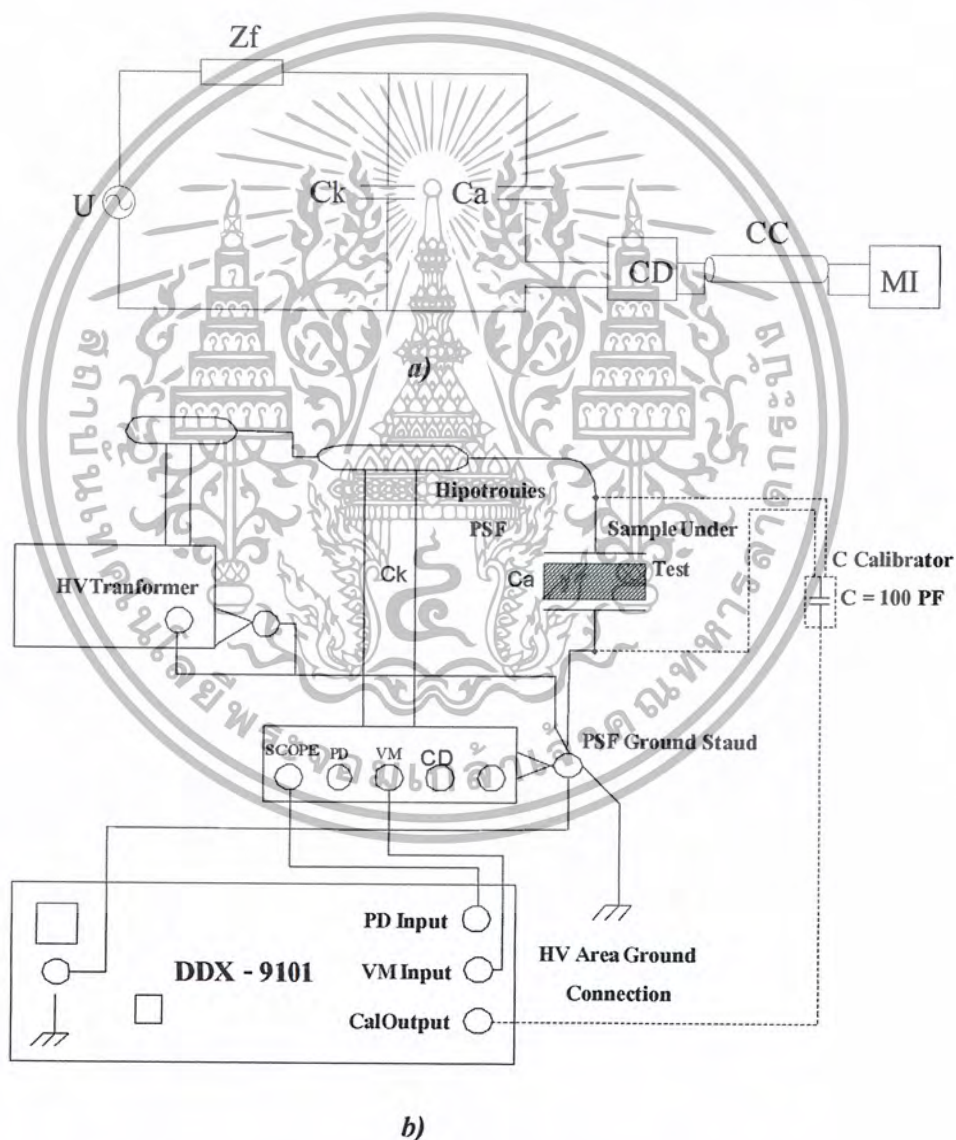
รูปที่ 5-17 วงจรตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5-17 เป็นตัวอย่างวงจรตรวจจับ PD ที่สมบูรณ์วงจรหนึ่ง โดยที่ได้มีการแสดงถึงวงจรป้องกันแรงดันเกินในส่วนของสัญญาณที่จะนำไปวิเคราะห์และได้มีการแสดงถึงสัญญาณเอาต์พุตแบบต่างๆ ไม่ว่าจะแสดงผลด้วยออสซิลโลสโคป, พิโคคูลอมป์ มิเตอร์ หรือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบกับปริมาณ PD ที่เกิดขึ้น

5.14 วิธีการทดสอบ

5.14.1 ตัวอย่างการทดลองดังรูปที่ 5-18 โดยที่อุปกรณ์ทดสอบ (C_u) จะใช้ปลายแหลม กับ ระบายโดย ต่อหรือทางด้านไฟฟ้าแรงสูงและระบายทางด้านกราวด์ เพื่อศึกษาโคโรนาดีสชาร์จ



รูปที่ 5-18 วงจรการทดลอง a) วงจรสมมุทธ์ b) วงจรทดสอบจริง

*** ก่อนทำการทดลองจะต้องนำ C Calibration ออกจากวงจรทดสอบทุกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

- U คือ หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 75 kV, 40 kVA, PD < 2 pC
- Ck คือ Coupling Capacitor 100 kV
- PD คือ ตัวตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน โดยที่ภายใน PD DETECTOR ได้รวมเอา PD Calibrator ไว้ด้วย
- Ca คือ Test Object ได้แก่ อุปกรณ์จำลอง PD

5.14.2 จัดเตรียมรายงานผลการทดสอบ PD และวิธีการวัด PD มีรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก

5.14.3 ทำการปรับเทียบชุดวัด PD มีรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ข

5.14.4 ทำการจ่ายแรงดันและการเก็บค่าการทดสอบมีวิธีการดังแสดงในภาคผนวก ข และได้แสดงผู้ควบคุมการจ่ายแรงดันไว้ด้วย

5.14.5 หลังจากทำการทดสอบ PD ของ Test Object ในวัสดุที่หนึ่งเสร็จแล้วทำการบันทึกค่าแล้วทำการเปลี่ยน Test Object มีละเอียดดังต่อไปนี้

5.14.5.1 วัสดุที่ใช้ทดสอบ เป็นแบบ Plate - rod โดยที่ห้ามทดสอบที่แรงดันเกิน 22kV โดยให้ระนาบต่ออยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง และรีดต่อลงกราวด์

5.14.5.2 วัสดุที่ใช้ทดสอบ เป็นแบบ Plate - Sphere โดยที่ห้ามทดสอบที่แรงดันเกิน 22kV โดยให้ระนาบต่ออยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง และปลายทรงกลมต่อลงกราวด์

5.14.5.3 วัสดุที่ใช้ทดสอบ เป็นแบบ Sphere - Plate โดยที่ห้ามทดสอบที่แรงดันเกิน 22kV โดยให้ปลายทรงกลมต่อทางด้านไฟฟ้าแรงสูง และระนาบต่อลงกราวด์

5.14.5.4 วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็น Internal Discharge แบบ Multi Voids โดยที่ห้ามทดสอบที่แรงดันเกิน 22 kV วัสดุทดสอบจำลองมีการเจาะรูไว้ตรงกลางของแผ่นอะครีลิก หลายรู โดยให้ปลอมเป็นโพรงอากาศเพื่อศึกษา การเกิด PD แบบ Internal Discharge

5.14.5.5 วัสดุที่ใช้ทดสอบ เป็น Internal discharge แบบ Single Void (โพรงอากาศเดียว) โดยที่ห้ามทดสอบที่แรงดันเกิน 25 kV วัสดุทดสอบจำลองมีการเจาะรูไว้ตรงกลางของแผ่นอะครีลิก 1 รูปลอมเป็นโพรงอากาศ

5.14.5.6 วัสดุที่ใช้ทดสอบ เป็นแบบ Internal Discharge แบบ single Extraneous Object (โพรงอากาศที่มีสิ่งแปลกปลอม) โดยที่ห้ามทดสอบที่แรงดันเกิน 25 kV โดยวัสดุทดสอบจำลองมีการเจาะรูไว้ตรงกลางอะครีลิกปลอมเป็นโพรงอากาศและให้มีเศษเหล็กเป็นสิ่งแปลกปลอมอยู่ในโพรงอากาศ

5.14.5.7 วัสดุที่ใช้ทดสอบ เป็นแบบ Surface Discharge (รีด - ระนาบ) โดยที่ห้ามทดสอบที่แรงดันเกิน 25 kV โดยให้รีดต่ออยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง และแผ่นระนาบอะครีลิกต่อลงกราวด์

5.14.5.8 วัสดุที่ใช้ทดสอบ เป็นแบบ Surface Discharge (ทรงกลม – ระนาบ) โดยที่ห้ามทดสอบที่แรงดันเกิน 23kV โดยให้ปลายทรงกลมอยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูงและแผ่นระนาบอะคริลิกต่อลงกราวด์

5.14.6 ในส่วนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

5.14.6.1 บันทึกค่าประจุที่รู้ค่าของชุดปรับเทียบ และที่อ่านได้จากเครื่องตรวจจับรวมทั้ง Background noise

5.14.6.2 ถ่ายแรงดันทดสอบให้กับอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบวัด PD ค่อยๆเพิ่มแรงดันครั้งละ 1 kV

5.14.6.3 บันทึกค่า PD จาก Test Report โดยให้แสดงค่า PD บนฐานรูปวงรีและฐานรูปคลื่นไซน์ที่ค่า PD สูงสุด และบันทึกค่าขนาดของ PD (pc) ที่ระดับแรงดันต่างๆ (ห้ามป้อนแรงดันจน วัสดุทดสอบเกิดเบรกดาวน์)



5.15 ตัวอย่างผลการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนแบบ (Corona) plate – rod



1.ด้านไฟแรงสูง, 2. ต่อลงกราวน์

Date : 18/8/04

1 : plate – rod

2 : Nuttaphan Boonsaner

3 : kmitl ECC 105

4 : PD DDX 9101

5 : Time 23:40 น

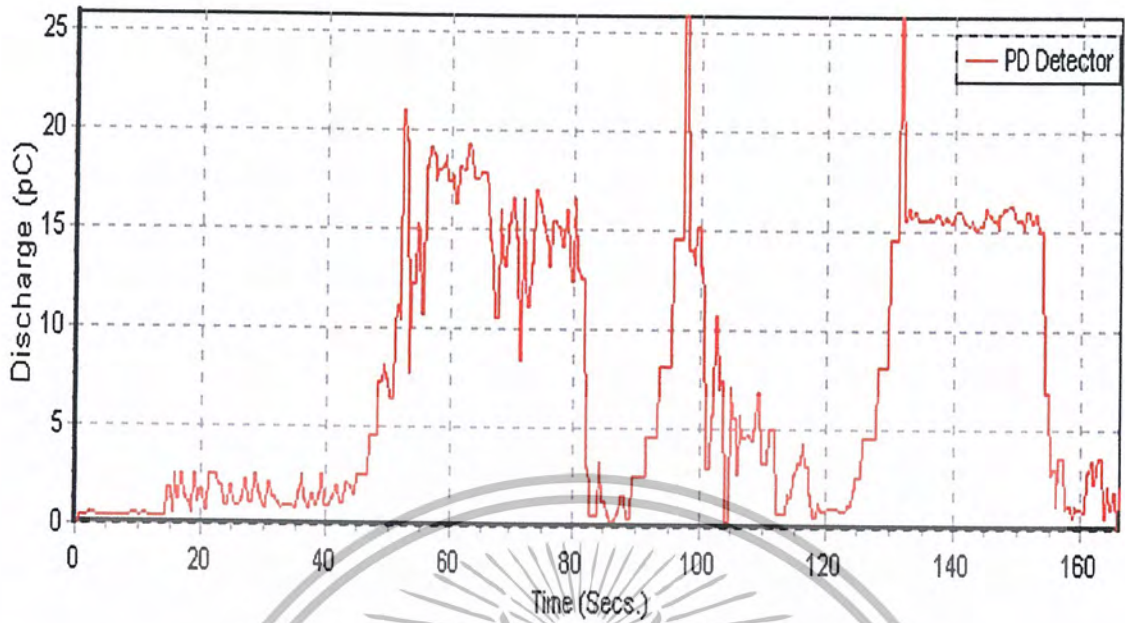
6 : ผู้ควบคุมการ Test อ. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

Time (HH:MM:SS)	Time (Secs)	% Nom. Rating	PD Detector (kV)	PD Detector (pC)
23:45:43	0.27	1.04	1.04	0.00
23:45:43	0.54	1.04	1.04	0.49
23:45:43	0.82	1.04	1.04	0.49
23:45:44	1.09	1.05	1.05	0.47
23:45:44	1.37	1.12	1.12	0.47
23:45:44	1.64	1.12	1.12	0.47
23:45:44	1.92	1.06	1.06	0.47
23:45:45	2.19	1.06	1.06	0.50
23:45:45	2.80	1.06	1.06	0.50
23:45:45	2.96	1.06	1.06	0.50
23:45:46	3.24	1.06	1.06	0.50
23:45:46	3.57	1.00	1.00	0.50
23:45:46	3.84	1.00	1.00	0.47
23:45:47	4.11	1.00	1.00	0.47
23:45:59	16.47	2.06	2.06	1.21
23:45:59	16.75	2.06	2.06	2.58
23:45:59	17.02	2.53	2.53	2.58
23:46:00	17.30	2.53	2.53	1.37
23:46:08	25.26	6.80	6.80	1.09
23:46:08	25.54	6.88	6.88	0.96
23:46:24	41.79	10.06	10.06	1.97
23:46:25	42.07	10.06	10.06	1.16
23:46:25	42.34	10.07	10.07	1.16
23:46:25	42.62	10.07	10.07	1.09

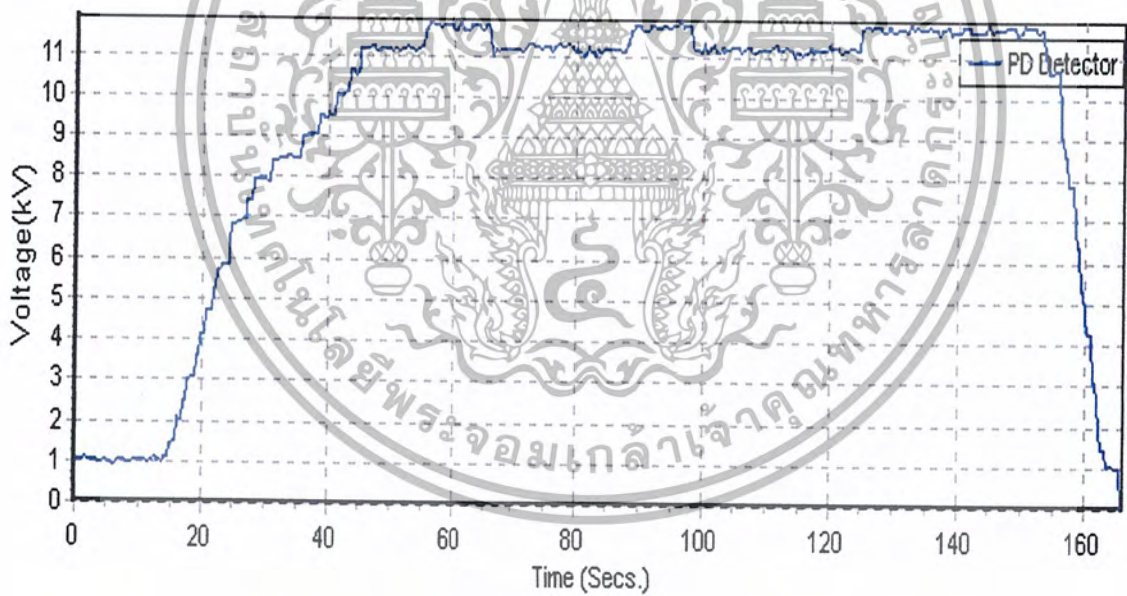
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time (HH:MM:SS)	Time (Secs)	% Nom. Rating	PD Detector (kV)	PD Detector (pC)
23:46:28	45.91	11.14	11.14	2.58
23:46:29	46.19	11.14	11.14	2.58
23:46:29	46.46	11.14	11.14	2.58
23:46:29	46.74	11.21	11.21	2.58
23:46:30	47.07	11.21	11.21	4.59
23:46:30	47.34	11.21	11.21	4.59
23:46:30	47.62	11.11	11.11	4.59
23:46:30	47.89	11.11	11.11	4.59
23:46:31	48.17	11.11	11.11	4.59
23:46:31	48.44	11.14	11.14	7.24
23:46:31	48.71	11.14	11.14	7.24
23:46:31	48.99	11.14	11.14	7.24
23:46:32	49.26	11.18	11.18	8.17
23:46:32	49.54	11.18	11.18	7.37
23:46:32	49.81	11.18	11.18	7.37
23:46:33	50.09	11.08	11.08	6.39
23:46:33	50.36	11.20	11.20	6.39
23:46:33	50.64	11.20	11.20	6.39
23:46:33	50.91	11.11	11.11	10.02
23:46:34	51.24	11.11	11.11	11.12
23:46:34	51.52	11.20	11.20	11.12
23:46:34	51.79	11.20	11.20	10.40
23:46:35	52.06	11.20	11.20	10.40
23:46:35	52.34	11.20	11.20	20.92
23:46:35	52.61	11.20	11.20	20.92
23:46:35	52.89	11.14	11.14	19.35
23:46:36	53.16	11.14	11.14	19.35
23:46:36	53.44	11.14	11.14	7.68
23:46:36	53.71	11.08	11.08	12.25
23:46:36	53.99	11.08	11.08	12.25
23:46:37	54.26	11.19	11.19	12.25
23:46:37	54.54	11.19	11.19	15.29
23:46:37	54.81	11.19	11.19	15.29
23:46:38	55.09	11.21	11.21	14.84
23:46:38	55.36	11.21	11.21	10.74
23:46:38	55.63	11.65	11.65	10.74
23:46:38	55.91	11.65	11.65	18.07
23:46:39	56.18	11.81	11.81	18.07
23:46:39	56.46	11.81	11.81	19.06
23:46:39	56.73	11.74	11.74	19.06
23:46:39	57.01	11.74	11.74	18.74
23:46:40	57.28	11.75	11.75	18.74
23:46:40	57.56	11.75	11.75	17.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



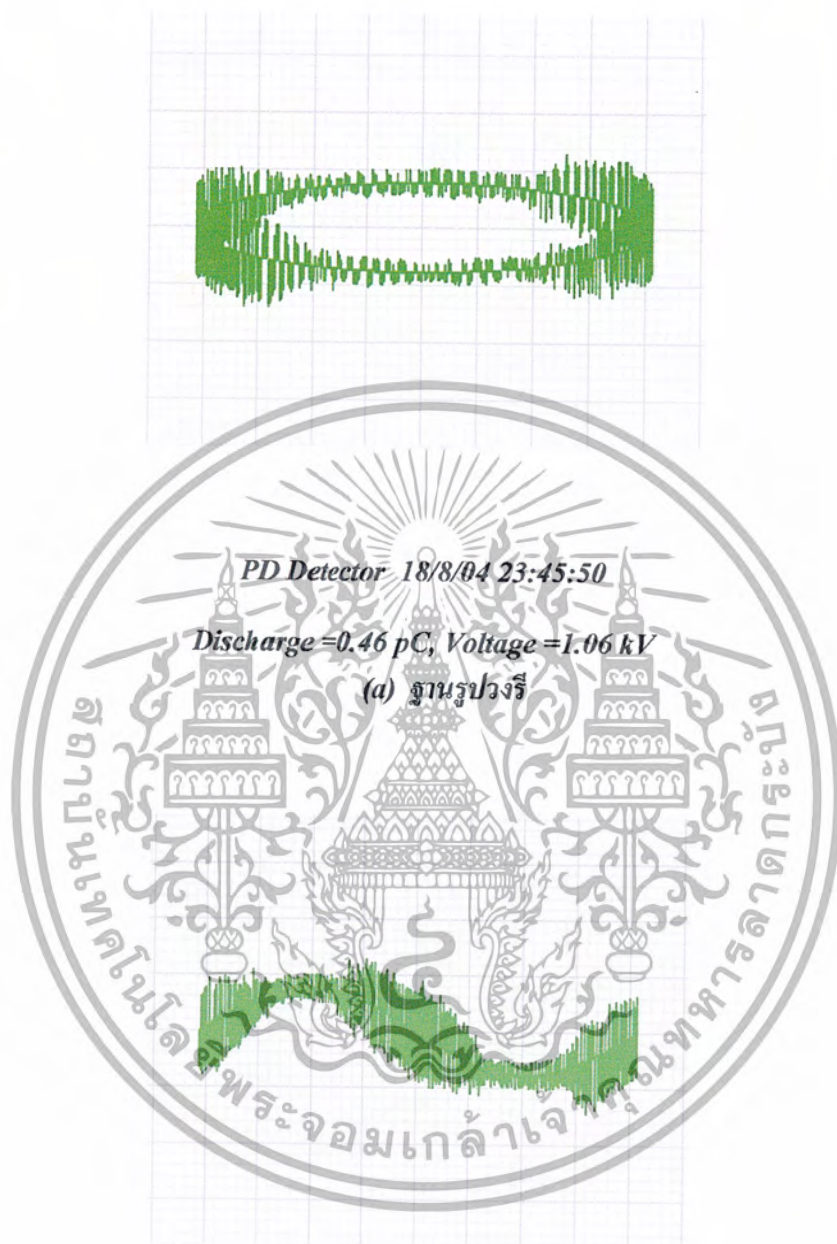
รูปที่ 5-19 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ PD และ เวลาทดสอบ



รูปที่ 5-20 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน และ เวลาที่ใช้การทดสอบ PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.16 ลักษณะก่อนการเกิด PD



PD Detector - 18/8/04 23:45:53

Discharge = 0.46 pC, Voltage = 1.06 kV

(b) ฐานรูปคลื่นไซน์

รูปที่ 5-21 ลักษณะก่อนการเกิด PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.16.1 ลักษณะการเกิด PD ขณะเริ่มเกิด

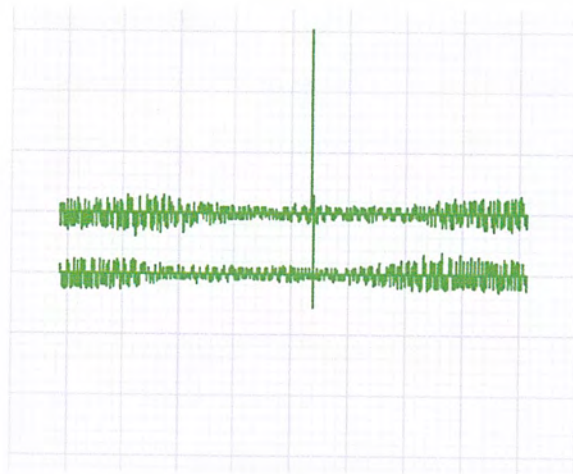


PD Detector - 18/8/04 23:47:27

Discharge = 0.35 pC, Voltage = 11.29 kV

(b) ฐานระนาบเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PD Detector - 18/8/04 23:47:39

Discharge = 3.14 pC, Voltage = 11.29 kV

(d) ฐานรูปคลื่นไซน์

รูปที่ 5-22 ลักษณะการเกิด PD ขณะเริ่มเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.16.2 ลักษณะการเกิด PD เมื่อเพิ่มแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ

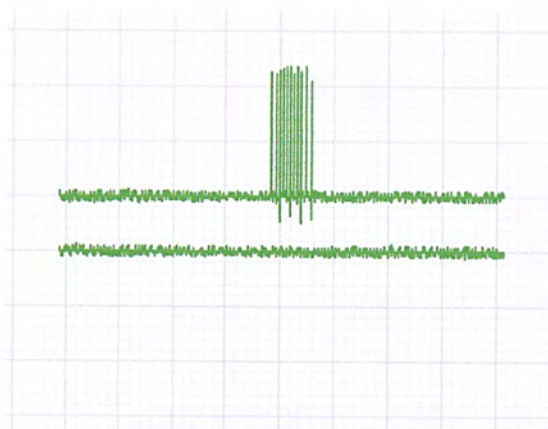


PD Detector - 18/8/04 23:48:01

Discharge = 15.73 pC, Voltage = 15 kV

(b) ฐานระนาบเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-23 ลักษณะการเกิด PD เมื่อเพิ่มแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.17 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดสอบ

ในการทำชุดทดสอบ Partial discharge และ ทำการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของชุดทดสอบ Partial discharge สรุปได้ว่า ถ้าอุปกรณ์ หรือ ฉนวนเกิดการดิสชาร์จบางส่วน อาจทำให้อายุการใช้งานลดลงหรือ อาจทำให้ระบบเกิดการเสียหายได้ ในส่วนชุดทดสอบ Partial discharge ได้มีการจัดสร้างขึ้นนั้นยังมีข้อบกพร่องอยู่ เนื่องจากการจ่ายแรงดันแล้วจะได้ยินเสียงของโคโรน่า ซึ่งถ้าเกิดโคโรนามากจนเกินไปอาจทำให้ชุดทดสอบ Partial discharge เกิดการเบรคควานี้ได้ และจะส่งผลไปยังเครื่องวัดการเกิด Partial discharge ได้ ทำให้เครื่องวัดเกิดความเสียหายได้



บทที่ 6

การทดสอบลูกถ้วยฉนวนด้วยแรงดันสูงความถี่สูง

โดยใช้หม้อแปลงเทสตา

6.1 บทนำ

หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง หรือหม้อแปลงเทสตามีใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตลูกถ้วยฉนวนและอุปกรณ์ฉนวนอื่นๆ โดยทั่วไปหม้อแปลงเทสตาจะใช้ในการตรวจสอบความสมบูรณ์หรือความบกพร่องทางกายภาพของลูกถ้วยฉนวน

6.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

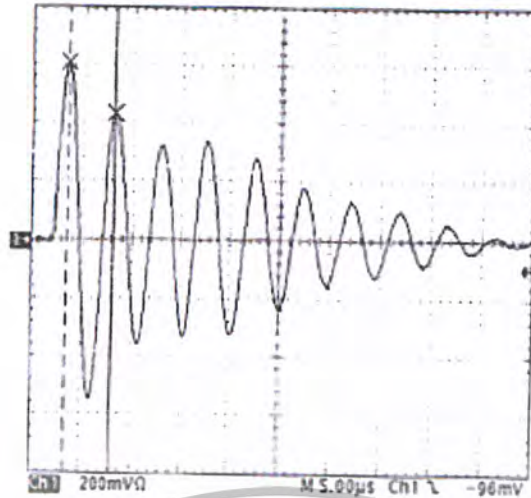
6.2.1 หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

จากรูปที่ 6-1 เป็นวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงเทสตาและส่วนประกอบอื่นๆ ของวงจรได้แก่ C_1 เป็นตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิ ส่วน C_2 เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้ารวมของขดลวดแรงสูง วัสดุทดสอบและของอุปกรณ์วัดแรงดันที่เกิดขึ้นทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเทสตาและมีสปาร์กแกป (Quenching Gap) เป็นตัวควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่จะถ่ายทอดไปยังขดลวด L_1 ซึ่งทำให้เกิดการเปิดปิดสปาร์กแกป และยังทำหน้าที่ตัดอาร์คหรือสปาร์กอีกด้วย



รูปที่ 6-1 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงเทสตา

โดยที่	C_1	คือ	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงดันต่ำ
	C_2	คือ	ค่าความจุไฟฟ้าทางด้านขาออก
	L_1	คือ	ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง
	L_2	คือ	ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง
	QG	คือ	ชุดสปาร์กแกป แบบกึ่งหันหมุน (Quenching Gap)



รูปที่ 6-2 รูปคลื่นที่ได้จากหม้อแปลงทดสอบที่ 212 kHz (5 μ s/div)

เมื่อย้ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ประมาณ 15 kV ให้กับตัวเก็บประจุ C_1 โดยที่ C_1 จะเก็บประจุจนกระทั่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าถึงระดับที่ทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างช่องอากาศ (Air Gap) สูญเสียค่าความเป็นฉนวนจะทำให้เกิดการเบรคความระหว่างช่องอากาศที่ตัวสปาร์กแก๊ป ทำให้วงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบกลายเป็นผลให้ C_1 ทำการคายประจุที่เก็บไว้ในรูปของสนามไฟฟ้าไปสู่ขดลวดปฐมภูมิ L_1 และ L_1 ก็จะเก็บพลังงานไว้ในรูปสนามแม่เหล็กเมื่อเก็บพลังงานเต็มที่แล้ว L_1 ก็จะถ่ายทอดพลังงานที่เก็บไว้กลับไปให้ C_1 ใหม่ ลักษณะของการถ่ายทอดพลังงานกลับไปกลับมาจะระหว่าง L_1 กับ C_1 ทำให้เกิดออสซิลเลท (Oscillate) คือเนื่องแบบ Damped oscillation ที่ความถี่สูงสำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 Hz ของไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ C_1 ใน 1 Cycle จะทำให้เกิดการอัดประจุและการคายประจุในช่วงครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบ ดังนั้นจะทำให้เกิดออสซิลเลทแบบ Damped oscillation อย่างต่อเนื่อง 100 ครั้งใน 1 วินาที ความถี่ออสซิลเลทที่ใช้จะสูงประมาณ 100-250 kHz ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance)

ค่าโดยประมาณของความถี่ที่ทำให้เกิดการออสซิลเลทนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 6-1

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (6-1)$$

- เมื่อ L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ มีหน่วยเป็น H
 C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านปฐมภูมิ มีหน่วยเป็น F
 f_1 คือ ความถี่ออสซิลเลท มีหน่วยเป็น Hz

การเกิดออสซิลเลทในวงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลาจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาซึ่งมีความถี่เช่นเดียวกับขดลวดปฐมภูมิ ดังนั้นวงจรทางด้านปฐมภูมิจะส่งพลังงานไปยังขดลวด ทางด้าน ทุติยภูมิคือ L_2 กับ C_2 ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิเริ่มลดลงและในขณะที่แรงดันทางด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้น ถ้าเพื่อค่าความเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิ L_2 และค่าเก็บประจุ (C_2) มีค่าเท่ากับทางด้านปฐมภูมิ คือ $L_1 C_1 = L_2 C_2$ จะทำให้เกิดออสซิลเลทแบบหน่วง (Damped oscillation) อย่างต่อเนื่อง และพลังงานที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

$$W = \frac{CU^2}{2} \tag{6-2}$$

โดยที่ W คือ พลังงานที่เกิดขึ้น
 C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
 U คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ตัวเก็บประจุ

และสามารถพิจารณาหาค่าแรงดันทางด้านขาออกของวงจรสร้างแรงดันสูงและความถี่สูงได้ตามสมการที่แสดงดังนี้

$$U_2 = \sqrt{\eta \frac{C_1}{C_2}} * U_1 \tag{6-3}$$

เมื่อ U_2 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออก
 U_1 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านขาเข้า
 η คือ ประสิทธิภาพการถ่ายทอดพลังงานของวงจร

$$U_{2max} = \rho \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} * U_1 \tag{6-4}$$

เมื่อ ρ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันซึ่งมีค่าเป็น

$$\rho = \frac{2\sqrt{1-\sigma}}{\sqrt{(1+a)^2 - 4\sigma a}} \tag{6-5}$$

โดยที่ a คือ อัตราส่วนการจูนซึ่งมีค่า

$$a = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1} \tag{6-6}$$

$$\text{และค่า } a \text{ มีค่าสูงสุดเมื่อ } a = 1-2K^2 \quad (6-7)$$

และค่า K สัมพันธ์การค้ำปลั่งซึ่งมีค่าเป็น

$$K = \sqrt{1-\sigma} \quad (6-8)$$

โดยที่

$$\sigma = 1 - M^2(L_1L_2) = 1 - K^2 \quad (6-9)$$

เมื่อ M คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดทั้งสอง

เมื่อแรงดันจ่ายออกของขดลวดด้านแรงสูงมีค่ามากพอจะทำให้เกิดการเบรคความหรือการวาวไฟตามผิวที่วัสดุทดสอบตามต้องการ เช่น ลูกถ้วยซึ่งการเกิดวาวไฟตามผิวจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีการสปาร์กอย่างต่อเนื่อง โดยลักษณะการเกิดการวาวไฟจะเป็นการบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ หรือความบกพร่องทางกายภาพของลูกถ้วยที่ทำการทดสอบ โดยถ้าเกิดการวาวไฟตามผิวทั่วบริเวณผิวของลูกถ้วยจนวนที่ทำการทดสอบก็แสดงว่าลูกถ้วยจนวนไม่มีความบกพร่องภายใน แต่ถ้ามีการวาวไฟตามผิวบางส่วนหรือเบรคความผ่านเนื้อจนวนลูกถ้วย ก็แสดงว่าลูกถ้วยมีความบกพร่องไม่สามารถนำไปใช้งานได้ หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ใช้ทดสอบนี้ จะนำไปใช้ทดสอบลูกถ้วยจนวน

โดยมีแรงดันสูงสุด 400 kV และมีความถี่สูงตามที่มาตรฐานการทดสอบลูกถ้วยกำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 200 kHz ซึ่งหม้อแปลงทดสอบที่ใช้ในการทดลองมีพิกัดดังนี้

- แรงดันค้ำปลั่งปฐมภูมิ มีค่า 0 – 15 kV

- แรงดันค้ำปลั่งทุติยภูมิ มีค่าสูงสุด 400 kV

- ความถี่ใช้งาน 200 kHz

ส่วนค่าความจุไฟฟ้ารวมทางค้ำปลั่งแรงดันสูง (C_2) จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 90 pF ซึ่งประกอบด้วย

- ความจุไฟฟ้าของลูกถ้วย มีค่าอยู่ในช่วง 10 – 50 pF

- ความจุไฟฟ้าสเตรย์ (Stray Capacitance) ของขดลวดมีค่าประมาณ 10 pF

- ความจุไฟฟ้าของแกปทรงกลม (Sphere gap) มีค่า 5 pF

- ความจุไฟฟ้าสายต่อแรงสูง มีค่าประมาณ 5 – 10 pF/m

โดยคิดความจุไฟฟ้าของลูกถ้วย 50 pF จากนั้นรวมประจุไฟฟ้าของสาย และความจุไฟฟ้าต่างๆ ด้านแรงสูงจะได้ค่าโดยประมาณเท่ากับ 90 pF

จำนวนรอบ	ค่าความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ L_1 (μH)	ค่าความเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิ L_2 (mH)
1	0.524	457 รอบ 7.04 mH
2	2.097	
3	4.95	
4	8.46	
5	12.86	
6	18.14	
7	24.36	
8	31.52	
9	39.69	
10	48.89	

ตารางที่ 6-1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

6.2.2 การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม

การวัดแรงดันสูงด้วยแก๊ปทรงกลม เป็นวิธีที่ง่ายและมีความแน่นอนเชื่อถือได้ โดยอาศัยการเกิดสปาร์กหรือเบรกดาวน์ระหว่างทรงกลม โสหะที่วางอยู่ในอากาศหรือก๊าซ ซึ่งเป็นไปตามกฎการเกิดคิซซาร์จของก๊าซ คือจะเกิดเบรกดาวน์ขึ้นเมื่อแรงดันสูงถึงค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์สถิติ (Statistic breakdown Voltage) ที่ทราบค่าแน่นอนทำซ้ำได้ ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการสปาร์กหรือเบรกดาวน์ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆเหล่านี้ดังในสมการที่ (6-10) มาตรฐานการวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลมฉบับปัจจุบัน IEC 60052 ได้มีการคำนึงถึงผลของความชื้นในอากาศด้วย ซึ่งมาตรฐานฉบับก่อน IEC 52 และ IEEE std 4 ได้ละเลยผลของความชื้นในอากาศ ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์

$$U_b = f(D, S, \delta, h) \quad (6-10)$$

เมื่อ	U_b	คือ	แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์ก
	D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม
	S	คือ	ระยะห่างช่องว่างแก๊ปทรงกลม ($S \leq D/2$)
	δ	คือ	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ ขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ
	h	คือ	ความชื้นของอากาศ

มาตรฐาน IEC 60052 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ (t_0) 20 °C และความดันบรรยากาศ (b_0) 101.3 kPa หรือ 760 mmHg หรือ

1013 mbar ความชื้นสัมบูรณ์จะอยู่ระหว่าง 5 gm^{-3} - 12 gm^{-3} ที่ค่าเฉลี่ย 8.5 gm^{-3} สำหรับมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐาน IEEE std 4:1995 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกความถี่ของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ(t_0) 20 °C และความดันบรรยากาศ (b_0) 101.3 kPa หรือ 1013 mbar หรือ ประมาณ 760 mmHg โดยที่ความชื้นสัมบูรณ์ 11 gm⁻³ ถ้า b เป็นความดันบรรยากาศ (kPa) และ H เป็นความสูงของบารอมิเตอร์ (mmHg) จะได้

$$b = 0.1333 H \quad (6-11)$$

ดังนั้นค่าแรงดันเบรกความถี่วัดได้ที่ความดัน, อุณหภูมิและความชื้นใดๆ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจะต้องแปลงค่าที่วัดได้ไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$U_0 = \frac{U}{\delta \times k} \quad (6-12)$$

เมื่อ U_0 คือ ค่าแรงดันเบรกความถี่ที่สภาวะมาตรฐาน
 U คือ ค่าแรงดันเบรกความถี่ที่สภาวะห้องทดสอบ
 δ คือ ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ
 k คือ ตัวประกอบแปลงผันเนื่องจากความชื้น

$$\delta = \frac{b}{b_0} \times \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (6-13)$$

$$k = 1 + (0.002 \times (h/\delta - 8.5)) \quad (6-14)$$

เมื่อ b คือ ความดันของอากาศที่สภาวะห้องทดลอง เป็น kPa, mbar หรือ mmHg
 T คือ อุณหภูมิของอากาศที่สภาวะห้องทดลอง เป็น °C
 H คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศที่สภาวะทดลองเป็น gm⁻³

ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงบางแห่งได้วัดค่าของความชื้นของบรรยากาศในสภาวะของความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถที่จะแปลงเป็นความชื้นสัมบูรณ์ได้ โดยใช้กราฟการแปลงผันดังแสดงในภาคผนวก ก เมื่อพิจารณาถึงสภาวะแวดล้อมในห้องทดสอบของประเทศไทยพบว่า ค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศมีค่าอยู่นอกเหนือขอบเขตที่กำหนดตามสภาวะมาตรฐานของ IEC โดยที่การหาค่าแฟลคเตอร์แก้ความชื้นในอากาศ (k_h) ได้มีมาก่อนแล้วในกรณีของการทดสอบอุปกรณ์ฉนวนโดยที่

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d} \times k_h \quad (6-15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V_{bn}	คือ	ค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน
V_b	คือ	ค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่สภาวะห้องทดลอง
K_d	คือ	แฟคเตอร์แก้ความหนาแน่นอากาศ
K_h	คือ	แฟคเตอร์แก้ความชื้นในอากาศ

K_d จะมีค่าเท่ากับ δ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ) เมื่อ δ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.95-1.05 และกรณีอื่นๆ สามารถหาค่า K_d ได้จากตารางที่ 6-2 ค่า δ นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6-13

ความหนาแน่นอากาศ (δ)	ค่าแก้ (K_d)
0.70	0.72
0.75	0.77
0.80	0.82
0.85	0.86
0.90	0.91
0.95	0.95
1.00	1.00
1.05	1.05
1.10	1.09
1.15	1.13

ตารางที่ 6-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_d กับ δ

สำหรับ K_h นั้นสามารถหาได้จากเส้นกราฟในภาคผนวก ข กรณีรายละเอียดการหาค่าแฟคเตอร์แก้ไขตามมาตรฐาน IEEE std สามารถดูได้จากมาตรฐานฉบับดังกล่าว

IEC 60052 กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐานของแกปทรงกลมได้ 12 ขนาด เริ่มต้นตั้งแต่ 20 มิลลิเมตร จนถึง 2000 มิลลิเมตร โดยที่ IEEE ได้กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมไว้ตั้งแต่ 62.5 มิลลิเมตร จนถึง 2000 มิลลิเมตร และค่าแรงดันมาตรฐานที่กำหนดไว้เริ่มตั้งแต่ 17.5 กิโลโวลต์ที่คิดจนถึงประมาณ 2 ล้านกิโลโวลต์ที่คิด ค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่กำหนดในตาราง มาตรฐานแสดงในภาคผนวก ค

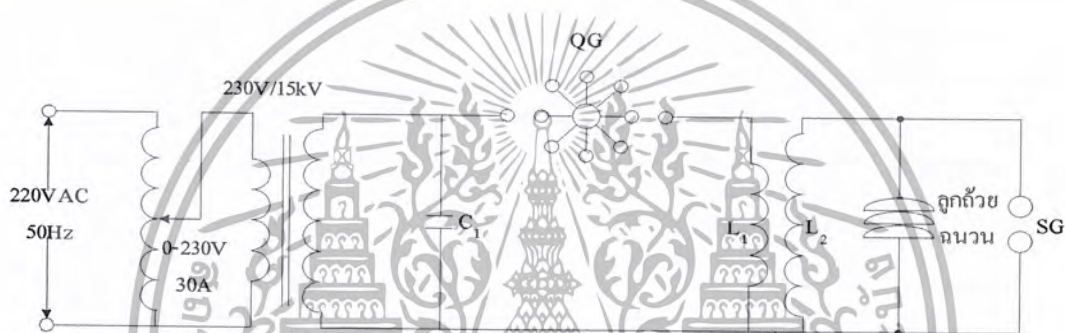
ค่าในตารางเป็นค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน IEC 60052 หากโครงสร้างการติดตั้งการฉายรังสี (irradiation) เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

6.3 การทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

1) Variac 0-230 V	1	เครื่อง
2) ชุดหม้อแปลงเทสลา	1	ชุด
3) Sphere gap ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm	1	ชุด
4) Voltmeter	1	ตัว
5) Thermometer, barometer และ hygrometer	1	ชุด
6) ลูกถ้วยฉนวน	1	ชุด

6.3.1 การทดลองหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงสูงของหม้อแปลงเทสลา



รูปที่ 6-3 วงจรทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงเทสลา

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ต่อยวงจรการทดลองดังรูปที่ 6-3
- 2) ตั้งระยะช่องว่างทรงกลมไว้ที่ 1 cm เลือกจำนวนขดลวดแรงต่ำไว้ที่ 4 รอบ
- 3) ป้อนแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้น 0-110 V จนเกิดการสปาร์กข้ามที่ช่องว่างทรงกลม บันทึกค่าแรงดันอินพุตและระยะช่องว่างทรงกลมที่ทำให้เกิดการสปาร์กข้ามที่ทรงกลม
- 4) ถ้าแรงดันอินพุตยังไม่ถึง 110 V ให้ทำการปรับระยะช่องว่างทรงกลมเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 cm เพื่อให้สามารถป้อนแรงดันอินพุตจนถึง 110 V ถ้าไม่เกิดการสปาร์กข้ามที่ช่องว่างทรงกลมให้ บันทึกระยะช่องว่างทรงกลมที่ทำให้เกิดการสปาร์กข้ามที่ช่องว่างทรงกลมขณะป้อนแรงดันอินพุตใกล้เคียงหรือเต็มพิกัด 110 V
- 5) ทดลองซ้ำข้อ 2 ถึง 4 โดยเพิ่มจำนวนรอบที่ของขดลวดทางด้านแรงต่ำจนครบทุกรอบ
- 6) เปรียบเทียบระยะช่องว่างทรงกลมของแต่ละรอบขดลวด เพื่อหาระยะช่องว่างทรงกลมที่มากที่สุดที่ทำให้เกิดการสปาร์กข้ามที่ ช่องว่างทรงกลมนำระยะแปกที่ได้ไปเปิดตาราง ภาคผนวก ค จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดที่สภาวะมาตรฐาน

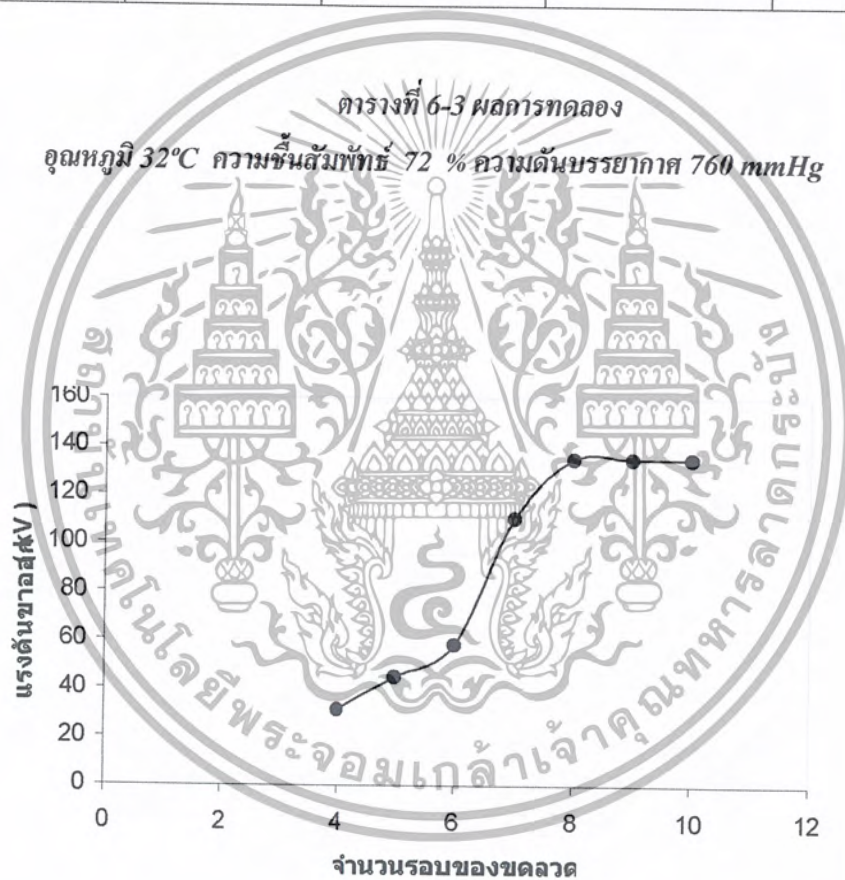
- 7) จำนวนรอบที่ได้จากข้อ 6 จะเป็นจำนวนรอบที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนรอบขด ลวดแรงต่ำ	ระยะ Sphere gap (cm)	แรงดันอินพุท (V)	แรงดันเบรกดาวน์ ที่สภาวะมาตรฐาน (kV)	แรงดันเบรกดาวน์ ที่สภาวะห้อง (kV)
4	1	80	31.7	31.2
5	1	77	31.7	31.2
	1.5	84	45.5	44.72
6	1	78	31.7	31.2
	1.5	79	45.5	44.72
	2	78	59	58.056
7	1	75	31.7	31.2
	1.5	74	45.5	44.72
	2	75	59	58.056
	2.4	76	70	68.88
	3	78	85	83.64
	3.5	77	97	95.448
	4	84	112	110.208
8	1	77	31.7	31.2
	1.5	74	45.5	44.72
	2	76	59	58.056
	2.4	76	70	68.88
	3	78	85	83.64
	3.5	78	97	95.448
	4	80	112	110.208
	4.5	80	125	123
	5	81	137	134.808
	9	1	78	31.7
1.5		78	45.5	44.72
2		79	59	58.056
2.4		80	70	68.88
3		80	85	83.64
3.5		78	97	95.448
4.5		79	125	123
5		80	137	134.808

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10	1	76	31.7	31.2
	1.5	76	45.5	44.72
	2	76	59	58.056
	2.4	80	70	68.88
	3	79	85	83.64
	3.5	79	97	95.448
	4	78	112	110.208
	4.5	80	125	123
	5	80	137	134.808



รูปที่ 6-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าแรงดันเบรกความถี่ที่สภาวะห้องทดลอง

ที่อุณหภูมิ 32°C ความชื้นสัมพัทธ์ 72% ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

วิธีทำ

ตามมาตรฐาน IEC 60052

$t_0 = 20^\circ\text{C}$ และ $b_0 = 760$ mmHg

เมื่อต้องการทราบค่าแรงดันเอาท์พุทที่สภาวะห้องจากความสัมพัทธ์

$$U_0 = \frac{U}{\delta \times h}$$

และจาก

$$\delta = \frac{b}{b_0} \times \frac{273 + t_0}{273 + t}$$

$$\delta = \frac{760}{760} \times \frac{273 + 20}{273 + 32} = 0.96$$

$$\text{จาก } k = 1 + [0.002 \times (h/\delta - 8.5)]$$

จากตารางภาคผนวกที่ ก ได้ค่า $h = 23$

แทนค่า h และ δ ในสูตร

$$k = 1 + [0.002 \times (23/0.96 - 8.5)] = 1.03$$

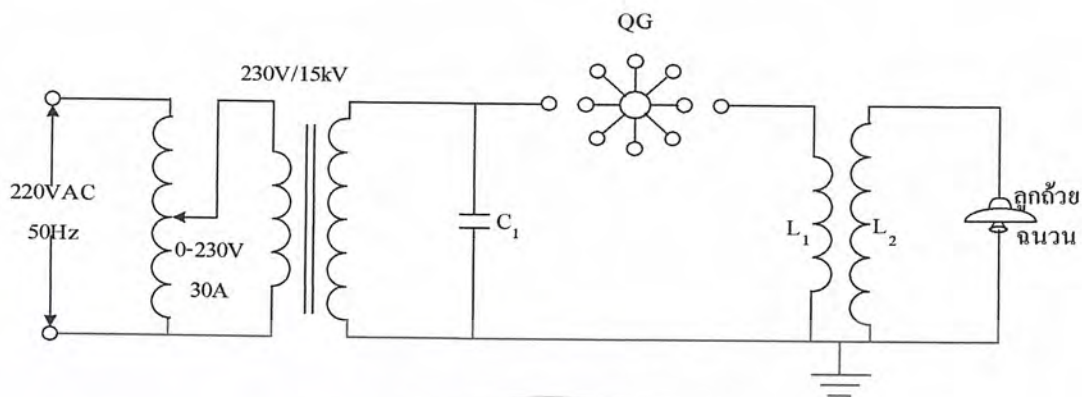
ดังนั้น จากการทดลองที่ระยะ ช่องว่างทรงกลม 1 cm จะได้แรงดันที่สภาวะมาตรฐาน 31.7 kV
ฉะนั้น แรงดันไฟฟ้าแรงสูงของหม้อแปลง เทสลาหาได้จาก

$$\begin{aligned} U &= U_0 \times \delta \times h \\ &= 31.7 \times 0.96 \times 1.03 \\ &= 31.2 \text{ kV} \end{aligned}$$

6.3.2 สรุปผลการทดลอง

เมื่อกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดด้านแรงต่ำและสภาวะโหลดมีค่าคงที่ แรงดันเอาท์พุทจ่ายออกด้านแรงสูงจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบด้านแรงต่ำหรือค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงต่ำโดยมีค่าแรงดันสูง จ่ายออกสูงสุดเมื่อเข้าสู่สภาวะจูน ซึ่งเป็นไปตามสมการ $L_1 C_1 = L_2 C_2$

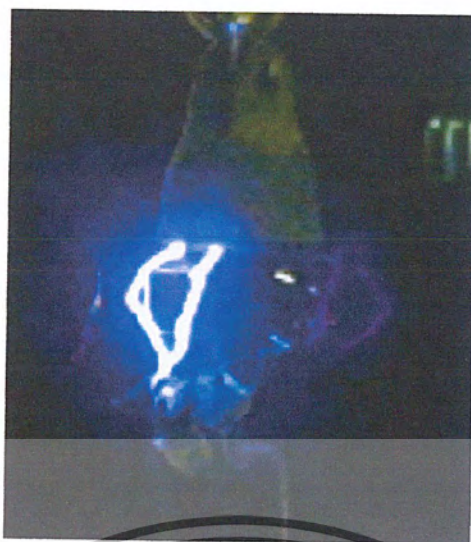
6.3.3 การทดสอบหาความบกพร่องของอุปกรณ์ฉนวนโดยใช้หม้อแปลงทดสอบ



รูปที่ 6-5 วงจรการทดสอบหลอดฉนวน

- 1) ต่อวงจรดังรูปที่ 6-5 โดยใช้หลอดฉนวนที่มีสภาพสมบูรณ์
- 2) ปรับตั้งจำนวนรอบไว้ที่ 8 รอบ
- 3) ทำการสับสวิตช์ (On Switch) ให้มอเตอร์หมุนสปาร์กแก๊ป ก่อนที่จะทำการป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงจ่ายกำลัง จากนั้นทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ตัวควบคุมแรงดัน จนกระทั่งเกิดการวาวไฟตามผิวบนหลอดฉนวนที่ทำการทำการทดสอบสังเกตพฤติกรรมการเกิดวาวไฟตามผิวหลอดฉนวน
- 4) เมื่อหยุดการทดสอบให้ปรับลดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ลดลงสู่ศูนย์ โดยการปรับตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Variac) แล้วปลดสวิตช์
- 5) เกี่ยวตะขอกราวด์ที่ขั้วแรงสูงของหม้อแปลงจ่ายกำลัง และตามจุดต่างๆ ที่อาจจะจะมีประจุตกค้างอยู่ทุกครั้งที่เข้าไปสัมผัส ไปในบริเวณที่ทำการทดสอบ
- 6) เปลี่ยนหลอดฉนวนฉนวนเป็นหลอดฉนวนที่มีสภาพไม่สมบูรณ์แล้วทำการทดสอบตามขั้นตอนเหมือนเดิม โดยป้อนแรงดันให้หลอดฉนวนฉนวนไม่สมบูรณ์ให้มีค่าเท่ากับที่ป้อนให้กับหลอดฉนวนที่มีสภาพสมบูรณ์สังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับหลอดฉนวน

การทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของหลอดฉนวนฉนวนดีจะเห็นปรากฏการณ์วาวไฟผิวหลอดฉนวนฉนวนดังรูปที่ 6-6

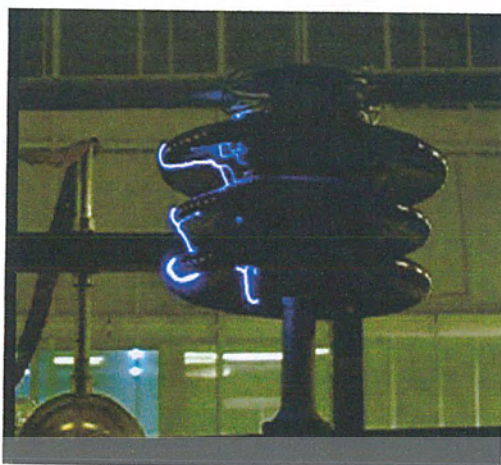


รูปที่ 6-6 การวาวไฟตามผิวลูกถ้วยแรงดันที่มีสภาพดีที่แรงดัน 100 kV

และส่วนที่สองทดสอบลูกถ้วยฉนวนบกพร่องจะไม่เกิดการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนแต่จะเจาะทะลุผ่านดังแสดงดังรูปที่ 6-7



รูปที่ 6-7 การทดสอบลูกถ้วยแรงดันที่บกพร่องที่แรงดัน 100 kV



รูปที่ 6-8 การทดสอบการรวมไฟตามผิวของลูกถ้วยก้านตรงที่แรงดัน 100 kV

ผลการทดสอบลูกถ้วยฉนวนแบบแขวน

ลำดับที่	จำนวนรอบของขดลวด แรงต่ำ (รอบ)	แรงดันอินพุท (V)	ผลการทดสอบ	
			เกิดวาทไฟตาม ผิว	ไม่เกิดวาทไฟ ตามผิว
1	8	77	√	
	9	80	√	
	10	81	√	
2	8	80	√	
	9	82	√	
	10	83	√	
3	8	77	√	
	9	81	√	
	10	86	√	
4	8	90		√
	9	90		√
	10	90		√

ตารางที่ 6-4 ผลการทดสอบลูกถ้วยฉนวนแบบแขวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบลูกถ้วยแบบก้านตรง

ลำดับที่	จำนวนรอบของขดลวด แรงต่ำ (รอบ)	แรงดันอินพุท (V)	ผลการทดสอบ	
			เกิดวาวไฟตามผิว	ไม่เกิดวาวไฟ ตามผิว
1	8	80	√	
	9	80	√	
	10	80	√	
2	8	80	√	
	9	82	√	
	10	83	√	
3	8	81	√	
	9	81	√	
	10	83	√	

ตารางที่ 6-5 ผลการทดสอบลูกถ้วยแบบก้านตรง

6.3.4 สรุปผลการทดสอบ

จากการใช้หม้อแปลงทดสอบลูกถ้วย จะเห็นได้ว่าต้องตั้งขดลวดทางด้านปฐมภูมิไว้ที่สถานะฐาน คือ 8 รอบขึ้นไปและแรงดันอินพุทที่ทำให้ลูกถ้วยฉนวนแบบก้านตรงและแบบแขนเกิดการวาวไฟตามผิวประมาณ 100 kV และการเกิดวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยนั้นแสดงว่าลูกถ้วยอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ ส่วนลูกถ้วยที่ไม่เกิดการวาวไฟตามผิวแสดงว่าเนื้อฉนวนไม่สมบูรณ์

บทที่ 7

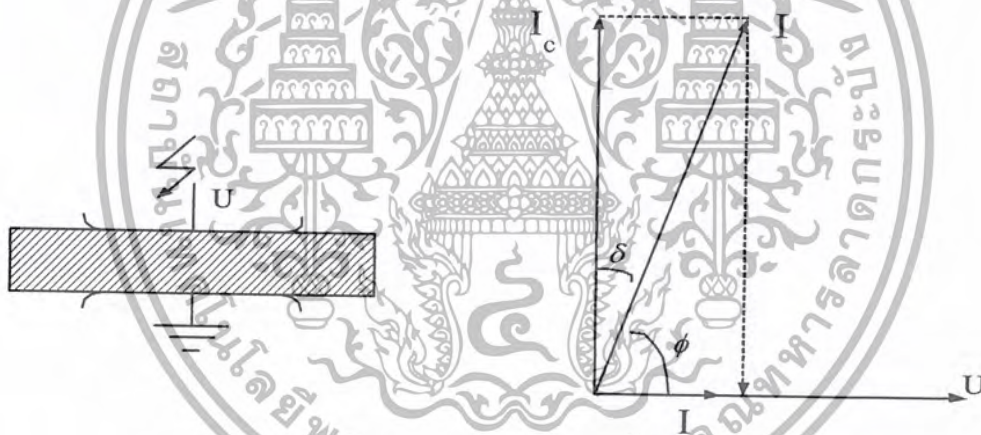
การทดสอบวัดพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

7.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

7.1.1 กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

7.1.1.1 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริก

ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนใดๆ เมื่อวางคั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดที่มีความต่างศักย์ หรืออยู่ในสนามไฟฟ้า ดังแสดงรูปที่ 7-1 a) ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนนั้นจะมีลักษณะสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ C ซึ่งสามารถเก็บพลังงานไว้ได้ในรูปสนามไฟฟ้า โดยทั่วไปไดอิเล็กตริกหรือฉนวน จะมีคุณสมบัติไม่เป็นตัวเก็บประจุบริสุทธิ์แต่จะมีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเกิดขึ้นในฉนวน กระแสที่ไหลผ่านไดอิเล็กตริกนั้นไม่เป็นกระแสประจุบริสุทธิ์ คือ นำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศาเท่ากับมุม δ ดังในรูปที่ 7-1 b) ค่า $\tan \delta$ นี้เรียกว่าแฟกเตอร์สูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งถือเป็นลักษณะที่สำคัญประการหนึ่งของฉนวน



a) ไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างอิเล็กโทรด

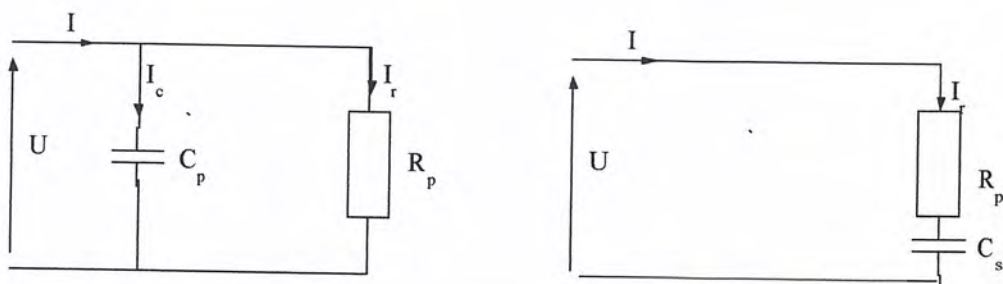
b) เฟสเซอร์ไดอะแกรม

รูปที่ 7-1 กระแสไหลผ่านไดอิเล็กตริก

จากรูปที่ 7-1 จะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านไดอิเล็กตริก ส่วนหนึ่งจะทับกับแรงดันที่ป้อน คือ I_a ทำให้กระแสที่ป้อนให้กับไดอิเล็กตริก I มีค่ามากกว่าค่ากระแสประจุ I_c แสดงว่ามีกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกนั้น กำลังไฟฟ้ดังกล่าวถือเป็นกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ดังนั้น ไดอิเล็กตริกใดๆ สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูล ที่ประกอบด้วยความต้านทาน R ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่แทนค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดอิเล็กตริก และองค์ประกอบค่าเก็บประจุ C ที่แทนคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกที่สามารถเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และพลังงานไว้ได้ในรูปสนามไฟฟ้า องค์ประกอบ R และ C ในวงจรสมมูลย์อาจถือเป็นแบบขนานหรือแบบอันดับก็ได้ดังในรูปที่ 7-2



a) วงจรขนาน

b) วงจรอันดับ

รูปที่ 7.2 วงจรสมมูลย์ของไดอิเล็กตริก

วงจรขนาน : $C_p =$ ค่าคาปาซิแตนซ์ขนาน
 $R_p =$ ความต้านทานขนาน
 $\text{tg } \delta = 1 / (\omega R_p C_p)$ (7-1)

วงจรอันดับ: $C_s =$ ค่าคาปาซิแตนซ์อนุกรม
 $R_s =$ ความต้านทานอนุกรม
 $\text{tg } \delta = \omega R_s C_s$ (7-2)

มุม δ คือ มุมกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

ω คือ ความถี่เชิงมุม

7.1.1.2 แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (dissipation factor)

ถ้าป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับตัวเก็บประจุที่สมบูรณ์ไม่มีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา

กำหนดให้ $U = U_m \sin \omega t$ (7-3)

$i = \omega C U_m \cos \omega t$ (7-4)

$I = \omega C U$ (7-5)

ความเป็นจริงกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุ จะนำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 7-1 b) เป็นมุมเฟสของตัวเก็บประจุ ดังนั้นแฟกเตอร์กำลัง เท่ากับ $\cos \phi$ หรืออีกทางหนึ่ง เท่ากับ $\sin \delta$

ฉะนั้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวเก็บประจุที่ไม่สมบูรณ์ คือ

$P_{d_v} = UI \cos \phi$ (7-6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_d = UI \sin \delta \quad (7-7)$$

เมื่อ U เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ป้อน

$$\text{แต่} \quad \delta = 90^\circ - \phi \text{ ซึ่งจะเป็นมุมเล็กๆ} \quad (7-8)$$

$$\text{ฉะนั้น} \quad \sin \delta = \text{tg } \delta \text{ ดังตารางที่ 1}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้} \quad \text{tg } \delta = \text{แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก}$$

δ	0	1	2	3	4	5	10	15	20
$\sin \delta$	0	0.017	0.035	0.052	0.0698	0.0872	0.174	0.259	0.342
$\tan \delta$	0	0.017	0.035	0.052	0.0699	0.0874	0.176	0.268	0.364

ตารางที่ 7-1 เปรียบเทียบค่า $\sin \delta$ กับ $\tan \delta$ เมื่อ $\delta = 0 - 20^\circ$

ในทางปฏิบัติฉนวนหรือไดอิเล็กตริกมีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกแบ่งได้ 3 รูปแบบ

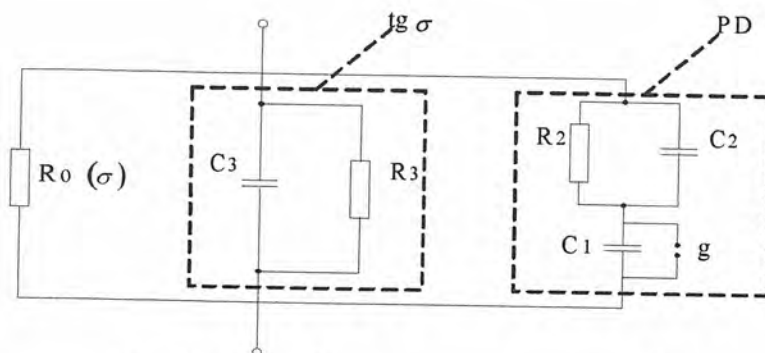
1) กำลังสูญเสียจากสภาพนำไฟฟ้า σ (conduction loss)

2) กำลังสูญเสียจากโพลาไรเซชัน (polarization loss)

3) กำลังสูญเสียจากไอออไนเซชัน (ionization loss) ในลักษณะของดิสชาร์จบางส่วน

กำลังสูญเสียเหล่านี้เกิดขึ้นได้ในฉนวนเมื่อแรงดันเข้าไปและจะแปรสภาพเป็นความร้อนขึ้นในฉนวน ฉนวนส่วนมากจะนำความร้อนได้ไม่ดี ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะระบายออกไปได้ยาก และเมื่อกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นความร้อนก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ถ้าอัตราการระบายความร้อนออกยังสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อน ก็ยังอยู่ในสภาพสมดุล ไม่เกิดความเสียหายต่อฉนวน แต่ถ้าระบายความร้อนที่เกิดขึ้นออกไปไม่ทัน ความร้อนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ ฉะนั้นการตรวจสอบคุณภาพของกาวฉนวนจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบ หรือวัดค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งสามารถประเมินผลได้โดยไม่เกิดการทำลายต่อวัสดุทดสอบ

กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวน ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันและสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ เวลา และคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกเอง กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกทั้ง 3 แบบดังกล่าวข้างต้น อาจเขียนแทนด้วยวงจรมูลย์ในรูปที่ 7-3



รูปที่ 7-3 วงจรสมมูลย์ของไดโอดีคตริกที่แทนกำลังสูญเสียไดโอดีคตริก เนื่องจากสภาพไฟฟ้า โพลาริเซชันและ ดิสซาร์จบางส่วน

ในรูปที่ 7-3 เป็นวงจรสมมูลย์ของไดโอดีคตริกที่แทนกำลังสูญเสียไดโอดีคตริก คือ $R_0(\sigma)$ แทนกำลังสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน C_3 แทนค่าความจุไฟฟ้าที่แท้จริงของไดโอดีคตริก R_3 แทนกำลังสูญเสียไดโอดีคตริกเนื่องจากโพลาริเซชัน C_1, C_2 และสปรักแกป g แทนวงจรมูลย์ของดิสซาร์จบางส่วน R_2 แทนกำลังสูญเสียในฉนวนเนื่องจากดิสซาร์จบางส่วน PD

7.1.1.3 การคำนวณกำลังสูญเสียไดโอดีคตริก

กำลังสูญเสีย ไดโอดีคตริกที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนเมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันที่ป้อนมีดังต่อไปนี้

1) กำลังสูญเสียไดโอดีคตริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าในแรงดันกระแสตรง

ในสนามไฟฟ้าคงตัว E ที่มีแรงดันกระแสตรง U ค่าความหนาแน่นของกระแส J อาจคำนวณโดยอาศัยกฎของโอมห้จากค่าสภาพนำไฟฟ้าเฉพาะ และความต้านทาน R_0 ได้คือ

$$P = U^2 / R_0 \quad (7-9)$$

$$J = \sigma E \quad (7-10)$$

กำลังสูญเสียไดโอดีคตริกต่อปริมาตร (p'_0) จะหาได้จากสูตร

$$p'_0 = EJ = \sigma E^2 \quad (7-11)$$

สภาพนำไฟฟ้า (σ) ของระบบการฉนวน ซึ่งประกอบด้วยของเหลว ของแข็ง จะเป็นผลมาจากไอออน สภาพนำไฟฟ้าของ (σ) จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สิ่งเจือปน ปริมาณความชื้น ค่าความต้านทานกระแสรั่วไหล $R_0(\sigma)$ ของฉนวนอาจหาได้โดยการวัดค่ากระแส จากการป้อนแรงดันกระแสตรงคงที่ ผลของการวัดจะขึ้นอยู่กับเวลาด้วย ฉะนั้นควรวัดค่าที่ 1 นาที หลังจากสับสวิตซ์แล้ว ค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) อาจคำนวณได้จากความต้านทานที่วัดได้ แรงดันที่ใช้ในการวัดปกติจะมีค่า 100 โวลต์ หรือ 1000 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีอื่น มิฉะนั้นผู้เผยแพร่เห็นเป็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเนื่องจากกระแสลับ

ในกรณีของแรงดันกระแสลับที่มีความเครียดสนามไฟฟ้า E ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อาจจะได้จากความสัมพันธ์

$$\vec{J} = (\sigma + j\omega\epsilon) \vec{E} \tag{7-12}$$

ในฉนวนนอกจากกำลังสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแล้ว ยังมีกำลังสูญเสียเนื่องจากโพลาไรเซชันและไอออไนเซชัน ฉะนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะมีใช้แต่ค่าจริงอย่างเดียวหากแต่มีค่าจินตภาพด้วยค่าแพกเตอร์กำลังงานสูญเสีย $\text{tg } \delta$ ของฉนวนซึ่งมีนิยามคือ อัตราส่วนค่ากระแสกำลัง I_a ต่อค่ากระแสประจุ I_c นั่นคือจากรูปที่ 7-1 b) จะได้

$$\text{tg } \delta = I_a/I_c = \frac{U/R_p}{\omega C_p U} = \frac{1}{\omega R_p C_p} \tag{7-13}$$

ซึ่งกำลังสูญเสียประกอบด้วยองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนตามที่กล่าว คือ

$$P_\sigma = \frac{U^2}{R_p} = I^2 R_s \tag{7-14}$$

$$P_d = P_\sigma + P_p + P_i \tag{7-15}$$

- เมื่อ P_d คือ กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก
- P_σ คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน
- P_p คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากโพลาไรเซชัน
- P_i คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากไอออไนเซชัน

ค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียจึงเขียนในลักษณะเดียวกันเป็น

$$\text{tg } \delta = \text{tg } \delta_\sigma + \text{tg } \delta_p + \text{tg } \delta_i \tag{7-16}$$

เป็นมุมระหว่างกระแสรวมผ่านไดอิเล็กตริก เป็นกระแสประจุกับกระแสกำลังที่ค่ามุมเล็กๆ จะได้ $\text{tg } \delta$ เท่ากับแพกเตอร์ $\cos \phi$ ฉะนั้น กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเขียนได้ว่า

$$P_d = P_b \text{tg } \delta = \omega C U^2 \text{tg } \delta \tag{7-17}$$

$$\text{โดยที่ } P_b = UI = \omega C U^2 \tag{7-18}$$

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ

ถ้าคิดเป็นกำลังสูญเสียต่อปริมาตรของฉนวนจะได้

$$p'_d = \omega \epsilon_0 \epsilon' E^2 \operatorname{tg} \delta \tag{7-19}$$

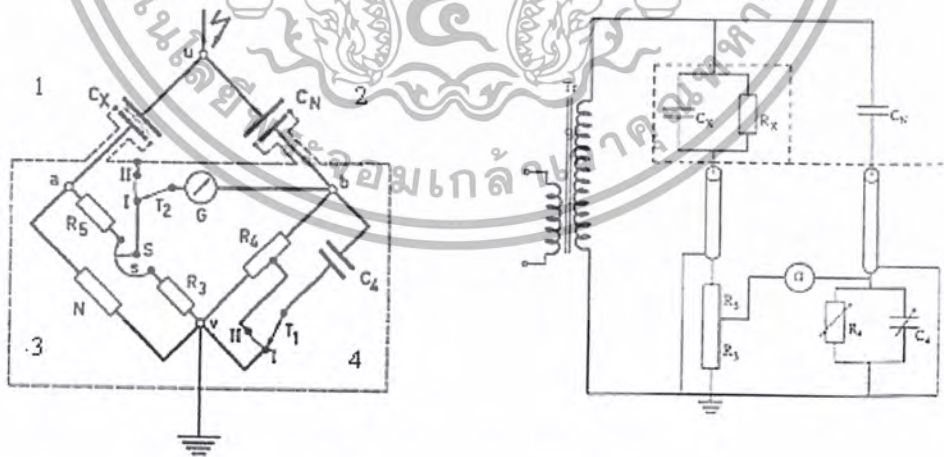
- เมื่อ p'_d คือ กำลังสูญเสียต่อปริมาตร
 E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า
 ถ้า C คือ ค่าเก็บประจุไฟฟ้าเป็น F และ U คือค่าแรงดันที่ป้อนเป็น V
 จะได้ p_d คือ ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็น W

7.1.2 การวัดค่าเก็บประจุ C และแฟกเตอร์ $\operatorname{tg} \delta$

กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกในฉนวนที่หาได้จากสมการ $P_d = CU^2 \operatorname{tg} \delta$ โดยการวัดค่า $\operatorname{tg} \delta$ และค่าเก็บประจุ C วิธีวัดค่าทั้งสองนี้โดยทั่วไปที่ใช้กันมี 2 วิธี คือ วิธีวัดคัมมิเตอร์ และวิธีบริดจ์ ในที่นี้จะกล่าวแต่เฉพาะวิธีบริดจ์ ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับควมถี่ในย่านปานกลาง คือ 10 ถึง 10^6 Hz บริดจ์ที่นิยมใช้กัน คือ Schering bridge และ Glynne bride (transformer ratio arm bridge) ที่ใช้กับความถี่พลังงานตั้งแต่ 50 Hz ถึง 100 kHz

7.1.2.1 Schering bridge

Schering bridge เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าเก็บประจุและแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก $\operatorname{tg} \delta$ ของตัวเก็บประจุ โดยการเปรียบเทียบกับค่าเก็บประจุมาตรฐาน ซึ่งเป็นแบบอากาศหรือก๊าซอัดความดัน (Compressed Gas Standard Capacitor) มีกำลังสูญเสียต่ำที่ความถี่พลังงาน หรือความถี่อื่นๆ วงจรของ Schering bridge ดังแสดงในรูปที่ 7-4



รูปที่ 7-4 วงจร Schering bridge

- C_x คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบหรือที่ต้องการวัด
 R_x คือ ความต้านทานสมมูลย์กับกำลังสูญเสียในไดอิเล็กตริก
 C_N คือ ค่าตัวเก็บประจุมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_3	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำและปรับค่าได้
R_4	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ
C_4	คือ	ค่าตัวเก็บประจุปรับค่าได้
G	คือ	กัลวานอมิเตอร์ความไวสูงสำหรับสมดุลวงจร

การปรับวงจรบริดจ์ให้สมดุลโดยการปรับค่า R_3 และ R_4 จนกระทั่งเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้ศูนย์ เมื่อบริดจ์สมดุลแล้ว จะได้สมการ

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (7-20)$$

เมื่อ Z_1, Z_2, Z_3 และ Z_4 เป็นอิมพีแดนซ์ของส่วนวงจร 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ คือ

$$Z_1 = \frac{R_x}{(1 + j\omega C_x R_x)} \quad (7-21)$$

$$Z_2 = \frac{-j}{\omega C_N} \quad (7-22)$$

$$Z_3 = R_3 \quad (7-23)$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \quad (7-24)$$

จากสมการ (7-21) ถึงสมการ (7-24) แทนลงในสมการ (7-20) จะได้ตั้งสมการ (7-25)

$$\text{นั่นคือ} \quad \frac{R_x}{R_3(1 + j\omega C_x R_x)} = \frac{-j}{\omega C_N R_4} (j\omega C_4 R_4) \quad (7-25)$$

$$\text{โดยการเทียบค่าจริงจะได้} \quad \frac{R_x}{(1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2)} = \frac{C_4 R_4}{C_N} \quad (7-26)$$

จาก รูป 7-5 เมื่อ C_x และ R_x ต่อกันแบบขนาน

$$\text{จะได้} \quad \cos \delta = \frac{\omega C_x R_x}{\sqrt{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2}} \quad (7-27)$$

$$\cos^2 \delta = \frac{\omega^2 C_x^2 R_x^2}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} \quad (7-28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_x = \frac{C_N \cos^2 \delta}{\omega C_x C_4 R_x R_3} \tag{7-29}$$

จากรูปที่ 7-5 $\text{tg } \delta = \frac{\omega C_4}{1/R_4}$ (7-30)

$$\text{tg } \delta = \frac{1/R_x}{\omega C_x} = \frac{1}{\omega C_x R_x} \tag{7-31}$$

$$\omega C_4 R_4 = \frac{1}{\omega C_x R_x} \tag{7-32}$$

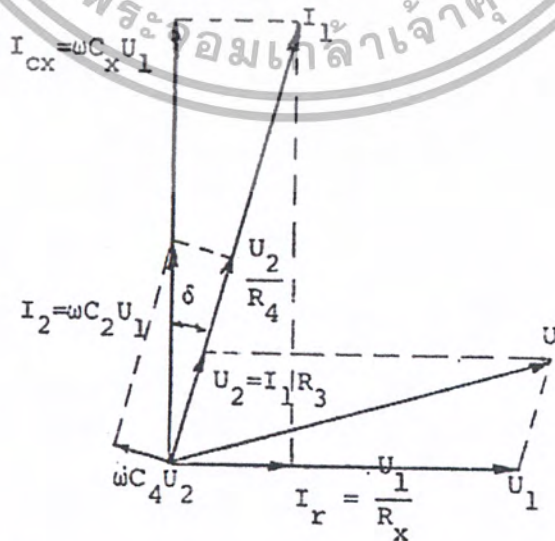
แทนค่า $\frac{1}{C_x R_x}$ ในสมการ (7-29) จะได้สมการ (7-33)

$$\frac{1}{C_x R_x} = \omega^2 C_4 R_4$$

$$C_x = \frac{C_N R_4 \cos^2 \delta}{R_3} \tag{7-33}$$

นั่นคือ $C_x = \frac{C_N R_4}{R_3}$ โดยประมาณ (7-34)

และ $\text{tg } \delta = \omega C_4 R_4$ (7-35)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้โดยบุคลากรของกรมเจ้าท่าเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้บุคคลอื่นภายนอกได้ทราบโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติ R_4 มักจัดไว้เป็นค่าคงตัวเฉพาะที่มีสวิตช์เลือกให้เปลี่ยนได้หลายค่าเพื่อให้สามารถวัดได้ละเอียดถูกต้องในช่วงกว้างของค่า C ส่วน R_3 เป็นความต้านทานที่ปรับได้ละเอียดและ C_4 เป็นค่าเก็บประจุที่ปรับได้เป็นหลัก $\times 10$ และมีค่าความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสีย $\tan \delta$

การวัดค่า C และ $\tan \delta$ ด้วย Schering bridge ดังกล่าวอาจมีการรบกวนจากภาคแรงสูงที่มีต่อวงจรภาคแรงต่ำซึ่งอาจจะคาบเกี่ยวผ่านค่าเก็บประจุสเตรย์ฉะนั้นตั้งแต่ภาคแรงต่ำของค่าเก็บประจุมาตรฐาน C_N และวัสดุทดสอบมาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจร 1, 2 และกัลวานอมิเตอร์ จะมีชิลด์ป้องกันแบบ 2 ชั้น (Double Screen Shielding) และป้องกันมิให้บริดจ์เสียหายจากแรงดันเกินเนื่องจากภาคแรงสูงเกิดผิดพร้อมขึ้นใน 3 หรือ 4 จึงใส่กับดักแรงดันเกิน หรือสปาร์กแก๊ปไว้ในวงจรภาคแรงต่ำ

7.1.2.2 Glynne bridge

Glynne bridge คือ บริดจ์ที่โดยทั่วไปเรียกว่า Transformer ratio arm bridge เพื่อให้ง่ายต่อการเรียกชื่อ จึงขอใช้เรียกว่า Glynne bridge เพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้พัฒนาบริดจ์นี้ขึ้น ซึ่ง Schwab ได้อธิบายไว้ ถึง Glynne bridge นี้ว่าเป็นบริดจ์ที่ใช้อ่าน $\tan \delta$ ได้โดยตรง มีหลักการใช้การสมดุลของวงจรตามข้อเสนอแนะของ Blumlein ตั้งแต่ปี 1928 และออกแบบสร้างเป็นบริดจ์สมบูรณ์โดย Glynne เมื่อเริ่มแรกออกแบบเพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 7-6



รูปที่ 7-6 Glynne bridge

Glynne bridge ประกอบด้วยขดลวด 3 ชุด มีแกนเหล็กที่มีค่า μ สูง มีค่ารั่วต่ำ (low leakage) มีลักษณะเป็น current comparator มีการชิลด์อย่างดี ขดลวดทั้งสอง n_1 และ n_2 สามารถปรับอัตราส่วนโดยการเปลี่ยนจุดต่อ (tapped turn) ส่วนขดลวดที่ 3 คือ n_3 เป็นตัวลัดจับว่า วงจรสมดุลหรือไม่ โดยมีกัลวานอมิเตอร์ G เป็นตัวชี้สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสมดุลวงจรบริดจ์โดยการปรับจำนวนรอบ n_1 และ n_2 จนกระทั่งได้ AT (Ampere turns) เท่ากัน ฟลักซ์แม่เหล็กจากขดลวดทั้งสองจะหักล้างกัน ได้ผลลัพธ์ฟลักซ์เป็นศูนย์ จึงไม่มีการเหนี่ยวนำในขดลวดที่ 3 คือ n_3 นั่นคือ

$$I_x n_1 - I_N n_2 = 0 \tag{7-36}$$

แทนค่ากระแส $I_x = \omega C_x U$

และ $I_N = \omega C_N U$

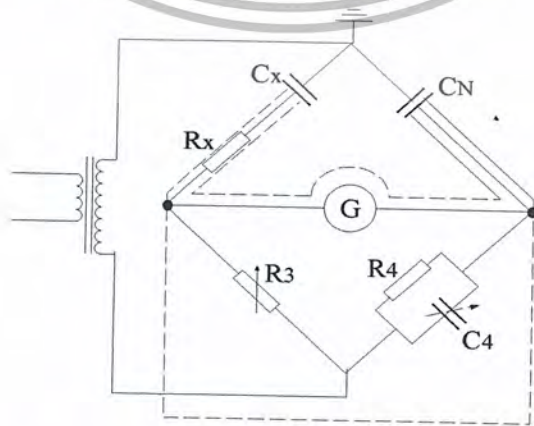
จะได้ $C_x = C_N \frac{n_2}{n_1}$ (7-37)

ค่าความต้านทานของขดลวด n_1 และ n_2 มีค่าน้อย และแฟกเตอร์ $\text{tg } \delta_N$ ของ C_N น้อยมากละทิ้งได้ จะได้ค่าแฟกเตอร์

$$\text{tg } \delta_x = \omega R_2 C_2 \tag{7-38}$$

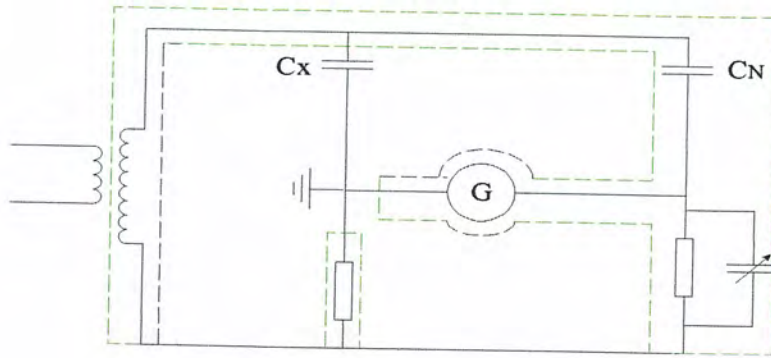
โดยการสมมูลค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบ มีวงจรสมมูลย์เป็นแบบอนุกรมทำนองเดียวกับที่พิสูจน์ทราบในวงจร Schering bridge ที่ปรับค่า R_4 ขนานกับ C_4 ได้ $\text{tg } \delta = \omega R_4 C_4$ ในสถานะสมดุล จุด A, B และ C มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับดิน เนื่องจากละทิ้งความต้านทานในขดลวด n_1 และ n_2 ผลของค่าเก็บประจุสเตรย์ของขดลวด จึงไม่มีผลต่อการสมดุลวงจร สามารถใช้เคเบิลชนิดชั้นเดียวได้เนื่องจากไม่มีผลของค่าเก็บประจุสเตรย์ของขดลวดจึงไม่มีผลต่อการสมดุลวงจรสามารถใช้เคเบิลชนิดชั้นเดียวได้เนื่องจากไม่มีผลของค่าเก็บประจุสเตรย์ลงดิน นับเป็นข้อดีเหนือกว่า Schering bridge และที่ความถี่พลังงาน วิธีของ Schering bridge มีความไวสูงกว่าเป็นร้อยเท่า

นอกจากการใช้วงจร Schering bridge และ Glynne bridge วัดค่าเก็บประจุ C และแฟกเตอร์ $\text{tg } \delta$ ตัวอย่างวงจรวัดแบบอื่นๆแสดงดังรูป 7-7 ถึง 7-9

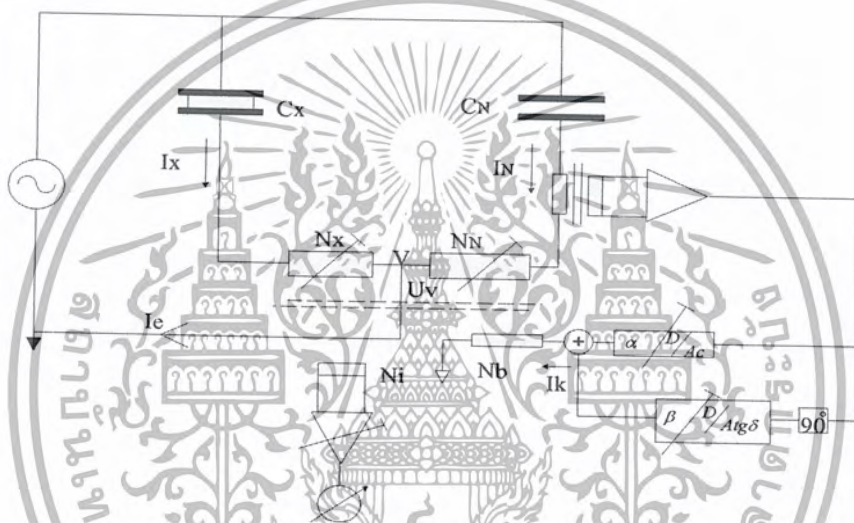


รูปที่ 7-7 High-voltage bridge with Farady cage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-8 Fully screened bridge

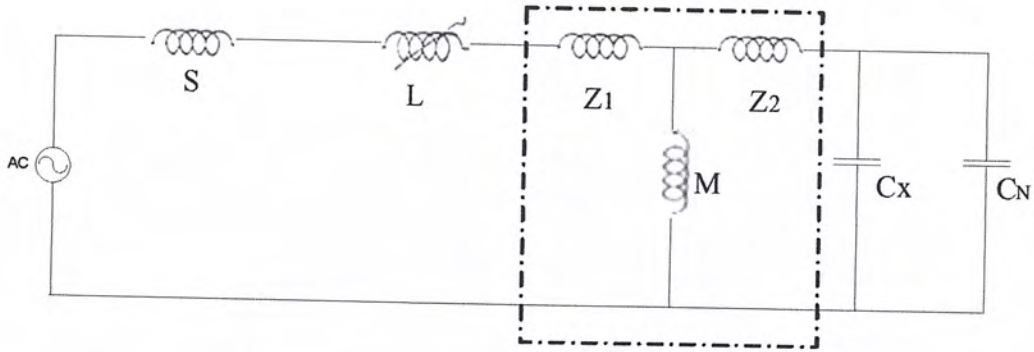


รูปที่ 7-9 เครื่องวัดพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกแบบติจิตอด

7.1.3 การวัดแรงดัน

เพื่อหลีกเลี่ยงการผิดพลาดในการวัด การวัดแรงดันจะต้องไม่มีฮาร์โมนิกส์ใดๆทั้งสิ้น ดังนั้นรูปร่างของสัญญาณจะต้องไม่มีฮาร์โมนิกส์ปนเข้ามาด้วยถ้าหากแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์โมนิกส์อยู่ซึ่งจะมีผลต่อค่าความจุของวัสดุที่จะทดสอบและค่าความจุมาตรฐานซึ่งผลตัวนี้จะขึ้นอยู่กับ order ของฮาร์โมนิกส์ของแหล่งจ่ายแรงดัน เช่น 5 ของฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ในแหล่งจ่ายแรงดันเท่ากับ 15 ของการวัด

ถ้าฮาร์โมนิกส์ของความถี่หลักมุลย์มีผลต่อการวัดอย่างมาก อาจจะสามารเห็นได้จาก การเคลื่อนที่แกว่งไปมาของเข็มเครื่องมือวัด เพื่อป้องกันวัดทดสอบจากฮาร์โมนิกส์ที่ไม่ต้องการจะเลือกใช้วงจรรีโซแนนซ์สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันดังวงจรต่อไปนี้

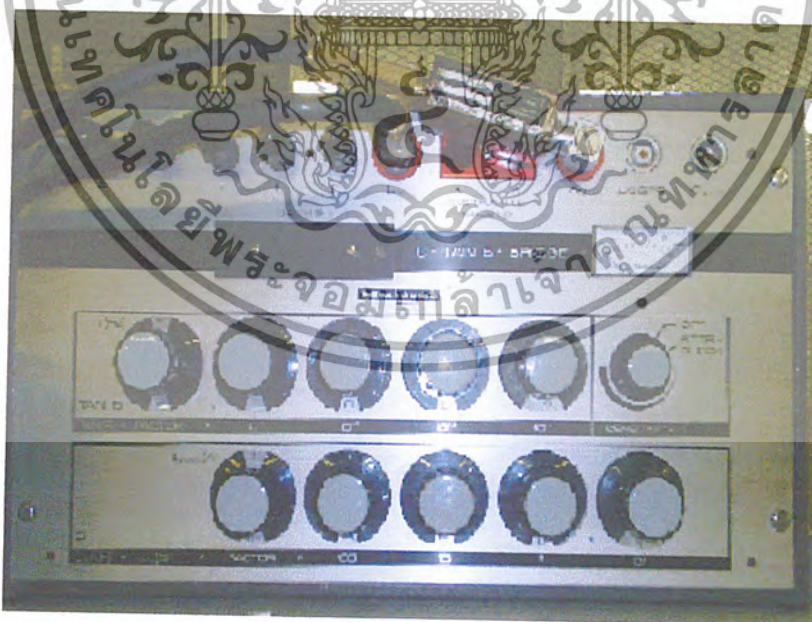


รูปที่ 7-10 วงจรการต่อเพื่อวัดค่าและลดผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้น

- เมื่อ Z_1, Z_2 = leakage inductances of the Transformer
 M = open circuit inductance of the Transformer
 S = power source Leakage
 L = inductance coil
 C_X = test object
 C_N = standard capacitor

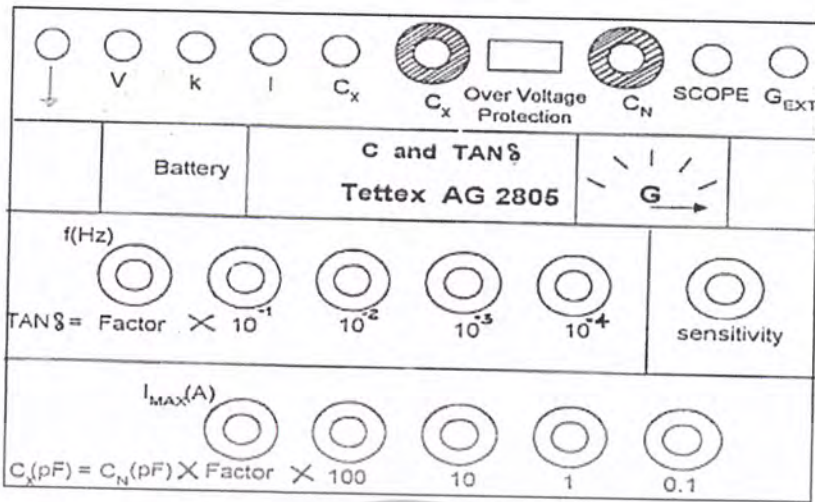
ในกรณีของการวัดแรงดันค่ามีข้อแนะนำให้ต่อ inductance coil ไว้ด้านหลังหม้อแปลง ซึ่งอาจใช้วงจรโซแนนซ์ ได้ด้วยในกรณีนี้ขดลวดเหนี่ยวนำจะต่อขนานกับขั้วอินพุทของหม้อแปลง การต่อแบบขนานนี้มีผลต่อทางค่านทฤษฎีของหม้อแปลงด้วย

7.1.4 รายละเอียดของส่วนต่างๆ ของเครื่อง Tettex AG 2805



รูปที่ 7-11 ลักษณะของเครื่อง และจุดต่อต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-12 ด้านหน้าของ Tettex AG 2805

Dimension: 500 x 300 x 23 mm, Net Weight: approx. 17.5 kg

7.1.4.1 สัญลักษณ์

\perp	: จุดต่อสายกราวด์
V	: junction
k-l	: จุดต่อสายสำหรับหม้อแปลงกระแสรุ่น 4723
C_x	: จุดต่อสายสำหรับวัดทดสอบ C_x
C_N	: จุดต่อสายสำหรับคาปาซิเตอร์ที่เพิ่มขึ้น (Cadd.ext) และคาปาซิเตอร์มาตรฐาน
SCOPE	: จุดต่อสายสำหรับคาโทดเรย์ออสซิลโลกราฟ (Cathod Ray Oscillograph)
Over Voltage Protection-X	: โอเวอร์โวลต์ที่แดงไฟส์ สำหรับป้องกัน bridge arm C_x -V
Over Voltage Protection-N	: โอเวอร์โวลต์ที่แดงไฟส์ สำหรับป้องกัน bridge arm
Bttr	: ที่เก็บแบตเตอรี่ขนาด 9 โวลต์ 4 ก้อน
G	: นูตอินดิเคเตอร์
S	: สวิตช์ปรับความไวสำหรับนูตอินดิเคเตอร์ และสวิตช์สำหรับเช็คแบตเตอรี่ และสวิตช์สำหรับนูตอินดิเคเตอร์
G_{EXT}	: จุดต่อสายสำหรับต่อ null indicator ภายนอก
Tan δ	: สวิตช์ปรับค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริก, สวิตช์ปรับค่าเป็นสตีปจาก ค่า 0 ถึง 10 นวน 3 ตัว และสวิตช์ปรับค่าละเอียดที่เคลื่อนที่ไปมาอย่างสมดุล และต่อเนื่องจากค่า 0 ถึง 11 จำนวน 11 ตัวอธิบายดังนี้ $0...10 \times (10^{-1} + 10^{-2} + 10^{-3}) + 0...11 \times 10^{-4}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (ดูรายละเอียดจากเครื่อง) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_x :	สวิตช์ปรับค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบ , สวิตช์ปรับค่าเป็นสเต็ป จาก 0 ถึง 10 จำนวน 3 ตัว และสวิตช์ปรับค่าความละเอียดที่เคลื่อนที่ไปมาอย่างสมดุลและต่อเนื่อง จาก 0 ถึง 10 จำนวน 1 ตัว
$F \tan \delta$:	สวิตช์ปรับค่าแฟคเตอร์ ตัวคูณค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก และตัวเลือกความถี่ 50/60 Hz
$F C_x$:	สวิตช์ปรับค่าแฟคเตอร์ตัวคูณค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบที่อ่านค่าได้

7.1.5 รายละเอียดของตัวเก็บประจุมาตรฐานที่ใช้ในชุดทดสอบ



Standard Capacitor ของ Tettex Instruments	
Technical dates :	Calibration :
Type 3370/100/200	Capacitance $C_{12} = 99.91 \text{ pF}$
Mfr. Nr. 137349	$\tan \delta_{12} < 1 \cdot 10^{-5}$
Year 1990	Capacitance $C_{13} = 20.22 \text{ pF}$
Rated Voltage 200 kV	$\left. \begin{array}{l} 20^\circ \text{C} \\ 459 \text{ kPa} \\ 20 \dots 200 \text{ kV} \end{array} \right\}$
Test Voltage 240 kV	
Filling Gas SF₆	
Service Pressure 450 kPa	
Temperature - 5...+45 °C	Partial Capacitance
Weight 136 kg	$C_{20} = 116 \text{ pF}$
	$C_{2E} = 0.4 \text{ pF}$
	$C_{10} = 3.4 \text{ pF}$
	Ratio $C_{13}/C_s = 1 : 10000$

รูปที่ 7-13 คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tetter รุ่น 3370

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.6 รายละเอียดของหม้อแปลงที่ใช้ในชุดทดสอบ



KIJWATANA TRANSFORMER			
kVA	1	hp	1
Pri	220	V	50
Sec	10000	V	4.5
No	11718	Year	1989
			0.1 A
			A

รูปที่ 7-14 หม้อแปลง กระแสสลับ 50 Hz 10 kV

7.2 การทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

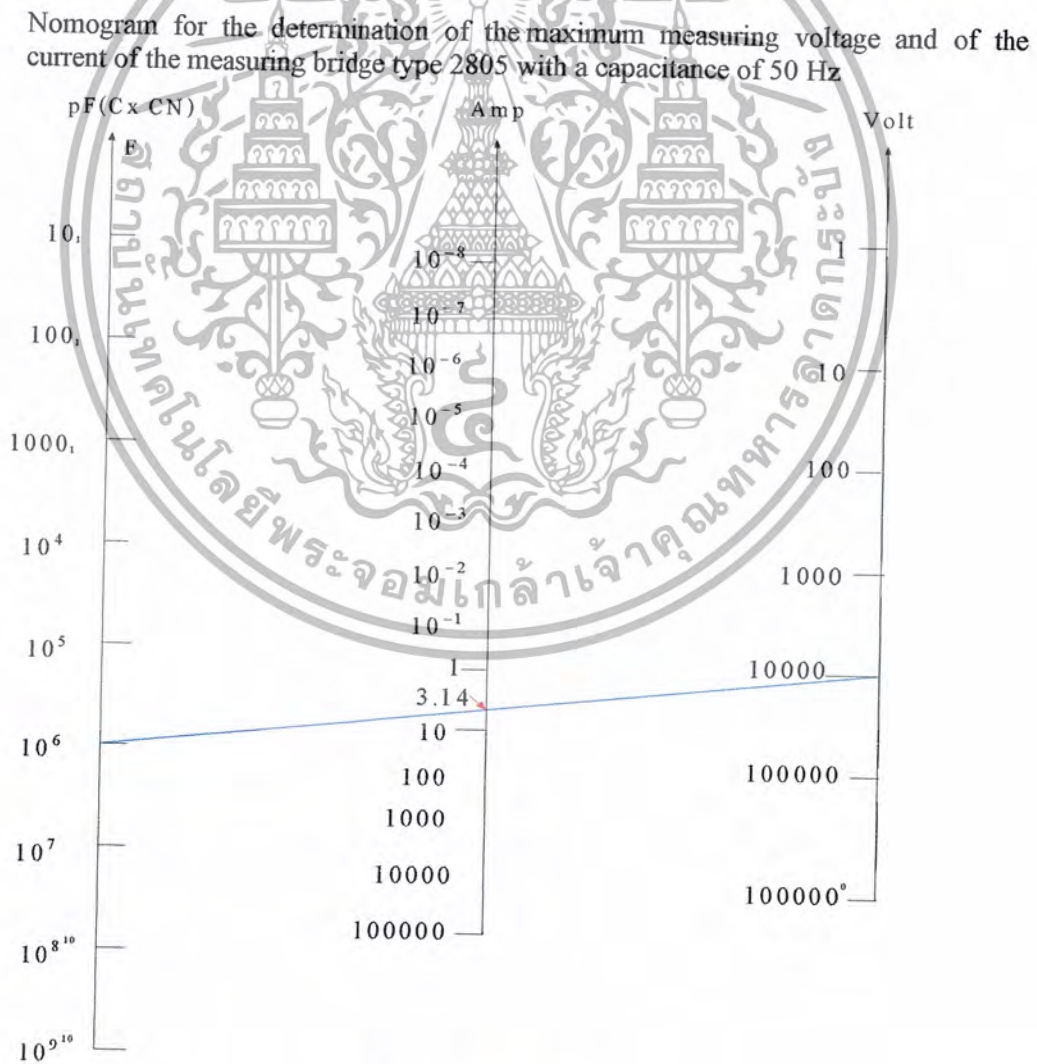
1. เครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกของ Teettex AG 2805
2. หม้อแปลงกระแสสลับ 50Hz 10 kV
3. ชุดควบคุมระดับแรงดันทดสอบ ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างหม้อแปลง 220V/10 kV
4. คาปาซิเตอร์ มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3370 ชนิดอัดก๊าซเซกเซฟลูออไรด์(SF₆) ขนาด 99.90pF 200/240 kV
5. สายเคเบิล FV-FB รุ่น 10D-FB
6. อะแดปเตอร์บ็อกซ์ (adaptor box) ที่บรรจุคาปาซิเตอร์ภายนอกที่ต่อเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 ลูกถ้วยแขวนชนิดต่างๆ

ก่อนที่จะเริ่มทำการทดสอบจะต้องแน่ใจว่าวงจรมีความพร้อม และต่อกราวด์ถูกต้องแล้ว ยิ่งกว่านั้นควรเช็คการปรับ Measurement ratio factor ให้ตรงกับการประมาณค่าความจุของวัสดุทดสอบ และแรงดันที่ใช้ในการวัดซึ่งสามารถที่จะพิจารณาหาค่ากระแสชาร์จได้โดยการแทนค่าในสมการเพื่อหากระแสหรือพิจารณาจาก Monogram ที่ให้ซึ่งจะได้ค่าโดยประมาณออกมาโดยจะต้องทราบค่าสองค่าคือแรงดันที่จะใช้ทดสอบและค่าความจุโดยประมาณของอุปกรณ์ที่จะทดสอบซึ่งจะสามารถหาค่ากระแสชาร์จโดยประมาณออกมาได้จากนั้นก็นำค่าที่ได้ไปทำการพิจารณาว่าค่าที่หามาได้เกินค่าพิกัดของเครื่องหรือไม่ และอยู่ในช่วงที่จะสามารถทำการวัดได้หรือไม่และจะต้องไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องขณะทำการวัดด้วย

ตัวอย่างที่ 7.1 ทำการทดสอบที่ค่าแรงดัน 10000 V และค่า C_x มีค่าประมาณ 1 μF ซึ่งจะได้ค่าโดยประมาณของค่ากระแสออกมาเป็น 3.14 A ซึ่งเป็นค่าที่สามารถใช้เครื่องนี้ทดสอบได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อเครื่อง



รูปที่ 7-15 Monogram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = U \cdot \omega \cdot C$$

จากกราฟ $U = 10000V, C_x = 1 \mu F, I = 3.14 A$

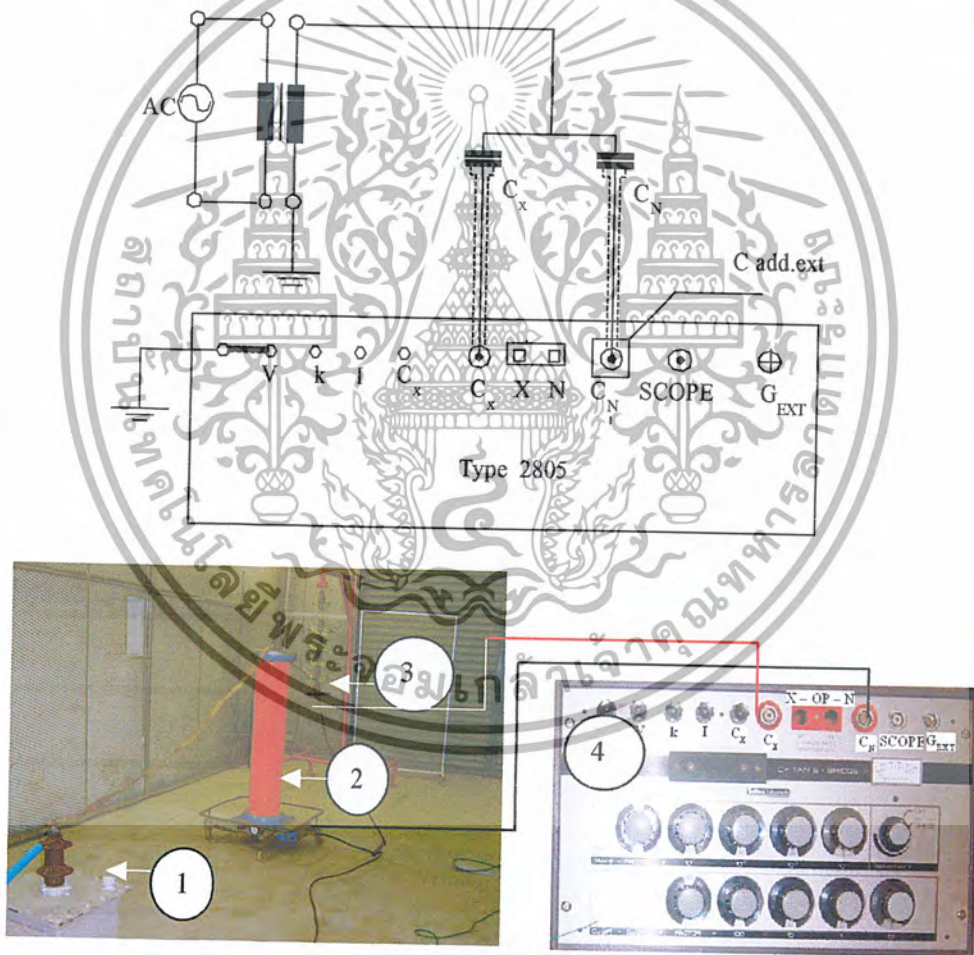
ถ้าไม่มี_Nomogram ก็สามารคคำนวณได้ดังนี้

$$I = \frac{U}{X_c} = \frac{U}{2\pi \times 50 \times c} = \frac{U}{2\pi \times 50 \times 1 \times 10^{-6}} \tag{7-39}$$

วิธีและขั้นตอนการทดสอบ

1) ต่อดวงจรรูป 7-16

2) ตรวจสอบไฟเลี้ยงเครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของ Tettex AG 2805 ว่ามีหรือไม่โดยปรับไปที่สวิตช์ปรับค่าความแม่นยำการวัด (Sensitivity Switch) โดยหมุนไปที่ตำแหน่งเซ็คเบตเตอร์ ถ้ามีไฟเลี้ยงพอ เข็มบนหน้าปัด null indicator จะเคลื่อนไปที่ค่า 100



รูปที่ 7.16 วงจรการทดสอบ

- 1 คือ หม้อแปลง 200 /10 kV
- 2 คือ C_N คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tetter รุ่น 3370
- 3 คือ C_X ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบหรือที่ต้องการวัด

4 คือ เครื่องวัด Tettex AG 2805 มอนูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ปรับสวิตช์ค่าแฟลคเตอร์ผลคูณของค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตตุทดสอบให้อยู่ที่ค่า $I_{max} = 50$ A (ค่ากระแสสูงสุดที่เครื่องมือวัดสามารถทน โดยไม่ทำความเสียหายแก่เครื่องมือวัด)

4) ปรับสวิตช์ปรับค่าความแม่นยำการวัดให้มาอยู่ที่สแต็ปแรก ซึ่งมีระดับความแม่นยำค่าสูงสุด (สวิตช์ปรับค่าความแม่นยำมี 7 สแต็ป)

5) ป้อนโวลเตจเข้าวงจรทดสอบที่ค่า 0.5 kV

6) ปรับสวิตช์แฟลคเตอร์ตัวคูณค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตตุทดสอบ และสวิตช์ปรับค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตตุทดสอบ รวมทั้งปรับสวิตช์แฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกและสวิตช์ปรับค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกโดยปรับให้เข็มบนนูลอินดิเคเตอร์ชี้ที่ 0

7) เพิ่มระดับค่าความแม่นยำในการวัด ไปยังสแต็ปที่ 2 และปรับค่าคาปาซิแตนซ์และแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกตามข้อ 6 จนถึงระดับค่าความแม่นยำในการวัดสแต็ปสุดท้าย (สแต็ปที่ 7)

8) บันทึกค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ที่อ่านได้จากผลการปรับจากข้อ 7 ไปคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของวัตตุทดสอบ

9) ป้อนโวลเตจเข้าวงจรทดสอบที่ค่า 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5 kV แล้วทำตามขั้นตอนข้อ 6-8 ผลการทดสอบนำไปคำนวณดังนี้

ค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตตุทดสอบ = ค่าคาปาซิแตนซ์มาตรฐาน x ค่าที่อ่านได้จากการปรับ

$$C_x = C_N \times F_{CX} \times C_x \quad (\text{ที่อ่านได้จากการปรับ}) \quad (7-40)$$

ค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของวัตตุทดสอบ = ค่าที่อ่านได้จากการปรับ

$$\tan \delta = F \tan \delta \times \tan \delta \quad (\text{ที่อ่านได้จากการปรับ}) \quad (7-41)$$

ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (P)

$$P = V^2 \omega C \tan \delta \quad \text{watt} \quad (7-42)$$

7.2.1 ผลการทดลอง

แรงดัน (kV)	ค่าคาปาซิเตอร์ C_x ที่อ่านได้ (pF)	ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ที่อ่านได้
1	44.90	0.07721
1.5	44.93	0.07823
2	44.93	0.07729
2.5	44.93	0.07620
3	44.93	0.07608
4	44.94	0.07470
5	44.98	0.07460

ตารางที่ 7-2 ผลการทดสอบของถูกด้วยแวนแคว้นยวูกที่หนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น มิใช่สัญญาที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดัน (kV)	ค่าคาปาซิเตอร์ Cx ที่อ่านได้ (pF)	ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ที่อ่านได้
1	45.35	0.07615
1.5	45.38	0.07615
2	45.45	0.07700
2.5	45.43	0.07616
3	45.45	0.07621
4	45.47	0.07588
5	45.48	0.07535

ตารางที่ 7-3 ผลการทดลองของลูกถ้วยแขวนแก้วเหนียวลูกที่สอง

แรงดัน (kV)	ค่าคาปาซิเตอร์ Cx ที่อ่านได้ (pF)	ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ที่อ่านได้
1	45.61	0.12357
1.5	45.45	0.12384
2	45.30	0.12378
2.5	45.30	0.12378
3	45.34	0.12486
4	45.50	0.12577
5	45.47	0.12610

ตารางที่ 7-4 ผลการทดลองของลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลนสีน้ำตาล

แรงดัน (kV)	ค่าคาปาซิเตอร์ Cx ที่อ่านได้ (pF)	ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ที่อ่านได้
1	48.12	0.05510
1.5	48.12	0.05400
2	48.10	0.05400
2.5	48.10	0.05442
3	48.05	0.05362
4	48.04	0.05349
5	48.04	0.05388

ตารางที่ 7-5 ผลการทดลองของลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลนสีขาว

แรงดัน (kV)	ค่าคาปาซิเตอร์ Cx ที่อ่านได้ (pF)	ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ที่อ่านได้
1	36.35	0.0701
2	36.35	0.0725
3	36.40	0.0738

ตารางที่ 7-6 ผลการทดลองของลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลนสีน้ำตาลลูกเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดัน (kV)	ค่าคาปาซิเตอร์ Cx ที่อ่านได้ (pF)	ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ที่อ่านได้
1	40.96	0.31
2	40.96	0.31
3	39.96	0.31
4	38.96	0.30
5	38.96	0.30

ตารางที่ 7-7 ผลการทดลองของลูกถ้วยแขวนแบบแก้ว (อุณหภูมิ 20°C , ความชื้น 72%)

7.2.2 สรุปผลและวิจารณ์การทดสอบ

เนื่องจากการออกแบบลูกถ้วยที่ใช้แรงดันต่างกัน ตามสภาพการใช้งาน จึงทำให้ค่าการเก็บประจุและค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกที่ได้จากการทดลองมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของลูกถ้วย และเครื่องวัดพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกมีสภาพเก่าแล้ว ไม่เคยได้รับการปรับเทียบจึงทำให้ผลการทดสอบอาจจะไม่ได้ตามผลที่จะเป็นจริง โดยในขณะนี้ตัวแทนจำหน่ายได้นำเครื่องวัดพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกไปตรวจสอบสภาพว่ายังใช้งานได้ตามเดิมอยู่หรือไม่และก็มีมีการปรับเทียบเพื่อให้เครื่องวัดพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกมีความเที่ยงตรงในการวัดว่าเครื่องวัดพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกยังให้ค่าที่วัดได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานหรือไม่

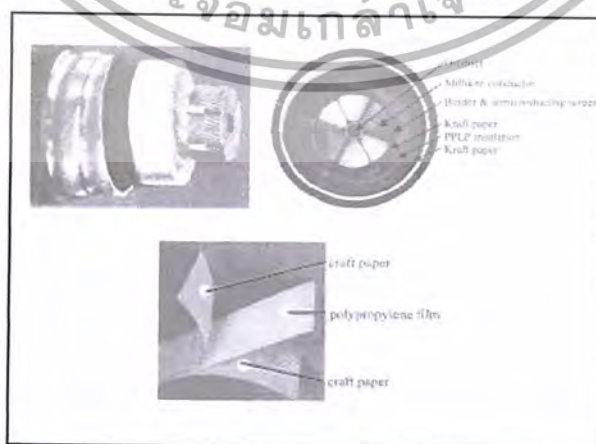
บทที่ 8

การเกิดเบรคดาวน์ และการนำไฟฟ้าในฉนวนของเหลว

8.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงาน และอุปกรณ์ที่สนับสนุนให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในสภาวะปกติของการทำงานจะไม่สามารถหลีกเลี่ยงสภาวะการทำงานที่ต้องเกิดการสูญเสียพลังงานได้ พลังงานสูญเสียดังกล่าวนี้จะอยู่ในรูปของความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามเวลา จึงกล่าวได้ว่าเมื่อมีการนำอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามาใช้งาน ก็จะทำให้เกิดการสะสมความร้อน และอุณหภูมิก็จะสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นอุปกรณ์หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่จะถูกนำมาใช้จึงต้องมีการออกแบบให้สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ในระดับหนึ่งตามมาตรฐาน ในขณะเดียวกันก็ต้องมีการถ่ายเทความร้อนออกจากตัวอุปกรณ์นั้นๆ ตลอดเวลาด้วยเสมอ การออกแบบอุปกรณ์เหล่านี้จึงต้องพิจารณาเลือกฉนวนที่จะใช้ทำระบบฉนวนโดยไม่เพียงแต่จะสามารถรับหรือทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ค่าหนึ่งเท่านั้นความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบกัน

สำหรับฉนวนของเหลวนั้นการใช้งานหลักๆ ในทางไฟฟ้าแรงสูงจะใช้ในการทำฉนวนสายเคเบิล ตัวอย่างสายเคเบิลที่ใช้น้ำมันเป็นฉนวนดังรูปที่ 8-1 เป็นต้น และนอกจากคุณสมบัติการใช้งานในฉนวนแล้วฉนวนของเหลวยังต้องมีคุณสมบัติอื่นๆเข้ามาพิจารณาอีกในการใช้งานจริงเป็นต้นว่าฉนวนน้ำมันในหม้อแปลงนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนให้แก่หม้อแปลงด้วย ส่วนฉนวนในเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเป็นตัวดับอาร์คด้วยฉนวนของเหลว หรือสารไดอิเล็กตริกของเหลวที่นิยมใช้งานกันมากที่สุดคือ น้ำมันปิโตรเลียม และสารพวกไฮโดรคาร์บอนสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆบางครั้งจะมีการใช้น้ำมันซิลิโคน และฟลูออรีเนทไฮโดรคาร์บอนและในระยะหลังๆ นี้เริ่มมีการใช้น้ำมันพีช และเอสเทอร์เป็นฉนวน



รูปที่ 8-1 สายเคเบิลที่ใช้น้ำมันเป็นฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติฉนวนของเหลวจะเป็นส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอนและจะเกิดการโพลาไรซ์ (Polarize) ได้ง่าย การใช้งานฉนวนของเหลวควรจะปราศจากความชื้น สารที่เกิดจากการออกซิเดชัน และสิ่งปนเปื้อนต่างๆ และการที่มีน้ำเจือปนอยู่ในสารนั้น ก็จะมีผลอย่างมากต่อค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของสารน้ำมันหม้อแปลงที่มีน้ำผสมอยู่เพียง 0.01% จะมีค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าลดลงจาก น้ำมันหม้อแปลงในสถานะแห้ง (ไม่มีน้ำเจือปน) ถึง 20% และถ้าน้ำมันมีสิ่งเจือปนเป็นสารอื่น (นอกเหนือจากน้ำ) จะยิ่งทำให้ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าลดลงรวดเร็วกว่านี้มาก

การพิจารณาคูสมบัติของไดอิเล็กตริกเหลวนั้นจะพิจารณากันที่สำคัญๆ อยู่ 3 ประการคือ

- 1) ค่าความนำไฟฟ้า
- 2) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ)
- 3) ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์

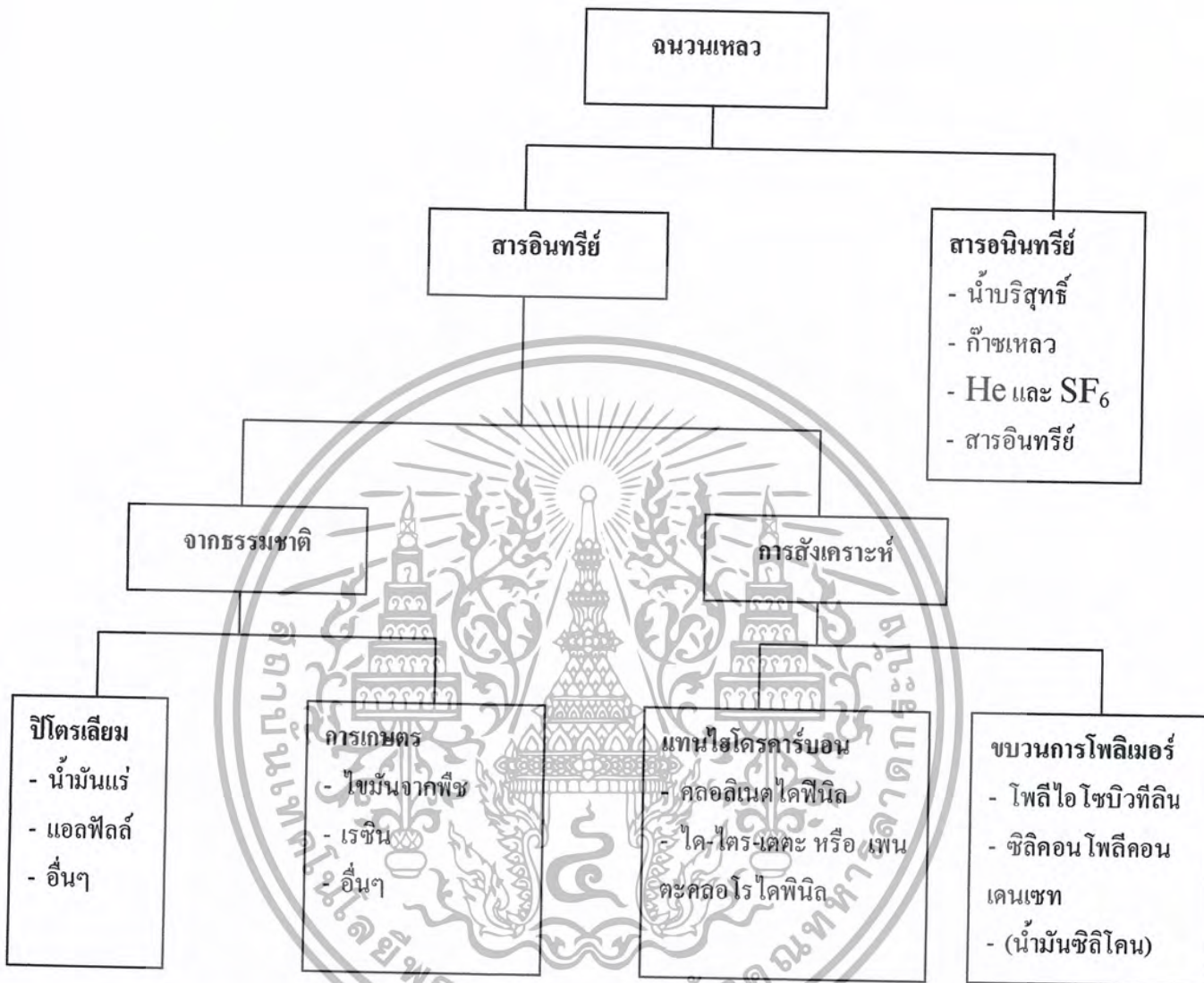
ในการนำฉนวนของเหลวมาใช้งานจริง ๆ นั้นจะต้องพิจารณาคูสมบัตินี้กันอีกหลายประการ ทั้งทางฟิสิกส์และเคมีเป็นต้นว่าความถ่วงจำเพาะความหนืด การทนต่อความร้อนการระบายความร้อน การลุกไหม้

ในทางปฏิบัติจริงการเลือกใช้น้ำมันของเหลวจะพิจารณาจุดหลักที่เสถียรภาพทางเคมี รวมไปถึงคุณสมบัติอื่น เช่น พื้นที่การใช้งาน ราคา ความสะดวก อายุการใช้งาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ฉนวนเหลวที่มีใช้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถที่จะผลิตได้ทั้งจากธรรมชาติโดยขบวนการกลั่นปิโตรเลียม และจากการสังเคราะห์ทางเคมี ซึ่งความหลากหลายจากแหล่งวัตถุดิบที่เป็นแร่ น้ำมันดิบ และกรรมวิธีในการผลิต ทำให้ฉนวนเหลวมีคุณสมบัติ และคุณภาพที่แตกต่างกันออกไป โดยสามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้เป็น 2 ประเภท คือ สารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์

ประเภทที่เป็นสารอินทรีย์จะประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ฉนวนเหลวเป็นประเภทสารอินทรีย์ที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ น้ำมันแร่ (Mineral Oil) น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันพืช ไขมัน เรซิน และแอสฟัลต์ เป็นต้น โดยเฉพาะน้ำมันแร่เป็นที่นิยมนำไปใช้เป็นฉนวน และตัวระบายความร้อนให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในระบบไฟฟ้าแรงสูง จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า น้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil) ฉนวนประเภทนี้นอกจากจะผลิตได้จากแหล่งวัตถุดิบธรรมชาติแล้วยังสามารถผลิตได้จากขบวนการสังเคราะห์สารทางเคมีที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีสถานะเป็นของเหลว และก๊าซ เช่น คลอริเนตไดฟีนีล (Chlorinated Diphenyls) แต่เป็นสารที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และราคาแพง ปัจจุบันจึงไม่มีการใช้งาน หรือประเภทที่มีโครงสร้างเป็นโพลิเมอร์ เช่น โพลีไอโซบิวทิลีน (Polyisobutylene) มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนทางไฟฟ้าดีกว่าน้ำมันหม้อแปลง จึงถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงอย่าง เช่น เคเบิล และ คาปาซิเตอร์แรงสูง รวมถึง ซิลิคอน โพลีคอนเซท ที่มีคุณสมบัติทางความร้อนและสารเคมีที่ดีกว่าน้ำมันหม้อแปลง

ส่วนฉนวนเหลวประเภทสารอนินทรีย์ที่ผลิตได้ประกอบด้วยไนโตรเจนเหลวอาร์กอนออกซิเจนเหลวและน้ำบริสุทธิ์

จากข้อมูลดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นสามารถสรุปประเภทของฉนวนเหลวได้ดังแสดงในรูปที่ 8-2



รูปที่ 8-2 ฉนวนเหลวประเภทต่างๆ

นอกเหนือจากคุณสมบัติของฉนวนเหลวแต่ละชนิดแล้ว ปัจจัยหรือส่วนประกอบอย่างอื่นหลายตัวก็มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า หรือ ความเป็นฉนวนไฟฟ้าของฉนวนเหลว การอธิบายถึงกลไกในการเสถียรคุณสมบัติของการเป็นฉนวน หรือการเกิดดีสชาร์จ และการเบรคดาวน์จึงมีหลายทฤษฎีที่เสนอแนวคิดเพื่อที่จะกล่าวถึงขบวนการเกิดดีสชาร์จ และการเบรคดาวน์ที่สอดคล้อง และเหมาะสมต่อสภาวะแวดล้อมที่ควรจะเป็นหรือบางกรณีอาจจะต้องนำเสนอหลายทฤษฎีในการอธิบายพร้อมกันเพื่อหาเหตุผลที่สอดคล้องต่อปรากฏการณ์หนึ่งๆ

ปัจจุบันกลไกการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวมักจะจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลไกการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์ และ กลไกการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวไม่บริสุทธิ์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1.1 กลไกการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์

เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากพออิเล็กตรอนจะสามารถหลุดออกจากผิวของขั้วคาโทดได้ อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาได้เหล่านี้จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด จึงเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด โดยขณะที่เคลื่อนที่ไปนั้นถึงแม้จะสูญเสียพลังงานไปกับการชนกับ โมเลกุลของเหลว แต่หากพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้ยังมากพออิเล็กตรอนเหล่านี้ก็ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับ โมเลกุลแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็น ไอออนและก่ออวาลานซ์ได้ จึงนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ได้ในที่สุด

8.1.2 กลไกการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวไม่บริสุทธิ์

โดยทั่วไปฉนวนเหลวเชิงการค้ำมักจะไม่สามารถที่จะทำให้มีความบริสุทธิ์สูงได้ ดังนั้น กลไกการเกิดเบรคดาวน์จึงขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนในฉนวนเหลว ตัวอย่าง เช่น อนุภาคตัวนำของแข็ง ความชื้น เป็นต้น เราสามารถจำแนกกลไกการเกิดเบรคดาวน์ได้ดังนี้

- กลไกการเกิดเบรคดาวน์เนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง
- กลไกการเกิดเบรคดาวน์เนื่องจากฟองก๊าซ
- กลไกการเกิดเบรคดาวน์จากหยดของเหลวเจือปน
- กลไกการเกิดเบรคดาวน์จากความร้อน
- กลไกการเกิดเบรคดาวน์เนื่องจากปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง
- กลไกการเกิดเบรคดาวน์จากปรากฏการณ์ EHD (Electrohydrodynamic)

สิ่งเจือปนของแข็งในฉนวนเหลวไม่บริสุทธิ์ เช่น อนุภาคตัวนำไฟเบอร์ หรือฝุ่นละออง เมื่อมีสนามไฟฟ้าสูงมาก พอลำหนึ่งอนุภาคเหล่านี้จะเกิดขั้วจากการเหนี่ยวนำภายใต้สนามไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงกระทำบนอนุภาค โดยหากจำลองอนุภาคเป็นรูปร่างทรงกลม แรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$F_c = r^3 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} E \nabla E$$

โดยที่

r = รัศมีของอนุภาค

ϵ_1 = เอมิตติวิตีฉนวนเหลว

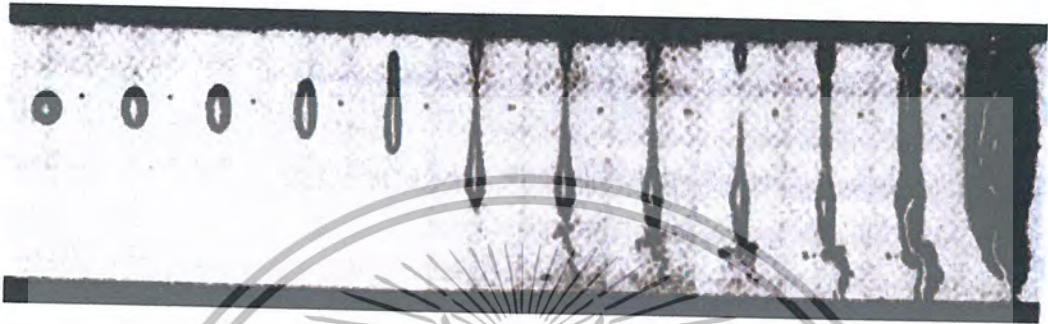
ϵ_2 = เอมิตติวิตีของอนุภาค

E = ความเครียดสนามไฟฟ้าเมื่อละเลยผลของอนุภาคเจือปน

โดยหาก $\epsilon_2 > \epsilon_1$ เช่น เศษโลหะเจือปนแรงจะมีทิศทางไปยังบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ถ้า $\epsilon_2 < \epsilon_1$ เช่น ฟองก๊าซ แรงจะกระทำในทิศตรงข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีฉนวนเหลวมีสิ่งเจือปนเป็นหยดน้ำลูกกลม หรือของเหลวชนิดอื่น อาจเกิดการเบรคดาวนขึ้นเนื่องจากความไม่คงรูปของหยดน้ำนี้ สมมติว่าหยดน้ำนี้มีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_2 จมอยู่ในฉนวนเหลวที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_1 อยู่ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ คือ อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดแผ่นระนาบขนานกัน เนื่องจากหยดน้ำนี้อัดไม่ได้ ผลจากสนามไฟฟ้านี้จะทำให้หยดน้ำนี้ยืดตัวออกตามแนวสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น รูปที่ 8-3 มีหยดน้ำเจือปนในฉนวนเหลว



รูปที่ 8-3 มีหยดน้ำเจือปนในฉนวนเหลว

ในกรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เช่น อิเล็กโตรดแบบระนาบกับระนาบ หรือ ทรงกลมกับทรงกลม ที่แกปแคบ ∇E เท่ากับศูนย์ ทำให้ไม่มีแรงกระทำต่ออนุภาคเจือปน อย่างไรก็ตามถ้า $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ติดของอนุภาคจะมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่น จึงเกิดการเคลื่อนที่และเรียงต่อกันของอนุภาคตามแนวของสนามไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายแนวเรียงของอนุภาคทั้งสองมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับรูปร่างของอนุภาค ดังตัวอย่างผลการคำนวณเมื่ออนุภาคเจือปนเป็นตัวนำรูปร่างต่างๆ ดังนี้

- อนุภาคทรงกลม ($y = 1$) $E_1 = 3E$
- อนุภาคทรงกลมรียาว (Prolate spheroidal particle, $y = 2$) $E_1 = 5.8E$
- อนุภาคทรงกลม ($y = 5$) $E_1 = 18E$

โดยที่

$y =$ อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนที่ยาวที่สุดต่อส่วนที่สั้นที่สุดของอนุภาค

$E_1 =$ ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายอนุภาค

$E =$ ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวเมื่อละเลยผลของอนุภาคเจือปน

เมื่อ E_1 มากกว่าหรือเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนเหลวที่จะทนได้หรือความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตก็จะทำให้เกิดดิซชาร์จบางส่วนบริเวณนั้น และนำไปสู่การเกิดการเบรคดาวน์ โดยมีคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของเหลวที่นิยมใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ดังตารางที่ 8-1 และตารางที่ 8-2

คุณสมบัติ	ชนิดของฉนวนเหลว		
	น้ำมันหม้อแปลง	คลอรีเนท	ฟลูออรีเนท
ความถ่วงจำเพาะ g/cm^3	0.9	1.4	1.8
จุดติดไฟ $^{\circ}C$	130 – 180	-	-
สภาพนำความร้อน $mW/cm^{\circ}C$	1.6	1	1
ความต้านทานจำเพาะ $ohm-cm$ ที่ $85^{\circ}C$	100×10^{12}	100×10^{12}	10×10^{12}
แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียที่ $80^{\circ}C$	10×10^{-4}	6×10^{-4}	6×10^{-4}
50 Hz ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตาม IEC Standard ที่ $20^{\circ}C$ kV/mm	10 – 25		
เปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ϵ_r (50 Hz)	2 – 2.5		
ความชื้นที่ยอมให้มีได้สูงสุด (ppm)	50		
ความหนืด การขยายตัว ($20 - 100^{\circ}C$)	$7 \times 10^{-4}^{\circ}C$		
ผลแตกตัวขององค์ประกอบเมื่อเกิดอาร์คไฟฟ้า	ไฮโดรเจน	กรดไฮโดร-	กรดไฮโดร-
	อะเซททีน	คลอริค	ฟลูออริค

ตารางที่ 8-1 คุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของเหลวที่นิยมใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Property	Transformer Oil	Cable Oil	Capacitor Oil	Askerals	Silicone Oils
Breakdown strength at 20 °C on 2.5 mm standard sphere gap	15 kV/mm	30 kV/ mm	20 kV/ mm	20 – 25 kV/ mm	30 – 40 kV/ mm
Relative permittivity (50 Hz)	2.2 – 2.3	2.3 – 2.6	2.1	4.8	2 – 73.0
Relative permittivity (50 Hz)	0.001	0.002	0.25×10^{-3}	0.60×10^{-2}	10^{-3}
Relative permittivity (1 kHz)	0.0005	0.0001	0.10×10^{-3}	0.50×10^{-3}	10^{-4}
Resistivity (phm-cm)	$10^{12} - 10^{13}$	$10^{12} - 10^{15}$	$10^{13} \times 10^{14}$	2×10^{13}	3×10^{14}
Specific gravity at 20 °C	0.89	0.93	0.88 – 0.87	1.4	1.0 – 1.1
Viscosity at 20 °C (CS)	30	30	30	100 – 150	10 – 1000
Acid value (mg/gm of KOH)	Nil	Nil	Nil	Nil	Nil
Refractive index	1.4820	1.4700	1.4740	1.60	1.5000 – 1.6000
Saponification (mg of KOH/gm of Oil)	0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01
Expansion (20 – 100 °C)	$7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	$7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	$7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	$7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	$5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$
Maximum permissible water Content (in ppm)	50	50	50	<30 (negligible)	<30 (negligible)

ตารางที่ 8-2 คุณสมบัติของคนวนน้ำมันชนิดต่างๆ ที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 การนำไฟฟ้า และ เกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์

ในการ ทดสอบฉนวนของเหลว นั้น ถ้าเราวัดค่าความนำไฟฟ้าได้ $10^{-18} - 10^{-20}$ mho/cm ในขณะที่ใส่สนามไฟฟ้าต่ำกว่า 1 kV/cm อาจแสดงว่าของเหลวนั้นยังไม่บริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าขึ้น (>100kV/cm) กระแสจะยังไม่เพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน ถ้าพิจารณาอย่างละเอียดเริ่มที่ กระแสน้อยๆที่สนามไฟฟ้าต่ำๆ จะมีกระแสจากการแยกตัวของประจุจากเนื้อสารที่สนามไฟฟ้าสูงขึ้น กระแสจะถึงจุดอิ่มตัว (Saturation) และที่สนามไฟฟ้าสูง กระแสจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีสนามไฟฟ้าช่วยเพิ่มจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่ขั้วอิเล็กโทรด และเกิดเป็นการเพิ่มแบบทวีคูณขึ้น โดยอธิบายได้จาก ทฤษฎีกลไกการเบรคดาวน์ของ Townsend กระแสที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดเบรคดาวน์

ในความเป็นจริงแล้วกลไกการเกิดกระแสดังกล่าวยังไม่สามารถอธิบายแน่ชัดได้ อย่างไรก็ตามเราทราบว่อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนั้นกระเจิงมาจากขั้วที่เป็นคาโทด และเพิ่มอย่างทวีคูณ ในลักษณะเดียวกับการเกิดไอออนในเซชันในก๊าซ ซึ่งอธิบายโดยทฤษฎีของ Townsend ขณะที่ถึงจุดเบรคดาวน์กระแสจะเพิ่มขึ้นกะทันหัน ในลักษณะคล้ายกับการเกิด ไอออนในเซชันปฐมภูมิ (Primary ionization) และยังมีประจุบวกที่วิ่งมายังคาโทดทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons) ซึ่งนำไปสู่การเบรคดาวน์ในที่สุด ค่าแรงดันเบรคดาวน์จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้า ระยะห่าง (Gap) ค่า Work function ของคาโทด และอุณหภูมิของคาโทด นอกจากนี้ความหนืด อุณหภูมิ ความหนาแน่น และ โครงสร้าง โมเลกุลของฉนวนเหลวก็มีผลต่อค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวด้วย ในตารางที่ 8-3 จะแสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์ และก๊าซเหลวชนิดต่างๆ

Liquid	Maximum breakdown strength (MV/cm)
Hexane	1.1 - 1.3
Benzene	1.1
Transformer Oil	1.0
Silicone	1.0 - 1.2
liquid Oxygen	2.4
Liquid Nitrogen	1.6 - 1.9
Liquid Hydroge	1.0
Liquid Helium	0.7
Liquid Argon	1.10 - 1.42

ตารางที่ 8-3 ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์สูงสุดของฉนวนเหลวบางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์จะสูงกว่าในตารางที่ 8-3 ถ้าก๊าซที่ผสมในฉนวนเหลวเป็นพวก Electronegative (เช่น ออกซิเจน) หรือถ้าเพิ่มความดันของฉนวนเหลวก็จะทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์เพิ่มขึ้น

สรุป การเกิดเบรคดาวน์ในของเหลวบริสุทธิ์ (หรืออาจเรียกว่า Electronic Breakdown) รวมทั้งการเกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่สนามไฟฟ้ามากกว่า 100 kV/cm พอจะอธิบายได้ว่า อิเล็กตรอนจะเกิดจากการกระเจิงจากคาโทด และที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับสิ่งปนเปื้อน และจะมีการเพิ่มอย่างทวีคูณตามทฤษฎีกระบวนการเกิดไอออนในเซชันของ Townsend (Primary & Secondary ionization) และดำเนินไปสู่การเบรคดาวน์ในที่สุด

8.3 กลไกทางอุณหภูมิกของการเกิดเบรคดาวน์

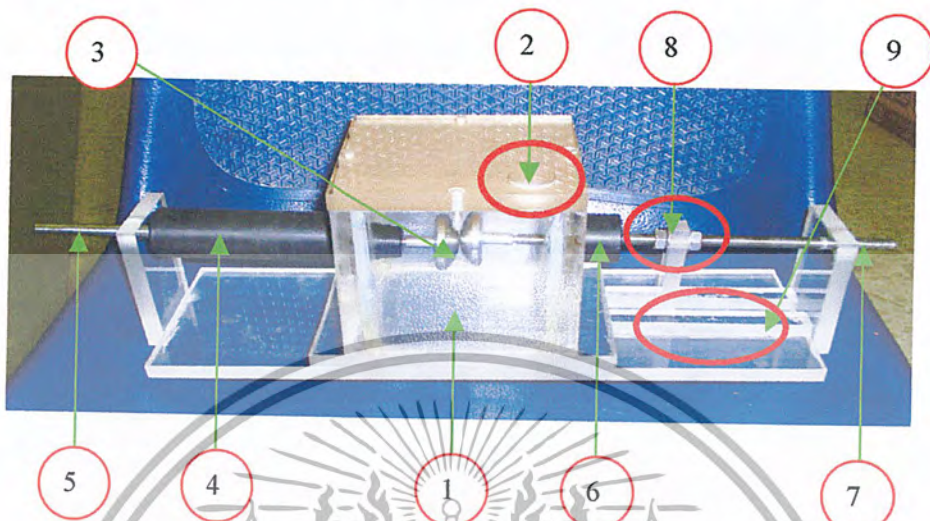
เทอร์มัลเบรคดาวน์เป็นอีกกลไกหนึ่งที่สามารถอธิบายการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวได้เป็นอย่างดี กลไกนี้เป็นการพิจารณาการทดลองขณะที่เกิดกระแสปริมาณมากๆ ในช่วงก่อนเกิดเบรคดาวน์ โดยวิเคราะห์ให้กระแสเดินทางจากจุดเล็กๆ บนผิวคาโทด (มีความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 1 A/cm^2)

กระแสที่มีความหนาแน่นสูงนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในฉนวนเหลว และทำให้เกิดฟองไอขึ้น ฟองไอนี้จะพองตัวกันขึ้นเมื่อพลังงานเกินกว่า 10^7 w/cm^3 และเกิดเบรคดาวน์ตามมา โดยการยึดตัวของฟองก๊าซจนถึงจุดวิกฤตหรือเมื่อช่องว่างที่เกิดขึ้นยึดตัวจนเป็นสะพานระหว่างขั้วอิเล็กโตรด โดยทั้ง 2 กรณีจะสังเกตเห็นการสปาร์คเป็นประกายไฟขึ้น

การพิจารณากลไกเบรคดาวน์ลักษณะนี้ จะได้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์แปรผันกับความดัน และ โครงสร้าง โมเลกุลของฉนวน ตัวอย่างเช่น n -alkenes จะมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ขึ้นกับความยาวลูกโซ่ของโมเลกุล อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้จะอธิบายได้เฉพาะในกรณีที่มีระยะระหว่างอิเล็กโตรด (gap) ใกล้ๆ กันเท่านั้น ($\leq 100 \mu\text{m}$) ไม่สามารถอธิบายการเบรคดาวน์ที่ระยะห่างมากๆ ได้

8.4 การออกแบบชุดภาชนะทดสอบการเบรคความดันในน้ำมันหม้อแปลง

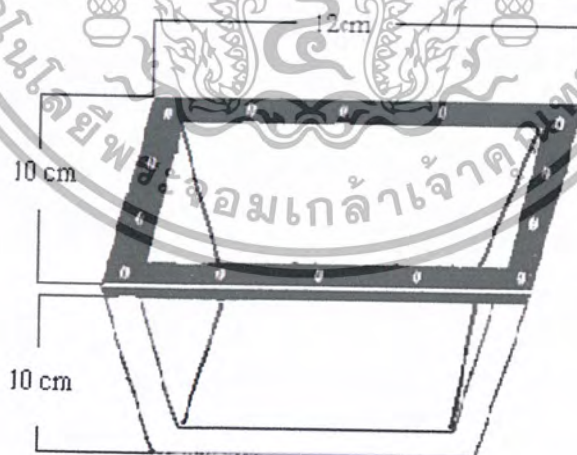
ชุดภาชนะทดสอบการเบรคความดันในน้ำมันหม้อแปลง แบ่งออกเป็น 9 ส่วน ดังรูปที่ 8-4



รูปที่ 8-4 อุปกรณ์ทดสอบการเบรคความดันในน้ำมันหม้อแปลง

8.4.1 ตัวภาชนะ

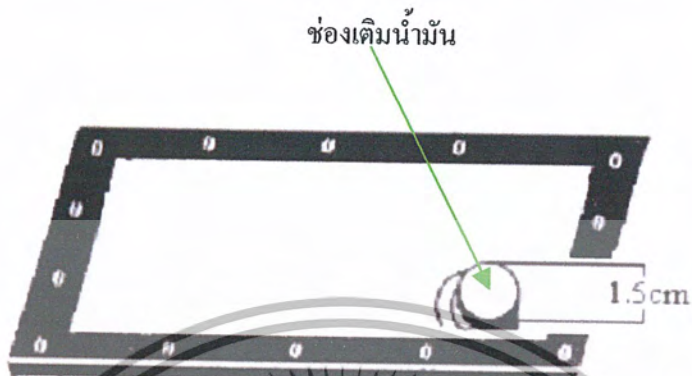
ทำมาจากอลูมิเนียม 1cm ซึ่งตัวภาชนะจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับของเหลว (น้ำมันหม้อแปลง) ที่อยู่ในภาชนะ ขนาดตัวภาชนะ 10cm. × 12cm. × 10 cm. ดังรูปที่ 8-5



รูปที่ 8-5 ตัวภาชนะ

8.4.2 ช่องเติมน้ำมัน

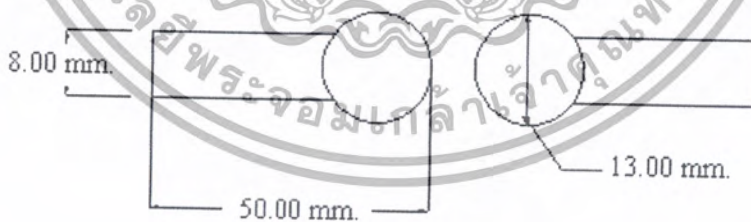
ทำมาจากอลูมิเนียม ซึ่งตัวช่องเติมน้ำมันนั้นจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับของเหลว(น้ำมันหม้อแปลง) อยู่ในลักษณะเหมือนกับตัวภาชนะเหมือนกัน ขนาด 1.5 cm ดังรูปที่ 8-6 ช่องเติมน้ำมัน



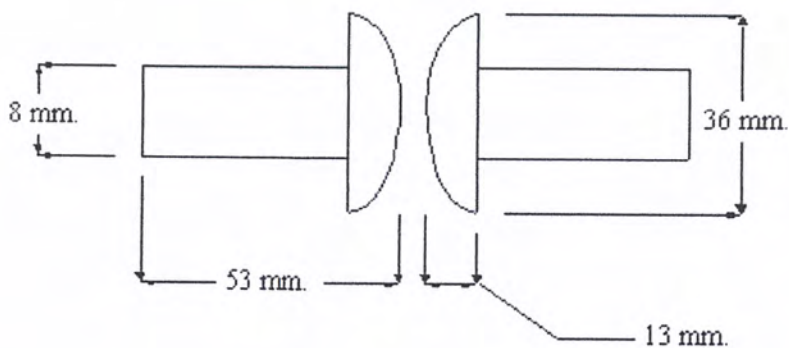
รูปที่ 8-6 ช่องเติมน้ำมัน

8.4.3 อิเล็กโตรดแบบ ทรงกลม และ ครึ่งวงกลม

ทำมาจากสแตนเลส โดยหัวอิเล็กโตรดแบบต่างๆ จะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับของเหลว (น้ำมันหม้อแปลง) ทำให้เกิดสนิม ดังรูปที่ 8-7 หัวอิเล็กโตรดแบบทรงกลม และ รูปที่ 8-8 หัวอิเล็กโตรดแบบวงรี



รูปที่ 8-7 หัวอิเล็กโตรดแบบทรงกลม



รูปที่ 8-8 หัวอิเล็กทรอนิกส์แบบวงรี

8.4.4 ปลอกฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

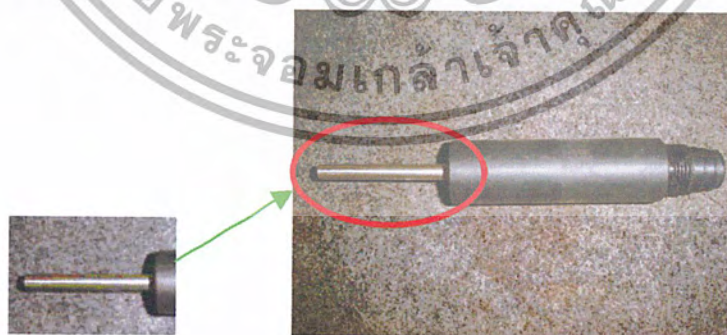
ทำจากซูเปอร์อีพอกซีชนิดพิเศษทนแรงดันสูงดังรูปที่ 8-9 ปลอกฉนวนไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 8-9 ปลอกฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

8.4.5 ปลายต่อไฟฟ้าแรงสูง

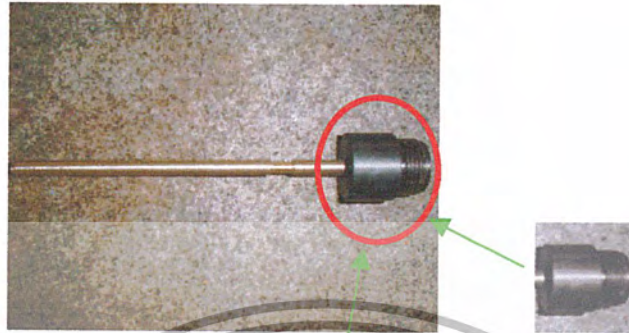
ทำจากสแตนเลสนำมากลับพร้อมทั้งทำขั้วต่อสายไว้เพื่อทำการต่อสายไฟหรือสายตัวนำอยู่ติดกับฉนวนไฟฟ้าแรงสูงทางด้านปลาย ดังรูปที่ 8-10 ปลายต่อไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 8-10 ปลายต่อไฟฟ้าแรงสูง

8.4.6 ปลอกฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์

ทำจากซูเปอร์ดีนชนิดพิเศษทนแรงดันสูงอยู่ติดกับแกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านกราวด์ ดังรูปที่ 8-11 ปลอกฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์



ปลอกฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์

รูปที่ 8-11 ปลอกฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์

8.4.7 ปลายด้านต่อกราวด์

ทำจากเสตนเลสสตีลพร้อมทั้งทำขั้วต่อสายไว้เพื่อทำการต่อสายหรือสายตัวนำต่อลงกราวด์ดังรูปที่ 8-12 ปลายด้านต่อกราวด์

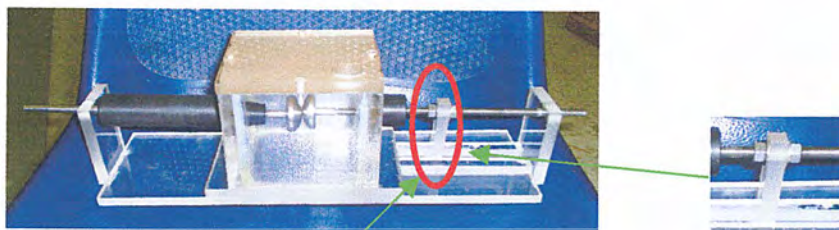


ปลายด้านต่อกราวด์

รูปที่ 8-12 ปลายด้านต่อกราวด์

8.4.8 ตัววัดระยะ gap ข้างในอุปกรณ์ทดสอบ

ทำจากอลูมิเนียม 1 cm. ขนาด 1.5 cm×5cm ใช้ในการวัดระยะ gap ข้างในอุปกรณ์ทดสอบ ดังรูปที่ 8-13 ตัววัดระยะ gap ข้างในอุปกรณ์ทดสอบ



ตัววัดระยะ gap ข้างในอุปกรณ์ทดสอบ

รูปที่ 8-13 ตัววัดระยะ gap ข้างในอุปกรณ์ทดสอบ

8.4.9 ฟุตเหล็กวัดระยะ

ทำจากสแตนเลสมีความยาว 15 cm. แล้วทำการตัดให้เหลือ 8 cm เพื่อให้รองรับกับรางที่จะติด ฟุตเหล็กวัดระยะ ดังรูปที่ 8-14 ฟุตเหล็กวัดระยะ และ รูปที่ 8-15 รางสำหรับติดฟุตเหล็กวัดระยะ



รูปที่ 8-14 ฟุตเหล็กวัดระยะ



รางสำหรับติดฟุตเหล็กวัดระยะ

ฟุตเหล็กวัดระยะ



รูปที่ 8-15 รางสำหรับติดฟุตเหล็กวัดระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.5 ระยะระหว่างอิเล็กโทรด (gap) กับผลของการเกิดเบรคดาวน์

ในทฤษฎีที่ผ่านมาจะมีเพียงการคำนวณหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์สูงสุดของฉนวนที่พิจารณาเท่านั้น แต่ที่จริงแล้วยังมีอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อการเกิดเบรคดาวน์ของฉนวนเหล่านั้นก็คือ ระยะระหว่างอิเล็กโทรดหรือระยะห่าง (gap length) โดยค่าแรงดันเบรคดาวน์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$V_b = Ad^n \quad (8-1)$$

โดย

d = เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

A = เป็นค่าคงที่

n = เป็นค่าคงที่

A และ n จะหาได้จากการทดลองเท่านั้น และเราสามารถหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$E_b = \frac{V_d}{d}$$

(8-2)

8.6 ตัวอย่างการทดลองการเบรคดาวน์

โดยใช้แถบทรงกลมขนาดหัวอิเล็กโตรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm ได้ผลการทดลองดังนี้

ระยะห่าง (gap) (mm)	4	6	10	12
แรงดันเบรคดาวน์ (kV)	90	140	210	255

จงเขียนสมการแสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงนี้

วิธีทำ จากผลการทดลองสามารถพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 8-16



รูปที่ 8-16 กราฟแสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์เป็นฟังก์ชันของระยะห่างของหัวอิเล็กโตรดจากข้อมูลในตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จากสมการ (8-1)} \quad V_b = Ad^n$$

$$\text{Take log ทั้ง 2 ข้าง} \quad \log V_b = \log A + n \log d$$

$$\log V_b - \log A = n \log d$$

$$n = \frac{\log V_b - \log A}{\log d}$$

จากกราฟในรูปที่ 8-16 จะได้ว่า

$$n = \text{ความชันของกราฟ}$$

$$= 0.947$$

และ

$$A = 24.5$$

ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรคดาวน์กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดของน้ำมันหม้อแปลงที่ทดสอบได้ดังนี้

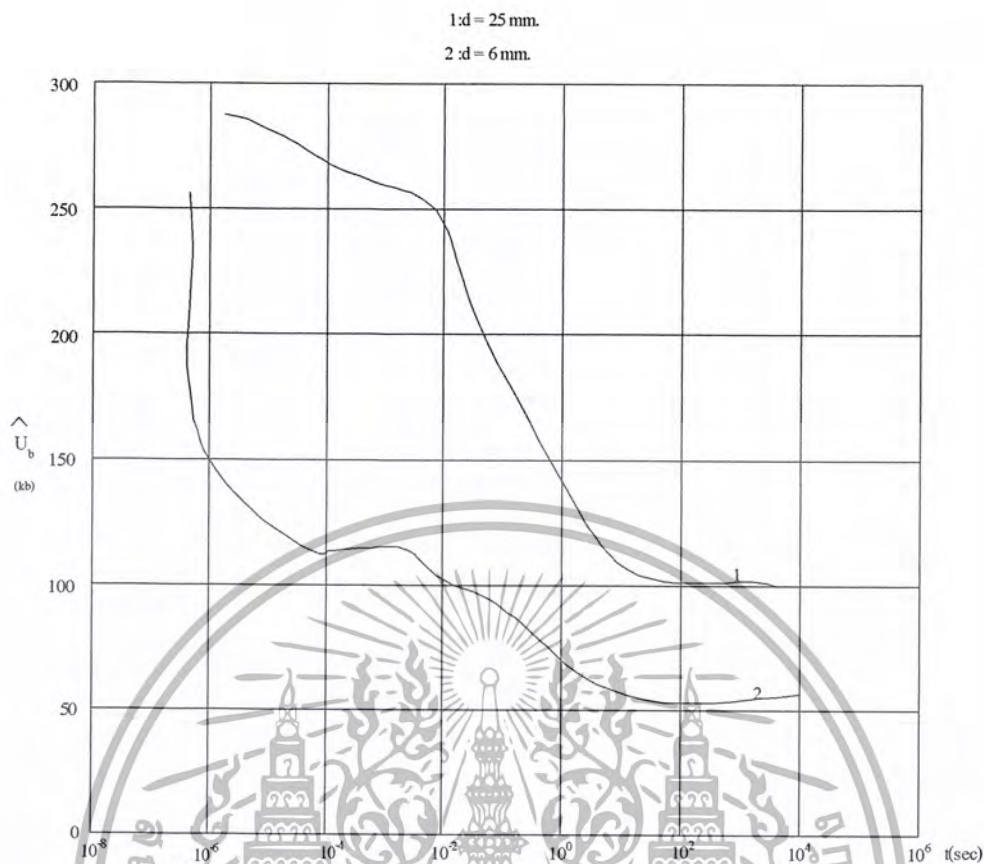
$$V_d = 24.5 d^{0.947}$$

(8-3)

8.7 ลักษณะของแรงดันกับผลของการเกิดเบรคดาวน์

นอกจากปัจจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วแรงดันเบรคดาวน์ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของลูกคลื่นแรงดันและช่วงเวลาที่ป้อนผ่านฉนวนเหลวอีกด้วย นั่นคือความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวจะขึ้นอยู่กับความเครียดของสนามไฟฟ้าที่คงอยู่ในลักษณะต่างๆ จากการทดลองพบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ขณะจ่ายแรงดันคงตัว (D.C. และ A.C.) จะมีค่าต่ำกว่าขณะจ่ายแรงดันลูกคลื่นอิมพัลส์ดังในรูปที่ 8-17 กราฟแสดงแรงดันเบรคดาวน์กับเวลาที่จ่ายแรงดันของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

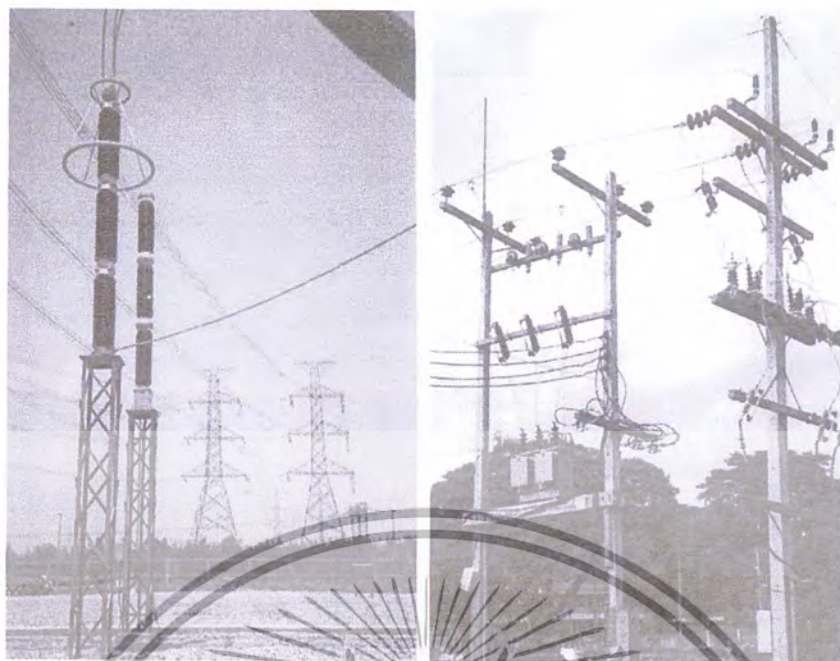
โดยสรุปแล้วก็ยังไม่มียุทธวิธีใดที่สามารถอธิบายการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวได้อย่างสมบูรณ์แบบ เพราะกลไกนี้มีความซับซ้อนมาก และโดยทั่วไปค่าแรงดันเบรคดาวน์มักจะหาจากการทดลองเท่านั้น ดังนั้นในการที่วิศวกรจะเลือกใช้ฉนวนเหลวที่เหมาะสมจะต้องศึกษาให้ดีเกี่ยวกับคุณสมบัติของฉนวนเหลวที่จะนำมาใช้งานนั้นๆ



รูปที่ 8-17 กราฟแสดงแรงดันต้นเบรคความถี่กับเวลาที่อ้ายแรงดัน
ของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

8.8 การเกิดเบรคความถี่ และการนำไฟฟ้าในฉนวนแข็ง

ฉนวนไฟฟ้า นอกจากจะทำหน้าที่กั้น หรือแยกส่วนที่มีไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์มิให้สัมผัสหรือลัดวงจรถึงกันแล้ว บางส่วนยังต้องทำหน้าที่ยึดให้มั่นคง หรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนก๊าซและฉนวนเหลวใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีและเพียงพอ แต่ต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบทำหน้าที่ยึดและรับแรงกล ตัวอย่างง่ายๆ เช่น สายไฟฟ้าขึงในอากาศ ใช้อากาศทำหน้าที่เป็นฉนวน แต่สายไฟฟ้าจะลอยหรือยึดอยู่ในอากาศได้อย่างไร จำเป็นต้องใช้ฉนวนแข็ง เช่น ลูกถ้วยฉนวนทำหน้าที่ยึดสายไฟฟ้าไว้ให้มั่นคงห่างจากดินหรือสายไฟฟ้าอื่นที่มีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากัน หรือเคเบิลอัดน้ำมันก็ตาม ต้องใช้ฉนวนแข็งเป็นตัวยึดค้ำน้ำหนัก หรือ หม้อแปลงไฟฟ้าใช้ฉนวนเหลวเป็นฉนวนหลัก แต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งทำหน้าที่ยึดค้ำควดต่างๆ และแกนเหล็กให้มั่นคง ให้มีระยะห่างตามที่กำหนดออกแบบฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่า ฉนวนแข็งเป็นฉนวนที่สำคัญยิ่งในระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 8-18 เป็นระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบขึงในอากาศที่มีแรงทางกลและมีสนามไฟฟ้าสูง



รูปที่ 8-18 ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบเชิงในอากาศที่มีแรงทางกลและมีสนามไฟฟ้าสูง

a) สายส่งแรงสูง (Transmission Lines)

b) ระบบจำหน่าย (Distribution System)

8.9 ลักษณะสมบัติของฉนวนแข็งที่ต้องการ

ลักษณะสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญคือ

- 1) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)
- 2) เปรอร์มิตติวิตี (ϵ')
- 3) แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)
- 4) ความคงทนต่อแรงกล
- 5) ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี และ ความร้อน

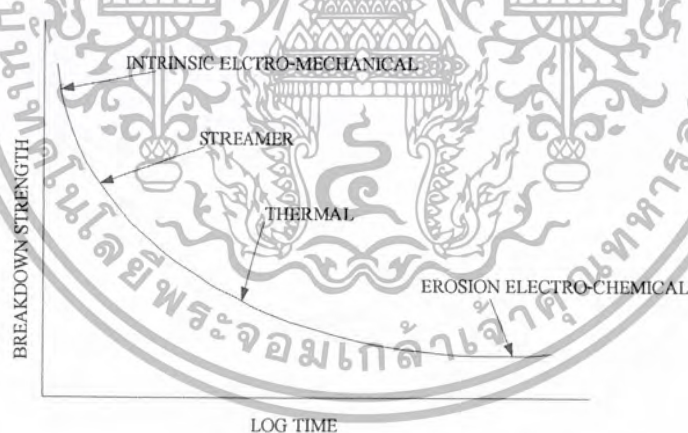
ฉนวนแข็งที่ดีนั้นจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าแรงสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ ทนต่อแรงกลได้สูง และ ปลอดภัยจากฟองก๊าซและความชื้น และไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้สูง และทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี และไม่เป็นพิษเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งที่ใช้กันอยู่ทั่วไป อาจได้มาจากสารอินทรีย์ เช่น กระดาษ ฝ้าย ยาง เป็นต้น หรือ สารอนินทรีย์ เช่น ไมก้า แก้ว เซรามิกส์ หรือสารสังเคราะห์ เช่น พลาสติก เป็นต้น

8.10 กลไกเบรคดาวน์ของฉนวนแข็ง

ผลของการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนแข็ง จะต่างไปจากการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนก๊าซ และฉนวนเหลว คือ ฉนวนก๊าซสามารถกลับคืนสู่สภาพฉนวนได้ดั้งเดิม ภายในเวลาอันรวดเร็ว หลังจากการเกิดเบรคดาวน์นั้นได้ผ่านพ้นไปแล้ว ฉนวนเหลวก็เช่นเดียวกัน ฉนวนสามารถกลับคืนสู่สภาพฉนวนได้ แต่ช้ากว่าก๊าซ ฉนวนแข็งเมื่อเกิดการเบรคดาวน์แล้วจะเสียหายอย่างถาวร ใช้งานอีกไม่ได้

กลไกการเกิดเบรคดาวน์ในของแข็งนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนมาก อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการจ่ายสนามไฟฟ้าตกคร่อมอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 8-19 โดยสามารถแยกพิจารณาปรากฏการณ์ในแต่ละช่วงเวลาที่จ่ายแรงดันตกคร่อมฉนวนแข็งได้ ดังต่อไปนี้

- Intrinsic or Ionic Breakdown
- Electromechanical Breakdown
- Failure due to Treeing and Traking
- Thermal Breakdown
- Electrochemical Breakdown
- Breakdown due to Internal Discharges



รูปที่ 8-19 กราฟแสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ เมื่อจ่ายแรงดันคร่อมฉนวนของแข็งระยะเวลาต่างๆ กัน

8.11 การเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนของแข็ง

ฉนวนของแข็งมีการใช้งานในวัสดุทางไฟฟ้าแทบทุกชนิด หรืออาจเรียกว่าทุกชนิดเลยก็ว่าได้ ดังนั้นในการศึกษาเกี่ยวกับฉนวนไฟฟ้าจะต้องให้ความสำคัญกับฉนวนของแข็งเป็นอย่างมาก ในการพิจารณาคูสมบัติของฉนวนแข็งที่จะเลือกใช้จะเหมือนกับการพิจารณาฉนวนของเหลวดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ฉนวนที่ดีจะต้องมีการสูญเสียต่ำ (กระแสรั่วไหลน้อย) มีความคงทนแข็งแรง ไม่ควรมีโพรง หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างภายใน และไม่ควรมีความชื้น มีคุณสมบัติทนความร้อนและการกัดกร่อนทางเคมี โดยทั่วไป
 ฉนวนของแข็ง จะมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์สูงกว่าฉนวนเหลวและก๊าซ แต่ข้อเสียเปรียบ
 ฉนวนแข็ง คือ เมื่อฉนวนแข็งเกิดการเบรคดาวน์ขึ้น จะทำให้โครงสร้างเสียหายอย่างถาวร ซึ่งต่างจากก๊าซ
 และฉนวนเหลวที่มีการคืนตัวกลับสภาพเดิมหลังจากเกิดเบรคดาวน์ได้ ถ้าหยุดจ่ายสนามไฟฟ้าลง

8.12 การเกิดเบรคดาวน์ของฉนวนของแข็งในทางปฏิบัติจริง

ในความเป็นจริงแล้ว เมื่อฉนวนเกิดเบรคดาวน์ขึ้นจะไม่ได้เกิดในรูปแบบที่แน่นอนในแบบต่างๆ
 ที่ได้กล่าวไป แต่มักจะเกิดจากการใช้งานเป็นระยะเวลานาน เช่น การเกิดเบรคดาวน์อันเนื่องมาจากร่อง
 รอยบนผิฉนวน โดยรอยบนผิวนี้อาจเป็นส่วนที่นำกระแสไปบนผิฉนวนซึ่งจะนำไปสู่การเบรคดาวน์ตาม
 ผิหรือที่เรียกว่าการรวบไฟ (Flash over) ของฉนวน การเกิดเบรคดาวน์ในแบบอื่นๆ เช่น การเบรคดาวน์
 ทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เกิดอิเล็กโตรไลซิส หรือ การเกิดการรวมตัวของ
 ไอออน ฯลฯ นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากการที่มีโพรงภายในเนื้อฉนวน และทำให้เกิดการดีสชาร์จ
 บางส่วน หรือที่เรียกว่า Partial Discharges ขึ้นได้ (การเบรคดาวน์ลักษณะนี้สำคัญมากในกรรมวิธีการ
 ผลิตฉนวนพวกกระดาษชุบน้ำมันที่ใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิลแรงสูง และตัวเก็บประจุแรงดันสูง)
 คุณสมบัติของฉนวนของแข็งที่มีการใช้งานกันแพร่หลายจะแสดงในตารางที่ 8-4 คุณสมบัติของวัสดุ
 ฉนวนแข็ง



Insulating material	Dielectric constant at 50 Hz	Loss factor $\tan \delta \times 10^{-4}$		Specific resistance at 20° C $\Omega \cdot \text{cm.}$	Breakdown strength kV/mm
		At 50 Hz	At 1 MHz		
Glass	3.5-9	5-100	5-100	$>10^{10}$	10-40
Ceramic insulators					
Glazed	6	170-250	10-120	$>10^{11}$	35
Steatite	6	10-30	3-20	$10^{12} - 10^{13}$	30-45
Sinterkorund	11	15	10	10^{15}	25-45
Mica-fOil (made from Mica, paper and shellac or asphalt)	4	200-400		10^{13}	17
Mineral Oil (transformer Oil)	2-2.5	1-5	1-5	$10^{13} - 10^{14}$	10-25
Paper(insulating paper)					
dry	2-2.5	25-40	200-400	10^{15}	10-20
Soaked in Oil	3-4	10-30		10^{15}	40-50
Acetobutyrate fOil CAB	3.8-4.1	70-110	240-260	10^{15}	125-130
Epoxy casting resin EP	3.2-3.9	35-50	100-200	$10^{15} - 10^{16}$	20-45
Phenolic resin moulding	5-15	100-300	50-700	$10^9 - 10^{14}$	10-40
Polyamide PA	3.5-4	300-1000	230-270	$10^8 - 10^{11}$	50
Polyethylene PE	2.3	2-4	2-4	10^{16}	≈ 40
Polyethylene terephthalate PETP	3.2	20	190	$>10^{15}$	160
Polycarbonate PC	3	7	110	$\geq 10^{16}$	>100
Polystercasting resin UP	3-7	30-300	60-400	$10^{13} - 10^{15}$	25-45
Polyacetal POM	4	10-15	55	10^{15}	70

ตารางที่ 8-4 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Insulating material	Dielectric constant at 50 Hz	Loss factor tan $\delta \times 10^{-4}$		Specific resistance at 20 ° C $\Omega \cdot \text{cm.}$	Breakdown strength kV/mm
		At 50 Hz	At 1 MHz		
Polymethylmethacrylate PMMA	3.5-4.5	500-600	150-300	10^{16}	≈ 35
Polypropylene PP	2.3-2.5		5-6	10^{16}	75
Polystyrene PS	2.5	1.5-2.5	1.5-2.5	10^{17}	≈ 55
Polytetrafluorethylene TPFE	2.0	<2	<2	10^{17}	≈ 25
Polyvinyl chloride hard PVC	3.8-4.3	120-1500	60-1000	$10^{15}-10^{16}$	40
Silicone rubber Si	2.5-5	5-500	5-500	$10^{13}-10^{16}$	20-30

ต่อ ตารางที่ 8-4 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.13 การทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลง

การทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ

- 1) การทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม
- 2) การทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์แกปครึ่งวงกลมกับแกปครึ่งวงกลม
- 3) การทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม
- 4) การทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปครึ่งวงกลมกับแกปครึ่งวงกลม

อุปกรณ์การทดลอง

- 1) แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 100 kV
- 2) ชุดทดสอบรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดตามมาตรฐาน IEC 156
- 3) ฉนวนน้ำมัน (น้ำมันหม้อแปลง หรือ ฉนวนเหลวอื่น)
- 4) โวลท์มิเตอร์

การเตรียมการและวิธีการ การทดสอบ

- 1) การเตรียมชุดทดลอง

ข้อสำคัญในการเตรียมชุดทดลอง ได้แก่ การระมัดระวังเกี่ยวกับความชื้น และสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ เมื่อไม่มีการทดลองก็ควรเก็บน้ำมันในที่ที่มีความชื้น และ เก็บไว้ในที่ปราศจากฝุ่นละอองเมื่อมีการเปลี่ยนน้ำมันชนิดใหม่ต้องล้างทำความสะอาดชุดทดสอบด้วย หลังจากล้างเสร็จแล้วควรนำน้ำมันที่จะทำการทดสอบปริมาณเล็กน้อยใส่ภาชนะและทำการเขย่าเพื่อล้างสิ่งสกปรกค้างออกให้หมด โดยทำเช่นนี้ประมาณ 2-3 ครั้ง

- 2) การเตรียมน้ำมันทดสอบ

ก่อนทำการบรรจุน้ำมันลงในภาชนะควรทำให้น้ำมันมีการหมุนเวียนเพื่อทำให้สิ่งเจือปนกระจายไปอย่างสม่ำเสมอ โดยระวังอย่าให้น้ำมันเกิดฟองอากาศ

- 3) การจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (220 V/ 100 kV) หลังจากจ่ายไฟฟ้าเข้าที่หม้อแปลงแล้ว แรงดันจะถูกส่งผ่านไปยังหัวอิเล็กโตรด โดยปรับค่าแรงดันจากศูนย์ในอัตราเร็วที่คงที่จนเกิดการเบรคความถี่ หลังจากที่เกิดการเบรคความถี่ในแต่ละครั้งควรปล่อยเวลาทิ้งไว้ประมาณ 3-5 นาที เพื่อให้ฉนวนน้ำมันที่ทำการทดลองคืนสภาพความเป็นฉนวน

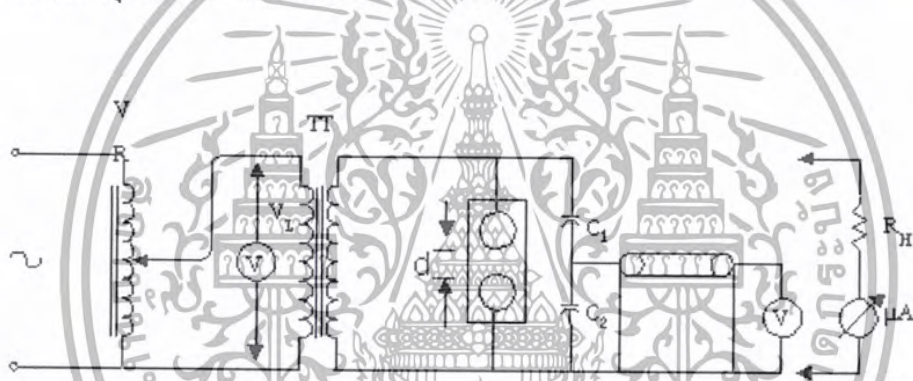
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การวัดแรงดันเบรคควาน์

การวัดแรงดันเบรคควาน์วัดได้จากโวลท์มิเตอร์ โดยคำนวณจากแรงดันด้าน Low Volt คือ ถ้า Low Volt ได้ 22 V แรงดันที่ออกด้านแรงสูงคือ 10 kV เพราะจะคำนวณจากขนาดหม้อแปลง (220V/10kV)

การทดลองที่ 1 การทดสอบการเบรคควาน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม

- 1) บันทึกสภาพอากาศของห้องทดลอง
- 2) ทำการบรรจุน้ำมันหม้อแปลงที่ยังไม่ได้ผ่านการทดลองลงในภาชนะที่จะทำการทดลอง ข้อสำคัญจะต้องไม่ให้มีสิ่งเจือปนลงไป ในภาชนะที่จะทดลอง
- 3) ต่อดวงจรการทดลอง ดังรูปที่ 8-20 วงจรการทดลองการเบรคควาน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม



รูปที่ 8-20 วงจรการทดลองการเบรคควาน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม

- 4) ปรับระยะแกปที่อยู่ในชุดทดลอง 3 mm. และค่อยๆ ไขนแรงดันจนเกิดการเบรคควาน์ บันทึกค่าแรงดันจากเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ
- 5) หลังจากทำการทดลองในระยะแรกเสร็จแล้ว ปรับระยะแกปในชุดทดลองเป็น 6 mm, 9 mm และ 1.2 cm ตามลำดับและทำซ้ำข้อ 4

ผลการทดลองที่ 1 การทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ ระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม

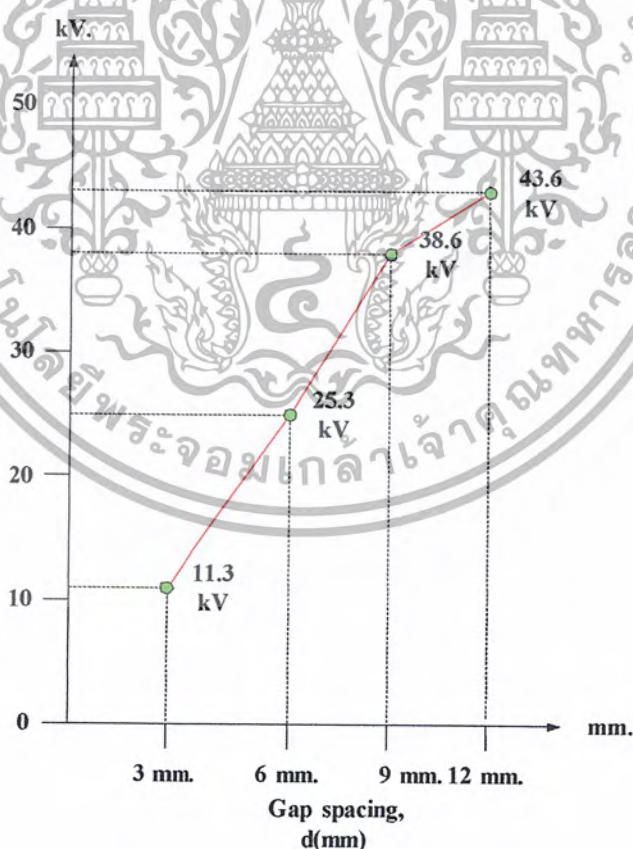
สภาพบรรยากาศห้องทดลอง

อุณหภูมิ 31 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 75 %

ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ระยะแกป	ค่าแรงดันเบรคความถี่ (kV)			
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าแรงดันเบรคความถี่เฉลี่ย
3 mm.	15	14	15	11.3
6 mm.	24	26	26	25.3
9 mm.	40	36	40	38.6
1.2 cm	44	45	42	43.6

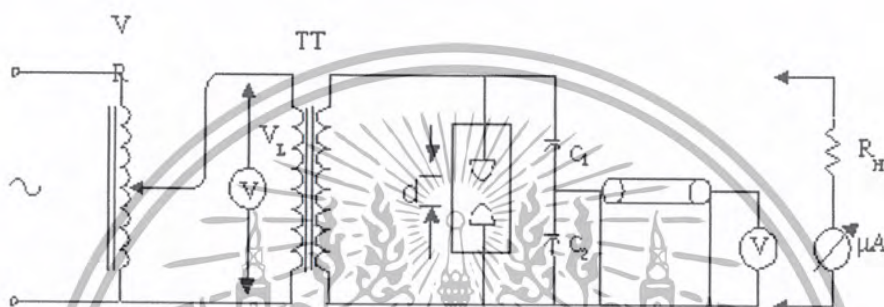


รูปที่ 8-21 กราฟผลการทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2 การทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธ์แก่ปรีวงกลมกับแก่ปรีวงกลม

- 1) บันทึกสภาพบรรยากาศของห้องทดลอง
- 2) ทำการบรรจุน้ำมันหม้อแปลงที่ยังไม่ได้ผ่านการทดลองลงในภาชนะที่จะทำการทดลอง ข้อสำคัญจะต้องไม่ให้มีสิ่งเจือปนลงไปในภาชนะที่จะทดลอง
- 3) ต่อวงจรการทดลอง ดังรูปที่ 8-22 การทดลองการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธ์แก่ปรีวงกลมกับแก่ปรีวงกลม



รูปที่ 8-22 การทดลองการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธ์แก่ปรีวงกลมกับแก่ปรีวงกลม

- 4) ปรับระยะแก่ปรีที่อยู่ในชุดทดลอง 3 mm. และค่อยๆ ป้อนแรงดันจนเกิดการเบรคความถี่ บันทึกค่าแรงดันจากเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ
- 5) หลังจากทำการทดลองในระยะแรกเสร็จแล้ว ปรับระยะแก่ปรีในชุดทดลองเป็น 6 mm, 9 mm และ 1.2 cm ตามลำดับและทำซ้ำข้อ 4

ผลการทดลองที่ 2 การทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ระหว่าง
ระหว่างแกปครึ่งวงกลมกับแกปครึ่งวงกลม

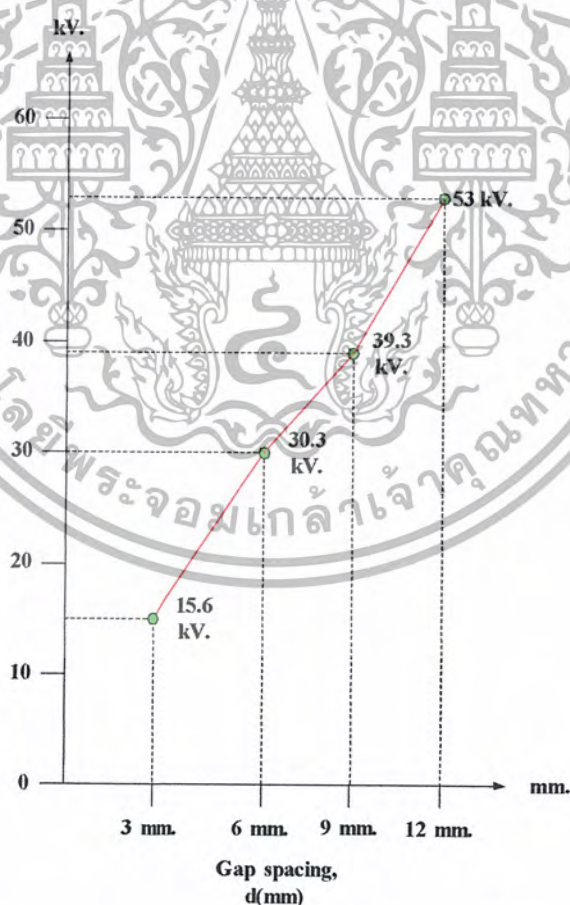
สภาพบรรยากาศห้องทดลอง

อุณหภูมิ 31 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 75 %

ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ระยะแกป	ค่าแรงดันเบรคความถี่ (kV)			
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าแรงดันเบรคความถี่เฉลี่ย
3 mm.	17	16	14	15.6
6 mm.	30	32	29	30.3
9 mm.	40	40	38	39.3
1.2 cm	55	54	50	53



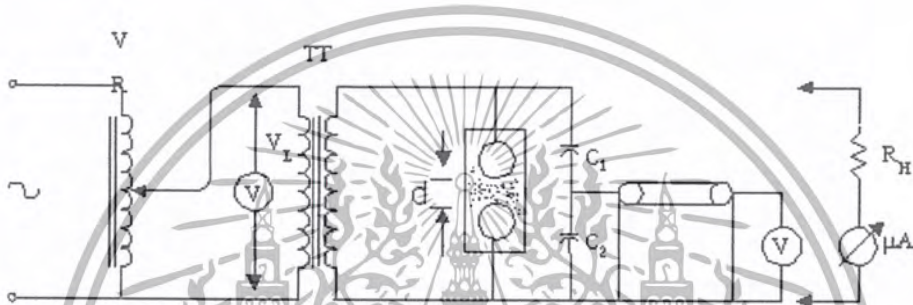
รูปที่ 8-23 กราฟผลการทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์

ระหว่างระหว่างแกปครึ่งวงกลมกับแกปครึ่งวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3 การทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม (ผงอลูมิเนียมเจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 30 g)

- 1) การทดสอบการเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม บันทึกสภาพบรรยากาศของห้องทดลอง
- 2) ทำการบรรจุน้ำมันหม้อแปลงที่ยังไม่ได้ผ่านการทดลองลงในภาชนะที่จะทำการทดลอง ข้อสำคัญจะต้องไม่ให้มีสิ่งเจือปนลงไป ในภาชนะที่จะทดลอง
- 3) ต้องจกรการทดลอง ดังรูปที่ 8-24 การเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม



รูปที่ 8-24 การเบรคความถี่ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม

- 4) ปรับระยะแกปที่อยู่ในชุดทดลอง 3 mm. และค่อยๆ ป้อนแรงดันจนเกิดการเบรคความถี่ บันทึกค่าแรงดันจากเครื่องมือวัดแรงดันค่า
- 5) หลังจากทำการทดลองในระยะแรกเสร็จแล้ว ปรับระยะแกปในชุดทดลองเป็น 6 mm, 9 mm และ 1.2 cm ตามลำดับและทำซ้ำข้อ 4

ผลการทดลองที่ 3 การทดสอบการเบรคความในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม (ผงอลูมิเนียมเจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 30 g)

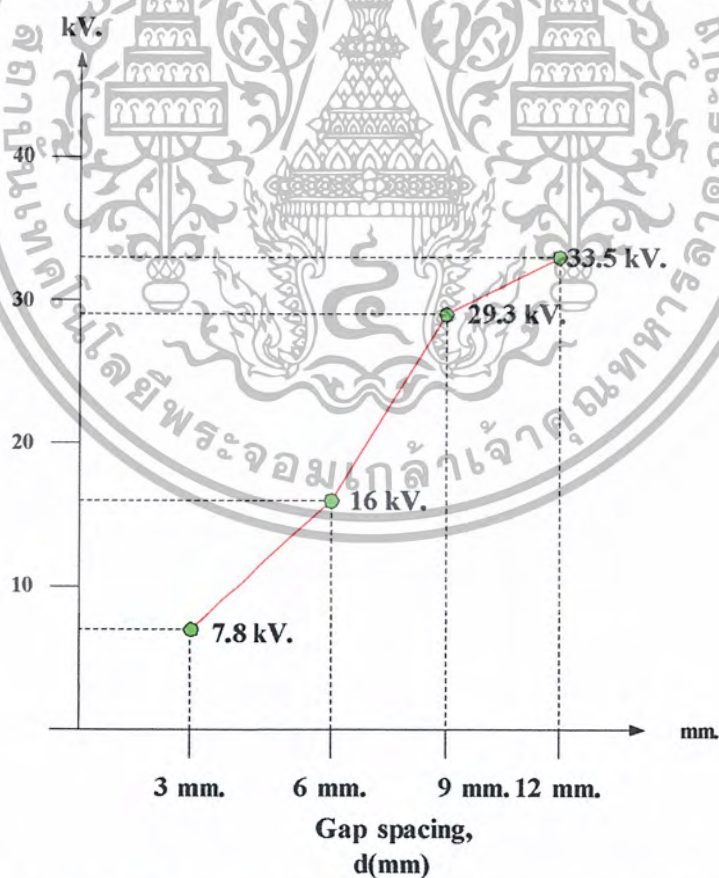
สภาพบรรยากาศห้องทดลอง

อุณหภูมิ 31 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 75 %

ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ระยะแกป	ค่าแรงดันเบรคความ (kV)			
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าแรงดันเบรคความเฉลี่ย
3 mm.	7	8	8.5	7.8
6 mm.	14	15	19	16
9 mm.	30	30	28	29.3
1.2 cm	32.5	31.5	36.5	33.5

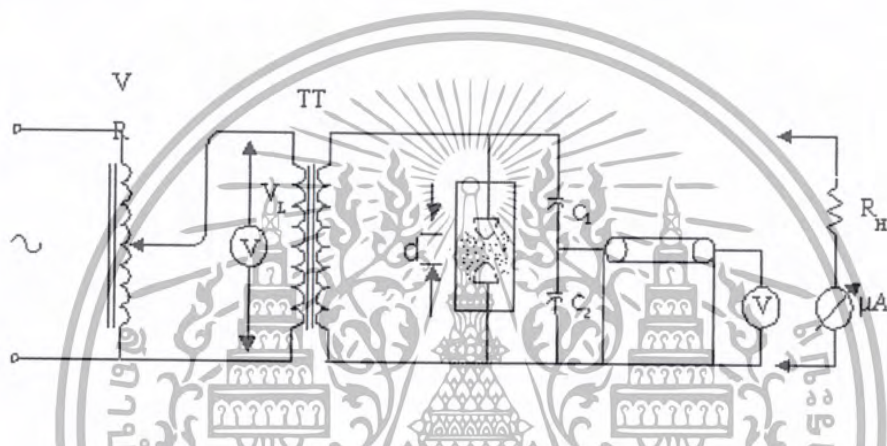


รูปที่ 8-25 กราฟผลการทดสอบการเบรคความในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม(ผงอลูมิเนียมเจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 30 g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 4 การทดสอบการเบรคดาวนในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปครึ่งทรงกลมกับแกปครึ่งทรงกลม (ผงอลูมิเนียมเจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ประมาณ 30 g)

- 1) บันทึกสภาพบรรยากาศของห้องทดลอง
- 2) ทำการบรรจุน้ำมันหม้อแปลงที่ยังไม่ได้ผ่านการทดลองลงในภาชนะที่จะทำการทดลอง ข้อสำคัญจะต้องไม่ให้มีสิ่งเจือปนลงไปในภาชนะที่จะทดลอง
- 3) ต้องจกรการทดลอง ดังรูปที่ 8-26 การทดสอบการเบรคดาวนในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม



รูปที่ 8-26 การทดสอบการเบรคดาวนในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม

- 4) ปรับระยะแกปที่อยู่ในชุดทดลอง 3 mm. และค่อยๆ ป้อนแรงดันจนเกิดการเบรคดาวน บันทึกค่าแรงดันจากเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ
- 5) หลังจากทำการทดลองในระยะแรกเสร็จแล้ว ปรับระยะแกปในชุดทดลองเป็น 6 mm, 9 mm และ 1.2 cm ตามลำดับและทำซ้ำข้อ 4

ผลการทดลองที่ 4 การทดสอบการเบรคความในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปครึ่งทรงกลมกับแกปครึ่งทรงกลม (ผงอลูมิเนียมเจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ประมาณ 30 g)

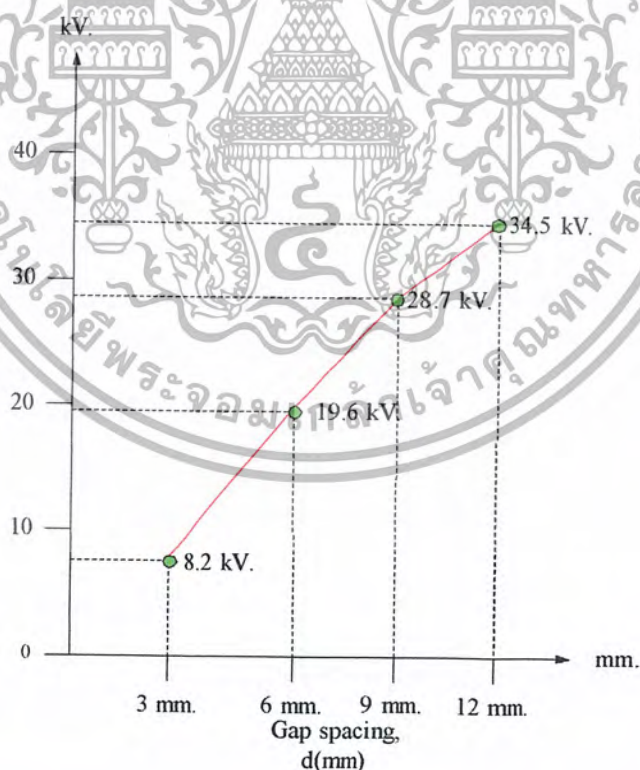
สภาพบรรยากาศห้องทดลอง

อุณหภูมิ 31 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 75 %

ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ระยะแกป	ค่าแรงดันเบรคความ (kV)			
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าแรงดันเบรคความเฉลี่ย
3 mm.	9	7.8	8	8.2
6 mm.	19.9	20	19	19.6
9 mm.	29	28	29	28.7
1.2 cm	34.5	34	35	34.5



รูปที่ 8-27 กราฟผลการทดสอบการเบรคความในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปครึ่งทรงกลมกับแกปครึ่งทรงกลม (ผงอลูมิเนียมเจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ประมาณ 30 g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.14 สรุปผลการทดลอง

ในการทดสอบการเบรคความถี่ในฉนวนเหลว(น้ำมันหม้อแปลง)พบว่า การที่เกิดการเบรคความถี่ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์มีค่าแรงดันเบรคความถี่ที่สูงกว่าแรงดันเบรคความถี่ที่ฉนวนเหลวไม่บริสุทธิ์ สรุปได้
 อื่นว่า ถ้าในหม้อแปลงที่ใช้ น้ำมันเกิดมีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปอยู่อาจทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานลดลง

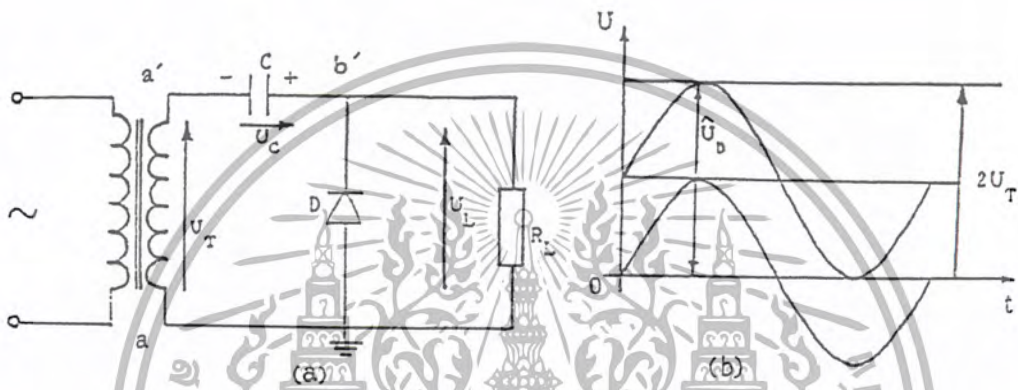


บทที่ 9

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง

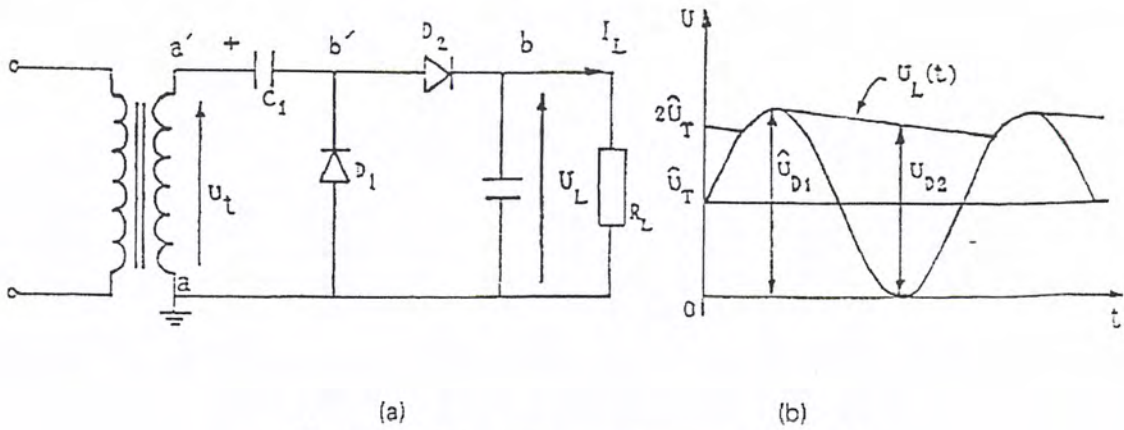
9.1 ทฤษฎี

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยวงจรพื้นฐานจากวงจรแรงดันสองเท่ามาต่อซ้อนกันเข้าเป็นวงจรขั้นบันไดตามหลักการของวงจร COCKCROFT-WALTON ซึ่งลักษณะของวงจรและทฤษฎีการทำงานของวงจรแสดงดังรูปที่ 9-1



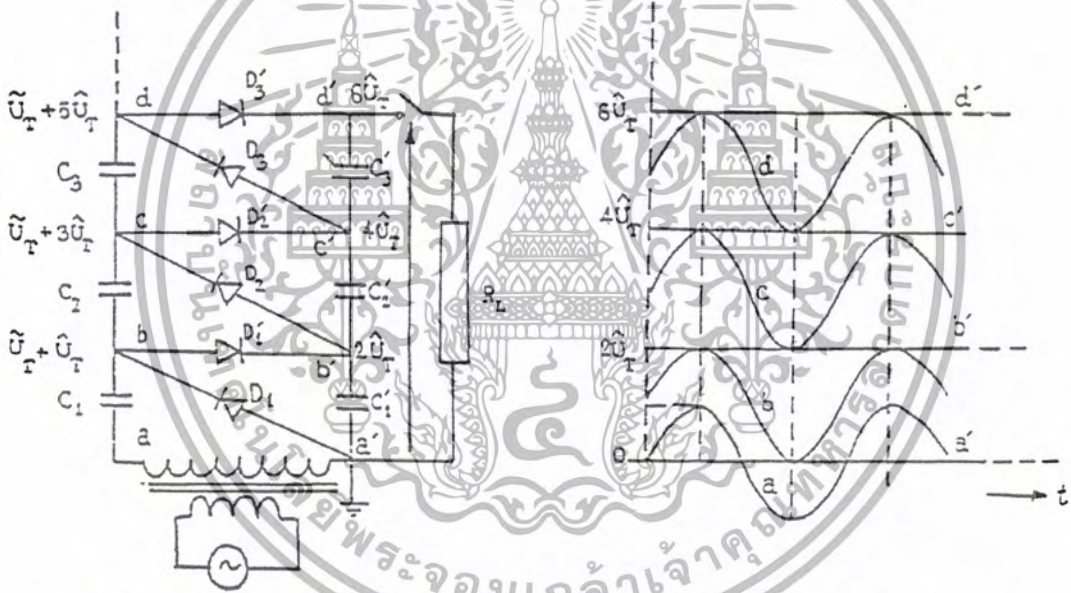
รูปที่ 9-1 วงจรแรงดันสองเท่า

จากรูปที่ 9-1 a) เมื่อจุด a' เป็นลบ (ครึ่งไซเคิลลบ) ตัวเก็บประจุ C จะอัดประจุจนถึงค่ายอดของแรงดันหม้อแปลง คือ $U_T = U_C$ เมื่อจุด a เป็น 0 และเพิ่มขึ้นเป็นบวก (ในครึ่งไซเคิลบวก) จะทำให้แรงดันที่จุด b' ซึ่งเท่ากับผลรวมของแรงดันหม้อแปลงกับแรงดันคร่อม $C (U_T + U_C)$ ถ้าแรงดันหม้อแปลงขึ้นจนถึงค่ายอด U_T แรงดันที่จุด b' คือ U_L จะมีค่าสูงสุดเป็นสองเท่าคือ $2U_T$ ดังนั้น diode จะต้องทนแรงดันได้อย่างน้อยเท่ากับ $2U_T$ แรงดันที่ได้ที่ load จะแปรค่าตั้งแต่ $0-2U_T$ ดังนั้นถ้านำแรงดันนี้ไปผ่านเรกติฟายเออร์และตัวเก็บกรองกระแส ดังรูปที่ 9-2 ก็จะทำให้แรงดันกระแสตรงสูงเป็น 2 เท่าของแรงดันค่ายอดของหม้อแปลงด้านจ่ายกำลังออก



รูปที่ 9-2 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงแบบแรงดันสองเท่า

เมื่อนำวงจรดังรูปที่ 9-2 มาต่อซ้อนกันเป็นรูปขั้นบันไดดังรูปที่ 9-3 ก็จะได้แรงดันกระแสตรงสูงสุดเป็นทวีคูณดังรูป (ในรูปที่ 9-3 แสดงการต่อเพียง 3 ชั้นเท่านั้น)

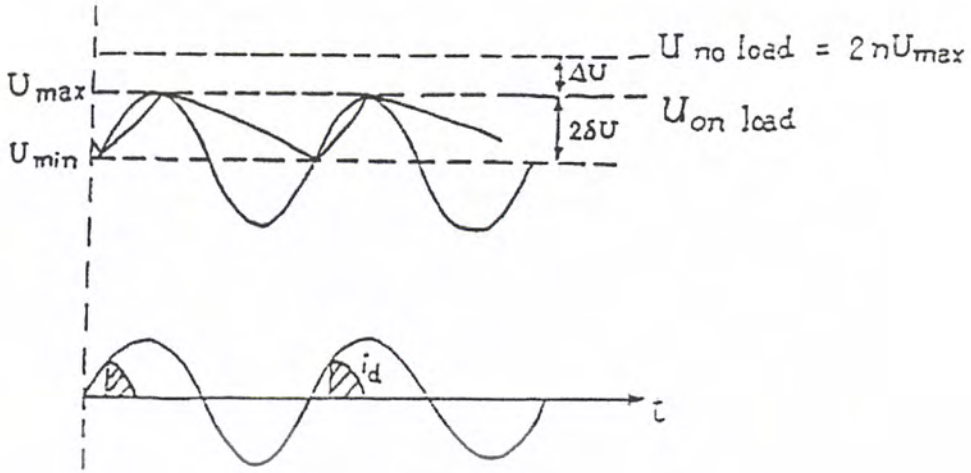


รูปที่ 9-3 วงจรขั้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรงตามวงจรของ COCKROFT-WALTON

Smoothing and Regulation

เมื่อต่อโหลดภาระสิ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือ

- a) ripple voltage σU
- b) voltage drop ΔU



รูปที่ 9-4 รูปคลื่นแรงดันของวงจร Cascade ขณะมี Load

ripple voltage (σU)

$$\sigma U = \frac{I_d}{f_c} * \left(\frac{n(n+1)}{4} \right) \tag{9-1}$$

voltage drop (ΔU)

$$\Delta U = \frac{I_d}{f_c} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n \right) \tag{9-2}$$

ถ้า $n > 3$ แล้ว $n^3 \gg n^2$

$$\therefore \Delta U = \frac{I_d}{f_c} \left(\frac{2}{3}n^3 \right) \tag{9-3}$$

∴ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจร Cascade (on-load)

$$\begin{aligned} U_{d_{max}} &= 2nU_T - \Delta U \\ &= 2nU_T - \frac{2}{3}n^3 \frac{I_d}{f_c} \\ U_{d_{min}} &= 2nU_T - \Delta U - \delta U \end{aligned} \tag{9-4}$$

9.2 การทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

- | | | |
|--|----|---------|
| 1) Variac 5A. | 1 | ตัว |
| 2) VOM | 2 | ตัว |
| 3) Micro ammeter (0-300µA) | 1 | ตัว |
| 4) Oscilloscope | 1 | เครื่อง |
| 5) สายไฟแบบหัว Jack สองข้างขนาดสั้น | 15 | เส้น |
| 6) สายไฟแบบหัว Jack สองหัวขนาดยาว | 5 | เส้น |
| 7) สายไฟแบบหัว Jack และหางปลาในหัวเดียวกัน | 6 | เส้น |

8) สาย Probe x10, x100 อย่างละ	1	เส้น
9) ชุดการทดลอง Cascade	3	ชุด
10) แผงความต้านทาน 100 kΩ	1	ชุด
11) Junction Box	1	ชุด

วิธีการทดลอง

1) ข้อควรระวังในการทดลอง

1.1 ก่อนจะทำการต่อวงจรตรวจสอบสายไฟภายในกล่องว่าขาดหรือทับกันหรือเปล่าหรือไม่ ถ้ามีควรขยับออกให้ห่างกันอย่างน้อย 1.5 cm.

1.2 ถ้า Terminal กล่องไหนไม่แน่นกรุณาขันให้แน่นและจัดสายไฟใหม่

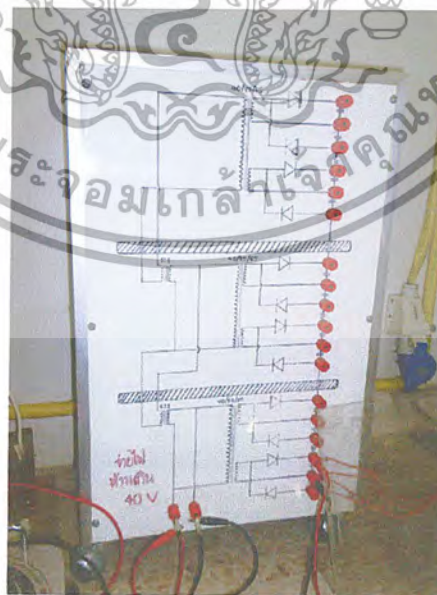
1.3 เวลาต่อวงจรเสร็จควรตรวจสอบเช็คอีกครั้งว่าสายไฟขาดหรือทับกันหรือไม่ถ้ามีกรุณาขยับออกให้ห่างกันอย่างน้อย 1.5 cm. มิฉะนั้นอาจมีการ leak เกิดขึ้น อาจเกิดการ Spark ขึ้นที่ c ทำให้ไดโอดพังได้

1.4 ขณะทำการทดลองกรุณาอยู่ห่างจากเครื่องประมาณ 50 cm. เพราะในระยะใกล้ๆ จะมีผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

1.5 ถ้ามีการ Spark เกิดขึ้นทำการดูที่ ไดโอดและทำการเปลี่ยนใหม่เพื่อที่จะทำให้เครื่องทำงานใหม่ได้

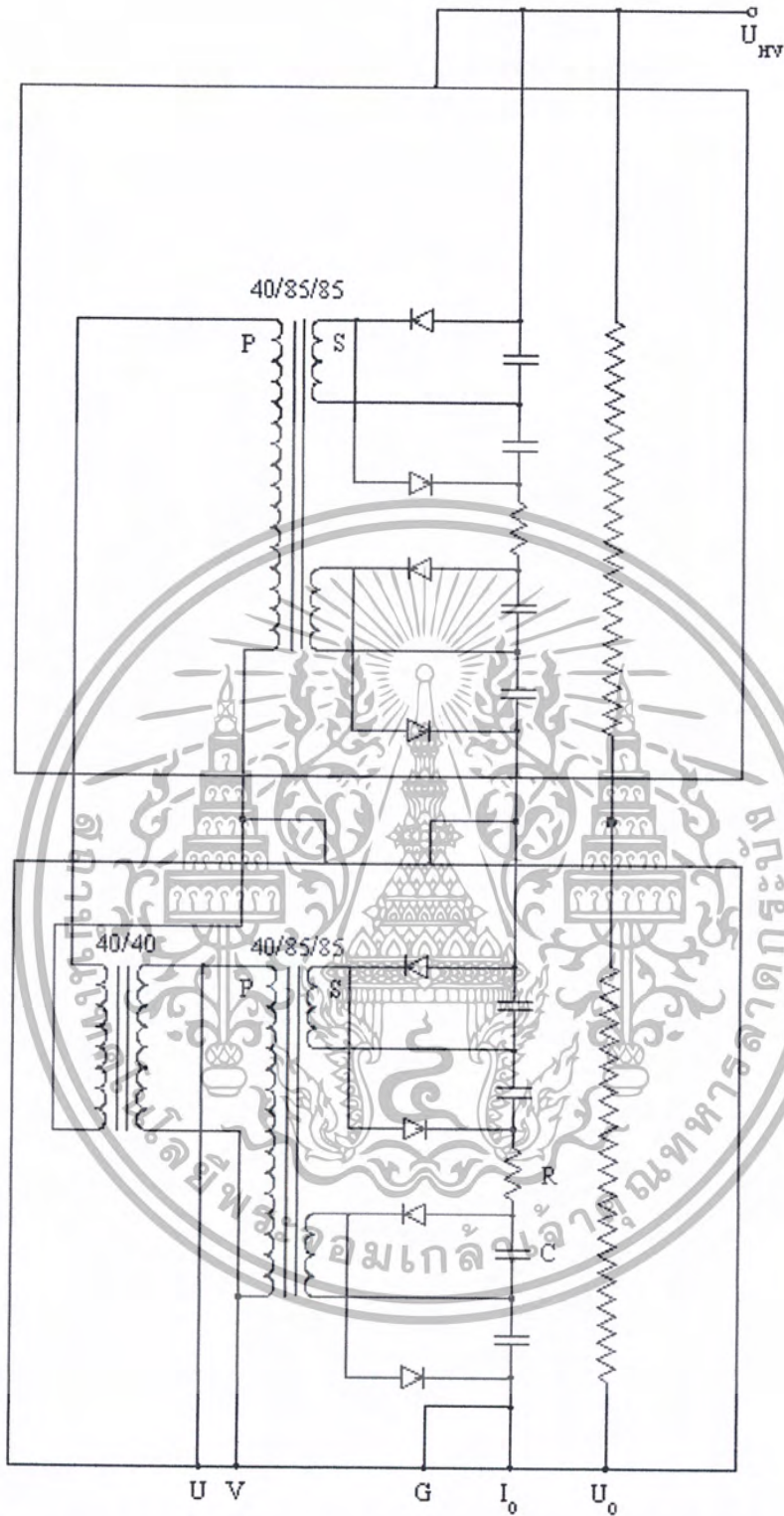
2) ขั้นตอนการทดลอง

2.1 ต่อวงจรตามรูปที่ 9-6 โดยตั้ง range ของ voltmeter (ใช้ VOM) ไปที่ 0-250 V และ range ของ micro amp meter ไปที่ 0-100 mA.



รูปที่ 9-5 DC HIGH VOLTAGE GENERATION MODEL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9-6 วงจรการทดลอง DC HIGH VOLTAGE GENERATION MODEL(4ชั้น)

หมายเหตุ : ห้ามจ่ายไฟเกิน 40 V (4ชั้น)

$$R_L = 100 \text{ k}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ค่อยๆ ปรับแรงดัน U_T (OUT) ที่ขั้วของหม้อแปลงด้าน Input ให้มีค่า 0-40V ดังตารางที่ 9-1

2.3 คำนวณค่าของ ΔU , σU และ $U_{\text{no-load}}$ พร้อมกับบันทึกค่าลงในตารางที่ 9-1

2.4 วาด Wave Form (ดูจาก Oscilloscope) ที่ U_T (OUT) = 40 V พร้อมกับบันทึกค่าที่อ่านได้จริงๆ ลงไปด้วย

$U_T(\text{in})$	$U_T(\text{out})$	I_d (mA) (มิเตอร์)	U_d	U_{max}	U_{min}	$U_{\text{no-load}}$	ΔU	σU
5	10.625	1.32	113.2	119.2	107.2	150.2	31.0	12
10	21.25	2.61	240.4	247.4	232.4	300.5	53.1	15
15	31.875	4.12	363.6	371.6	355.6	450.7	79.1	16
20	42.5	5.39	488.0	495.0	483.0	601.0	106.0	92
25	53.125	6.91	612.0	620.0	606.0	751.3	131.3	114
30	63.75	8.34	726.0	733.0	721.0	901.5	168.5	12
35	74.375	9.72	850.0	859.0	843.0	1051.8	192.8	16
40	85.0	11.03	1097.0	1107.0	1202.0	1202.0	95.0	19.8

ตารางที่ 9-1 ตารางบันทึกผลการทดลอง (5ชั้น)

เมื่อ

- $U_T(\text{In})$ คือ แรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า (volt)
- $U_T(\text{Out})$ คือ แรงดันของหม้อแปลงที่จ่ายให้กับวงจร Voltage Multiplier (volt)
- I_d คือ กระแส Output ของวงจร Voltage Multiplier μA
- U_d คือ แรงดันที่ Output ของวงจร Voltage Multiplier (volt)
- ΔU คือ แรงดันตกเนื่องจาก Loss ต่างๆ $U_{\text{no-load}} - U_{\text{max}}$ (volt)
- σU คือ แรงดันที่ระลอก: $(U_{\text{max}} - U_{\text{min}})/2$ (volt)
- U_{max} คือ แรงดันที่ Output ของวงจรที่มีค่าสูงที่อ่านได้
- U_{min} คือ แรงดันที่ Output ของวงจรที่มีค่าต่ำที่อ่านได้
- $U_{\text{no-load}}$ คือ $U_T(\text{Out}) \cdot (2)^{1/2} \cdot (10)$

9.3 สรุปผลการทดลอง

จากวงจรสร้างแรงดันสูงกระแสตรง จะสามารถสร้างได้ประมาณสองเท่าของค่าขอดแรงดันด้านจ่ายออกของหม้อแปลงคูณด้วยจำนวนชั้น ถ้าหากไม่มีโหลดหรือ ไม่มีแรงดันตก เมื่อมีโหลดจะมีแรงดันตกในไดโอด ในหม้อแปลงและในตัวเก็บประจุเอง ฉะนั้นจะได้แรงดัน U_d น้อยกว่า $10 \cdot U_T(\text{out})$ แต่เนื่องจากวงจรการทดลองดังรูป 9-6 ใช้ตัวเก็บประจุ ที่ไว้สำหรับตอนมอดเตอร์สตาร์ท ค่า 150 MF จึงทำให้ได้แรงดัน U_d มากกว่า $10 \cdot U_T(\text{out})$

บทที่ 10

การต่อลงดิน

10.1 ขั้นตอนการคำนวณการออกแบบ

ข้อกำหนดการออกแบบระบบต่อลงดิน

1. t_f อยู่ในช่วงเวลา 0.25-1.0 วินาที (EGAT กำหนด $t_f = t_s = 1$ วินาที)
2. I_G คำนวณจากวงจรที่เกี่ยวข้อง ปกติแล้ว $I_G \leq I_f$ เสมอ เพราะว่ามีกระแสลัดวงจรบางส่วนไหลออกจากระบบกราวด์ไปยังทางสาย Overhead Ground wire ของ Tower (EGAT กำหนด $I_f = 3I_o$, 20 kV สำหรับระบบ 115 kV และ 40 kV สำหรับระบบ 230 kV)
3. p ของดินปกติจะใช้วิธี werner (Four point method) ปกติ EGAT จะเป็นผู้กำหนดค่า p หลังจากได้พิจารณา Test report แล้ว
4. ความหนาของหินกรวดประมาณ 0.08 - 0.15 เมตร (EGAT กำหนด $h_s = 0.15$ เมตร)
5. ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวดประมาณ 1000 - 5000 Ω -m (EGAT กำหนด $p_3 = 3000$ Ω -m)
6. ความลึกของตะแกรงกริดประมาณ 0.5-1.5 เมตร (EGAT กำหนด $h = 0.5$ เมตร) ขนาดตัวนำที่ใช้ทำกริด และกราวด์รื้อดประมาณ AWG 2/0 - 500 MCM หรือ 67-250 mm^2 (EGAT กำหนด Bare Copper Cable NO.4/0 AWG 19 strands) (107.2 mm^2) ทำเป็นกริดและใช้ Copper covered หรือ copper clad steel ยาว 10 ฟุต (3m) ขนาด Φ 5/8" (198 mm^2) ทำเป็นรื้อด

สรุปขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน

ขั้นตอนที่ 1 สํารวจข้อมูลพื้นที่ (Field Data)

- กำหนดพื้นที่ของสถานี ไฟฟ้าย่อย (ตารางเมตร) : A
- คำนวณหาค่า Soil Resistivity (Ω -m) : p (เฉลี่ย)

ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดของตัวนำ (Conductor size)

$$A(\text{mm}^2) = I \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP \left[\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_o + T_a} \right) \right] \right]}}$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ทำกริด (Conductor cross section ; mm^2)

I = กระแสลัดวงจรลงดิน (Fault current ; KA, r.m.s)

T_m = อุณหภูมิที่ยังไม่หลอมละลาย (Maximum allowable temperature ; $^{\circ}\text{C}$)

T_a = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (Ambient temperature ; $^{\circ}\text{C}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนไว้เพื่อการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_r = อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงที่ของวัสดุ (Reference temperature of material constant : $^{\circ}C$)

α_0 = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$ (Thermal coefficient of resistivity at $0^{\circ}C$)

α_r = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ $T_r^{\circ}C$ (Thermal coefficient of resistivity at $t_r^{\circ}C$)

ρ_r = ความต้านทานจำเพาะของความต้านทานที่อุณหภูมิ $T_r^{\circ}C$ (The resistivity of the ground conductor at $t_r^{\circ}C$: $\mu\Omega/cm^3$)

t_0 = เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร (Time of current flow :sec)

TCAP = แฟกเตอร์ความจุทางความร้อน : $^{\circ}C$ (Thermal capacity factor : $J/cm^3/^{\circ}C$)

$$TCAP = 4.184 S_H \cdot S_w$$

เมื่อ S_H = ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific hert : $cal/g/^{\circ}C$)

S_w = ค่าความหนาแน่น (Specific weight : g/cm^3)

ขั้นตอนที่ 3 หา Step Voltage และ touch Voltage

$$E_{step50} = (1000 + 6 \cdot C_s P \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5 \cdot C_s P \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

เมื่อ ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity : $\Omega \cdot m$)

ρ_s = ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (Crurrh rock resistivity : $\Omega \cdot m$)

P = Proximity effect factor = $1 + 1.3 \left[\frac{a}{h + h_s} \right]$

a = Equivalent radius of a foot = 0.106 m

h = ความลึกที่ฝังตัวนำ (Depth of burial conductor: m)

h_s = ความต้านทานของหินกรวด (Surface layer thickness : m)

t_s = ระยะเวลาที่ clear fault

C_s = Reduction factor

$$C_s = 1 - a \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{(2hs + a)}$$

ขั้นตอนที่ 4 Initial Design

กำหนดค่าเริ่มต้น ดังต่อไปนี้

- ระยะห่างของการวางตัวนำขนานกัน (Spacing between parallel conductor , D : m)

- ความยาวของตัวนำ (Conductor length , L_c : m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความยาวของ Ground Rod (Length of ground rod L_r : m)
- จำนวนของ Ground Rod (Number of ground rod, N_r)
- จำนวนของตัวนำในทิศแกน X (Number of parallel conductors in X – axis direction)
- จำนวนของตัวนำในทิศแกน Y (Number of parallel conductors in Y – axis direction)

ขั้นตอนที่ 5 Grid Resistance

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

- เมื่อ ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity : $\Omega - m$)
 A = พื้นที่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อย
 h = ความลึกที่ฝัง grid (Depth of burial grid conductor : m)
 L = ความยาวทั้งหมดของตัวนำ (Total length of ground conductor : m)
 $= L_c + (N_r \cdot L_r)$

ขั้นตอนที่ 6 Grid Current

$$I_G = S I_f \cdot 1000$$

- เมื่อ I_f = กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น (Ampere)
 S_f = สัมประสิทธิ์การแผ่กระจายของกระแส (Current division factor)
 $= (\text{total impedance}) / (\text{grid resistance})$

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่า GPR (Grid Potential Rise)

$$GPR = I_G \cdot R_G$$

ถ้า $GPR < E_{\text{touch } 50}$ ไปยัง step 12

ถ้า $GPR > E_{\text{touch } 50}$ ไปยัง step 8

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่า Mesh Voltage และ Step Voltage

Mesh Voltage

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L}$$

$$K_m = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

$$K_i = 0.656 + 0.172 n$$

$$L = L_c + (N_r \cdot L_r)$$

Step Voltage

$$E_s = \frac{\rho K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{(1-0.5^{n-2})}{D} \right]$$

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่า Mesh Voltage

ถ้า $E_m < E_{\text{touch}50}$ ไปยังขั้นตอนที่ 10

ถ้า $E_m > E_{\text{touch}50}$ ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่า step Voltage

ถ้า $E_s < E_{\text{step}50}$ ไปยังขั้นตอนที่ 12

ถ้า $E_s > E_{\text{step}50}$ ไปยังขั้นตอนที่ 13

ขั้นตอนที่ 11 Modify Design

ขั้นตอนนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าข้อมูลที่กำหนดไว้ในตอนต้น เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวคำนวณแล้วไม่ตรงตามเงื่อนไข ตัวแปรที่จะเปลี่ยนแปลงมี D, n, L โดยที่

- D จะมีการเปลี่ยนทั้งด้านแนวราบ (แกน x) และแนวตั้ง (แกน y) โดยการเปลี่ยนแปลงทั้งสอง ด้านจะต้องใกล้เคียงกัน
- n จะเพิ่มทั้งสองด้านทีละ 1 ก็ต่อเมื่อ D ใกล้เคียง 1
- เมื่อเปลี่ยน D, n, L จะเปลี่ยนด้วย ($L = D_x N_y + D_y N_x$)
- การออกแบบ Ground Grid หากไม่ปลอดภัยจะมีการเพิ่ม Ground Rod เข้าไปด้วย
- ถ้าไม่ปลอดภัยก็มีการแบ่งกริดให้ถี่ขึ้น โดยยังไม่มีการเพิ่ม Ground Rod ซึ่งถ้ายังไม่ปลอดภัยอีกก็ให้มีการเพิ่ม Ground Rod

10.2 ตัวอย่างในการคำนวณและการออกแบบ

ข้อมูลสำหรับการคำนวณระบบกราวด์

➤ พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (A) = 75×120	=	9000	m^2
➤ ความต้านทานจำเพาะของหิน (ρ_s)	=	4000	$\Omega - m$
➤ ความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ)	=	17	$\Omega - m$
➤ ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน (I_f)	=	50	kA
➤ เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร (t_c)	=	0.5	sec
➤ อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย (T_m)	=	700	$^{\circ}C$
➤ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (T_a)	=	40	$^{\circ}C$
➤ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน (α_r)	=	0.00393	
➤ ความต้านทานจำเพาะของคาน้ำที่อุณหภูมิอ้างอิง (ρ_r)	=	1.7241	$\mu\Omega / cm^3$
➤ TCAP (Thermal Coefficient factor)	=	3.442	$J/cm^3 / ^{\circ}C$
➤ K_o (Thermal Coefficient)	=	$\frac{1}{\alpha_r} - T_r$	= 234

➤ พื้นที่หน้าตัดของสายคาน้ำ : mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาขนาดของสายกราวด์

$$A(\text{mm}^2) = I \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP \ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_o + T_a} \right) \right]}}$$

$$A(\text{mm}^2) = 50 \sqrt{\frac{(0.5)(0.00393)(1.7241)(10^4)}{(3.422) \ln \left[1 + \left(\frac{700 - 40}{234 + 40} \right) \right]}}$$

$$A = 142.06 \text{ mm}^2$$

การคำนวณค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวและศักดาไฟฟ้าสัมผัส

- ความต้านทานจำเพาะของดินกรวด (ρ_s) = 4000 $\Omega - m$
 - ความหนาของชั้นดินกรวด (h_s) = 0.1 m
 - ความลึกของตัวตะแกรงกริด (h) = 0.5 m
 - a (Equivalent radius of factor) = 0.106 m
 - P (Proximity effect factor) = $1 + 1.3 \left[\frac{a}{h + h_s} \right]$
 - C_s (Reduction factor) = $1 - a \left[\frac{1 - \frac{\rho}{\rho_s}}{(2h_s + a)} \right]$
- $$= 10.106 \left[\frac{1 - (17/4000)}{(2) \times 0.1 + 0.106} \right]$$
- $$= 0.6551$$

Touch Voltage

$$E_{\text{touch } 50} = (1000 + 1.5 C_s P \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 + (1.5 \times 0.655) \times (1.229 \times 4000)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{touch } 50} = 957.11 \text{ Volts}$$

Step Voltage

$$E_{\text{step } 50} = (1000 + 6 C_s P \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 + (6 \times 0.655) \times (1.229 \times 4000)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 3336.23 \text{ Volts}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของการปักกราวด์กริด

- พื้นที่ของกราวด์กริด (A) = 9000 m²
- ระยะห่างระหว่างตัวนำ(D) = 10 m
- ความลึกของตัวนำกริด(h) = 0.5 m
- จำนวนแท่งกราวด์(N_r) = 55 pcs
- ความยาวของแท่งกราวด์รีด (L_r = N_r × 3.048) = 55 × 3.048 m
- ความยาวของตัวนำกริด (L_c) = 2350 m
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน x (N_x) = 9
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน y (N_y) = 13

การคำนวณหาค่าความต้านทานของกราวด์กริด

ความยาวของตัวนำทั้งหมดที่ประกอบด้วยกริดและกราวด์รีด

$$\begin{aligned} L &= L_c + 1.15 L_r \\ &= 2350 + 1.15 (55 \times 3.048) \\ &= 2542.79 \text{ m} \end{aligned}$$

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

$$R_g = 17 \left[\frac{1}{2542.79} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 9000}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.50\sqrt{\frac{20}{9000}}} \right) \right]$$

$$R_g = 0.0860 \text{ } \Omega$$

การคำนวณหาค่า Grid Potential rise

$$\begin{aligned} \text{เมื่อกระแสกริด (I}_G\text{)} &= 50 \text{ kA} \\ \text{GPR} &= I_G R_G \\ &= 50000 \times 0.0860 \\ &= 4300 \text{ V} \end{aligned}$$

$$I_G R_G (4300) > E_{\text{touch } 50} (957.118)$$

การคำนวณหาค่า Mesh Voltage และ Step Voltage

Mesh Voltage

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m K_i I_G}{L}$$

เมื่อ

$$I_G = 50 \text{ kA}$$

$$N_A = 9$$

$$N_B = 13$$

$$h = 0.5 \text{ m}$$

$$D = 10 \text{ m}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = 1.2247$$

$$d = 0.0134 \text{ m}$$

$$K_i = 0.656 + 0.172 n \\ = 0.656 + (0.172 \times 11) = 2.548$$

$$K_m = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

$$K_m = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{10^2}{16 \times 0.5 \times 0.0134} + \frac{(10+2 \times 0.5)^2}{8 \times 10 \times 0.0134} - \frac{0.5}{4 \times 0.0134} \right) + \frac{1}{1.2247} \ln \frac{8}{\pi(2 \times 11 - 1)} \right]$$

$$K_m = 0.8309$$

$$\therefore E_m = \frac{(17 \times 0.8309 \times 2.548 \times 50000)}{2542.49}$$

$$E_m = 707.71 \text{ Volts}$$

$$E_m (707.71) < E_{\text{touch } 50} (957.1)$$

Step Voltage

$$E_s = \frac{\rho K_s \cdot K_i I_G}{L}$$

เมื่อ

$$I_G = 50 \text{ kA}$$

$$L = 2542.79 \text{ m}$$

$$N = \text{MAX}[N_A, N_B] = 13$$

$$K_i = 0.656 + (0.172 \times 13) = 2.892$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{(1-0.5^{n-2})}{D} \right] \\ = 0.3804$$

$$\therefore E_s = \frac{17 \times 0.3804 \times 2.892 \times 50000}{2542.79}$$

$$= 367.74 \text{ Volts}$$

$$E_s (367.74) < E_{\text{step } 50} (3336.23)$$

การตรวจสอบ Mesh Voltage และ Step Voltage

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่า

$$E_m (707.71) < E_{\text{touch } 50} (957.1)$$

$$E_s (367.74) < E_{\text{step } 50} (3336.23)$$

สรุปว่า การออกแบบระบบต่อลงดินนี้เกิดความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.3 ตัวอย่างการคำนวณและการออกแบบระบบการต่อลงดิน

สถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115 /22 kV ,มาตรฐานการคำนวณและการออกแบบ (IEEE Guide for Safety is Substation Grounding : IEEE 80-1986)

ข้อมูลสำหรับการคำนวณ

- ❖ ความต้านทานจำเพาะของดิน (soil) = 1.015 Ω - m
- ❖ ความต้านทานจำเพาะของคอนกรีต (ConCrete Resistivity) = 51.6 Ω - m
- ❖ กระแสฟอลต์สูงสุด (Maximum r.m.s. fault Current) = 25.0 kA
- ❖ ระยะเวลาที่เกิดฟอลต์ (Fault duration time) = 1.0 seC
- ❖ ขนาดของกราวนรีรอด (Ground rod size) = $\phi \frac{5}{8}'' \times 3$ m

Point	Measurd Values (Ω - m)			
	B(m)	15	25	35
	A(m)	3	3	7
P1	P1	0.05	0.01	0.03
	X			
P2	P1	0.04	0.02	0.05
	Y			
P2	P2	0.02	0.01	0.02
	X			
R(Average)	P2	0.03	0.04	0.06
	Y			
ρ (Average)	$\sum R/N$	0.035	0.02	1.04
ρ (Average)	$2 \pi AR$	0.6597	0.6283	1.759
ρ (Average)	$= (0.6597+0.6283+1.759)/3$	$= 1.015 \Omega$ - m		

ตารางที่ 10-1 การทดสอบหาค่าความต้านทานดิน

การคำนวณหาขนาดกราวนรีรอด (Calculation for ground wire size)

พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (A)

- กระแสลัดวงจร (I_f) = 25 kV
- ระยะเวลาการเกิดฟอลต์(T_c) = 1 Sec
- อุณหภูมิรอบด้านหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม(T_a) = 40 $^{\circ}c$
- สัมประสิทธิ์ของความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิอ้างอิง= 0.00381
- ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง(α_r)= 1.7774 $\mu\Omega/Cm^3$
- แฟกเตอร์ความจุทางความร้อน(TCAP) = 3.422
- Thermal Coefficent (K_o) = 242

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A(\text{mm}^2) = I \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP \ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_o + T_a} \right) \right]}}$$

$$A(\text{mm}^2) = 25 \sqrt{\frac{(1)(0.00381)(1.7774)(10^4)}{(3.422) \ln \left[1 + \left(\frac{1084 - 40}{242 + 40} \right) \right]}}$$

$$A = 89.38 \text{ mm}^2$$

การคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวและศักดาไฟฟ้าสัมผัส

เมื่อ

- ระยะเวลาการเกิดกระแสฟลักซ์ = 1 sec
- ความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ_s) = 1.015 $\Omega - m$
- ความต้านทานจำเพาะของคอนกรีต (ρ_c) = 51.6 $\Omega - m$
- C_s (Reduction factor) = 0.750
- K = -0.961
- H_s = 0.2

Touch Voltage

$$E_{\text{touch } 50} = \frac{0.116}{\sqrt{t_s} (1000 + 1.5 C_s \rho_s)}$$

$$= \frac{0.116}{\sqrt{1} (1000 + (1.5 \times 0.75 \times 51.60))}$$

$$E_{\text{touch } 50} = 122.734 \text{ Volts}$$

Step Voltage

$$E_{\text{step } 50} = \frac{0.116}{\sqrt{t_s} (1000 + 6 C_s \rho_s)}$$

$$= \frac{0.116}{\sqrt{1} (1000 + (6 \times 0.75 \times 4000))}$$

$$E_{\text{step } 50} = 142.933 \text{ Volts}$$

ข้อมูลเบื้องต้น (Initial Data)

- พื้นที่ของกราวนักรีด (A) 34×60 = 2040.00 m^2
- ระยะห่างระหว่างตัวนำ(D) = 5 m
- ความลึกของตัวนำกริด(h) = 0.5 m
- จำนวนแท่งกราวนักรีด(N_r) = 48 rods
- ความยาวของแท่งกราวนักรีด ($L_r = N_r \times 2.43$) = 116.64 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความหนาของพื้นที่คอนกรีต(h_s) = 0.20 m
- ความยาวของตัวนำกริด [$L_c=(34 \times 10)+(60 \times 7)$] = 760 m
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน x (N_x) = 10
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน y (N_y) = 7

การคำนวณหาค่าความต้านทานของกราวด์กริด

เมื่อ L คือ ผลรวมทั้งหมดของความยาวตัวนำ

$L =$ ความยาวของตัวนำกริด+ ความยาวของตัวนำรีด

$$L = L_c + L_r = 760 + 116.64 = 876.6 \text{ m}$$

จะได้ว่า

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

$$R_g = 1.015 \left[\frac{1}{876.64} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 2040}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.50 \sqrt{\frac{20}{2040}}} \right) \right]$$

$$R_g = 0.0110 \ \Omega$$

การคำนวณหาค่ากระแสกริด (Calculation of Grid Current)

เมื่อ $I_G = S_f I_f 1000$

Current Division Factor (S_f) = 0.6

Maximum Fault Current (I_f) = 25 kA

$$I_G = 0.6 \times 25 \times 1000$$

$$= 15 \text{ kA}$$

การคำนวณหาค่า Grid Potential rise

เมื่อ กระแสกริด (I_G) = 15 kA

GPR = $I_G R_G$

$$= 15000 \times 0.011$$

$$= 167.2 \text{ V}$$

$I_G R_G (167.2) > E_{\text{touch } 50} (122.734)$

การคำนวณหาค่า Mesh Voltage และ Step Voltage

Mesh Voltage

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m K_i I_G}{L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $I_G = 15 \text{ kA}$
 $N_A = 10$
 $N_B = 7$
 $h = 0.5 \text{ m}$
 $h_o = 1 \text{ m}$
 $D = 3 \text{ m}$
 $K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = 1.2247$
 $d = 0.0110 \text{ m}$

$K_i = 0.656 + 0.172 n$
 $= 0.656 + (0.172 \times 8.367) = 2.095$

$K_m = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$

$K_m = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{10^2}{16 \times 0.5 \times 0.0134} + \frac{(3+(2 \times 0.5))^2}{8 \times 10 \times 0.0134} - \frac{0.5}{4 \times 0.0134} \right) + \frac{1}{1.2247} \ln \frac{8}{\pi(2 \times 11 - 1)} \right]$

$K_m = 0.5626$

$\therefore E_m = \frac{(1 \times 0.5626 \times 2.095 \times 15000)}{894.14}$

$E_m = 20.069 \text{ Volts}$

$E_m (20.069) < E_{\text{touch } 50} (122.73)$

Step Voltage

เมื่อ $I_G = 15 \text{ kA}$
 $L = LC + 1.15Lr = 60 + [1.15 \times 117] = 894.136 \text{ m}$
 $N = \text{MAX}[N_A, N_B] = 10$
 $K_i = 0.656 + (0.172 \times 10) = 2.376$

$K_s = \text{SpaCing fo Step Voltage}$

$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{(1-0.5^{n-2})}{D} \right]$
 $= 0.31818 [1 + 0.286 + 0.33333(0.98788)]$
 $= 0.51386$

$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L}$

$\therefore E_s = \frac{1 \times 0.51386618 \times 2.376 \times 15000}{894.14}$
 $= 20.790 \text{ Volts}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในขององค์กรเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบ Mesh Voltage และ Step Voltage

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่า

$$E_m (20.069) < E_{\text{touch } 50} (122.73)$$

$$E_s (20.790) < E_{\text{step } 50} (142.94)$$

สรุปว่า การออกแบบระบบต่อลงดินนี้เกิดความปลอดภัย

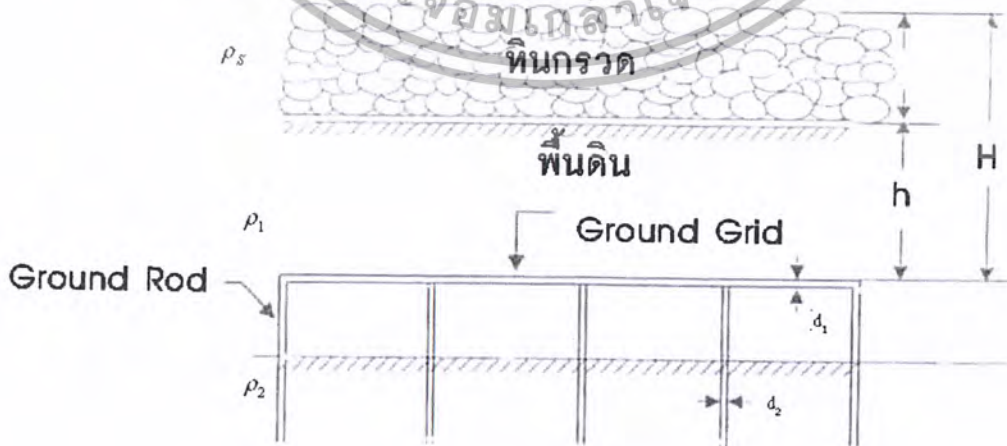
10.4 ผลการออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้แนวทางตาม ANSI/IEEE Std.80-1986 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ยอมรับกันโดยทั่วไป สำหรับการออกแบบ โดยใช้แผ่นพลาสติกใส่เพิ่มเข้าไปเหนือตะแกรงกริดเป็นบางจุดนั้น ก็ได้มีวิธีการคำนวณให้เห็นกรณีที่ไม่ใส่แผ่นพลาสติก กับใส่แผ่นพลาสติก พร้อมทั้งโปรแกรมการออกแบบ อีกทั้งวิธีการใหม่ซึ่งสามารถลดจำนวนตัวนำและประหยัดวัสดุตัวนำกริดถึง 30-40% ได้แสดงตัวอย่างให้เห็นการคำนวณดังต่อไปนี้

10.5 ตัวอย่างสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115 kV

ข้อมูลสำหรับการคำนวณ

- ❖ ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (ρ_s) 3000 Ω -m
- ❖ ความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) 11.7 Ω -m
- ❖ ความลึกของกราวด์กริดใต้ระดับผิวบนสุด(H) 0.65 m
- ❖ ความลึกของกริด (h) 0.5 m
- ❖ ความหนาของชั้นหินกรวด (h_s) 0.15 m
- ❖ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของกราวด์กริด (d_1)
- ❖ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของกราวด์ร็อด (d_2)



รูปที่ 10-1 ลักษณะการฝังกราวด์กริดและกราวด์ร็อด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เกิดผลของการโรยหินกรวด + คิดผลเนื่องจากมีระบบกราวด์ฝังอยู่ในดิน
ขั้นตอนการคำนวณ

1.หาพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \\ &= 70 \times 76 \\ &= 5320 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

2.หาความต้านทานจำเพาะของดินโดยเฉลี่ย $\Omega : (\rho)$

$$(11+12.47+12.71+11.68+10.64)/5 = 11.7 \ \Omega$$

ข้อมูลทั้งหมดได้จาก Test of Record ด้านหลังการคำนวณ

3.การคำนวณหาขนาดตัวนำ

พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (A)

- ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน (I_f) = 50 kV
- อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย = 700 °C
- ระยะเวลาการเกิดฟอสต์(T_c) = 0.6 sec
- อุณหภูมิรอบค้ำหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม(T_a) = 40 °C
- สัมประสิทธิ์ของความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิอ้างอิง = 0.00393
- ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง(α_r) = 1.7241 $\mu\Omega/\text{cm}^3$
- แฟกเตอร์ความจุทางความร้อน(TCAP) = 3.422 $\text{J}/\text{cm}^3/\text{°C}$
- Thermal Coefficient (K_o) = 234

$$A(\text{mm}^2) = I_f \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP \ln \left[1 + \frac{T_m - T_a}{K_o + T_a} \right]}}$$

$$A(\text{mm}^2) = 25 \sqrt{\frac{(1)(0.00393)(1.7241)(10^4)}{(3.422) \ln \left[1 + \frac{700 - 40}{234 + 40} \right]}}$$

$$A = 156.62 \text{ mm}^2$$

4.การคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวและศักดาไฟฟ้าสัมผัส

เมื่อ

- ความลึกของกริด (h) = 0.5 m
- ความหนาของชั้นหินกรวด (h_s) = 0.15 m
- ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (ρ_s) = 3000 $\Omega - \text{m}$

Proximity Effect (P)

$$1 + \frac{1.3a}{H}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= 1 + \frac{1.3a}{h+h_s} \\
 &= 1 + \frac{1.3 \times 0.106}{0.5 + 0.15} \\
 &= 1.212
 \end{aligned}$$

แฟกเตอร์ลดเนื่องจากการ โยกรวด (C_s)

$$C_s = 1 - a \left[\frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{(2hs + a)} \right]$$

$$\begin{aligned}
 C_s &= 1 - 0.106 \left[\frac{\left(1 - \frac{11.7}{3000}\right)}{((2 \times 0.15) + 0.106)} \right] \\
 C_s &= 0.7399
 \end{aligned}$$

กรณีที่เกิดผลของการ โยกรวด + คิดผลเนื่องจากระบบกราวด์ฝังอยู่ในดิน

$$R_{TS} = R_B + 6C_s \rho_s \left(1 + \frac{1.3a}{H}\right)$$

$$R_{TS} = 1000 + \left[(6 \times 0.7399 \times 3000) \left(1 + \frac{1.3 \times 0.106}{0.65}\right) \right]$$

$$R_{TS} = 0.7399$$

$$R_{TP} = R_B + 1.5C_s \rho_s \left(1 + \frac{1.3a}{H}\right)$$

$$R_{TP} = 1000 + \left[(1.5 \times 0.7399 \times 3000) \left(1 + \frac{1.3 \times 0.106}{0.65}\right) \right]$$

$$R_{TP} = 5035.41 \quad \Omega$$

เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร (T) = 0.6 sec

Touch Voltage

$$E_{\text{touch } 50} = (R_B + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 + (1.5 \times 0.7399 \times 1.212 \times 3000)) \frac{0.116}{\sqrt{0.6}}$$

$$E_{\text{touch } 50} = 754 \text{ Volts}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Step Voltage

$$\begin{aligned}
 E_{\text{step } 50} &= (1000 + 6 C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \\
 &= (1000 + (6 \times 0.7399 \times 1.212 \times 3000)) \frac{0.116}{\sqrt{0.6}} \\
 E_{\text{step } 50} &= 2567 \text{ Volts}
 \end{aligned}$$

5.การคำนวณหาค่าความต้านทานของกราวด์กริด**ข้อมูลเบื้องต้น (Initial Data)**

- พื้นที่ของกราวด์กริด 70×76 (A) = 5320 m^2
- ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน (D) = 16 m
- ความลึกของตัวนำกริด (h) = 0.5 m
- เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ (d) = 0.011 m
- จำนวนแท่งกราวด์ (N_r) = 57 rods
- ความยาวของแท่งกราวด์หรือค (L_r) = 3 m
- ความหนาของพื้นที่คอนกรีต (h_s) = 0.20 m
- ความยาวของตัวนำกริด [L] = 1918 m
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน x (N_x) = 5 pcs
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน y (N_y) = 5 pcs

จะได้ว่า

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

$$R_g = 11.7 \left[\frac{1}{1918} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 5320}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.50 \sqrt{\frac{20}{5320}}} \right) \right]$$

$$R_g = 0.07677 \ \Omega$$

6.Check Grid Potential Rise

การคำนวณหาค่า Grid Potential rise

$$\text{กระแสกริด (I}_g\text{)} = 50 \text{ kA}$$

$$\text{GPR} = I_g R_g$$

$$= 50000 \times 0.07677$$

$$= 3838.5 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_G R_G (3838.5) > E_{\text{touch } 50} (745)$$

7. การคำนวณค่า Mesh Voltag และ Step Voltage

Mesh Voltage

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m K_i I_G}{L}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} I_G &= 50 \text{ kA} \\ N_A &= 5 \\ N_B &= 5 \\ h &= 0.5 \text{ m} \\ h_o &= 1 \text{ m} \\ D &= 3 \text{ m} \end{aligned}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = 1.2247$$

$$d = 0.0110 \text{ m}$$

$K_{ii} = 1.0$ สำหรับมีกราวด์หรืออยู่ที่มุมของกริด

เมื่อ

$$I_G = 50 \text{ kA}$$

$$L = L_c + 1.15L_f = 60 + [1.15 \times 117] = 1943.5 \text{ m}$$

$$N = \text{MAX}[N_A, N_B] = 5$$

$$K_m = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{16^2}{16 \times 0.5 \times 0.011} + \frac{(16 + (2 \times 0.5))^2}{8 \times 16 \times 0.011} - \frac{0.5}{4 \times 0.011} \right) + \frac{1}{1.2247} \ln \frac{8}{\pi(2 \times 5 - 1)} \right]$$

$$K_m = 1.11556$$

จากสูตร

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m K_i I_G}{L}$$

$$\therefore E_m = \frac{(11.7 \times 1.11556 \times 1 \times 50000)}{1943.65}$$

$$E_m = 509.0142 \text{ Volts}$$

$$E_m (509) < E_{\text{touch } 50} (745)$$

Step Voltage

K_s = Spacing for Step Voltage

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{(1-0.5^{n-2})}{D} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{16+0.5} + \frac{(1-0.5^{5-2})}{16} \right]$$

$$= 0.35501$$

$$E_s = \frac{\rho K_s \cdot K_i I_G}{L}$$

$$\therefore E_s = \frac{11.7 \times 0.35501 \times 1.516 \times 50000}{1943.65}$$

$$= 162 \text{ Volts}$$

$$E_s (20.790) < E_{\text{step } 50} (142.94)$$

การตรวจสอบ Mesh Voltage และ Step Voltage

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่า

$$E_m (509) < E_{\text{touch } 50} (754)$$

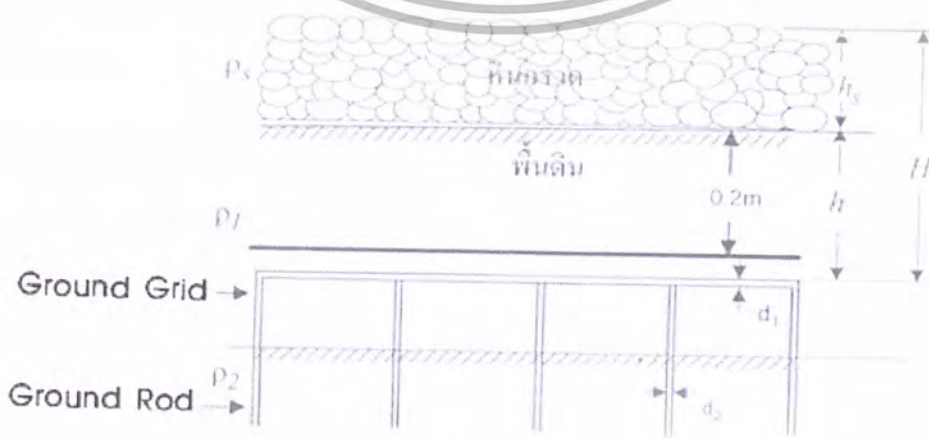
$$E_s (162) < E_{\text{step } 50} (2567)$$

สรุปว่า การออกแบบระบบต่อลงดินนี้เกิดความปลอดภัย

10.6 ตัวอย่างสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115 kV ในกรณีใช้แผ่นพลาสติก

ข้อมูลสำหรับการคำนวณ

- ❖ ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (ρ_s) = 3000 $\Omega \cdot \text{m}$
- ❖ ความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) = 11.7 $\Omega \cdot \text{m}$
- ❖ ความลึกของกราวนกริดใต้ระดับผิวบนสุด (H) = 0.65 m
- ❖ ความลึกของกริด (h) = 0.5 m
- ❖ ความหนาของชั้นหินกรวด (h_s) = 0.15 m
- ❖ ความลึกของแผ่นพลาสติก = 0.2 m
- ❖ ความหนาของแผ่นพลาสติกควรมากกว่า 0.15 mm



รูปที่ 10-2 ลักษณะการฝังแผ่นพลาสติก, กราวนกริดและกราวนร็อด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่สัญญาเห็นพ้องไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการคำนวณ

1.หาพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \\ &= 70 \times 76 \\ &= 5320 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

2.หาความต้านทานจำเพาะของดินโดยเฉลี่ย $\Omega : (\rho)$

$$(11+12.47+12.71+11.68+10.64)/5 = 11.7 \ \Omega$$

ข้อมูลทั้งหมดได้จาก Test of Record ด้านหลังการคำนวณ

3.การคำนวณหาขนาดตัวนำ

พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (A)

- ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน (I_f)	=	50	kV
- อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย	=	700	°C
- ระยะเวลาการเกิดฟอสต์(T_c)	=	0.6	Sec
- อุณหภูมิรอบด้านหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม(T_a)	=	40	°C
- สัมประสิทธิ์ของความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิอ้างอิง	=	0.00393	
- ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง(α_r)	=	1.7241	$\mu\Omega/\text{Cm}^3$
- แฟกเตอร์ความทนความร้อน(TCAP)	=	3.422	J/Cm ³ /°C
- Thermal CoeffiCient (K_o)	=	234	

$$A(\text{mm}^2) = I_f \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP \ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_o + T_a} \right) \right]}}$$

$$\begin{aligned} A(\text{mm}^2) &= 25 \sqrt{\frac{(1)(0.00393)(1.7241)(10^4)}{(3.422) \ln \left[1 + \left(\frac{700 - 40}{234 + 40} \right) \right]}} \\ A &= 156.62 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

4.การคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก๊าวและศักดาไฟฟ้าสัมผัส

เมื่อ

○ ความหนาของชั้นหินกรวด	(h_s)	=	0.15	m
○ ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด	(ρ_s)	=	3000	$\Omega - \text{m}$
○ รัศมีสมมูลย์ของเท้า	(b)	=	0.08	m
○ ระยะห่างระหว่างเท้า	(d_f)	=	1	m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = X_1 = \frac{h_s}{b} = \frac{0.1}{0.08} = 1.25$$

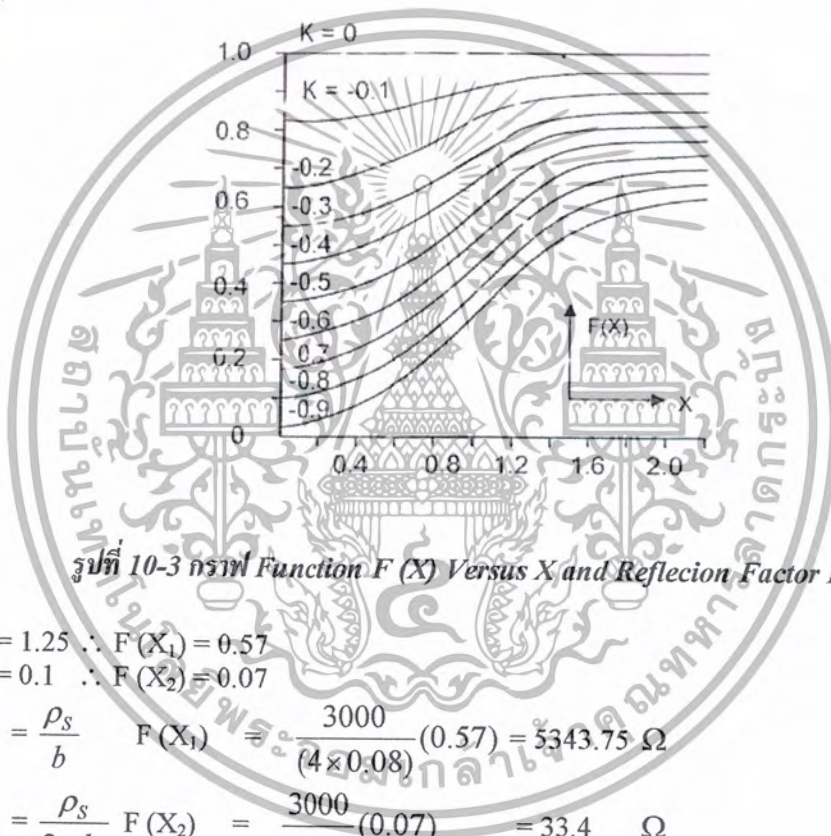
$$X = X_2 = \frac{h_s}{b} = \frac{0.1}{1} = 0.1$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

$$K = \frac{11.7 - 3000}{11.7 + 3000}$$

$$K = -0.09$$

จากกราฟ Function F (X) Versus X and Reflecion Factor K



รูปที่ 10-3 กราฟ Function F (X) Versus X and Reflecion Factor K

$$X_1 = 1.25 \therefore F(X_1) = 0.57$$

$$X_2 = 0.1 \therefore F(X_2) = 0.07$$

$$R_f = \frac{\rho_s}{b} F(X_1) = \frac{3000}{(4 \times 0.08)} (0.57) = 5343.75 \ \Omega$$

$$R_{mf} = \frac{\rho_s}{2\pi d_f} F(X_2) = \frac{3000}{2\pi(1)} (0.07) = 33.4 \ \Omega$$

$$R_{2F} = 2 (R_f - R_{Mf})$$

$$R_{2F} = 2 (5343.75 - 33.42)$$

$$R_{2F} = 10620.65 \ \Omega$$

$$R_{2F} = \frac{1}{2} (R_f + R_{Mf}) = 2670 \ \Omega$$

5.หาความต้านทานของแผ่นพลาสติก

ความลึกของกริด	(h)	=	0.5 m
ความต้านทานจำเพาะของดิน	(ρ)	=	11.7 Ω-m
ระยะระหว่างตัวนำที่ขนานกัน	(D)	=	16 m
Function of h	(r)	=	0.0148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{D}{2r}$$

$$R = \frac{11.7}{2\pi(0.2)} \ln \frac{16}{2(0.0148)}$$

$$R = 58.6 \quad \Omega$$

$$R_T = R_f + R$$

$$R_T = 5343.75 + 58.5874$$

$$R_T = 5402.4 \quad \Omega$$

กรณีเมื่อเพิ่มแผ่นพลาสติก

$$R_{2FS} = 2(R_f - R_{Mf})$$

$$R_{2FS} = 2(5402.4 - 33.42)$$

$$R_{2FS} = 10737.9 \quad \Omega$$

$$R_{2FP} = \frac{1}{2}(R_f + R_{Mf}) = 2717.9 \quad \Omega$$

เวลาที่กระแสไหลของกระแสตรงจจร (T) = 0.6 sec

Touch Voltage

$$E_{\text{touch } 50} = \frac{(R_B + R_{2FP}) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}}{(1000 + 2717.9) \frac{0.116}{\sqrt{0.6}}}$$

$$E_{\text{touch } 50} = \frac{556.8 \text{ Volts}}{556.8 \text{ Volts}}$$

Step Voltage

$$E_{\text{step } 50} = \frac{(1000 + R_{2FS}) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}}{(1000 + 10737.9) \frac{0.116}{\sqrt{0.6}}}$$

$$E_{\text{step } 50} = \frac{1757.8 \text{ Volts}}{1757.8 \text{ Volts}}$$

6. การคำนวณหาค่าความต้านทานของกราวด์กริด

ข้อมูลเบื้องต้น (Initial Data)

- พื้นที่ของกราวด์กริด 70×76 (A) = 5320 m^2
- ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน (D) = 16 m
- ความลึกของตัวนำกริด (h) = 0.5 m
- เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ (d) = 0.011 m
- จำนวนแท่งกราวด์ (N_r) = 57 rods
- ความยาวของแท่งกราวด์ (L_r) = 3 m
- ความหนาของพื้นที่คอนกรีต (h_c) = 0.20 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความยาวของตัวนำกริด [L] = 1714 m
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน x (N_x) = 5 pcs
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน y (N_y) = 5 pcs

จะได้ว่า

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20}A} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

$$R_g = 11.7 \left[\frac{1}{1918} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 5320}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.50 \sqrt{\frac{20}{5320}}} \right) \right]$$

$$R_g = 0.07677 \text{ } \Omega$$

7. Check Grid Potential Rise

การคำนวณค่า Grid Potential rise

$$\begin{aligned} \text{กระแสกริด } (I_g) &= 50 \text{ kA} \\ \text{GPR} &= I_g R_g \\ &= 50000 \times 0.07677 \\ &= 384.5 \text{ V} \\ I_g R_g (384.5) &> E_{\text{touch } 50} (556.8) \end{aligned}$$

8. การคำนวณค่า Mesh Voltage และ Step Voltage

Mesh Voltage

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} I_G &= 50 \text{ kA} \\ N_A &= 5 \\ N_B &= 5 \\ h &= 0.5 \text{ m} \\ h_o &= 1 \text{ m} \\ D &= 3 \text{ m} \\ K_h &= \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = 1.2247 \\ d &= 0.0110 \text{ m} \end{aligned}$$

$K_{ii} = 1.0$ สำหรับมีกราวด์หรืออยู่ที่มุมของกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$I_G = 50 \text{ kA}$$

$$L = L_C + 1.15L_r = 60 + [1.15 \times 117] = 1943.5 \text{ m}$$

$$N = \text{MAX}[N_A, N_B] = 5$$

$$K_m = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{16^2}{16 \times 0.5 \times 0.011} + \frac{(16 + (2 \times 0.5))^2}{8 \times 16 \times 0.011} - \frac{0.5}{4 \times 0.011} \right) + \frac{1}{1.2247} \ln \frac{8}{\pi(2 \times 5 - 1)} \right]$$

$$K_m = 1.11556$$

จากสูตร

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L}$$

$$\therefore E_m = \frac{(11.7 \times 1.11556 \times 1 \times 50000)}{1943.65}$$

$$E_m = 509.0142 \text{ Volts}$$

$$E_m (509) < E_{\text{touch } 50} (745)$$

Step Voltage

$$K_s = \text{Spacing for Step Voltage}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{(1-0.5^{n-2})}{D} \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{16+0.5} + \frac{(1-0.5^{5-2})}{16} \right]$$

$$= 0.35501$$

$$E_s = \frac{\rho K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L}$$

$$\therefore E_s = \frac{11.7 \times 0.35501 \times 1.516 \times 50000}{1943.65}$$

$$= 162 \text{ Volts}$$

$$E_s(20.790) < E_{\text{step } 50}(142.94)$$

9.การตรวจสอบ Mesh Voltage และ Step Voltage

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่า

$$E_m (509) < E_{\text{touch } 50} (556.8)$$

$$E_s (162) < E_{\text{step } 50}(1757.8)$$

10.Detailed Design

จากการคำนวณ ในกรณีที่ใส่แผ่นพลาสติกพบว่า ได้รับผลตามเงื่อนไขการออกแบบระบบ
กราวด์กริด

สรุปว่า การออกแบบระบบต่อลงดินนี้เกิดความปลอดภัย

SOIL RESISTIVITY TEST (25°C)			
ITEM	A(m)	R(Ω)	ρ (Ω - m)
1	0.5	4.10	12.88
2	1.0	2.30	14.45
3	2.0	1.20	15.08
4	5.0	0.40	12.57
5	10.0	0.10	6.28
6	15.0	0.05	4.17
7	0.5	5.88	18.47
8	1.0	2.97	18.66
9	2.0	1.20	15.08
10	5.0	0.36	11.30
11	10.0	0.12	7.54
12	15.0	0.04	3.77
13	0.5	5.88	18.47
14	1.0	2.50	15.47
15	2.0	1.15	14.45
16	5.0	0.37	11.62
17	10.0	0.15	9.42
18	15.0	0.07	6.60
19	0.5	5.70	17.09
20	1.0	2.58	16.21
21	2.0	0.16	12.06
22	5.0	0.28	8.80
23	10.0	0.15	9.42
24	15.0	0.06	5.65
25	0.5	4.15	13.04
26	1.0	2.00	12.57
27	2.0	0.87	10.98
28	5.0	0.42	13.19
29	10.0	0.15	9.42
30	15.0	0.05	4.17
TOTAL Average			11.70034

ตารางที่ 10-2 Test of Record ความต้านทานจำเพาะของดินโดยเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.7 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

ข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.พื้นที่ของกราวด์กริด	= 70×76	m ²
2.ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน : ρ_T -Moist soil	= 10	$\Omega - m$
3.ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง: ρ_L -Moist soil	= 100	$\Omega - m$
4.ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด: ρ_S - Clean limestone resistivity	= 2500	$\Omega - m$
5.ความหนาของชั้นหินกรวด: h_S	= 0.1	m
6.ระยะเวลาของกระแสแรงจร: t_f	= 0.5	s
7.ค่ากระแสแสดัดวงจรลงดิน	= 50	kA
8.อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	= 40	°C
9.X/R ratio	= 3.33	
10.Current division factor: S_f	= 60	%
11.จำนวนตัวนำที่วางในแนวแกน X	= 5	
12.จำนวนตัวนำที่วางในแนวแกน Y	= 5	

ข้อกำหนดในการออกแบบ

- ความลึกของตะแกรงต่อลงดิน $0.25 < h < 2.5$ m
- ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ทำกริดวางขนานกัน $D > 2.5$ m
- เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่ใช้ทำกรวดกริด $d < 0.25h$
- จำนวนของตัวนำที่ใช้กริดที่วางขนานกันในแต่ละทิศทาง $n \leq 25$

การทดลองที่ 1. การออกแบบระบบต่อลงดิน โดยใช้โปรแกรม ETAP 4.0.0 โดยป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ให้มาลงใน โปรแกรมและกำหนดชนิดของตัวนำที่ใช้เป็นแบบ Copper- Annealed soft – drawn ขนาด 150 mm² และความลึกของตัวนำตะแกรงกริดคือ 0.5 m ได้ค่าจากการทดลองดังนี้

ผลการทดลอง

R_g	=	0.7	Ω
$E_{touch50}$	=	454.4	Volts
E_{step50}	=	202.7	Volts

การทดลองที่ 2 ออกแบบระบบต่อลงดินใน การทดลองที่ 1 ใหม่ โดยทำการเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน ดังตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1.

Conductor Size(mm ²)	R _g (Ω)	Touch Voltage (Volts)		Step Voltage (Volts)		Optimal of conductors		GPR (Volts)
		Calculated	Tolerable	Calculated	Tolerable	x	y	
95	0.7	445.9	484.1	202.7	1,444.3	10	9	2,139.1
120	0.7	454.4	484.1	202.7	1,444.3	10	9	2,143.0
150	0.7	445.9	484.1	202.7	1,444.3	10	9	2,139.1
185	0.7	477.2	484.1	205.7	1,444.3	9	8	2,165.7
240	0.7	466.9	484.1	205.7	1,444.3	9	8	2,160.6

ตารางที่ 10- 3 Changing Conductor size

การทดลองที่ 3 ออกแบบระบบต่อลงดินใน การทดลองที่ 1 ใหม่ โดยทำการเปลี่ยนความลึกของตะแกรงต่อลงดิน ดังตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2

Depth of Ground grid(m)	R _g (Ω)	Touch Voltage (Volts)		Step Voltage (Volts)		Optimal of conductors		GPR (Volts)
		Calculated	Tolerable	Calculated	Tolerable	x	y	
0.25	0.7	452.9	484.1	381.3	1,444.3	11	10	2,135.4
0.5	0.7	454.9	484.1	202.7	1,444.3	10	9	2,143.0
1.0	0.7	447.8	484.1	119.2	1,444.3	9	8	2,142.8
2.0	0.7	462.6	484.1	74.0	1,444.3	8	7	2,146.2
2.5	0.7	457.2	484.1	74.3	1,444.3	8	7	2,136.4

ตารางที่ 10-4 Changing De of Ground grid

การทดลองที่ 4 ออกแบบระบบต่อลงดินใน การทดลองที่ 1 ใหม่ โดยทำการเพิ่ม ground rod ชนิด Copper – Clad Steel wire 1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 cm ตำแหน่งในการติดตั้งคือทั่วทั้งตะแกรง (Rods through Grid Area) โดยเพิ่มจำนวนของ Ground rod ดังตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3

Number of rods	R _g (Ω)	Touch Voltage (Volts)		Step Voltage (Volts)		Optimal of conductors		GPR (Volts)
		Calculated	Tolerable	Calculated	Tolerable	x	y	
4	0.7	457.2	484.1	201.7	1,444.3	8	7	2,034.9
8	0.7	457.2	484.1	201.7	1,444.3	8	7	2,034.9
12	0.7	457.2	484.1	201.7	1,444.3	8	7	2,034.9
16	0.7	457.2	484.1	201.7	1,444.3	8	7	2,034.9
20	0.7	457.2	484.1	201.7	1,444.3	8	7	2,034.9

Optimal Number of rods = 4

ตารางที่ 10-5 Changing Number of rods

10.8 สรุปผลของการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าออยนั้น โดยการใส่แผ่นพลาสติกเพิ่มเข้าไปเหนือตะแกรงกริดเป็นบางจุด โดยจะใส่ไว้ระหว่างร่องตาข่าย ณ ตำแหน่งที่คาดว่าจะมีอันตรายมากเช่น ทางเดิน ตำแหน่งที่ตั้งอุปกรณ์ เป็นต้น ซึ่งมันเป็นการเพิ่มค่าความต้านทานที่ทำให้สูงขึ้นได้ในบางจุดของสถานีไฟฟ้าออย ดังตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญในการวิจัย คือความหนาของชั้นหินกรวดความต้านทานจำเพาะของดินขึ้นอยู่กับสภาพของที่ตั้งสถานีไฟฟ้าออย, ระยะความลึกของแผ่นพลาสติก, ความลึกของการฝังตะแกรงกริด, ความยาวของตัวนำ, กรวดรื้อ, ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน, จำนวนร่องตาข่าย การวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นการออกแบบระบบต่อลงดินที่ใช้โปรแกรม ETAP 4.0.0 เพื่อนำไปใช้งานได้จริง เพราะมีการแสดงผลลัพธ์ทางหน้าจอคอมพิวเตอร์อีกทั้งในกรณีที่ค่าของศักดาไฟฟ้าต่างๆ ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไข โปรแกรมก็ยังจะสามารถที่จะทำการออกแบบปรับปรุงได้ตามตัวแปรที่สำคัญๆ ในเบื้องต้น การวิจัยระบบต่อลงดินโดยนำแผ่นพลาสติกใส่เพิ่มเข้าไปนั้นจะทำให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้น ซึ่งจะได้ค่าศักดาไฟฟ้าตามข้อกำหนดด้วย

อีกหนึ่งแนวทางใหม่ของการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าออยซึ่งเป็นวิธีการที่เพิ่มเติมหลังจากใส่แผ่นพลาสติกแล้ว โดยเป็นวิธีการลดจำนวนตัวนำของตะแกรงกริดที่มีระยะไม่สมมาตร ซึ่งวิธีนี้สามารถลดจำนวนตัวนำได้ถึง 30-40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดการประหยัดและมีความปลอดภัยมากขึ้น ระยะตะแกรงกริดที่ไม่สมมาตรทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวนำแผ่กระจายในชั้นใต้ดินได้ดี และยังทำให้ลดศักดาไฟฟ้าที่พื้นผิวหน้าของดินด้วย อีกทั้งยังทำให้เกิดความปลอดภัยในชีวิตและอุปกรณ์ต่างๆ

บทสรุปนี้ แสดงให้เห็นถึงความคิดเพิ่มเติมทางการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าออยตาม ANSI/IEEE Std.80-1986 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ยอมรับกัน โดยทั่วไป โดยการใส่แผ่นพลาสติกเพื่อเพิ่มความต้านทานที่เท้าของผู้ปฏิบัติงาน อีกทั้งวิธีลดจำนวนตัวนำของตะแกรงกริดที่มีระยะไม่สมมาตรแสดงให้เห็นทั้งวิธีลดจำนวนตัวนำของตะแกรงกริดที่มีระยะไม่สมมาตรให้เห็นทั้งวิธีคำนวณและการประมวลผลของโปรแกรมการประมวลผลจะมีความสะดวกและรวดเร็ว แต่ก็มีข้อเสียอยู่หลายประการด้วยกัน เพราะโปรแกรมไม่สามารถทราบได้เลยว่า ข้อมูล ที่ผู้ใช้ป้อนเข้าสู่โปรแกรมถูกต้องหรือไม่ ดังนั้นเมื่อผู้ใช้งานต้องการที่จะทำการประมวลผลต่างๆ ที่กำหนดด้วยโปรแกรมการประมวลผลแล้ว ผู้ใช้ต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล ก่อนที่จะป้อนข้อมูลสู่โปรแกรม แต่ถ้ากรณีที่ผู้ใช้ป้อนข้อมูลถูกต้องแล้ว โปรแกรมจะทำการประมวลผลและแสดงค่าที่ถูกต้องต่อไป

10.9 มาตรฐานการต่อลงดินและค่าความต้านทานของการต่อลงดิน

1.National Electrical Safety Code 1977 ถ้าในระบบมีจุดต่อลงดินเพียงจุดเดียว (Singlegrounded system) ความต้านทานของสายดินต้องมีค่าไม่เกิน 25 โอห์ม (ถ้าสามารถทำได้) และในกรณีของระบบที่มีจุดต่อลงดินหลายจุด (multiple grounded system) สายนิวตรอนจะต้องต่อลงดินที่ตำแหน่งหม้อแปลง และเพิ่มขึ้นอีกไม่น้อยกว่า 4 จุด

2.National Electrical Code 1975 ถ้าต้องตอกแท่งหลักสายดิน 1 ท่อนแล้ววัดค่าความต้านทานของการต่อลงดินได้เกิน 25 โอห์ม ให้ตอกแท่งหลักสายดินเพิ่มอีก 1 ท่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.VDE 0100/11-58 กำหนดให้สายนิวטרอลต้องต่อลงดินใกล้หม้อแปลงและจุดต่อลงดินในไลน์ซึ่งอย่างน้อยที่ตำแหน่งปลายของสายแยกที่ยาวกว่า 200 เมตร ค่าความต้านทานรวมของจุดต่อลงดินใกล้หม้อแปลงและภายในระยะ 200 เมตรที่ห่างจากปลายสายแยกไม่ควรเกิน 5 โอห์ม(แต่ละจุดอาจมีค่าความต้านทานเกินกว่า 5 โอห์มได้) เช่นนิวทรอลต่อลงดิน 4 จุดในระยะ 200 เมตร วัดค่าความต้านทานของแต่ละจุดได้ 60, 30, 15 และ 12 โอห์มตามลำดับ (แต่เมื่อวัดค่าความต้านทานรวมแล้วจะต้องไม่เกิน 5 โอห์ม) ในบางแห่ง เช่น บริเวณที่เต็มไปด้วยหิน (rocky ground) มาตรฐาน VDE ยอมให้ค่าความต้านทานของสายดินสูงถึง 800 โอห์ม แต่ทั้งนี้ค่าแรงดันสัมผัส (Contact voltage) ของสายดินจะต้องไม่เกิน 65 โวลท์

4.VDE 0675/9.57 ความต้านทานสายดินของล่อฟ้า (Lightning arrester) ที่มีพิทัดแรงดันเกิน 1 KV ควรมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม

5.Code of Practice, Protective Earthing ของการไฟฟ้าแห่ง รัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย กำหนดค่าความต้านทานสายดินของระบบแรงสูงไว้ไม่เกิน 30 โอห์ม และระบบแรงต่ำไม่เกิน 10 โอห์ม (สำหรับระบบแรงต่ำที่มีจุดต่อลงดินหลายจุด)

สำหรับประเทศไทย เนื่องจากพื้นที่บางแห่งแห้งแล้ง บางแห่งเป็นหินและบางแห่งชุ่มชื้นการต่อลงดินในพื้นที่ที่เป็นหินและพื้นที่แห้งแล้ง ให้แต่ละจุดมีค่าความต้านทานไม่เกิน 5 โอห์มนั้นทำได้ยาก ถึงแม้ในทางทฤษฎีจะสามารถทำได้ก็ตาม แต่ก็จะต้องลงทุนสูงและเสียเวลามาก ดังนั้นมาตรฐานของการไฟฟ้าบางแห่ง เช่น มาตรฐานของ กฟผ. ซึ่งเดิมกำหนดค่าความต้านทานทางสายดินแต่ละจุดจะต้องไม่เกิน 5 โอห์ม ก็ได้กำหนดใหม่ว่าควรมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม และในพื้นที่ที่ยากต่อการต่อลงดิน ค่าความต้านทานของสายดินแต่ละจุดยอมให้สูงสุด 25 โอห์ม

10.10 วิธีลดค่าความต้านทานดิน

เมื่อฝังหรือตอกแท่งหลักสายดินตามวิธีการดังกล่าวมาแล้ว ให้ใช้แมกเนอรัลดค่าความต้านทาน ณ จุดต่อลงดินซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกินกว่า 5 โอห์ม หากว่าความต้านทานที่วัดได้เกินกว่าที่กำหนดดังกล่าวมาก จะต้องทำการแก้ไขด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ดังนี้

1. โดยวิธีเพิ่มจำนวนแท่งหลักดิน

การตอกแท่งหลักสายดิน เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน หากสามารถตอกแท่งหลักสายดินได้ลึกถึงชั้นของดินที่มีความชื้นถาวร (permanemt moisture) แล้วความต้านทานดินจะต่ำมาก ในบางแห่งการตอกแท่งหลักสายดินลงไปลึกเพียง 2 เมตร ก็ถึงชั้นของดินที่มีความชื้นถาวรได้ ดังนั้นการตอกแท่งหลักสายดินให้ลึกลงไปได้มากก็จะยิ่งเป็นผลดี

2. โดยการฝังตัวนำตามแนวระดับ

ในกรณีที่ชั้นหิน (Bed rock) อยู่ใกล้ผิวดิน ทำให้ไม่สามารถตอกแท่งหลักสายดินลงไปได้ลึกตามที่กำหนดหรือการตอกลงไปทำให้ได้ค่าความต้านทานดินที่สูงมาก วิธีการฝังตัวนำตามแนวระดับ (Strip electrode) จะช่วยแก้ปัญหาและจะช่วยลดค่าความต้านทานดินให้ลดลงไปได้ วิธีนี้ทำได้โดยการขุดดินให้เป็นร่องลึกประมาณ 50 ซม. และฝังเหล็กแบนยาวไม่น้อยกว่า 10 เมตร (แต่ไม่เกินกว่า 25 เมตร) ในแต่ละแนวส่วนการวัดค่าความต้านทานดินต้องวัดในแนวตั้งฉากกับ Strip electrode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้ความต้านทานดินต่ำพออาจจะฝัง strip electrode เพิ่มเป็นหลายแนวตามแนวรัศมีจากจุดทำการราวดี วิธีนี้มีข้อเสียคือ เนื่องจาก strip electrode ฝังลึกไม่ถึงชั้นดินที่มีความชื้นถาวร ทำให้ค่าความต้านทานดินเปลี่ยนแปลงได้มากตามฤดูกาล

3. โดยการใช้เกลือฝังรอบแท่งหลักสายดิน

วิธีนี้บางที่เรียกว่า Soil Treatment ทำได้โดยขุดหลุมลึกและกว้างประมาณ 30 ซม. เป็นรูปวงแหวนรอบแท่งหลักสายดิน โดยให้ห่างจากแท่งหลักสายดินประมาณ 30 ซม. เพื่อมิให้เกลือไปสัมผัสกับแท่งหลักสายดินโดยตรง โดยใช้เกลือผสมถ่านป่นลงไปประมาณ 20-40 กก. แล้วเอาดินกลบให้พูนสูงกว่าระดับเดิมเล็กน้อย เอาดินซึ่งมีหญ้าขึ้นวางทับอีกทีหนึ่ง แล้วใช้น้ำราดรอบบริเวณนั้นเพื่อให้เกลือละลายและทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น วิธีนี้จะสามารถลดความต้านทานดินลงได้ประมาณ 15-90 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าดินบริเวณใกล้แท่งหลักสายดินมีความต้านทานจำเพาะต่ำอยู่แล้วก็จะได้ผลน้อย ขณะทำ Soil treatment เสร็จใหม่ๆ ค่าความต้านทานดินอาจสูงขึ้นกว่าเดิม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาทางเคมียังไม่ซึมซาบไปทั่วเนื้อดินและดินยังไม่อัดแน่น ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่าการทำ Soil treatment ต้องใช้เวลารอพอสมควรจึงจะทำการวัดได้ อย่างน้อยประมาณ 3-4 ชั่วโมงค่าความต้านทานดินจึงจะลดลง

เนื่องจากการทำ Soil treatment เป็นวิธีการที่ไม่ถาวร เพราะเกลือที่ใช้จะเจือจางไปตามกาลเวลาทำให้ความต้านทานดินกลับสูงขึ้นมาได้อีกจึงต้องมีการทำ Soil treatment ใหม่ๆ 2-3 ปี นอกจากนี้แท่งหลักสายดินยังจะเป็นสนิมเร็วกว่าปกติอีก ดังนั้นวิธีนี้ควรใช้ในพื้นที่ดินมีค่าความต้านทานจำเพาะสูง

1. Standard Coefficient of Conversion

1.1 ความยาว

2 mil	= 0.0254 mm.	= 0.001 in.
1 mm.	= 39.37 mils.	= 0.03937 in.
1 cm.	= 0.3927 in.	= 0.0328 ft.
1 inch	= 25.4 mm.	= 0.083 ft. = 0.0278 yd. = 2.54 cm.
1 feet	= 0.305 m.	= 0.333 yd.
1 yard	= 3281 ft.	= 1094 yd. = 0.6123
1 mile	= 5280 ft.	= 1760 yd. = 1906 m = 1.609 km.

1.2 พื้นที่

1 MCM	= 1000 CM (Circular Mile)	= 0.5067 mm
-------	---------------------------	-------------

10.11. งานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบบราวดีของสถานีไฟฟ้านั้นมีอยู่มาก และได้มีการพัฒนาวิธีการให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ ซึ่งแต่ละงานวิจัยก็จะมีการตั้งข้อสมมุติฐานและเสนอวิธีการต่างกันไป บางงานวิจัยอาจจะเสนอเฉพาะวิธีการหาพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง บางงานวิจัยอาจจะเสนอวิธีการออกแบบอย่างสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านั้นก็ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานจริง ซึ่งแต่ละงานวิจัยพอจะแยกได้ดังนี้

1. การหาค่าความต้านทานระบบกราวด์

ค่าความต้านทานระบบกราวด์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการหาระดับศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์ (Ground Potential Rise – GPR) อันเนื่องมาจากมีกระแสลัดวงจรลงดิน เพื่อให้ทราบว่าศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์อยู่ในช่วงที่มนุษย์จะทนได้หรือไม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าค่าความต้านทานระบบกราวด์มีค่าต่ำศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นก็จะมีค่าต่ำด้วยแต่ก็ไม่ได้ประกันว่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนกราวด์หรือค่าความต้านทานของกราวด์จะเป็นตัวกำหนดถึงความปลอดภัยได้อย่างแน่นอน

สมการที่ใช้หาค่าความต้านทานกราวด์พื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือสมการของ Schwarz (1954) ซึ่งได้เสนอสมการหาค่าความต้านทานของกริด ค่าความต้านทาน กราวด์รีดและค่าความต้านทานรวมระหว่างกราวด์รีดเพื่อนำไปหาค่าความต้านทาน

กราวด์ทั้งหมดใช้ได้ดีกับกรณีที่ดินเป็นดินชั้นเดียว ซึ่ง Kerel (1981) ได้นำสมการที่ Schwarz เสนอไว้มาใช้เพื่อหาความยาวของตัวนำกริดทั้งหมดที่น้อยที่สุด ที่จะทำให้ได้ค่าความต้านทานของกราวด์ที่ต้องการ โดยจะแบ่งการคำนวณออกเป็นลูป (Loop) และสมมติให้ตัวนำกริดฝังอยู่ในดินชั้นเดียวที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่าผิวดินและไม่คำนึงถึงกราวด์รีด

Chow และ Salama (1994) ได้เสนอวิธีการคำนวณค่าความต้านทานกราวด์ด้วยวิธีการที่เรียกว่าอิมเมจของกระแส (Current Image) โดยสูตรที่ใช้ในการคำนวณความต้านทานกราวด์จะ ขึ้นอยู่กับความลึกของกริด, ขนาดของกริด, จำนวนเมฆและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ ที่ใช้ทำกริด โดยถือว่าที่ใช้เป็นดินชั้นเดียว การคำนวณค่าความต้านทานกราวด์ด้วยวิธีนี้ เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำ จะมีผลต่อค่าความต้านทานกราวด์มาก

Thapar และคณะ ได้เสนอวิธีการหาค่าความต้านทานกราวด์ของสถานีไฟฟ้ารูปทรงต่าง ๆ ที่นอกเหนือไปจากสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจตุรัส เช่น รูปทรงตัวแอล, ตัวที และทรงสามเหลี่ยม โดยถือว่าดินที่ใช้เป็นแบบดินชั้นเดียว (Uniform Soil) สมการที่ใช้หาค่าความต้านทาน กราวด์ใช้ได้ดีกับการแบ่งเมฆเป็นส่วนตัดตรงยาวประมาณ 5 เมตร โดยที่ไม่มีกราวด์รีดร่วมอยู่ด้วย สมการที่ใช้ในการหาความต้านทานมันเองและความต้านทานรวม (Self and Ground Resistance) อยู่บนพื้นฐานของศักดาไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละส่วน

2. การหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ประโยชน์ของดินนั้นมีมากมายหลายอย่างด้วยกัน เช่นในการป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและฟ้าผ่าได้ ซึ่งในภาวะที่ดินมีค่าความชื้นน้อย จะทำให้ดินนั้นมีค่าความต้านทานสูงแต่ถ้าหากดินมีความชื้นมาก ก็จะทำให้ค่าความต้านทานของดินมีค่าความต้านทานต่ำซึ่งความชื้นในดินจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน คือ ถ้าเป็นดินที่มีลักษณะเป็นดินทรายจะมีความชื้นน้อยเพราะว่าดินชนิดนี้อุ้มน้ำได้ไม่ดี แต่ถ้าหากเป็นดินเหนียวจะมีความชื้นมาก เพราะสามารถอุ้มน้ำได้ดีนอกจากนั้นค่าความชื้นของดินยังขึ้นอยู่กับฤดูกาลอีกด้วย คือ ถ้าเป็นฤดูแล้งดินจะมีความชื้นน้อยจึงทำให้ดินในฤดูฝนนี้มีความต้านทานต่ำ

ในการคำนวณเพื่อออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าโยยอนั้น ค่าที่สำคัญที่จะต้องนำมาใช้ในการคำนวณคือค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ซึ่งโครงสร้างของดินนั้นอาจจะเป็นดินชั้นเดียว

(Single-Layer) ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะอย่างสม่ำเสมอหรืออาจจะมีค่าต่างกันเป็นชั้น ๆ เรียกว่าเป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินหลายชั้น (Multi-Layer) แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วการกำหนดโครงสร้างของดินเป็นชั้นนั้นก็เพื่อให้การคำนวณง่ายแต่ก็อาจจะทำให้การออกแบบนั้นผิดพลาดไปได้ ดังนั้นเพื่อให้มีการคำนวณนั้นถูกต้องยิ่งขึ้นอาจจะกำหนดให้ดินเป็นดินสองชั้น (Two-Layer) ก็ได้ จึงต้องมีการประมวลค่าพารามิเตอร์ทั้งสามของดินที่เป็นดินสองชั้น ซึ่งจะประกอบด้วยค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ชั้นล่างและความลึกของดินชั้นบน

Blattner (1980) ได้เสนอวิธีการคาดการณ์ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและค่าความต้านทานของกราวด์ร็อด ที่ระดับความลึกต่าง ๆ โดยวิธี Extrapolate จากค่าที่ได้จากการวัดโดยวิธีปักกราวด์ร็อด (Driven Rod Method) ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะปรากฏ (Apparent Resistivity) ค่าที่ได้จากการ Extrapolate จะถูกต้องที่สุดที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่อเมตรมีค่าเกือบคงที่ และอยู่ในช่วงไม่เกินสิบเท่าของความลึกสูงสุดที่วัดได้ แต่วิธีดังกล่าวนี้ไม่สามารถที่จะหาค่าพารามิเตอร์ของดินได้

วิธีดังกล่าวความต้านทานจำเพาะของดินนั้นจะมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่มีการนำมาศึกษาและนำมาใช้ในการออกแบบระบบกราวด์จะมีอยู่ด้วยกันสองวิธีคือวิธีปักกราวด์ร็อด (Driven Rod Method) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วิธีเปลี่ยนความลึก (Variation of Depth Method) และ วิธีวัดแบบ 4 จุด (Four-point Method) ซึ่งปกติแล้วจะใช้วิธีที่สองมากกว่าเนื่องจากสะดวกต่อการปฏิบัติงานและให้ความถูกต้องมากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะใช้หลักการวางอิเล็กโทรดแบบเวนเนอร์ (Wenner Method) ส่วนวิธีแรกนั้นจะต้องลงทุนสูงและใช้เวลานานในการปฏิบัติงาน แต่ก็สามารถที่จะใช้กราวด์ร็อดนั้นเป็นส่วนหนึ่งของระบบกราวด์ได้เลย ค่าที่วัดได้จากทั้งสองวิธีจะเป็นกระแสและแรงดัน ซึ่งก็คือค่าความต้านทานนั่นเอง แล้วนำเอาค่าความต้านทานนี้ไปแทนค่าเพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่อไป Blattner (1982) ได้นำเอาวิธีการวัดทั้งสองมาเปรียบเทียบกันแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ โดยวิธีปักกราวด์ร็อดนั้น จะสมมุติให้การกระจายของกระแสที่ไหลออกจากกราวด์ร็อดไปสู่ดินนั้นมีลักษณะขนานกับผิวดินและสมการที่ใช้กับการวัดทั้งสองวิธีนั้นไม่ได้ไปในสมการ โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานจำเพาะปรากฏของดินที่ใช้กับวิธีปักกราวด์ร็อดมีความยาวน้อยกว่า ความลึกของดินชั้นบนและสมการที่ใช้ในกรณีที่กราวด์ร็อดมีความยาวมากกว่าความลึกของดินชั้นบน

การกำหนดโครงสร้างของดินที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยผิดไปหรือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของดินผิดไป อาจจะทำให้การคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์ผิดไปด้วยถึงแม้วิธีการคำนวณที่นำมาใช้หาค่าความต้านทานของระบบกราวด์นั้นจะเป็นระบบที่ดีที่สุดแล้วก็ตาม ดังนั้นจึงสมควรจะมีวิธีการที่จะหาค่าพารามิเตอร์ของดินได้อย่างถูกต้อง Dawalibi และ Blattner (1984) ได้เสนอเทคนิคในการแปลความหมายของข้อมูลที่ได้จากการวัดแบบเวนเนอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสามของดินสองชั้น ซึ่งจะใช้วิธี Steepest – Descent Algorithm โดยวิธีการนี้จะกำหนดระยะห่างเริ่มต้นของอิเล็กโทรดที่ 2.5 เมตร ต่อมา Meliopoulos และคณะ (1984) ได้เสนอวิธีการอีกอีกแบบหนึ่งที่ใช้ในการประมวลค่าพารามิเตอร์ ทั้งสามของดินที่เป็นดินสองชั้น ที่ได้ข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีปักกราวด์ร็อด โดยจะใช้วิธี Weighted least Square Estimation คือการทำให้ค่าผิดพลาดระหว่างค่าจริงที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่วัดได้น้อยที่สุดและมีการขจัดคุณภาพของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวด้วยโดยจะกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ หากมีผู้ขโมยไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นระดับความเชื่อมั่น (Confidence Level) และในปี 1986 Meliopoulos และคณะก็ได้นำเอาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาพัฒนาและนำมาใช้กับการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วและได้ชี้ถึงแหล่งที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการประมาณค่าพารามิเตอร์ว่าจะประกอบด้วยข้อผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องมือวัดและจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามธรรมชาติ เช่น จากความชื้น อุณหภูมิและปริมาณของเกลือที่มีอยู่ในดิน เป็นต้น

การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นจะเป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐาน IEEE-81-ซึ่งจะอธิบายวิธีการวัดและการแปลความหมายจากข้อมูลที่ได้จากการวัด นอกจากนี้ยังกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในแต่ละวิธีกล่าวถึงแต่อย่างไรก็ตามเนื้อหาในมาตรฐานนี้ก็ไม่ได้ให้รายละเอียดมากนัก

3. การหาค่าความต้านทานที่เท้า (Footing Resistance)

เป็นค่าความต้านทานที่อยู่ใต้เท้าทั้งสองข้างของมนุษย์ เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการหาศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่ปลอดภัยสำหรับมนุษย์ ค่าความต้านทานที่เท้ามักถูกแทนแผ่นตัวนำวงกลมที่มีรัศมี 8 เซนติเมตร และวางอยู่ในแนวระนาบบนผิวดิน ในสถานีไฟฟ้าย่อยมักโรยด้วยหินกรวดให้มีความหนา 8-20 เซนติเมตร เพื่อเป็นการทำให้ความต้านทานจำเพาะที่ใต้เท้าคนที่มีค่าสูงขึ้น

Thapar และคณะ (1993) ได้แสดงให้เห็นว่าการคำนวณค่าความต้านทานที่เท้าตามมาตรฐาน IEEE-80 (1986) ยังมีข้อผิดพลาดและข้อจำกัดอยู่และได้เสนอสมการ, กราฟและแบบจำลองขึ้นใหม่เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานที่เท้าไว้ 2 วิธีคือ แบบจำลองแผ่นตัวนำวงกลมแบบจำลองแผ่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Thapar และ Ziad (1989) ได้เสนอวิธีการเพิ่มความต้านทานที่เท้าในบางจุดของสถานีไฟฟ้าเพื่อเป็นการลดความต้านทานกราวด์ โดยการ ใช้แผ่นพลาสติกที่ทำมาจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีน, เพอร์มาลอน พีวีซี หรือนีโอพรีน ผังได้ชั้นหินกรวดโดยทำการทดสอบกับแผ่นพลาสติกทั้งที่เจาะรู การใช้แผ่นพลาสติกสามารถช่วยลดค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสได้

Thapar และคณะ (1992) ได้เสนอสมการและแบบจำลองในการหาค่าความต้านทานที่เท้าเนื่องจากการสะสมของดินในชั้นหินกรวดที่อยู่ลึกลงไป เมื่อสะสมในช่องว่างระหว่างหินที่อยู่ต่ำลงไป จะมีชั้นของความต้านทานจำเพาะที่แตกต่างกันอยู่ 3 ชั้นคือ ชั้นของหินที่ไม่มีดินสะสม ชั้นของหินที่มีดินสะสม และชั้นของดินเพียงอย่างเดียว ในการหาค่าความต้านทานที่เท้าจึงต้องใช้แบบจำลองของความต้านทานจำเพาะที่ต่างกัน 3 ชั้นการหาค่ากระแสแตริต

กระแสแตริตเป็นกระแสที่ไหลระหว่างกริดและดินรอบ ๆ กระแสแตริตนี้ควรมีค่าน้อยกว่ากระแสแตริตวงจรเสมอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระแสแตริตวงจรที่เกิดขึ้นทั้งหมด มีส่วนใดที่เป็นกระแสไหลลงกริดและลงดินไป

Thapar และ Madan (1984) ได้เสนอวิธีการหาค่ากระแสแตริตที่ใช้ในการคำนวณหาศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวและศักดาไฟฟ้าสัมผัส เป็นค่าที่เหมาะสมกว่าที่จะใช้ค่ากระแสแตริตวงจร เพื่อความประหยัดในการออกแบบโดยทำการศึกษากระแสแตริต โดยคำนึงถึงค่าความต้านทานกราวด์กริด, พารามิเตอร์ของสาย

เอกสารนี้เป็นการออกแบบโดยทำการศึกษาระบบกริด โดยคำนึงถึงค่าความต้านทานกราวด์กริด, พารามิเตอร์ของสายไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Overhead Ground Wire, ค่าความต้านทานของเสา (Tower Footing Resistance), ระยะห่างระหว่างเสา (Tower Span)

4. งานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้า

Machias และคณะ (1989) ได้เสนอวิธีการที่เรียกว่า ระบบชำนาญงาน (Expert System) ในการออกแบบระบบและทดสอบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยใช้ลักษณะการถาม – ตอบ ข้อมูลแบบกราฟฟิกผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ ระบบฐานข้อมูลและสูตรที่ใช้ในการคำนวณจะบรรจุอยู่ในฐานความรู้ โดยฐานความรู้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกประกอบด้วยกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการหาชนิดของตัวนำ, ชนิดของการเชื่อมต่อและความลึกในการตอกกราวด์ร็อดส่วนที่สองประกอบด้วยกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการหาคุณลักษณะของกราวด์กริดเพื่อคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์จะทนได้มีการพัฒนาระบบชำนาญงาน (Expert System) ในการออกแบบและการก่อสร้างระบบกราวด์เพื่อความประหยัดและความปลอดภัยยิ่งขึ้น

Lazzara และ Barbeito (1990) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยในแบบจำลองของดินสองชั้น (Non-Uniform Soil) ซึ่งสมการตามมาตรฐาน IEEE – 80 (1986) ตั้งสมมติฐานว่าดินเป็นแบบดินชั้นเดียว แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่าความต้านทานจำเพาะของดินมักเปลี่ยนแปลงตามความลึก โดยได้ทำการศึกษาที่ Florida Power Corporation เป็นเวลา 2 ปี โดยพื้นที่ทำการทดลองมีความต้านทานจำเพาะที่ผิวดินบนอยู่ในช่วง 1000-2000 โอห์ม – เมตร ได้ทำการศึกษาค่าความต้านทานระบบกราวด์, ค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว รวมทั้งศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการคำนวณ

Meliopoulos และคณะ (1993) ได้เสนอวิธีการ และคอมพิวเตอร์โมเดล ในการวิเคราะห์ระบบกราวด์ด้วยวิธีการที่เรียกว่า Method of Moment โดยวิเคราะห์ระบบกราวด์ที่ประกอบด้วยกราวด์กริด, กราวด์ร็อด, รั้ว, ท่อโลหะ, กราวด์อิเล็กทรอนิกส์ทรงสี่เหลี่ยม, แผ่นโลหะเรียบ, ฯลฯ ที่ฝังอยู่ใต้ดินหรือวางอยู่บนผิวดิน โดยถือว่าดินเป็นแบบดินชั้นเดียว (Uniform Soil) หรือดินสองชั้น (Two – Layer Soil) แล้วทำการคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัส, ศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว, กระแสที่ไหลผ่านร่างกายคนขณะที่เกิดกระแสไหลผิดปกติ, ความต้านทานระบบกราวด์และ โวลต์เตจโพรไฟล์ (Voltage Profile)

Thapar และคณะ (1992) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมโยงระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย 2 สถานี ด้วยสายตัวนำที่ฝังอยู่ใต้ดิน เมื่อเกิดกระแสผิดปกติไหลลงดินที่ได้ทำการศึกษาค่าความต้านทานกราวด์ที่ประกอบด้วยกราวด์กริด 2 แห่ง, ค่าศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์ (Ground Potential Rise) ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละแห่ง และค่า Voltage Profile ตามแนวความยาวของตัวนำที่เชื่อมต่อภายในสถานีไฟฟ้าย่อยมีฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กของอุปกรณ์ต่าง ๆ อยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่ง Thapar และคณะ (1989) ได้ทำการศึกษาค่าความต้านทานของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กของอุปกรณ์ที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าเช่น สวิตช์, เบรกเกอร์, ฯลฯ โดยทำการแบ่งฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กออกเป็น 4 รูปแบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.ฐานรากทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแผ่เรียบ (Mat Foundation)

2.ฐานรากทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (Direct Vertical Footing)

3.ฐานรากรูปทรงพีระมิด (Pyramidal Spread Footing)

4.ฐานรากทรงฐานยื่น (Spread Footing with Slab)

การหาความต้านทานของฐานรากเพื่อศึกษาว่าในขณะที่เกิดภาวะกระแสไหลผิดปกติหรือกระแสไหลรั่ว ฐานรากเหล่านี้จะสามารถรับไว้ได้เพียงใด

การเพิ่มความต้านทานสัมผัสของมนุษย์โดยการ โรยหินกรวดในสถานีไฟฟ้าด้วยความหนาประมาณ 8-15 ซม. เป็นการลดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ไม่ให้มีค่ามากเกินไปซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะของหินเป็นตัวกำหนดค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่ปลอดภัยของมนุษย์ โดย Abledu และ Donald (1992) ได้เสนอวิธีการวัดค่าความต้านทานของหินกรวดที่เปียก ซึ่งเป็นค่าความต้านทานจำเพาะที่ต่ำที่สุดและได้เสนอสมการและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะของหินและน้ำที่ใช้ในการรดหิน โดยน้ำที่ใช้ในการทดลองอาจเป็นน้ำฝนหรือน้ำประปาก็ได้ ในทางปฏิบัติแล้วน้ำฝนที่ใช้ในการรดหิน ในทางปฏิบัติแล้วน้ำฝนซึ่งมีความต้านทานจำเพาะประมาณ 100 โอห์ม-เมตร เป็นตัวทำให้อินทรีย์สภาพเปียกมากที่สุด

Picken (1993) ได้ทำการทบทวนมาตรฐานในการออกแบบระบบกราวด์กริดคือมาตรฐาน BS7354 (1990) มาตรฐาน IEEE - 80 (1986) มาตรฐาน DIN VED 0141 (1989) และมาตรฐาน CENELEC (1993) แล้วทำการเปรียบเทียบผลจากพารามิเตอร์ต่างๆ

มาตรฐาน BS7354 ได้มีการคิดผลของความต้านทานของรองเท้า ในขณะที่มาตรฐานอื่น ไม่ได้นำมาพิจารณา มีผลทำให้ค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้มีค่าสูงขึ้น แต่ทุกมาตรฐานจำเป็นต้องหาค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวมนุษย์จะทนได้ และต้องออกแบบให้ศักดาไฟฟ้าสัมผัสที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าที่มนุษย์จะทนได้ภายใต้ภาวะต่างๆ นอกจากนี้ได้แสดงความแตกต่างของมาตรฐานต่างๆ เพื่อนำไปเป็นข้อพิจารณาในการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยต่อไป

5. การพิจารณาการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย

การออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้ามีวัตถุประสงค์เพื่อความปลอดภัยของมนุษย์ที่ทำงานเกี่ยวกับขั้วกับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือยืนอยู่ในบริเวณสถานีไฟฟ้าที่มีการติดตั้ง โครงสร้างหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ ที่จะได้รับผลจากกระแสฟ้าผ่าหรือกระแสลัดวงจรลงดิน ซึ่งจะทำให้เกิดเกรเดียนท์ของศักดาไฟฟ้า (Potential Gradient) สูง ที่จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ นอกจากนี้จะเป็นทางผ่านให้อุปกรณ์กับดักฟ้าผ่าและอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินคายประจุลงดิน หรือเป็นทางผ่านการไหลกลับของกระแสหม้อแปลงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการลัดวงจรแบบวาย

โดยปกติแล้วกระแสลัดวงจรลงดินของสถานีไฟฟ้าจะมีค่าสูง ในการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าจึงนิยมทำเป็นแบบกริด (Grid) เพื่อให้กระแสลัดวงจรลงดินไหลผ่านได้อย่างรวดเร็ว ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ สัปดาห์ไฟฟ้านี้เป็นสัปดาห์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์ (Ground Potential Rise) และสัปดาห์ไฟฟ้าที่มนุษย์ได้รับ โดยตรงประกอบด้วย สัปดาห์ไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) และ สัปดาห์ไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) เพื่อลดอันตรายจากสัปดาห์ไฟฟ้าทั้งสองจึงต้องมีการควบคุมหรือแก้ไขไม่ให้สัปดาห์ทั้งสองดังกล่าวมีค่าเกินกว่าที่มนุษย์จะทนได้โดยไม่เป็นอันตราย และต้องพยายามลดค่าความต้านทานของระบบกราวด์ให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งตามมาตรฐานจะกำหนดไว้ไม่เกิน 1 โอห์ม สำหรับสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่และไม่เกิน 5 โอห์มสำหรับสถานีไฟฟ้าขนาดเล็ก แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาเฉพาะค่าความต้านทานของระบบกราวด์เพียงอย่างเดียวไม่ได้ประกันว่าระบบกราวด์นั้นจะปลอดภัย สิ่งที่สำคัญคือต้องมีการพิจารณาสัปดาห์ไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นกับระบบกราวด์จะต้องมีค่าต่ำกว่าสัปดาห์ไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้และสัปดาห์ไฟฟ้าช่วงก้าวจะต้องมีค่าต่ำกว่าสัปดาห์ไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้

ระบบกราวด์กริดทำเป็นรูป (Loop) ล้อมรอบบริเวณพื้นที่ทั้งหมดของสถานีไฟฟ้าและบางครั้งอาจจะออกนอกแนวรั้วก็ได้ซึ่งการล้อมรอบพื้นที่มากขึ้นจะเป็นการลดค่าความต้านทานของระบบกราวด์และสัปดาห์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์ ตัวนำกริดจะวางขนานกันและตัดขวางกัน โดยให้ใกล้กับ โครงสร้างหรือแนวการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อให้สะดวกในการต่อสายกราวด์และอุปกรณ์ให้สั้นที่สุด ตัวนำกริดจะต้องต่อถึงกันหมดอย่างมั่นคง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจุดที่ตัวนำวางขวางกัน เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสลัดวงจรลงดินไหลไปรวมกันเพียงจุดเดียว เช่น ที่ตำแหน่งของจุดนิวตรอนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คาปาซิเตอร์หรือหม้อแปลง เป็นต้น การเชื่อมต่อตัวนำกริดส่วนมากจะใช้วิธี Exothermic ซึ่งเป็นวิธีการเชื่อมตัวนำด้วยการให้ความร้อนสูงเฉียบพลันโดยจะให้ความสะดวกและง่ายต่อการปฏิบัติงาน

ขนาดของตัวนำกริดที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้คือ มีสภาพความนำสูง แข็งแรงทนทานต่อการผุกร่อน ทนทานต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นทางกลหรือถูกทำลายโดยง่าย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ตัวนำทองแดงมีคุณสมบัติครบถ้วน ขนาดตัวนำที่เล็กที่สุดที่ยอมให้ใช้งานตามมาตรฐาน โดยทั่วไปจะใช้สายทองแดงขนาด 1/0 และ 2/0 AWG แต่ทางบริษัทผู้ผลิตได้ตั้งมาตรฐานสำหรับสายทองแดงที่ใช้ทำสายกราวด์คือ สายทองแดงขนาด 4/0 AWG เป็นสายขนาดเล็กที่สุดเป็นขนาดมาตรฐาน เพื่อความแข็งแรงทางกล (Mechanical Strength) แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดขนาดสายนั้นต้องพิจารณาถึงความทนทานต่อกระแสลัดวงจรลงดิน ช่วงเวลาการไหลของกระแส ความร้อนที่จะเกิดขึ้นโดยไม่ทำให้สายหลอมละลาย ตัวนำกริดจะถูกฝังลึกจากผิวดินประมาณ 0.15 – 0.5 เมตร และมีระยะห่างของตัวนำประมาณ 3 – 15 เมตร ซึ่งในกรณีตัวนำกริดมีระยะห่างกันสัปดาห์ไฟฟ้าสัมผัสแรงสูงก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากจุดกึ่งกลางของระบบกราวด์กริดไปจนถึงเมฆที่อยู่รอบนอก ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นจะอยู่กับขนาดของระบบกราวด์ ขนาดและความลึกของตัวนำและค่าความต้านทานจำเพาะของดิน แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบด้วยวิธีนี้อาจจะเป็นการสิ้นเปลืองในการใช้ตัวกริดเพิ่มขึ้นเพื่อจะลดสัปดาห์ไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด ดังนั้นในบริเวณเมฆรอบ ๆ เส้นรอบรูปของระบบกราวด์กริดอาจจะให้ตัวนำกริดมีระยะชิดกันมากกว่าในบริเวณใกล้ ๆ จุดกึ่งกลางของระบบ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการติดตั้งระบบกราวด์ได้

การออกแบบกราวด์ ได้มีการนำเอากราวด์หรือคานาต่อกับกราวด์กริด เนื่องจากกราวด์หรือคานาเป็นตัวนำ ให้กระแสไหลลงดินได้ดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่โครงสร้างดินเป็นดินสองชั้นและดินชั้นบนมี

ค่าความต้านทานสูงกว่าดินชั้นล่าง การใช้กราวด์หรือคานาสามารถลดความต้านทานของระบบกราวด์ได้ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในกรณีพิเศษหรือกรณีอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรวดรีดมักจะได้รับ การคอกกับกริดที่ตำแหน่งที่ตัวนำกริดตัดขวางกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณเส้นรอบรูปของระบบกรวดรีดหรือตำแหน่งที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขนาดใหญ่เช่น หม้อแปลง โดยทั่วไปตามมาตรฐานที่ใช้ขนาดของกรวดรีดที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $5/8$ นิ้ว (16 มิลลิเมตร) และมีความยาว 8-10 ฟุต (2.44-3.05 เมตร)

ในบริเวณสถานีไฟฟ้าได้มีการโรยหินกรวด (Crushed Rock) ด้วยความหนาประมาณ 0.08 – 0.15 เมตร เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานสัมพัทธ์ของมนุษย์กับพื้นดินได้ ซึ่งเป็นการลดกระแสที่จะไหลผ่านร่างกายมนุษย์ไม่ให้มีค่ามากเกินไป ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวดมีค่าประมาณ 1000 – 5000 โอห์ม – เมตร รั้วที่เป็นโลหะที่ล้อมรอบบริเวณพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าอาจเป็นจุดหนึ่งที่ทำให้เกิดอันตรายกับมนุษย์ที่ไปสัมผัสได้ เสาร์้วแต่ละต้นจึงควร จะได้รับการเชื่อมต่อกับระบบกรวดรีดเพื่อป้องกันอันตราย ดังนั้นพื้นที่ของระบบกรวดรีดจึงควรครอบคลุม โดยรอบของรั้วทั้งหมดโดยเส้นรอบรูปของระบบกรวดรีดควรห่างจากแนวรั้วประมาณ 0.15-0.5 เมตร

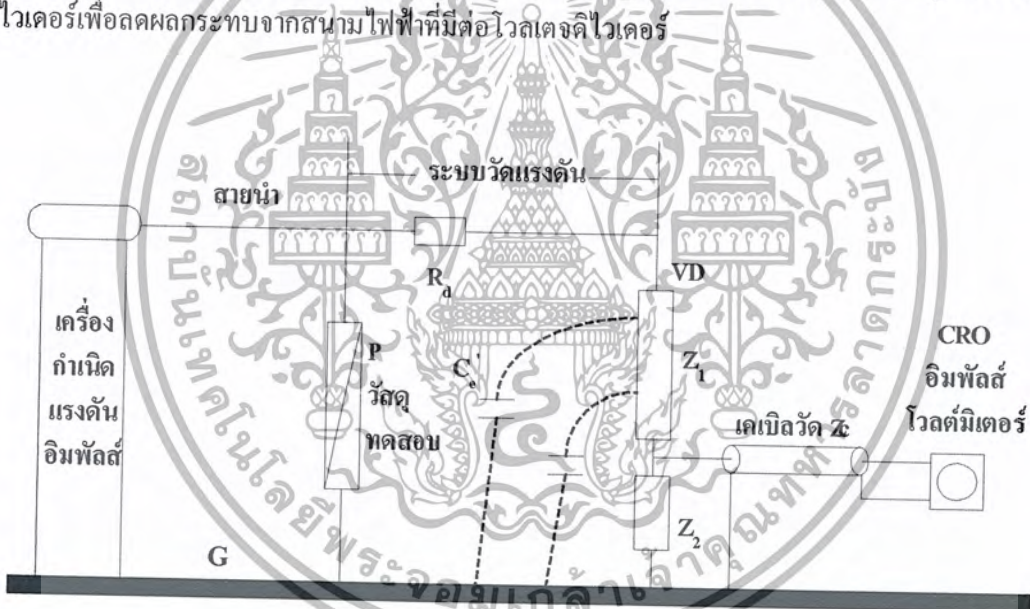


บทที่ 11

การศึกษาผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์

11.1 บทนำ

ในการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์จะต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของระบบวัด โดยการหาผลตอบสนองรูปขั้น (Step response) จากวงจรในรูปที่ 11-1 เป็นวงจรการวัดแรงดันอิมพัลส์โดยจะมีตัวต้านทานหน่วงทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในภาวะทรานเซียนต์ที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของสายตัวนำกับค่าเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ ตัวต้านทานหน่วงที่ใช้เป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำโดยอาจต่อที่ต้นสายตัวนำ หรืออิเล็กโตรดแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ โดยให้มีค่าประมาณเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำ จะช่วยหน่วงการแกว่งที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากันของสายตัวนำกับเครื่องกำเนิดแรงดัน และโวลเตจดีไวเดอร์ โดยความยาวของสายตัวนำต้องมีค่าความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของโวลเตจดีไวเดอร์เพื่อลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อโวลเตจดีไวเดอร์



รูปที่ 11-1 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

11.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

11.2.1 ผลตอบสนองรูปขั้น

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติการถ่ายโอน (transfer characteristic) ของโวลเตจดีไวเซอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดีขึ้น จึงควรที่จะได้ทราบถึงคำจำกัดความหรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการเสียก่อน โวลเตจดีไวเซอร์ถือเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยข่ายวงจร 4 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 11-2



รูปที่ 11-2 ข่ายวงจร 4 ขั้ว เขียนแทนระบบวัด

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาเข้าและขาออกในเชิงความถี่สามารถเขียนแทนได้ด้วย สมการ

$$\begin{bmatrix} U_i(s) \\ I_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(s) & A_{12}(s) \\ A_{21}(s) & A_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_o(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix}$$

เมื่อ s คือ ตัวแปลงลาปลาซ (Laplace Transform)

ในกรณีที่ $I_o = 0$ จะสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ได้เป็น

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{A_{11}(s)} \tag{11-1}$$

ค่า $H(s)$ จะแทนผลตอบสนองแอมพลิจูดและเฟสของระบบในเชิงความถี่ที่ความถี่ต่ำๆ แอมพลิจูดจะมีค่าคงที่ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นแอมพลิจูดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ที่แอมพลิจูดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ± 3 dB เรียกว่า ความถี่จำกัด (limit frequency) ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ (normalized transfer function) จะสามารถเขียนแทนได้ด้วย

$$h(s) = \frac{A_{11}(0)}{A_{11}(s)} \tag{11-2}$$

เนื่องจากโวลเตจดีไวเซอร์มักจะมีค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการหาผลตอบสนอง แอมพลิจูด/ความถี่ (amplitude/frequency response) จึงทำได้ค่อนข้างยากวิธีที่นิยมในทางปฏิบัติ คือ การหาผลตอบสนองรูปขั้น (step response) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{s}H(s)\right] \tag{11-3}$$

จากผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันขาออกเมื่อ ทราบแรงดันขาเข้า $V_i(t)$ ใดๆ ได้จาก

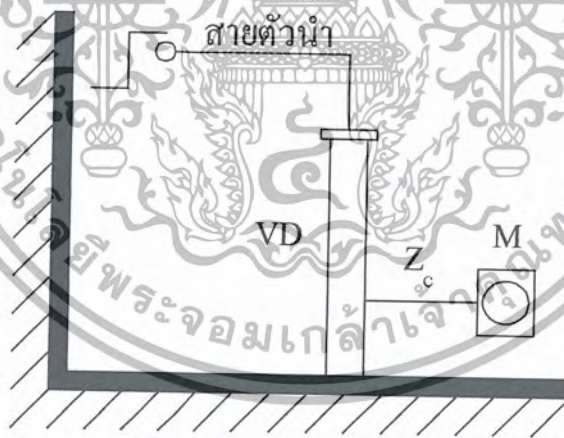
$$U_o = \int_0^t U_i'(t-\tau).G(\tau).dt \tag{11-4}$$

เมื่อ $V_i'(t-\tau)$ คืออนุพันธ์ของ $V_i(t-\tau)$ เมื่อเทียบกับ τ

เวลาตอบสนองของระบบวัดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ ดังแสดงในสมการ

$$T_N = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1-h(s)}{s} \right] \tag{11-5}$$

โดยวงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขั้นตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60-2(1994) แสดงไว้ในรูปที่ 11-3



รูปที่ 11-3 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับระบบวัดแรงดัน

มาตรฐานได้กำหนดนิยามพารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้นไว้ดังนี้

1) พารามิเตอร์ผลตอบสนอง (response parameter) หมายถึง พารามิเตอร์ซึ่งได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้น โดยวิธีที่กำหนด

2) จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองรูปขั้น (virtual origin of step response, O_1) หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองรูปขั้น ในกรณี

ที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่นจะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านเส้นที่เกิดการแกว่งและใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรงข้างต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ (normalized step response, $g(t)$) หมายถึงผลตอบสนองรูปขั้นที่นอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย (ดูรูปที่ 11-4 a)

4) อินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น (step response integral) หมายถึง อินทิกรัลจาก O_1 ถึง t ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองรูปขั้น $g(t)$ (ดูรูปที่ 11-4b)

$$T(t) = \int_{O_1}^t (1 - g(\tau)) d\tau \quad (11-6)$$

5) เวลาตอบสนองจากการทดลอง (experimental response time, T_N) หมายถึง ค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่ t_{\max}

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

6) เวลาตอบสนองบางส่วน (partial response time, T_α) หมายถึง ค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น

7) เวลาตอบสนองเศษเหลือ (residual response time, $T_R(t_i)$) หมายถึง เวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่เวลาที่กำหนด t_i โดย $t_i < t_{\max}$

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

8) ส่วนพุ่งเกิน (overshoot, β) หมายถึง ค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ ที่เกินหนึ่งหน่วย

9) เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น (initial distortion time, T_o) หมายถึง พื้นที่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์, ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ และเส้นตรงที่ใช้หา O_1

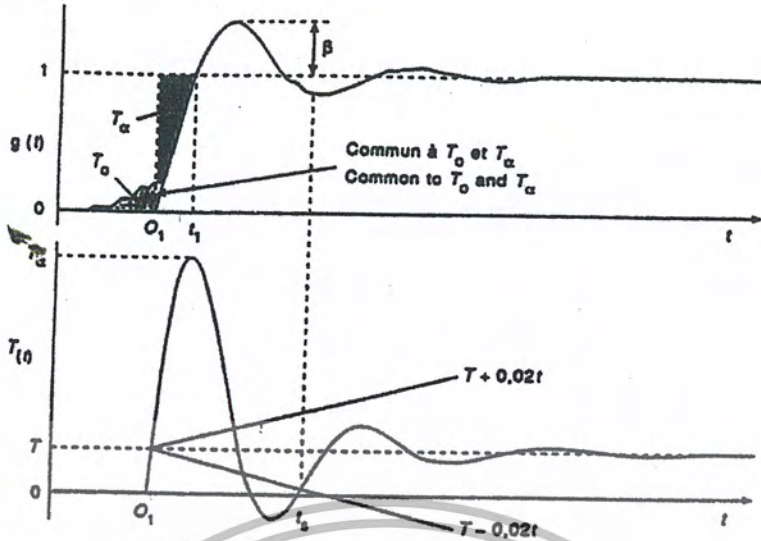
10) เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (setting time, t_s) หมายถึง เวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองเศษเหลือ $T_R(t)$ มีค่าน้อยกว่า 2 % ของ t

$$|T_N - T(t)| < 0.02t_s$$

สำหรับทุกๆค่าของ t ในช่วงจาก t_s ถึง t_{\max}

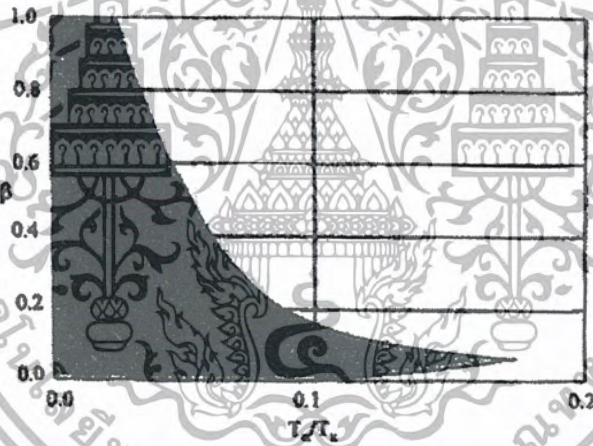
เนื่องจากในมาตรฐานไม่ได้ระบุค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ ดังนี้

ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่นที่ค่าเวลานำคลื่น T_1 ส่วนพุ่งเกิน β และเวลาตอบสนองบางส่วน T_α ควรอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า T_α/T_x จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรงเงาของรูปที่ 11-5



รูปที่ 11-4 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง

a) เมื่อเทียบกับ $g(t)$ b) เมื่อเทียบกับ $T(t)$



รูปที่ 11-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T/T_c โดยที่ T_c คือ เวลาค้นน้ำคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่จะวัด

ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์คลื่นตัดที่หน้าคลื่นในช่วงเวลาค้นน้ำคลื่น T_c พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไขดังต่อไปนี้

เวลาตอบสนองจากการทดลอง

$$T_\alpha - 0.03T_c \leq T_N \leq 0.03T_c$$

เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว

$$t_s \leq T_c$$

เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น

$$T_0 \leq 0.005T_c$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.2.2 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดีไวเคอร์

การวิเคราะห์หาความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายของโวลเตจดีไวเคอร์ อาจหาได้ด้วยวิธีจำลองแบบ คือใช้วงจรสมมูล ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยๆ โดยถือว่าองค์ประกอบย่อยเหล่านี้ต่อกันเป็นแบบลูกโซ่ต่อเนื่องดังรูป 11-6 สมมติว่าโวลเตจดีไวเคอร์ประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยต่ออันดับมีจำนวนเท่ากับ n และแรงดันสูงเท่ากับ U ส่วนภาคแรงต่ำคือ ปลายขั้วโวลเตจดีไวเคอร์ด้านที่ต่อลงดิน ต่อออกมาวัดแรงดัน U_2 เพียง 1 องค์ประกอบย่อย แต่ละตัว Z'_q จะเขียนแทนได้ด้วย R' และ C' อันเป็นองค์ประกอบที่ต้องการ (บางกรณีอาจมีค่าประจุขานาน C'_p) แต่เนื่องจากมีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านดีไวเคอร์ จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นตามธรรมชาติซึ่งเขียนแทนด้วย L' ต่ออันดับกับ R' และ C' ดังรูปที่ 11-6 b) ในขณะที่เดียวกันก็มีสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากศักย์สนามไฟฟ้าที่โวลเตจดีไวเคอร์ จึงทำให้เกิดค่าประจุเดียวกับดินในลักษณะขานานกันจึงเขียนแทนด้วย C'_e และเป็นตัวอิมพีแดนซ์ขวาง Z'_q

จากองค์ประกอบย่อย Z'_1 และ Z'_q คิดเป็นอิมพีแดนซ์รวม Z_1 และ Z_q จะหาอัตราส่วนแรงดันด้านออก ต่อแรงดันด้านเข้าโดยฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังต่อไปนี้

$$h(s) = \frac{nU_2}{U} = n \frac{\sinh \frac{1}{n} \sqrt{Z_1(s)/Z_q(s)}}{\sinh \sqrt{Z_1(s)/Z_q(s)}} \quad (11-7)$$



$$Z'_1 = R' + j\omega L' + \frac{1}{j\omega C'}$$

$$Z'_q = \frac{1}{j\omega C'}$$

n = จำนวนองค์ประกอบย่อยทั้งหมดและ
องค์ประกอบต่อออกมาวัด
แรงดันภาคแรงต่ำ บู

รูปที่ 11-6 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเคอร์ $R = nR'$ $C_e = n.C'_e$

องค์ประกอบดีไวเคอร์ทั้งหมด = n $L = nL'$ $C = \frac{C'}{n}$

องค์ประกอบย่อย = 1 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอาศัยความสัมพันธ์สมการ (11-7) จึงหาผลตอบสนองอมัลไลซ์ $g(t) = L^{-1} \frac{1}{s}$ ของ โวลเตจดีไวเคอร์แบบต่างๆ ได้ ซึ่งจะได้วิเคราะห์แต่ละแบบของ โวลเตจดีไวเคอร์ เป็นแบบความต้านทาน (คือ $C \rightarrow \infty$) แบบตัวเก็บประจุ (คือ $\rightarrow 0$ และ $C_p \rightarrow 0$) และแบบผสมเป็นตามลำดับต่อไป

11.2.3 โวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านทานล้วน

ในกรณีที่ค่าเก็บประจุในวงจรสมมูลรูปที่ 11-7b) มีค่าเป็นอนันต์ คือ $C' \rightarrow \infty$ โวลเตจดีไวเคอร์ก็ จัดเป็นแบบความต้านทาน ถ้าความต้านทานรวมมีค่าสูงพอทำให้ค่า L/R มีค่าน้อยมาก ($R \geq 10 \text{ k}\Omega$) และ ใช้ความต้านทานที่มีความเหนี่ยวนำต่ำ อาจคิดค่า $L = 0$ และ $C_p \ll C_c$ จึงเขียนสมการของฟังก์ชันถ่าย โอนนอร์มัลไลซ์ได้คือ

$$h(s) = \frac{\sinh \frac{1}{n} \sqrt{sRC_c}}{\sin \sqrt{sRC_c}} \tag{11-8}$$

และผลตอบสนองรูปขึ้นนอร์มัลไลซ์ได้เป็น

$$g(t) = 1 = 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \exp\left(-\frac{k^2 \pi^2 t}{RC_c}\right) \tag{11-9}$$

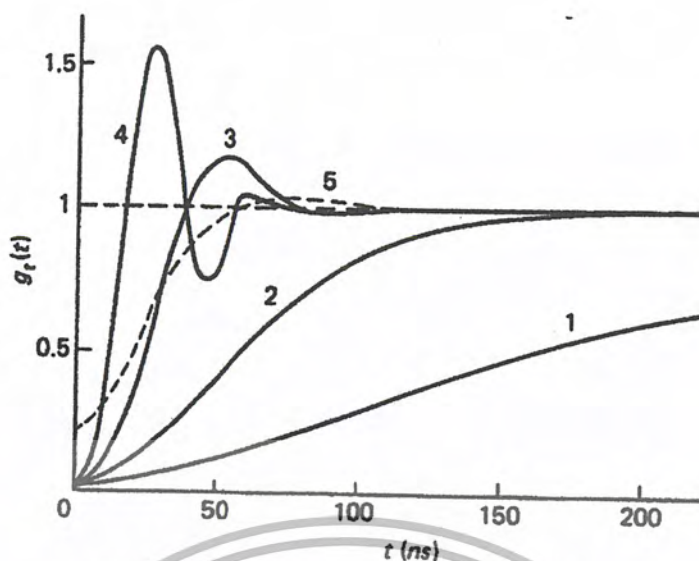
เมื่อ $k = 1, 2, 3, \dots, \infty$

จะได้เฟกเคอร์สำคัญอันแสดงให้ทราบถึงลักษณะของโวลเตจดีไวเคอร์คือ

$$\begin{aligned} \text{แบนด์วิดท์} \quad f_B &= \frac{1.46}{RC_c} \\ \text{เวลาผลตอบสนอง} \quad T &= \frac{RC_c}{6} \end{aligned}$$

ค่าเก็บประจุสเตรลงดิน C_c ต่อหน่วยความยาวของความสูงดีไวเคอร์อาจคำนวณได้ และมีค่าประมาณ 10 ... 15 pF/m ความสูง ดังนั้นค่าแบนด์วิดท์ และเวลาตอบสนอง T นอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน R ดีไวเคอร์ และยังขึ้นอยู่กับความสูงของดีไวเคอร์อีกด้วย จากสมการ f_B และ แสดงให้เห็นชัดเจนว่าโวลเตจดีไวเคอร์ ความต้านทานที่ค่าโอห์มสูงมากๆ สำหรับแรงดันกระแสตรง และกระแสสลับ ด้วยเหตุผลขีดจำกัดในทางความร้อนนั้น จะทำให้แบนวิดท์มีช่วงแคบจะนั้นในกรณีวัดแรงดันอิมพัลส์ ความต้านทาน R ต้องมีค่าต่ำ และจะต้องทนต่อพลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ได้ ดังตัวอย่างเช่น อิมพัลส์โวลเตจดีไวเคอร์ขนาด 400 kV สูง 1 เมตร ค่าเก็บประจุลงดิน $C_c = 10 \text{ pF}$, $R = 10 \text{ k}\Omega$ จะได้ $f_B = 14.6 \text{ MHz}$, $T = 16.7 \text{ nsec}$

อย่างไรก็ตาม ความต้านทาน R ของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเคอร์ ไม่ควรมีค่าต่ำเกินไป ดังตัวอย่าง ค่าความต้านทานต่างๆดังในตารางที่มีผลต่อตอบสนองรูปขึ้นแสดงในรูป 11-7



รูปที่ 11-7 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดีไวเคอร์แบบความต้านส่วน

11.2.4 โวลเตจดีไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุ

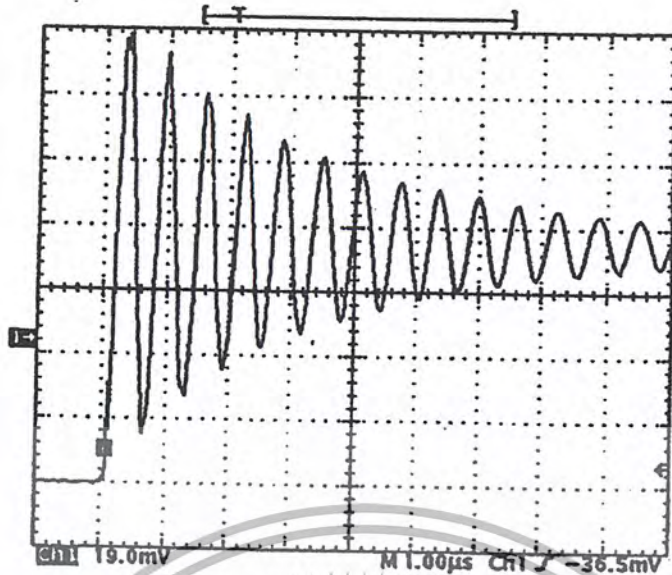
ในกรณีที่ความต้านทานในวงจรสมมูล (รูปที่ 8-6) มีค่าเป็นศูนย์ $R' \rightarrow 0$ โวลเตจดีไวเคอร์นั้นจะเป็นแบบตัวเก็บประจุ แต่ค่า L' ที่ความถี่สูงๆ ไม่อาจตัดทิ้งได้ ดังนั้นผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์สามารถเขียนได้เป็น

$$g(t) = 1 - \frac{C_e}{6(C + C_p)} + 2e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \sinh(b_k t)}{AB} \quad (11-10)$$

$$\text{โดยที่ } A = \left[1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{Ck^2\pi^2} \right], \quad a = R/2L$$

$$B = \left[1 + \frac{C_p k^2 \pi^2}{C_e} \right], \quad b_k = \sqrt{\frac{k^2 \pi^2 A}{LC_e B}}$$

ในรูป 11-8 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้จากโวลเตจดีไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุ 1000 kV มี $C' = 0.2 \mu\text{F}$ จำนวน $n = 504$, $C'_e = 137 \text{pF}$, $C'_h = 0$ และ $R_1 = 0$



รูปที่ 11-8 ออสซิลโลแกรมผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุ เมื่อ $R_I = 0$

การแกว่งที่เกิดขึ้นในผลตอบสนองรูปขึ้น มีความสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาที่คลื่นเดินทางในตัวโวลเตจดีไวเคอร์ คือ $\tau = \sqrt{LC_e}$ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยประมาณจากความเร็วแสง และความถี่ของการแกว่งสามารถคำนวณได้จาก

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_e}} \quad (11-11)$$

แสดงว่าโวลเตจดีไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุส่วน มีความไวต่อแรงดันขาเข้า ที่เวลาขึ้นเร็วแรงดันขาออกจะออสซิลเลทหรือแกว่งมาก ซึ่งเมื่อนำไปต่อเข้ากับระบบวัด จึงเกิดเรโซแนนซ์กับสายตัวนำทำให้ระบบแกว่ง ดังนั้น โวลเตจดีไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุส่วน จึงใช้วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดไม่ได้ โดยการแกว่งหรือออสซิลโลชัน ของตัวโวลเตจดีไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุนี้ อาจขจัดได้โดยการค่าความต้านทานอันดับย่อย R' เข้ากับตัวเก็บประจุ ผลรวมความต้านทานที่ต่อเข้าไปจะเป็น $R = nR'$ เรียกว่าความต้านทานหน่วง โดยเลือกให้ได้พอเหมาะ

ค่าความต้านทานหน่วง (damping resistor) ที่พอเหมาะอาจหาได้จากความสัมพันธ์

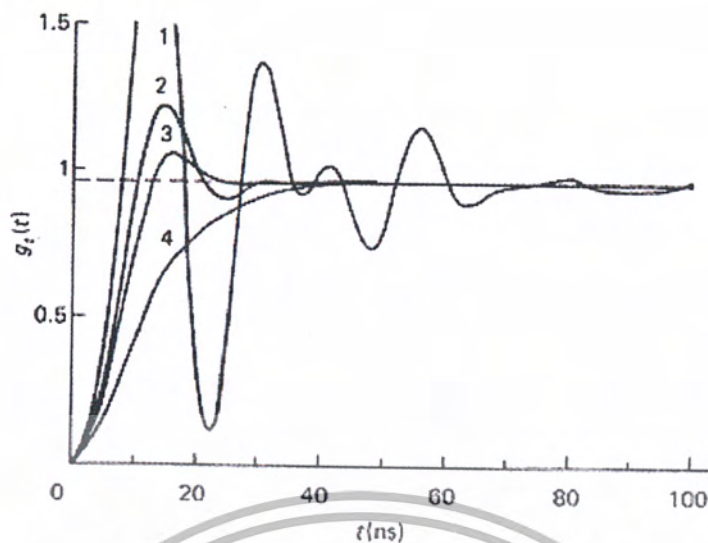
$$R \approx 4\sqrt{\frac{L}{C_e}} \quad (11-12)$$

และเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเคอร์สามารถคำนวณได้เป็น

$$T = \frac{RC_e}{6} \quad (11-13)$$

การใส่ความต้านทานหน่วงจะมีผลต่อผลตอบสนองรูปขึ้น ดังตัวอย่างในรูป 11-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11-9 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ได้จากการ

คำนวณ

เมื่อ $C = 150 \text{ pF}$, $L = 2.5 \mu\text{H}$, $C_e = 40 \text{ pF}$, $C_p = 1 \text{ pF}$

จะได้ $4\sqrt{L/C_e} = 1000 \Omega$

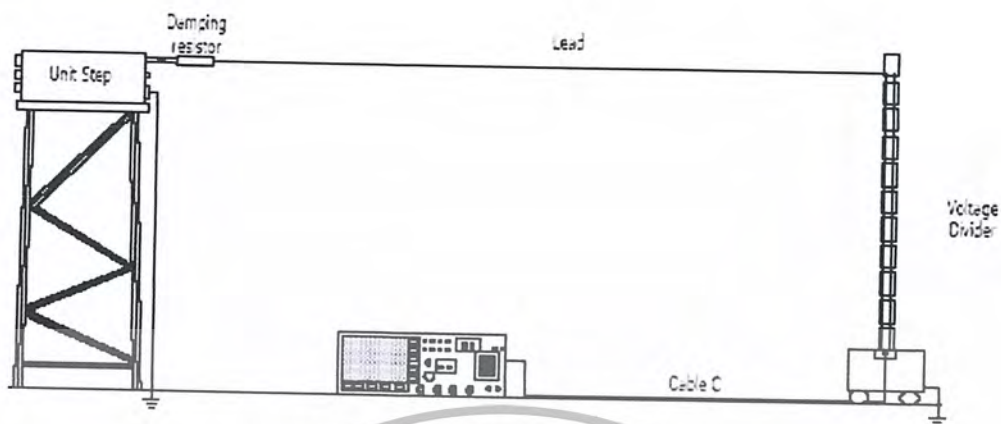
1: $R = 250 \Omega$

2: $R = 750 \Omega$

3: $R = 1000 \Omega$

4: $R = 2000 \Omega$

11.3 การทดลองและประเมินผล



รูปที่ 11-10 วงจรหาผลตอบสนองรูปขั้น

11.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

โวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม

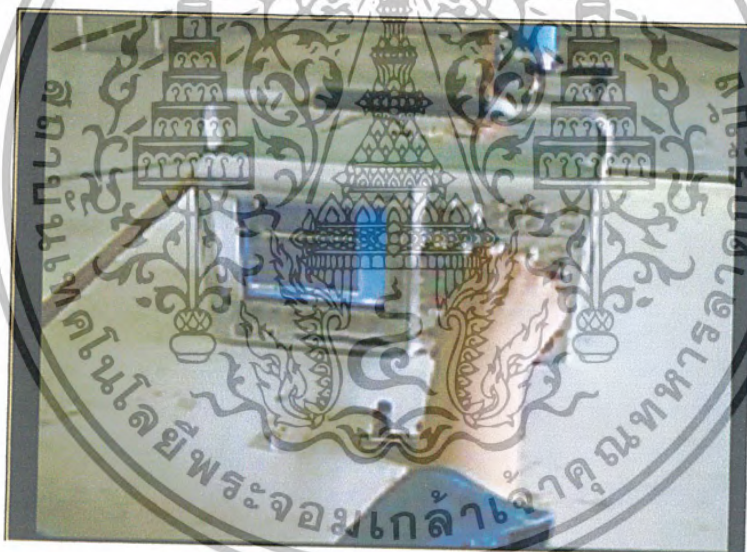
- 1) ต้องทำตามมาตรฐาน IEC 60-2(1994) กำหนดดังรูปที่ 11-10 โดยที่สายตัวนำต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของดีไวเดอร์ และ Unit step ต้องมีความสูงเท่ากับโวลเตจดีไวเดอร์
- 2) ป้อนสัญญาณที่มีลักษณะรูปคลื่นขนาดหนึ่งหน่วย โดยเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น (unit step generator) บันทึกลงที่ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์
- 3) ต่อตัวต้านทานหน่วงที่ต้นสายตัวนำบันทึกการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์
- 4) เปลี่ยนค่าตัวต้านทานหน่วงจนกระทั่งได้สัญญาณเอาต์พุตใกล้เคียงกับสัญญาณรูปขั้นที่ป้อนให้กับดีไวเดอร์

11.3.2 ผลการทดลอง

ในโครงการนี้ได้ทำการทดลองป้อนสัญญาณรูปขั้นให้กับ โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมโดยเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น ของบริษัท HAEFELY รุ่น USG 40 ซึ่งมีค่าแรงดันขาออก $90 \pm 10 \text{ V } 50 \text{ Hz}$ ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

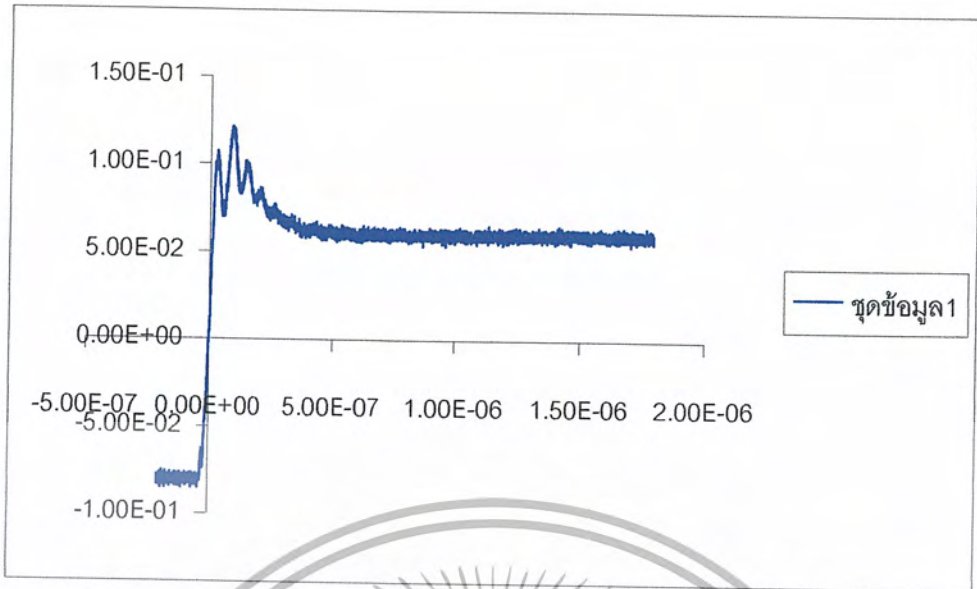


รูปที่ 11-11 การปรับค่าความต้านทานหน้าวง



รูปที่ 11-12 การใช้ข้อสจิลโคปัดรูปคลื่นสัญญาณการตอบสนองรูปขั้น

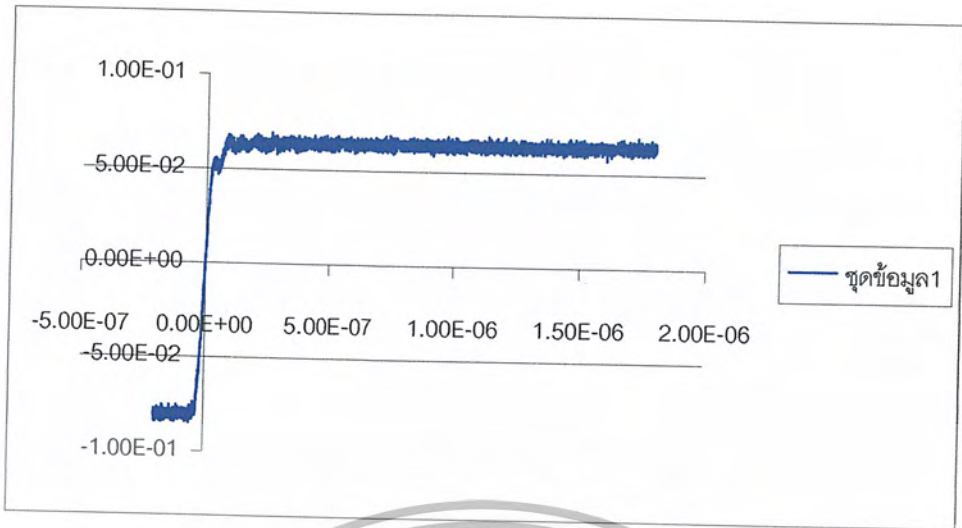
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



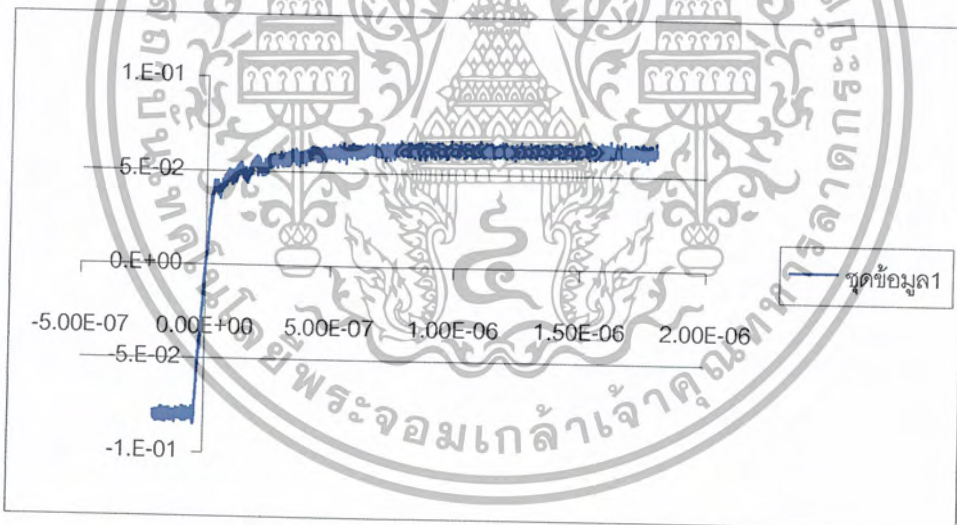
รูปที่ 11-13 ซิลิโกราฟผลตอบสนองของรูปชั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม



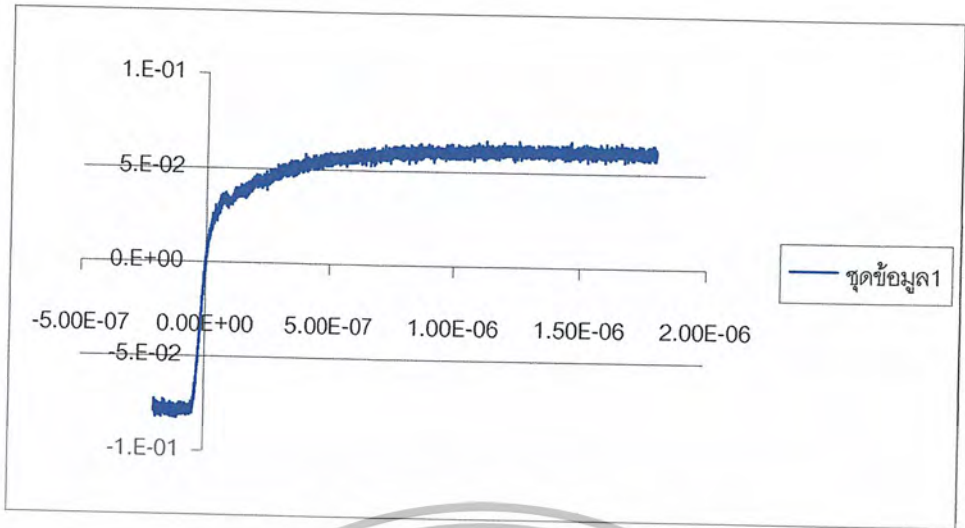
รูปที่ 11-14 ซิลิโกราฟผลตอบสนองของรูปชั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 250 Ω



รูปที่ 11-15 ซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ค่า
ความต้านทานหน่วง 500 Ω

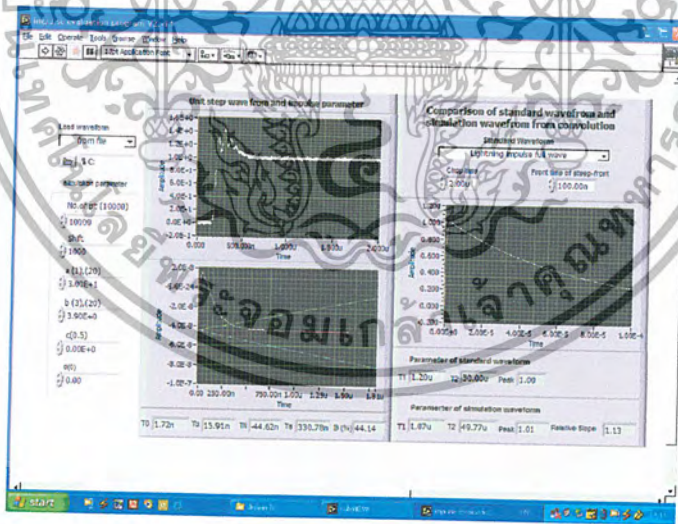


รูปที่ 11-16 ซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ค่า
ความต้านทานหน่วง 750 Ω

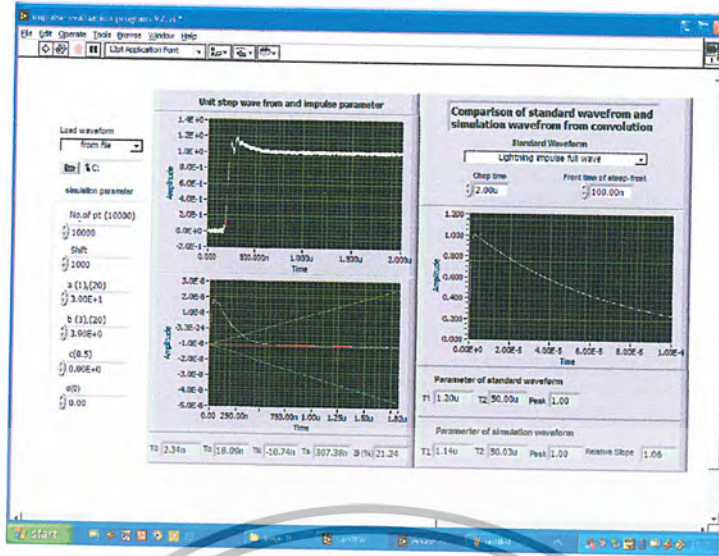


รูปที่ 11-17 ซิลโดกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 1000 Ω

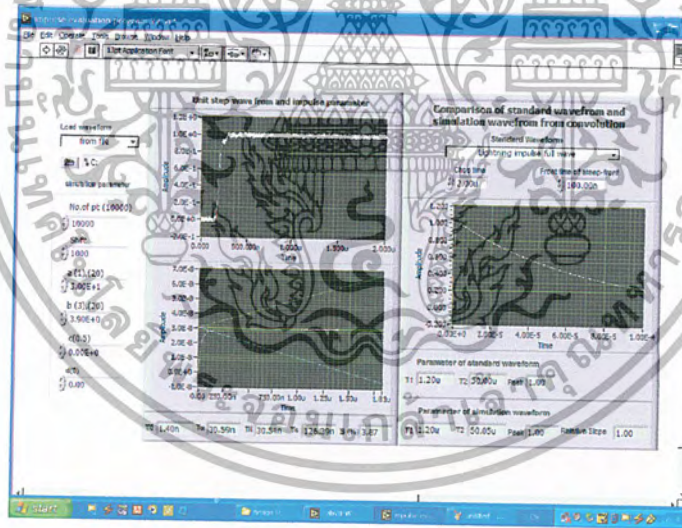
ผลการหาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขึ้น โดยใช้โปรแกรม LABVIEW



รูปที่ 11-18 ผลการ Simulate หาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองของ โวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม ด้วยโปรแกรม LABVIEW

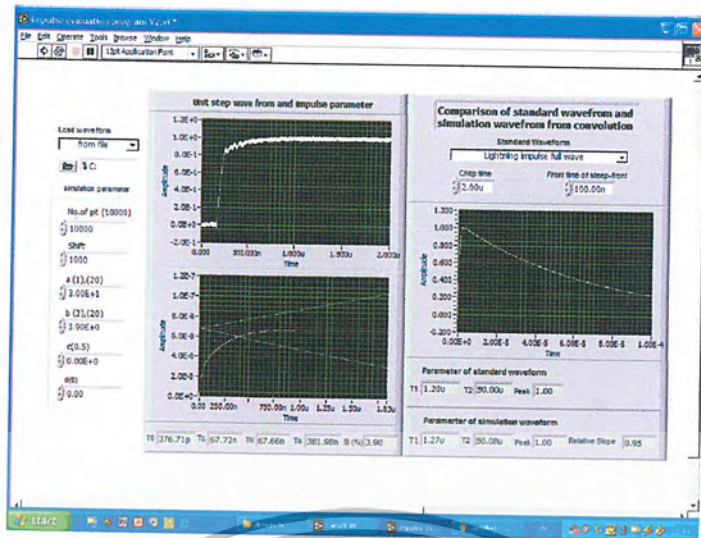


รูปที่ 11-19 ผลการ Simulate หาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนอง โวลเตจดีไวเซอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 250 Ω ด้วยโปรแกรม LABVIEW

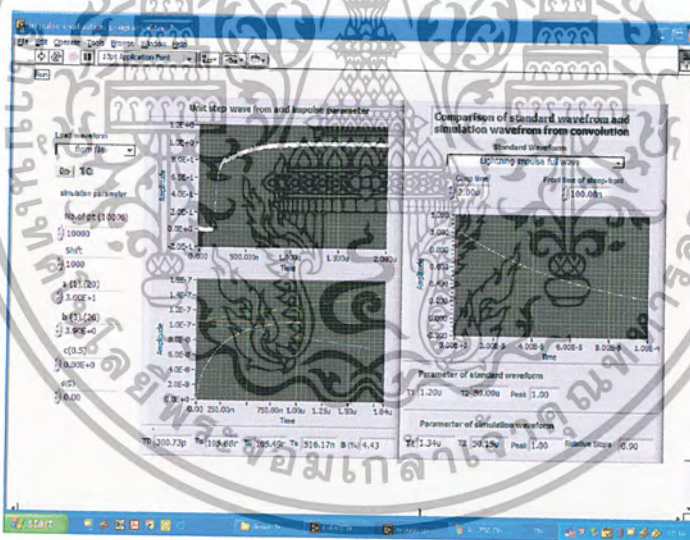


รูปที่ 11-20 ผลการ Simulate หาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเซอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วง 500 Ω ด้วยโปรแกรม LABVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11-21 ผลการ Simulate ค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองของ โวลเตจดีไวเดอร์แบบ
ผสมที่ค่าความต้านทานหนึ่ง 750Ω ด้วยโปรแกรม LABVIEW



รูปที่ 11-22 ผลการ Simulate ค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองของ โวลเตจดีไวเดอร์แบบ
ผสมที่ค่าความต้านทานหนึ่ง 1000Ω ด้วยโปรแกรม LABVIEW

ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปจันโดยใช้โปรแกรม
MATHLAP ได้ค่าตามตารางที่ 11-1

Parameter	R_d	R_d	R_d	R_d	R_d
	0Ω	250Ω	500Ω	750Ω	1000Ω
$T_o(\text{ns})$	1.72	2.34	1.40	376.71	300.73
$T_\alpha(\text{ns})$	15.91	18.09	30.59	37.72	105.68
$T_N(\text{ns})$	-44.62	-10.74	30.54	67.66	105.49
$T_s(\mu\text{s})$	330.78	307.38	126.39	381.98	516.17
$\beta\%$	44.14	21.24	3.87	3.90	4.43

ตารางที่ 11-1 ผลการผลของการ Simulate ด้วยโปรแกรม LABVIEW

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x

$$R_d = 0 \Omega$$

$$T_\alpha/T_x = 15.91 \text{ ns} / 1.2 \mu\text{s} = 0.013$$

$$\beta = 0.44$$

$$R_d = 250 \Omega$$

$$T_\alpha/T_x = 18.09 \text{ ns} / 1.2 \mu\text{s} = 0.015$$

$$\beta = 0.21$$

$$R_d = 500 \Omega$$

$$T_\alpha/T_x = 30.59 \text{ ns} / 1.2 \mu\text{s} = 0.025$$

$$\beta = 0.037$$

$$R_d = 750 \Omega$$

$$T_\alpha/T_x = 37.72 \text{ ns} / 1.2 \mu\text{s} = 0.031$$

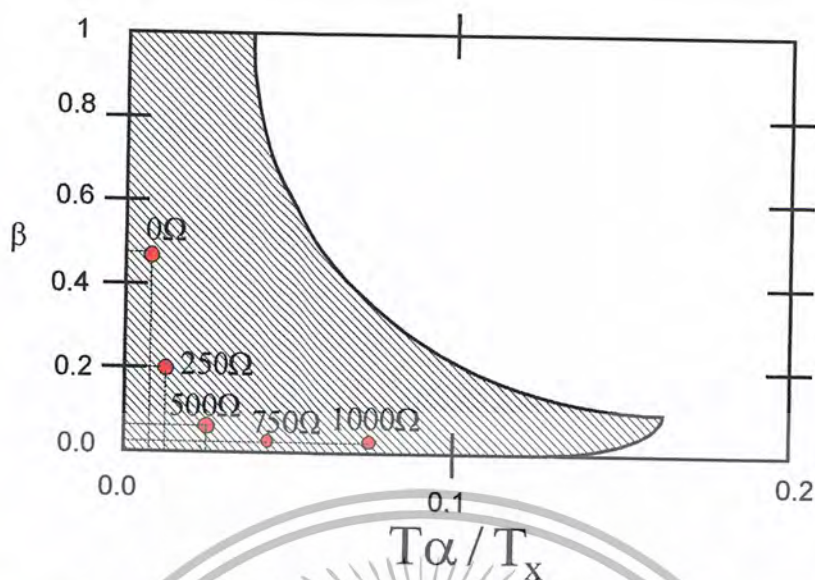
$$\beta = 0.039$$

$$R_d = 1000 \Omega$$

$$T_\alpha/T_x = 105.68 \text{ ns} / 1.2 \mu\text{s} = 0.088$$

$$\beta = 0.043$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11-23 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x โดยที่ T_x คือ เวลาหน่วงคลื่น ($1.2\mu s$) ของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

11.3.3 สรุปผลการทดลองและข้อแนะนำ

จากกราฟการตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมจะสังเกตเห็นว่าช่วงหน้าคลื่นจะเกิดออสซิลโลสโคปและเมื่อต่อตัวต้านทานหน่วงเข้าไปการเกิดออสซิลโลสโคปช่วงหน้าคลื่นจะลดลงและค่าที่เหมาะสมอยู่ที่ $500\ \Omega$ เพราะลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงกับสัญญาณยูนิคสเตปที่ป้อนเข้ามาและค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองก็อยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x แสดงว่าโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ความต้านทานหน่วง $500\ \Omega$ สามารถใช้วัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ ตามข้อแนะนำของมาตรฐาน IEC 60-2(1994) และที่ค่าความต้านทานหน่วงที่ค่าต่างๆก็ยังสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้เพราะค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองก็อยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x แต่ค่าที่ได้อาจไม่เหมาะสม

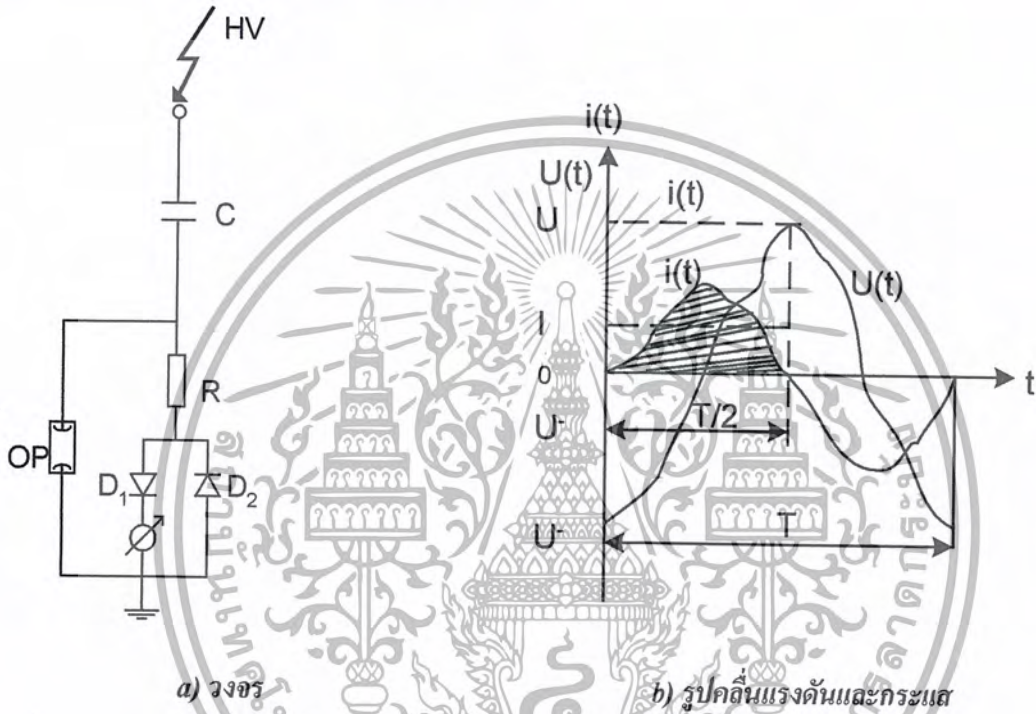
การทดลองในโครงการนี้หาพารามิเตอร์ผลตอบสนองจากการ Simulate ด้วยโปรแกรม LABVIEW แต่อาจจะทำได้ด้วยโปรแกรม MATHLABdH ก็ได้และค่าความต้านทานหน่วงที่ต่อในวงจรการทดลองต้องเป็นความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำโดยการออกแบบตัวต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำได้เขียนอธิบายไว้ในภาคผนวก

บทที่ 12

การวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับ

12.1 บทนำ

วิธีการวัดแรงดันกระแสสลับสามารถวัดได้ทั้งค่ายอดและค่า rms โดยในที่นี่จะกล่าวถึงการวัดค่ายอดด้วยวิธี Chubb – Fortes cue ดังวงจรรูปที่ 12-1



รูปที่ 12-1 การวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับด้วยตัวเก็บประจุต่ออันดับ (OP: ตัวป้องกันแรงดันเกิน)

12.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หลักการทํางานของวงจรนี้คือต้องการอ่านค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุแรงสูง C โดยให้กระแสไหลผ่านไดโอด D ก่อน ฉะนั้นแอมมิเตอร์ที่ใช้จึงใช้มิเตอร์วัดกระแสตรง เพื่อวัดค่ากระแสเฉลี่ยซึ่งค่ากระแสเฉลี่ยที่วัดได้จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความต่างระหว่างค่ายอดบวกกับค่ายอดลบของแรงดันค่ากระแสเฉลี่ยที่มีเตอร์วัดได้คือ

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{C}{T} \int_{U^-}^{U^+} du \\ &= fC(U^+ - U^-) \end{aligned} \tag{12-1}$$

เมื่อ f คือความถี่ของแรงดันที่วัด

U^+ คือค่ายอดบวก

U^- คือค่ายอดลบ

จะเห็นได้ว่าแม้ค่ายอดบวกและลบไม่เท่ากันค่าที่วัดได้ก็ยังถูกต้อง กรณีที่ค่ายอดบวกและยอดลบเท่ากันจะได้ค่ายอดแรงดันที่วัด

$$U_{\text{peak}} = \frac{\bar{I}}{2fC} \quad (12-2)$$

ในรูปที่ 12-1 b) แสดงให้เห็นว่าถึงแม้รูปคลื่นที่วัดไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ค่าที่วัดได้ก็ยังถูกต้อง ตราบเท่าที่รูปคลื่นแรงดันไม่มีค่ายอดเกิดขึ้นอีกในระหว่างครึ่งคาบ ($T/2$) มิฉะนั้นจะผิดพลาด เพราะแอมมิเตอร์วัดกระแสทางเดียว ความถูกต้องของการวัดขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของแอมมิเตอร์ ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความถี่

จากรูปที่ 12-1 a) โคโอดและแอมมิเตอร์ในวงจรไม่สามารถรับกระแสขนาดใหญ่มาก ในกรณีที่เกิดการเบรคดาวน์ในวงจรได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีวงจรป้องกันซึ่งประกอบด้วย OP และ R โดยความต้านทาน R จะป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลผ่านแอมมิเตอร์เกินค่าจำกัด เนื่องจากเมื่อมีกระแสสูงไหลผ่านตัวต้านทาน R แรงดันที่ตกคร่อม R จะทำให้ OP ทำงาน ซึ่งจะเป็นการลัดวงจรวัดทั้งหมด OP ในทางปฏิบัติมักจะเป็นแก๊สออกาซนาทเด็ค (gas discharge tube) ซึ่งเบรคดาวน์ที่แรงดันประมาณ 50-250 โวลท์

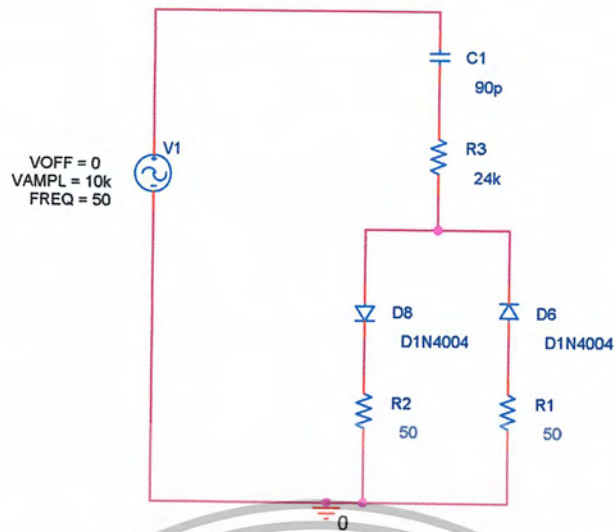
12.3 การออกแบบและการสร้าง

ในโครงการนี้ตัวเก็บประจุมีค่า 90 pF ดังนั้นคำนวณหาตัวกระแสที่ไหลผ่านในวงจรได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I &= \omega CU \\ &= 2\pi \cdot 50 \cdot 90 \cdot 10^{-12} \cdot 100 \cdot 10^3 \\ &= 2.83 \text{ mA} \\ I_{\text{peak}} &= \sqrt{2} \cdot 2.83 \text{ mA} = 4 \text{ mA} \end{aligned} \quad (12-2)$$

ค่าความต้านทาน R ที่ใช้ป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลผ่านแอมป์มิเตอร์เกินค่าจำกัดซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ (เลือก OP ที่แรงดันเบรคดาวน์ประมาณ 90V)

$$R = 90/4 \cdot 10^{-3} = 24 \text{ k}\Omega$$



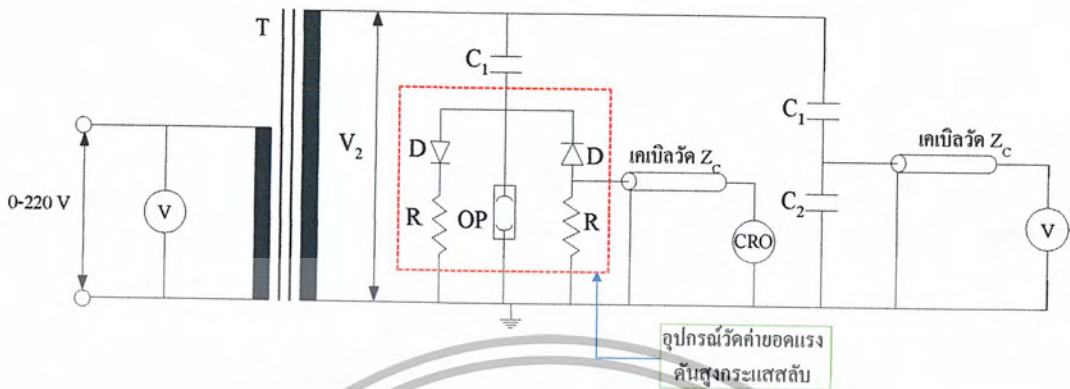
รูปที่ 12-2 วงจรที่ทำการจำลองด้วยโปรแกรม Orcad



รูปที่ 12-3 ผลของการ Simulate ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.4 การทดสอบและประเมินผล



รูปที่ 12-4 การต่อวงจรทดลอง Chubb - Fortes cue

- เมื่อ
- T คือ หม้อแปลงทดสอบ 220V / 100 kV 5kVA
 - C₁ คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง 90 pF 100kV
 - C₂ คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ
 - Z_c คือ สายเคเบิล 75Ω
 - OP คือ ตัวป้องกันแรงดันเกิน
 - D คือ ไดโอด
 - R คือ ตัวต้านทาน 100 Ω
 - V คือ โวลต์มิเตอร์
 - CRC คือ ออสซิลโลสโคป

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ต่อวงจรดังรูปที่ 1 และป้อนแรงดันอินพุตตามตารางการทดลอง
- 2) บันทึกค่าแรงดันตกคร่อม R โดยอ่านจากโวลมิเตอร์
- 3) หากกระแสที่เฉลี่ยที่ไหลผ่าน C₁ โดยใช้สูตร $I = E/R$
- 4) บันทึกรูปคลื่นของแรงดันที่ตกคร่อม R โดยการนำออสซิลโลสโคปมาต่อคร่อมที่ R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

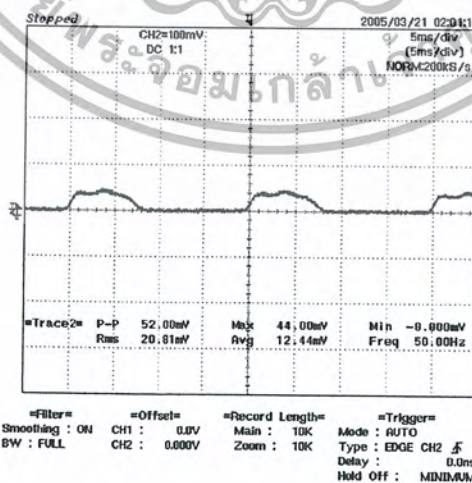
12.4.1 ผลการทดลอง

แรงดันอินพุท (kV)	แรงดันตกคร่อม R (mV)	ความต้านทาน R (Ω)	กระแสเฉลี่ย (μ A)
10	6.3	50	126
20	12.6	50	252
30	18.9	50	378
40	25.3	50	506
50	31.7	50	634
60	38.1	50	762
70	44.3	50	886

ตารางที่ 12-1 ผลการทดลอง

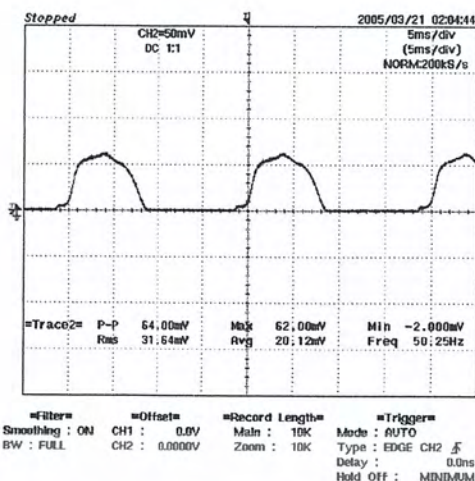


ก) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่แรงดันเอาต์พุต 10 kV

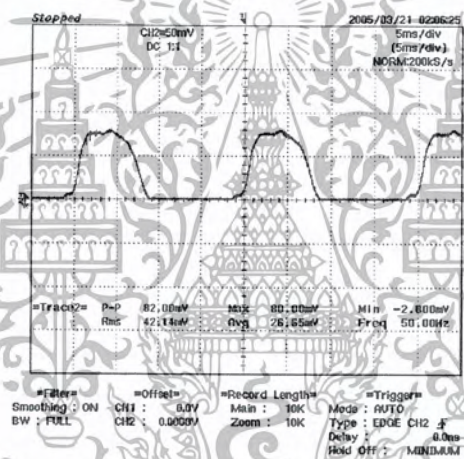


ข) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่แรงดันเอาต์พุต 20 kV

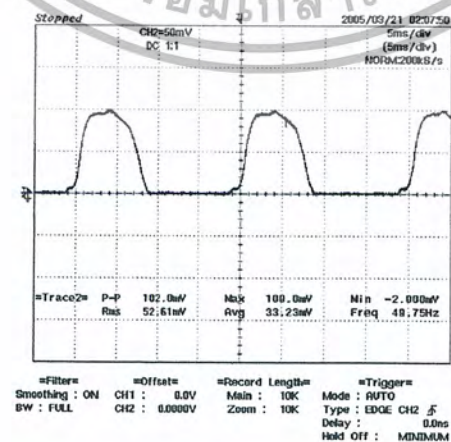
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่แรงดันเอาต์พุต 30 kV

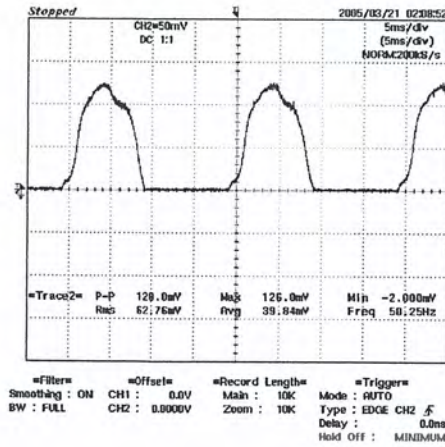


จ) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่แรงดันเอาต์พุต 40 kV

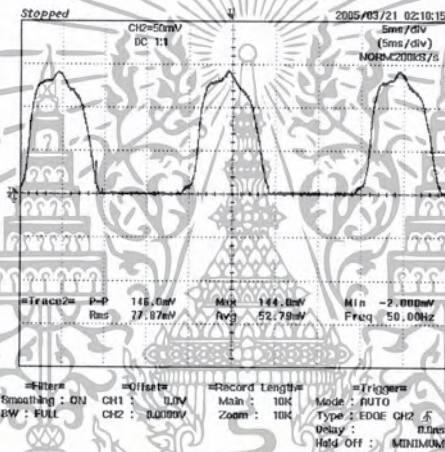


ฉ) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่แรงดันเอาต์พุต 50 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ฉ) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่แรงดันเอาต์พุต 60 kV



ช) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่แรงดันเอาต์พุต 70 kV

รูปที่ 12-5 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อม ตัวต้านทาน

12.4.2 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองป้อนแรงดันอินพุต 70 kV ค่ากระแสเฉลี่ยที่ได้จะมีค่าเป็น 7 เท่าของกระแสเฉลี่ย ในขณะที่ป้อนอินพุต 10 kV ซึ่งมีผลใกล้เคียงกับการ Simulate ด้วยโปรแกรม Orcad ส่วนรูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป จะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์แต่ค่าที่วัดได้ก็ยังคงต้องถ้าไม่เกิดรูปคลื่นแรงดันคายอดขึ้นอีกระหว่างครึ่งคาบ (T/2) และเหตุผลอีกประการหนึ่งที่รูปคลื่นไม่เป็นรูปคลื่นไซน์อาจจะเกิดจากตัวเก็บประจุ C เพราะได้ทำการวัดรูปคลื่นแรงที่ออกจากตัวเก็บประจุ C และได้นำอุปกรณ์วัดคายอดแรงดันสูงกระแสสลับ ไปทำการทดลองเปลี่ยนตัวเก็บประจุเป็นตัวต้านทาน R ซึ่งผลการทดลองอยู่ในภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 13

สรุปและวิจารณ์การดำเนินงาน

13.1 สรุปผลการดำเนินงานทั้งหมดที่ผ่านมา

จากที่สมัยก่อนห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงยังไม่มีความพร้อมที่จะรองรับการลงวิชาปฏิบัติการของนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ามากนัก ซึ่งในอดีตมีเพียงประมาณ 2 ถึง 3 แลป แต่เมื่อโครงการนี้สำเร็จ ทำให้ห้องปฏิบัติการมีความพร้อมมากขึ้นสามารถรองรับการลงวิชาปฏิบัติการทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงได้สูงถึง 11 แลป ดังต่อไปนี้

- 1) เทคนิคการวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม
- 2) การทดสอบอุปกรณ์แรงดันสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์
- 3) การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (BIL)
- 4) การตรวจจับคิสซาร์จบางส่วนและวิเคราะห์คิสซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
- 5) การทดสอบลูกถ้วยฉนวนด้วยแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้หม้อแปลงทดสอบ
- 6) การทดสอบวัดพลังงานสูญเสียไอเอสเทร็ค
- 7) การทดสอบการเกิดเบรคดาวและการนำไฟฟ้าในฉนวนเหลว
- 8) การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงด้วย DC High Voltage Generation Model
- 9) เทคนิคการวัดระบบกราวด์
- 10) การศึกษาผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลท์เทจดีโมเดออร์
- 11) การวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับ

อีกทั้งยังสามารถรองรับการศึกษารวบรวมทางด้านแรงสูง การบริการทางด้านวิชาการให้กับหน่วยงานทั้งของภาครัฐและเอกชนสามารถรองรับการทดสอบลูกถ้วยฉนวน, เคเบิลสเปซเซอร์, หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์ทางด้านแรงสูงอื่นๆ

13.2 วิจารณ์การดำเนินงานทั้งหมดที่ผ่านมา

ถึงแม้ว่าห้องปฏิบัติการจะมีความพร้อมมากขึ้นแต่ก็ยังมีอุปกรณ์บางตัวที่ยังชำรุดอยู่ที่ยังไม่สามารถปรับปรุงซ่อมแซมให้ใช้งานได้ตามปกติเหมือนแต่ก่อน เนื่องจากติดปัญหาที่งบประมาณมีไม่เพียงพอที่จะซื้อวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากอุปกรณ์ทางด้านแรงดันสูงเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาค่อนข้างแพงจึงเกิดปัญหาติดขัด อันเป็นสาเหตุให้การดำเนินงานอาจจะล่าช้าไปบ้าง หรือวัสดุอุปกรณ์บางประเภทก็เป็นวัสดุรุ่นเก่าที่ไม่มีจำหน่ายในท้องตลาดแล้วจึงเป็นปัญหาส่วนหนึ่ง เช่น เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1500 kV ถ้าสามารถซ่อมได้สำเร็จก็จะทำให้สามารถรองรับการทดสอบต่างๆ ได้เพิ่มขึ้นอีก แต่ยังคงติดที่ยังหาชิ้นส่วนอะไหล่ที่จะใช้ซ่อมแซมยังหาไม่ได้จึงเป็นยังเป็นปัญหาที่ไม่สามารถทำให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทำงานได้ตามปกติเหมือนแต่ก่อน และในการทำโครงการก็ยังติดปัญหาเรื่องมีอำนาจความสะดวก เช่น ไม่มีรถเคลื่อนย้ายของหนัก เช่น หม้อแปลง จึงทำให้งานล่าช้า ซึ่งถ้ามีรถยกของหนักเคลื่อน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้ายของหนักก็จะทำให้การทำงานสะดวกเร็วยิ่งขึ้น สุดท้ายก็คือเรื่องแกปทรงกลมตัวใหญ่ยังไม่สามารถย้ายมายังห้องปฏิบัติการแห่งใหม่ได้เนื่องจากขาดอุปกรณ์ในการเคลื่อนย้าย แต่ถึงอย่างไรการดำเนินงานในโครงการนี้ก็ผ่านมาด้วยดีสามารถนำหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมาทำการทดสอบได้ทันเวลา ก็ด้วยความช่วยเหลือจาก บริษัทจตุรไทย ในการช่วยนำรถยกมาทำการย้ายของหนัก เพราะฉะนั้นโครงการนี้จึงสำเร็จลงได้

13.3 ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

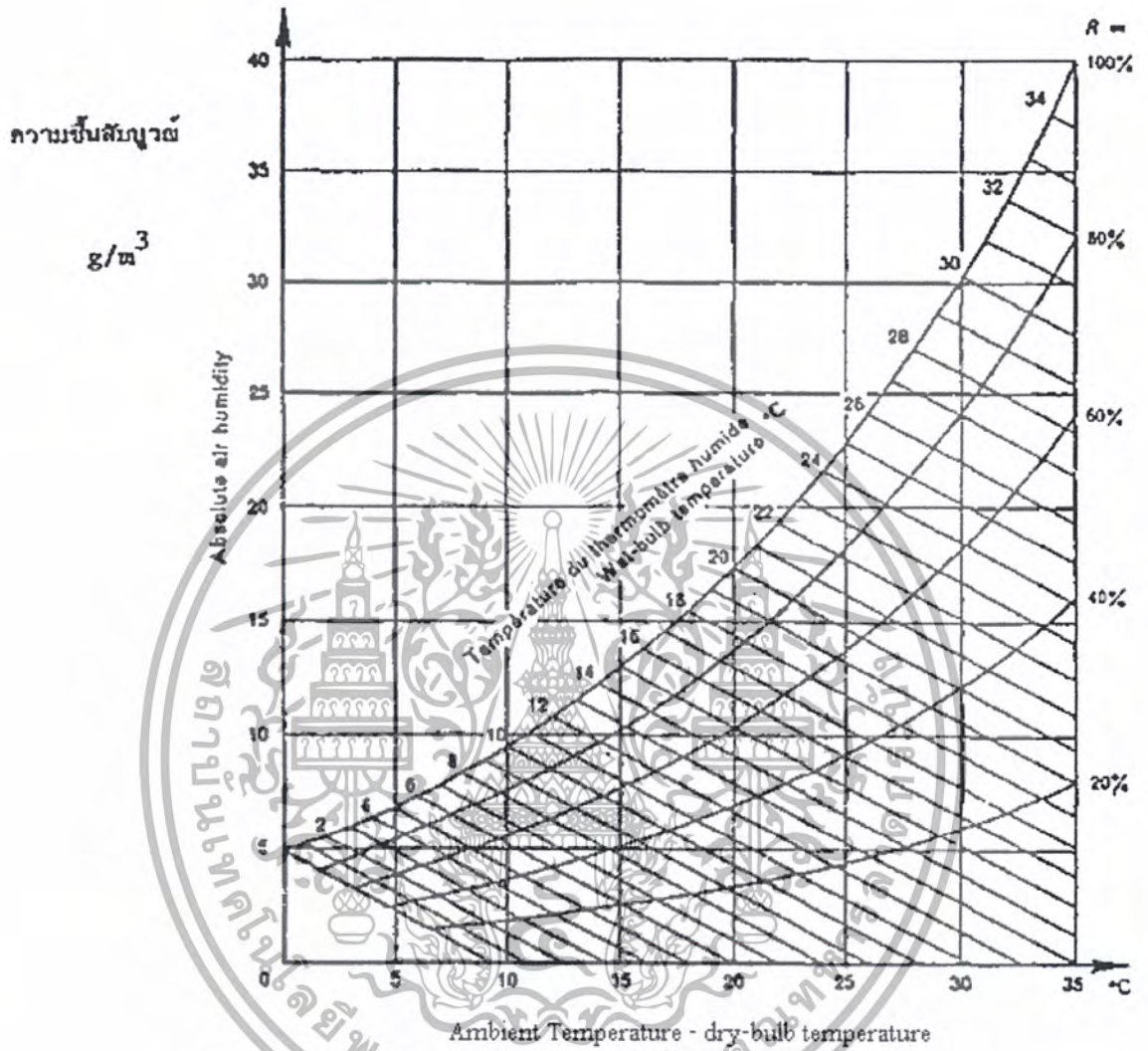
สิ่งที่ได้วิจารณ์ผลการดำเนินงานไว้แล้ว ดังนั้นจึงมีข้อเสนอแนะเพื่อจะได้เป็นแนวทางในการพัฒนาห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงให้ดียิ่งขึ้นต่อไป จึงได้มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

- 1) ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงควรได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ทัดเทียมกับห้องปฏิบัติการของที่อื่นๆ
- 2) ควรมีเจ้าหน้าที่หรือช่างเทคนิคที่ชำนาญทางด้านแรงสูง ประจำห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อคอยดูแลอำนวยความสะดวกแก่นักศึกษาที่มาทำการวิจัยศึกษาละอื่นๆ
- 3) ควรมีการจัดสรรงบประมาณในการบำรุงรักษาห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง
- 4) ควรจัดงบประมาณในการย้ายแกปทรงกลมลูกบนมายังห้องปฏิบัติการให้เรียบร้อยเพื่อจะได้รองรับการทดสอบได้มากขึ้น
- 5) ควรจะมีรถเคลื่อนย้ายและยกของหนักเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงานของนักศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
กราฟการแปลงผัน



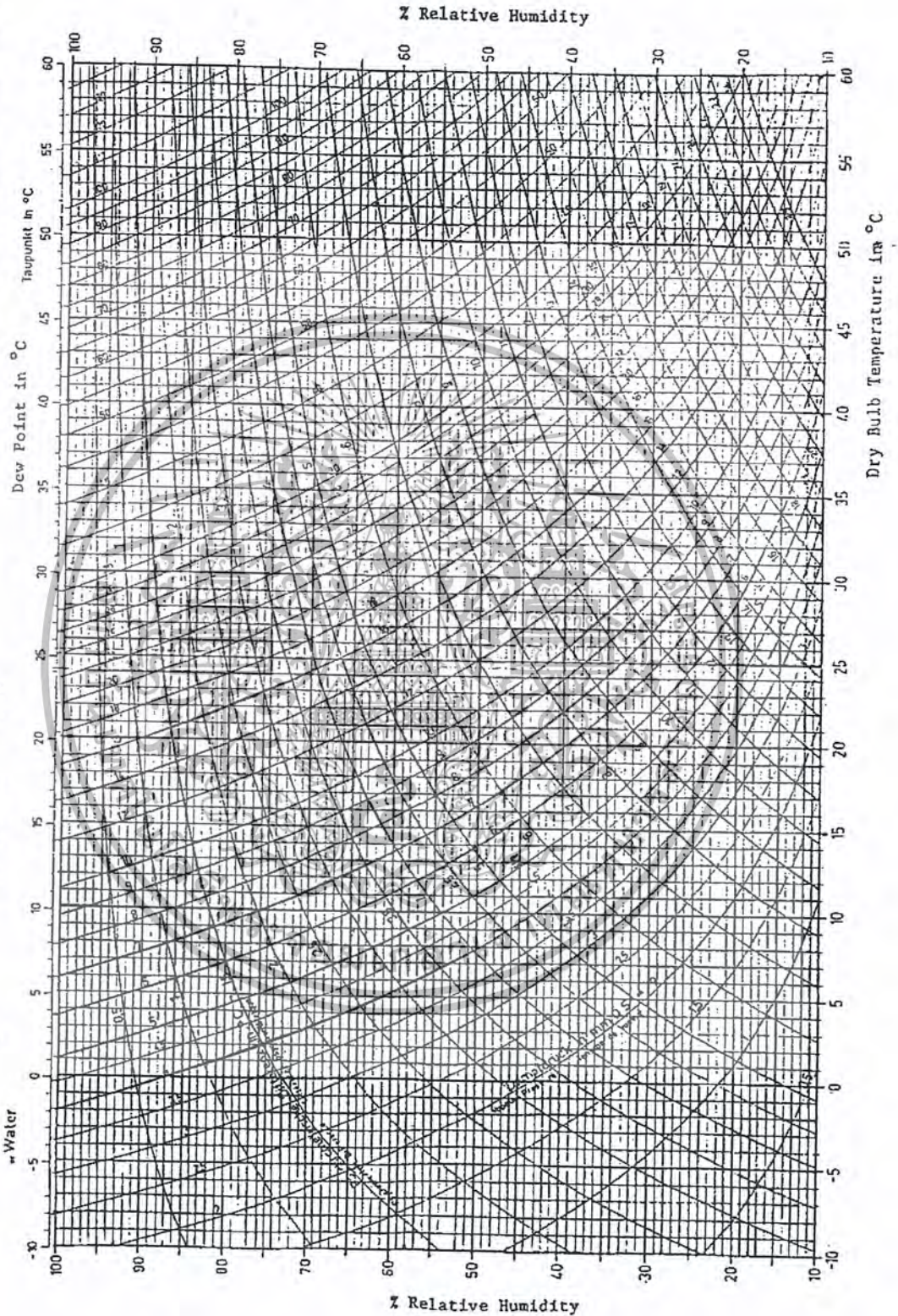
อุณหภูมิโดยรอบ - อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

ความชื้นสัมบูรณ์อากาศในเทอมของอุณหภูมิ เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งและเปียก
ในกราฟได้แสดงความชื้นสัมพัทธ์ไว้ด้วย

**รูปที่ ผก-1 ความชื้นสัมบูรณ์อากาศในเทอมของอุณหภูมิเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งและเปียก
และความชื้นสัมพัทธ์**

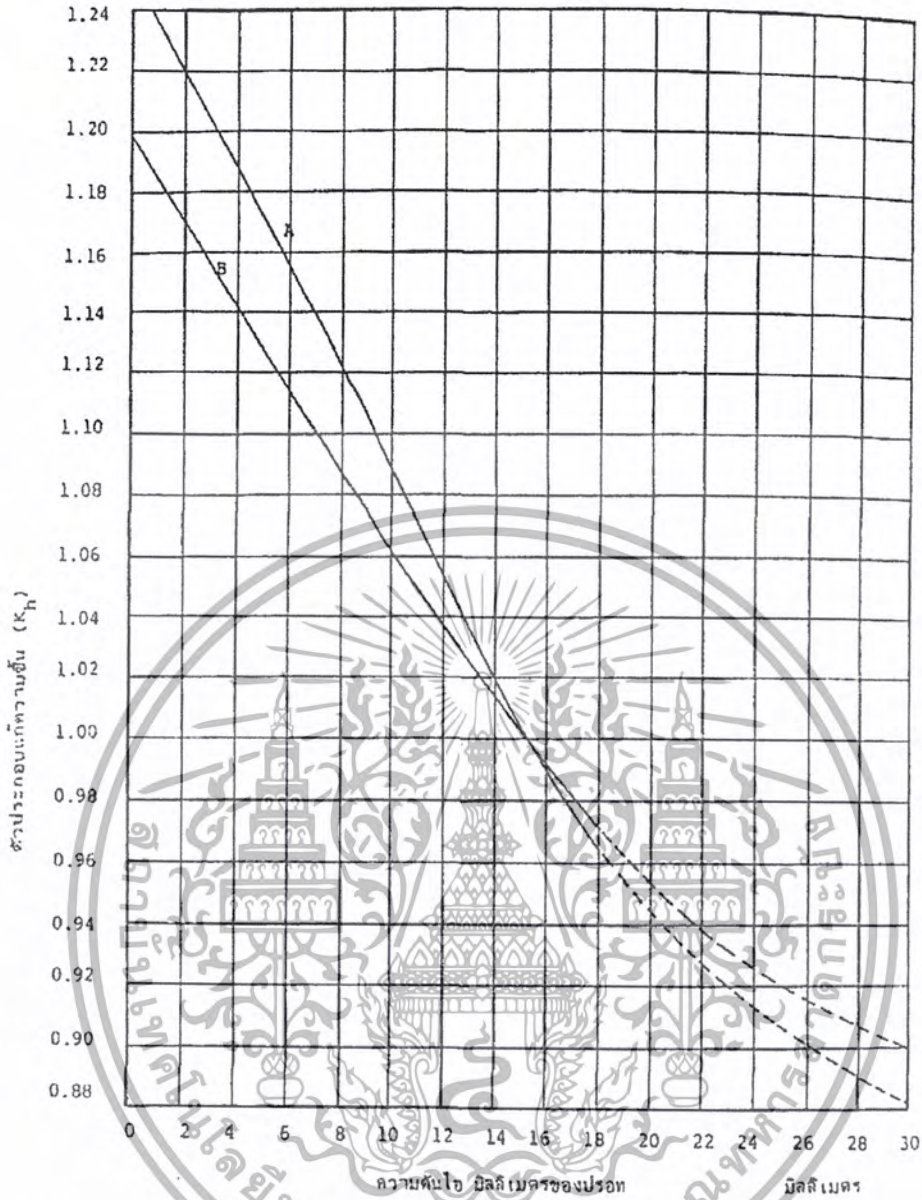
ภาคผนวก ข
กราฟการแปลงผัน

Psychrometertafel Nr. 768b for Psychrometer with glass thermometers, velocity of air ≥ 2 m/sec
nach D. Sonntag



รูปที่ ผข-1 กราฟการแปลงผันเพื่อหาค่าความดันไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผข-2 ตัวประกอบแก้ความชื้นสำหรับแรงดันทดสอบกระแสสลับความถี่ต่ำ
(Low – frequency humidity correction factor)

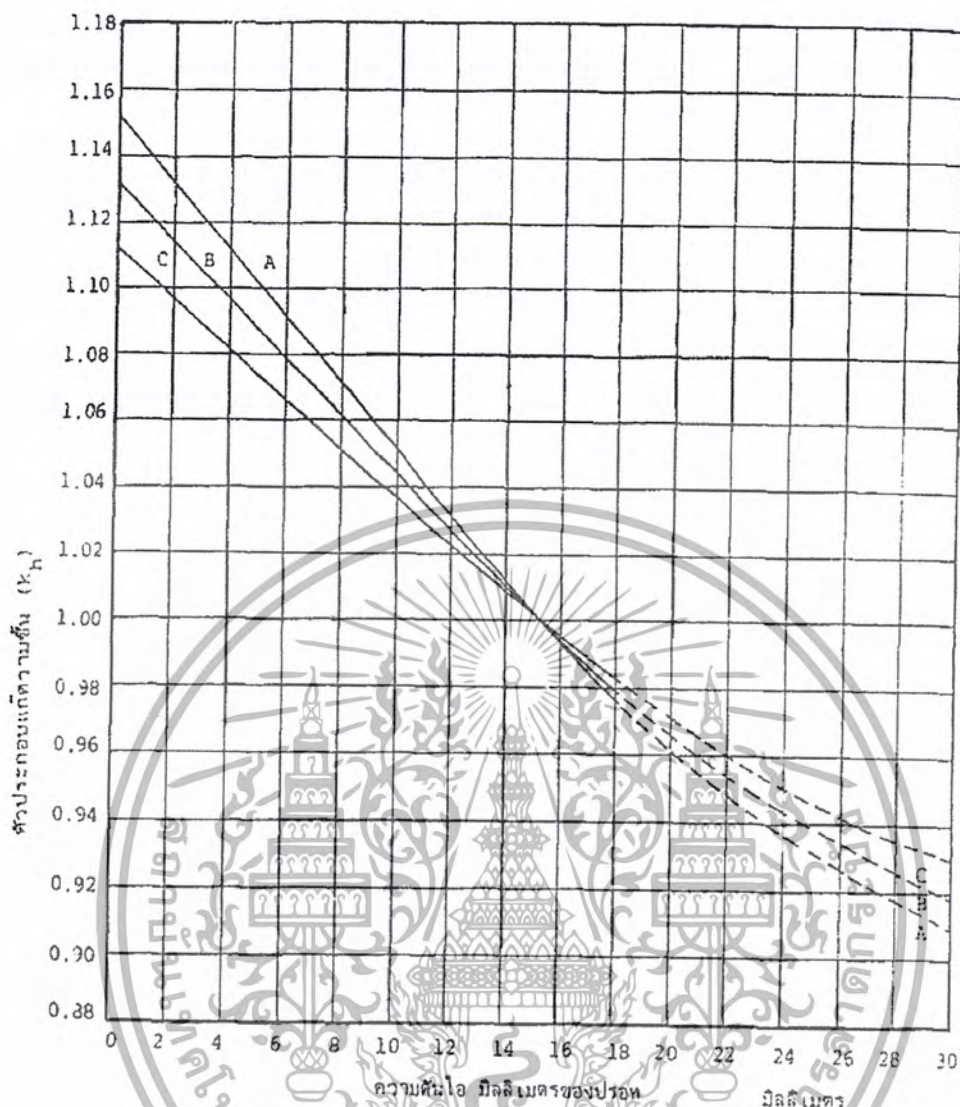
เส้น A สำหรับลูกถ้วยก้านตรง ลูกถ้วยหลัก

เส้น B สำหรับลูกถ้วยแขวน และลูกถ้วยอุปกรณ์สำเร็จรูป (apparatus insulators)

ในกรณีที่ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวต่ำกว่า 100 kV แฟคเตอร์แก้ความชื้นจะเป็น

$$k'_h = 1 + \frac{U}{141} (k_h - 1)$$

เมื่อ U คือ แรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำ kV



รูปที่ ผข-3 ตัวประกอบแก้ความชื้นสำหรับแรงดันทดสอบอิมพัลส์

เส้น A สำหรับลูกถ้วยแขวน รูปคลื่นบวม

เส้น B สำหรับลูกถ้วยก้านตรง รูปคลื่นบวม

ลูกถ้วยแขวน รูปคลื่นลบ

ลูกถ้วยอุปกรณ์สำเร็จรูป รูปคลื่นบวม

เส้น C สำหรับลูกถ้วยก้านตรง รูปคลื่นลบ

ลูกถ้วยอุปกรณ์สำเร็จรูป รูปคลื่นลบ

ในกรณีค่าแรงดันวาวไฟตามผิวต่ำกว่า 141 kV แฟคเตอร์แก้ความชื้นจะเป็น

$$k'_h = 1 + \frac{U}{141}(k_h - 1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางแรงดันเบรกดาวนมาตรฐาน

Sphere Gap spacing (cm)	Sphere diameter (cm)												
	15	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200	
0.05	2.8												
0.10	4.7												
0.15	6.4												
0.20	8.0	8.0											
0.25	9.6	9.6											
0.30	11.2	11.2											
0.40	14.4	14.3	14.2										
0.50	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8							
0.60	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9							
0.70	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0							
0.80	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0							
0.90	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9							
1.0	30.7	32.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7						
1.2	(35.1)	37.6	37.5	37.4	37.4	37.4	37.4						
1.4	(38.5)	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9						
1.5	(40.0)	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5						
1.6		48.1	48.1	48.1	48.1	48.1	48.1						
1.8		53.0	53.5	53.5	53.5	53.5	53.5						
2.0		57.5	58.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0				
2.2		61.5	63.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5				
2.4		65.5	67.5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0				
2.6		(69.0)	72.0	74.5	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0				
2.8		(72.5)	76.0	79.5	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0				
3.0		(75.5)	79.5	84.0	85.0	85.0	85.0	85.5	85.0	85.0			
3.5		(82.5)	(87.5)	95.0	97.0	97.0	97.0	97.0	97.0	97.0			
4.0		(88.5)	(95.0)	105	108	110	112	112	112	112	112		
4.5			(101)	115	119	122	125	125	125	125	125	125	
5.0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	138	
5.5				(131)	138	143	149	151	151	151	151	151	
6.0				(138)	146	152	161	161	161	161	161	161	
6.5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177	177	
7.0				(150)	(161)	169	189	189	190	190	190	190	
7.5				(155)	(168)	177	202	202	203	203	203	203	
8.0					(174)	(185)	206	214	215	215	215	215	
9.0					(185)	(198)	226	239	240	241	241	241	
10					(195)	(209)	244	263	265	266	266	266	266
11						(219)	261	286	290	292	292	292	292
12						(229)	275	309	315	318	318	318	318
13							(285)	331	339	342	342	342	342

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14						(302)	353	363	366	366	366
15						(314)	373	387	390	390	390
16						(326)	392	410	414	414	414
17						(337)	411	432	438	438	438
18						(347)	429	453	462	462	462
19						(357)	445	473	486	486	486
20						(366)	460	492	510	510	510
22							489	530	555	560	560
24							515	565	595	595	610
26							(540)	600	635	655	660
28							(565)	635	675	675	705
30							(585)	655	710	745	750
32							(605)	695	745	790	795
34							(625)	725	780	835	840
36							(640)	750	815	875	885
38							(655)	(775)	845	915	930
40							(670)	(800)	875	955	975
45								(850)	945	1050	1080
50								(895)	1010	1130	1180
55								(935)	(1060)	1210	1260
60								(970)	(1110)	1280	1340
65									(1160)	1340	1410
70									(1200)	1390	1480
75									(1230)	1440	1540
80										(1490)	1600
85										(1540)	1660
90										(1580)	1720
100										(1660)	1840
110										(1730)	(1940)
120										(1800)	(2020)
130											(2100)
140											(2180)
150											(2250)

NOTE 1 Values are not valid for impulse voltages below 10 kV.

NOTE 2 Figures in brackets, which are for spacing of more than 0.5 D, are of larger uncertainty.

ตารางที่ ผค-1 แรงดันคายอด (ค่า $U_{50\%}$ ในการทดสอบ *Impulse*) หน่วยเป็น kV สำหรับแรงดันกระแส
สลับความถี่กำลัง แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตชิงชั่วลบและแรงดันกระแสตรงของทั้งสองขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sphere Gap spacing (cm)	Sphere diameter (cm)											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
0.05												
0.10												
0.20												
0.25												
0.30	11.2	11.2										
0.40	14.4	14.3	14.2									
0.50	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8						
0.60	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9						
0.70	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0						
0.80	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0						
0.90	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9						
1.0	30.7	32.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7					
1.2	(35.1)	37.8	37.5	37.4	37.4	37.4	37.4					
1.4	(38.5)	43.2	43.2	42.9	42.9	42.9	42.9					
1.5	(40.0)	46.2	45.9	45.5	45.5	45.5	45.5					
1.6		49.0	48.6	48.1	48.1	48.1	48.1					
1.8		54.5	54.0	53.5	53.5	53.5	53.5					
2.0		59.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0				
2.2		64.0	64.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5			
2.4		69.0	69.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0			
2.6		(73.0)	73.5	75.5	75.5	75.5	75.0	75.0	75.0			
2.8		(77.0)	78.0	80.5	80.5	80.5	81.0	81.0	81.0			
3.0		(81.0)	82.0	85.5	85.5	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0		
3.5		(90.0)	(91.5)	97.5	97.5	97.5	99.0	99.0	99.0	90.0		
4.0		(97.5)	(101)	109	110	111	112	112	112	112	112	
4.5			(108)	120	122	124	125	125	125	125	125	
5.0			(115)	130	134	136	138	138	138	138	138	138
5.5				(139)	145	147	151	151	151	151	151	151
6.0				(148)	155	158	163	164	164	164	164	164
6.5				(156)	(164)	168	175	177	177	177	177	177
7.0				(163)	(173)	178	187	189	190	190	190	190
7.5				(170)	(181)	187	199	202	203	203	203	203
8.0					(189)	(196)	211	214	215	215	215	215
9.0					(203)	(212)	233	239	240	241	241	241
10					(215)	(226)	254	263	265	266	266	266
11						(238)	273	287	290	292	292	292
12						(249)	291	311	315	318	318	318
13							(308)	334	339	342	342	342
14							(323)	357	363	366	366	366
15							(337)	380	387	390	390	390
16							(350)	402	411	414	414	414
17							(362)	422	435	438	438	438
18							(374)	442	458	462	462	462
19							(385)	461	482	486	486	486

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้อนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20					(395)	480	505	510	510	510
22						510	545	555	560	560
24						540	585	600	610	610
26						570	620	645	655	660
28						(595)	660	685	700	705
30						(620)	695	725	745	750
32						(640)	725	760	790	795
34						(660)	750	795	835	840
36						(680)	785	830	875	885
38						(700)	(810)	865	915	935
40						(715)	(835)	900	965	980
45							(890)	980	1050	1090
50							(940)	1040	1150	1190
55							(985)	(1100)	1240	1290
60							(1020)	(1150)	1310	1380
65							0)	(1200)	1380	1470
70								(1240)	1430	1550
75								(1280)	1480	1620
80									(1530)	1690
85									(1580)	1760
90									(1630)	1820
100									(1720)	1930
110									(1790)	(2030)
120									(1860)	(2120)
130										(2200)
140										(2280)
150										(2350)

ตารางที่ ผค-2 แรงดันค้ายอด (ค่า $U_{50\%}$ ในการทดสอบอิมพัลส์) หน่วยเป็น kV สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตชิงซั้วบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการทดสอบ

กรณีการทดสอบเบรกความถี่ของช่องว่างทรงกลม เป็นการทดสอบที่จัดอยู่ใน Class: Successive Discharge test ซึ่งเป็นการทดสอบที่ป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบจนเกิดเบรกความถี่ หรือป้อนแรงดันถึงระดับใดระดับหนึ่ง แล้วรอนจนกระทั่งสังเกตเห็นการเกิดเบรกความถี่ในการทดสอบ n ครั้ง จะได้ค่าแรงดันเบรกความถี่ n ค่า คือ U_i สามารถที่จะหาค่าตัวแปร U_{50} และ z ได้โดย

$$U_{50}^* = \Sigma U_i / n$$

$$z^* = \sqrt{\frac{\Sigma (U_i - U_{50}^*)^2}{n-1}}$$

ค่าประมาณที่ดีที่สุดสำหรับ U_{50} และ z คือค่า U_{50}^* และ z^* ที่เกิดค่า L สูงสุด

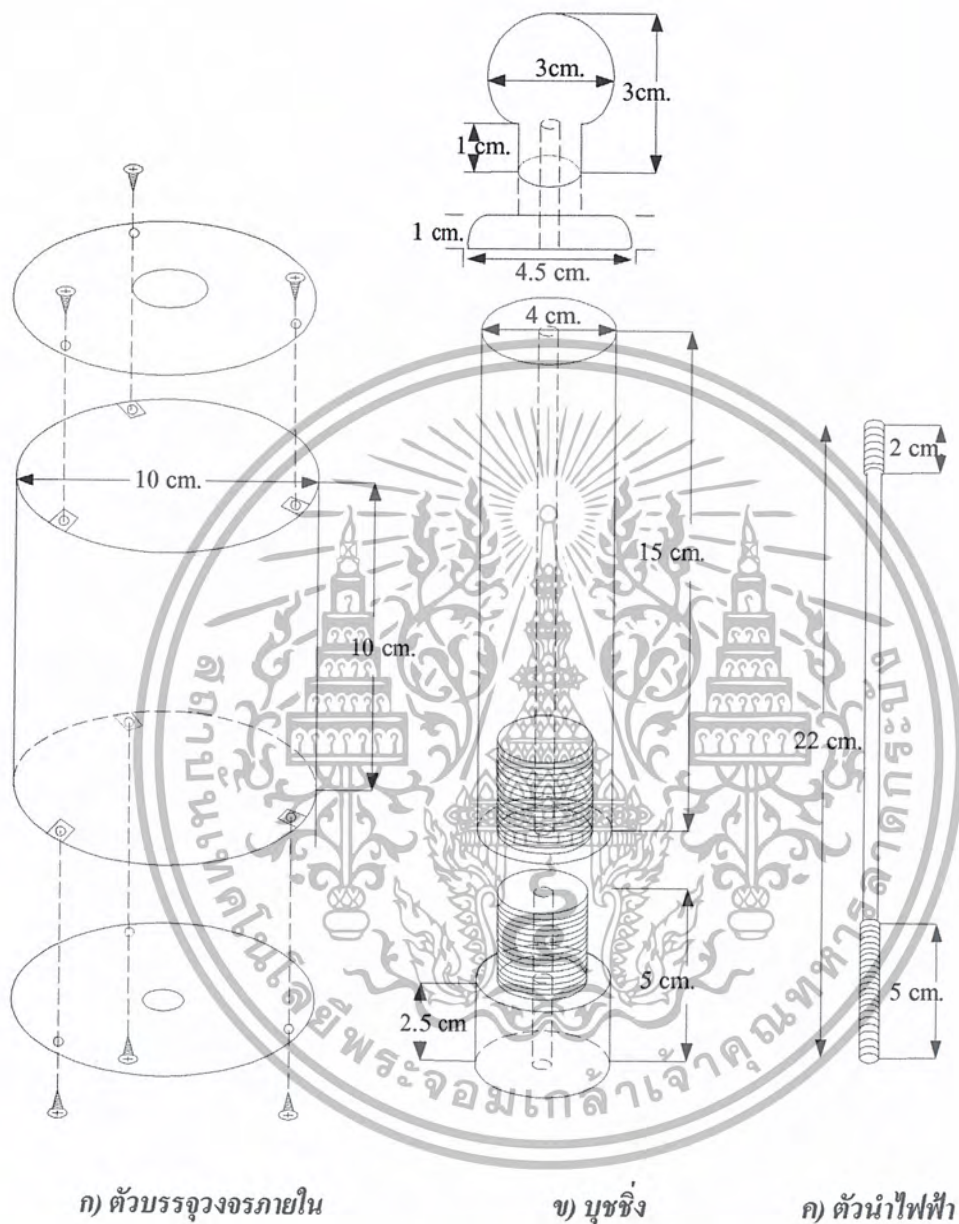
เมื่อ

$$L = f(U_1; U_{50}, z)^{m_1} \cdot f(U_2; U_{50}, z)^{m_2} \dots f(U_m; U_{50}, z)^{m_m}$$

$$f = \frac{dp}{dU}$$

โดยที่ ระดับแรงดัน U_i จะเกิดขึ้น m_i ครั้ง ; $m_i \geq 1$

ภาคผนวก จ
การออกแบบความต้านทานชั้นที่



รูปที่ ผจ-1 โครงสร้างภายนอก

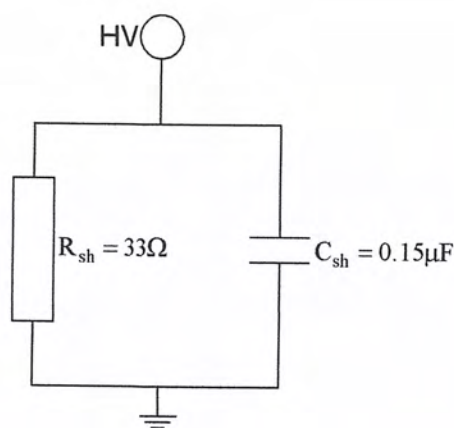
โครงสร้างภายนอกประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ

1) ตัวบรรจุวงจรภายใน มีลักษณะดังรูป ก) ซึ่งทำมาจากท่อทองเหลืองมีลักษณะเป็นทรงกระบอก

2) บุชซึ่ง มีลักษณะดังรูป ข) โดยที่หัวบุชซึ่งทำมาจากสแตนเลสกลึงขึ้นรูป ส่วนฉนวนทำมาจากซูเปอร์ดีนกลึงขึ้นรูป

3) ตัวนำ มีลักษณะดังรูป ค) ทำจากสแตนเลสกลึงขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



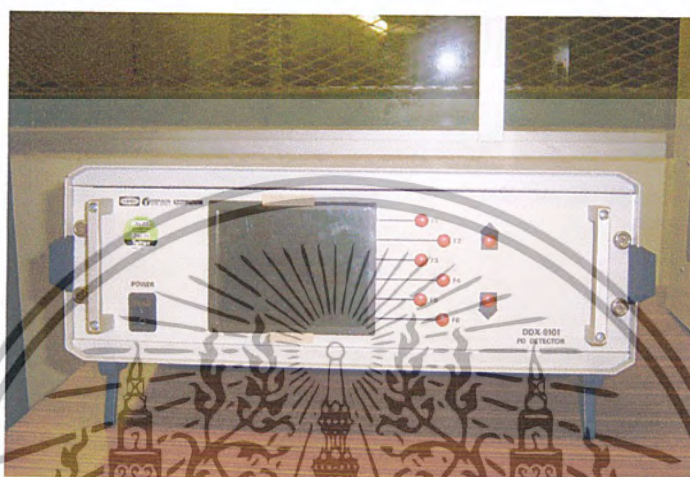
รูปที่ ผจ-2 โครงสร้างภายใน

ในส่วน โครงสร้างภายในจะประกอบไปด้วยความต้านทานขนาด 33Ω และ ตัวเก็บประจุจะมีขนาดเท่ากับ $0.15\mu F$ ในส่วนการออกแบบโครงสร้างภายในจะไม่มีสูตรตายตัวในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้อาจจะเปลี่ยนแปลงจากนี้ก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้จัดทำ และขึ้นอยู่กับขนาดอิมพีแดนซ์หือแปลง ซึ่งในส่วนการออกแบบในโครงการนี้ผู้จัดทำได้เปลี่ยนค่าความต้านทานไปเรื่อยๆ โดยให้ค่าตัวเก็บประจุคงที่ ค่าความต้านทานจะเริ่มจาก 1Ω และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่การเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้ก็มีผลกระทบในเรื่องต่างๆดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ดังนั้นผู้ที่ จะทำการออกแบบก็ต้องตัดสินใจในเอาเองว่าจะออกแบบอย่างไร

ภาคผนวก จ

วิธีการจัดเตรียมรายงานผลการทดสอบ PD และวิธีการวัด PD

- 1) เปิดเครื่อง PD DETECTOR DDX – 9101 แสดงในรูปที่ ผจ-1 และเปิด COMPUTER แสดงในรูปที่ ผจ-2



รูปที่ ผจ-1 เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101



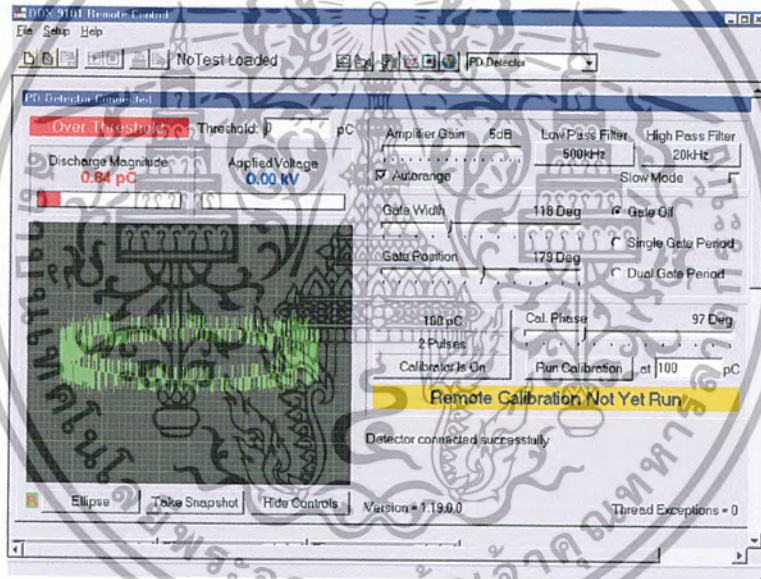
รูปที่ ผจ-2 COMPUTER ที่ใช้แสดงผล

- 2) ขั้นตอนต่อไปหลังจากเปิดเครื่องทั้ง 2 โดยที่เครื่อง PD DETECTOR DDX – 9101 แสดงในรูปที่ ผจ-3 และหน้าจอคอมพิวเตอร์ COMPUTER แสดงในรูปที่ ผจ-4



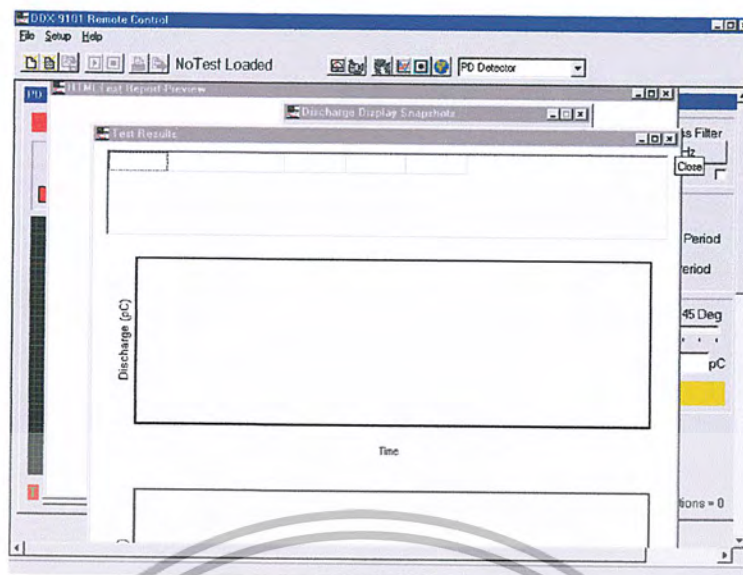
รูปที่ ผจ-5 โปรแกรม REMOTE 9101

หลังจากเข้าไปที่โปรแกรม REMOTE 9101 หน้าจอCOMPUTER จะปรากฏดังรูป ที่ ผจ-6



รูปที่ ผจ-6 หน้าจอCOMPUTERโปรแกรม REMOTE 9101

หมายเหตุ บางครั้งเมื่อเปิดโปรแกรม REMOTE 9101 แล้วอาจจะเจอหน้าจอCOMPUTER ดังแสดงรูปที่ ผจ-7 และรูปที่ ผจ-8



รูปที่ ผฉ-7 หน้าจอกรณีที่มีข้อมูลยังค้างอยู่



รูปที่ ผฉ-8 หน้าจอกรณีที่เกิดจากการเปิดโปรแกรมCOMPUTERก่อนเปิดเครื่องตรวจจับ PD

ในกรณีรูปที่ ผฉ-7 เป็นได้ 2 กรณี คือ 1 มีข้อมูลยังค้างอยู่

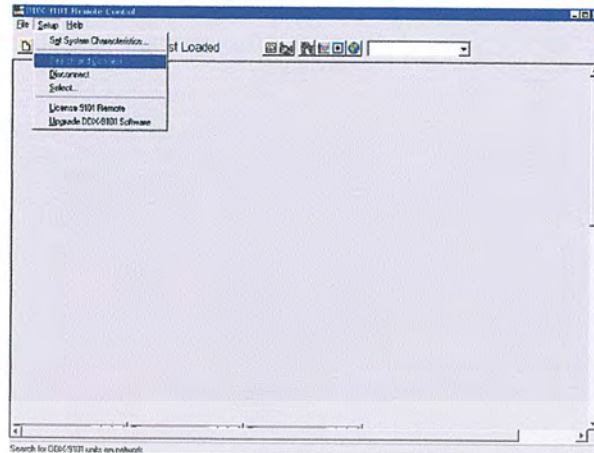
2 มีการออกจากโปรแกรมโดยกะทันหัน

วิธีการการแก้ไขกรณีที่เกิดในกรณีรูปที่ ผฉ-7 คือ

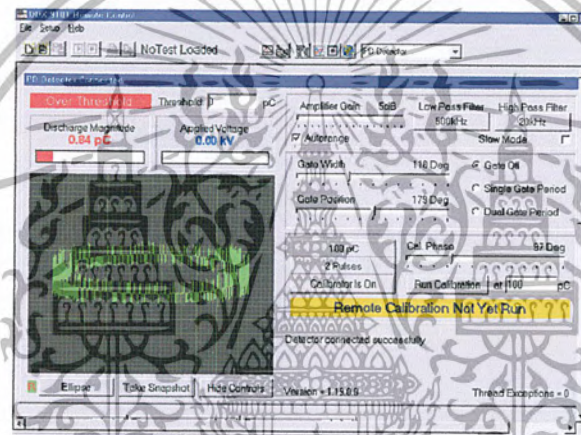
3.1 นำเมาส์ไปคลิกที่เครื่องหมาย ของแต่ละหน้าที่เป็นสีขาว ออกที่ละหน้างานเข้าสู่หน้าจอปกติ กรณีที่หน้าจอ COMPUTER แสดงดังรูปที่ ผฉ-8

3.2 เกิดจากการเปิดโปรแกรม REMOTE 9101 ก่อนที่จะเปิดเครื่อง PD DETECTOR ให้ นำเมาส์ไปคลิกที่ Set up เลือกไปที่ Search and Connect ดังแสดงในรูปที่ ผฉ-9 หลังจากแก้ตามวิธีที่ได้กล่าวไว้

เอกสารนี้ข้างต้นแล้วจะได้หน้าจอกลับมาเหมือนเดิมพร้อมที่จะดำเนินการต่อ แสดงในรูปที่ ผฉ-10
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



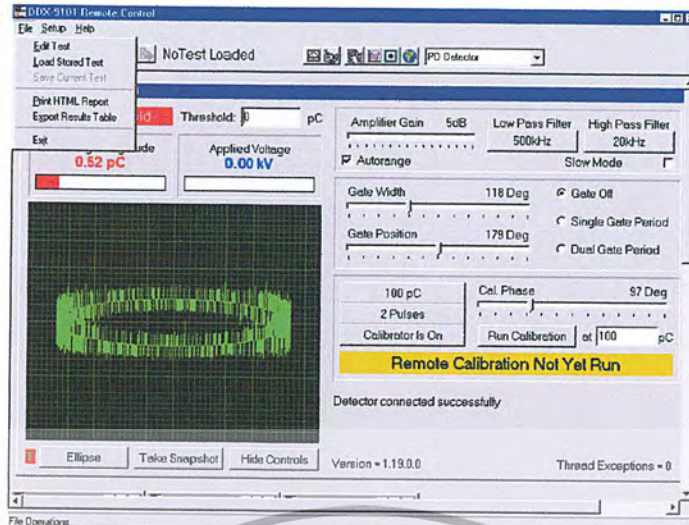
รูปที่ ผล-9 คลิกที่ Search and Connect



รูปที่ ผล-10 หน้าจอโปรแกรมปกติ

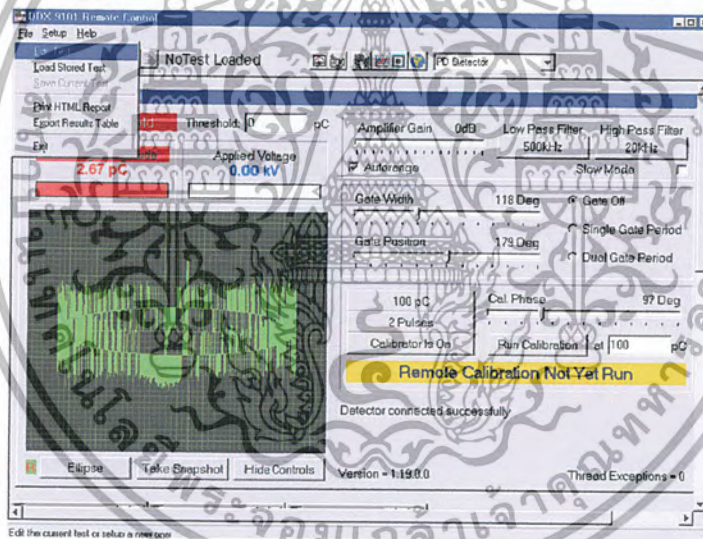
(โปรแกรม DDX – 9101 REMOTE CONTROL เป็น โปรแกรมที่สามารถนำข้อมูลทั้งหมดรวมทั้งรูป PD ที่เกิด สามารถนำออกมาเป็นรายงานมาดูในเครื่องหรือจะพิมพ์ออกมานำเสนอต่อไปได้ โดยจะได้กล่าวในขั้นตอนต่อไป)

4) ก่อนจะทำกรทดลองควรเลือกการตั้งค่ารายละเอียดข้อมูลต่างๆเพื่อจะแสดงในรายงานผลการทดสอบ PD โดยการเลือกที่ File แสดงในรูปที่ ผล-11



รูปที่ ผจ-11 การตั้งค่ารายละเอียดข้อมูลของรายงานผลการวัด PD

5) เลือกที่ Edit แสดงไว้ในรูปที่ ผจ-12 เป็นการเลือกเพื่อตั้งค่าเพื่อระบุรายละเอียดของรายงาน



รูปที่ ผจ-12 การเลือกที่ Edit

6) จอจะแสดงหน้าต่าง Set Test Profile และจะมีไอคอนอยู่ด้านล่างของ Set Test Profile คือ

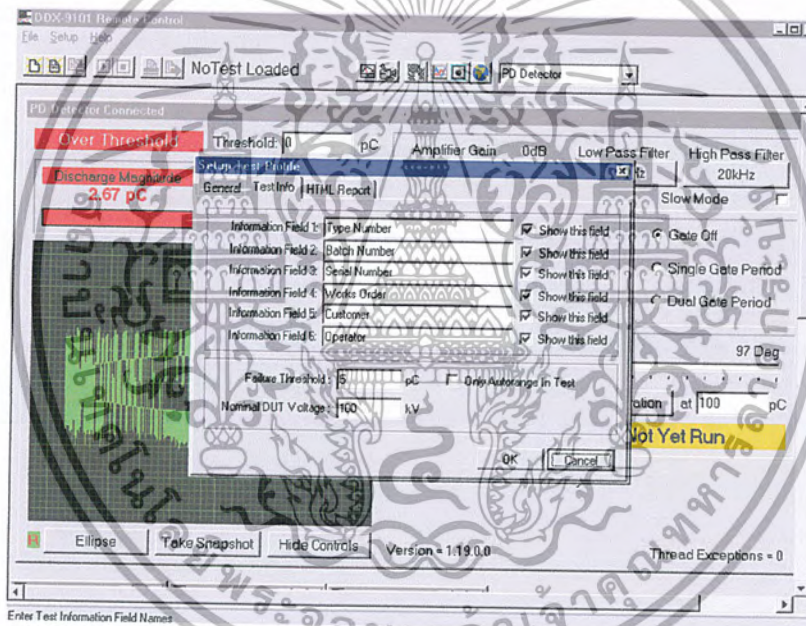
- 6.1) General
- 6.2) Test Info
- 6.3) HTML Report

ตามลำดับแสดงในรูปที่ ผจ-12, รูปที่ ผจ-14 และ รูปที่ ผจ-15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

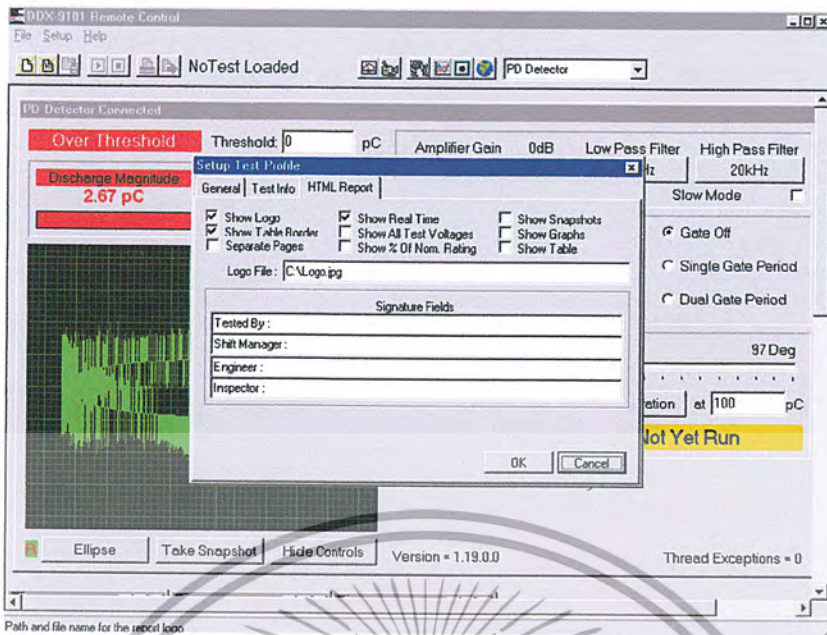


รูปที่ ผฉ-13 General



รูปที่ ผฉ-14 Test Info

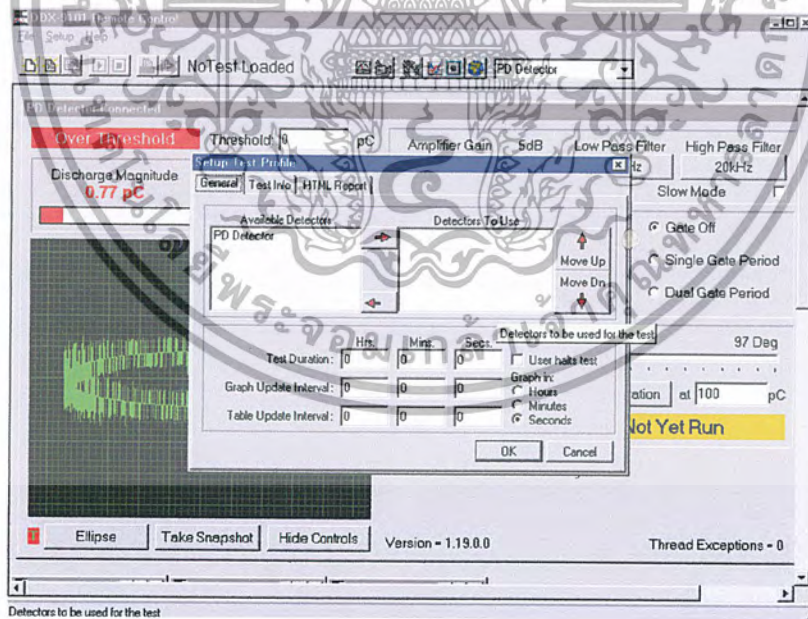
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผจ-15 HTML Report

(ทั้ง 3 ไอคอนเป็นการตั้งค่ารายละเอียดที่จะแสดงในรายงาน)

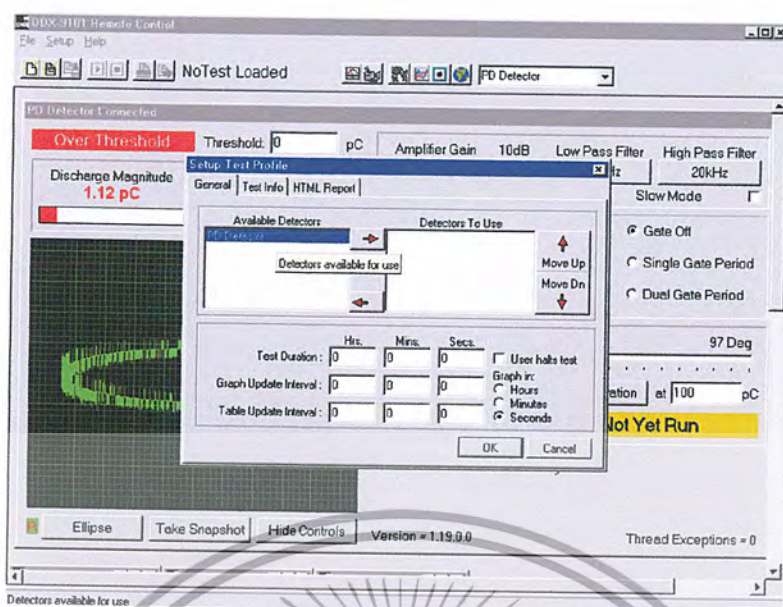
7) ขั้นตอนต่อไปคลิกที่ **General** จะได้นหน้าต่าง แสดงในรูปที่ ผจ-16



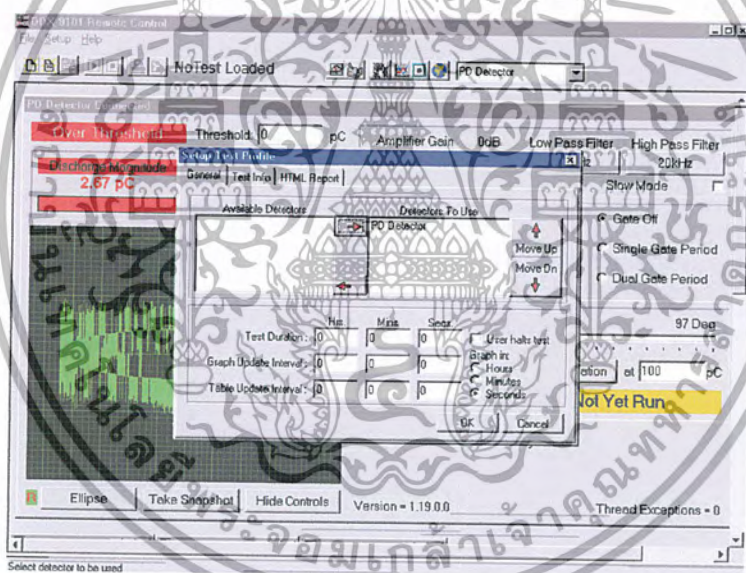
รูปที่ ผจ-16 การคลิกที่ **General**

ต่อมาแนะนำสื่ไปคลิกที่คำว่า PD DETECTOR 1 ครั้งจะมีแถบสีน้ำเงิน หลังจากนั้นเอาเมาส์ไปคลิกที่ลูกศรที่อยู่ขวามือจะมีหน้าต่างแสดงรูปที่ ผจ-17 และ รูปที่ ผจ-18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผล-17 การคลิกที่คำว่า PD DETECTOR

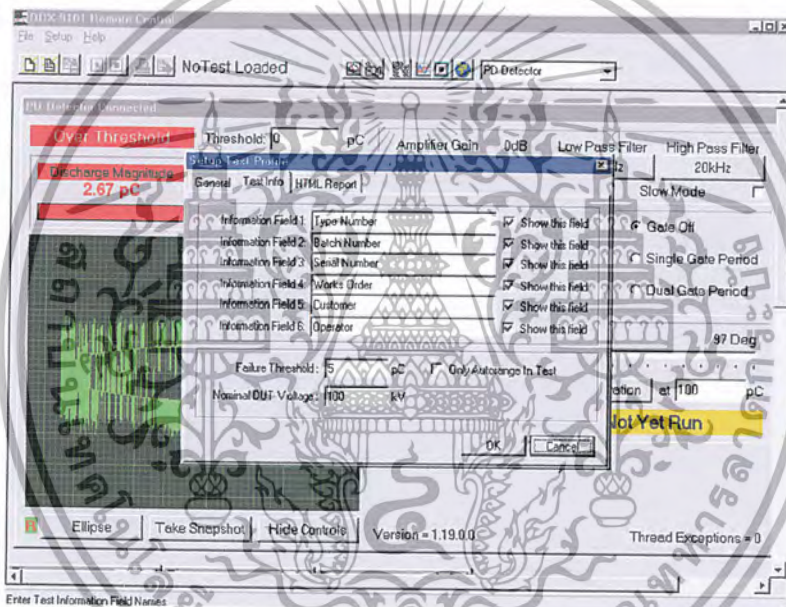


รูปที่ ผล-18 หลังจากคลิกคำว่า PD DETECTOR แล้ว

ส่วนในช่องที่มีเลข 0 ตามรูปที่ ผล-17 และรูปที่ ผล-18 เป็นช่องที่จะใช้ในการตั้งเวลาเพื่อที่จะให้มีการ Up Date ผลการทดสอบในรูปแบบของ Graph หรือข้อมูลในตารางทุกๆ ช่วงที่พิจารณา แต่อาจจะกรณีไม่ตั้งค่าไว้ ถ้าหากต้องการข้อมูลตลอดเวลาที่ทำการทดสอบเพื่อที่จะได้ข้อมูลค่า PD ทุกๆ ช่วงเวลาบางครั้งถ้าหากตั้งไว้ที่ 1 นาที แต่พอในช่วงเวลา 30 วินาที PD อาจจะเกิดก็ได้จึงทำให้ในรายงานของเราไม่มีข้อมูลในช่วง 30 วินาทีนั้นแต่จะมีข้อมูลในช่วง 1 นาทีที่เราตั้งไว้แทน เมื่อตั้งค่าที่ไอคอนของ General เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ไปตั้งค่าที่ไอคอนต่อไปตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) ขั้นตอนต่อไป หลังจากทำข้อ 7) เสร็จแล้ว นำเมาส์มาคลิกที่ Test Info ในส่วนของ Test Info จะปรากฏช่องที่เขียนว่า In Formation Field 1 - In Formation Field 6 คือช่องที่เราจะระบุข้อมูลต่างๆ ของการทดสอบตามรายละเอียดที่แนะนำไว้ในช่องว่างดังกล่าว แต่ถ้าผู้ทดลองไม่ต้องการแสดงค่าที่ปรากฏในช่องในรายงานนี้ก็ให้นำเมาส์ไปคลิกในช่องข้างหลังของแต่ละแถวนั้น ส่วนในช่อง Failure Threshold คือช่องที่เรากำหนดค่า PD ของอุปกรณ์ทดสอบที่ยอมรับได้ว่าจะไม่ให้มีค่าเกินเท่าไร ถ้าหากว่าในการทดสอบค่าของ PD ของอุปกรณ์ทดสอบมีค่ามากกว่าค่าที่ตั้งไว้ตัวเลขที่แสดงค่า PD จะเป็นสีแดง ส่วนช่อง Nominal DUT Voltage ก็เช่นกันเพียงแต่เปลี่ยนจากค่า PD เป็นค่าแรงดันที่ต้องการให้เป็นแรงดันที่จะพิจารณาผลการทดสอบหรือเป็นแรงดันสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบในกรณีที่ผู้ทำการทดลองไม่ต้องการที่จะระบุค่าของทั้งสองช่องนั้นแค่จะเปลี่ยนให้เป็นการปรับแรงดันและค่า PD แบบ AUTO ก็ได้ให้นำเมาส์ไปคลิกที่ช่อง Only Auto range In Test ในหัวข้อที่ 8 แสดงในที่รูปที่ ผจ-19

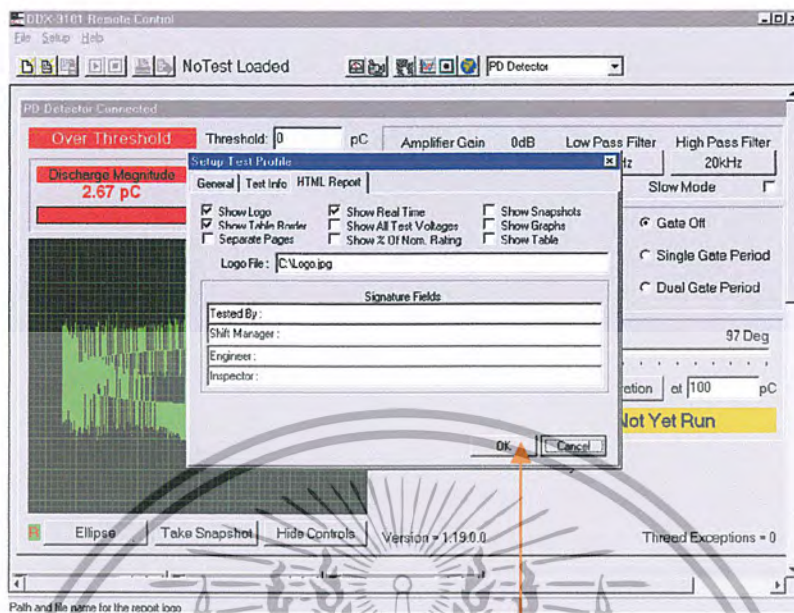


รูปที่ ผจ-19 การคลิกที่ Test Info

9) ขั้นตอนต่อไป หลังจากทำข้อ 7 และ ข้อ 8 แล้วให้นำเมาส์มาคลิกที่ HTML ส่วนใน ไอคอน HTML นั้น จะเป็น ไอคอนที่บอกว่าจะให้ในรายงานนั้นแสดงข้อมูลอะไรบ้าง โดยการนำเมาส์คลิกในช่องที่มีเครื่องหมายถูกที่อยู่หน้าข้อมูลที่เรต้องการให้แสดง แต่ถ้าเราจะไม่ต้องการให้นำเมาส์มาคลิกให้เครื่องหมายถูกหายไป ส่วนในช่องคำว่า Logo File:C:\ Logo. jpg นั้น ในช่องสี่เหลี่ยมจะเป็นการใช้ FILE รูปหรือ LOGO ที่เราได้รูปต่างๆเอามาเก็บไว้ เช่นรูปตราสถาบันตราต่างๆ หรือ รูปอะไรก็ได้ที่เก็บไว้ในเครื่อง COMPUTER มาใส่ โดยการนำเอาชื่อ File มาใช้ ตัวอย่างเช่น File:C:\ Logo. jpg คือ เราได้นำรูปตราสถาบันเก็บไว้ในชื่อ Logo. jpg เก็บไว้ในไดร์ C เป็นต้น (แล้วแต่ผู้ทดลองจะนำรูปอะไรมาใส่หรือไม่ใส่ก็ได้) แต่ Logo ที่นำมาใส่จะยังไม่ปรากฏให้เห็นในขณะที่ทำการปฏิบัติ โดยจะปรากฏให้เห็นในรายงาน

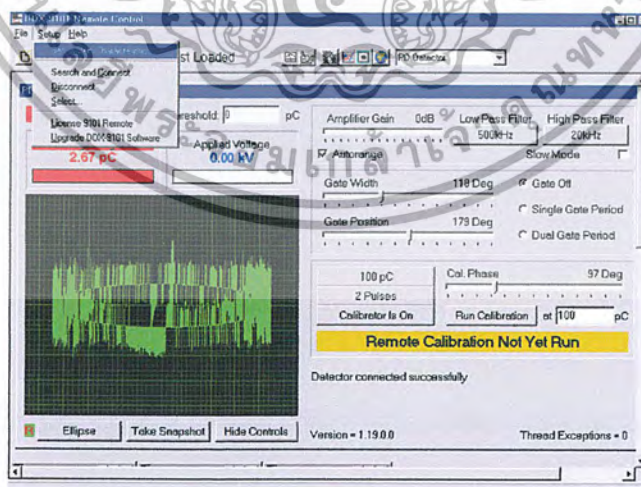
หรือ เมื่อพิมพ์ออกมาเท่านั้น ส่วนของ Signature Fields คือช่องที่จะให้ผู้เกี่ยวข้อง ลงชื่อรับทราบเท่านั้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำมาในขั้นตอนข้อ 6-9 แล้วให้เลือก OK เพื่อทำให้การตั้งค่าของรายงานผลการทดสอบ PD ที่ จะนำเสนอเสร็จสิ้น แสดงในรูปที่ ผล-20



รูปที่ ผล-20 หลังจากการตั้งค่ารายงานเสร็จ

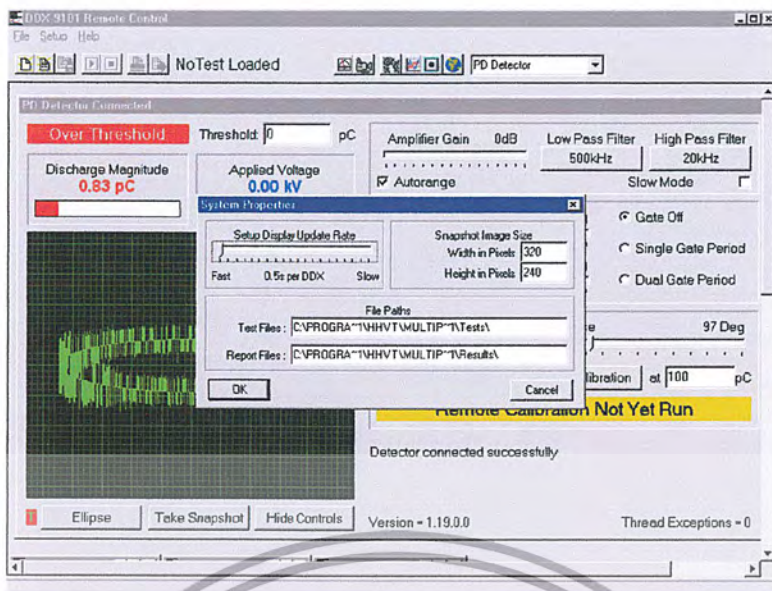
10) ขั้นตอนต่อไป หลังจากตั้งค่าการทำรายงานเสร็จแล้วจะต้องเลือกเพิ่มข้อมูลหรือ Folder จะนำ รายงานผลการทดสอบ PD ไปเก็บ ให้เลือกที่ Set up บนแถบ Menu ด้านบนที่อยู่ติดกับ File หลังจากนั้นนำเมาส์มาคลิกที่ Set System Characteristics แสดง ในรูปที่ ผล-21



รูปที่ ผล-21 แถบบาร์ Set System Characteristics

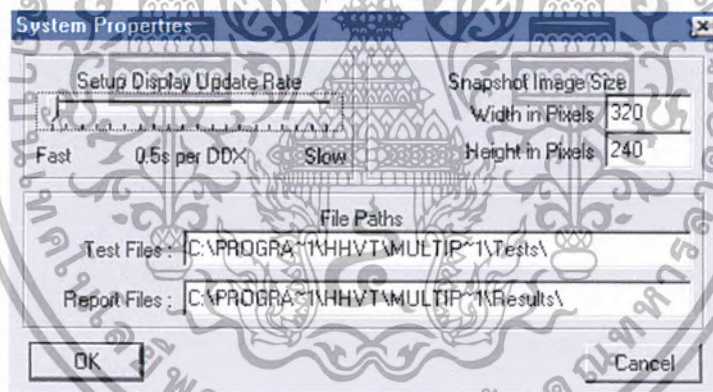
จะปรากฏหน้าต่าง System Properties แสดงในรูปที่ ผล-22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



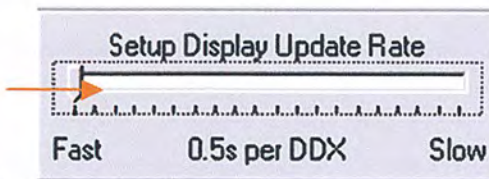
รูปที่ ผฉ-22 การส่งรายงานไป Save

จะสังเกตเห็น Block อยู่ 3 Block แสดงในรูปที่ ผฉ-23 คือ 1. Setup Display Update Rate 2. Snapshot Image Size 3. File Paths ทั้ง 3 Block มีวิธีการตั้งค่าดังต่อไปนี้คือ



รูปที่ ผฉ-23 การตั้งค่า

10.1 Setup Display Update Rate คือเป็นตัวปรับความเร็วของการนำผลลัพธ์ที่วัดได้มาแสดงผลว่าจะให้เร็วหรือช้าวิธีการตั้งค่าคือ



ให้นำเมาส์ไปคลิกในช่อง

และเลื่อนแถบบาร์ไป

ตามที่เรต้องการหรืออาจจะไม่ปรับก็ได้แล้วแต่ผู้ทดลอง

10.2 Snapshot Image Size คือ การตั้งขนาดของรูปของ PD และ Graph PD ที่จะบันทึกรวม ทั้ง Voltage เพื่อที่จะให้รูป PD มีขนาดตามที่ต้องการ วิธีการปรับ Snapshot Image Size มีดังนี้



ให้นำเมาส์ไปคลิกที่ช่อง

ตามที่ลูกศรชี้แล้ว

พิมพ์ไปในช่องตามขนาดที่ต้องการหน่วยเป็น Pixels

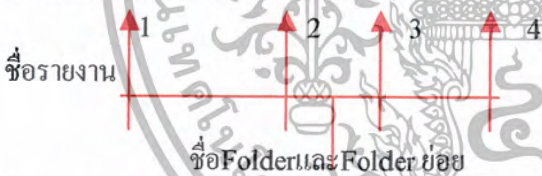
10.3 File Paths คือ ส่วนที่อยู่ของรายงานที่นำไปเก็บไว้

วิธีการปรับค่า File Paths คือ นำเมาส์ไปคลิกที่ช่อง

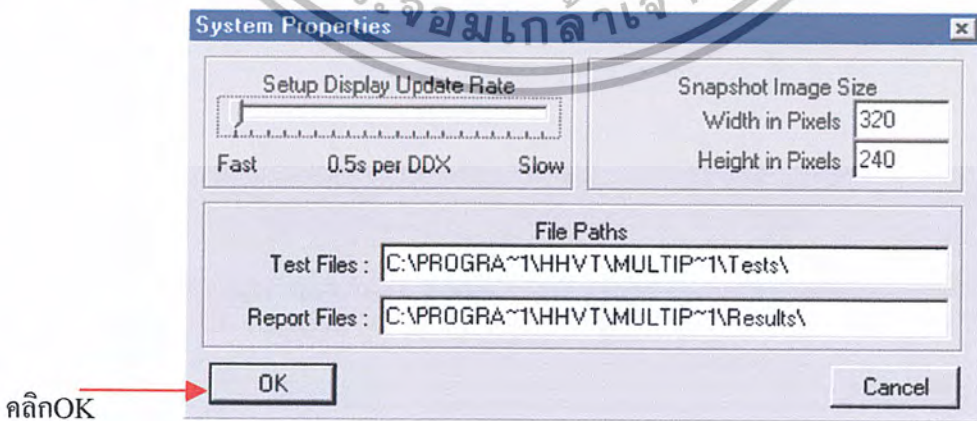


แล้วพิมพ์ส่วนที่อยู่ของรายงานที่ต้องการลงไปช่องว่าง โดยที่เราจะต้องสร้าง FOLDER ไว้รองรับรายงานผลการทดสอบ PD อยู่ก่อนแล้ว

ตัวอย่าง C: PROGRA-1\HHVT\MULTIP-1\Tests\



หลังตั้งชื่อเสร็จแล้วก็กด OK แสดงในรูปที่ ผล-24

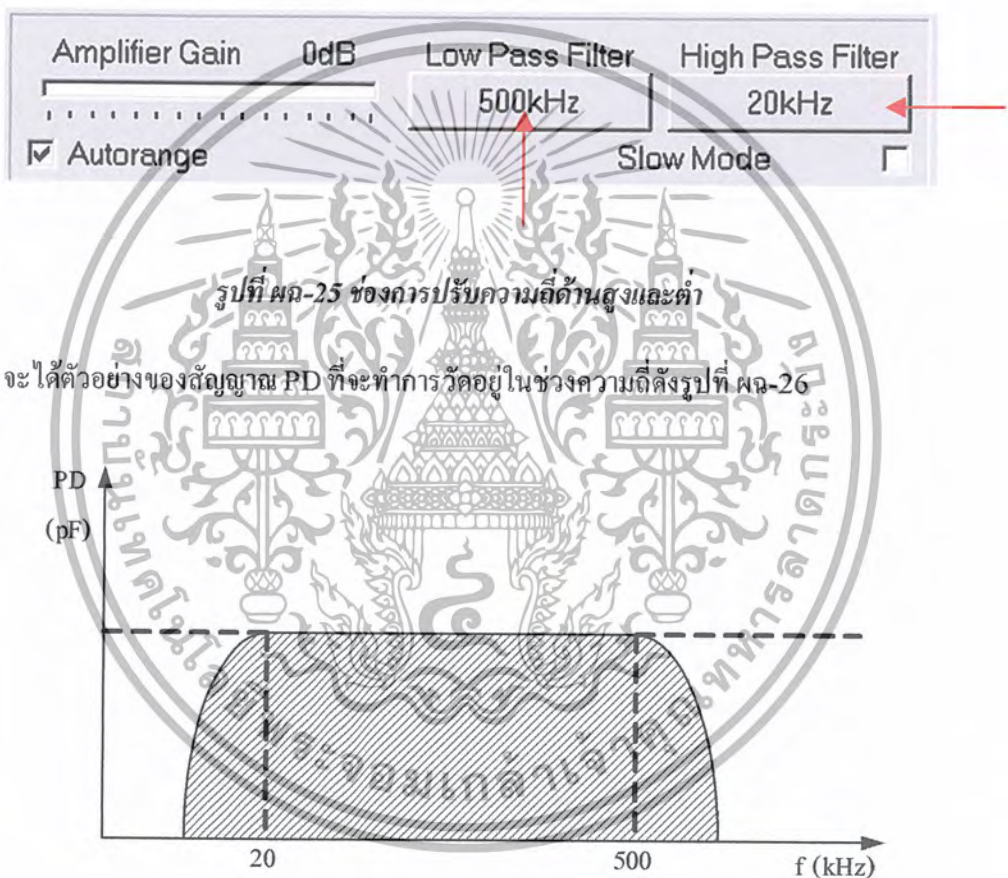


รูปที่ ผล-24 การตั้งชื่อเสร็จแล้วคลิก OK

หมายเหตุ ก่อนการตั้งค่าจัดเตรียมรายงานรายงานผลการทดสอบ PD ผู้ทดลองอาจจะต้องวงจรตามข้อ 1 และตรวจสอบแล้วตรวจสอบอย่างมั่นใจแล้ว ซึ่งจะทำได้สามารถ ปรับเทียบชุดวัด PD ได้ต่อไป

11) การปรับเทียบเครื่อง PD Detector

11.1 ตั้งแถบ Bandwidth ตามที่ต้องการซึ่งเป็นการกำหนดช่วงความถี่ที่จะสัญญาณที่ตรวจจับและนำมาวิเคราะห์ต่อไป ตัวอย่างเช่น ถ้าตั้งความถี่ไว้ที่ 500 kHz ที่ Low Pass Filter หมายถึง สัญญาณความถี่ต่ำกว่า 500 kHz จะผ่านเข้ามาทำการวิเคราะห์ได้ และ ถ้าตั้งความถี่ด้าน High Pass Filter ที่ 20 kHz หมายถึง ความถี่ของสัญญาณที่สูงกว่า 20 kHz จะผ่านเข้ามาได้ แสดงไว้ในรูปที่ ผล-25



รูปที่ ผล-26 ช่องสัญญาณ PD ที่จะทำการวัด

11.2 ในการปรับเทียบระบบวัดค่า PD จะต้องทำการเลือกค่า C ปรับเทียบ ในกรณีนี้ที่ห้องทดลองของ สจล. มีค่า C ปรับเทียบให้เลือกใช้ 2 แบบ คือ C แบบปรับค่าได้มี 2 ค่าอยู่ระหว่าง 1nF - 1000 nF และ C แบบค่าคงที่มีค่า 100 pF สามารถเลือกใช้ตัวใดตัวหนึ่งแสดงในรูป ผล-27 และรูปที่ ผล-28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผศ-27 C ปรับค่าได้มีค่า $1nF - 1000 nF$



รูปที่ ผศ-28 ค่า C ค่าคงที่มีค่า $100 pF$

วิธีการปรับเทียบสามารถดูได้จากภาคผนวก ข โดยที่หลังจากการปรับเทียบเสร็จแล้วให้นำเอา C ปรับเทียบออกจากระบบก่อนที่จะทำการทดลองป้อนแรงดันสูงให้กับอุปกรณ์ทดสอบต่อไป

ภาคผนวก ข

การเปรียบเทียบค่าเก็บประจุในวงจรวัด PD

1) การต่อวงจรเปรียบเทียบ

1.1 ภาพรวมของวงจรการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ ผช-1 โดยการใช้ C เปรียบเทียบแบบค่าคงที่



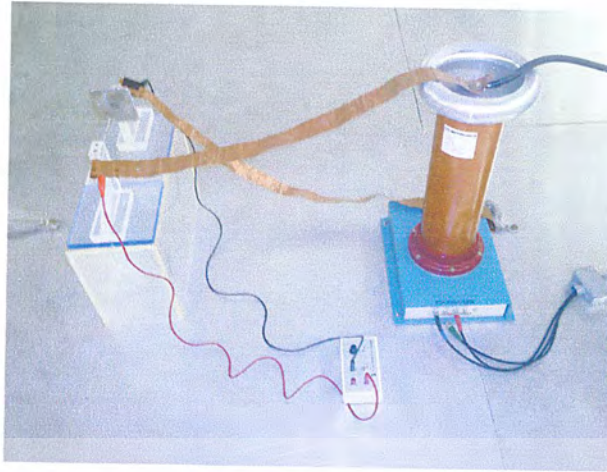
รูปที่ ผช-1 วงจรการเปรียบเทียบ

1.2 วงจรการต่อ C เปรียบเทียบ ทั้ง 2 แบบแสดงดังรูปที่ ผช-2 และ รูปที่ ผช-3



รูปที่ ผช-2 การต่อวงจรเปรียบเทียบโดยใช้แบบค่า C ค่าคงที่ (100 pF)

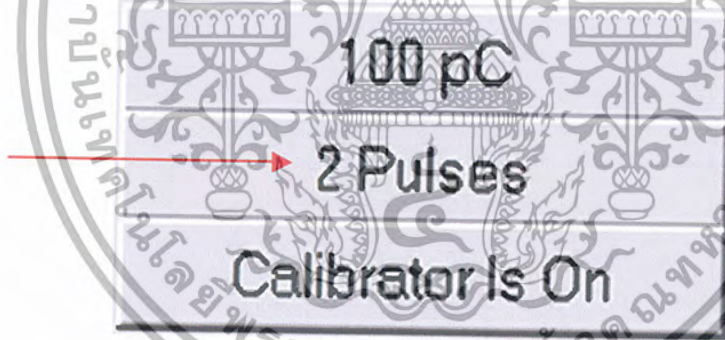
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผช-3 การต่อวงจรแบบค่า C ปรับค่าได้ (C ปรับค่าได้มีค่า $1\text{nF} - 1000\text{ nF}$)

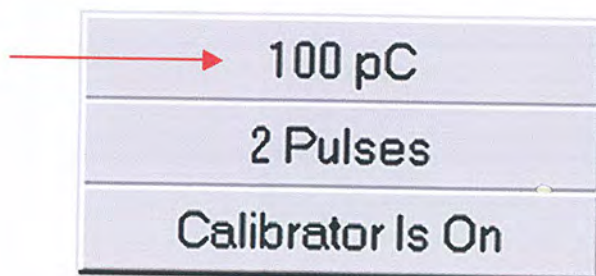
กลับมายังส่วนการปฏิบัติการของคอมพิวเตอร์ หลังจากการปรับตั้งแถบ Bandwidth ของเครื่องมือวัด PD แล้วให้ทำดังนี้

1.3 เลือกจำนวนพัลส์และทำการเลือกตำแหน่ง (มมเฟส) ของสัญญาณปรับเทียบ โดยการนำเมาส์ไปคลิกที่ไอคอนแสดงในรูปที่ ผช-4 จากภาพเป็นการเลือกสัญญาณที่ 2 พัลส์ โดยกำหนดขนาดสัญญาณป้อนเข้า 100 pC แสดงในรูปที่ ผช-5



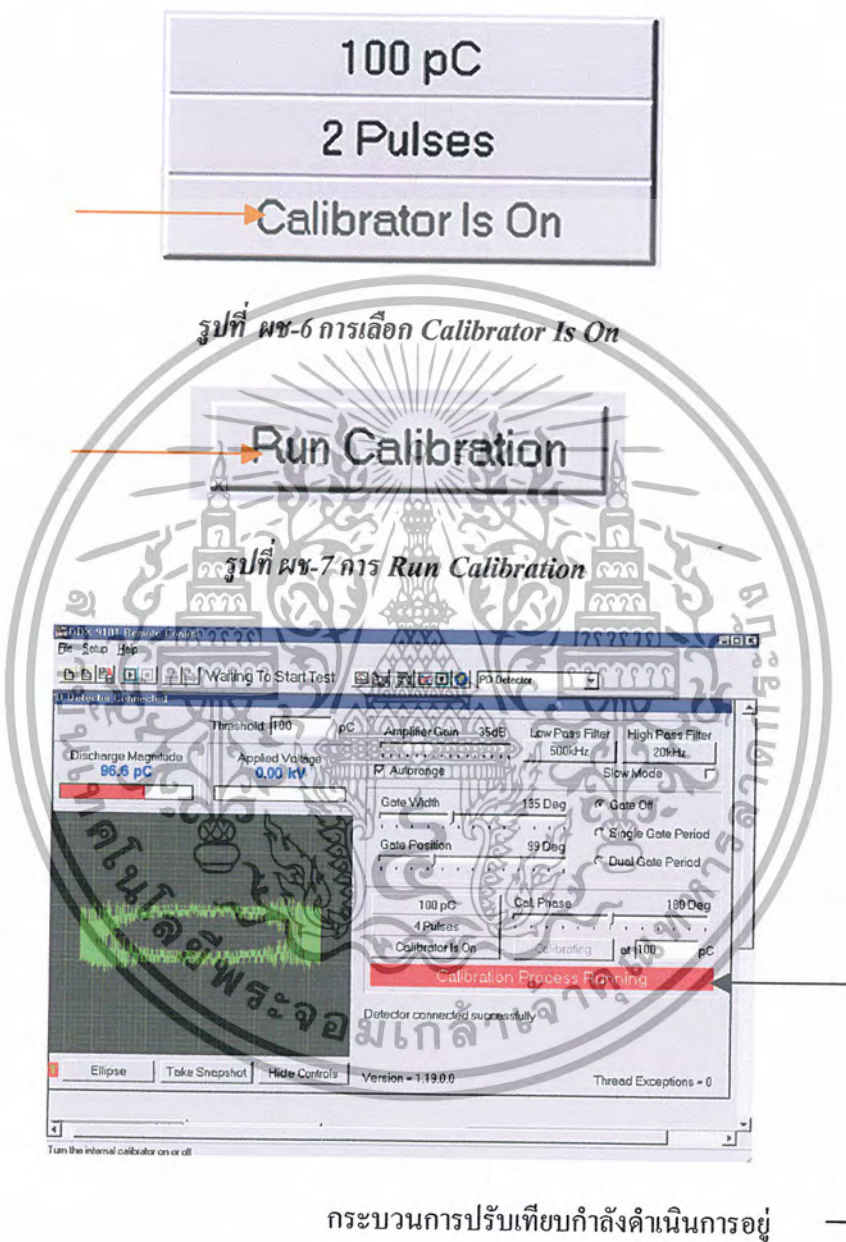
รูปที่ ผช-4 การเลือกจำนวน Pulses (ที่ไอคอนตามลูกศรเท่านั้น)

1.4 ขั้นตอนไปทำการเลือกค่าขนาดของ C ที่จะใช้ปรับเทียบที่หน้าจอโปรแกรมโดยการนำเมาส์ไปคลิกที่ไอคอนตามลูกศรชี้แสดงในรูปที่ ผช-5 ในกรณีเลือกค่าปรับเทียบ 100 pC



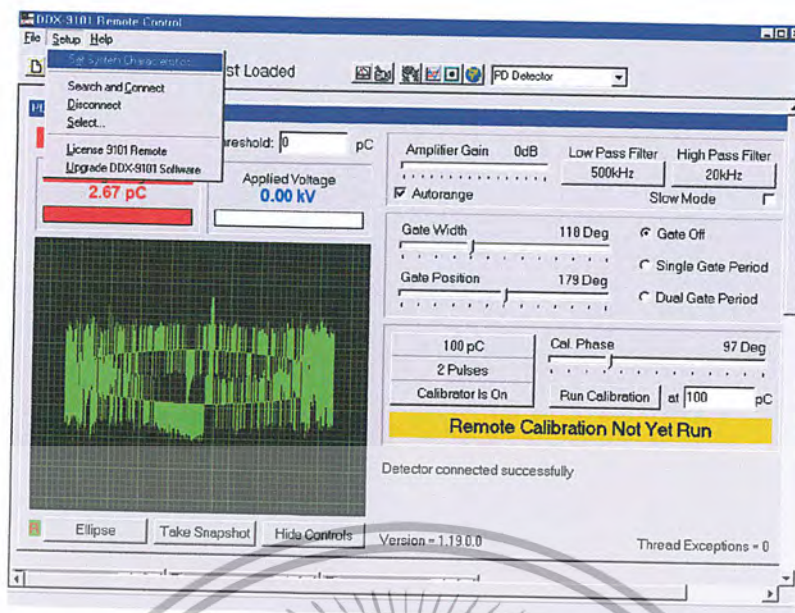
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เลือก Calibrate On แสดงในรูปที่ ผช-6 ต่อมาก็เลื่อน Pointer มาทางด้านขวามือ คือ ช่อง Run Calibration เามาตีไปคลิกตามรูปที่ ผช-7 เครื่องจะทำการ Calibrate และ จะมีแถบสีแดงที่อยู่ข้างใต้ Run Calibration บอกว่ากำลัง Calibrateอยู่ตามรูปที่ ผช-8



รูปที่ ผช-8 ขณะทำการ Run Calibration

4) ขั้นตอนต่อไป หลังจากการ Run Calibration ประมาณ 2 นาที สีแดงที่แสดงการ Run Calibration จะเปลี่ยนเป็นสีเขียวแสดงว่าการ Calibration ได้เสร็จสิ้นแล้วดังรูปที่ ผช-9



รูปที่ ผช-9 ทำการ Calibration เสร็จแล้ว

5) กระบวนการหลังการปรับเทียบค่าเก็บประจุ

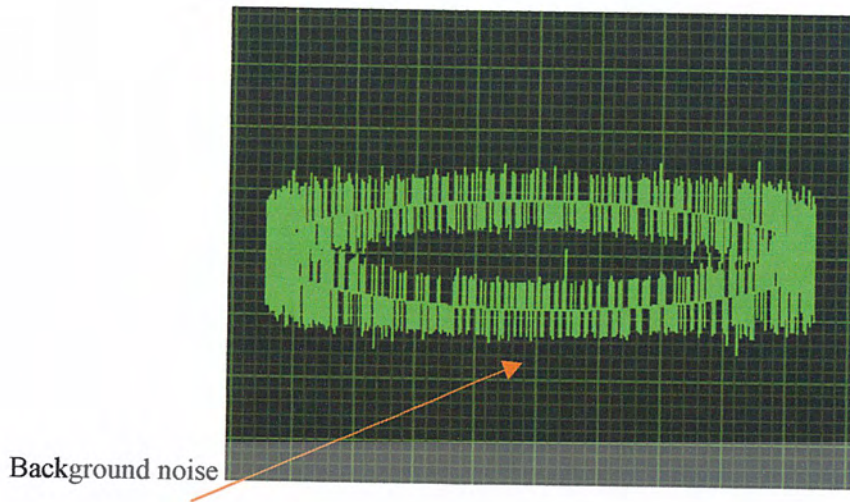
5.1 เมื่อหน้าจอปรากฏว่า Calibration Process Finished ให้ปลดตัว C ที่ใช้ในการปรับเทียบออกจากวงจร

ข้อควรระวัง

- หลังจากเราทำการปรับเทียบแล้วจะต้องปลดตัว C ที่ใช้ในการปรับเทียบออกจากวงจรวัดเสมอ
- ก่อนที่เราจะจ่ายแรงดันให้กับวงจรทดสอบ เราต้องรู้ว่าค่าเบรกดาวน์ ของ Test Object ของเรามีค่าเท่าไร ฉะนั้นถ้าเกิดการเบรกดาวน์ที่ Test Object นั้นอาจทำให้อุปกรณ์วัดทั้งหมดที่ต่ออยู่ในวงจรเกิดการเสียหายได้

5.2 หลังจากปลด C ที่ใช้ในการปรับเทียบออกจากวงจรทดสอบแล้ว กลับมาที่หน้าจอ COMPUTER กด Calibration Off เพื่อที่จะดู Background noise ของระบบดังแสดงในรูปที่ ผช-10 โดยลูกศรสีแดงจะชี้สัญญาณ Background noise สัญญาณรบกวนดังกล่าวออกมาจาก หลอดฟลูออเรสเซนต์ และ สัญญาณความถี่สูง ซึ่งอาจเป็นสัญญาณวิทยุก็เป็นได้

****Background noise ที่มาตรฐานยอมรับจะต้องมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่า PD ที่จะทำการวัด****



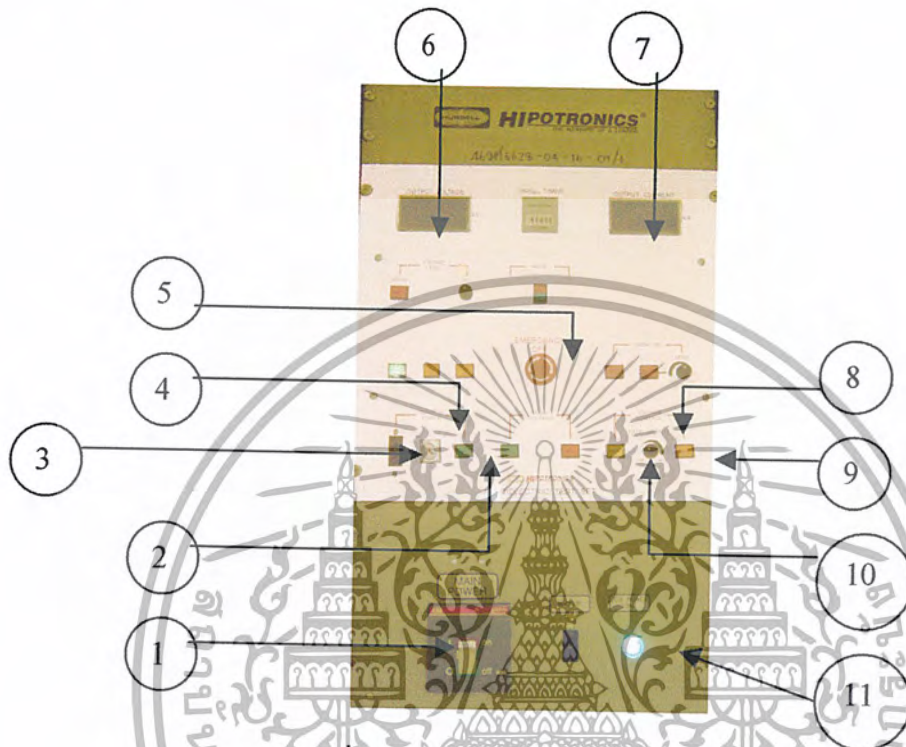
รูปที่ ผช-10 ขณะกด Calibrate off เพื่อ ดู Background noise

ในกรณีที่ค่า Background noise มีค่าสูงเกินไป ผู้ปฏิบัติการทดลองจะต้องทำการแก้ไขระบบวัด
ให้มีค่า Background noise อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการก่อนมิฉะนั้นค่า PD ที่วัดได้จะไม่ถูกต้อง



ภาคผนวก ข
การจ่ายแรงดันทดสอบ

1) ตู้ควบคุมการจ่ายแรงดันทดสอบ



รูปที่ ผข-1 ตู้ควบคุมการจ่ายแรงดันทดสอบ

หมายเลขแสดงอุปกรณ์ของตู้ควบคุมการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงทดสอบของตู้ทดสอบ PD มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1.1 MAIN POWER Circuit Breaker
- 1.2 หลอดไฟสีเขียวแสดงสถานะการป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงทดสอบ
- 1.3 สวิตเซอร์กิตเบรกเกอร์
- 1.4 สวิตกัญแจ
- 1.5 ปุ่ม EMERGENCY
- 1.6 หน้าจอแสดงแรงดันที่หม้อแปลงทดสอบจ่ายให้กับ Test object
- 1.7 หน้าจอแสดงกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงทดสอบจ่ายให้กับ Test object
- 1.8 สวิต เลือกการควบคุมการป้อนแรงดัน
- 1.9 สวิตที่ควบคุมการป้อนแรงดันเพิ่ม
- 1.10 สวิตที่ควบคุมการลดขนาดของแรงดันลง
- 1.11 หลอดไฟสีเขียวแสดงว่าสถานะการพร้อมการทำงานของผู้ควบคุมแรงดัน

2) การจ่ายแรงดันทดสอบมีวิธีการดังนี้

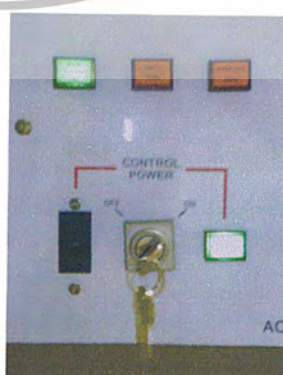
ขั้นตอนหลังจากทำการ ปรับเทียบระบบวัด PD เสร็จแล้วจะเป็นการจ่ายแรงดันให้กับ Test Object และการเก็บข้อมูล

2.1 ตรวจสอบวงจรทดสอบอีก 1 ครั้ง รวมทั้งรวมทั้งตรวจสอบว่าได้นำ C ที่ใช้ในการปรับเทียบออกจากวงจรทดสอบแล้วหรือยัง ถ้ายังให้นำ C ปรับเทียบออกจากวงจร รวมทั้งตะขอรอานด้วย

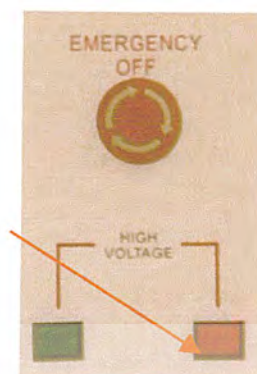
2.2 เริ่มการจ่ายแรงดันควบคู่กับการเก็บผลการทดลอง มีวิธีการดังนี้



บิตถูกแอมที่ตำแหน่ง ON



***ถ้าบิตสัญญาณ ON แล้วหลอดไฟสีเขียวด้านขวามือจะสว่างรวมถึงหลอดไฟด้านบนสว่างด้วย แสดงว่ามีแรงดันพร้อมที่จะจ่ายให้กับหม้อแปลงทดสอบ



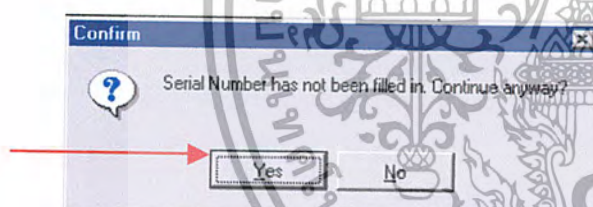
2.2.2 ขั้นตอนต่อไปกดสวิตช์ ON ด้าน HIGH VOLTAGE

(สถานะ

การ ON สวิตช์จะทำให้มีแรงดันพร้อมที่จะป้อนให้หม้อแปลงทดสอบแต่ยังไม่มีเก็บข้อมูลของรายงานที่ตั้งไว้)

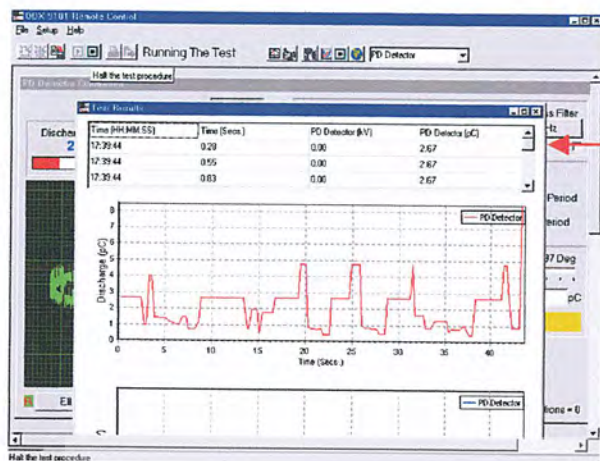
2.2.3 ขั้นตอนต่อไปวางมือจากตู้ Control แล้วกลับไปหน้าจอ Computer แล้วนำเมาส์ไปคลิก

ที่ Play แสดงในรูป  จะมีไอคอนแสดงออกมาให้นำเมาส์ไปคลิกที่ Yes



เป็นจำนวน 6 ครั้ง สุดท้ายแล้วรายงานการทดสอบ

จะปรากฏออกมาให้ทำการปิดหน้าต่างของรายงานผลการทดสอบก่อน การปิดหน้าต่างรายงานผลการทดสอบนั้นทำได้โดยนำเมาส์ไปคลิกปิดตามรูปที่ ผช-3 รายงานจะถูกนำไปเก็บไว้ที่ไอคอนข้างล่างโดยที่ยังคงบันทึกข้อมูลให้ตลอด



คลิกปิดหน้าต่างรายงาน



รูปที่ ผช-3 การปิดหน้าต่างรายงาน

2.2.4 ขั้นตอนต่อไปกลับมาที่ CONTROL หลังจากนั้นจะมีปุ่ม LOWER และ RAISE ซึ่ง



เป็นปุ่มลดและเพิ่มแรงดัน ให้ผู้ทดลองกดปุ่ม RAISE เพื่อเพิ่มแรงดัน แสดงดังรูป (ให้เพิ่มแรงดันช้าๆ แบบกดและปล่อย ถ้าสมมุติเราเพิ่มแรงดันเร็วเกินไป อาจจะทำให้เราไม่สามารถรู้ได้ว่าค่า PD ที่เริ่มเกิดที่แรงดันเท่าไร และอีกกรณีหนึ่ง อาจจะทำให้แรงดันมีค่าถึงค่าเบรกดาวน์ของ Test Object ได้ และจะเป็นอันครายต่ออุปกรณ์ตรวจจับ PD)

2.2.5 ขณะที่เริ่มป้อนแรงดันผู้ร่วมทดลองอีกคนต้องทำการสังเกตค่า PD ที่เกิดและจับภาพ

สัญญาณ PD ที่เกิดโดยการจับภาพนั้นจะใช้ SNAPSHOT คือว่าจะมีไอคอนเป็นรูปกล้อง  ปรากฏอยู่ให้นำเมาส์ไปคลิกที่  เมื่อต้องการภาพ PD ที่เกิดขึ้นในขณะนั้น

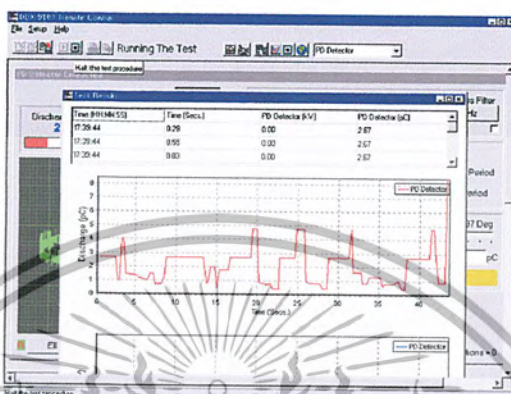
หมายเหตุ จำนวนภาพที่จับ ได้จะเท่ากับจำนวนเมาส์ที่คลิก และผู้ทดลองควรจะเก็บภาพการเกิด PD ทั้ง แบบฐานวงรี และ แบบฐานคลื่นไซน์ และอื่นๆ

2.2.6 เมื่อระดับการเกิด PD ของอุปกรณ์ทดสอบมีค่าถึงกำหนดหรือระดับแรงดันที่ปรับให้กับอุปกรณ์ทดสอบมีค่าเท่ากับแรงดันที่กำหนดให้หยุดทำการทดสอบและลดแรงดันลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 หลังจากลดแรงดันให้เป็นศูนย์แล้วจึงทำการหยุดการทำรายงานของ โปรแกรม โดยการนำ

เมาส์ไปคลิกที่ไอคอน  ที่อยู่ติดกับไอคอน  และจะมีรายงานแสดงออกมาให้ดูตามรูปที่ ผช-4



รูปที่ ผช-4 กราฟการเกิด PD

หมายเหตุ ถ้าจะนำรายงานที่ Save มาดูอีกรอบก็ไปดูได้ใน Folder ที่เราได้ Save ไว้

2.2.8 บันทึกผลการทดลองให้ Save ไว้ที่เป็น Disket ขณะเดียวกันให้นำภาพของ PD แต่ละชนิดลงในผลการทดลองด้วย

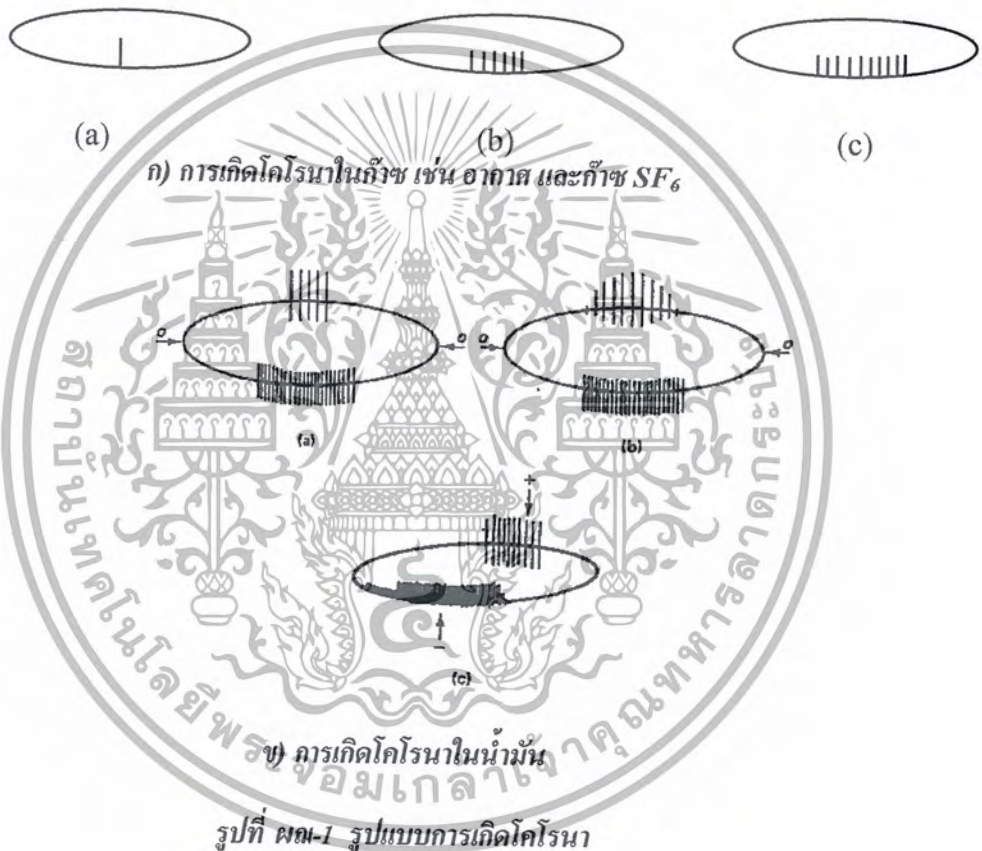
2.2.9 กดสวิตปิดการทำงานของตู้ควบคุมแรงดันทั้ง Control circuit Breaker และ Main power circuit Breaker และให้ทำการกราวด์ที่ตัวหม้อแปลง

ภาคผนวก ฉ

รูปแบบการเกิดดิซาร์จบางส่วน

1) รูปแบบ PD แบบโคโรนา

รูปแบบ PD ของการเกิดโคโรนาจะแสดงดังรูปที่ ผฉ-1 ถ้าดิซาร์จปรากฏทางด้านลบของรูปคลื่นแสดงว่าเกิดโคโรนาทางด้านแรงสูง แต่ถ้าดิซาร์จปรากฏทางด้านบวกของรูปคลื่น แสดงว่าเกิดโคโรนาทางด้านกราวด์ ลักษณะของ โคโรนาทางด้านแรงสูงที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 270 องศา สำหรับในกรณีแรงดันเริ่มต้น และเมื่อแรงดันสูงขึ้น PD จะเกิดในช่วง 90 องศาด้วย โดยขนาดของ PD จะมีค่าใกล้เคียงกัน



2) รูปแบบ PD แบบดิซาร์จตามผิว

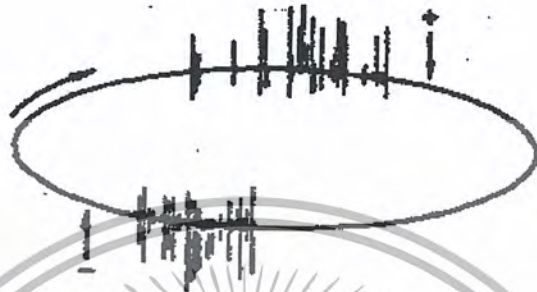
รูปแบบ PD ของการดิซาร์จตามผิว จะแสดงดังรูปที่ ผฉ-2 ลักษณะของดิซาร์จตามผิวที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0 - 90 องศา และ 180-270 องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น การเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) รูปแบบ PD แบบดิซซาร์จภายใน

รูปแบบ PD ของการดิซซาร์จภายในจะแสดงดังรูปที่ ผผ-3 ลักษณะของดิซซาร์จภายในที่แสดงบนฐานเวลา รูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0 - 90 องศา และ 180-270 องศา เช่นเดียวกับดิซซาร์จตามผิวแต่ลักษณะการกระจายของพัลส์ PD จะน้อยกว่า

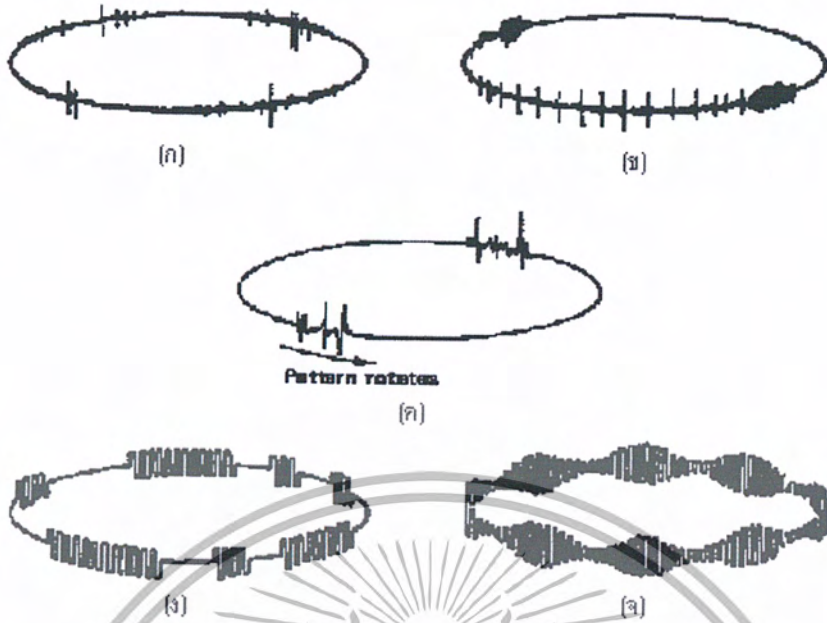


รูปที่ ผผ-3 รูปแบบการเกิดดิซซาร์จภายใน

4) รูปแบบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

สัญญาณรบกวน จะแสดงดังรูปที่ ผผ-4 ในการตรวจจับ PD บ่อยครั้งที่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอกเข้ามาจนทำให้การวัดค่า PD ผิดพลาด และได้ผลมากกว่าความเป็นจริง ทำให้เกิดความเข้าใจผิดว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น ไม่ได้คุณภาพ กล่าวคือ ค่า PD ที่วัดได้สูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด PD แบบคางมุมีดังนี้

- 4.1) สัญญาณรบกวนเนื่องจากทรานซิสเตอร์ ดังแสดงในรูป ผผ-4 ก) ลักษณะของสัญญาณ รบกวนชนิดนี้จะเกิดเป็นพัลส์คู่
- 4.2) สัญญาณรบกวนเนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ดังแสดงในรูป ผผ-4 ข)
- 4.3) สัญญาณรบกวนเนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบอะซิงโครนัส ดังแสดงในรูป ผผ-4 ค)
- 4-5) สัญญาณรบกวนเนื่องจากของคลื่นรบกวนในการส่งสัญญาณสื่อสาร ดังแสดงในรูป ผผ-4 ง) ลักษณะของสัญญาณรบกวน คือ จะมีคลื่นรบกวนความถี่สูงเข้ามาในวงจรวัด
- 4-6) สัญญาณรบกวนเนื่องจากของคลื่นรบกวนวิทยุ ดังแสดงในรูป ผผ-4 จ) ลักษณะของสัญญาณรบกวน คือ จะมีคลื่นรบกวนความถี่สูงเข้ามาในวงจรวัดเช่นเดียวกับสัญญาณรบกวนเนื่องจากของคลื่นรบกวนในการส่งสัญญาณสื่อสาร



รูปที่ ๔-๔ สัญญาณรบกวนแบบต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

ตัวต้านทานหน่วง

ตัวต้านทานหน่วงทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในภาวะทรานเซียนต์ ที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของสายตัวนำกับค่าเก็บประจุของโวลเตจดีไวเซอร์ ตัวต้านทานหน่วงที่ใช้เป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำโดยอาจต่อที่ต้นสายตัวนำ หรืออิลคโตรดแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเซอร์ โดยให้มีค่าประมาณเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำ จะช่วยหน่วงการแกว่งที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากันของสายตัวนำกับเครื่องกำเนิดแรงดันและโวลเตจดีไวเซอร์

1) การออกแบบและการสร้างความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ

การออกแบบจะต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะต้องไม่เกินค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของฉนวนโดยรอบความต้านทาน(ซึ่งในโครงการนี้ใช้อากาศเป็นฉนวน) ดังนั้นการออกแบบในเบื้องต้นสำหรับความต้านทานแรงสูงนั้นจะต้องคำนึงถึง การฉนวนและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยรอบองค์ประกอบย่อย รวมถึงการฉนวนภายนอกของความต้านทาน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน การฉนวนด้วยอากาศตามความยาวของความต้านทานที่สภาวะห้องอากาศได้โดยประมาณดังนี้

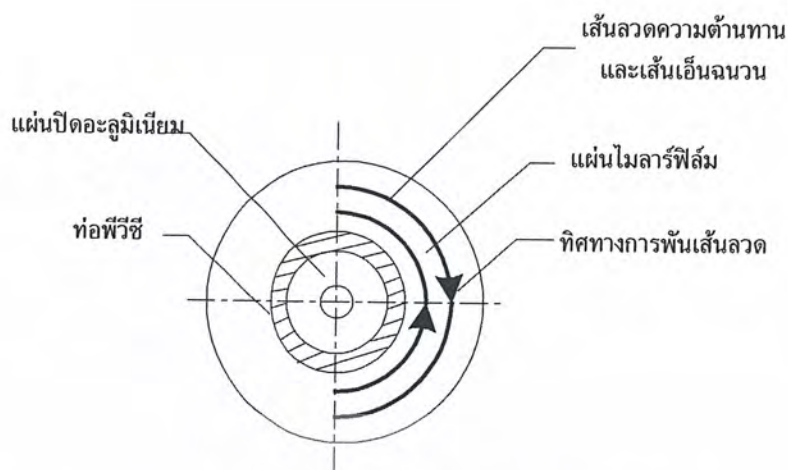
ความยาวตามผิวฉนวนที่ใช้ภายในอาคาร ถ้าเป็นผิวเรียบจะใช้ความยาวจำเพาะดังนี้

$$\text{ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดันกระแสสลับ} = 5 \text{ m/MV}$$

$$\text{ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดันอิมพัลส์} = 2.5 \text{ m/MV}$$

ดังนั้นสำหรับองค์ประกอบความต้านทานหน่วงของโวลเตจดีไวเซอร์ ซึ่งมีแรงดันกำหนด 100 kV จึงต้องมีความยาวอย่างน้อย 25 เซนติเมตร นอกจากนี้จะต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงดันของตัวต้านทานแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงกำลังสูญเสียในรูปความร้อนที่เกิดขึ้นอีกด้วย โดยไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงเกิน 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าขีดจำกัดของอุณหภูมิของกระบอกฉนวนพีวีซีที่ใช้ในการรองรับการพันของขดลวดนิเกิล - โครเมียม

ความต้านทานหน่วงในที่นี้เลือกทำจากขดลวด Ni-Cr 60/16 พันแบบไร้ความเหนี่ยวนำบนท่อฉนวนพีวีซี โดยพันซ้อนกัน 2 ชั้น แต่ละชั้นมีความต้านทานเป็นสองเท่าของค่ารวม เพราะทั้งสองชั้นต้องต่อขานานและพันสวนทิศทางการพันรูปที่ 1 การพันลักษณะนี้จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไหลในขดลวดทั้งสองชั้นหักล้างกันหมด การพันแต่ละชั้นต้องให้ได้ค่าความต้านทานใกล้เคียงมากที่สุด เพื่อให้กระแสไหลในแต่ละชั้นเท่ากันและเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ ผยว-1 การพันความต้านทานเส้นลวดแบบไร้ความเหนียว

เส้นลวดที่นำมาทำความต้านทานนี้เป็นเส้นลวดเปลือย ฉะนั้นระหว่างรอบของเส้นลวดจะพันคั่นด้วยเส้นเอ็นในรอนทำหน้าที่เป็นฉนวน โดยเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นเอ็นให้ใกล้เคียงกับของเส้นลวด และจะพันคู่ขนานไปพร้อมกับเส้นลวด ระหว่างชั้นของการพันแต่ละชั้นจะคั่นด้วยแผ่นฉนวนไมลาร์

2) ขั้นตอนการออกแบบตัวต้านไร้ความเหนียว

1. คำนวณหาค่าความต้านทานที่ต้องการออกแบบ

2. คำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวต้านทาน

$$W = m\sigma\Delta T$$

เมื่อ

ΔT คือ อุณหภูมิเพิ่ม หน่วยเป็น K

W คือ พลังงานที่ป้อนให้กับตัวต้านทาน หน่วยเป็น J

M คือ ของลวดความต้านทาน หน่วยเป็น g

σ คือ ความร้อนจำเพาะของขดลวดความต้านทาน หน่วยเป็น J/gK

3. คำนวณหาความยาวของเส้นลวดความต้านทานที่พันต่อชั้น

$$l = 2R/\rho$$

เมื่อ

l คือ ความยาวของเส้นลวด

$2R$ คือ ค่าความต้านทานแต่ละชั้น

ρ คือ ค่าโอห์มต่อเมตร

4. คำนวณหาจำนวนรอบของเส้นลวด

$$N = l/\pi d$$

เมื่อ

N คือ จำนวนรอบของเส้นลวดแต่ละชั้น

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกพีวีซี

5. คำนวณหาความยาวท่อพีวีซี

การพันเส้นลวดจะพันคู่ขนานไปพร้อมกับเส้นเอ็นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน (หรือใกล้เคียงกันมากที่สุด) ฉะนั้นความยาวท่อพีวีซีจึงคำนวณได้

$$L = 2N\phi$$

เมื่อ L คือ ความยาวท่อ
 ϕ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด

3) ตัวอย่างการออกแบบตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ

เลือกค่าความต้านทานประมาณ $1k\Omega$ โดยลวดความต้านทานที่ใช้เป็นลวด Ni-Cr 60/16 ชนิด ไม่มีฉนวนหุ้ม ซึ่งมีข้อกำหนดทางเทคนิคดังนี้

ค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาว	18.8	Ω/m
ค่าความต้านทานจำเพาะ	$\rho = 0.715$	$\Omega mm^2/m$
เส้นผ่าศูนย์กลาง	$d = 0.22$	mm
ค่าความหนาแน่น	$\rho = 7.15$	g/cm^3
ความร้อนจำเพาะ	$\sigma = 0.46$	J/gK
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ	$K = 11$	ppm/K

จากข้อกำหนดของลวดความต้านทานข้างต้น สามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิเพิ่มในขณะใช้งานได้จาก

$$\Delta T = \frac{W}{m\sigma}$$

(พญ-1)

เมื่อ ΔT คือ อุณหภูมิเพิ่ม หน่วยเป็น K
 W คือ พลังงานที่ป้อนให้กับตัวต้านทาน หน่วยเป็น J
 M คือ ของลวดความต้านทาน หน่วยเป็น g
 σ คือ ความร้อนจำเพาะของขดลวดความต้านทาน หน่วยเป็น J/gK

ซึ่งมาตรฐานกำหนดไว้ว่าไม่ควรมีค่าเกิน 200 K

พลังงานที่ป้อนให้กับตัวความต้านทานสามารถหาได้จาก

$$W = \frac{1}{R} \int_0^{\infty} v^2(t) dt$$

ถ้าต้องการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งมีสมการดังนี้

$$V(t) = Ve^{-t/\tau}$$

เมื่อ V คือ ค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน หน่วยเป็น V

τ คือ ค่าคงตัวทางเวลาของฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล หน่วยเป็น s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์ใช้เฉพาะในห้องเรียน ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสามารถหาค่าพลังงานที่ป้อนได้เป็น

$$W = \frac{1}{R} \int_0^{\infty} (Ve^{-t/\tau})^2 dt$$

$$W = \frac{V^2}{R} \int_0^{\infty} e^{-2t/\tau} dt$$

$$W = \frac{V^2}{R} \cdot \frac{\tau}{2} \quad (\text{ผญ-2})$$

ในกรณีเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า อาจประมาณได้ว่าแรงดันเอกซ์โปเนนเชียลมีค่าคงตัว เวลา 68.5 μ s ดังนั้นถ้าต้องการวัดแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่ายอด 100 kV โดยมีตัวต้านทานหน่วง 1k Ω จะคำนวณหาพลังงานที่ป้อนได้จากสมการที่ (ผญ-2)

$$W = \frac{100^2 * 10^6 * 68.5 * 10^{-6}}{1000 * 2}$$

$$= 342.5 \text{ J}$$

คำนวณหาความยาวของขดลวด

$$l = 2R/\rho$$

$$= \frac{2 * 1000}{18.8}$$

$$= 106.4 \text{ เมตร}$$

มวลของขดลวดความต้านทานสามารถคำนวณได้จาก

$$m = \frac{1}{4} \pi d^2 l \rho$$

$$= \frac{1}{4} * \pi * 0.22^2 * 106.4 * 7.15$$

$$= 28.9 \text{ g}$$

คำนวณหาค่าอุณหภูมิเพิ่มในขณะใช้งานได้จากสมการที่ 1

$$\Delta T = \frac{W}{m\sigma}$$

$$= \frac{342.5}{28.9 * 0.46}$$

$$= 25.8 \text{ K}$$

คำนวณหาค่าจำนวนรอบของเส้นลวด

$$N = l/\pi d$$

เลือกใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้วจะได้จำนวนรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N = \frac{106.4}{\pi * 2 * 2.54 * 10^{-2}}$$

$$= 667 \text{ รอบ}$$

คำนวณหาความยาวท่อพีวีซี

$$L = 2N\phi$$

เลือกเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด 0.22 mm

$$L = 2 * 667 * 0.22 * 10^{-3}$$

$$= 0.29 \text{ เมตร}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] IEEE std 4 - 1995: "IEEE Standard Techniques for High Voltage testing".
- [2] IEC 60-1:1989 : "High-Voltage test techniques Part 1: General definitions and test requirement".
- [3] IEC 52-1960: "Recommendations for voltage measurement by means of sphere-gaps".
- [4] IEC 60052 : 2002 : "Voltage measurement by means of standard air gaps".
- [5] IEEE Std 4-1995: "IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing".
- [6] IEC.PublicationNO.60-2: "HighVoltageTest Techniques and Part2-1994: Measuring System".
- [7] IEC 156: "Insulating Liquids Determination of The Breakdown Teat method", 1995-07.
- [8] IEC 76-3: "Power transformers Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearaces in air".
- [9] IEC 722-1982: " Guide to the lighting impulse and switching impulse testing of power transformers and reactors".
- [10] Kuffel E.and Zaengl W. S.(1984) : "High Voltage Engineering Fundamental", Pergamon Press Ltd.,Oxford, 1st ed.
- [11] W.HAUSCHILD. AND W. MOSCH (1992): "STATISTICAL TECHNIQUES FOR HIGH-VOLTAGE ENGINEERING".
- [12] Prof Dr Ir F. H. Krueger : "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment".
- [13] ตำรวย สังข์สะอาด : "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [14] เอกสารประกอบการเรียนวิชา Electrical Power Engineering Laboratory 1: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [15] วันชัย แสงแพระ : "เครื่องวัดค่าปาซิแตนซ์และค่าแพคเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537.
- [16] ตำรวย สังข์สะอาด: "เทคนิคการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า", คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] ตำรวย สังข์สะอาด: "เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง", คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [18] ภาณุพงศ์ พินกฤษและคณะ: "การทดสอบ BIL ของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย", ปรินญานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร , 2543.
- [19] วีระพันธ์ รังสีจิตรประภา: "ระบบวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบดิจิทัลสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง", รายงานผลการวิจัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [20] ปรีชา คุ่มครอง: "การออกแบบสร้างมัลติเบิ้ลช็อบปีงแกปขนาด 400 กิโลโวลท์", วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
- [21] สรพล ดำรงจิตติกล: "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", 2535.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง “เทคนิคการตรวจจับ PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [23] เกวริน วิเศษจินดาวัฒน์ : “การจำรูปแบบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2544.
- [24] พุทธิรักษ์ มรรุส , ขวัญชัย เจริญขวัญ , และสมศักดิ์ บุญธรรม : “หม้อแปลงเตสลา 400 kV 200 kHz”, ปรินญาณินพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [25] ตำราย สังข์สะอาด : “เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV 1000 J”, รายงานผลการประดิษฐ์ทุนอุดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2536.
- [26] ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ : “การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเคอร์ขนาด1000kV” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2539.
- [27] คมสัน เพ็ชรรักษ์ : “ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการสร้างและวัดแรงดันสูง”, เอกสารประกอบการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2540.
- [28] วิโรจน์ วรรณพาหุณ : “ปรากฏการณ์เบรคความถี่ของฉนวนเหลว”, ปรินญาณินพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง , 2532.
- [29] มนตรี ธรรมารักษ์ : “ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ” วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [30] พินิจ ศรีธร : “การออกแบบและสร้างชุดทดลองความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง”, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [31] ธลาวิทย์ วินิจฉัย : “แรงดันเบรคความถี่กระแสตรงและสวิตซ์อิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [32] วันชัย แสงแพร : “เครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียค่าในไดอิเล็กตริก”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537.
- [33] หนังสือเรียนวิชา Electrical Power Engineering Laboratory II: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [34] คู่มือ PASSONI VILLA: Impulse Generator type GTU 200 kV, 5kJ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้