

ลักษณะสมบัติทางวิศวกรรมของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับในระบบ 33 กิโลโวลต์



นายนวิศวรรษ วัฒนเดช

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

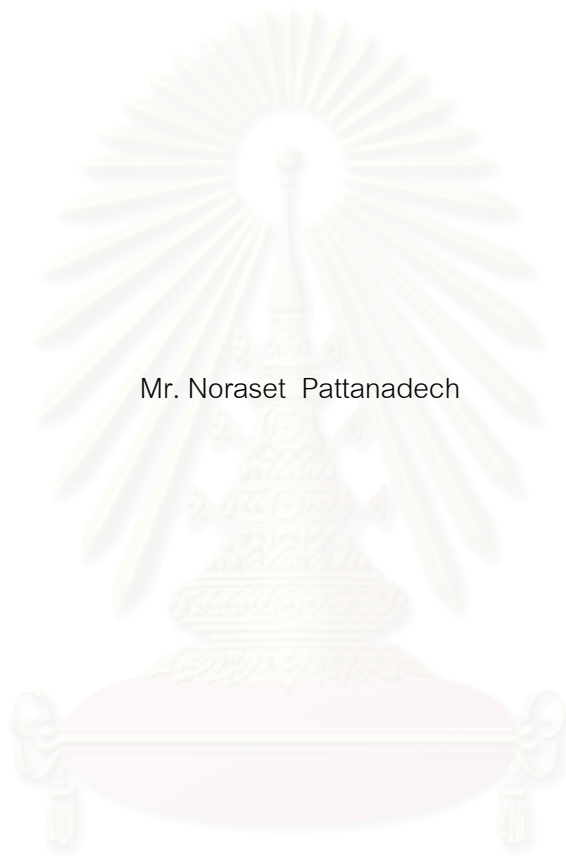
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0794-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENGINEERING CHARACTERISTICS OF AN ALTERNATING SHEDS
LONG ROD INSULATOR IN 33-kV SYSTEM

Mr. Noraset Pattanadech



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0794-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ลักษณะสมบัติทางวิศวกรรมของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับในระบบ 33 กิโลโวลต์
โดย	นายนรเศรษฐ์ พัฒนเดช
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

นรเศรษฐ พัฒนเดช : ลักษณะสมบัติทางวิศวกรรมของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับในระบบ 33 กิโลโวลต์ (ENGINEERING CHARACTERISTICS OF AN ALTERNATING SHEDS LONG ROD INSULATOR IN 33-kV SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล, หน้า 120, ISBN 974-03-0794-9

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอผลการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะสมบัติทางวิศวกรรมของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดาในระบบ 33 kV ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับพวงลูกถ้วยแขวน (ANSI CI 52-4) 4 ลูก และกับลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ การวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยผิวสะอาดและลูกถ้วยเปรอะเปื้อนตามธรรมชาติ ผลการทดสอบลูกถ้วยผิวแห้งสะอาดพบว่า ค่าแรงดันวาบไฟตามผิว 50 Hz ของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา มีค่าต่ำกว่าพวงลูกถ้วยแขวนประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งอิมพัลส์วิกฤตชั่วฉับของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดามีค่าสูงกว่าพวงลูกถ้วยแขวนประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดสอบลูกถ้วยเปรอะเปื้อน ได้นำตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนไปติดตั้งโดยไม่ได้รับแรงดันที่สถานีไฟฟ้าบางปู เพื่อรองรับสิ่งเปรอะเปื้อนเป็นเวลา 12 เดือน แล้วนำมาทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวตามข้อกำหนด IEC 507:1991 และกระแสรั่วไหล ผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามปริมาณการสะสมสิ่งเปรอะเปื้อนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำมีค่าแรงดันวาบไฟตามผิวค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณสิ่งเปรอะเปื้อน และมีค่าสูงกว่าลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดา โดยที่กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้งสองแบบที่ระดับแรงดันปกติมีค่าน้อยกว่า 1 mA

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4170358421 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : Alternating Sheds Long Rod Insulator, Natural Pollution, Flashover Voltage, Leakage Current

NORASET PATTANADECH : ENGINEERING CHARACTERISTICS OF AN ALTERNATING SHEDS LONG ROD INSULATOR IN 33-KV SYSTEM . THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SAMRUAY SANGKASAAD, Ph.D. Sc. Techn. THESIS CO-ADVISOR : CHANNARONG BANMONGKOL, Ph.D. pp. 120, ISBN 974-03-0794-9

This thesis presents experimental results on engineering characteristics of ordinary glazed alternating sheds long rod Insulator in 33 kV system by comparing with insulator string consisting of 4 suspension insulators (ANSI CI 52-4) and with semiconducting glazed alternating sheds long rod insulator. The experiments were carried out in two parts, i.e. flashover voltage test of clean insulators and flashover voltage test of natural polluted insulators. The tested results for clean insulators show that the 50 Hz dry flashover voltage of ordinary glazed alternating sheds long rod insulator is lower than that of suspension insulator string about 17 percent. However, the critical negative impulse dry flashover voltage of ordinary glazed alternating sheds long rod insulator is higher than that of the suspension insulator string about 6 percent. For natural polluted test, insulator samples were installed at Bang Pu substation with the period of 12 months for collecting contamination without energizing. Consequently, flashover voltage test in accordance with IEC 507 :1991 and leakage current test were performed for specified periods. It is found that the flashover voltage of ordinary glazed alternating sheds long rod insulator under polluted condition obviously decreases with increasing quantity of pollution. On the other hand, the flashover voltage of the semiconducting glazed alternating sheds long rod insulator is higher than that of the ordinary glazed alternating sheds long rod insulator and hardly depends on quality of contamination. The leakage current of two types of alternating sheds long rod insulators at operating voltage are less than 1 mA.

Department	Electrical Engineering.....	Student's signature
Field of study	Electrical Engineering.....	Advisor's signature
Academic year	2001.....	Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีก็เนื่องจากความช่วยเหลือสนับสนุนจากหลายท่าน โดยเฉพาะท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สังข์สะอาด และท่านอาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยกรุณาให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ โดยมีเห็นแก่เห็นคเห็น้อยและรำคาญใจ และได้กรุณาตรวจแก้ไขรายงานให้เป็นที่เรียบร้อย รวมทั้งท่านอาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รั้งสีวิจิตรประภา ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ ในขณะที่ทำการแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี คุณณรงค์ ทองฉิม อดีตนักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการ EMC ได้ให้คำแนะนำตลอดจนลงมือเองในบางครั้ง เกี่ยวกับการทดลองด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะการออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลและการแก้ปัญหาการเกิดแรงดันเกินพุ่งเข้าเมื่อทำการบันทึกค่ากระแสรั่วไหล โดยใช้คอมพิวเตอร์ การไฟฟ้านครหลวงที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่เพื่อติดตั้งลูกถ้วยฉนวน เจ้าหน้าที่การไฟฟ้านครหลวงและเจ้าหน้าที่ประจำสถานีไฟฟ้าย่อยบางปูที่คอยให้ความช่วยเหลือในการติดตั้งและจัดเก็บลูกถ้วยฉนวน อาจารย์ บำรุง ตอนสุข อาจารย์ประจำคณะวิชาเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ที่ได้ให้คำแนะนำในเรื่องการวัดและการทดลองทางด้านเคมี รวมทั้งให้ยืมเครื่องวัดความนำไฟฟ้า นื่องๆสาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวัดค่าความนำไฟฟ้าของสิ่งเปราะเปื้อนที่บริษัทปิโตรเคมีแห่งชาติ จำกัดมหาชน เจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยเฉพาะคุณประเสริฐ รั้งสีโสภณอาภรณ์ ได้ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบแรงดันวาวไฟตามผิวแห่งกระแสสลับความถี่ต่ำของลูกถ้วยฉนวน เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่าน โดยเฉพาะ คุณถาวร เอื้อดี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังทุกท่าน รวมทั้งเจ้าหน้าที่ช่างเทคนิคทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือและความสะดวกในเรื่องต่างๆมาโดยตลอด ขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท สาขา EMC และ HVT ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา รวมทั้งบุคคลอีกหลายๆท่านที่ยังมิได้เอ่ยถึง และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอีก 2 หน่วยงาน คือ ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ บริษัท อาเซียน อินซูเลเตอร์ จำกัด ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำการศึกษาวิจัย รวมทั้งได้ทำการผลิตลูกถ้วยคอดันยาวปีกลับขึ้นมา

อนึ่ง โครงการวิจัยชิ้นนี้สำเร็จด้วยดีเนื่องด้วยความดีงามและความมีน้ำใจของทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น และผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่คอยสนับสนุนและส่งเสริมในการเรียนต่อระดับปริญญาโทมาโดยตลอด ทั้งทางด้านการเงินและกำลังใจเสมอมา

นรเศรษฐ พัฒนเดช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 ผลงานการศึกษาในอดีต.....	2
1.4 ขอบข่ายของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ลูกถ้วยฉนวนในสถานะเปราะ.....	4
2.1 สิ่งเปราะ.....	4
2.1.1 ประเภทของสิ่งเปราะ.....	4
2.1.2 การวัดและการแบ่งระดับของความเปราะ.....	5
2.1.2.1 การวัดค่าระดับความเปราะ.....	5
2.1.2.2 การแบ่งระดับความเปราะ.....	6
2.1 การเกิดฉนวนไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปราะ.....	7
2.2 แนวทางการแก้ไขการเกิดฉนวนไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปราะ.....	9
2.2.1 การลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปราะบนผิวลูกถ้วยฉนวน.....	9
2.2.2 การป้องกันการเกิดสภาพนำไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวน.....	11
2.2.3 การเพิ่มความคงทนต่อแรงดันฉนวนไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน.....	12
2.3 การออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในบริเวณเปราะ.....	13
2.3.1 เงื่อนไขการใช้ลูกถ้วยฉนวนในสถานะเปราะ.....	13
2.3.2 ขั้นตอนการออกแบบลูกถ้วยฉนวนใช้ในบริเวณเปราะ.....	15

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 ลูกถ้วยคอดันยาว.....	16
2.4.1 ลูกถ้วยคอดันยาวพอร์ชเลน.....	16
2.4.2 ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ.....	17
2.4.2.1 ชนิดและคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการเคลือบผิว ลูกถ้วยฉนวน.....	17
2.4.2.2 ผลของการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ.....	19
2.5 กระแสรั่วไหล.....	22
2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระแสรั่วไหลบนผิวลูกถ้วยฉนวน.....	23
2.5.2 การวัดค่ากระแสรั่วไหล.....	23
บทที่ 3 การออกแบบลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับและอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล.....	28
3.1 การออกแบบลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับ.....	28
3.1.1 เกณฑ์การออกแบบ.....	28
3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบ.....	28
3.1.3 การกระจายของสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน.....	32
3.2 อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล.....	32
3.2.1 แนวคิดพื้นฐานในการวัดกระแสรั่วไหล.....	32
3.2.2 วงจรและส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล.....	33
3.2.2.1 ส่วนอินพุท.....	33
3.2.2.2 ส่วนขยายและตรวจจับค่าขอดีชญาณ.....	34
3.2.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลเข้ากับระบบบันทึกและแสดงผล ด้วยคอมพิวเตอร์.....	39
บทที่ 4 การทดสอบหาคูณลักษณะสมบัติของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับ.....	41
4.1 การตรวจสอบทางมิติ.....	41
4.2 การทดสอบหาคูณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าลูกถ้วยผิวแห้งสะอาด.....	42
4.2.1 การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งสะอาด.....	42
4.2.2 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน.....	47

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.3 การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งอิมพัลส์วิกฤต.....	49
4.2.4 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์.....	61
4.3 การทดสอบหาคูณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าลูกถ้วยผิวเปียกเปรอะเปื้อน.....	62
4.3.1 การแขวนลูกถ้วยฉนวนเพื่อรองรับสิ่งเปรอะเปื้อน.....	62
4.3.2 การวัดระดับความเปรอะเปื้อน.....	63
4.3.3 การเก็บตัวอย่างและการวัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลายเปรอะเปื้อน.....	64
4.3.4 วิธีการคำนวณค่า ESDD.....	66
4.3.4.1 การคำนวณค่า ESDD ตามวิธีที่นำเสนอในวารสารของ NGK...	66
4.3.4.2 การคำนวณค่า ESDD ตามข้อแนะนำของ IEC 507	67
4.3.5 ผลการคำนวณค่า ESDD และการวิเคราะห์ผล.....	68
4.3.6 การวิเคราะห์และประเมินผลการวิจัย.....	70
4.3.7 การขนส่งและการเก็บลูกถ้วยฉนวนก่อนการทดสอบ.....	72
4.3.8 การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิว และกระแสรั่วไหลลูกถ้วยผิวเปียกเปรอะเปื้อน.....	73
4.3.8.1 อุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการ.....	73
4.3.8.2 การทดลองหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวสะอาดและเปรอะเปื้อนสภาพเปียก.....	75
4.3.8.3 ผลการทดลอง.....	76
4.3.8.4 สรุปผลการทดสอบ.....	86
4.4 การทดสอบหาคูณลักษณะสมบัติทางกลและอื่นๆ.....	91
4.4.1 การทดสอบความแข็งแรงทางกล.....	91
4.4.2 การทดสอบความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า.....	93
4.4.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน.....	95
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	98
5.1 สรุป.....	98

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	99
รายการอ้างอิง.....	100
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก หลักเกณฑ์การใช้ลูกถ้วยฉนวนแรงสูงในระบบจำหน่าย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	107
ภาคผนวก ข อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล การเปรียบเทียบ ความเป็นเชิงเส้น การตอบสนองต่อ ความถี่ และสัญญาณแรงดันในแต่ละส่วนวงจรย่อย.....	109
ภาคผนวก ค หลักการทำงานของโปรแกรมวัดกระแสรั่วไหล.....	117
ภาคผนวก ง อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์.....	118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	120

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
2.1 การแบ่งระดับความเปรอะเปื้อน.....	6
2.2 ปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน (mg) บนลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบ	10
2.3 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน	13
3.1 เปรียบเทียบค่ามิติ ที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815.....	31
4.1 ขนาดมิติของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับหลังจากทำการผลิต.....	41
4.2 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา.....	44
4.3 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ...	44
4.4 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำของพวงลูกถ้วยแขวน 52- 4.....	45
4.5 เปรียบเทียบค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำลูกถ้วยฉนวนทั้ง 3 ชนิด.....	45
4.6 การเกิดวาทไฟตามผิวแห้งกระแสสลับ 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับที่ระดับแรงดัน 72.5 kV.....	47
4.7 การเกิดวาทไฟตามผิวแห้งกระแสสลับ 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับที่ระดับแรงดัน 145 kV	48
4.8 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห้งอิมพัลส์วิกฤตชั่ววอก ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา และเคลือบสารกึ่งตัวนำ และพวงลูกถ้วยแขวน 52 - 4.....	51
4.9 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห้งอิมพัลส์วิกฤตชั่วลบ ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา และเคลือบสารกึ่งตัวนำ และพวงลูกถ้วยแขวน 52 - 4.....	51
4.10 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห้งอิมพัลส์วิกฤตชั่ววอกและชั่วลบของลูกถ้วยฉนวนทดสอบ	60
4.11 ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของลูกถ้วยฉนวนทดสอบ.....	62
4.12 ตัวประกอบแก้ไขที่ใช้ในการหาค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	68
4.13 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำสะอาดและสารละลายเปรอะเปื้อน.....	69
4.14 ค่า ESDD ที่คำนวณตามวิธีที่นำเสนอในวารสาร NGK.....	69
4.15 ค่า ESDD ที่คำนวณ ตามข้อเสนอแนะ IEC 507.....	70
4.16 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสะสมสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวน.....	71
4.17 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบธรรมดาผิวเปียกสะอาด.....	76
4.18 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกสะอาด...	76
4.19 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz พวงลูกถ้วยแขวน 52 - 4 ผิวเปียกสะอาด.....	77

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.20 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบธรรมดาผิวเปียกเปราะเปื้อน 4 เดือน.....	77
4.21 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกเปราะเปื้อน 4 เดือน.....	77
4.22 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบธรรมดาผิวเปียกเปราะเปื้อน 8 เดือน	78
4.23 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกเปราะเปื้อน 8 เดือน	78
4.24 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบธรรมดาผิวเปียกเปราะเปื้อน 12 เดือน	78
4.25 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกเปราะเปื้อน 12 เดือน	79
4.26 กระแสรั่วไหลผ่านผิวสะอาดลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา.....	79
4.27 กระแสรั่วไหลผ่านผิวสะอาดลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ.....	79
4.28 กระแสรั่วไหลผ่านผิวสะอาดพวงลูกถ้วยแขวน 52 –4.....	80
4.29 กระแสรั่วไหลผ่านผิวเปราะเปื้อน 4 เดือน ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา....	80
4.30 กระแสรั่วไหลผ่านผิวเปราะเปื้อน 4 เดือน ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ	80
4.31 กระแสรั่วไหลผ่านผิวเปราะเปื้อน 8 เดือน ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา....	81
4.32 กระแสรั่วไหลผ่านผิวเปราะเปื้อน 8 เดือน ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ	81
4.33 กระแสรั่วไหลผ่านผิวเปราะเปื้อน 12 เดือนลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา....	81
4.34 กระแสรั่วไหลผ่านผิวเปราะเปื้อน12 เดือนลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ	82
4.35 แรงดันวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยคอตันยาวแบบเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำ ที่ สภาวะต่างๆ.....	86
4.36 เปรียบเทียบกระแสรั่วไหลที่พิกัดแรงดัน 30 kV กับก่อนเกิดวาทไฟตามผิว.....	88
4.37 ผลการทดสอบแรงดึงทางกลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ.....	92
4.38 ผลการทดสอบความแข็งแรงร่วมทางกล และทางไฟฟ้า.....	94
4.39 ระดับอุณหภูมิในอ่างน้ำร้อนและอ่างน้ำเย็น.....	96
4.40 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนก่อนและหลังการทดสอบการเปลี่ยน อุณหภูมิโดยฉับพลัน.....	97

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 ลูกถ้วยฉนวนประเภท A และ B แบ่งตาม IEC 383 –1.....	1
2.1 การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ลูกถ้วยฉนวน.....	8
2.2 ขั้นตอนของการเกิดวาทไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน	9
2.3 การจับเกาะที่ส่วนต่างๆของผิวลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบที่เกิดจากสิ่งเปราะเปื้อนประเภท ควัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน	10
2.4 การเคลื่อนผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยวัสดุไม่ชอบน้ำ	12
2.5 ลักษณะปีกกริบของลูกถ้วยฉนวนคอตันและค่าที่แนะนำให้ใช้	14
2.6. ขั้นตอนการออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในสภาวะเปราะเปื้อน.....	15
2.7 ลูกถ้วยคอตันยาว	16
2.8 ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบคอตันยาวและแบบแขวน.....	17
2.9 การเพิ่มขึ้นของอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำหลังจากใช้งานเป็นระยะเวลา 25 ปี	18
2.10 การเกิดวาทไฟตามผิว.....	20
2.11 วงจรสมมูลของพวงลูกถ้วยฉนวน	21
2.12 การกระจายแรงดันไฟฟ้า	22
2.13 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลและแรงดันของลูกถ้วยฉนวนระบบ 750 kV	24
2.14 การวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้ CT เป็นตัวตรวจจับสัญญาณกระแส	25
2.15 การวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้ตัวต้านทาน	26
2.16 รูปคลื่นกระแสรั่วไหล	26
3.1 รูปแบบของปีกประเภทต่าง ๆ.....	29
3.2 ภาพสเกตลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ.....	30
3.3 ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในการวิจัยหลังจากทำการผลิต	31
3.4 แนวคิดพื้นฐานของการตรวจจับกระแสรั่วไหล.....	33
3.5 ส่วนอินพุตอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล.....	33
3.6 วงจรขยายที่ทำหน้าที่เป็นวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	34
3.7 วงจรฟูลเวฟเรกติฟาย.....	35
3.8 สัญญาณที่จุดต่าง ๆ ของวงจรฟูลเวฟเรกติฟาย.....	36
3.9 วงจรตรวจจับค่ายอด.....	37

ภาพประกอบ	หน้า
3.10 วงจรส่วนอิเล็กทรอนิกส์อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล.....	38
3.11 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล.....	39
3.12 หน้าจอแสดงผล แสดงค่าของสัญญาณกระแสรั่วไหลเทียบกับเวลา.....	40
4.1 (ก) การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำลูกถ้วยฉนวน ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	42
4.1 (ข) การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำลูกถ้วยฉนวน ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงบางพลี การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	43
4.2 ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลักเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งนำ เปรียบเทียบกับพวงลูกถ้วยแขวนและค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำมาตรฐานลูกถ้วยแท่งก้านตรงที่ใช้ในบริเวณประเอบือน.....	46
4.3 (ก) การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลัก.....	49
4.3 (ข) การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตพวงลูกถ้วยแขวน 52-4.....	50
4.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วววกและชั่วลบที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลักเคลือบธรรมดา.....	52
4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วววกและชั่วลบที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลักเคลือบสารกึ่งตัวนำ.....	52
4.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วววกและชั่วลบที่ใช้ทดสอบพวงลูกถ้วยแขวน 52- 4.....	53
4.7 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาบไฟตามผิวที่ทางคลื่นแรงดันชั่วววกของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลักเคลือบธรรมดา.....	54
4.8 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาบไฟตามผิวที่ทางคลื่นแรงดันชั่วลบของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลักเคลือบธรรมดา.....	55
4.9 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาบไฟตามผิวที่ทางคลื่นแรงดันชั่วววกของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลักเคลือบสารกึ่งตัวนำ.....	56
4.10 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาบไฟตามผิวที่ทางคลื่นแรงดันชั่วลบของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลักเคลือบสารกึ่งตัวนำ.....	57
4.11 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาบไฟตามผิวที่ทางคลื่นแรงดันชั่วววกของพวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4	58
4.12 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาบไฟตามผิวที่ทางคลื่นแรงดันชั่วลบของพวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4	59

ภาพประกอบ	หน้า
4.13 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์วิกฤตชั่ววอก และชั่วลบของลูกถ้วยฉนวนทดสอบ.....	60
4.14 ลูกถ้วยฉนวนที่แขวนรองรับสิ่งเปราะเปื้อนที่สถานีไฟฟ้าย่อยบางปู.....	63
4.15 ลักษณะการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวน.....	64
4.16 ลูกถ้วยฉนวนและอุปกรณ์ที่ใช้เก็บรวบรวมสิ่งเปราะเปื้อน.....	65
4.17 การเก็บรวบรวมสิ่งเปราะเปื้อน.....	65
4.18 การวัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย.....	66
4.19 การเก็บลูกถ้วยฉนวนระหว่างขนย้าย และระหว่างรอการทดสอบ.....	72
4.20 (ก) ไดอะแกรมวงจรที่ใช้ทดสอบหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวและกระแสรั่วไหล.....	73
4.20 (ข) วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวและกระแสรั่วไหลเนื่องจากความเปราะเปื้อน.....	74
4.20 (ค) การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนภายในกระโจมไอน้ำ.....	74
4.21 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวเปราะเปื้อน.....	75
4.22 (ก) กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา ผิวเปียกเปราะเปื้อน 12 เดือน ลูกที่ 1	82
4.22 (ข) กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา ผิวเปียกเปราะเปื้อน 12 เดือน ลูกที่ 2	83
4.22 (ค) กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ ผิวเปียกเปราะเปื้อน 12 เดือน ลูกที่ 1	83
4.22 (ง) กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ ผิวเปียกเปราะเปื้อน 12 เดือน ลูกที่ 2	84
4.22 (จ) กระแสรั่วไหลของพวงลูกถ้วย 52-4 4 ลูกเป็น 1 พวง ผิวเปียกสะอาด พวงที่ 1	84
4.22 (ฉ) กระแสรั่วไหลของพวงลูกถ้วย 52-4 4 ลูกเป็น 1 พวง ผิวเปียกสะอาด พวงที่ 2	85
4.23 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาที่สภาวะต่างๆ.....	86
4.24 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำที่สภาวะต่างๆ.....	87
4.25 เปรียบเทียบแรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้งสองแบบ.....	87
4.26 กระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดัน 30 kV ของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้งสองชนิด.....	89
4.27 กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้งสองชนิดก่อนการเกิดวาทไฟตามผิว.....	89
4.28 กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนตัวอย่างผิวเปียกสะอาดขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ป้อน....	90

ภาพประกอบ	หน้า
4.29 กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตันขาวปีกสลับผิวเปียกประอะเป็อน 8 เดือน.....	90
4.30 การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนเพื่อการทดสอบทางกล.....	91
4.31 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนเมื่อได้รับแรงดึง.....	92
4.32 การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนเพื่อทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงร่วมทางกลและไฟฟ้า.....	94
4.33 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนเมื่อได้รับการทดสอบความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า.....	95
4.34 การทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยนับปล้นของลูกถ้วยฉนวน.....	96
ข.1 อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล ส่วนประกอบและโครงสร้าง.....	109
ข.2 การเปรียบเทียบเฉพาะอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล.....	110
ข.3 การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล โดยทำการบันทึกค่าและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์.....	110
ข.4 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล บอร์ดที่ 1	111
ข.5 การตอบสนองต่อความถี่ของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล บอร์ดที่ 1.....	111
ข.6 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล บอร์ดที่ 2.....	112
ข.7 การตอบสนองต่อความถี่ของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล บอร์ดที่ 2.....	112
ข.8 สัญญาณแรงดันที่ส่วนต่างๆเมื่อมีกระแสรั่วไหล 0.5 mA	113
ข.9 สัญญาณแรงดันที่ส่วนต่างๆ เมื่อมีกระแสรั่วไหล 1 mA.....	114
ข.10 สัญญาณแรงดันที่ส่วนต่างๆเมื่อมีกระแสรั่วไหล 10 mA.....	114
ข.11 สัญญาณแรงดันที่ส่วนต่างๆเมื่อมีกระแสรั่วไหล 100 mA.....	115
ข.12 ออปแอมป์เริ่มทำงานผิดพลาดเมื่อมีกระแสรั่วไหลมากกว่า 550 mA.....	116

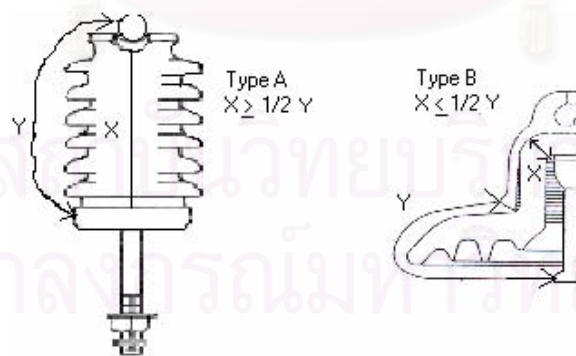
บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ลูกถ้วยฉนวน เป็นอุปกรณ์ฉนวนที่มีความสำคัญในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า และรองรับแรงกลจากน้ำหนักของสายไฟ ลูกถ้วยฉนวนที่มีอยู่ในระบบส่งจ่ายมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของระบบ หน้าที่ใช้งาน และสภาพแวดล้อมของการใช้งาน[1] สาเหตุหลักของการเกิดไฟฟ้าดับประการหนึ่ง เกิดจากการฉนวนของระบบผิดปกติ ซึ่งส่งผลให้เสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าลดลง

ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้กับระบบแรงดันสูง มักจะเป็นลูกถ้วยคอตันยาว (Long rod insulator) หรือ ลูกถ้วยแขวน (Cap and pin หรือ Suspension insulator) ที่ต่อกันเป็นพวง (string) ชนิดฉนวนโดยทั่วไปจะเป็นพอร์ซเลน (Porcelain) หรือแก้วเหนียว (Toughened glass) ตามมาตรฐาน IEC 383-1 [2] ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูงอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือประเภท A จะเป็นลูกถ้วยมีแนวเจาะทะลุเนื้อฉนวนยาวกว่าครึ่งหนึ่งของระยะวางไฟตามผิวที่เป็นอากาศรอบนอก ลูกถ้วย ตัวอย่างเช่น ลูกถ้วยแท่ง ลูกถ้วยแท่งก้านตรง และลูกถ้วยคอตันยาว และประเภท B ซึ่งเป็นลูกถ้วยมีแนวเจาะทะลุเนื้อฉนวนสั้นกว่าครึ่งหนึ่งของระยะวางไฟตามผิวที่เป็นอากาศรอบนอก ลูกถ้วย ได้แก่ ลูกถ้วยก้านตรง ลูกถ้วยก้านตรงแบบพีก และลูกถ้วยแขวน ตัวอย่างของลูกถ้วยฉนวนประเภท A และ B ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ลูกถ้วยฉนวนประเภท A และ B แบ่งตาม IEC 383-1 [2]

เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของลูกถ้วยฉนวนทั้งสองประเภทที่สำคัญก็คือลูกถ้วยฉนวนประเภท A เป็นแบบเนื้อตันจึงไม่มีโอกาสเจาะทะลุซึ่งตรงกันข้ามกับลูกถ้วยฉนวนประเภท B ที่มีความหนาของลูกถ้วยฉนวนแข็งน้อยจึงมีโอกาสเจาะทะลุได้

1.2 ที่มาของปัญหา

การใช้งานลูกถ้วยฉนวนมักจะประสบปัญหาการเกิดเจาะทะลุเนื้อฉนวนแข็ง หลังจากได้ติดตั้งใช้งานไประยะหนึ่ง ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่าที่มีความชันหน้าคลื่นสูง [3] และในกรณีที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งเปราะเปื้อน (Polluted environment) เช่น ฝุ่น ควัน สารเคมี และเกลือ เป็นต้น ผลกระทบจากสิ่งเปราะเปื้อนต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนอาจทำให้เกิดความไวตามผิวได้ง่ายขึ้น อันเป็นต้นเหตุให้เกิดความผิดปกติในระบบส่งจ่าย

การแก้ปัญหาการเกิดเจาะทะลุอาจจะทำได้โดยการเพิ่มคุณภาพของเนื้อฉนวนให้มีความแข็งแรงขึ้น หรือใช้ลูกถ้วยฉนวนประเภท A เช่น ลูกถ้วยฉนวนคู่คอตัน หรือลูกถ้วยคอตันยาวทดแทนลูกถ้วยฉนวนซึ่งเป็นลูกถ้วยฉนวนประเภท B ได้ ส่วนการแก้ปัญหาการเกิดความไวตามผิว อันเนื่องมาจากความเปราะเปื้อนนั้นทำได้โดยการออกแบบมิติของลูกถ้วยให้เหมาะสมกับระดับของความเปราะเปื้อน หรือใช้ลูกถ้วยฉนวนที่ทำมาจากวัสดุชนิดอื่นที่ไม่ชอบน้ำเช่น ลูกถ้วยยางซิลิโคน หรือลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น [4]

1.3 ผลงานการศึกษาในอดีต

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของความเปราะเปื้อนต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนได้มีการทำกันอย่างแพร่หลายทั่วโลกตั้งแต่ต้นทศวรรษที่ 1970[5] สำหรับในประเทศไทยนั้น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตได้เริ่มต้นศึกษาโดยใช้เครื่องวัดระดับมลภาวะตั้งแต่ปีพ.ศ.2531[6] และในปี พ.ศ.2533 ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวนในเขต3[7] และศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ศึกษาเรื่องลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยเปราะเปื้อนในปี 2541 [5] จากรายงานการศึกษาวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเคลือบสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นทางหนึ่งที่แก้ปัญหาคความเปราะเปื้อน แต่งานวิจัยดังกล่าวใช้ลูกถ้วยคอตันยาวจากต่างประเทศ จึงสมควรที่จะได้ศึกษาพัฒนาเทคโนโลยีในเรื่องนี้ขึ้นในประเทศไทย ซึ่งจะสอดคล้องกับการที่ลูกถ้วยประเภท A คอตันนั้นสามารถที่จะแก้ปัญหาคการเจาะทะลุได้ด้วย เพื่อให้เกิดความเข้าใจในลักษณะสมบัติ และความเหมาะสมในการใช้งานของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับบแบบเคลือบธรรมดาและลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับบแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำจึงเห็นสมควรอย่างยิ่งที่จะได้มีการศึกษาวิจัยลักษณะสมบัติของลูกถ้วยชนิดนี้ต่อไป

1.4 ขอบข่ายของงานวิจัย

ขอบข่ายของงานวิจัยนี้คือทำการออกแบบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดา และแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำขึ้นมาเพื่อศึกษาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลในสภาพ สะอาด และสภาพเปรอะเปื้อนตามธรรมชาติ โดยมีระยะศึกษาวิจัย 24 เดือน การทดลองจะทำตาม IEC [2,8,9] และ ANSI [10] ดังรายละเอียดดังนี้

1) ศึกษาลักษณะรูปร่างและคุณสมบัติของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดา และแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับลูกถ้วยแท่งและพวงลูกถ้วยแขวน

2) ทำการออกแบบรูปลักษณะ มิติ ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดา และแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำให้กับ โรงงานอุตสาหกรรม เพื่อผลิตลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้ง 2 แบบ ที่มีลักษณะรูปร่างดังที่ต้องการ

3) นำลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้ง 2 แบบ ไปติดตั้งในสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยบางปู การไฟฟ้า นครหลวง โดยไม่ต้องรับแรงดัน ซึ่งเป็นสถานที่ที่มีความเปรอะเปื้อนทางเคมีและมีความเปรอะเปื้อนจากไอเกลือเนื่องจากอยู่ใกล้ โรงงานอุตสาหกรรมและใกล้ชายฝั่งทะเล โดยใช้ลูกถ้วยคอตัน ยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดา 12 ลูก และลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำ 9 ลูก

4) ออกแบบปรับปรุงกระโจมไอน้ำเพื่อใช้ในการทดลองลูกถ้วยฉนวนเปรอะเปื้อน

5) ออกแบบและทำการสร้างอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลต้นแบบ ปรับปรุงให้อุปกรณ์วัด กระแสรั่วไหลใช้พลังงานน้อยลง เพิ่มขีดความสามารถให้อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลสามารถเก็บ บันทึกรายข้อมูล รวมทั้งแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ได้

6) ทำการทดลองหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลในสภาวะแห้งผิวสะอาดของ ลูกถ้วยฉนวนทั้ง 2 แบบ

7) นำลูกถ้วยฉนวนที่ติดตั้งไว้กลับมาทดลองหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าในสภาวะเปรอะ เปื้อนตามธรรมชาติ เมื่อครบกำหนดระยะเวลาการติดตั้ง 4 เดือน 8 เดือน และ 12 เดือน ตามลำดับ

8) ทำการวัดระดับสิ่งเปรอะเปื้อน (Equivalent salt deposit density : ESSDD) ของสถานี ไฟฟ้าย่อยบางปู ทุก 4 เดือน 8 เดือน และ 12 เดือน ตามลำดับ

9) ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

10) สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ลูกถ้วยฉนวนในสถานะเปรอะเปื้อน

สิ่งเปรอะเปื้อนที่จับเกาะอยู่บนผิวของลูกถ้วยฉนวน เมื่อเปียกน้ำอันอาจเกิดจากหมอกหรือความชื้นในตอนเช้า หรือฝนที่ตกปรอยๆ สภาพนำไฟฟ้าของผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้กระแสรั่วไหลตามผิวของลูกถ้วยฉนวนมีค่าเพิ่มมากขึ้นและเป็นสาเหตุให้เกิดความไวตามผิวได้ง่าย การเกิดความไวตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อนขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำ ปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของการเกิดความไวตามผิว [11]

2.1 สิ่งเปรอะเปื้อน

2.1.1 ประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อน

การแบ่งประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนโดยทั่วไปแล้วนิยมแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ตามสภาพแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งาน[11] ได้แก่ สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเล สิ่งเปรอะเปื้อนจากอุตสาหกรรม สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเลทราย และสิ่งเปรอะเปื้อนจากบริเวณอื่น ๆ

1) สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเล ได้แก่ พวกเกลือทะเล (Sea salt หรือ Sodium chloride ; NaCl) การสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนเหล่านี้บนผิวลูกถ้วยฉนวน เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะด้วยกันคือ การสะสมแบบรวดเร็ว (Rapid pollution) เกิดขึ้นในกรณีที่มีพายุขนาดใหญ่พัดหอบเอาเกลือทะเลเข้ามาเช่น พายุไต้ฝุ่น เป็นต้น และการสะสมแบบธรรมดา (Ordinary pollution) เป็นการสะสมที่ใช้เวลานานก่อนข้างนานเกิดจากลมทะเลที่พัดเป็นฤดูกาล ตามปกติแล้วระดับของสิ่งเปรอะเปื้อนจะลดลงไปเมื่อลึกลงไปจากชายฝั่งทะเล อย่างไรก็ตามอาจจะพบเกลือทะเลที่ระยะห่างจากชายฝั่งทะเลถึง 100 กิโลเมตรได้ [12]

2) สิ่งเปรอะเปื้อนจากอุตสาหกรรม ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในบริเวณเขตอุตสาหกรรมจะเปรอะเปื้อนครวและเขม่าที่ปล่องออกมาจากปล่องท่อไอเสีย ระดับของสิ่งเปรอะเปื้อนชนิดนี้ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อห่างไกลจากโรงงานมากขึ้น สิ่งเปรอะเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายชนิด มีส่วนผสมและองค์ประกอบทางด้านเคมีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมนั้น ๆ

3) สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเลทราย ทะเลทรายเป็นบริเวณที่สิ่งเปรอะเปื้อนสามารถที่จะสะสมบนผิวลูกถ้วยได้เป็นจำนวนมากเนื่องจากปริมาณของฝนที่ตกเพียงเล็กน้อย ทะเลทรายที่อยู่ห่างไกลออกไปจากชายฝั่งทะเล จะมีสิ่งเปรอะเปื้อนที่คล้ายๆกับสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทฝุ่น แต่สำหรับทะเลทรายที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลนั้นนอกจากสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทฝุ่นแล้วยังจะมีเกลือทะเลผสมอยู่ด้วย

4) สิ่งเปื้อนอื่นจากบริเวณอื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวไปแล้ว เช่น เถ้า หรือ ผุ่น ภูเขาไฟ หรือ ปุ๋ย อาจเกิดขึ้นโดยการฉีดพ่นให้กับต้นไม้ พืช ผัก หรือ การเผาไหม้ของวัสดุต่างๆ นอกจากนี้แล้วจากบทความฉบับ[12] ได้กล่าวถึงสิ่งเปื้อนชนิดนี้โดยเน้นไปที่สิ่งเปื้อนอื่นจากฝุ่น (Dust contamination) โดยได้อธิบายว่าเกิดจากการพัดพาเอาทราย หรือ ฝุ่นที่เกิดจากดินไปเกาะติดลูกถ้วยฉนวน ระดับความรุนแรงของสิ่งเปื้อนอื่นจากฝุ่นค่อนข้างต่ำ องค์ประกอบของ สิ่งเปื้อนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพพื้นที่

2.1.2 การวัดและการแบ่งระดับของความเปื้อน

ระดับของความเปื้อนนั่นจะเป็นตัวกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบมิติที่เหมาะสมของลูกถ้วยฉนวนและอาจจะนำไปใช้กำหนดระดับความเปื้อนที่จะใช้ในการทดสอบหาคณะลักษณะสมบัติลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปื้อนจำลอง ก่อนที่จะนำลูกถ้วยฉนวนที่ผ่านการออกแบบไปติดตั้งใช้งานจริง มาตรฐาน IEC 815 [13] ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการหาค่าและการแบ่งระดับของความเปื้อนดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1.2.1 การวัดค่าระดับความเปื้อน

การวัดค่าระดับความเปื้อนที่สถานที่ที่ติดตั้งลูกถ้วยฉนวน มีหลายวิธีดังนี้

- 1) การวัดค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรของสิ่งเปื้อน โดยวิธี directional gauges
- 2) การวัดค่าปริมาณการสะสมสิ่งเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนเทียบกับปริมาณเกลือ(NaCl) ซึ่งจะให้ค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ได้จากการนำสิ่งเปื้อนมาละลายน้ำที่มีปริมาณเท่ากันซึ่งจะเรียกวิธีนี้เรียกว่าการหาค่า ESDD (Equivalent salt deposit density)

- 3) การนำเอาข้อมูลทางสถิติจำนวนครั้งของการเกิดวาบไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยที่มีความยาวแตกต่างกันมาทำการวิเคราะห์

- 4) การวัดค่าความนำไฟฟ้าเชิงผิวของลูกถ้วยฉนวนตัวอย่าง

- 5) การวัดค่ากระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนขณะที่ได้รับแรงดันใช้งานปกติ(เป็นการหาค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณา)

การวัดระดับความเปื้อนแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันกล่าวคือ วิธีที่ 1 และ 2 สามารถทำได้โดยง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง แต่วิธีที่ 1 นั้นไม่ได้ให้ข้อมูลลักษณะช่วงเวลาการสะสมและระดับของความเปื้อนออกมาโดยตรง วิธีที่ 2 ข้อมูลที่ได้จะเป็นระดับของความเปื้อนที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ผิวลูกถ้วยฉนวนมีความเปียกชื้น ความถูกต้องของการวัดทั้ง 2 วิธีนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่บ่อยในการวัด ถ้าการสะสมของสิ่งเปื้อนเกิดขึ้นไม่เร็วนักก็อาจจะทำการวัดเดือนละครั้ง หรือเว้นระยะห่างกว่านี้ แต่ถ้าการสะสมของสิ่งเปื้อนเกิดขึ้น

รวดเร็วก็น่าจะต้องทำการวัดที่ขึ้น สำหรับวิธีที่ 3 นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือทดสอบที่มีราคาแพง ข้อมูลที่ได้จะถูกต้องเฉพาะลูกถ้วยที่มีความยาวใกล้เคียงกับลูกถ้วยที่พิจารณา และใช้งานที่ระดับแรงดันใกล้เคียงกัน สองวิธีสุดท้ายต้องการแหล่งพลังงานและอุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูลต่อเนื่อง วิธีการประเมินค่าระดับของความเปราะเปื้อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่การวัดค่า ESDD การวัดค่าความต้านทานของผิว และการวัดค่ากระแสรั่วไหล [14,15]

การหาค่าระดับความเปราะเปื้อนนั้นเพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น IEC 815 [13] ได้แนะนำให้พิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ต่อไปนี้เพิ่มเติมคือ ลักษณะของพื้นที่แต่ละแห่งที่สัมพันธกับระดับความเปราะเปื้อน และข้อมูลของเหตุการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งาน ลูกถ้วยฉนวน ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญมาทำการวิเคราะห์

2.1.2.2 การแบ่งระดับความเปราะเปื้อน

ตามมาตรฐาน IEC 815 [13] ได้แบ่งระดับความเปราะเปื้อนออกเป็น 4 ระดับ ตามสภาพพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน

ระดับของความเปราะเปื้อน	ตัวอย่าง
1) เล็กน้อย (Light)	<ul style="list-style-type: none"> - บริเวณที่ปลอดภัยจากการประกอบอุตสาหกรรม และชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปริมาณน้อย - บริเวณที่มีความหนาแน่นในการประกอบอุตสาหกรรมหรือที่อยู่อาศัยน้อยโดยที่จะต้องเป็นบริเวณที่มีลมพัดผ่านหรือมีฝนตกบ่อย - บริเวณเขตเกษตรกรรมหรือบริเวณที่อยู่ใกล้ ๆ ภูเขา โดยที่พื้นที่ทั้งหมดเหล่านี้ จะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่น้อยกว่า 10-20 กิโลเมตร และจะต้องไม่ได้รับลมทะเลโดยตรง
2) ปานกลาง (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> - บริเวณเขตอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มีการสร้างฝุ่นหรือควันออกมา และอาจจะเป็นบริเวณย่านชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปานกลาง - บริเวณย่านชุมชนหรือเขตอุตสาหกรรมหนาแน่นแต่จะต้องมีลมพัดผ่านหรือฝนตกปรอยๆ - บริเวณที่มีลมทะเลพัดผ่าน ซึ่งจะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลพอสมควร (ควรจะห่างหลาย ๆ กิโลเมตร)

3) สูง (Heavy)	<ul style="list-style-type: none"> - เขตอุตสาหกรรมหนาแน่นหรือบริเวณชานเมืองของเมืองใหญ่ที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนสูง - บริเวณที่ได้รับลมทะเลที่รุนแรงโดยตรงหรือชายฝั่งทะเล
4) สูงมาก(Very heavy)	<ul style="list-style-type: none"> - บริเวณที่เป็นเขตรับฝุ่นควันจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยเฉพาะฝุ่นที่เป็น thick conductive deposit - บริเวณที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลมาก ๆ ซึ่งมีการรับเอาสิ่งปะระเปื้อนที่พัดมาจากทะเลโดยตรง - ทะเลทรายที่มีโอกาสฝนตกน้อยมาก จะต้องรับลมที่นำเอาทรายและไอเกลือเข้ามา

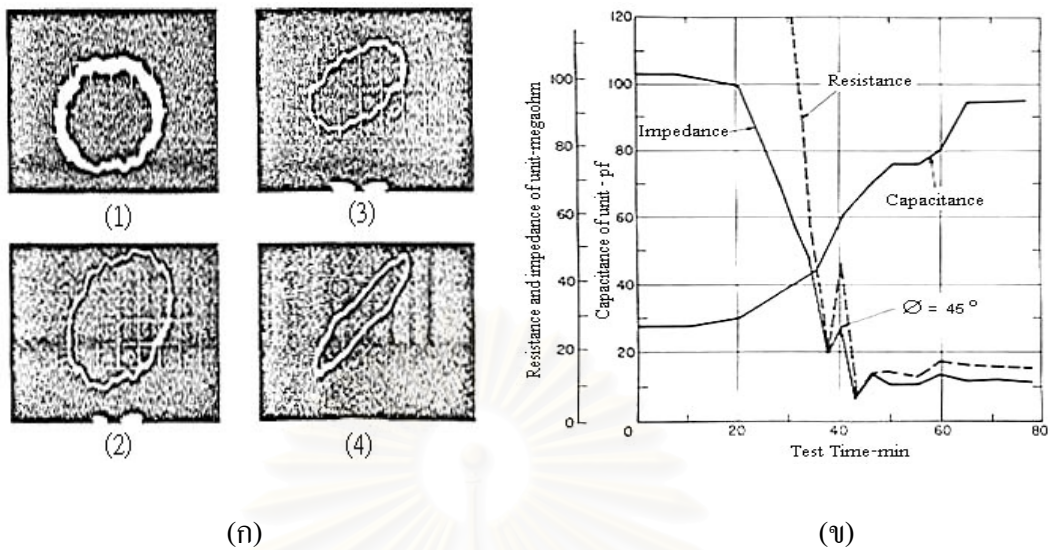
หมายเหตุ 1) บริเวณเกษตรกรรมในข้อ 1 ถ้ามีการใช้ปุ๋ยโดยการฉีดพ่นหรือมีการเผาไหม้ของกากขี้มูลพืชต่างๆ เมื่อมีลมพัดนำเอาสิ่งเหล่านั้นแพร่กระจายออกไป ระดับความเปราะเปื้อนอาจจะอยู่ในระดับสูง

2) บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลหรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลในข้อ 2 หรือ 3 ระยะทางที่พิจารณาจะต้องขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศของชายฝั่งทะเล และลักษณะของลมทะเลที่เกิดขึ้นด้วย

2.2 การเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณปรอะเปื้อน

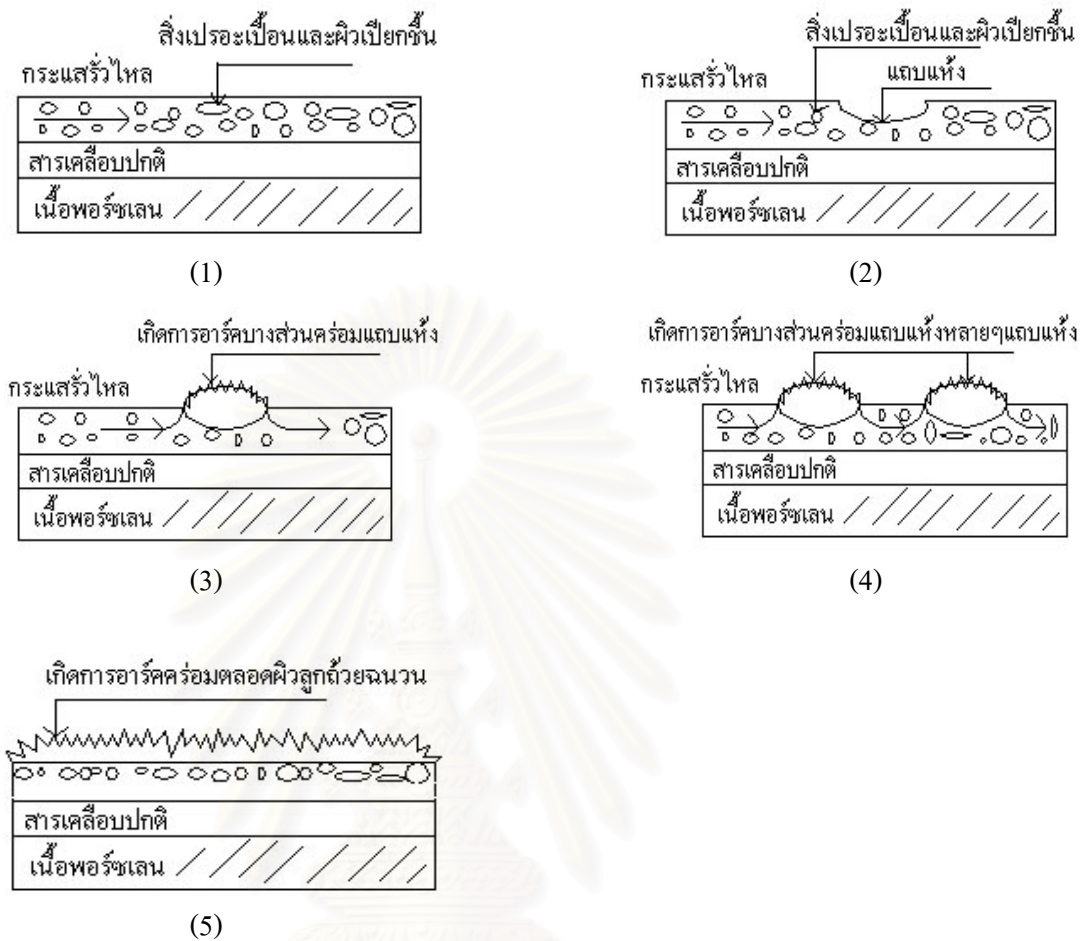
การศึกษากลไกการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องมาจากการเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนได้มีการศึกษามานานกว่า 40 ปี แต่ก็ยังไม่สามารถที่จะเข้าใจได้อย่างถ่องแท้[16] ความพยายามที่จะทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวจากอดีตที่ผ่านมา เริ่มต้นจากการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกายภาพของการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน[16-19] และได้มีความพยายามที่จะเสนอรูปแบบของสมการและโมเดลขึ้นมาเพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว [17,18,20-23]

กลไกการเกิดวาบไฟตามผิวเริ่มต้นจากสิ่งเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวนได้รับความชื้นจากหมอกหรือมีฝนตกเบาๆ สภาพนำไฟฟ้าที่ผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลที่เกิดจะมีขนาดเพิ่มตามไปด้วย โดยที่อิมพีแดนซ์ของผิวของลูกถ้วยฉนวน (Surface impedance) จะเปลี่ยนสภาพจากเชิงตัวเก็บประจุในตอนเริ่มต้นไปเป็นแบบเชิงความต้านทานเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ลูกถ้วยฉนวน (ก) รูปลิสซัจว์ (Lissajour figure) แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกถ้วยฉนวนในสภาพผิวเปียกก่อนเกิดวาบไฟตามผิว (ข) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิกของอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกถ้วยฉนวน[16]

กระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิของความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดผิวลูกถ้วย โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส บริเวณที่มีความหนาแน่นกระแสสูงเช่นบริเวณคอคอดจะเกิดความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ผิวของลูกถ้วยฉนวนบริเวณนั้นแห้งก่อน มีลักษณะเป็นส่วนเล็กๆแคบๆมีความกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตรเรียกว่าแถบแห้ง(Dry band) [16] บริเวณแถบแห้งนี้มีสภาพความต้านทานสูง ไม่สามารถที่จะนำกระแสได้ ทำให้แรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่แถบแห้ง ถ้าความคงทนต่อความเป็นฉนวนของอากาศบริเวณแถบแห้งมีค่าน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้ง จะเกิดการเบรกดาวน์ของอากาศรอบแถบแห้งขึ้น เรียกว่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน(Partial discharge) กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นอาจทำให้ขนาดของแถบแห้งขยายออกไป ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จต่อไปอีกการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะหยุดลง ถ้ามีแถบแห้งหลายๆส่วนที่อยู่ใกล้กันเกิดพัฒนาการจนเชื่อมต่อกันได้ ก็จะเกิดวาบไฟตามผิวดกคร่อมตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน ขั้นตอนของการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากสิ่งแปรอะเป็นแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนของการเกิดฉาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน

2.3 แนวทางการแก้ไขการเกิดฉาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน

วิธีการป้องกันไม่ให้เกิดฉาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อน มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 การลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวน

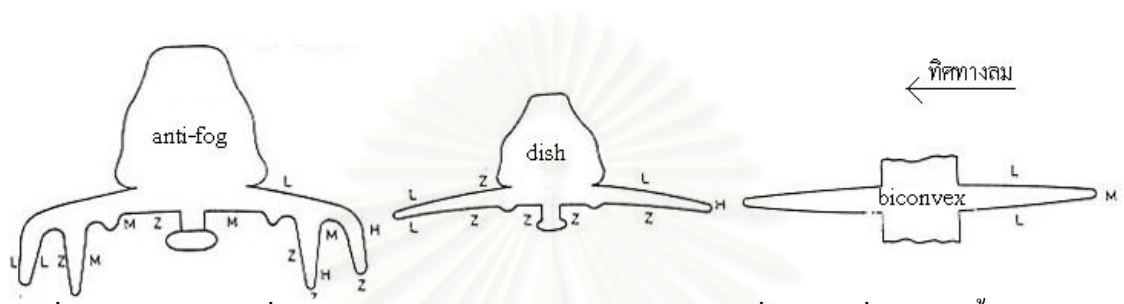
การป้องกันการเกิดฉาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนโดยวิธีการลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนได้แก่การทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนตามระยะเวลาที่กำหนด หรือ การใช้ลูกถ้วยฉนวนประเภทที่มีรูปทรงที่ยากแก่การจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อน (Aerodynamic profiles)

1) การฉีดล้างทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนตามระยะเวลาที่เหมาะสม [12,24,25]

การฉีดล้างทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนนั้นเป็นวิธีดั้งเดิม จะทำเมื่อลูกถ้วยฉนวนเริ่มสกปรก สามารถทำได้ทั้งในขณะที่ดับกระแสไฟฟ้า (De-energize) และขณะจ่ายกระแสไฟฟ้า (Hot line) โดยจะต้องพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ (Conductivity) ที่ใช้ในการฉีด ระยะห่าง และ

แรงดันของน้ำ(Minimum distance and nozzle pressure) ทิศทางลม (Wind direction) ตลอดจนลักษณะการติดตั้งของลูกถ้วย

2) การออกแบบลูกถ้วยฉนวนให้มีรูปร่างที่ทำให้การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนทำได้ยากขึ้น[24,25] จากผลการศึกษาการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวนที่มีรูปร่างต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.3 พบว่าลูกถ้วยฉนวนแบบ biconvex มีสิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะน้อยที่สุด รายละเอียดการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.3 การจับเกาะที่ส่วนต่างๆของผิวลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบที่เกิดจากสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทควัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน [24]

- โดยที่ H คือ บริเวณที่มีการจับเกาะหนาแน่น
- M คือ บริเวณที่มีการจับเกาะปานกลาง
- L คือ บริเวณที่มีการจับเกาะเบาบาง
- Z คือ บริเวณที่ไม่มีการจับเกาะหรือมีการจับเกาะที่น้อยมาก

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน (mg) บนลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบ [24]

ความเร็วลม	ลูกถ้วยแบบ anti- fog	ลูกถ้วยแบบ disk	ลูกถ้วยแบบ biconvex
9 m/s	630	390	40
1.5 m/s	150	10	น้อยมาก

ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบรูปร่างของลูกถ้วยฉนวนคือการทำความสะอาดตัวเองโดยธรรมชาติ เมื่อมีลมพัดผ่านหรือฝนตก ลูกถ้วยฉนวนแบบ anti-fog นั้นออกแบบให้มีระยะรั้วสูงขึ้นแต่จะพบว่าโอกาสที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะมิได้สูงสุด ลูกถ้วยแบบ disk นั้นโอกาสที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะมีมากกว่าลูกถ้วยแบบ biconvex แต่ก็มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตนเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติได้ดีกว่า

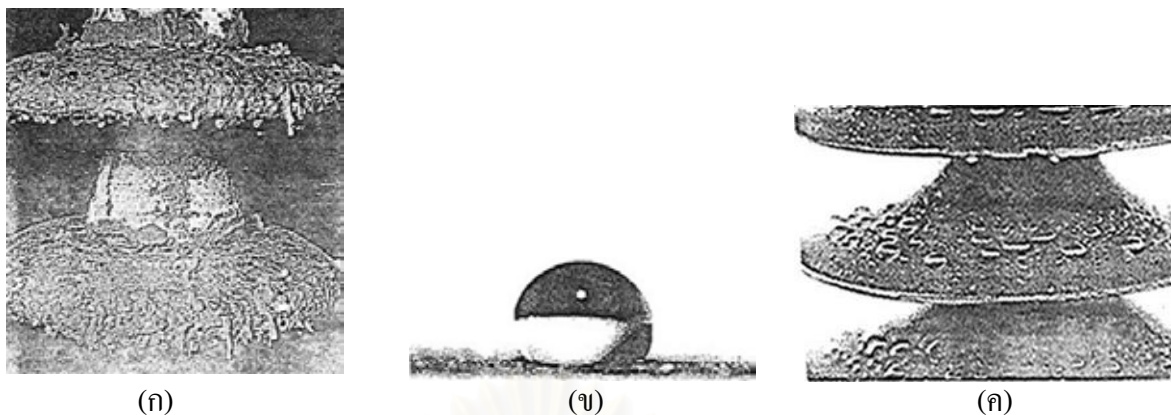
2.3.2 การป้องกันการเกิดสภาพนำไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวน [24,25]

สภาพนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวน เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลตามผิว จะเป็นผลให้ลูกถ้วยฉนวนมีโอกาสที่จะเกิดควาบไฟตามผิวได้ง่าย การป้องกันไม่ให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าที่มีลักษณะฟิล์มนำไฟฟ้ากระจายอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดผิวลูกถ้วยฉนวนสามารถทำได้โดยการเคลือบผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Water repellent หรือ hydrophobic material) เช่น พวกร Silicon pastes หรือ Silicone elastomer หรือการใช้ลูกถ้วยยางซิลิโคน (Silicone rubber insulator) มีรายละเอียดดังนี้

1) Silicone pastes เป็นส่วนผสมระหว่าง Silicone oil กับสารประเภท Carrier powder เช่น Silica flour เมื่อเคลือบแล้วจะมีรูปร่างคงตัวในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง +200 องศาเซลเซียส Silicone pastes มีคุณสมบัติดูดซับสิ่งเปราะเปื้อน โดยเฉพาะสิ่งเปราะเปื้อนที่เป็นของแข็ง เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว Silicone paste จะอึดตัวไม่สามารถที่ดูดซับสิ่งเปราะเปื้อนได้อีก จะต้องล้างสิ่งเปราะเปื้อนและสารเคลือบออกและทำการเคลือบใหม่ โดยทั่วไปการเคลือบลูกถ้วยฉนวนด้วย Silicone pastes ในแต่ละครั้ง ลูกถ้วยฉนวนสามารถใช้งานได้ในพื้นที่เปราะเปื้อนประมาณ 3 ปี โดยที่การอึดตัวของ Silicone paste จะขึ้นอยู่กับความหนาของ Silicone paste ที่ใช้เคลือบด้วย ปัจจุบันมีการพัฒนาสารชนิดอื่นเพื่อนำมาเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวน เช่น Basic hydrocarbon grease หรือ Controlled-viscosity gel หรือ Petrolatum based เป็นต้น

2) Silicone elastomer หรือ Fluorocarbon มีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายสีสามารถผสมให้เจือจางเพื่อให้เหมาะสมในการทาหรือพ่นเคลือบ การเคลือบลูกถ้วยฉนวนด้วย Silicone elastomer ปกติแล้วจะมีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร Silicone elastomer จะมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ จะทำให้แรงดึงดูดระหว่างน้ำกับผิวที่เคลือบไว้มีค่าน้อย ในสภาพฝนที่ตกปรอยๆ หยดน้ำที่อยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวนจะรวมตัวกันเป็นรูปทรงกลมกลิ้งตกลงไปจากผิวลูกถ้วยฉนวนเหมือนกับน้ำที่กลิ้งบนใบบอน หรือจะแยกเกาะเป็นเม็ดๆ ไม่เชื่อมต่อกันทำให้ทางเดินของกระแสรั่วไหลตามผิวลูกถ้วยฉนวนไม่ต่อเนื่องและลดน้อยลง โอกาสที่ลูกถ้วยฉนวนจะเกิดควาบไฟตามผิวจึงมีค่าน้อยลง

3) Silicone rubber insulator เป็นลูกถ้วยฉนวนที่ทำด้วยยางซิลิโคน มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง แต่เมื่อติดตั้งใช้งานกลางแจ้ง จะต้องรับแสงแดด โอโซน หรือฝนตกโดยตรง หรือในกรณีที่มีการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนประเภทไอเกลือและสารเคมีบนผิวลูกถ้วยฉนวนทำให้คุณสมบัติไม่ชอบน้ำลดลง คุณลักษณะสมบัติและความเหมาะสมในการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนชนิดนี้ยังอยู่ในขั้นตอนการศึกษาวิจัย



รูป 2.4 การเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยวัสดุไม่ชอบน้ำ (ก) การจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนที่เคลือบด้วย Hydrocarbon grease หลังจากติดตั้งใช้งานเป็นเวลา 3 ปี ในบริเวณเปราะเปื้อน[24] (ข) หยคน้ำทรงกลมบนผิวลูกถ้วยฉนวนซิลิโคน (ค) ลักษณะการจับเกาะของหยคน้ำบนผิวของลูกถ้วยฉนวนซิลิโคน [26]

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับลักษณะสมบัติการใช้งานลูกถ้วยฉนวนชนิดซิลิโคนมีการทำการศึกษาวินิจฉัยอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538 จนถึงปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของซิลิโคนอันได้แก่ มีน้ำหนักเบา แข็งแรง สามารถที่จะออกแบบเป็นรูปร่างลักษณะต่างๆ ได้ตามที่ต้องการ ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้งานลูกถ้วยฉนวนซิลิโคนมีการเผยแพร่อยู่ในบทความวารสารทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าชั้นนำของโลก เช่น IEE หรือ IEEE อยู่เป็นจำนวนมาก

2.3.3 การเพิ่มความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยฉนวน

การเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้นถ้าลูกถ้วยฉนวนมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามผิวสูงขึ้น อาจจะทำให้ได้โดยการเพิ่มระยะรั่ว(Leakage distance) ของลูกถ้วยฉนวนหรือการใช้ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ

1) การเพิ่มระยะรั่ว (Leakage distance) ของลูกถ้วยฉนวนทำได้โดยการติดตั้ง Creepage extender หรือการใช้ลูกถ้วยฉนวนที่มีระยะรั่วมากขึ้น[12,24,25] การเพิ่มระยะรั่วของลูกถ้วยฉนวนให้มากขึ้นนั้นทำให้กระแสรั่วไหลเกิดขึ้นน้อยลงเช่น ลูกถ้วยฉนวนแบบ Anti fog มาตรฐาน IEC 815[13] ได้แนะนำค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance (mm/kV) ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปราะเปื้อนโดยเป็นฟังก์ชันของระดับของสิ่งเปราะเปื้อนของสถานที่นั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยที่ ระยะรั่ว คือ ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดตามผิวลูกถ้วยฉนวนระหว่างอิเล็กโทรด และอาจจะมีการพิจารณาปัจจัยอย่างอื่นอีกเช่น ระยะอาร์ก (Arcing distance) คือ ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดผ่านอากาศหรือระยะที่วัดตามแนวเกิดอาร์ก และ ความยาวปกติ (Nominal length) คือ ระยะที่วัดระหว่างจุดศูนย์กลางของรูหรือช่องของฝาครอบโลหะด้านบนและด้านล่างของลูกถ้วยฉนวน

ตารางที่ 2.3 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน [13]

ระดับของความเปรอะเปื้อน	ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance (mm/kV)
เล็กน้อย	16
ปานกลาง	20
สูง	25
สูงมาก	31

โดยที่ บริเวณที่มีระดับของความเปรอะเปื้อนเบาบาง ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance อาจจะมีค่าน้อยกว่า 16 mm/kV ก็ได้ แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 12 mm/kV (ค่าต่ำสุดที่ยินยอมให้ใช้) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การดูแลบำรุงรักษา และบริเวณที่มีระดับของความเปรอะเปื้อนสูงมากเป็นพิเศษ ค่าที่ระบุไว้คือ 31 mm/kV อาจจะไม่เพียงพอที่จะสามารถป้องกันการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวได้ ดังนั้นควรพิจารณาใช้ลูกถ้วยฉนวนที่มีค่า Nominal specific creepage distance เพิ่มขึ้น โดยจะขึ้นอยู่กับ การบำรุงรักษาและผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ และประสบการณ์ผู้ออกแบบ บางกรณีอาจจะต้องพิจารณาควบคู่ไปกับการวางแผนการทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนหลังจากติดตั้งใช้งานหรือการใช้สารเคลือบเคลือบลูกถ้วยฉนวนอีกด้วย

2) การใช้ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ ผลของการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทำให้มีกระแสรั่วไหลตามผิวเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย การกระจายของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนจะสม่ำเสมอตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน จึงไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์แถบแห้งอันเป็นสาเหตุการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวได้โดยง่าย [4,6,24,27]

2.4 การออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน

2.4.1 เงื่อนไขการเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนในสถานะเปรอะเปื้อน

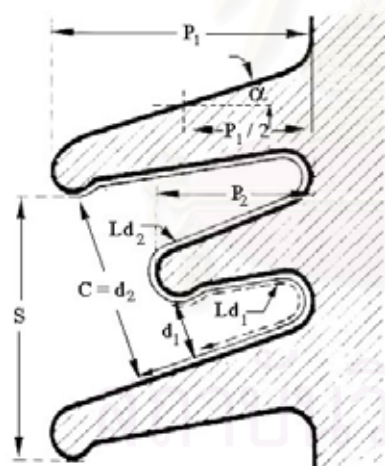
เงื่อนไขการเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนจะพิจารณาถึงประเภทของลูกถ้วยฉนวน และสภาพแวดล้อมที่จะนำลูกถ้วยฉนวนไปติดตั้งใช้งาน ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำมาใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อนควร จะได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดควาไฟฟ้าตามผิวได้ง่าย ปัญหาการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวของลูกถ้วยฉนวนในสถานะเปรอะเปื้อนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือ

1) ระดับของความเปรอะเปื้อนและชนิดของสิ่งเปรอะเปื้อน รวมทั้งสภาพแวดล้อมบริเวณที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งาน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือทิศทางการพัดของลม โดยทั่วไประดับของความเปรอะเปื้อนจะพิจารณาเป็นค่า ESDD ค่า ESDD ที่จะนำมาพิจารณานั้นจะเป็นค่าที่ได้จากการวัดทดสอบมาเป็นระยะเวลาานพอสมควร ค่าที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ทางด้านสถิติ ค่าสูงสุดของ ESDD จะนำมาใช้ในการพิจารณาเพื่อการออกแบบ เมื่อพิจารณาประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนดังที่ได้

กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 2.1.1 พบว่าในกรณีสิ่งเปราะเปื้อนจากทะเล เกลือทะเลจะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่จะทำให้เกิดความไฟตามผิว และในกรณีสิ่งเปราะเปื้อนจากทะเลทราย พกวัตถุเฉื่อย(Inert material)จะมีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า(Withstand voltage) ของลูกถ้วยฉนวนโดยตรง [12,16]

2) ความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะมีความสัมพันธ์กับการเกิดความไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน การออกแบบจะต้องคำนึงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่เกิดแรงดันเกิน ค่าแรงดันที่จะใช้ออกแบบเพื่อให้เป็นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนนั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีระดับเผื่อ(Margin) สูงกว่าแรงดันเฟสใช้งานคือประมาณ 10-20% กรณีการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ(Transient overvoltage) ความคงทนต่อแรงดันเกินจะมีค่าลดลง ถ้าผิวของลูกถ้วยฉนวนมีความเปราะเปื้อน [12,16]

3) รูปร่างของลูกถ้วยฉนวน กำหนดด้วยการขึ้นรูปของวัสดุในกระบวนการผลิต[28] รูปร่างและขนาดของลูกถ้วยฉนวนจะสัมพันธ์โดยตรงกับการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วย การทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยลมและฝน รวมทั้งการกระจายของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของลูกถ้วยฉนวนอีกด้วย IEC 815 [13] ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบปีกของลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



- $C > 30$ มม.
- $S/P \geq 0.8$
- $Ld/d < 5$
- $P_1 - P_2 \geq 15$ มม.
- $\alpha > 5^\circ$
- $C.F. \leq 4$ ระดับสูงและสูงมาก
- $P.F. > 0.7$ ระดับสูงและสูงมาก

รูปที่ 2.5 ลักษณะปีกครีบบนของลูกถ้วยฉนวนคอตันและค่าที่แนะนำให้ใช้ [13]

- โดยที่
- C คือ ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน
 - S คือ ระยะห่างระหว่างชั้นปีกในแนวตั้งของปีกคู่ใดๆ
 - P คือ ความกว้างของปีกที่ยื่นออกไปจากคอตัน โดยที่ P_1 และ P_2 เป็นความกว้างของปีกยาวและปีกสั้นตามลำดับ
 - d คือ ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก
 - Ld คือ ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดจุดวัดค่า

α คือ มุมของปีกที่ทำกับแนวระนาบ

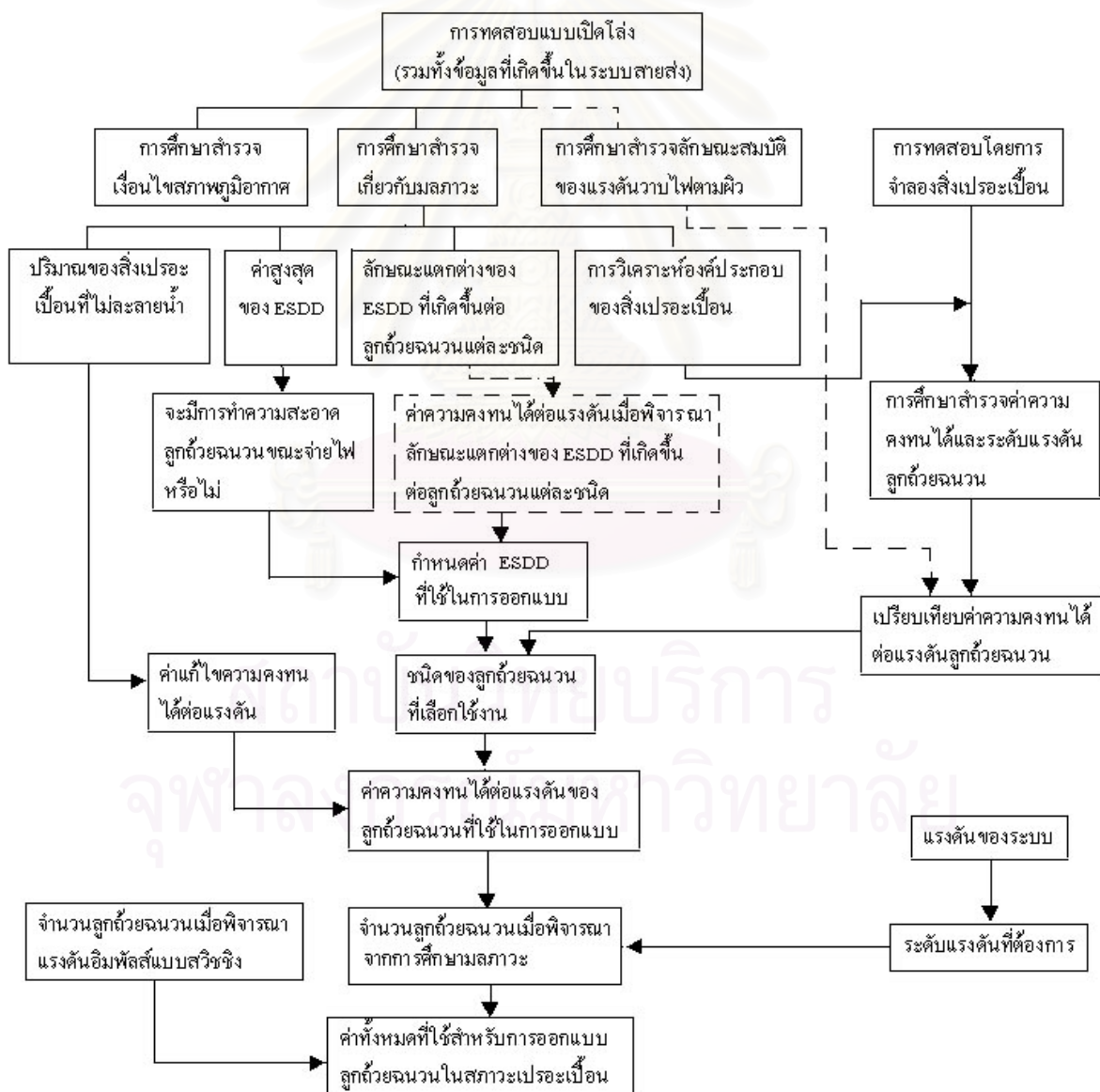
l คือ ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดควัดค่า

C.F คือ แฟกเตอร์ระยะรั้ว = ระยะรั้วของลูกถ้วย / ระยะอาร์กของลูกถ้วย

P.F. คือ แฟกเตอร์ภาพด้านข้าง = $(2P_1 + 2P_2 + S) / l$

2.4.2 ขั้นตอนการออกแบบลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน

วัสดุที่จะนำมาทำเป็นลูกถ้วยฉนวนนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่สามารถจะทนต่อความเครียดของสนามไฟฟ้าและแรงทางกลที่เกิดขึ้นในขณะใช้งานจริงได้ ขั้นตอนรายละเอียดการออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อนแสดงดังรูปที่ 2.6 ในปัจจุบันได้มีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ[28,29]ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบถูกต้องสะดวกและรวดเร็วขึ้น



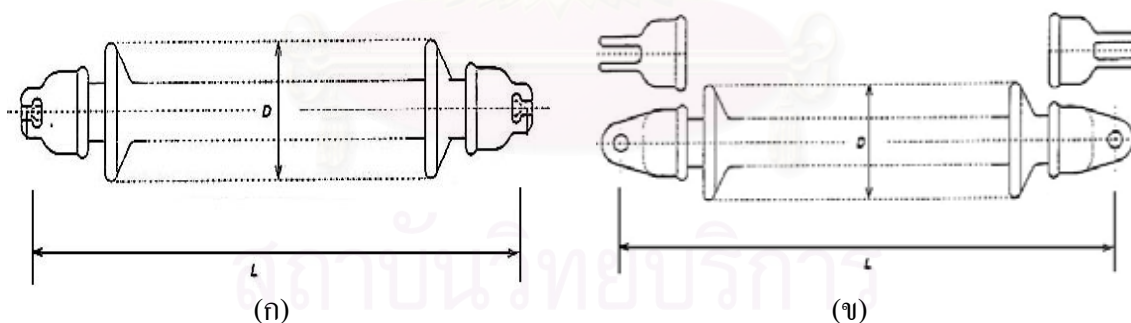
รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในสภาวะเปรอะเปื้อน[12]

2.5 ลูกถ้วยคอตันยาว

ลูกถ้วยคอตันยาวผลิตขึ้นมาในครั้งแรกเพื่อแก้ปัญหาของลูกถ้วยแขวนพอร์ชเลน ที่มีปัญหาการเกิดการแตกเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์หลังจากใช้งานไประยะหนึ่ง เพราะวาลูกถ้วยคอตันยาวเป็นลูกถ้วยฉนวนประเภท A เป็นแบบเนื้อตันจึงไม่มีโอกาสเจาะทะลุ เมื่อทำการออกแบบลักษณะมิติของลูกถ้วยคอตันยาวให้มีความถูกต้องเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในสภาวะเปราะเปื้อน ลูกถ้วยคอตันยาวเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาการเกิดวาทไฟตามผิวและการเจาะทะลุได้

2.5.1 ลูกถ้วยคอตันยาวพอร์ชเลน

ลูกถ้วยคอตันยาวใช้เป็นลูกถ้วยแขวนหรือลูกถ้วยรับแรงดึง รูปร่างจะเป็นแบบทรงกระบอกที่มีปีกทั้ง 2 ด้าน[30] เป็นลูกถ้วยเดี่ยวที่มีลักษณะผสมระหว่างลูกถ้วยแท่งกับลูกถ้วยแขวน ตัวลูกถ้วยเป็นคอตันสามารถแขวนห้อยต่อกันได้ ความยาวแต่ละท่อนอาจถึง 100 เซนติเมตร ทนแรงดันได้ถึง 300 kV ต่อท่อน[1] ลูกถ้วยคอตันยาวเป็นลูกถ้วยประเภท A ทำให้ไม่มีโอกาสที่จะเจาะทะลุเนื่องจนวน ลูกถ้วยแบบนี้จะมีหัวครอบโลหะอยู่ที่ส่วนปลายของท่อนลูกถ้วยเพื่อใช้ต่อกับลูกถ้วยแบบเดียวกันเท่านั้น หัวครอบโลหะจะมีทั้งด้านบนและด้านล่าง IEC 60433 [30] ได้แบ่ง ลูกถ้วยคอตันยาวออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะหัวครอบโลหะได้แก่ แบบ B หัวครอบโลหะจะเป็นแบบ socket และแบบ C หัวครอบโลหะจะเป็นแบบ clevis ดังรูปที่ 2.7

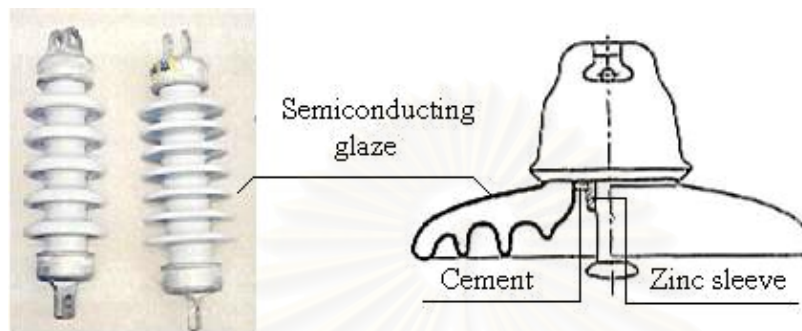


รูปที่ 2.7 ลูกถ้วยคอตันยาว (ก) แบบ B (ข) แบบ C [30]

การผลิตลูกถ้วยคอตันยาวเกิดขึ้นเป็นครั้งแรกที่ประเทศเยอรมันและประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ต่อมาได้ใช้กันอย่างแพร่หลายในภูมิภาคดังกล่าว สำหรับภูมิภาคเอเชีย ประเทศญี่ปุ่นได้เริ่มผลิตลูกถ้วยคอตันยาวขึ้นมาใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1954 [31] แต่ไม่ค่อยเป็นที่นิยมที่จะนำไปใช้งาน

2.5.2 ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ

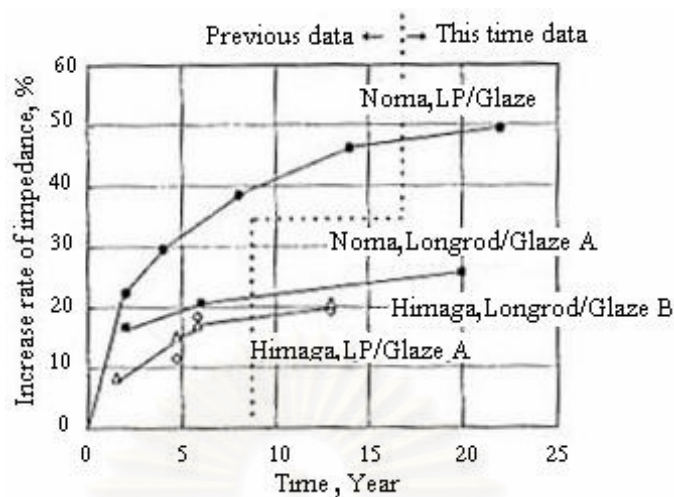
ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ (Resistance glazed หรือ Semiconducting glazed insulator) เป็นลูกถ้วยฉนวนที่ใช้กันทั่วไปเพียงแต่เคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ลักษณะรูปร่างของลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบคอตันยาวและแบบแขน

2.5.2.1 ชนิดและคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวน

1) สารกึ่งตัวนำที่ใช้เคลือบผิวลูกถ้วย ฉนวนกึ่งตัวนำที่นำมาใช้เคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนในครั้งแรกคือ Iron-oxide เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งประสบปัญหาการผุกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลต์ และเกิด Thermal runaway อันเป็นผลจากสัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิของความต้านทานของสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นลบ (Negative temperature coefficient of Resistance) ที่มากเกินไป ต่อมาได้เปลี่ยนมาใช้ Tin-oxide พบว่าสามารถแก้ปัญหาทั้งสองประการดังกล่าวได้ [32] สารกึ่งตัวนำที่ใช้เคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนในปัจจุบันจะใช้ Tin-oxide (SnO_2) เป็นหลัก โดยที่มี Antimony (Sb^{5+}) ผสมอยู่เล็กน้อย รวมทั้งเพิ่ม Niobium-oxide (Nb_2O_5) เพื่อป้องกันความผุกร่อน [33] ผลการทดสอบที่ประเทศญี่ปุ่นเมื่อเร็วๆ นี้ หลังจากที่ได้ติดตั้งลูกถ้วยฉนวนเพื่อรองรับสิ่งเปราะเปื้อนในระบบจำหน่าย 33 kV เป็นเวลาประมาณ 25 ปี โดยเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2518 ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้คือกลุ่มที่ 1 ประกอบด้วย SnO_2 และ Sb_2O_5 กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วย SnO_2 , Sb_2O_5 และ Nb_2O_5 พบว่าลูกถ้วยกลุ่มที่สองมีค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ลูกถ้วยกลุ่มแรกมีค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ จากค่าเริ่มต้น การเพิ่มขึ้นของค่าอิมพีแดนซ์ไม่ได้เป็นการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น [34] ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเพิ่มขึ้นของอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำหลังจากใช้งานเป็นระยะเวลา 25 ปี [34]

2) การเกิด Thermal runaway การที่สัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิของความต้านทานของสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นลบ ถ้าลูกถ้วยฉนวนได้รับแรงดันเกินอาจจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Thermal runaway ขึ้นได้ กล่าวคือผลจากการที่เคลือบลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำจะทำให้ลูกถ้วยฉนวนมีความต้านทานอยู่ค่าหนึ่งซึ่งเป็นความต้านทานของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบอยู่ ในสภาวะปกติลูกถ้วยฉนวนรองรับแรงดันที่ปกติ จะมีกระแสรั่วไหลในปริมาณเล็กน้อยทำให้เกิดความร้อนขึ้นมา เมื่อลูกถ้วยฉนวนได้รับแรงดันเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลจะมีค่าสูงขึ้นเปรียบเสมือนว่าความต้านทานลูกถ้วยฉนวนมีค่าลดลง เป็นผลให้อุณหภูมิของลูกถ้วยฉนวนมีค่าสูงขึ้นอีก ค่าความต้านทานของลูกถ้วยฉนวนก็จะลดลงในขณะที่ขนาดของกระแสรั่วไหลจะเพิ่มมากขึ้นเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีกระแสจำนวนมากไหลผ่านผิวลูกถ้วยฉนวนเรียกว่าการเกิด Thermal runaway โดยการพิจารณาปรากฏการณ์ดังกล่าวอธิบายได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำจะมีผลต่อการเกิด Thermal runaway กล่าวคือถ้าสารกึ่งตัวนำมีค่าอิมพีแดนซ์มาก กระแสรั่วไหลก็จะค่าน้อย ความร้อนที่เกิดจากกระแสรั่วไหลก็จะน้อยด้วย ทำให้ไม่เกิด Thermal runaway และผลการทดลองต่อมาพบว่า เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมของ ลูกถ้วยฉนวนสูงขึ้น ความคงทนต่อแรงดันของลูกถ้วยฉนวนจะลดลง [32]

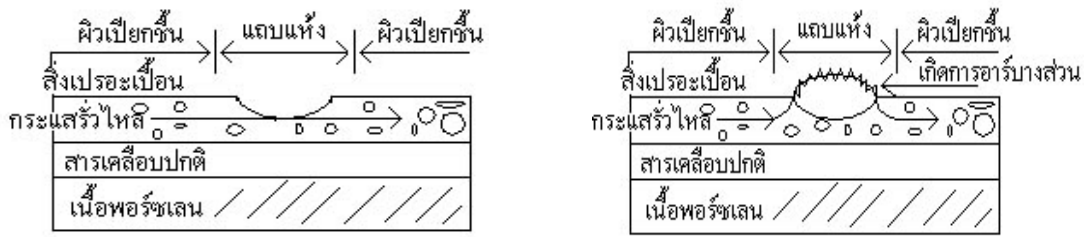
3) อิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ อิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวนจะมีผลต่อค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนและการเกิด Thermal runaway กล่าวคือถ้าค่าอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำมีค่าลดลงค่าความคงทนต่อแรงดันภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าสูงขึ้น แต่จะทำให้ค่าความคงทนต่อการเกิด Thermal runaway มีค่าลดลง ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำจึงมี

ความสำคัญที่จะต้องพิจารณา ปกติแล้วค่าอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำจะมีค่าอยู่ในช่วง 5-100 เมกกะโอห์ม แต่จากการพิจารณาถึงปัจจัย 2 ประการดังกล่าวซึ่งมีความขัดแย้งกัน อันเกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวน พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการออกแบบ จะพิจารณาจากผลการเกิด Thermal runaway เป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากผลการทดสอบพบว่าลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำที่จะนำไปใช้แทนลูกถ้วยฉนวนธรรมดา นั้น ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำมีค่าความคงทนต่อการเกิดแรงดันวาทไฟตามผิวภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนมากกว่าลูกถ้วยฉนวนเคลือบธรรมดา 2-3 เท่าและค่าความคงทนต่อการเกิดแรงดันวาทไฟตามผิวค่อนข้างจะมีค่าคงที่เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำมีค่าประมาณ 5-30 เมกกะโอห์ม จากผลการทดสอบดังกล่าวนำไปสู่การหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบลูกถ้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 นิ้ว ที่เคลือบด้วย Tin - oxide ควรจะมีค่า 15 เมกกะโอห์ม/หน่วย ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมอาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่านี้ถ้าออกแบบสำหรับลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณที่มีอุณหภูมิแวดล้อมแตกต่างกันไป[32]

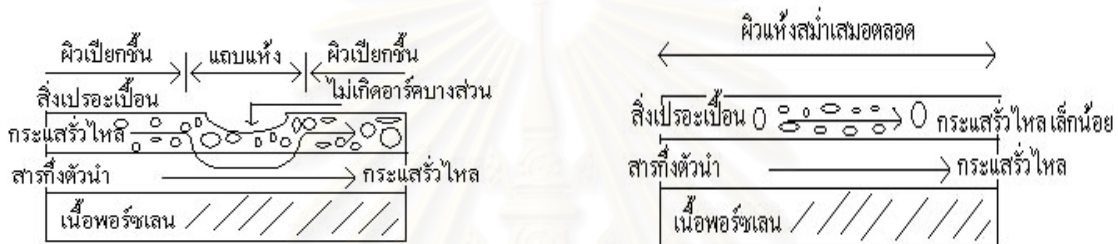
2.5.2.2 ผลของการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ

การเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำมีประโยชน์อยู่หลายประการ เป็นผลจากการที่มีกระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันใช้งานปกติเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นก่อนการเกิดวาทไฟตามผิวซึ่งมีค่าประมาณ 100 mA – 1A ค่ากระแสรั่วไหลก่อนเกิดวาทไฟตามผิวนั้น จะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันใช้งานของลูกถ้วยฉนวน กระแสรั่วไหลลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ระดับแรงดัน 13 kV มีค่า 0.63 – 0.86 mA [27] และจากรายงานการวิจัย [35] กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตินยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ระดับแรงดัน 33 kV มีค่าประมาณ 2 mA พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันใช้งานปกติจะมีค่าประมาณ 0.5 W/kV ของแรงดันระบบและอุณหภูมิที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาวะปกติประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส[24] การเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดคุณสมบัติ 3 ประการ ช่วยป้องกันการเกิดวาทไฟตามผิวเนื่องจากผลภาวะคือ

- 1) ไม่เกิดปรากฏการณ์แถบแห้งซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญของการเกิดวาทไฟตามผิว เนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน กรณีที่มีการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ ความร้อนที่เกิดจากกระแสรั่วไหลมีการกระจายค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน ดังนั้นแทบจะไม่มีโอกาสที่จะเกิดแถบแห้งขึ้นได้ ในกรณีที่มีแถบแห้งเกิดขึ้นแรงดันที่ตกคร่อมแถบแห้งจะถูกควบคุมให้มีค่าน้อยๆ ด้วยความต้านทานของสารที่เคลือบผิวดังนั้นจึงไม่เกิดการอาร์กคร่อมแถบแห้งเหล่านั้น รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบผลของการเคลือบธรรมดาและการเคลือบสารกึ่งตัวนำต่อการเกิดการอาร์กบางส่วนบนผิวลูกถ้วยฉนวน และวงจรสมมูลของพวงลูกถ้วยฉนวนแบบเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำในสภาวะสะอาดและเปราะเปื้อน แสดงดังรูปที่ 2.11



(ก) พฤติกรรมของลูกถ้วยเคลือบธรรมดา

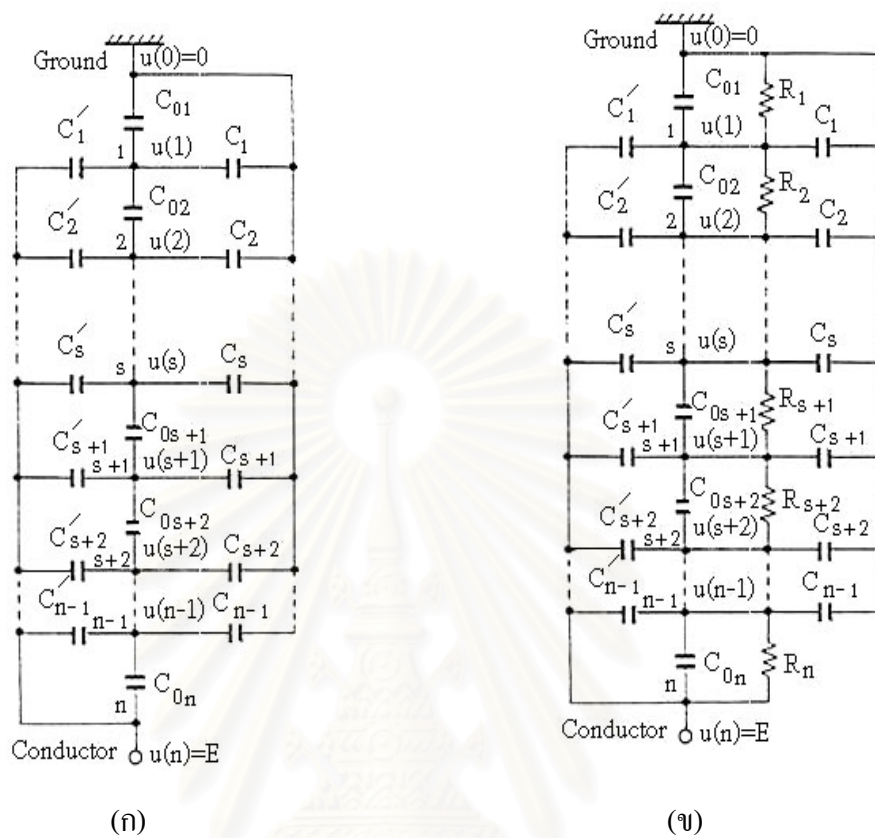


(ข) พฤติกรรมของลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.10 การเกิดวาวไฟตามผิว (ก) ลูกถ้วยเคลือบธรรมดา (ข) ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ[33]

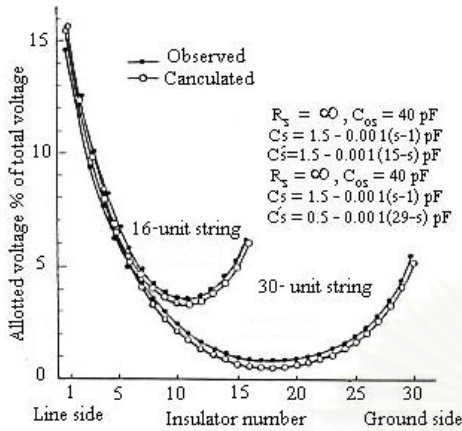
2) อุณหภูมิของผิวลูกถ้วยจะสูงขึ้น เนื่องจากผลของกระแสรั่วไหลที่ไหลบนชั้นของสารกึ่งตัวนำ ทำให้ความชื้นไม่สามารถกลั่นตัวบนผิวลูกถ้วยจนวนได้ปัญหาที่เกิดจากความชื้นรวมตัวกับสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยจนวนแล้วกลายเป็นสภาพนำไฟฟ้าจะหมดไป

3) การกระจายของแรงดันสม่ำเสมอตลอดผิวลูกถ้วยจนวนเนื่องจากผลของความต้านทานของสารกึ่งตัวนำที่ใช้เคลือบ ลักษณะการกระจายของแรงดันจะเปลี่ยนตามเวลาซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของลูกถ้วยจนวนและอุณหภูมิแวดล้อม การกระจายของแรงดันที่สม่ำเสมอทำให้ความคงทนแรงดันต่อการเกิดวาวไฟตามผิวมีค่าสูงขึ้น กรณีของลูกถ้วยแขวนความคงทนแรงดันต่อการเกิดวาวไฟตามผิวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติความนำไฟฟ้าและความยาวของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบไว้ อีกด้วย [36] นอกจากนี้แล้วค่าระดับแรงดันรบกวนคลื่นวิทยุ(RIV) ของลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนจะมีค่าน้อยกว่าลูกถ้วยเคลือบธรรมดาในสภาวะเปราะเปื้อน [32] รูปที่ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของแรงดันไฟฟ้าและลักษณะสมบัติ RIV ของพวงลูกถ้วยจนวนเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำ

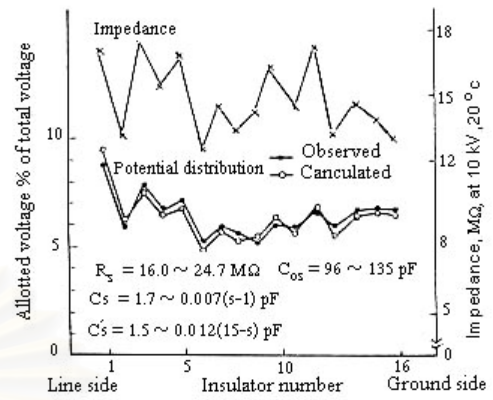


- เมื่อ C_{0s} คือ ค่า Self capacitance
 C_s คือ ค่า Stray Capacitance ระหว่างลูกถ้วยฉนวนกับกราวด์
 C'_s คือ ค่า Stray Capacitance ระหว่างลูกถ้วยฉนวนกับตัวนำ
 R_s คือ ค่า Surface Resistance โดยที่ R_s คือ ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ ถ้าหากว่า
 ลูกถ้วยฉนวนที่พิจารณาเป็นลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ แต่ถ้าลูกถ้วยฉนวนที่พิจารณาเป็นลูกถ้วย
 เคลือบธรรมดา R_s คือ ความต้านทานของสิ่งประกอบอื่น
 $U(s)$ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของลูกถ้วยลูกที่ S

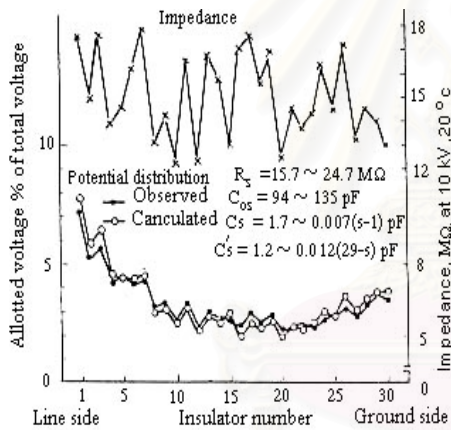
รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของพวงลูกถ้วยฉนวน (ก) แบบเคลือบธรรมดาในสภาวะผิวสะอาด
 (ข) แบบเคลือบสารกึ่งตัวนำ [32] หรือแบบเคลือบธรรมดาในสภาวะผิวประกอบอื่น [16]



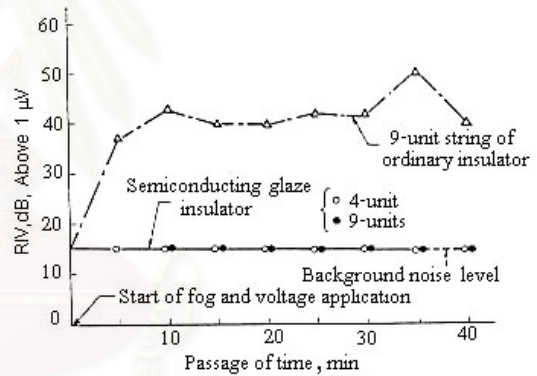
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.12 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (ก) พวงลูกถ้วยเคลือบธรรมดา 16 และ 31 ยูนิต (ข) พวงลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ 16 ยูนิต (ค) พวงลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ 30 ยูนิต (ง) ลักษณะสมบัติ RIV ของพวงลูกถ้วยเคลือบธรรมดาและลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน[32]

2.6 กระแสรั่วไหล

กระแสรั่วไหลตามผิวลูกถ้วยฉนวนเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมในการใช้งานลูกถ้วยฉนวน กระแสรั่วไหลเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การเกิดควาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนเกิดได้ง่ายขึ้น การที่ลูกถ้วยฉนวนมีกระแสรั่วไหลอยู่ต่อเนื่องตลอดจะทำให้ผิว

ของลูกถ้วยฉนวนได้รับความเสียหายโดยเฉพาะลูกถ้วยยางซิลิโคนและลูกถ้วยประเภทวัสดุผสม (Composite insulator) จะทำให้คุณสมบัติไม่ชอบน้ำลดลง และการกระจายของสนามไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยฉนวนจะเปลี่ยนแปลงไป การใช้งานลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำจะมีกระแสรั่วไหลเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ขนาดของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากระแสรั่วไหลสำหรับลูกถ้วยฉนวนชนิดอื่นๆ กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นทำให้เกิดพลังงานสูญเสียอย่างต่อเนื่อง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อุปกรณ์ประกอบที่ต่อร่วมกับลูกถ้วยฉนวนร้อนขึ้นอีกด้วย จากผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเกี่ยวกับกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวน

2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระแสรั่วไหลบนผิวลูกถ้วยฉนวน

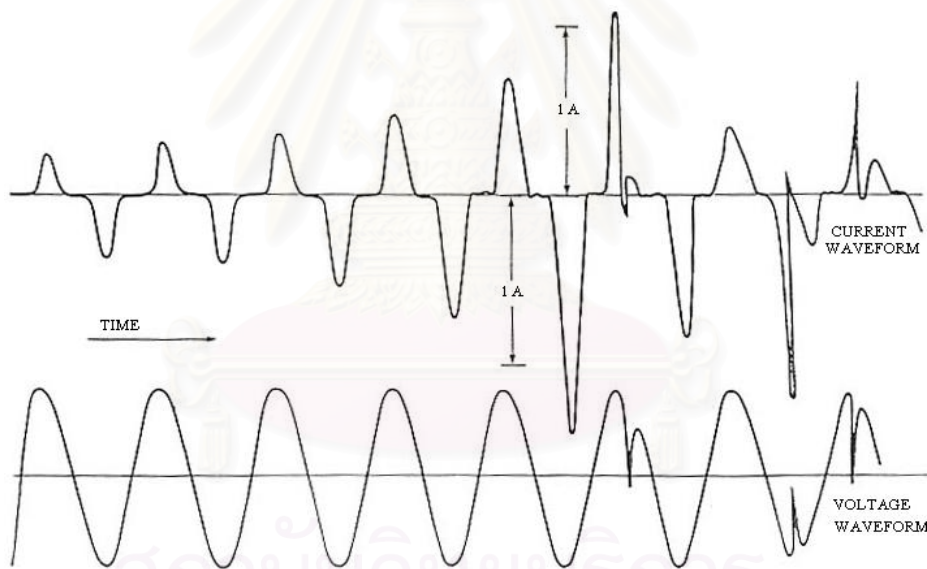
กระแสรั่วไหลผ่านผิวลูกถ้วยฉนวนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ [37]

- 1) ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวน
 - 2) ปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวน ในกรณีที่เป็นสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทละลายน้ำได้ เมื่อสิ่งเปรอะเปื้อนดังกล่าวเปียกชื้นความต้านทานผิวของลูกถ้วยฉนวนจะลดลง กระแสรั่วไหลก็จะเพิ่มขึ้น สิ่งเปรอะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำไม่ได้เป็นสาเหตุให้กระแสรั่วไหลมีขนาดเพิ่มขึ้นแต่จะช่วยให้สิ่งเปรอะเปื้อนประเภทละลายน้ำได้เกาะอยู่ตามผิวของลูกถ้วยฉนวน
 - 3) คุณสมบัติไม่ชอบน้ำของวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวน จากรายงานการวิจัยพบว่าในระยะแรกของการติดตั้งใช้งานลูกถ้วยยางซิลิโคน คุณสมบัติไม่ชอบน้ำของลูกถ้วยยางซิลิโคน มีค่าคงที่ในทุกสภาพเปรอะเปื้อน
 - 4) ระดับแรงดันของระบบ กระแสรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นตามระดับแรงดันใช้งานของลูกถ้วยฉนวนเช่นระบบ 780 kV ขนาดค่ายอดของกระแสรั่วไหลประมาณ 800 mA และค่ายอดอาจจะมีค่าถึง 1.4 A ก่อนที่จะลูกถ้วยฉนวนจะเกิดวาวไฟตามผิว ในขณะที่ระบบ 250 kV จะมีค่ายอดของกระแสรั่วไหล ประมาณ 660 mA ก่อนการเกิดวาวไฟตามผิว [16]
 - 5) ลักษณะแวดล้อม โดยทั่วไปแล้วกระแสรั่วไหลจะขึ้นอยู่กับลักษณะธรรมชาติแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งานอยู่เช่น ความชื้น และการเกิดฝนตก สภาพหมอก เป็นต้น
- กระแสรั่วไหลในสภาวะปกติจะเป็นกระแสเชิงเก็บประจุ (Capacitive Current) เมื่อลูกถ้วยฉนวนเปรอะเปื้อนและเปียกชื้น ขนาดของกระแสรั่วไหลก็จะเพิ่มขึ้นและกลายเป็นกระแสเชิงความต้านทาน (Resistive Current) [16]

2.6.2 การวัดค่ากระแสรั่วไหล

การวัดค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นอาจจะทำการวัดเป็นค่าเฉลี่ยหรือค่าประสิทธิผลหรือค่ายอดก็ได้ สภาวะปกติเมื่อลูกถ้วยฉนวนรองรับพิคัดแรงดันใช้งาน กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะคลื่นไซน์ จึงทำให้สามารถพิจารณาได้ทั้งค่าเฉลี่ย ค่าประสิทธิผลหรือค่ายอด โดยสามารถที่

จะนำค่าต่างๆเหล่านั้นไปคำนวณหาค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้น แต่เมื่อพิจารณากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการใช้งานลูกถ้วยฉนวนในสถานะเปราะเปื้อน โดยที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนมีสภาพเปียกชื้นอันเนื่องมาจากฝนที่ตกเบาๆ หรือ หมอก น้ำค้าง รวมทั้งสภาพอากาศที่ชื้นในตอนเช้าตรู่ ผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลจะทำให้เกิดสภาพแถบแห้งบนผิว ลูกถ้วยฉนวนขึ้นมา อาจจะนำไปสู่การเกิดควาบไฟตามผิวได้ ในกรณีดังกล่าวนี้กระแสรั่วไหลจะประกอบด้วยกระแสที่ความถี่พลังงานและกระแสรั่วไหลฮาโมนิกส์ที่ 3 เป็นหลัก [14,38,39] ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ดังนั้นการวัดค่ากระแสรั่วไหลในเหตุการณ์ดังกล่าวนี้จึงไม่ค่อยจะเหมาะสมที่จะเป็นการวัดค่าประสิทธิภาพผลหรือค่าเฉลี่ย เพราะการเกิดควาบไฟตามผิวจะเกิดจากค่ายอดของแรงดัน รวมทั้งค่ายอดของกระแสยังจะสามารถบอกถึงระดับของมลภาวะได้ดี การทำ Monitoring โดยการวัดค่ายอดกระแสรั่วไหลมีปรากฏอยู่ในงานวิจัยหลายๆชิ้น[14,38,40] รวมทั้งจำนวนครั้งของการเกิดค่ายอดของกระแสจะสัมพันธ์โดยตรงกับการเสื่อมสภาพของการเป็นฉนวนอีกด้วย[41]

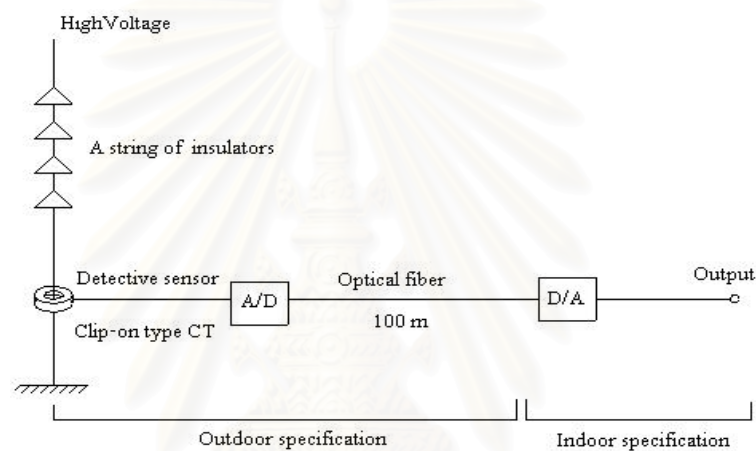


รูปที่ 2.13 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลและแรงดันของลูกถ้วยฉนวนระบบ 750 kV [16]

การตรวจจับสัญญาณกระแสรั่วไหลโดยทั่วไปสามารถทำได้ 2 วิธี คือการตรวจจับด้วยหม้อแปลงกระแส (Current transformer ; CT) หรือตัวต้านทานชั้นท์ (Shunt resistor) แต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังนี้

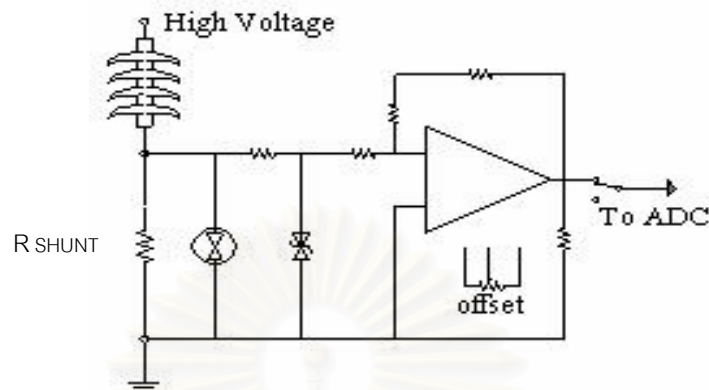
1) การตรวจจับกระแสรั่วไหลโดยใช้ CT จะใช้ CT เป็นตัวตรวจจับกระแสรั่วไหลจากลูกถ้วยฉนวนไปยังดินโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กและเปลี่ยนสัญญาณกระแสเป็นสัญญาณแรงดันโดยผ่านความต้านทานหรือเบอร์เดนของ CT และส่งต่อไปยังส่วนขยายสัญญาณเพื่อทำการวัดหรือบันทึกค่าดังแสดงในรูปที่ 2.14 วิธีนี้อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่อยู่ทางด้านเอาท์พุท

ของ CT จะไม่เกิดความเสียหายเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นทางด้านอินพุทของ CT การใช้งาน CT จะต้องคำนึงถึงการอิมิตัวของแกนเหล็กซึ่งจะทำให้สัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุทของ CT ผิดเพี้ยนไปได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเลือกพิคกิ้งกำลัง VA และอัตราส่วนกระแสอินพุทต่อกระแสเอาต์พุทของ CT ให้เหมาะสม สามารถที่จะตอบสนองในช่วงย่านวัดที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง รวมทั้งค่าความสามารถในการแยกแยะ CT ซึ่งพิจารณาได้จาก Class ของ CT การตรวจจับกระแสรั่วไหลโดยใช้ CT มีใช้งานทั่วไปโดยเฉพาะในกรณีที่อยู่ปรกณที่ที่จะต้องตรวจจับกระแสรั่วไหลมีโอกาสเกิดวาบไฟตามผิว เช่น การตรวจจับกระแสรั่วไหลตลอดเวลา(Online monitoring) ของลูกถ้วยฉนวน หรือ กัปดักแรงดันเกิน [14,38,42]



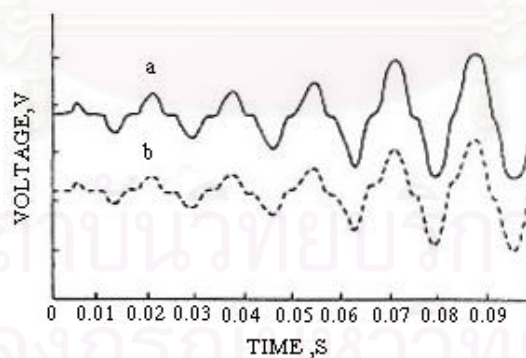
รูปที่ 2.14 การวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้ CT เป็นตัวตรวจจับสัญญาณกระแส [38]

2) การตรวจจับกระแสรั่วไหลโดยใช้ตัวต้านทานชั้นที่ จะใช้ตัวต้านทานที่มีค่าเหมาะสมต่ออยู่ทางด้านกราวด์ของลูกถ้วยฉนวน แล้วทำการวัดแรงดันคร่อมตัวต้านทานดังรูปที่ 2.15 วงจรตรวจจับแบบนี้จำเป็นที่จะต้องมียุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากการเกิดแรงดันเกินที่อาจจะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์เครื่องมือวัดในขณะที่เกิดวาบไฟตามผิว [39]



รูปที่ 2.15 การวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้ตัวต้านทาน [39]

ค่าความต้านทานของตัวต้านทานชั้นที่ใช้ในการวัดกระแสรั่วไหลจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมหลายประการเช่น ย่านของกระแสที่ต้องการวัด ตัวอย่างค่าความต้านทานที่ใช้ในงานวิจัยเรื่องการวัดกระแสรั่วไหลลูกถ้วยฉนวน มีอยู่หลายค่าเช่น 10 โอห์ม [39] 30 โอห์ม [41] 130 โอห์ม [43] หรือแม้กระทั่ง 1 โอห์ม [44] เป็นต้น รูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่ได้จากตรวจจับด้วย CT และตัวต้านทานเปรียบเทียบกันดังในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 รูปคลื่นกระแสรั่วไหล (a) การตรวจจับด้วย CT (b) การตรวจจับด้วยความต้านทาน[14]

ประโยชน์ของการศึกษาเรื่องกระแสรั่วไหลนอกจากจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางกายภาพของกระแสรั่วไหลซึ่งบ่งบอกถึงพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นและความเสียหายของฉนวนลูกถ้วย และสามารถที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและเลือกวัสดุที่เหมาะสมแล้ว การตรวจจับกระแสรั่วไหลอย่างต่อเนื่องสามารถที่จะนำไปใช้ในการป้องกันการเกิดวาบไฟตามฉนวนลูกถ้วย

ฉนวนเนื่องจากสภาวะเปราะเปื้อนได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างขนาดของกระแส
รั่วไหลกับปริมาณการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อน ทำให้สามารถที่จะรู้ระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะทำ
ความสะอาดลูกถ้วยฉนวนหรือเปลี่ยนลูกถ้วยฉนวนเมื่อสิ่งเปราะเปื้อนมีปริมาณมากพอที่จะเป็น
สาเหตุให้เกิดความไฟฟ้าตามผิวได้[14,45] และสามารถที่จะนำไปใช้ในการเลือกชนิดแบบลูกถ้วย
ฉนวนไปใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อน [40] โดยที่หลักเกณฑ์การใช้ลูกถ้วยฉนวนแรงสูงในระบบ
จำหน่าย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แสดงในภาคผนวก ก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับและอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล

ลูกถ้วยฉนวนแบบคอตัน เช่น ลูกถ้วยแขวนคอตัน ลูกถ้วยแท่งและลูกถ้วยคอตันยาว เป็นลูกถ้วยฉนวนประเภท A จึงไม่มีปัญหาเรื่องการเจาะทะลุเมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าเสิร์ฟสูงมากๆ เช่น แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน (Steep front impulse voltage) แต่อย่างไรก็ตามลูกถ้วยชนิดแบบคอตันก็ยังมีปัญหาเรื่องความเปราะเปื้อนเพราะลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อนสิ่งเปราะเปื้อนและเปียกชื้นเป็นสิ่งที่ทำให้ความคงทนต่อแรงดันวาทไฟตามผิวต่ำลง ดังนั้นการออกแบบรูปลักษณะของปีกและครีบจะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากสิ่งเปราะเปื้อนและเปียกชื้นเหล่านี้ และการออกแบบลักษณะมิติของลูกถ้วยจะต้องพิจารณาถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแก่ฉนวนอีกด้วย โดยที่ลูกถ้วยฉนวนปีกสลับเป็นลูกถ้วยชนิดหนึ่งที่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพเปราะเปื้อน[13]

3.1 การออกแบบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ

การออกแบบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเพื่อใช้กับระบบจำหน่ายนั้นได้เลือกระดับแรงดัน 33 kV เป็นพิกัดแรงดันใช้งานของลูกถ้วยฉนวน ทำให้ลูกถ้วยฉนวนที่ออกแบบสามารถนำไปใช้กับระบบแรงดัน 33 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และระบบแรงดัน 24 kV การไฟฟ้านครหลวงได้

3.1.1 เกณฑ์การออกแบบ

1) ลูกถ้วยฉนวนแบบต่างๆที่ใช้งานในระบบแรงดัน 33 kV จะต้องมียูปร่าง มิติ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดย สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม แต่โดยที่ประเทศไทยยังไม่มีการใช้ลูกถ้วยคอตันยาว มาตรฐานที่บังคับใช้กับลูกถ้วยคอตันยาวจึงไม่มี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาข้อบังคับมาตรฐานจากลูกถ้วยชนิดอื่นที่มีใช้งานในสภาวะเปราะเปื้อนที่ระดับแรงดัน 33 kV [46] และมีรูปร่างใกล้เคียงกับลูกถ้วยคอตันยาว ซึ่งได้แก่ลูกถ้วยแท่ง[47] และลูกถ้วยแท่งก้านตรง[48] และ พวงลูกถ้วยแขวน [49] ดังแสดงในภาคผนวก ก

2) การออกแบบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเพื่อใช้กับระบบจำหน่าย อาศัยข้อแนะนำตามมาตรฐาน IEC 815 [13]

3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบ

การออกแบบลูกถ้วยฉนวนคอตันยาวปีกสลับมีวิธีการดังนี้

1) คำนวณค่า minimum nominal creepage distance ตามสมการที่ (3.1)

$$(Lnc)_{\min} = (Lsc)_{\min} \times U_m \times kd \quad (3.1)$$

เมื่อ $(Lnc)_{\min}$ คือ minimum nominal creepage distance

$(Lsc)_{\min}$ คือ minimum specific creepage distance สำหรับบริเวณที่มีมลภาวะรุนแรง (very heavy pollution level) กำหนดให้ใช้ค่า 31 mm./kV ในการออกแบบ [13]

U_m คือ highest system voltage phase-to-phase for the equipment

kd คือ ตัวประกอบแก้ไข (correction factor); $kd = 1$ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลูกถ้วย (D_m) < 300 มิลลิเมตร

ลูกถ้วยจนวนเป็นแบบปีกสลับ ค่า D_m โดยประมาณหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$D_m = (De_1 + De_2 + 2Di) / 4 \quad (3.2)$$

โดยที่ De_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกใหญ่

De_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกเล็ก

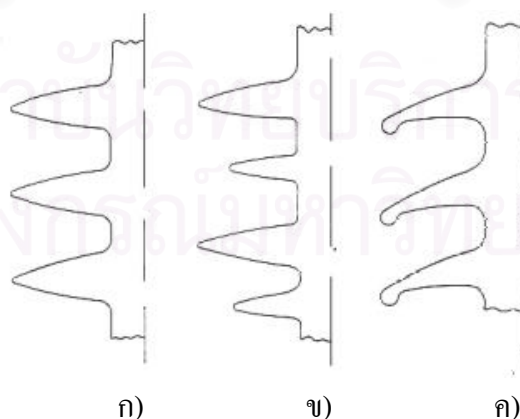
Di คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนลูกถ้วย

จะได้ $(Lnc)_{\min} = 1228$ มิลลิเมตร

เลือกออกแบบที่ 1300 มิลลิเมตร โดยที่ 1.1 เป็นค่า margin

2) เลือกแบบปีกของลูกถ้วย

ปีกของลูกถ้วยโดยทั่วไปแล้วแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ปีกแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน

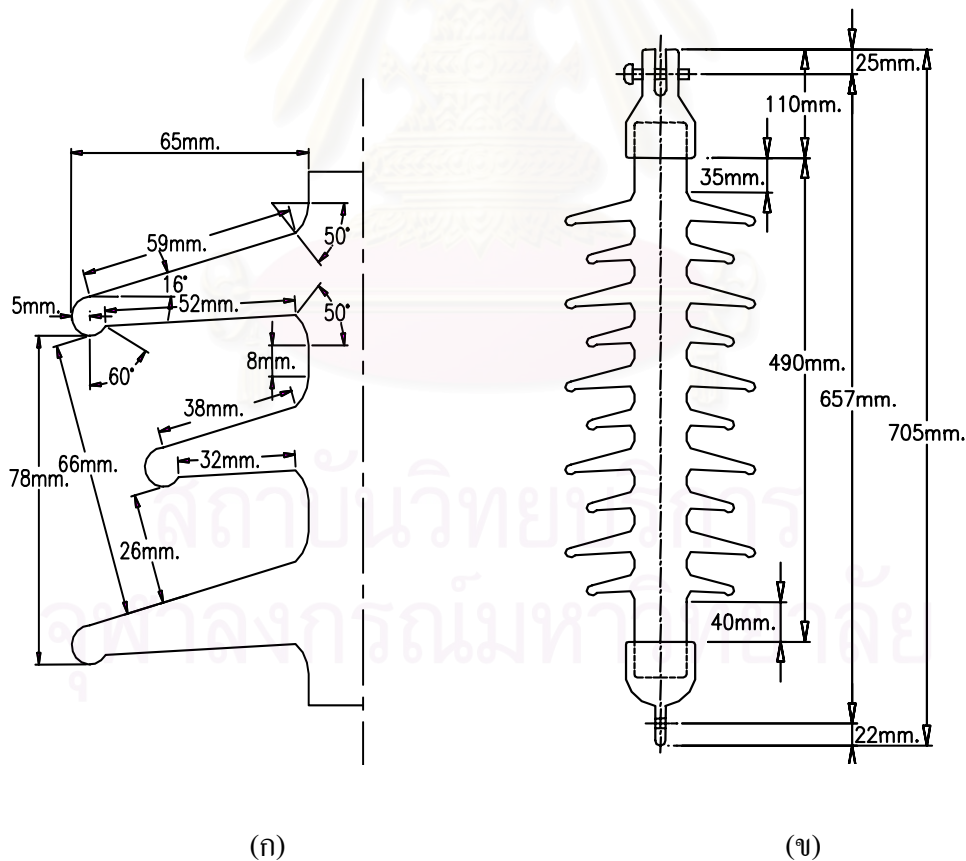


รูปที่ 3.1 รูปแบบของปีกประเภทต่างๆ [24]

พิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างรูปแบบของปีกแต่ละแบบพบว่าปีกแบบ ก) สิ่งเปรอะเปื้อน มีโอกาสที่จับเกาะน้อยที่สุด แต่ทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ลมพัด หรือฝนตกได้แก่ที่สุด ส่วนปีกแบบ ข) การที่มีปีกสั้นมาเสริมสลับกับปีกยาวเพื่อทำหน้าที่ชะเชย ระยะรั้วที่หายไป ปีกแบบนี้จะทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าปีกแบบ ก) สำหรับปีกแบบ ค) สิ่งเปรอะเปื้อนมีโอกาสดจับเกาะได้เพิ่มขึ้น แต่มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าปีกชนิดแบบอื่นๆ แต่โอกาสที่หยดน้ำจะเชื่อมต่อระหว่างปีกในสภาวะที่ฝนตกหนักมีเพิ่มขึ้น

ด้วยคุณลักษณะของปีกลูกถ้วยแบบ ข และแบบ ค มีจุดดีจุดด้อยต่างกัน ฉะนั้นปีกที่ ออกแบบจะมีลักษณะผสมระหว่างปีกแบบ ข) และ ค) ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติ โอกาสที่หยดน้ำเชื่อมต่อระหว่างปีกในสภาวะฝนตกหนักจะมีค่าน้อยลง เหมาะสมกับบริเวณที่มีระดับของสิ่งเปรอะเปื้อนปานกลางถึงรุนแรงและมีฝนตกชุก การออกแบบกำหนดให้มีปีก 10 ปีก เป็นปีกยาวและสั้นสลับกันไป จะทำให้ลูกถ้วยคอดันยาวปีก สลับที่ออกแบบมีความยาวใกล้เคียงกับพวงลูกถ้วยแขวน 4 ลูกต่อกัน

3) ทำการปรับค่าต่างๆ ให้ได้ตามข้อแนะนำ ลูกถ้วยที่ออกแบบจะมีในลักษณะ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพสเกตลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับ (ก) ระยะระหว่างปีกและค่ากำหนดต่างๆ (ข) ลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับ ความยาวที่แสดงในแบบเป็น มิลลิเมตร

4) เปรียบเทียบค่ามิติ ที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815 ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบค่ามิติ ที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815

สัญลักษณ์	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ออกแบบ
C	มากกว่า 30 ม.ม.	65 ม.ม.
S/P1	มากกว่าหรือเท่ากับ 0.8	1.2
Ld/d	น้อยกว่า 5	$Ld1/d1 = 3.56$; $Ld2/d2 = 3.62$
P1-P2	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 ม.ม.	21 ม.ม.
α	มากกว่า 5 องศา	16 องศา
C.F.	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4	2.18
P.F.	มากกว่า 0.7	1.09

5) ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับหลังจากทำการผลิตเปรียบเทียบกับพวงลูกถ้วยแขวน 52 - 4 จำนวน 4 ลูก แสดงดังรูปที่ 3.3



ก)

ข)

ค)

รูปที่ 3.3 ลูกถ้วยชนิดที่ใช้ในการวิจัยหลังจากทำการผลิต (ก) ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ (ข) ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา (ค) พวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 4 ลูก ต่อกัน

3.1.3 การกระจายของสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน

การออกแบบลักษณะลูกถ้วยฉนวนจะต้องคำนึงถึงกระจายของสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการเกิดควาบไฟตามผิว การออกแบบลักษณะมิติของลูกถ้วยฉนวนที่ดีจะต้องพยายามออกแบบให้ครีบหรือชั้นของลูกถ้วยฉนวนมีผิวโค้งไปตามเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า (Equipotential lines) เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวมีค่าน้อย และมีการกระจายสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ การออกแบบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเพื่อใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน นอกจากจะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขดังกล่าวแล้วจะต้องคำนึงถึงรูปลักษณะของปีกให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 815 อีกด้วย ซึ่งทำได้ค่อนข้างยาก ต้องอาศัยการประนีประนอมเงื่อนไขทั้งสองเข้าด้วยกัน และเพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยคอตันยาวมีค่าสม่ำเสมอขึ้น จึงใช้วิธีการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะช่วยให้ความมกทนแรงดันต่อการเกิดควาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนมีค่าสูงขึ้น และค่าระดับแรงดันรับกนวนวิทยจะมีค่าลดลง

การออกแบบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับมุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาการเกิดแรงดันควาบไฟตามผิวในสภาวะเปรอะเปื้อน จึงได้คำนึงถึงรูปลักษณะมิติของลูกถ้วยฉนวนเป็นหลัก และเพื่อให้สามารถที่จะพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่ากระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาจึงได้มีการออกแบบอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล

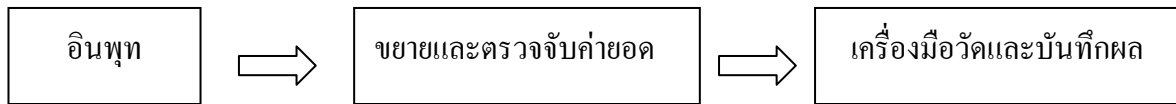
3.2 อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล

การวัดกระแสรั่วไหลตามผิวลูกถ้วยฉนวนที่พิกัดแรงดันใช้งาน และที่ระดับแรงดันสูงขึ้นก่อนที่จะเกิดควาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน โดยทั่วไปจะใช้ CT เป็นตัวตรวจจับสัญญาณกระแสรั่วไหล ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์บันทึกผลหรือแสดงผลซึ่งต่ออยู่ทางด้านเอาต์พุตของ CT ทำงานผิดพลาด หรือเกิดความเสียหายเมื่อเกิดควาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน สัญญาณกระแสรั่วไหลที่ได้จะนำมาแสดงหรือบันทึกผลด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์หรือ คอมพิวเตอร์

3.2.1 แนวคิดพื้นฐานในการวัดกระแสรั่วไหล

อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลที่ออกแบบเป็นตัวตรวจจับค่ายอดของกระแส ประกอบด้วยส่วนอินพุทซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจจับกระแสรั่วไหลจากลูกถ้วยฉนวนไปยังกราวด์ และเปลี่ยนเป็นสัญญาณแรงดันโดยผ่านตัวต้านทานหรือเบอร์เดนของ CT สัญญาณแรงดันที่ได้จะผ่านเข้าตู้วงจรรองความถี่ต่ำผ่านซึ่งออกแบบให้เป็นวงจรขยายแรงดันด้วย สัญญาณแรงดันที่ได้รับการขยายซึ่งเป็นสัญญาณกระแสระดับจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณเรกติฟายแบบเต็มลูกคลื่น จะผ่านวงจรตรวจจับค่ายอดสัญญาณและส่งต่อไปยังเครื่องมือวัดผ่านทางสายเคเบิลเพื่อแสดงผลหรือทำการบันทึกผล เพราะว่าการทดลองจะมีการป้อนแรงดันจนเกิดควาบไฟตามผิวของลูกถ้วย ฉะนั้นจำเป็นจะต้องมีตัว

ป้องกันแรงดันเกินต่ออยู่ก่อนและหลัง CT เพื่อช่วยป้องกันวงจรในภาคอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งจะมีการต่อตัวป้องกันแรงดันเกินก่อนและหลังสายเคเบิล เพื่อป้องกันแรงดันเกินที่อาจจะเข้าสู่เครื่องมือวัด ไดอะแกรมแสดงแนวคิดพื้นฐานของการตรวจจับกระแสรั่วไหล แสดงในรูปที่ 3.4



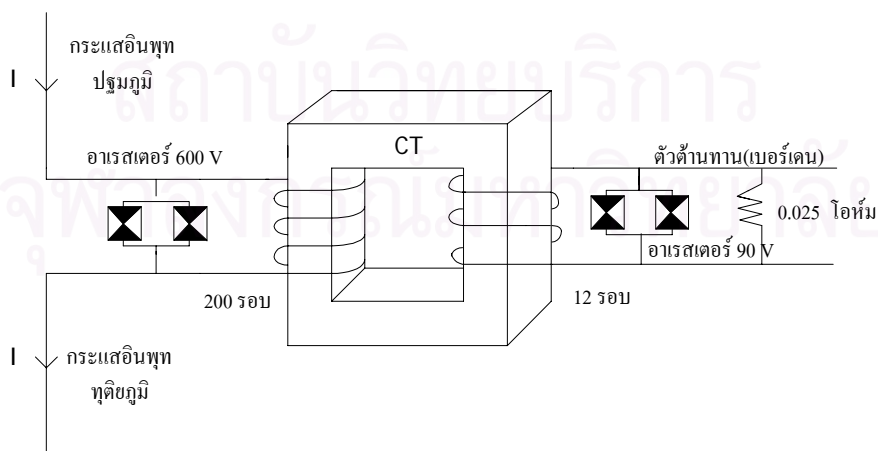
รูปที่ 3.4 แนวคิดพื้นฐานของการตรวจจับกระแสรั่วไหล

3.2.2 วงจรและส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล

อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลประกอบด้วยส่วนต่างๆดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.2.1 ส่วนอินพุต

ใช้ CT เป็นตัวตรวจจับกระแสรั่วไหลดังแสดงในรูปที่ 3.5 CT มีพิกัดกำลัง 5 VA อัตราส่วนกระแสทางด้านอินพุต ต่อเอาต์พุต มีค่าเท่ากับ 60/5 ความเที่ยงตรง class 1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของ CT เมื่อค่าความต้านทานเบอร์เดนของ CT มีค่า 0.025 โอห์ม พบว่า CT มีความเป็นเชิงเส้นอยู่ภายในช่วงกระแสอินพุต 0.01 - 1 แอมแปร์ เพื่อให้อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลนี้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นสำหรับกระแสค่าน้อย ๆ จึงได้ทำการพันขดลวดอินพุตรอบแกน CT เป็นจำนวนประมาณ 200 รอบ ทำให้ CT มีพฤติกรรมเสมือนหม้อแปลงกระแสแบบแปลงกระแสขึ้นในอัตราส่วน 1 ต่อ 15 สัญญาณกระแสรั่วไหลจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณแรงดันโดยผ่านตัวต้านทานเบอร์เดนและส่งต่อไปยังส่วนขยายและตรวจจับค่ายอดของสัญญาณต่อไป ส่วนอินพุตอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล แสดงดังรูปที่ 3.5



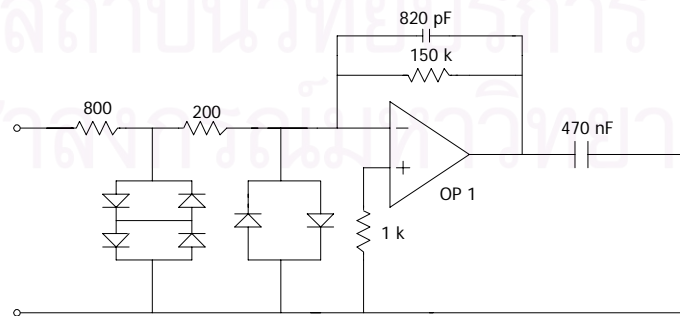
รูปที่ 3.5 ส่วนอินพุตอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล

3.2.2.2 ส่วนขยายและตรวจจับค่ายอดสัญญาณ

ส่วนขยายและตรวจจับค่ายอดของสัญญาณ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ตรวจจับได้ให้เป็นสัญญาณที่มีขนาดโตขึ้น และทำการเรคคิฟายสัญญาณเพื่อให้สามารถตรวจจับค่ายอดได้ทั้งค่าด้านบวกและทางด้านลบ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1) วงจรขยายและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

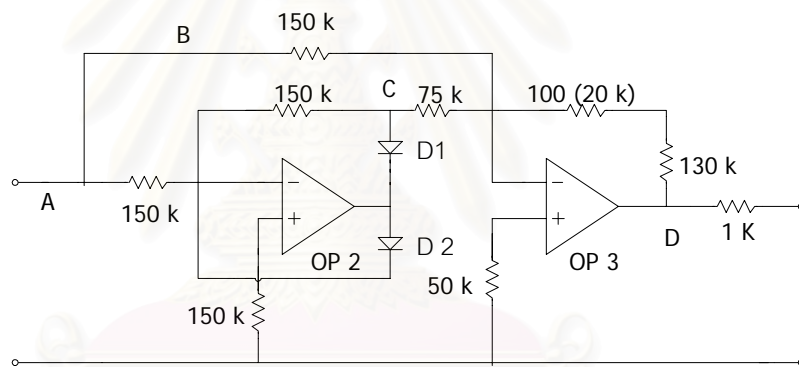
จากผลการทดสอบหากระแสรั่วไหลสำหรับลูกถ้วยฉนวนชนิดต่างๆ พบว่ากระแสรั่วไหลมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามระดับความเปรอะเปื้อน อุณหภูมิ สภาพแวดล้อมและอื่นๆ ซึ่งมักจะไม่ค่อยเท่ากันสำหรับแต่ละการทดลอง กลุ่มนักวิจัย [34] พบว่าสำหรับลูกถ้วยแห้ง และลูกถ้วยคอดันขาวเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ใช้กับระบบแรงดัน 33 kV เมื่อทำการทดสอบหาค่าแรงดันวาวไฟตามผิวเปรอะเปื้อนจำลองและวัดกระแสรั่วไหล พบว่ากระแสรั่วไหลของลูกถ้วยทั้งสองชนิดมีค่าประมาณ 2.2 - 9.0 mA ที่ระดับแรงดัน 20 kV และระดับความเปรอะเปื้อน 0.6 (mg/cm²) และนักวิจัยอีกกลุ่ม [44] ได้ทำการวัดค่ากระแสรั่วไหลต่อเนื่องภายในระยะเวลาที่กำหนดลูกถ้วยยางซิลิโคนที่ใช้กับระบบ 30 kV ซึ่งติดตั้งใกล้ชายฝั่งทะเลพบว่ามีการรั่วไหลเกิดขึ้นในสภาวะปกติน้อยกว่า 1 mA และมีค่าสูงถึง 140 mA เมื่อมีลมพายุพัดเข้ามา อาศัยผลการทดลองดังกล่าวพิจารณาขานของกระแสรั่วไหลที่ต้องการวัดเพื่อให้อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลสามารถที่จะวัดค่ากระแสรั่วไหลได้ครอบคลุมค่ากระแสที่อาจจะเกิดขึ้นได้ จึงทำการออกแบบให้อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลสามารถทำการวัดค่ากระแสรั่วไหลได้ถูกต้องภายในย่านวัด 0.5-500 mA เนื่องจากสัญญาณกระแสรั่วไหลมีขนาดเล็กจึงมีความจำเป็นที่จะต้องขยายขนาดสัญญาณ โดยใช้วงจรขยายซึ่งจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันให้มีระดับสูงขึ้น เพื่อที่จะสามารถส่งไปยังเครื่องมือวัดได้ โดยที่ไม่มีการลดทอนเนื่องจากการครอบในความต้านทานของสายเคเบิล หรือมีการผิดเพี้ยนเนื่องจากสัญญาณรบกวน และวงจรขยายจะทำหน้าที่เป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งจะยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำกว่า 250 Hz ผ่านได้ วงจรขยายและกรองความถี่ต่ำผ่านแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรขยายที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

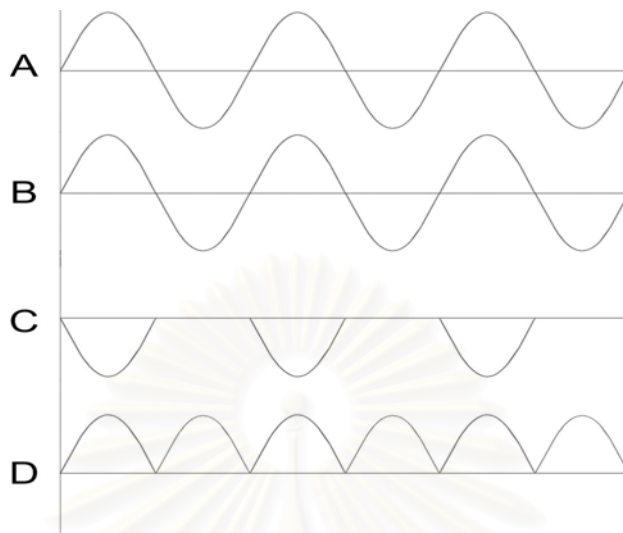
2) วงจรฟูลเวฟเรกติฟาย

เพื่อให้อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลสามารถที่จะทำการตรวจจับค่ายอดของสัญญาณกระแสได้ ทั้งซีกบวกและซีกลบ จึงทำการแปลงสัญญาณกระแสสลับที่รับมาจากวงจรถายายเป็นสัญญาณคลื่นเต็ม โดยมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่จุด A สัญญาณจะปรากฏที่จุด B ด้วย และสัญญาณชุดเดียวกันนี้จะถูกขยายแบบกลับเฟสด้วยอัตราขยาย -1 โดยออปแอมป์ตัวที่ 2 สัญญาณที่ถูกขยายจะไปปรากฏอยู่ที่จุด C ไคโอด D1 จะอยู่ในสถานะทำงานเมื่อสัญญาณที่จุด A เป็นบวกและจะอยู่ในสถานะไม่ทำงานเมื่อสัญญาณที่จุด A เป็นลบ ไคโอด D2 จะทำหน้าที่ยึดจับแรงดันด้านลบไม่ให้เกิน 0.7 V เพื่อป้องกันการอิมิตัวทางด้านลบ สัญญาณขาออกของวงจรฟูลเวฟเรกติฟายจะเป็นผลรวมของสัญญาณที่ได้จากจุด B ผ่านวงจรถายายที่มีอัตราขยายเท่ากับ -1 และสัญญาณที่ได้จากจุด C ซึ่งผ่านวงจรถายายที่มีอัตราขยายเท่ากับ -2 สัญญาณทั้งหมดจะนำมารวมกันด้วย ออปแอมป์ตัวที่ 3 วงจรฟูลเวฟเรกติฟาย และสัญญาณที่จุดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 วงจรฟูลเวฟเรกติฟาย

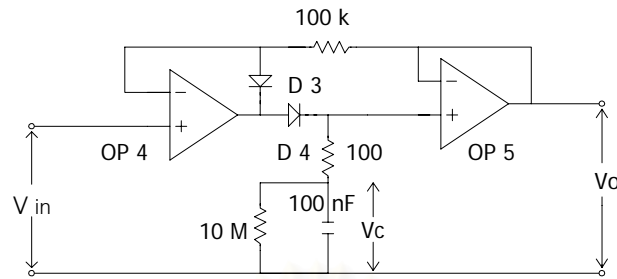
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 สัญญาณที่จุดต่าง ๆ ของวงจรฟูลเวฟเรกติฟาย

3) วงจรตรวจจับค่ายอด

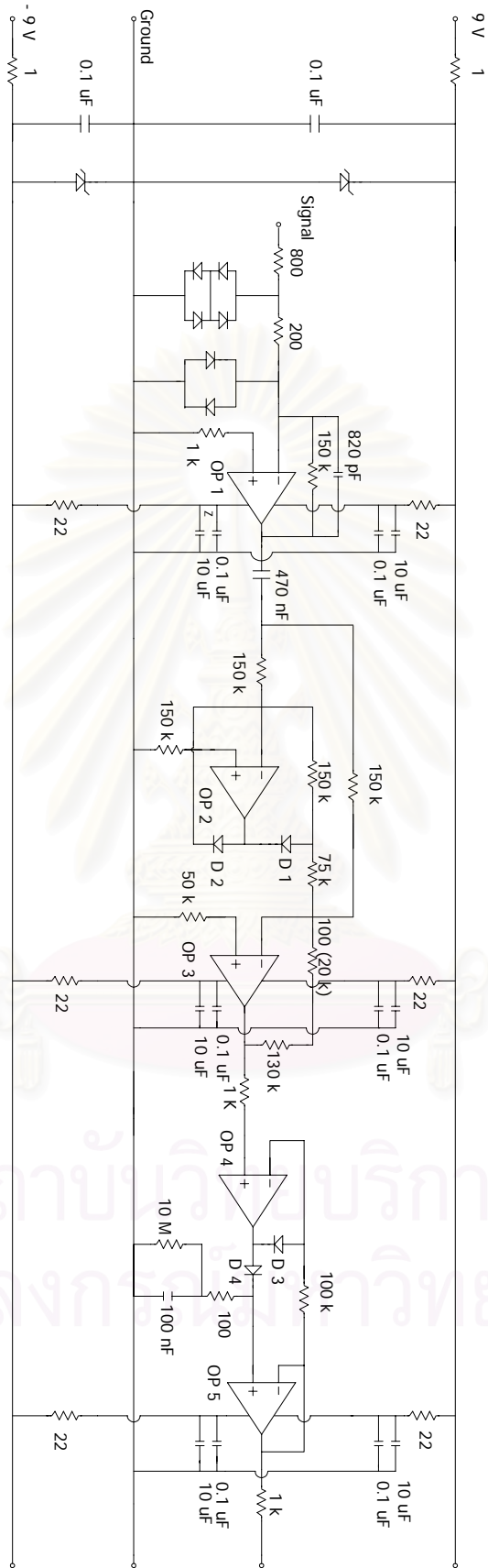
วงจรตรวจจับค่ายอดมีหลักการทำงานดังนี้ พิจารณาช่วงเริ่มต้น แรงดันอินพุทของวงจรมีค่ามากกว่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_C โดยที่ V_C จะมีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุท V_O ด้วย ไดโอด D4 จะนำกระแส คาปาซิเตอร์ C จะเริ่มชาร์จประจุ ออปแอมป์ตัวที่ 5 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ ทำให้ออปแอมป์ตัวที่ 4 ทำหน้าที่เป็น Unity follower ดังนั้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ V_C จะมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุท V_{in} จนกระทั่ง V_{in} มีค่าเพิ่มถึงค่ายอดทำให้ V_C มีค่าเท่ากับแรงดันค่ายอด ช่วงเวลาถัดมาเมื่อ V_{in} น้อยกว่า V_C แรงดันเอาต์พุท V_O ของออปแอมป์ตัวที่ 4 จะถูกขยายจนอิมิตัวทางด้านลบ ไดโอด D3 จะอยู่ในสถานะไม่นำกระแส ไดโอด D4 อยู่ในสถานะไม่นำกระแส V_O เท่ากับ V_C และ C จะเริ่มคายประจุผ่านตัวต้านทาน 10 เมกกะโอห์ม เมื่อ V_{in} มีค่ามากกว่า V_C แรงดันเอาต์พุทของออปแอมป์ตัวที่ 4 จะเข้าสู่การอิมิตัวทางด้านบวก ไดโอด D3 ไม่นำกระแส ไดโอด D4 จะนำกระแสอีกครั้ง C ก็จะเริ่มชาร์จประจุ จนเท่ากับแรงดันค่ายอดที่เกิดขึ้นใหม่ การทำงานของวงจรตรวจจับค่ายอดก็จะเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง วงจรตรวจจับค่ายอดของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรตรวจจับค่ายอด

วงจรย่อยทั้งหมดเมื่อนำมาประกอบกันจะเป็นดังรูปที่ 3.10 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในชุดวัดกระแสรีวไหลคือ ออปแอมป์ เบอร์ TL 061 ใช้เป็นตัวขยายแรงดันและกรองความถี่ และ เบอร์ AD 684 ใช้เป็นตัวเรกติไฟและตรวจจับค่ายอด อุปกรณ์วัดกระแสรีวไหลได้มีการปรับปรุงพัฒนามาตลอดจากเดิมที่พิกัดกระแสใช้งาน 16 mA (แบตเตอรี่ 9 V 4 ก้อนต่อการใช้งาน 1 วัน) ความถูกต้อง 3 เปอร์เซ็นต์ ที่ย่านวัดกระแส 10 – 500 mA จนกระทั่งที่ใช้ในปัจจุบัน อุปกรณ์วัดกระแสรีวไหลแบ่งเป็น 2 ชุดดังนี้ ชุดที่ 1 มีย่านวัดกระแส 0.5 - 50 mA อัตราขยาย 120 เท่า ความผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์วัด ไม่เกิน 2.14 เปอร์เซ็นต์ และชุดที่ 2 มีย่านวัดกระแส 10-500 mA อัตราขยาย 130 เท่า ความผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์วัด 1.43 เปอร์เซ็นต์ เกิดขึ้นที่ค่ากระแสอินพุท 505 mA นอกจากนั้นความผิดพลาดสูงสุดไม่เกิน 0.8 เปอร์เซ็นต์ การเปรียบเทียบและผลการทดสอบหาความเป็นเชิงเส้นและการตอบสนองความถี่ และรูปคลื่นสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรย่อย แสดงในภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 วงจรส่วนอิเล็กทรอนิกส์อุปกรณ์วิเคราะห์คลื่น

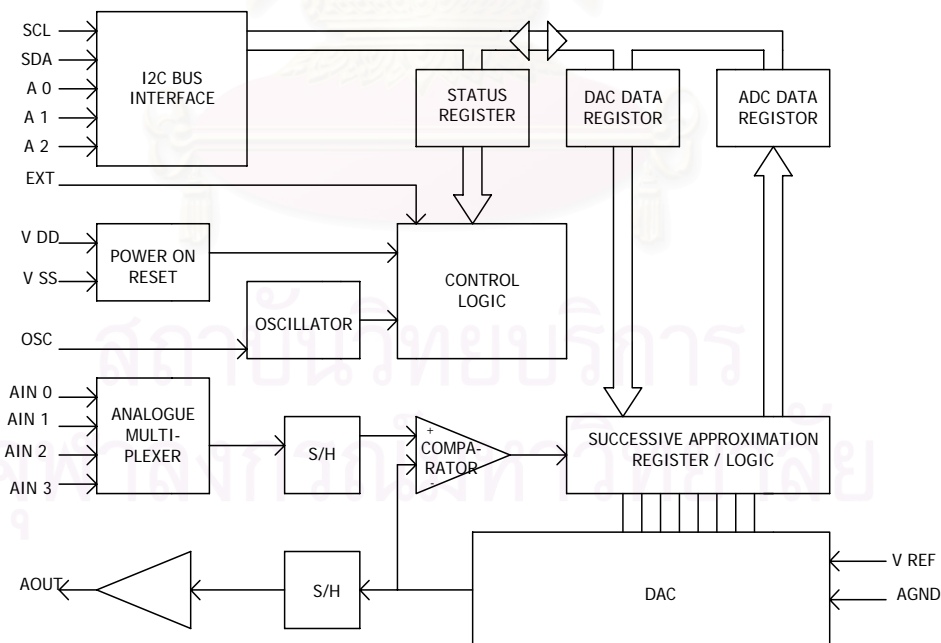
3.2.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลเข้ากับระบบบันทึกและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์

การเก็บบันทึกและแสดงปริมาณกระแสรั่วไหลตามผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยให้เกิดความสะดวกในการปฏิบัติงานและทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้จำนวนมาก ส่วนประกอบของชุดอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ประกอบด้วย

- 1) อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล เป็นอุปกรณ์ชุดเดียวกับกับอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลในข้อ

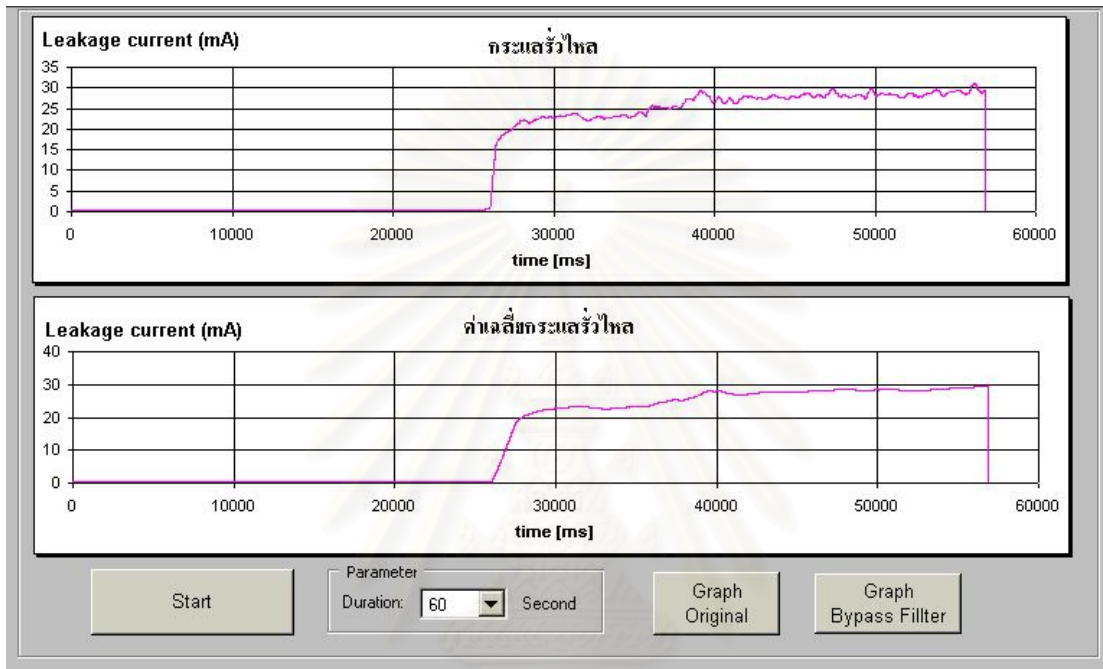
3.2.2 ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณกระแสรั่วไหลผ่านผิวลูกถ้วยฉนวนไปยังด้านกราวด์ สัญญาณกระแสรั่วไหลที่จะได้เปลี่ยนเป็นสัญญาณแรงดัน เพื่อส่งต่อไปยังตัวแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิทัล

2) ตัวแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter) หรือ ADC หรือ เอดีซี ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแรงดันที่ได้จากอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลให้เป็นสัญญาณดิจิทัล การแปลงสัญญาณจากแอนะลอกเป็นดิจิทัลนั้น ทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์สามารถที่จะอ่านค่าแรงดันดังกล่าวเพื่อนำไปแสดงผลและเก็บข้อมูลต่อไป ADC ที่เลือกใช้คือเบอร์ TCF 8591 รับแรงดันไฟตรง 5 โวลต์จากแหล่งจ่ายภายในเครื่องในคอมพิวเตอร์ ป้อนให้กับชุดออปแอมป์ที่เป็นวงจรภายใน ADC เบอร์ TCF 8591 มีคุณสมบัติสรุปโดยย่อคือ Full – scale Range = 0 - 5 โวลต์, Resolution 8 บิต, อัตราซีกตัวอย่าง 11.1 kHz รายละเอียดเพิ่มเติมของวงจรส่วนนี้ เป็นไปตามคำแนะนำของผู้ผลิต[50] รายละเอียดวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิทัล

3) ชุดแสดงผล การแสดงผลค่ายอดสัญญาณกระแสรั่วไหลสามารถที่จะแสดงผลเป็น เรียวล์ไทม์หรือ ไมก็ก็ได้ การแสดงผลแบบเรียวล์ไทม์จะถูกต้องมากขึ้นเมื่อมีการใช้คอมพิวเตอร์ที่มี สมรรถนะสูงขึ้น ระยะเวลาที่ใช้บันทึกค่ายอดของสัญญาณกระแสรั่วไหลสามารถกำหนดให้บันทึก ภายในระยะเวลาที่ต้องการได้ การแสดงผลจะนำค่ายอดของกระแสรั่วไหลมาแสดงผล ดังแสดงใน รูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 หน้าจอแสดงผล แสดงค่าของสัญญาณกระแสรั่วไหลเทียบกับเวลา

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลและแสดงผลเป็น โปรแกรมสำเร็จรูปที่มี ประกอบชุด เอดีซี เบอร์ TCF 8591 สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากหนังสือคู่มือ [51] โดยที่ การแสดงผลกระแสรั่วไหลที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการดัดแปลงให้สอดคล้องกับ รูปแบบที่ต้องการ หลักการทำงานของโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ค และการเปรียบเทียบอุปกรณ์ วัดกระแสรั่วไหลที่ใช้การเก็บบันทึกข้อมูลและบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงในภาคผนวก ข

บทที่ 4

การทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติของลูกถ้วยคอตันยาว

เมื่อทำการออกแบบและสร้างลูกถ้วยด้วยฉนวนเสร็จสิ้นแล้วจึงได้ทำการตรวจสอบและทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าในสถานะผิวลูกถ้วยสะอาด สถานะผิวลูกถ้วยเปรอะเปื้อน และคุณสมบัติทางกลและอื่นๆ อ้างอิงมาตรฐาน IEC [2,8,9] และ ANSI [10] เพื่อวิเคราะห์และประเมินผล การตรวจสอบและการทดสอบมีดังต่อไปนี้

- 1) การตรวจสอบทางมิติ
- 2) การทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าลูกถ้วยผิวแห้งสะอาด
- 3) การทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าลูกถ้วยผิวเปียกสะอาดและเปรอะเปื้อน
- 4) การทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางกลและอื่นๆ

4.1 การตรวจสอบทางมิติ

การตรวจสอบรูปร่างและมิติเป็นการทดสอบลักษณะทั่วไปของลูกถ้วยฉนวนแต่ละชนิดแบบ มาตรฐานจะกำหนดรูปร่างลักษณะมิติไว้แน่นอนพร้อมกับค่าที่ยอมให้คลาดเคลื่อนได้ การตรวจสอบลักษณะทางมิติของลูกถ้วยฉนวนจะทำเปรียบเทียบกับพวงลูกถ้วยแขนแบบ 52-4 4 ลูกต่อกันเป็น 1 พวง ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดมิติของลูกถ้วยคอตันยาวปึกสลับหลังจากทำการผลิต

รายการ	คอตันยาวปึกสลับ เคลือบธรรมดา	คอตันยาวปึกสลับ เคลือบสารกึ่งตัวนำ	พวงลูกถ้วยแขน 52-4 4 ลูกเป็น 1 พวง
ระยะอาร์ก (ม.ม.)	525	525	654
ระยะรั้ว (ม.ม.)	1370	1375	1168
ความยาวตามแกน (ม.ม.)	660	660	598
ระยะ เส้นผ่านศูนย์กลาง (ม.ม.)	ปึกสั้น 143	143	248
	ปึกยาว 192	192	
	แกน 63	63	

4.2 การทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนแห้งสะอาด

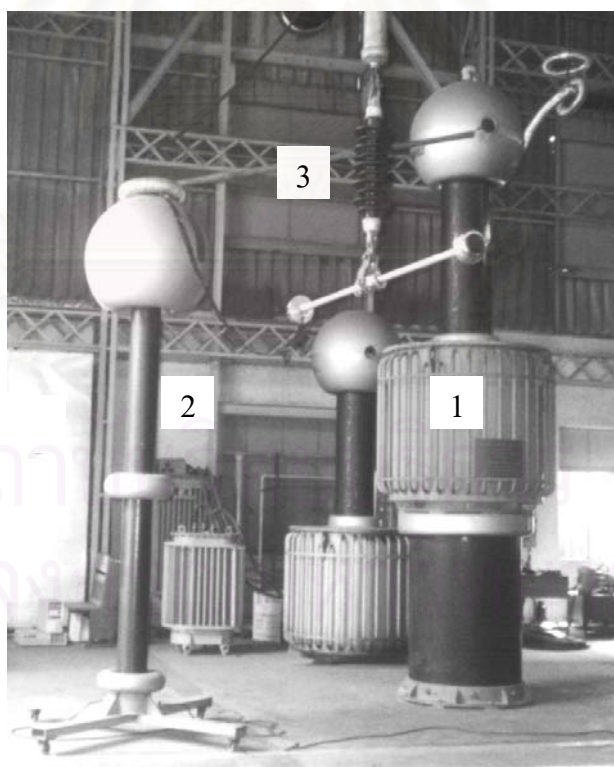
คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่จะใช้เป็นข้อกำหนดและเกณฑ์พิจารณาตัดสินคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนว่าได้ตามมาตรฐานหรือไม่ จะต้องทดสอบในหัวข้อต่อไปนี้

4.2.1 การทดสอบหาค่าแรงดันวابلไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ

แรงดันวابلไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ (Low frequency dry flashover voltage) หมายถึงค่าเฉลี่ยของแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ทำให้เกิดวابلไฟตามผิวบนลูกถ้วยฉนวนในสภาพแห้ง การทดสอบหาค่าแรงดันวابلไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลักแบบเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำจะทำเปรียบเทียบกับพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 ลูกเป็น 1 พวง

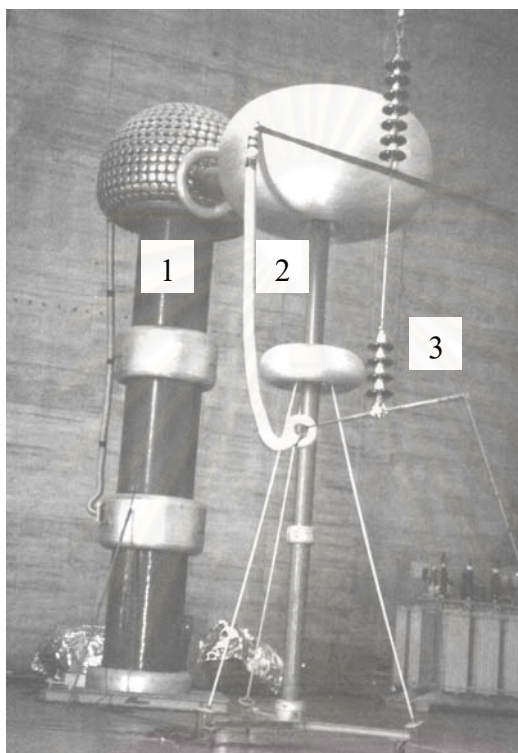
1) วงจรการทดสอบ

การทดสอบหาค่าแรงดันวابلไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำใช้อุปกรณ์และวงจรทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 (ก) การทดสอบหาค่าแรงดันวابلไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำลูกถ้วยฉนวน ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- โดยที่ 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ 500 kV 250 kVA
 2 คือ โวลเตจดิไวเดอร์ วัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ 600 kV
 3 คือ ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ



รูปที่ 4.1 (ข) การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำลูกถ้วยฉนวน ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงบางพลี การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

- โดยที่ 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ 1200 kV 900 kVA
 2 คือ โวลเตจดิไวเดอร์ วัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ 1200 kV
 3 คือ พวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 4 ลูกเป็น 1 พวง

รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ (ก) ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดา และแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำ (ข) พวงลูกถ้วยแขวน

2) วิธีการทดลอง การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนและลำดับขั้นตอนการทดลองปฏิบัติตาม ANSI C 29.1 - 1992 [10] โดยที่สภาพแวดล้อมขณะทำการทดลองมีรายละเอียดดังนี้ ความดันของอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 762.9 - 769 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าอยู่ระหว่าง 22.5 – 29.8 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 51.5 – 63 เปอร์เซ็นต์ ผลการคำนวณค่าตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ ; Kd มีค่าเท่ากับ 0.988 – 1.02 และค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้น; Kh มีค่าเท่ากับ 0.952 – 1.047

3) ผลการทดสอบ ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำ และพวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 4 ลูกเป็น 1 พวง แสดงในตารางที่ 4.2 ตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา

ลูกถ้วยฉนวนลูกที่	แรงดันวาทไฟตามผิวที่สภาวะมาตรฐาน (kV)					ค่าเฉลี่ย
	แรงดันวาทไฟตามผิว					
1	216.8	216.8	216.8	216.8	221.8	217.8
2	214.8	214.8	217.3	217.8	216.8	216.3
3	219.8	220.8	218.8	223.8	220.8	220.8
4	213.8	214.8	214.8	213.8	216.8	214.8
5	218.8	217.8	215.8	214.8	215.8	216.6

แรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำเฉลี่ย 5 ลูก คือ 217.23 kV

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ

ลูกถ้วยฉนวนลูกที่	แรงดันวาทไฟตามผิวที่สภาวะมาตรฐาน (kV)					ค่าเฉลี่ย
	แรงดันวาทไฟตามผิว					
1	256.4	249.4	249.4	246.9	246.4	249.7
2	254.9	249.4	245.4	253.9	254.4	251.6
3	256.7	254.7	254.2	253.7	256.7	255.2
4	250.7	264.7	272.7	279.7	266.7	266.9
5	247.4	244.4	235.5	242.4	237.5	241.5

แรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำเฉลี่ย 5 ลูก คือ 252.99 kV

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำพวงลูกด้วยแชน 52- 4

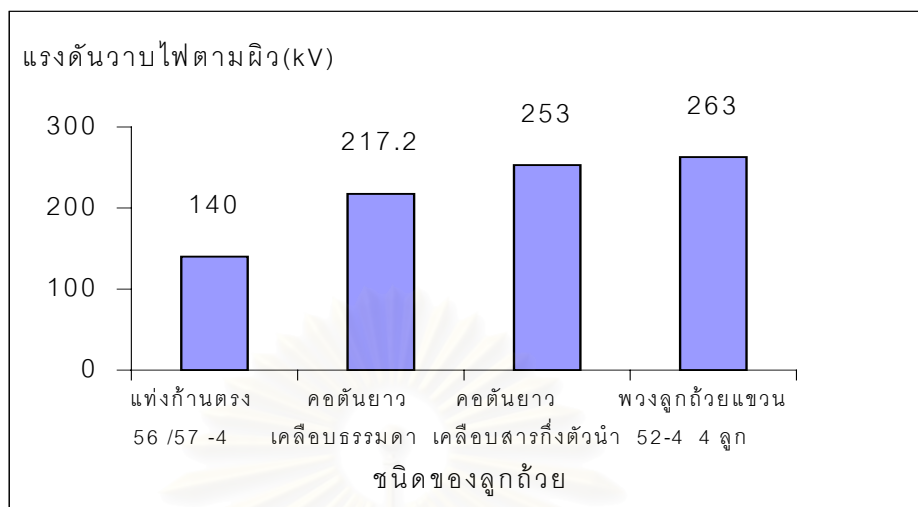
พวงลูกด้วยฉนวน พวงที่	แรงดันวาทไฟตามผิวที่สภาวะมาตรฐาน (kV)					ค่าเฉลี่ย
	แรงดันวาทไฟตามผิว					
1	263.2	269.8	275.4	264.1	273.5	268.99
2	264.1	258.5	249.1	248.2	251	254.18
3	256.6	261.3	270.7	263.2	266	263.55
4	266.6	269.4	271.2	269.4	275.9	270.49
5	252.5	265.6	255.3	259	254.4	257.35

แรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำเฉลี่ย 5 ลูกคือ 262.91 kV

ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำของลูกด้วยฉนวนทั้ง 3 ชนิดเปรียบเทียบกันแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำของลูกด้วยฉนวนทั้ง 3 ชนิด

ลูกด้วยฉนวนลูกที่	แรงดันวาทไฟตามผิวที่สภาวะมาตรฐาน (kV)		
	เคลือบธรรมดา	เคลือบสารกึ่งตัวนำ	พวงลูกด้วยแชน
1	217.8	249.7	269
2	216.3	251.6	254
3	220.8	255.2	264
4	214.8	266.9	270
5	216.6	241.5	257
เฉลี่ย	217.23	252.99	263



รูปที่ 4.2 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำ เปรียบเทียบกับพวงลูกถ้วยแขวน และค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำมาตรฐานลูกถ้วยแท่งก้านตรงที่ใช้ในบริเวณประะเป็อน

4) การวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดาและแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำมีค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำน้อยกว่า พวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 4 ลูก เป็น 1 พวง 17.49 % และ 3.8 % ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่พวงลูกถ้วยแขวนมีระยะอาร์กมากกว่าลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ 129 มม. เมื่อพิจารณาเกณฑ์การใช้งานลูกถ้วยฉนวนในบริเวณประะเป็อนปานกลางที่ระดับแรงดัน 33 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดให้ใช้พวงลูกถ้วยแขวน 52- 4 4 ลูกเป็น 1 พวง และลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57 – 4 ดังรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก โดยที่สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม(สมอ.) กำหนดให้ ลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56 /57 – 4 จะต้องมีความถี่ต่ำวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำไม่น้อยกว่า 140 kV เมื่ออ้างอิงตามมาตรฐานดังกล่าวพบว่า ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับผ่านเกณฑ์การทดสอบค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำตามข้อกำหนดของสมอ.

4.2.2 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน

ค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ความถี่พลังงาน (Power – frequency withstand voltage) หมายถึง ค่าแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงานที่ลูกถ้วยฉนวนจะต้องทนได้โดยจะต้องไม่เกิดวาบไฟตามผิวขึ้นภายในระยะเวลาที่กำหนด

1) วงจรการทดสอบ การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน ใช้อุปกรณ์และวงจรทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1

2) วิธีการทดลอง การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนและลำดับขั้นตอนการทดลองปฏิบัติตาม ANSI C 29.1-1978 [10] โดยที่สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ ความดันอากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 68 เปอร์เซ็นต์ ผลการคำนวณค่าตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ ; K_d มีค่าเท่ากับ 0.94 และค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้น; K_h มีค่าเท่ากับ 0.968

3) ผลการทดสอบ เมื่อป้อนแรงดันให้กับลูกถ้วยฉนวน 70 kV (สำหรับลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ทำงานกับระบบแรงดันสูงสุด 36 kV) และ 140 kV (สำหรับลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ทำงานกับระบบแรงดันสูงสุด 69 kV) [52] เป็นระยะเวลา 1 นาที สังเกตการเกิดวาบไฟตามผิว ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 การเกิดวาบไฟตามผิวแห่งกระแสสลับ 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับที่ระดับแรงดัน 72.5 kV (ระดับแรงดันที่ป้อนให้กับลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ ที่สภาวะห้องทดลอง)

ลูกถ้วยฉนวนลูกที่	ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ	
	เคลือบธรรมดา	เคลือบสารกึ่งตัวนำ
1	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
2	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
3	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
4	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
5	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว

ตารางที่ 4.7 การเกิดวาทไฟตามผิวแห่งกระแสสลับ 50 Hz ลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลัที่ระดับแรงดัน 145 kV (ระดับแรงดันที่ป้อนให้กับลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลั ที่สภาวะห้องทดลอง)

ลูกถ้วยจนวนลูกที่	ลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลั	
	เคลือบธรรมดา	เคลือบสารกึ่งตัวนำ
1	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว
2	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว
3	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว
4	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว
5	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว

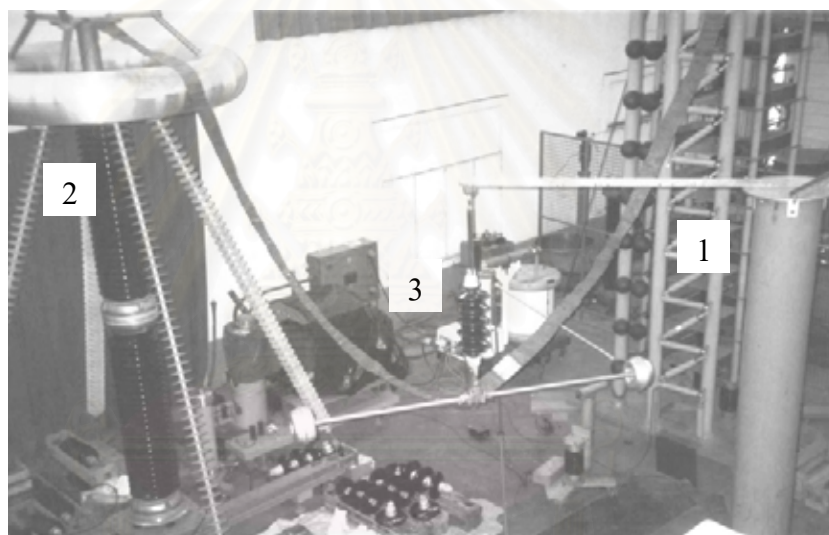
4) การวิเคราะห์และประเมินผล ลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลัทั้งสองแบบออกแบบให้ใช้งานที่ระดับแรงดัน 33 kV ดังนั้นได้ทำการป้อนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ระดับแรงดันทดสอบ 70 kV (ที่สภาวะมาตรฐาน) ให้กับลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลันาน 1 นาที และสังเกตว่ามีการเกิดวาทไฟตามผิวหรือไม่ ผลการทดสอบพบว่าไม่เกิดวาทไฟตามผิวกับลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลัทั้ง 2 ชนิด และเพื่อให้เกิดความแน่ใจในการใช้งานจึงได้ทำการทดสอบที่ระดับแรงดันสูงกว่าคือที่ระดับแรงดันใช้งาน 69 kV ลูกถ้วยจนวนจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ระดับแรงดัน 140 kV (ที่สภาวะมาตรฐาน) ผลการทดสอบพบว่าไม่เกิดวาทไฟตามผิวกับลูกถ้วยจนวนทั้ง 2 ชนิดเหมือนกันกับกรณีแรก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลัผ่านเกณฑ์การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับตามข้อกำหนดของ IEC 71 –1 [52]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.3 การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งอิมพัลส์วิกฤต

แรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (Critical impulse flashover voltage) หมายถึง ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวลูกถ้วย 50% เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์วิกฤตมาตรฐาน 1.2 / 50 μ S แบ่งเป็นชั่วคราวและชั่วลบ การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตอาจทำได้ 2 วิธีคือ วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ (Multiple level voltage method) และวิธีปรับขึ้น - ลง (Up-and-down method) [53]

1) วงจรการทดสอบ การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งอิมพัลส์วิกฤตของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับและพวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 4 ลูกเป็น 1 พวง ใช้อุปกรณ์และวงจรการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.3

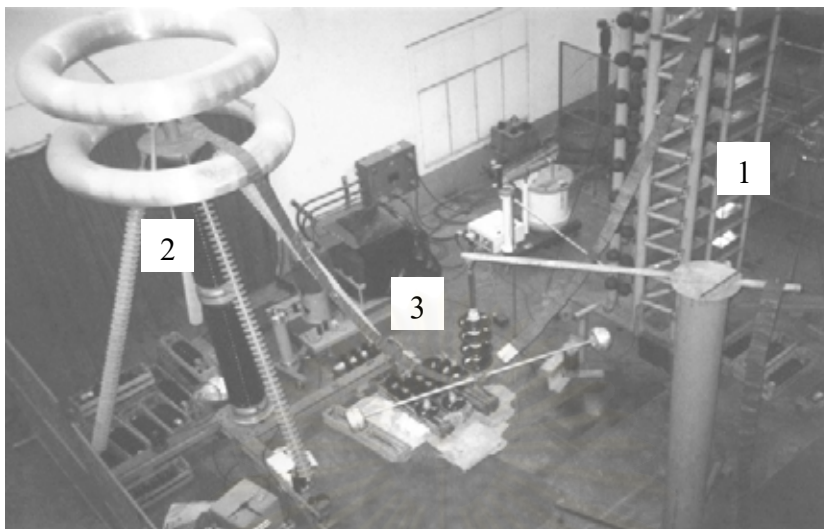


รูปที่ 4.3 (ก) การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ

โดยที่ 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ

2 คือ อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบ ตัวเก็บประจุ มีความต้านทานหน่วง 760 pF

3 คือ ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ



รูปที่ 4.3 (ข) การทดสอบหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตพวงลูกถ้วยแขวน 52 - 4

โดยที่ 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ

2 คือ อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบ ตัวเก็บประจุ มีความต้านทานหน่วง 760 pF

3 คือ พวงลูกถ้วยแขวน 52 - 4 4 ลูกต่อกันเป็น 1 พวง

รูปที่ 4.3 วงจรที่ใช้ในการทดสอบการทดสอบหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (ก) ลูกถ้วยคอตันยาวปีกลัสส์ (ข) พวงลูกถ้วยแขวน 52 - 4

2) วิธีการทดลอง จะใช้วิธีปรับขึ้น - ลง (Up and down method) [53] การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนและลำดับขั้นตอนการทดลองปฏิบัติตาม ANSI C 29.2 - 1992 [10] โดยที่สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ ความดันอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 757.8-760.2 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าอยู่ระหว่าง 28 - 32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 43 - 83 เปอร์เซ็นต์ ผลการคำนวณค่าตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ ; K_d มีค่าเท่ากับ 0.969 - 0.99 และค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้น; K_h มีค่าเท่ากับ 0.921 - 0.995

3) ผลการทดสอบ ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์วิกฤต ขั้วบวกและขั้วลบของลูกถ้วยคอตันยาวปีกลัสส์เคลือบธรรมดา เคลือบสารกึ่งตัวนำ และพวงลูกถ้วยแขวน 52 - 4 แสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบที่ใช้สำหรับการทดสอบลูกถ้วยคอตันยาวปีกลัสส์เคลือบธรรมดา และเคลือบสารกึ่งตัวนำ และพวงลูกถ้วยแขวน 52 - 4 แสดงดังรูปที่ 4.4 - รูปที่ 4.9 และรูปคลื่นอิมพัลส์ที่แสดงการเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนแต่ละ

ชนิดที่ห่างคลื่นแรงดันทั้งขั้วบวกและขั้วลบ แสดงดังรูป 4.10 – รูปที่ 4.16 ตามลำดับ โดยที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีประสิทธิภาพในการสร้างแรงดัน (η) เท่ากับ 98.5 %

ตารางที่ 4.8 ค่าแรงดันวาวไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์วิกฤตขั้วบวกลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา และเคลือบสารกึ่งตัวนำ และพวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4

ลูกที่	แรงดันวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (Ub 50% ; kV)		
	เคลือบธรรมดา	เคลือบสารกึ่งตัวนำ	พวงลูกถ้วยแขวน
1	395	402	416
2	400	405	423
3	400	399	417
4	397	406	415
5	394	399	424
เฉลี่ย	397	402	419

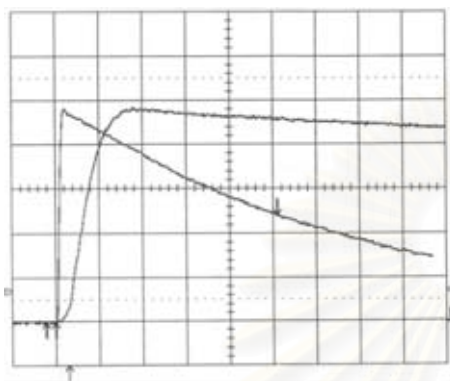
ตารางที่ 4.9 ค่าแรงดันวาวไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์วิกฤตขั้วลบ ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา และเคลือบสารกึ่งตัวนำ และพวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4

ลูกที่	แรงดันวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (Ub 50% ; kV)		
	เคลือบธรรมดา	เคลือบสารกึ่งตัวนำ	พวงลูกถ้วยแขวน
1	392	404	369
2	396	409	368
3	393	406	374
4	393	414	374
5	398	416	376
เฉลี่ย	395	410	372

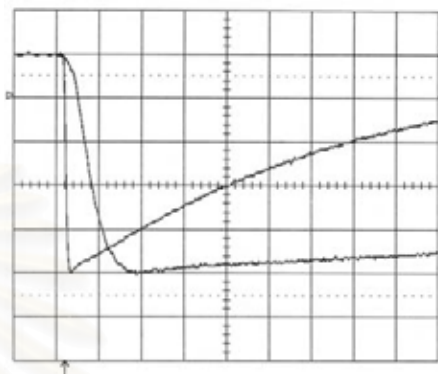
รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนตัวอย่าง

1) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบ

ธรรมดา



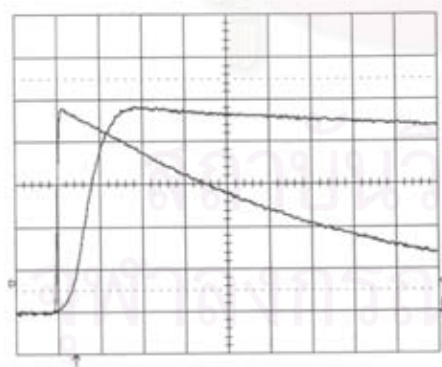
(ก) ข้าวบวก



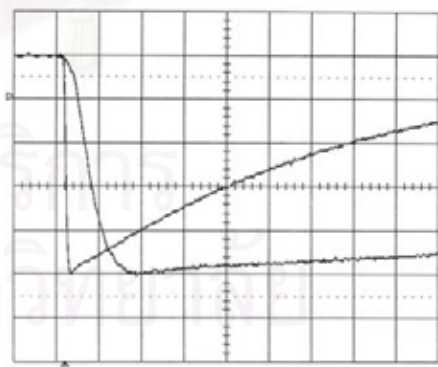
(ข) ข้าวลบ

รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา(ก) ข้าวบวก ที่ระดับแรงดัน 380 kV โดยที่ $T_1 = 1.18 \mu\text{S}$ $T_2 = 51.05 \mu\text{S}$ (ข) ข้าวลบ ที่ระดับแรงดัน 379 kV โดยที่ $T_1 = 1.18 \mu\text{S}$ $T_2 = 51.61 \mu\text{S}$

2) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ



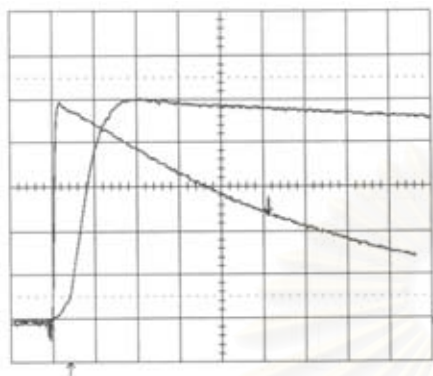
(ก) ข้าวบวก



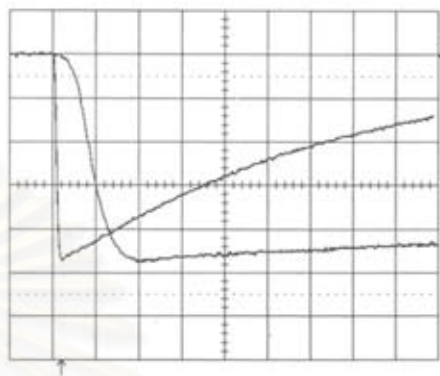
(ข) ข้าวลบ

รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ (ก) ข้าวบวก ที่ระดับแรงดัน 377 kV โดยที่ $T_1 = 1.18 \mu\text{S}$ $T_2 = 52.83 \mu\text{S}$ (ข) ข้าวลบ ที่ระดับแรงดัน 389 kV โดยที่ $T_1 = 1.18 \mu\text{S}$ $T_2 = 51.81 \mu\text{S}$

3) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบใช้ทดสอบพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 4 ลูก เป็น 1 พวง



(ก) ข้าวบวก

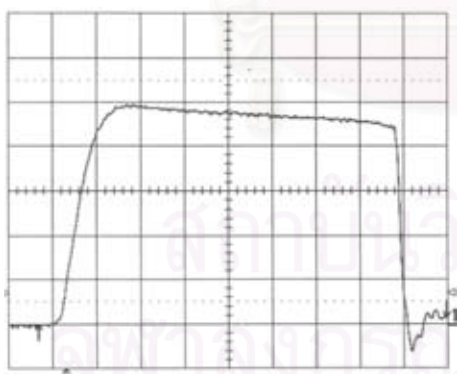


(ข) ข้าวลบ

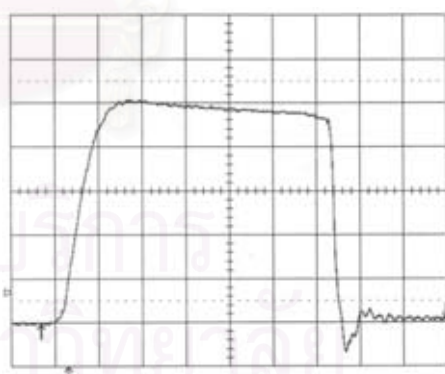
รูปที่ 4. 6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบที่ใช้ทดสอบพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 (ก) ข้าวบวก ที่ระดับแรงดัน 397 kV โดยที่ $T_1 = 1.18 \mu\text{S}$ $T_2 = 51.6 \mu\text{S}$ (ข) ข้าวลบ ที่ระดับแรงดัน 379 kV โดยที่ $T_1 = 1.18 \mu\text{S}$ $T_2 = 51.86 \mu\text{S}$

การเกิดวาทไฟตามผิวแหงอิมพัลส์

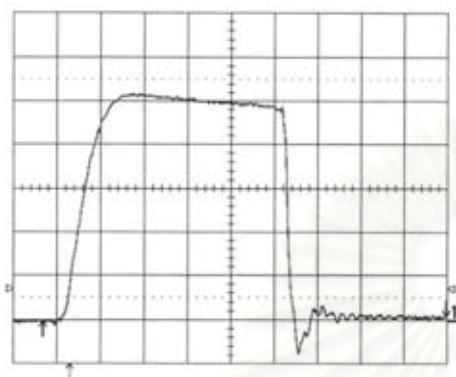
1) การเกิดวาทไฟตามผิวแหงอิมพัลส์ข้าวบวก ลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา



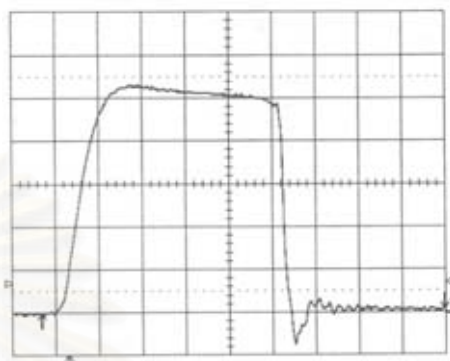
(ก) แรงดัน 389 kV



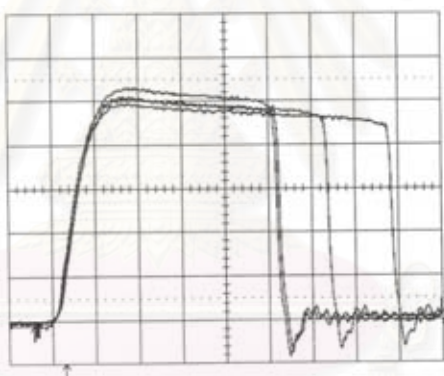
(ข) แรงดัน 399 kV



(ค) แรงดัน 409 kV



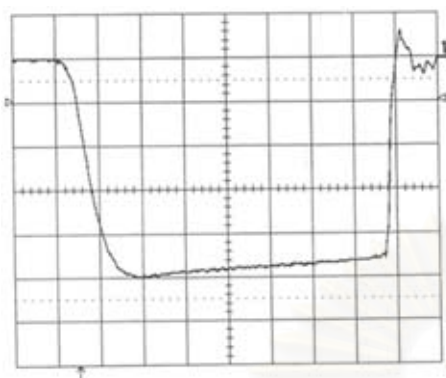
(ง) แรงดัน 417 kV



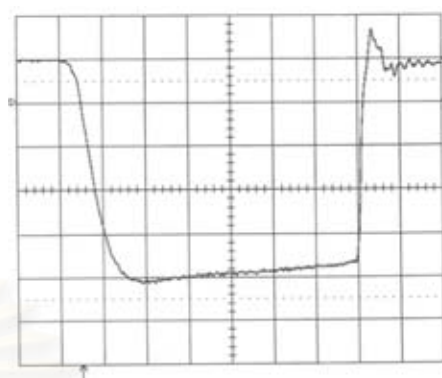
(จ) เปรียบเทียบการเกิดวาทไฟตามผิวที่ระดับแรงดันตามข้อ ก ข ค ง

รูปที่ 4.7 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาทไฟตามผิวที่ทางคลื่นแรงดันขั้วบวกของลูกถ้วยคอตันยาว
 ปีกสลับเคลือบธรรมดาที่ระดับแรงดัน ก) 389 kV ข) 399 kV ค) 409 kV ง) 417 kV
 จ) ความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันอิมพัลส์ต่อระยะเวลาการเกิดวาทไฟตามผิว

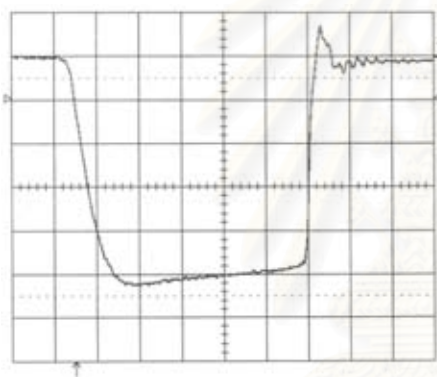
2) การเกิดวาทไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์ชั่วพล ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา



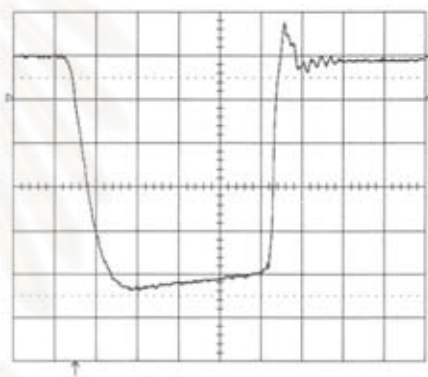
(ก) แรงดัน 388 kV



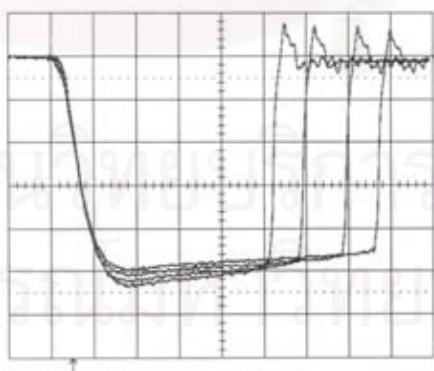
(ข) แรงดัน 398 kV



(ค) แรงดัน 407 kV



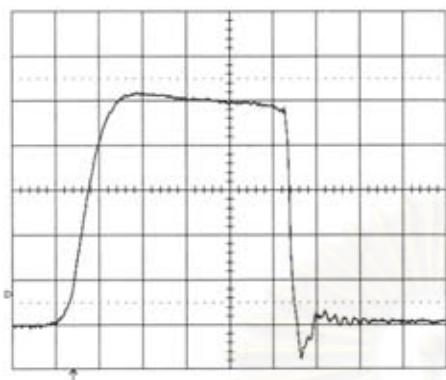
(ง) แรงดัน 416 kV



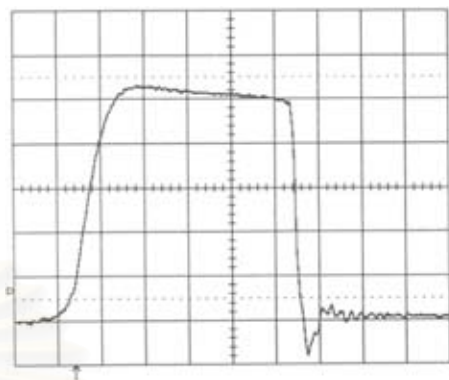
(จ) เปรียบเทียบการเกิดวาทไฟตามผิวที่ระดับแรงดันตามข้อ ก ข ค ง

รูปที่ 4.8 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาทไฟตามผิวที่หากลืนแรงดันชั่วพลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาที่ระดับแรงดัน ก) 388 kV ข) 398 kV ค) 407 kV ง) 416 kV
จ) ความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันอิมพัลส์ต่อระยะเวลาการเกิดวาทไฟตามผิว

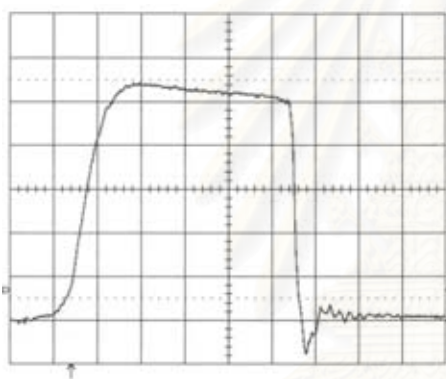
3) การเกิดวาทไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์ชั่ววอกของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ



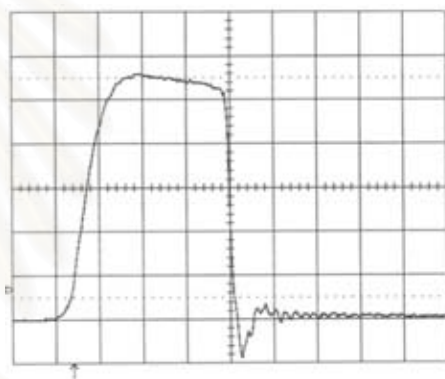
(ก) แรงดัน 404 kV



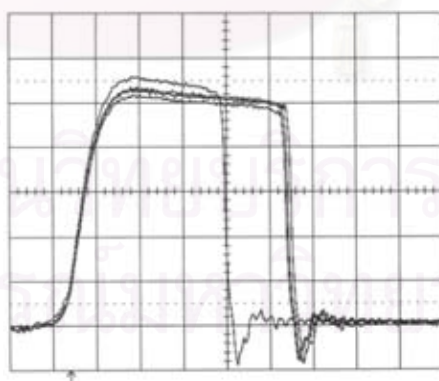
(ข) แรงดัน 414 kV



(ค) แรงดัน 423 kV



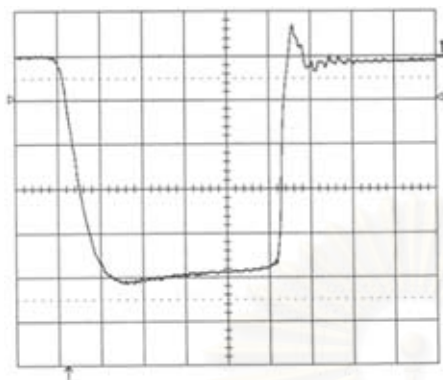
(ง) แรงดัน 435 kV



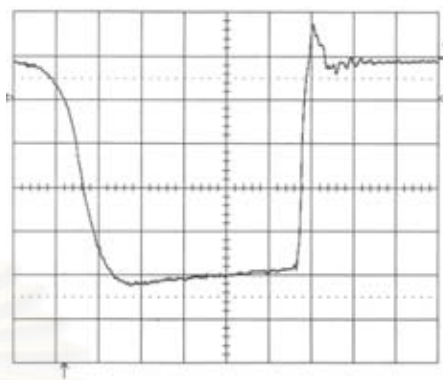
(จ) เปรียบเทียบการเกิดวาทไฟตามผิวที่ระดับแรงดันตามข้อ ก ข ค ง

รูปที่ 4.9 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาทไฟตามผิวที่หางคลื่นแรงดันชั่ววอกของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ระดับแรงดัน ก) 404 kV ข) 414 kV ค) 423 kV ง) 435 kV
 จ) ความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันอิมพัลส์ต่อระยะเวลาการเกิดวาทไฟตามผิว

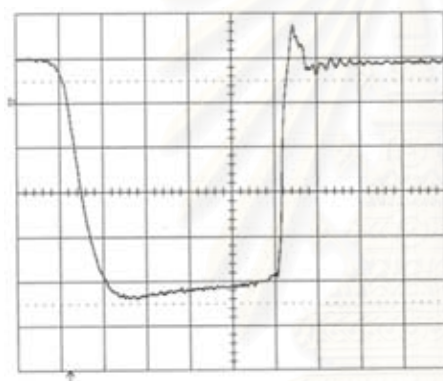
4) การเกิดวาบไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์ชั่วเวลาถูกด้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ



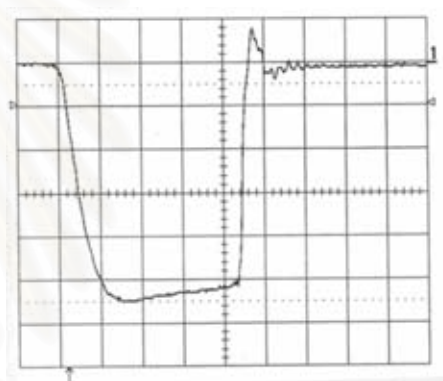
(ก) แรงดัน 398 kV



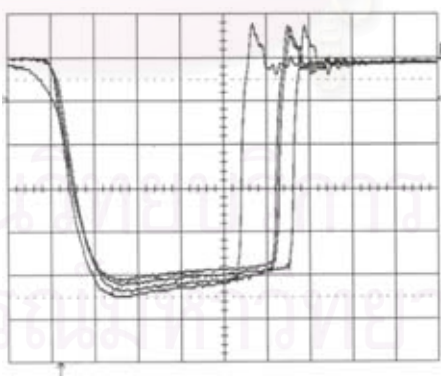
(ข) แรงดัน 406 kV



(ค) แรงดัน 417 kV



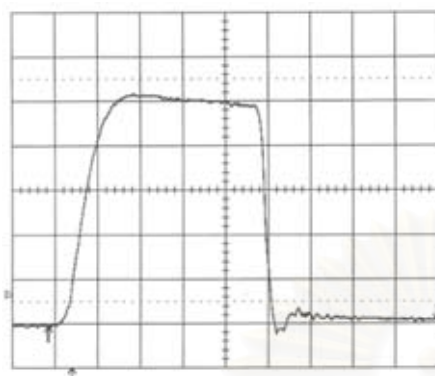
(ง) แรงดัน 427 kV



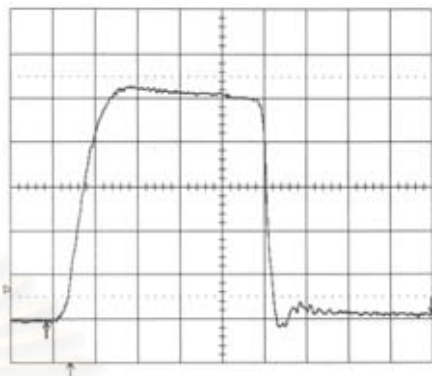
(จ) เปรียบเทียบการเกิดวาบไฟตามผิวที่ระดับแรงดันตามข้อ ก ข ค ง

รูปที่ 4.10 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาบไฟตามผิวที่ทางคลื่นแรงดันชั่วเวลาถูกด้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ระดับแรงดัน ก) 398 kV ข) 406 kV ค) 417 kV ง) 427 kV จ) ความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันอิมพัลส์ต่อระยะเวลาการเกิดวาบไฟตามผิว

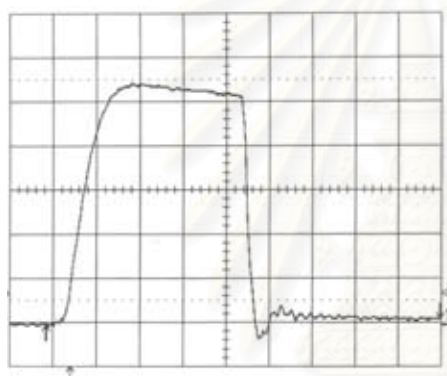
5) การเกิดวาทไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์ชั่ววอกพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 4 ลูกต่อ 1 พวง



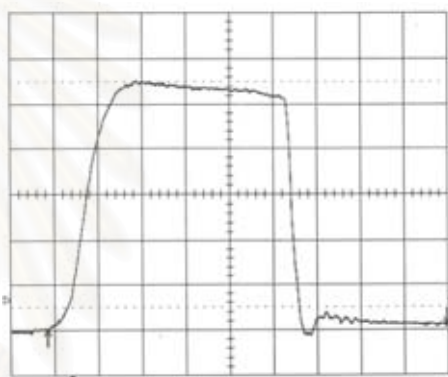
(ก) แรงดัน 406 kV



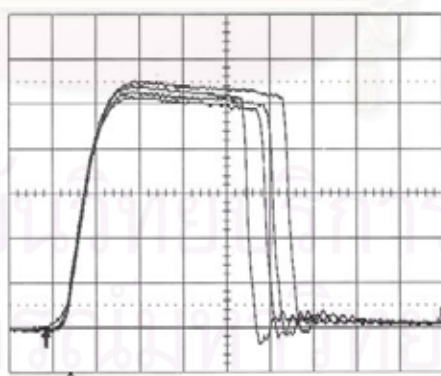
(ข) แรงดัน 416 kV



(ค) แรงดัน 426 kV



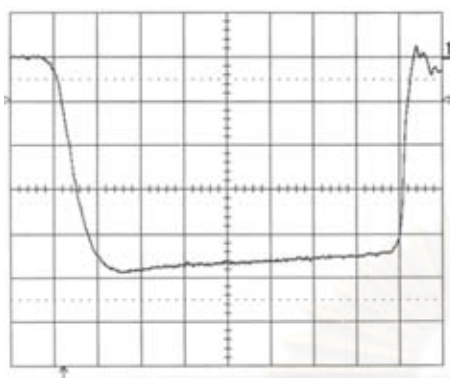
(ง) แรงดัน 433 kV



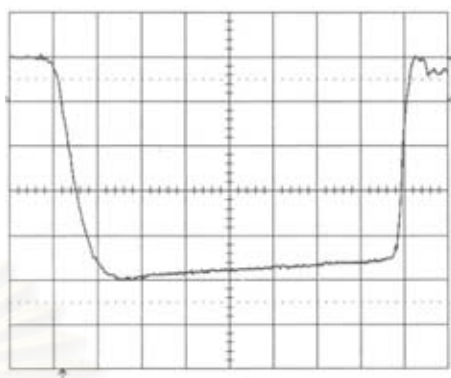
จ) เปรียบเทียบการเกิดวาทไฟตามผิวที่ระดับแรงดันตามข้อ ก ข ค ง

รูปที่ 4.11 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาทไฟตามผิวที่ห่างคลื่นแรงดันชั่ววอกของพวงลูกถ้วยแขวน 52-4 4 ลูกเป็น 1 พวง ที่ระดับแรงดัน ก) 406 kV ข) 416 kV ค) 426 kV ง) 433 kV
 จ) ความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันอิมพัลส์ต่อระยะเวลาการเกิดวาทไฟตามผิว

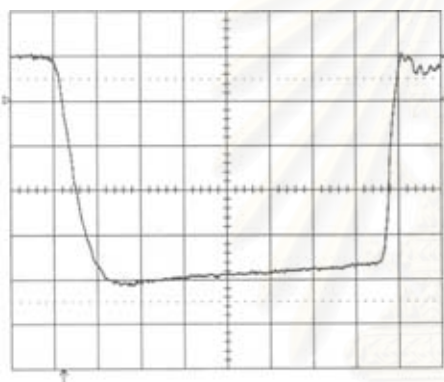
6) การเกิดวาทไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์ชั่วลบพวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 4 ลูกเป็น 1 พวง



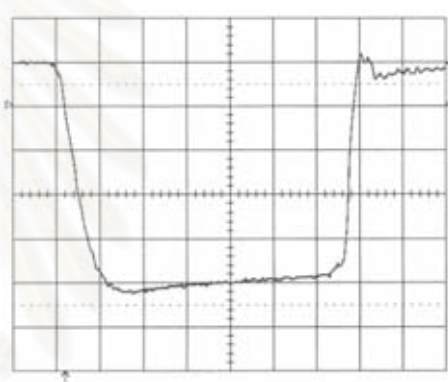
(ก) แรงดัน 379 kV



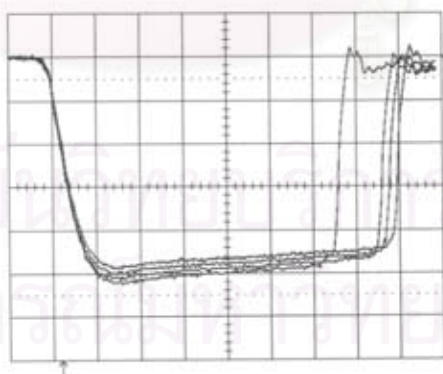
(ข) แรงดัน 388 kV



(ค) แรงดัน 398 kV



(ง) แรงดัน 408 kV



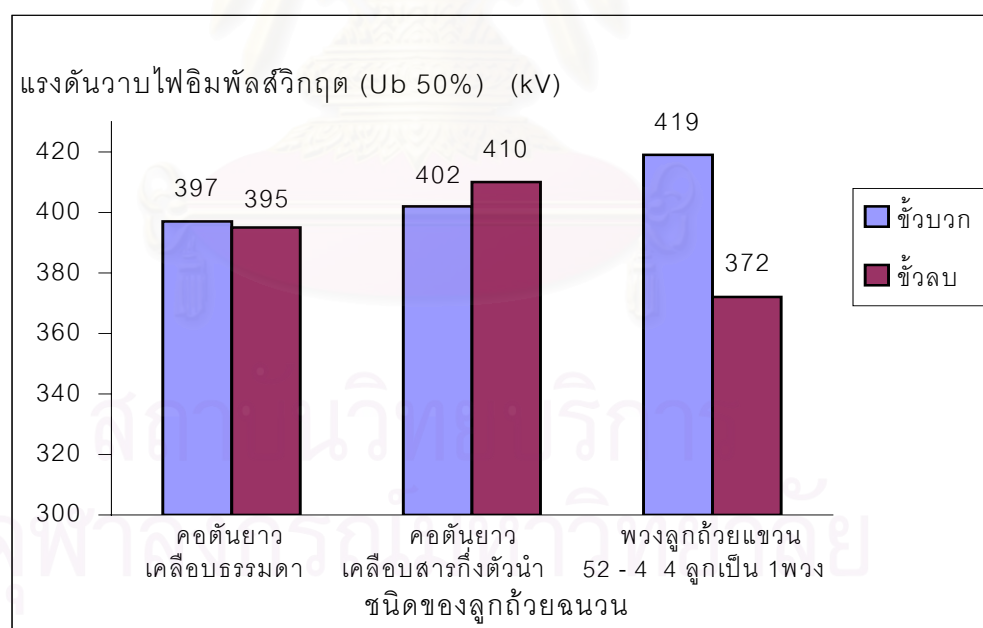
จ) เปรียบเทียบการเกิดวาทไฟตามผิวที่ระดับแรงดันตามข้อ ก ข ค ง

รูปที่ 4.12 รูปคลื่นอิมพัลส์การเกิดวาทไฟตามผิวที่ทางคลื่นแรงดันชั่วลบของพวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 4 ลูกเป็น 1 พวง ที่ระดับแรงดัน ก) 379 kV ข) 388 kV ค) 398 kV ง) 408 kV
 จ) ความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันอิมพัลส์ต่อระยะเวลาการเกิดวาทไฟตามผิว

4) การวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ ผลการทดสอบหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์วิกฤตชั่วววกและชั่วลบของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำ และพวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์วิกฤตชั่วววก และชั่วลบของลูกถ้วยชนิดทดสอบ

ชนิดของลูกถ้วยชนิดทดสอบ	แรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (Ub 50% ; kV)	
	ชั่วววก	ชั่วลบ
คอดันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา	397	395
คอดันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ	402	410
พวงลูกถ้วยแขวน 52- 4 4 ลูกเป็น 1 พวง	419	372



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์วิกฤตชั่วววก และชั่วลบของลูกถ้วยชนิดทดสอบ

การทดสอบหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบ
 ธรรมดา และเคลือบสารกึ่งตัวนำ และพวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน
 ANSI C 29.1 [10] การหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (U_b 50%) ของลูกถ้วยชนิดตัว
 อย่างใช้วิธีปรับขึ้น – ลง [54] ซึ่งได้ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตขั้วบวก 397 kV และขั้ว
 ลบ 395 kV สำหรับลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา และค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์
 วิกฤตขั้วบวก 402 kV และขั้วลบ 410 kV สำหรับลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ
 และ สำหรับพวงลูกถ้วยแขวนจะได้ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตขั้วบวก 419 kV และขั้ว
 ลบ 372 kV เมื่อพิจารณาเกณฑ์การผ่านการทดสอบที่กำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม
 กำหนดให้ ลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56 /57 – 4 จะต้องมียค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตต่ำสุด ขั้ว
 บวก 225 kV และ 300 kV สำหรับขั้วลบ จะพบว่าลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับผ่านเกณฑ์การทดสอบ
 ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำตามข้อกำหนดของ สมอ.

4.2.4 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์(Critical impulse withstand voltage) อาจทำได้
 2 วิธีโดยการป้อนแรงดันตามที่กำหนด 15 ครั้ง ของแต่ละขั้วและยอมให้เกิดวาทไฟตามผิวได้ไม่เกิน
 2 ครั้ง หรือ อาจหาได้จากค่าวาทไฟตามผิว 50 % คือหาความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ โดยอาศัย
 สถิติตามสมการที่ (4.1) คือ

$$U_{w10\%} = U_{b50\%}(1 - 3z) = 0.96 U_{b50\%} \quad [54] \quad (4.1)$$

เมื่อ z คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.3 เมื่อเป็นการกระจายปกติ

- 1) วิธีการทดสอบ ใช้วิธีการคำนวณทางสถิติ
- 2) ผลการคำนวณ ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของลูกถ้วยฉนวนทดสอบ

ชนิดของลูกถ้วยฉนวน	ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ ($U_{w10\%}$)	
	ขั้วบวก	ขั้วลบ
คอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา	381	379
คอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ	386	394
พวงลูกถ้วยแขวน 52- 4 ลูกเป็น 1 พวง	402	357

3) การวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ ลูกถ้วยฉนวนคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดามีค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ 381 kV สำหรับขั้วบวก และ 379 kV สำหรับขั้วลบ พิจารณามาตรฐานที่มีการกำหนดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของลูกถ้วยฉนวน คือ IEC 71-1 [53] กำหนดให้ลูกถ้วยฉนวนที่จะใช้กับระดับแรงดันสูงสุด 36 kV จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ 145 kV หรือ 170 kV ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการต่อกราวด์ และ IEC 60433 [30] กำหนดให้ลูกถ้วยคอตันยาว L 100 B/C 325 ซึ่งมีความยาวระยะปกติสูงสุดไม่เกิน 870 มิลลิเมตร (ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับมีความยาวปกติ 660 มิลลิเมตร) และมีความคงทนต่อแรงดึง 100 kN จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไม่น้อยกว่า 325 kV จากผลการทดสอบพบว่าลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐาน ทั้ง 2 ฉบับ

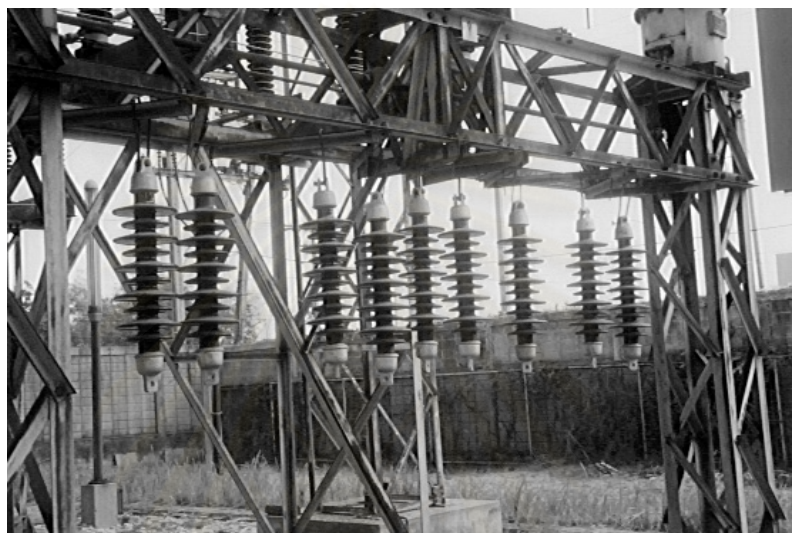
4.3 การทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าลูกถ้วยผิวเปียกเปรอะเปื้อน

โดยความเป็นจริงลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ติดตั้งหรือรองรับสายไฟจะใช้งานในสภาพแวดล้อมที่เปิดโล่ง ลูกถ้วยฉนวนมีโอกาสที่จะได้รับฝุ่นละออง สิ่งเปรอะเปื้อนและเปียกชื้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าวาบไปตามผิวต่ำลง มาตรฐาน IEC 507 ; 1991 [9] จึงได้แนะนำให้มีการทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าในสภาวะผิวเปรอะเปื้อนจำลอง เพื่อที่จะให้เกิดความมั่นใจได้เมื่อนำเอาลูกถ้วยฉนวนเหล่านั้นติดตั้งใช้งานในสภาวะแวดล้อมจริง

4.3.1 การแขวนลูกถ้วยฉนวนเพื่อรองรับสิ่งเปรอะเปื้อน

การทดสอบคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อนตามธรรมชาติ ได้จากการนำลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำไปแขวนรองรับสิ่งเปรอะเปื้อนชนิดสารเคมี และไอเกลือจากทะเลโดยไม่ป้อนแรงดันที่สถานีไฟฟ้าย่อยบางปู ตาม

โครงการเป็นเวลา 1 ปี ดังรูปที่ 4.14 และเก็บมาทดสอบหลังจากติดตั้งรองรับสิ่งเปราะเปื้อนเป็นเวลา 4 เดือน 8 เดือน และ 12 เดือน ตามลำดับ และได้ทำการวัดค่า ESDD ในช่วงเวลาดังกล่าวด้วยทุกครั้ง



รูปที่ 4.14 ลูกถ้วยฉนวนที่แขวนรองรับสิ่งเปราะเปื้อนที่สถานีไฟฟ้าย่อยบางปู

4.3.2 การวัดระดับความเปราะเปื้อน

ระดับความเปราะเปื้อนหรือค่า ESDD เป็นค่าที่นำไปใช้ในการออกแบบ เลือกใช้ และกำหนดรายละเอียดในการบำรุงรักษาลูกถ้วยฉนวนที่ติดตั้งในระบบสายส่ง การวัดระดับความเปราะเปื้อนได้ทำ 3 ครั้ง หลังจากทำการแขวนลูกถ้วยฉนวนเพื่อรองรับสิ่งเปราะเปื้อน การวัดค่า ESDD ได้ทำการวัดในวันที่ 30 พฤศจิกายน 2543 วันที่ 4 เมษายน 2544 และ วันที่ 14 สิงหาคม 2544 ตามลำดับ ขั้นตอนการวัดระดับความเปราะเปื้อนที่จับเกาะบนผิวลูกถ้วยฉนวนมีดังนี้

- 1) การเก็บตัวอย่างและการวัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลายเปราะเปื้อน
- 2) การคำนวณค่า ESDD
- 3) ผลการคำนวณ ESDD และการวิเคราะห์ผล

4.3.3 การเก็บตัวอย่างและการวัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลายเปรอะเปื้อน

การเก็บตัวอย่างสิ่งเปรอะเปื้อนเพื่อวัดค่า ESDD มีขั้นตอนดังนี้

1) ใช้น้ำกลั่นหรือน้ำสะอาดล้างอุปกรณ์ต่างๆ เช่น บีกเกอร์ กระจกวัดสาร แปรง และอุปกรณ์อื่นๆ ให้สะอาดก่อนทำการเก็บสะสมสิ่งเปรอะเปื้อน เพื่อความถูกต้องของผลการทดลอง ควรจะล้างอุปกรณ์ต่างๆอย่างน้อย 4 ครั้ง [55]

2) เติมน้ำสะอาดประมาณ 200 ml ในบีกเกอร์ ขนาด 250 ml ปริมาณน้ำสะอาดจะมีผลต่อการอิมตัวของสิ่งเปรอะเปื้อน อาจจะต้องใช้ปริมาณน้ำสะอาด 2000 ml ถ้าต้องการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยที่ติดตั้งขายทะเลที่มีการสะสมไอเกลือเป็นเวลา 1 ปี [56]

3) นำแปรงสะอาดแช่ในน้ำสะอาด วัดค่าความนำไฟฟ้า และอุณหภูมิของน้ำสะอาด

4) นำแปรงไปเช็ดสิ่งเปรอะเปื้อนที่ผิวด้านบนของลูกถ้วยจนวน แล้วนำแปรงกลับไปจุ่มในบีกเกอร์ที่มีน้ำสะอาด แกว่งแปรงเบาเพื่อให้สิ่งเปรอะเปื้อนละลายในน้ำ

5) ทำซ้ำข้อ 4 อีกหลายๆครั้ง จนแน่ใจว่าไม่มีสิ่งเปรอะเปื้อนเหลืออยู่บนผิวด้านบนลูกถ้วย

6) วัดค่าความนำไฟฟ้า และอุณหภูมิของน้ำที่มีสิ่งเปรอะเปื้อนผสมอยู่

ลักษณะการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเก็บสะสมสิ่งเปรอะเปื้อน วิธีการเก็บรวบรวมและการวัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายเปรอะเปื้อนแสดงในรูปที่ 4.15- รูปที่ 4.18 ตามลำดับ



(ก) 4 เดือน



(ข) 8 เดือน



(ค) 12 เดือน

รูปที่ 4.15 ลักษณะการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยจนวน ก) การสะสมสิ่งเปรอะเปื้อน 4 เดือน ข) การสะสมสิ่งเปรอะเปื้อน 8 เดือน ค) การสะสมสิ่งเปรอะเปื้อน 12 เดือน

ลูกถ้วยฉนวนตัวอย่างและอุปกรณ์ที่ใช้เก็บรวบรวมสิ่งเปราะเปื้อน



(ก)



1) 2) 3) 4)

(ข)

รูปที่ 4.16 ลูกถ้วยฉนวนและอุปกรณ์ที่ใช้เก็บรวบรวมสิ่งเปราะเปื้อน ก) ลูกถ้วยฉนวนตัวอย่าง ข) อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเก็บสิ่งเปราะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวลูกถ้วย 1) กระจกตวงสารละลาย ทรงกระบอกใช้สำหรับวัดปริมาณของน้ำสะอาด 2) บีกเกอร์และฟู่กั้น 3) ขวดเก็บสาร 4) ขวดฉีดน้ำ

การเก็บรวบรวมสิ่งเปราะเปื้อน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 การเก็บรวบรวมสิ่งเปราะเปื้อน (ก) การเก็บรวบรวมสิ่งเปราะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวนตัวอย่าง (ข) สารละลายสิ่งเปราะเปื้อนเปรียบเทียบกับน้ำสะอาด

การวัดค่าความนำไฟฟ้าของน้ำสะอาดและสารละลายประอะเปื่อนที่ห้องปฏิบัติการเคมี



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.18 การวัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย ก) น้ำสะอาดที่ใช้สำหรับละลายสิ่งประอะเปื่อน (ข) สิ่งประอะเปื่อนที่ได้จากผิวลูกถ้วยฉนวนตัวอย่าง 1 ลูก

4.3.4 วิธีการคำนวณหาค่า ESDD

การคำนวณหาค่า ESDD อาจทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับระดับความถูกต้องของค่า ESDD ที่ต้องการ[55] วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการวัด ESDD ไว้ 2 วิธี คือ การคำนวณหาค่า ESDD ตามวิธีที่นำเสนอในวารสารของ NGK และการคำนวณหาค่า ESDD ตามข้อเสนอแนะของ IEC 507

4.3.4.1 การคำนวณหาค่า ESDD ตามวิธีที่นำเสนอในวารสารของ NGK [7,11]

1) คำนวณค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่มีและไม่มีสิ่งประอะเปื่อนที่อุณหภูมิ 20°C ตามสมการ (4.2)

$$\delta_{20} = \delta t / k \quad (4.2)$$

เมื่อ k คือตัวประกอบแก้ไขสามารถคำนวณได้ตามสมการ (4.3) ค่า k อาจหาจากกราฟ[11] ก็ได้

$$k = (1 / 1.046) \times \{ 1 + 0.0226 (t - 18) + 0.000084 (t - 18)^2 \} \quad (4.3)$$

เมื่อ δ_{20} คือ ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ 20°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

δt คือ ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ $t^{\circ}\text{C}$ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

t คือ อุณหภูมิของสารละลาย ($^{\circ}\text{C}$)

2) คำนวณค่า ความเข้มข้นเกลือของสารละลาย (Salt (NaCl) Concentration of Solution) ตามสมการที่ (4.4)

$$D = (5.7 \times 10^{-4} \times \delta_{20})^{1.03} / 10 \quad (4.4)$$

เมื่อ D คือ ความเข้มข้นเกลือของสารละลาย (%)

3) คำนวณค่า ESDD ตามสมการที่ (4.5)

$$ESDD = 10 \times V \times (D_A - D_B) / S \quad (4.5)$$

เมื่อ ESDD คือ Equivalent Salt Deposit Density (mg / cm^2)

V คือ ปริมาตรของน้ำสะอาดที่ใช้ (ml)

D_A คือ ความเข้มข้นเกลือของสารละลายเปราะเปื้อน (%)

D_B คือ ความเข้มข้นเกลือของน้ำสะอาดรวมกับแปรง (%)

S คือ พื้นที่ผิวของลูกถ้วยนวนที่พิจารณา (cm^2)

4.3.4.2 วิธีการคำนวณค่า ESDD จำนวนตามข้อแนะนำ IEC 507 [9]

1) คำนวณค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ 20°C ตามสมการที่ (4.6)

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - \sigma(\theta - 20)] \quad (4.6)$$

เมื่อ θ คือ อุณหภูมิของสารละลาย ($^\circ\text{C}$)

σ_{θ} คือ ค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ $\theta^\circ\text{C}$ (s/m)

σ_{20} คือ ค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ 20°C (s/m)

σ คือ ค่าตัวประกอบแก้ไข แปรตามอุณหภูมิของสารละลาย แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ตัวประกอบแก้ไขที่ใช้ในการหาค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิต่างๆ[9]

θ ($^{\circ}\text{C}$)	σ
5	0.03156
10	0.02817
20	0.02277
30	0.01905

ข้อสังเกต ในกรณีที่ค่าอุณหภูมิของสารละลายไม่ได้ระบุไว้ในตารางแต่ค่าอุณหภูมิดังกล่าวยังอยู่ในช่วง $5^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ ค่าตัวประกอบแก้ไข σ สามารถหาได้โดยวิธี การประมาณในช่วง (Interpolation)

2) คำนวณค่า ความเป็นเกลือ (Salinity ; Sa) (kg/m^3) ของสารละลายเมื่อ σ_{20} มีค่าอยู่ในช่วง $0.004 - 0.4 \text{ s/m}$ ตามสมการที่ (4.7)

$$\text{Sa} = (5.7\sigma_{20})^{1.03} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (4.7)$$

3) คำนวณค่า SDD (salt deposit density) (mg/cm^2) ตามสมการที่ (4.8)

$$\text{SDD} = \frac{\text{Sa} \cdot V}{A} \quad (\text{mg}/\text{cm}^2) \quad (4.8)$$

เมื่อ Sa คือ ค่าความเป็นเกลือของสารละลาย (kg/m^3)

V คือ ปริมาตรสารละลาย (cm^3)

A คือ พื้นที่ผิวลูกถ้วย

4.3.5 ผลการคำนวณค่า ESDD และการวิเคราะห์ผล

1) ค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำสะอาดและสารละลายเปราะเปื้อนที่ได้จากการวัด ทั้ง 3 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำสะอาดและสารละลายประอะเป็อน

ระยะเวลาสะสม สิ่งประอะเป็อน (เดือน)	ความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลาย			
	ก่อนใช้ประอะเป็อน		หลังใช้ประอะเป็อน	
	Conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
4	226	25	735	25
8	43.2	25.2	1113	25.2
12	51.1	24.2	136.1	24.2

4) ผลการคำนวณค่า ESDD ตามวิธีที่นำเสนอในวารสาร NGK แสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ค่า ESDD ที่คำนวณตามวิธีที่นำเสนอในวารสาร NGK

ระยะเวลาสะสม สิ่งประอะเป็อน (เดือน)	Before/after Collective	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	Conductivity at 20°C ($\mu\text{S/cm}$)	Concentration of salt (%)	ESDD (mg/cm^2)
4	Before	25	226	203.6	0.0108	0.040
	After	25	735	662.162	0.0366	
8	Before	25.2	43.2	38.71	0.00197	0.083
	After	25.2	1113	997.31	0.05589	
12	Before	24.2	51.1	43.752	0.0239	0.011
	After	24.2	136.1	124.52	0.00656	

3) ผลการคำนวณค่า ESDD ตามข้อแนะนำ IEC 507 แสดงในตารางที่ 4.15
ตารางที่ 4.15 ค่า ESDD ที่คำนวณ ตามข้อแนะนำ IEC 507

ระยะเวลาสะสม สิ่งเปราะเปื้อน (เดือน)	Before/after Collective	Temperature (^o c)	Conductivity (S / m)	Conductivity at 20 ^o c (S / m)	Salinity (kg / m ³)	ESDD (mg/cm ²)
4	Before	25	0.0226	0.0202	0.1079	0.039
	After	25	0.0735	0.0658	0.3642	
8	Before	25.2	0.0043	0.0039	0.0196	0.082
	After	25.2	0.1113	0.0993	0.5562	
12	Before	24.2	0.0051	0.0047	0.0238	0.011
	After	24.2	0.0136	0.0124	0.0653	

4.3.6 การวิเคราะห์และประเมินผลการวิจัย

ผลการวัดค่า ESDD ทั้ง 3 ครั้งในรอบ 1 ปี พบว่า การสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนในระยะ 8 เดือน (การวัดครั้งที่ 2) มีค่า ESDD สูงสุด และรองลงมาจะเป็นการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนในรอบ 4 เดือนและ 12 เดือน ตามลำดับ ค่า ESDD ที่วัดได้ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสะสมสิ่งเปราะเปื้อนและปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อน แต่จะแปรผันตามชนิดของสิ่งเปราะเปื้อนเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามปริมาณสิ่งเปราะเปื้อนก็มีผลบ้างต่อค่า ESDD การพิจารณาการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนนอกจากจะพิจารณาถึงมิติรูปร่างและวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนแล้วจะต้องพิจารณา การพัดพาของลม(ทิศทางและความเร็ว) พายุ และปริมาณฝนในช่วงระยะเวลาดังกล่าวด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ซึ่งสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้ การสะสมสิ่งเปราะเปื้อนในช่วง 4 เดือนแรก สิ่งเปราะเปื้อนจะเป็นประเภทฝุ่นดิน ทำให้ค่า ESDD มีค่าเพียงเล็กน้อย การสะสมสิ่งเปราะเปื้อนในช่วงถัดมาสิ่งเปราะเปื้อนจะเป็นประเภทฝุ่นดินและไอเกลือจากทะเล ทำให้ค่า ESDD มีค่าเพิ่มขึ้น การสะสมสิ่งเปราะเปื้อนในช่วงสุดท้ายสิ่งเปราะเปื้อนจะเป็นประเภทฝุ่นดินและไอเกลือจากทะเล แต่ถูกชะล้างไปทั้งหมดเนื่องจากการที่มีฝนตกอย่างยาวนานทำให้ค่า ESDD มีค่าต่ำสุด

ตารางที่ 4.16 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสะสมสิ่งเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวน

การวัดค่า ESDD	ระยะเวลา การสะสมสิ่งเปื้อน	ลม	ฝน	ผลลัพธ์
ครั้งที่ 1 30 พ.ย. 2543	ต้นสิงหาคม – กลางตุลาคม	มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ทะเลสู่แผ่นดิน	เดือนกันยายนมีฝนตกชุกที่ สุดในรอบปี	มีฝุ่นและไอเกลือแต่ถูก ชะล้างไปจำนวนมาก
	กลางตุลาคม-ปลายพฤศจิกายน	มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ แผ่นดินสู่ทะเล	ประปรายไม่รุนแรง	ฝุ่นประเภทดิน
ครั้งที่ 2 4 เม.ย. 2544	ต้นธันวาคม- กลางกุมภาพันธ์	มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ แผ่นดินสู่ทะเล	ประปรายไม่รุนแรง	ฝุ่นไอเกลือสะสมแต่ถูก ชะล้างไปบ้างเล็กน้อย
	กลางกุมภาพันธ์ – ต้นเมษายน	ลมจากทิศใต้และตะวันออกเฉียงใต้ ทะเลสู่แผ่นดิน	5 – 19 มีนาคม ฝนตกหนักเพราะมีลมพายุ	ฝุ่นไอเกลือสะสมแต่ถูก ชะล้างพอสมควร
ครั้งที่ 3 14 ส.ค. 2544	ต้นเมษายน – กลางพฤษภาคม	ลมจากทิศใต้และตะวันออกเฉียงใต้ ทะเลสู่แผ่นดิน	มีฝนตกพอสมควร อากาศอบอ้าว	ฝุ่นไอเกลือสะสม
	กลางพฤษภาคม-กลางสิงหาคม	มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ทะเลสู่แผ่นดิน	ต้นเดือนสิงหาคมมีฝนตกหนัก มาก(โศกนาฏกรรม อ.หล่มสัก)	สิ่งเปื้อนถูกชะล้าง จนหมด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.7 การขนส่งและเก็บลูกถ้วยฉนวนก่อนการทดสอบ

เนื่องจากงานวิจัยในครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนที่ติดตั้งใช้งานในสภาวะเปรอะเปื้อน โดยการนำลูกถ้วยฉนวนไปแขวนติดตั้งรองรับความเปรอะเปื้อน แล้วจึงนำกลับมาทำการทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยเปื้อนตามธรรมชาติ ดังนั้นความเปรอะเปื้อนที่จับเกาะบนผิวลูกถ้วยฉนวนจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการทดสอบ จึงต้องมีข้อควรระวังหลายประการที่จะต้องคำนึงในระหว่างการขนส่ง และการรอรับการทดสอบของลูกถ้วยฉนวนดังต่อไปนี้

- 1) ระหว่างการขนส่งลูกถ้วยฉนวน ขอมให้เกิดความกระทบกระเทือนน้อยที่สุด
- 2) ระหว่างการขนส่ง และตลอดโครงการวิจัย ห้ามสัมผัสกับผิวลูกถ้วยฉนวน

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว จึงได้ใช้กล่องโครงเหล็กสำหรับขนย้ายลูกถ้วยฉนวน และใช้รถตู้ทึบเป็นพาหนะในการเดินทาง เมื่อเคลื่อนย้ายลูกถ้วยฉนวนมาถึงยังห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงถ้าหากว่าไม่สามารถกระทำการทดสอบได้ทันที จะต้องมีการเก็บรักษาลูกถ้วยฉนวนนั้นไว้ให้อยู่ในสภาพเดิมมากที่สุด รูปที่ 4.19 แสดงการใช้กล่องโครงเหล็กในการขนย้ายลูกถ้วยฉนวน และการเก็บรักษาลูกถ้วยฉนวนระหว่างรอการทดสอบ



(ก)



(ข)

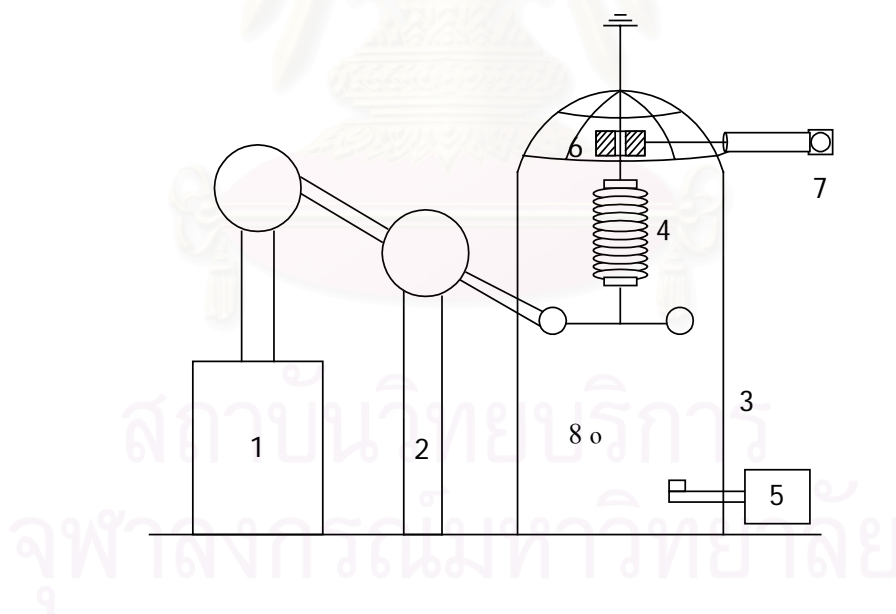
รูปที่ 4.19 การเก็บลูกถ้วยฉนวนระหว่างขนย้าย และระหว่างรอการทดสอบ ก) กล่องโลหะสำหรับเก็บลูกถ้วยฉนวน ข) พลาสติกที่ใช้คลุมกล่องโลหะในระหว่างการรอการทดสอบ

4.3.8 การทดสอบหาค่าแรงดันวาทตามผิวและกระแสรั่วไหลลู่กด้วยผิวเปียกประอะเปื้อน

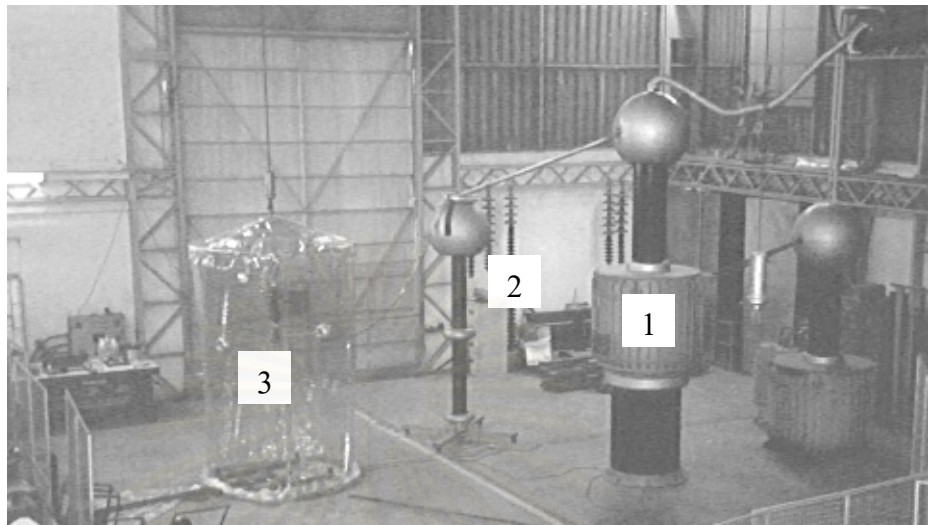
การเกิดวาทตามผิวเนื่องจากความประอะเปื้อน เป็นสาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งของการเกิดวาทผดพร่องในระบบส่งจ่าย การเลือกใช้ลู่กด้วยฉนวนในบริเวณที่มีลู่ประอะเปื้อนได้อย่างเหมาะสมจะเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดวาทผดพร่องเนื่องจากความประอะเปื้อนได้ง่าย การทดสอบหาค่าแรงดันวาทตามผิวและกระแสรั่วไหลตามผิวลู่กด้วยฉนวนผิวเปียกประอะเปื้อนจำลอง หรือประอะเปื้อนธรรมชาตินั้น จะทำให้ทราบถึงความเหมาะสมในการติดตั้งใช้งานลู่กด้วยฉนวนในสภาวะประอะเปื้อนได้เป็นอย่างดี

4.3.8.1 อุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการ

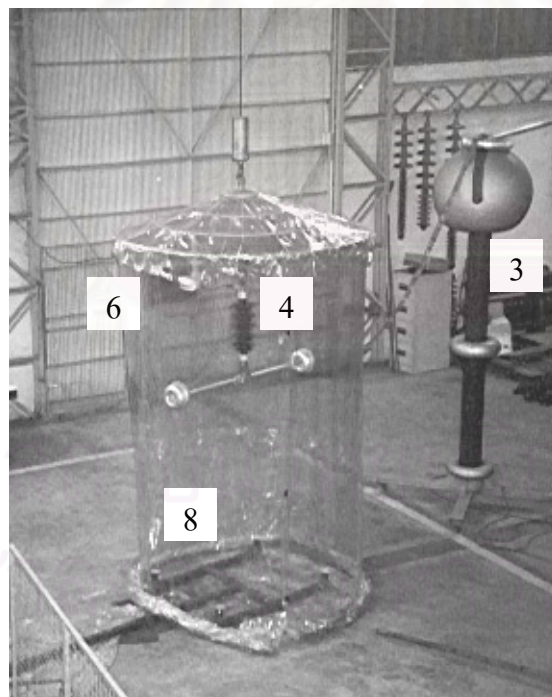
การทดลองหาค่าแรงดันวาทตามผิวสะอาดและผิวประอะเปื้อนสภาพเปียกใช้อุปกรณ์ดังวจรแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) (ข) และ (ค)



(ก) ไดอะแกรมวจรที่ใช้ทดสอบหาค่าแรงดันวาทตามผิวและกระแสรั่วไหล



(ข) วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าแรงดันวาทตามผิวและกระแสรั่วไหลเนื่องจากความเปราะเปื้อน



(ค) การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนภายในกระโจมไอน้ำ

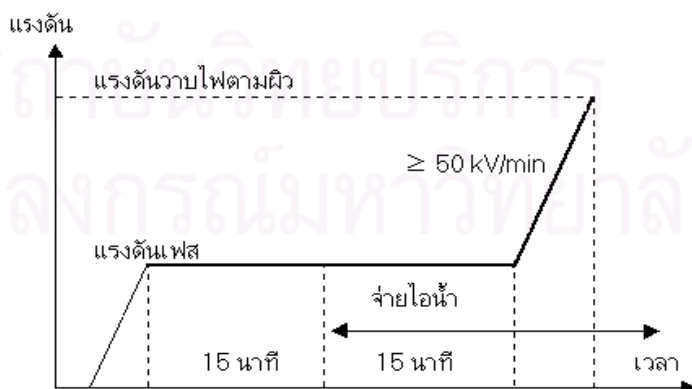
รูปที่ 4.20 วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าแรงดันวาทตามผิวเนื่องจากความเปราะเปื้อน

- โดยที่
- 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ 500 kV 250 kVA พิกัดกระแสลัดวงจร 1.67 A
 - 2 คือ โวลเตจดีไวเดอร์ วัดแรงดัน แบบตัวเก็บประจุ 600 kV
 - 3 คือ กระจอมไอน้ำทำด้วยโครงเหล็กคลุมด้วยแผ่นพลาสติก
 - 4 คือ ลูกถ้วยฉนวนทดสอบ 5 คือ แหล่งจ่ายไอน้ำจะเป็นหม้อต้มน้ำ
 - 6 คือ หม้อแปลงกระแส 7 คือ ดิจิตอลมิเตอร์
 - 8 คือ ตัวตรวจจับอุณหภูมิและความชื้นติดตั้งภายในกระจอม

4.3.8.2 การทดลองหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวสะอาดและเปราะเปื้อนสภาพเปียก

การทดสอบหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวสะอาดและเปราะเปื้อนและการวัดกระแสรั่วไหล ลูกถ้วยฉนวนหลังจากนำลูกถ้วยทดสอบยาวปีกลบไปแขวนเพื่อรองรับสิ่งเปราะเปื้อนตามเวลาที่กำหนด การทดลองหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวในสภาพเปียกนั้นปฏิบัติตาม IEC 507 : 1991 [9] ดังนี้

- 1) ใช้อุปกรณ์การทดลองดังแสดงในวงจรรูปที่ 4.20
- 2) ทำการทดลองป้อนแรงดันให้ลูกถ้วยฉนวนเท่ากับแรงดันเฟส เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นก็จ่ายไอน้ำเข้าไปในกระจอมไอน้ำด้วยอัตราการกำเนิดไอน้ำประมาณ $50-200 \text{ g/m}^3/\text{hr}$ โดยยังรักษาแรงดันให้เท่าเดิมเป็นเวลาอีก 15 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาจึงทำการเพิ่มแรงดันขึ้นไปจนกว่าจะเกิดวาทไฟตามผิวด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันอย่างน้อย 50 kV/min ตามแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 4.21 บันทึกค่าแรงดันวาทไฟตามผิวและกระแสรั่วไหล



รูปที่ 4.21 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวเปราะเปื้อน

4.3.8.3 ผลการทดลอง

ผลการทดลองการหาค่าแรงดันวบไฟตามผิวกระแสสลับลูกถ้วยฉนวนผิวสะอาดและเปรอะเปื้อนสภาพเปียกและการวัดกระแสรั่วไหลมีดังนี้

1) ค่าแรงดันวบไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบธรรมดาผิวเปียกสะอาด แสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 แรงดันวบไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบธรรมดาผิวเปียกสะอาด ค่าแรงดันวบไฟตามผิวเฉลี่ย 221.6 kV

ลูกถ้วยฉนวนลูกที่	แรงดันวบไฟตามผิว (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	220	224	222	222
2	218	224	220	221
3	222	220	224	222

2) แรงดันวบไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกสะอาด แสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 แรงดันวบไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกสะอาด ค่าแรงดันวบไฟตามผิวเฉลี่ย 235.6 kV

ลูกถ้วยฉนวนลูกที่	แรงดันวบไฟตามผิว (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	236	234	236	235
2	238	232	240	237
3	232	236	236	235

3) แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz พวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 ผิวเปียกสะอาด แสดงในตารางที่

4.19

ตารางที่ 4.19 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz พวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 ผิวเปียกสะอาด ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวเฉลี่ย 247.5 kV

ลูกถ้วยจนวนพวงที่	แรงดันวาทไฟตามผิว (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	250	248	248	249
2	250	250	250	250
3	244	240	248	244

4) แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบธรรมดาผิวเปียกเปรอะเปื้อน 4 เดือน แสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบธรรมดาผิวเปียกเปรอะเปื้อน 4 เดือน ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวเฉลี่ย 202.9 kV

ลูกถ้วยจนวนลูกที่	แรงดันวาทไฟตามผิว (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	200	204	204	203
2	204	202	208	205
3	200	204	200	201

5) แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกเปรอะเปื้อน 4 เดือน แสดงในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกเปรอะเปื้อน 4 เดือน ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวเฉลี่ย 231.3 kV

ลูกถ้วยจนวนลูกที่	แรงดันวาทไฟตามผิว (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	228	234	232	231
2	232	230	230	231
3	234	232	230	232

6) แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอดันยาวเคลือบธรรมดาผิวเปียกประอะเป็อน 8 เดือน แสดงในตารางที่ 4.22
 ตารางที่ 4.22 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอดันยาวเคลือบธรรมดาผิวเปียกประอะเป็อน 8 เดือน ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวเฉลี่ย 178 kV

ลูกถ้วยฉนวนลูกที่	แรงดันวาทไฟตามผิว (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	172	180	176	176
2	176	172	178	175
3	180	184	184	183

7) แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอดันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกประอะเป็อน 8 เดือน แสดงในตารางที่ 4.23
 ตารางที่ 4.23 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอดันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกประอะเป็อน 8 เดือน ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวเฉลี่ย 228.9 kV

ลูกถ้วยฉนวนลูกที่	แรงดันวาทไฟตามผิว (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	228	226	224	226
2	224	226	230	227
3	226	234	232	230

8) แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอดันยาวแบบเคลือบธรรมดาผิวเปียกประอะเป็อน 12 เดือน แสดงในตารางที่ 4.24
 ตารางที่ 4.24 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอดันยาวเคลือบธรรมดาผิวเปียกประอะเป็อน 12 เดือน ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวเฉลี่ย 221.8 kV

ลูกถ้วยฉนวนลูกที่	แรงดันวาทไฟตามผิว (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	202	200	198	200
2	204	202	206	204
3	204	200	200	201

9) แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกประะเปื้อน 12 เดือน แสดงในตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกประะเปื้อน 12 เดือน ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวเฉลี่ย 233.4 kV

ลูกถ้วยจนวนลูกที่	แรงดันวาทไฟตามผิว (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	225	236	236	232
2	236	240	236	238
3	228	236	232	232

10) กระแสรั่วไหลผ่านผิวลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาผิวเปียกสะอาด แสดงในตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 กระแสรั่วไหลผ่านผิวสะอาด ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา

ลูกที่	กระแสรั่วไหล (mA) ที่ระดับแรงดัน (kV)								
	30 (ก่อน)	30	50	75	100	125	150	175	200
1	0.04	0.04	0.09	0.26	0.64	1.20	30.47	34.17	35.67
2	0.04	0.04	0.09	0.43	0.93	1.61	30.03	33.47	35.97
3	0.04	0.04	0.11	0.43	1.23	1.62	29.34	34.11	36.11
เฉลี่ย	0.04	0.04	0.1	0.37	0.93	1.48	29.95	33.91	39.91

11) กระแสรั่วไหลผ่านผิวลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกสะอาด แสดงในตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 กระแสรั่วไหลผ่านผิวสะอาด ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ

ลูกที่	กระแสรั่วไหล (mA) ที่ระดับแรงดัน (kV)								
	30 (ก่อน)	30	50	75	100	125	150	175	200
1	0.56	0.65	1.37	2.11	3.67	5	28.89	31.19	39.33
2	0.56	0.63	1.29	2.25	3.61	4.65	28.94	32.28	37.53
3	0.56	0.60	1.26	2.13	3.57	4.98	30.08	31.97	39.86
เฉลี่ย	0.56	0.63	1.31	2.16	3.61	4.88	29.31	31.82	38.91

12) กระแสรั่วไหลผ่านผิวพวงลูกถ้วยแขวน 52–4 4 ลูกต่อกันเป็น 1 พวง ผิวเปียกสะอาด แสดงในตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 กระแสรั่วไหลผ่านผิวสะอาด พวงลูกถ้วยแขวน 52–4

พวง ที่	กระแสรั่วไหล (mA) ที่ระดับแรงดัน (kV)								
	30 (ก่อน)	30	50	75	100	125	150	175	200
1	0.15	0.3	0.77	22.23	26.08	30.7	32.2	33.59	34.42
2	0.16	0.27	6.74	27.39	29.2	30	30.71	30.99	32.28
3	0.16	0.28	0.69	21.36	24.59	29.22	31.93	33.00	34.84
เฉลี่ย	0.16	0.29	0.72	23.66	26.62	29.98	31.61	32.13	33.86

13) กระแสรั่วไหลผ่านผิวลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลักเคลือบธรรมดาผิวเปียกเปรอะเปื้อน 4 เดือน แสดงในตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.29 กระแสรั่วไหลผ่านผิวเปรอะเปื้อน 4 เดือนลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลักเคลือบธรรมดา

ลูกที่	กระแสรั่วไหล (mA) ที่ระดับแรงดัน (kV)								
	30 (ก่อน)	30	50	75	100	125	150	175	200
1	0.04	0.04	0.13	17.44	22.28	29.44	31.72	34.41	42.56
2	0.04	0.05	0.13	19.58	22.14	28.81	31.67	34.56	43.03
3	0.04	0.05	0.14	17.18	20.65	28.29	30.84	34.42	42.64
เฉลี่ย	0.04	0.05	0.14	18.06	21.68	28.85	31.41	34.46	42.74

14) กระแสรั่วไหลผ่านผิวลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลักเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกเปรอะเปื้อน 4 เดือน แสดงในตารางที่ 4.30

ตารางที่ 4.30 กระแสรั่วไหลผ่านผิวเปรอะเปื้อน 4 เดือนลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลักเคลือบสารกึ่งตัวนำ

ลูกที่	กระแสรั่วไหล (mA) ที่ระดับแรงดัน (kV)								
	30 (ก่อน)	30	50	75	100	125	150	175	200
1	0.75	1.27	2.78	4.94	6.19	14.06	36.11	39	41.28
2	0.75	1.19	3.17	4.96	6.08	13.63	36	37.44	40.66
3	0.72	1.24	3.09	4.36	32.22	33.92	35.94	38.67	40.94
เฉลี่ย	0.74	1.23	3.01	4.75	14.83	20.53	36.02	38.37	40.96

15) กระแสรั่วไหลผ่านผิวหนังด้วยคอตันยาวปีกสลัปลักษณะคาวีเป็ยกประอะเป็อน 8 เดือน แสดงในตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 กระแสรั่วไหลผ่านผิวหนังประอะเป็อน 8 เดือนลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลัปลักษณะคาวี

ลูกที่	กระแสรั่วไหล (mA) ที่ระดับแรงดัน (kV)								
	30 (ก่อน)	30	50	75	100	125	150	175	200
1	0.05	0.05	0.74	1.66	2.55	10.07	27.02	34.94	
2	0.04	0.04	1.21	1.86	2.79	10.92	31.56	34.83	
3	0.04	0.04	0.75	1.48	2.26	10.88	31.47	33.31	
เฉลี่ย	0.04	0.05	0.90	1.67	2.53	10.62	30.02	34.36	

16) กระแสรั่วไหลผ่านผิวหนังด้วยคอตันยาวปีกสลัปลักษณะกึ่งตัวนำคาวีเป็ยกประอะเป็อน 8 เดือน แสดงในตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.32 กระแสรั่วไหลผ่านผิวหนังประอะเป็อน 8 เดือน ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลัปลักษณะกึ่งตัวนำ

ลูกที่	กระแสรั่วไหล (mA) ที่ระดับแรงดัน (kV)								
	30 (ก่อน)	30	50	75	100	125	150	175	200
1	0.87	2.27	4.57	7.02	11.00	20.98	39.75	42.5	44.75
2	1.12	2.44	4.39	6.31	10.53	19.20	38.69	42.94	46.58
3	0.87	2.44	4.5	6.76	11.22	17.62	38.73	42.64	44.69
เฉลี่ย	1	2.38	4.48	6.70	10.92	19.27	39.06	42.69	45.34

17) กระแสรั่วไหลผ่านผิวหนังด้วยคอตันยาวปีกสลัปลักษณะคาวีเป็ยกประอะเป็อน 12 เดือน แสดงในตารางที่ 4.33

ตารางที่ 4.33 กระแสรั่วไหลผ่านผิวหนังประอะเป็อน 12 เดือนลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลัปลักษณะคาวี

ลูกที่	กระแสรั่วไหล (mA) ที่ระดับแรงดัน (kV)								
	30 (ก่อน)	30	50	75	100	125	150	175	200
1	0.07	0.12	0.18	18.10	24.69	25.34	27.59	28.88	32.72
2	0.07	0.13	0.23	17.01	20.75	25.43	27.95	28.27	29.97
3	0.07	0.28	0.3	20.28	23.75	24.87	27.29	27.41	30.37
เฉลี่ย	0.07	0.18	0.24	18.46	23.06	25.21	27.61	28.17	31.02

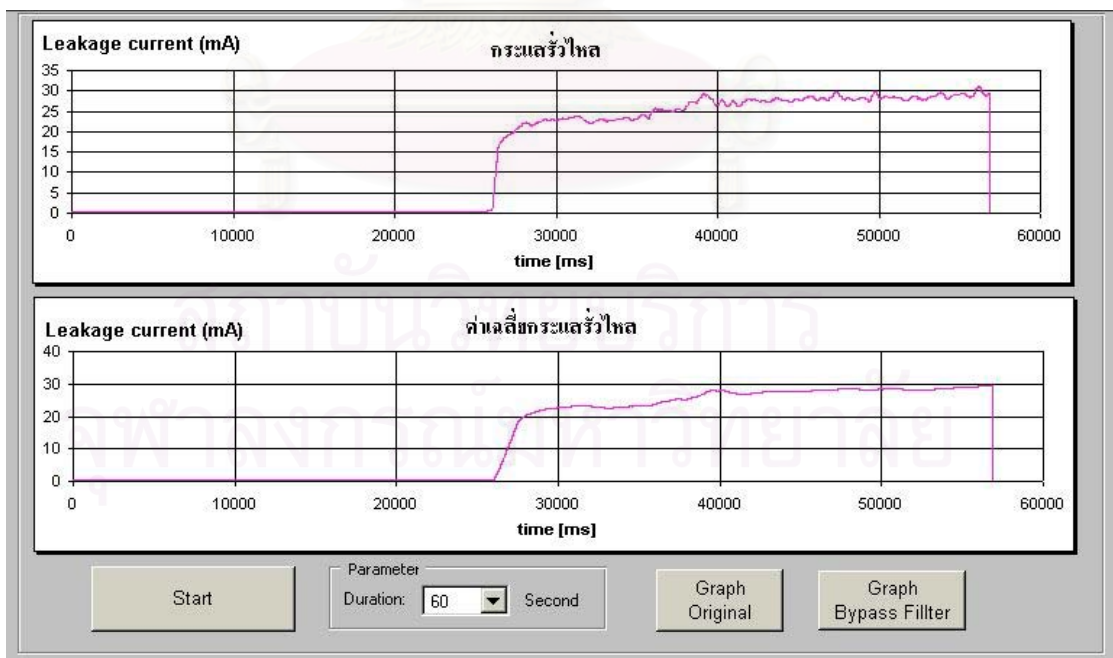
18) กระแสรั่วไหลผ่านผิวลูกถ้วยคอตันขาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกประอะเป็อน 12 เดือน แสดงในตารางที่ 4.34

ตารางที่ 4.34 กระแสรั่วไหลผ่านผิวประอะเป็อน 12 เดือน ลูกถ้วยคอตันขาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ

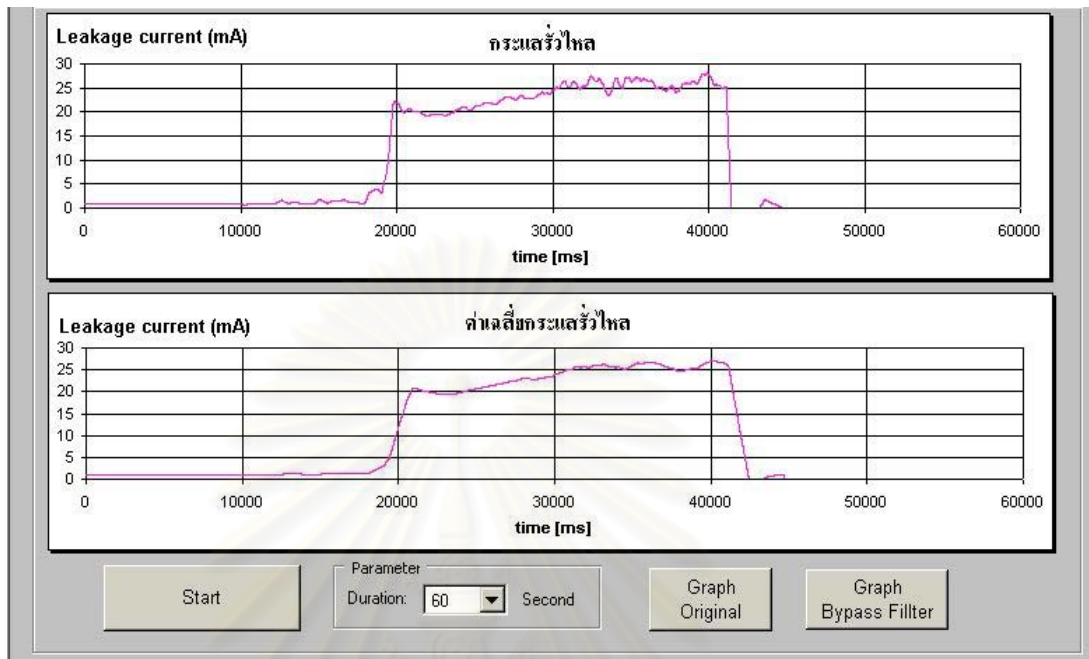
ลูกถ้วย	กระแสรั่วไหล (mA) ที่ระดับแรงดัน (kV)								
	30 (ก่อน)	30	50	75	100	125	150	175	200
1	0.9	1.92	3.34	4.93	24.76	29.19	33.63	36.77	41.67
2	0.9	2.23	3.14	4.10	21.19	26.94	30.38	34.22	37.12
3	0.9	2.18	3.66	6.66	24.82	27.64	30.46	34.16	37.15
เฉลี่ย	0.9	2.11	3.38	5.23	23.59	27.93	31.49	35.05	38.65

หมายเหตุ ผลการทดลองกระแสรั่วไหลที่นำเสนอในตาราง ที่ 4.26 – 4.34 ได้จากการทดลอง 3 ครั้งต่อ 1 ลูก ถ้วนนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยอีกครั้งหนึ่ง

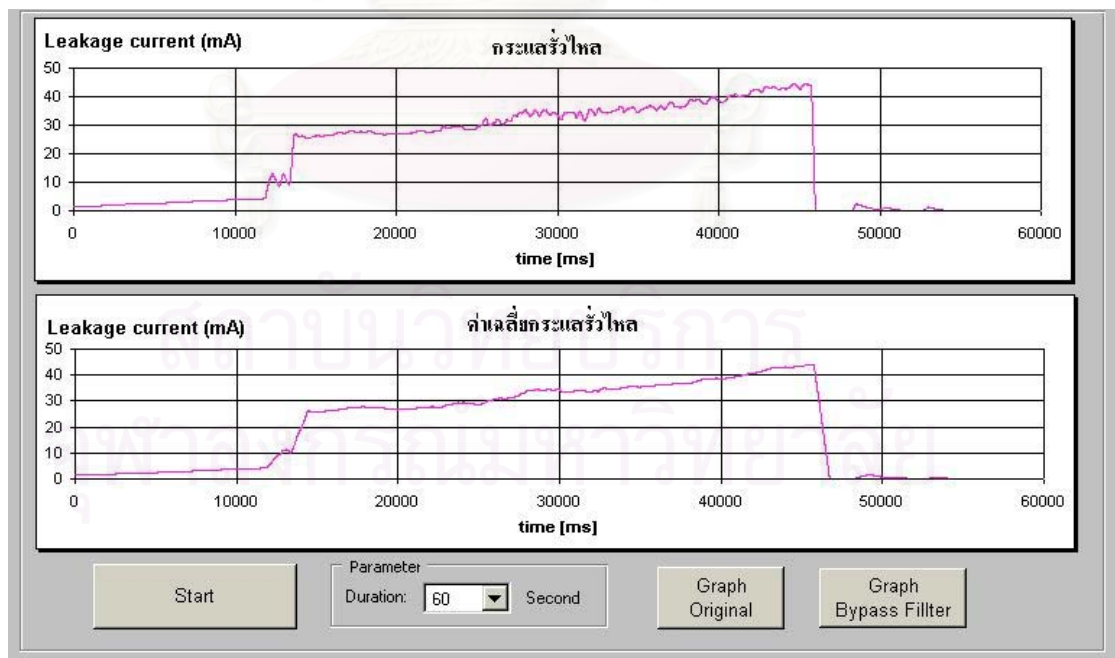
19) กระแสรั่วไหลผ่านผิวลูกถ้วยจนวนขณะรับแรงดัน 30 kV และเพิ่มระดับแรงดันจน เกิดวาบไฟตามผิว ที่ได้จากการบันทึกและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.22



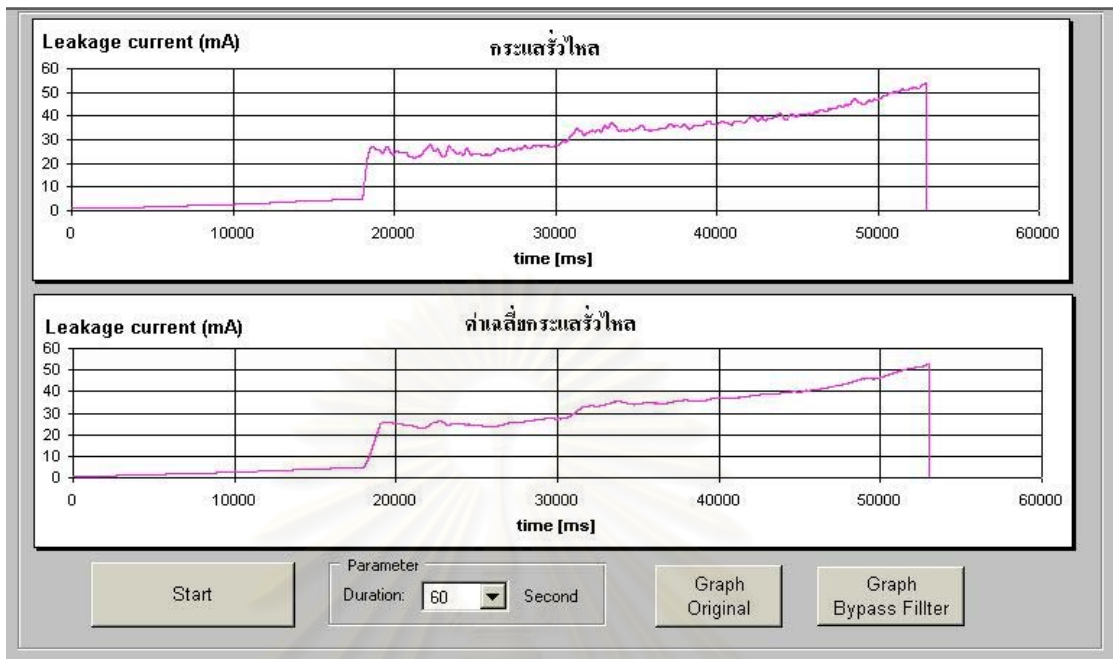
(ก) กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตันขาวปีกสลับเคลือบธรรมดาผิวเปียกประอะเป็อน 12 เดือน ลูกถ้วยที่ 1



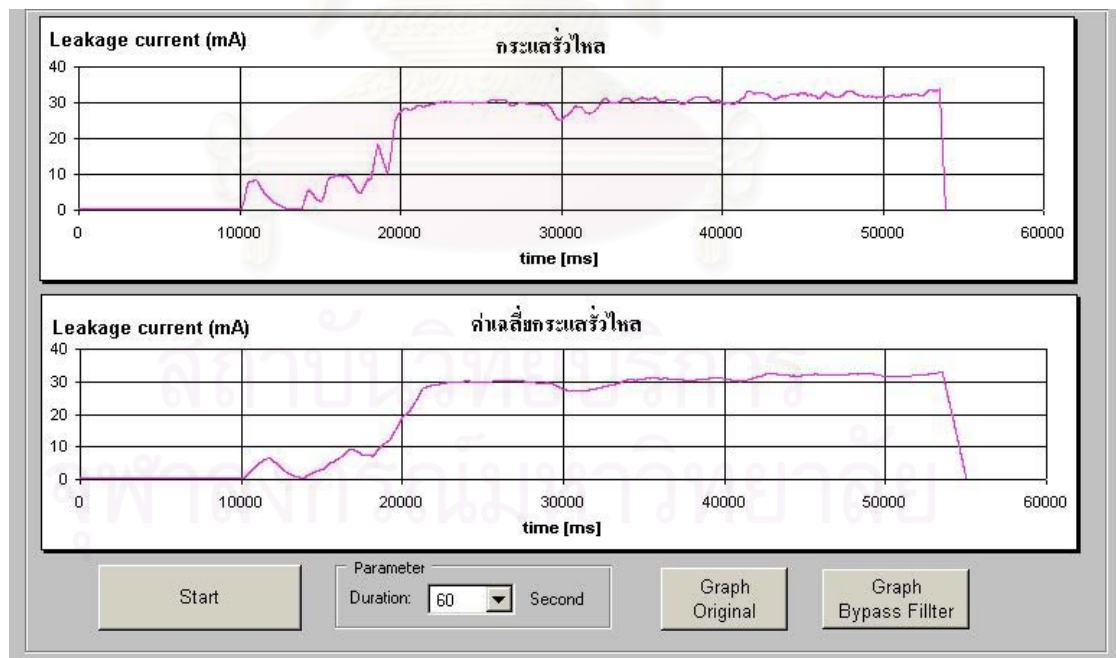
(จ) กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตันขาวปีกลับเคลือบธรรมดาผิวเปียกประะเป็น 12 เดือน ลูกที่ 2



(ค) กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตันขาวปีกลับเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกประะเป็น 12 เดือน ลูกที่ 1



(ง) กระแสรั่วไหลถูกด้วยคอตันขาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกประเอือน 12 เดือนลูกที่ 2



(จ) กระแสรั่วไหลของพวงลูกด้วย 52-4 4 ลูกเป็น 1 พวง ผิวเปียกสะอาด พวงที่ 1



(ฉ) กระแสรั่วไหลของพวงลูกถ้วย 52-4 4 ลูกเป็น 1 พวง ผิวเปียกสะอาด พวงที่ 2

รูปที่ 4.22 การบันทึกค่ากระแสรั่วไหลผ่านผิวลูกถ้วยฉนวนโดยใช้คอมพิวเตอร์ ขณะรับแรงดัน 30 kV และเพิ่มระดับแรงดันจนเกิดวาบไฟตามผิว (ก) กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาผิวเปียกเปรอะเปื้อน 12 เดือน ลูกที่ 1 (ข) กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาผิวเปียกเปรอะเปื้อน 12 เดือน ลูกที่ 2 (ค) กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกเปรอะเปื้อน 12 เดือน ลูกที่ 1 (ง) กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำผิวเปียกเปรอะเปื้อน 12 เดือน ลูกที่ 2 (จ) กระแสรั่วไหลของพวงลูกถ้วย 52-4 4 ลูกเป็น 1 พวง ผิวเปียกสะอาด พวงที่ 1 (ฉ) กระแสรั่วไหลของพวงลูกถ้วย 52-4 4 ลูกเป็น 1 พวง ผิวเปียกสะอาด พวงที่ 2

4.3.8.4 สรุปผลการทดสอบ

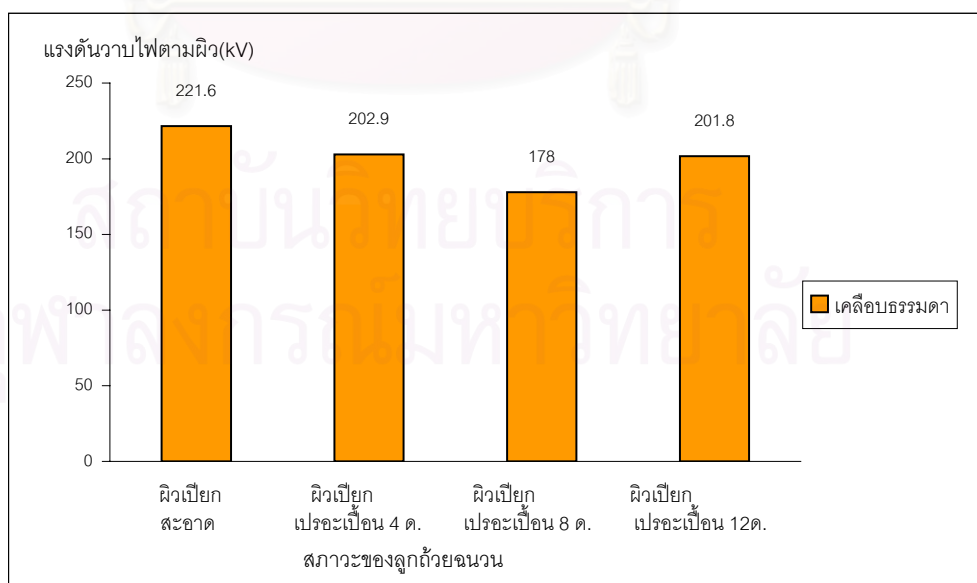
ผลการทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ของลูกถ้วยฉนวนสภาพผิวเปียกสะอาดและเปราะเปื้อน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ของลูกถ้วยคอตันยาวแบบเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำที่สภาวะต่างๆแสดงในตารางที่ 4.35

ตารางที่ 4.35 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ของลูกถ้วยคอตันยาวแบบเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำ ที่สภาวะต่างๆ

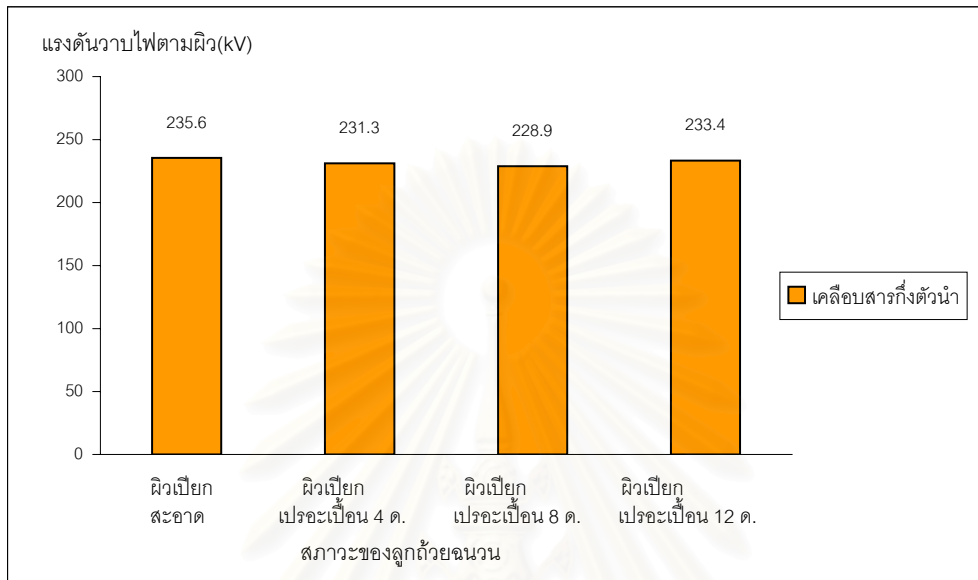
เงื่อนไขการทดสอบ	แรงดันวาทไฟตามผิว (kV)	
	เคลือบธรรมดา	เคลือบสารกึ่งตัวนำ
ผิวเปียกสะอาด	221.6	235.6
ผิวเปียกเปราะเปื้อน 4 เดือน	202.9	231.3
ผิวเปียกเปราะเปื้อน 8 เดือน	178.0	228.9
ผิวเปียกเปราะเปื้อน 12 เดือน	201.8	233.4

2) แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ของลูกถ้วยคอตันยาวแบบเคลือบธรรมดาที่สภาวะต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.23



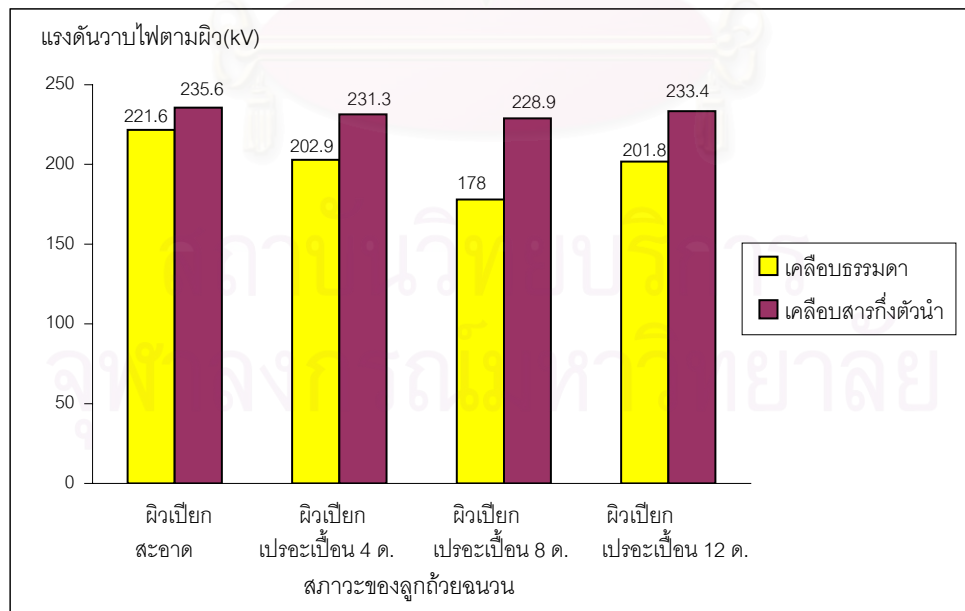
รูปที่ 4.23 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ของลูกถ้วยคอตันยาวปกสลับเคลือบธรรมดาที่สภาวะต่างๆ

3) แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ของลูกถ้วยคอตันยาวแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำที่สภาวะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยคอตันยาวปกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำที่สภาวะต่างๆ

4) เปรียบเทียบแรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ของลูกถ้วยคอตันยาวแบบเคลือบธรรมดาและแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำ แสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบแรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ของลูกถ้วยคอตันยาวปกสลับทั้งสองแบบ

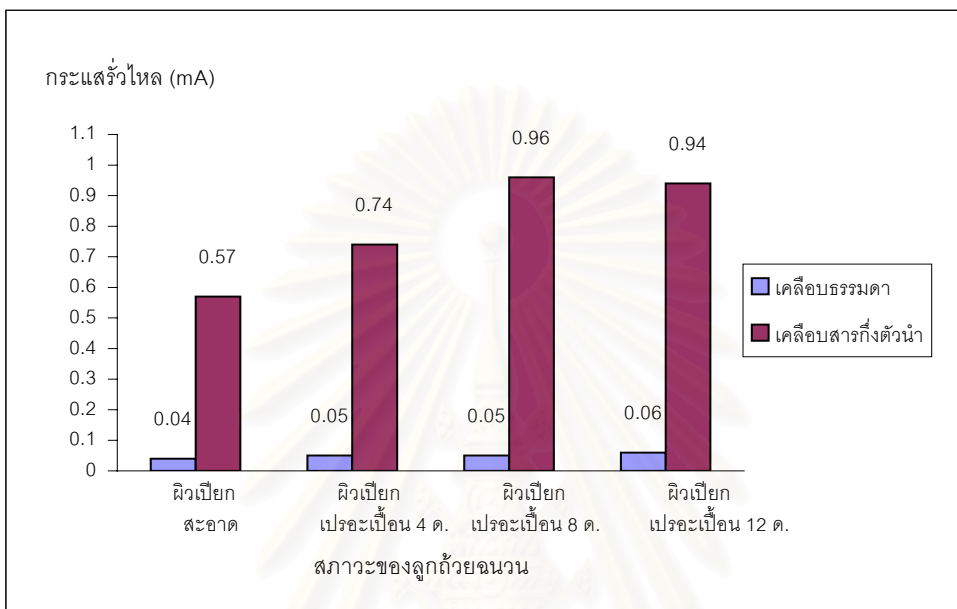
5) กระแสรั่วไหลถูกด้วยคอตันขาวแบบเคลือบธรรมดาและแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำเมื่อผิวถูกด้วยฉนวนมีสภาพเปียกสะอาดและเปราะเปื้อนที่พิกัดแรงดัน 30 kV และก่อนการเกิดวาทไฟตามผิว แสดงในตารางที่ 4.36

ตารางที่ 4.36 เปรียบเทียบกระแสรั่วไหลที่พิกัดแรงดัน 30 kV กับก่อนเกิดวาทไฟตามผิว

เงื่อนไขการทดสอบ	กระแสรั่วไหล (mA)			
	เคลือบธรรมดา		เคลือบสารกึ่งตัวนำ	
	พิกัดแรงดัน	ก่อนเกิดวาทไฟ	พิกัดแรงดัน	ก่อนเกิดวาทไฟ
สะอาด	< 0.3	35.92	0.57	38.90
เปราะเปื้อน 4 เดือน	< 0.3	42.74	0.74	43.10
เปราะเปื้อน 8 เดือน	< 0.3	34.36	0.96	45.34
เปราะเปื้อน 12 เดือน	< 0.3	31.02	0.94	44.50

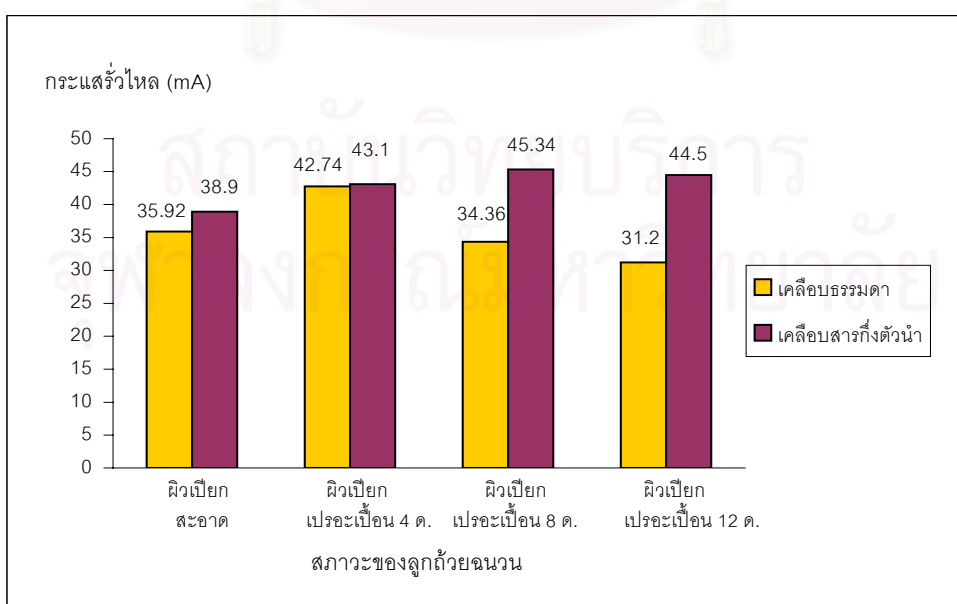
หมายเหตุ ที่ระดับค่ากระแสรั่วต่ำกว่า 0.3 mA ไม่สามารถที่จะเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลได้ จึงไม่ทราบค่าความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นเชิงเส้นที่แน่นอน ในกรณีที่ระดับกระแสรั่วไหลมีค่าน้อยกว่า 0.3 mA จากผลการทดสอบ เมื่อทำการคำนวณออกมาโดยที่ไม่ทราบความผิดพลาดนั้นพบว่ากระแสรั่วไหลเมื่อถูกด้วยสะอาดจะมีค่า 0.04 mA เมื่อถูกด้วยเปราะเปื้อน 4 เดือน และ 8 เดือน จะมีค่า 0.05 mA และเมื่อถูกด้วยเปราะเปื้อน 12 เดือน จะมีกระแสรั่วไหล 0.06 mA และเมื่อพิจารณาจากแนวโน้มความไม่เป็นเชิงเส้นที่ระดับกระแสรั่วไหลค่าต่างๆ ประมาณได้ว่าที่ระดับกระแสรั่วไหลน้อยกว่า 0.3 mA ความผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลมีค่าประมาณ 20 - 30 เปอร์เซ็นต์

6) กระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันทดสอบ แสดงการเปรียบเทียบที่ระดับแรงดัน 30 kV ดังแสดงในรูปที่ 4.26 โดยที่ระดับกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันยาวเคลือบธรรมดาที่ระดับแรงดันใช้งานนั้นเป็นค่าโดยประมาณ



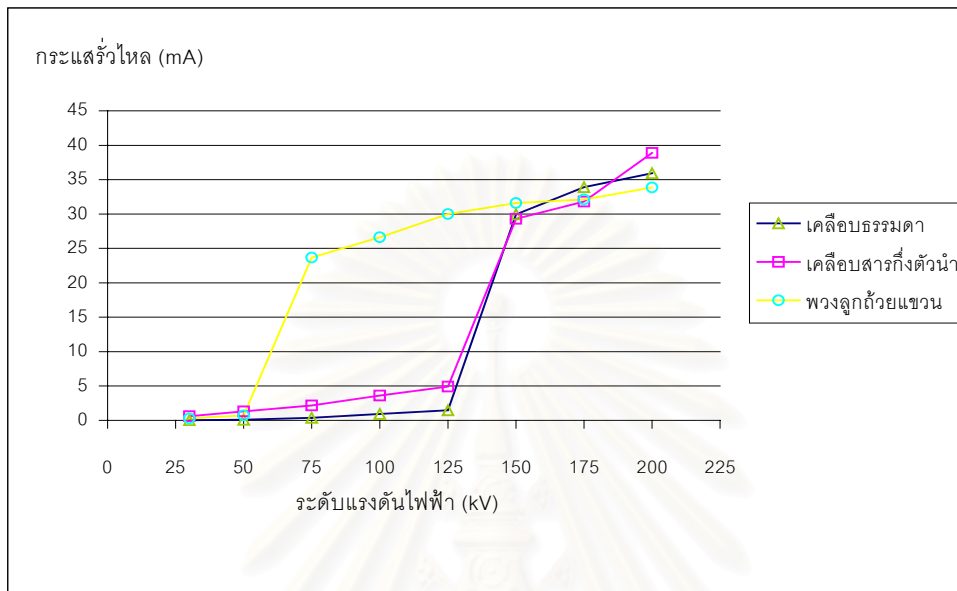
รูปที่ 4.26 กระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดัน 30 kV ของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้งสองชนิด

7) การเปรียบเทียบกระแสรั่วไหลก่อนการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำ แสดงในรูปที่ 4.27



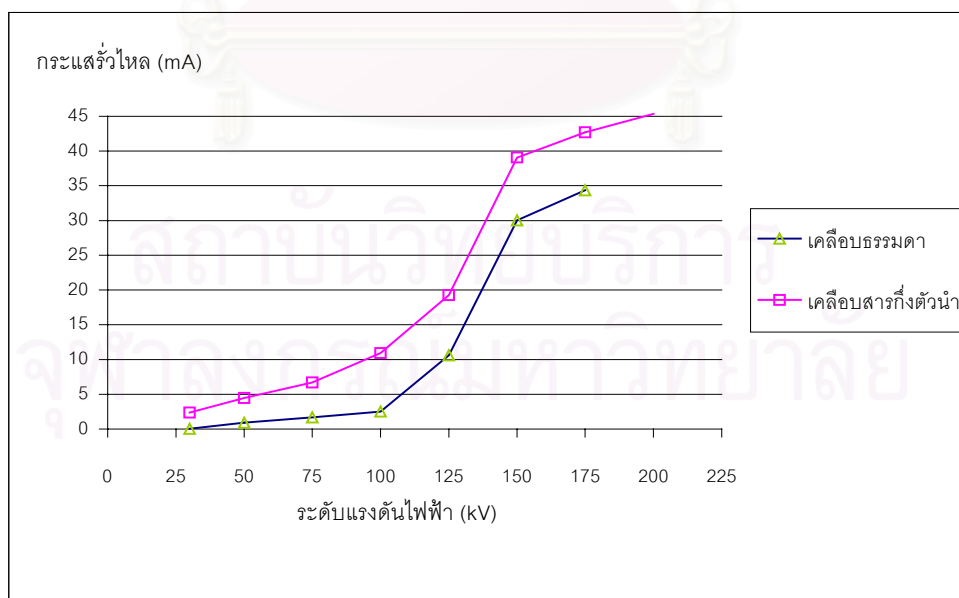
รูปที่ 4.27 กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้งสองชนิดก่อนการเกิดควาไฟฟ้าตามผิว

8) กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันขาวปีกสลับเคลือบธรรมดา เคลือบสารกึ่งตัวนำ และ พวงลูกถ้วยแขวนในสภาวะผิวเปียกสะอาดที่ระดับแรงดันค่าต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันขาวตัวอย่างผิวเปียกสะอาดขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ป้อน

9) การเปรียบเทียบกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันขาวปีกสลับเคลือบธรรมดาและเคลือบสารกึ่งตัวนำในสภาวะเปียกไอน้ำผิวประอะเปื้อน 8 เดือน ที่ระดับแรงดันต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันขาวปีกสลับผิวเปียกประอะเปื้อน 8 เดือน

4.4 การทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางกลและอื่นๆ

การใช้งานลูกถ้วยฉนวน นอกจากจะต้องมีความคงทนต่อความเครียดทางไฟฟ้าแล้วลูกถ้วยฉนวนจะต้องได้รับความเครียดทางกลอันเนื่องมาจากน้ำหนักและแรงดึงแรงกระแทกต่างๆ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมลูกถ้วยฉนวน จึงกำหนดให้มีการทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางกล และการทดสอบอื่นๆ เช่น การทดสอบความแข็งแรงรวมกลไฟฟ้า และการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยนับปล้น เป็นต้น

4.4.1 การทดสอบความแข็งแรงทางกล (Mechanical failing load)

ลูกถ้วยคอตันยาวออกแบบมาเพื่อที่จะใช้งานแทนลูกถ้วยแขวน ในสภาพใช้งานจะได้รับแรงดึงจากน้ำหนักตัวนำสายไฟ จากลูกถ้วยคอตันยาวลูกถ้วยล่างๆถ้ามีการต่อกันเป็นพวงเพื่อที่จะให้รองรับแรงดันได้สูงขึ้น จากแรงลมและแรงอื่นๆ จึงต้องทดสอบความแข็งแรงทางกล โดยการดึงฝาครอบด้านหนึ่ง และที่ก้านต่ออีกด้านหนึ่ง ในแนวแกนเดียวกัน

1) วิธีการทดลอง การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนและลำดับขั้นตอนการทดลองปฏิบัติตาม IEC 383- 1 [2] โดยที่การทดลองจะสุ่มเลือกลูกถ้วยคอตันยาวปีกลับ 5 ลูกเพื่อมาทำการทดสอบความแข็งแรงทางกล

2) ลักษณะการติดตั้งลูกถ้วยเพื่อทดสอบ ความแข็งแรงทางกล และตัวยึดโลหะสำหรับการทดลองตามมาตรฐาน IEC 471 ; 1977 [57] แสดงดังรูปที่ 4. 30



(ก) การติดตั้งลูกถ้วย



(ข) ตัวยึดโลหะ

รูปที่ 4.30 การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนเพื่อการทดสอบทางกล (ก) การติดตั้งลูกถ้วยเพื่อทดสอบ

(ข) ตัวยึดโลหะสำหรับการทดลองตามมาตรฐาน IEC 471 ; 1977 [57]

3) ผลการทดสอบหาค่าแรงดึงทางกลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแสดงในตารางที่ 4.37 และลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.31

ตารางที่ 4.37 ผลการทดสอบแรงดึงทางกลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ

ลูกถ้วย จนวนลูกที่	แรงดึงทางกล (kN)	ลักษณะความเสียหาย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	104.86	หัวแคปในส่วนที่เป็นโลหะด้านบนขาด	0.43
2	105.84	หัวแคปในส่วนที่เป็นโลหะด้านบนขาด	
3	104.86	หัวแคปในส่วนที่เป็นโลหะด้านบนขาด	
4	112.7	เกิดการขาดในส่วนบนของปีกแรก	
5	114.66	หัวแคปในส่วนที่เป็นโลหะด้านบนขาด	
ค่าเฉลี่ย	108.58		

ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยจนวน



ก)



ข)

รูปที่ 4.31 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยจนวนเมื่อได้รับแรงดึง (ก) หัวแคปในส่วนที่เป็นโลหะด้านบนขาดไม่สามารถรับแรงดึงได้ (ข) การเกิดการขาดในส่วนบนของปีกแรก

4) วิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ มาตรฐาน IEC 383 -1 [2] กำหนดว่า ในการทดสอบหาค่าแรงดึงทางกลที่มีกลุ่มลูกถ้วยฉนวนตัวอย่าง 5 ลูก จะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมรับ $C_0 = 1.2$ และถ้าค่าเฉลี่ย (X_t) มีค่าเป็นไปตามสมการที่ 4.9 ลูกถ้วยฉนวนจะผ่านการทดสอบแรงดึงทางกล

$$X_t \geq SFL + C_0 \sigma_T \quad (4.9)$$

เมื่อ X_t = ค่าแรงดึงเฉลี่ยจากการวัดสำหรับการทดสอบแบบ type test = 108.58 kN
 SFL = Specified mechanical failing load
 = 100 kN เมื่อเป็น ลูกถ้วยแบบ คอตตันยาวที่มีฝาครอบแบบ Ball and socket และมีระยะตามความยาวปกติไม่เกิน 832 มม.

$$C_0 = \text{ค่าคงที่การยอมรับ} = 1.2$$

$$\sigma_T = \text{ค่าความแปรปรวนของข้อมูลทดสอบ} = 0.184$$

$$SFL + C_0 \sigma_T = 100 + (1.2)(0.184) = 100.22 \text{ kN}$$

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าแรงดึงทางกลของลูกถ้วยคอตตันยาวปีกสลักแต่ละลูกและค่าเฉลี่ยแรงดึงทั้งหมดของลูกถ้วยคอตตันยาวปีกสลักผ่านเกณฑ์การทดสอบตาม IEC 383 - 1

4.4.2 การทดสอบความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า (Electromechanical failing load)

ในทางปฏิบัติลูกถ้วยฉนวนใช้งานตามสภาพจริงนั้น จะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันของตัวนำ และได้รับแรงกลด้วย ฉะนั้นจึงต้องทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันตามมาตรฐานกำหนดและป้อนแรงดึงให้กับลูกถ้วย

1) วิธีการทดลอง การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนและลำดับขั้นตอนการทดลองปฏิบัติตาม IEC 383- 1 [2] โดยที่การทดลองจะเลือกลูกถ้วยคอตตันยาวปีกสลัก 5 ลูกเพื่อทดสอบความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้าโดยจะป้อนแรงดันให้ลูกถ้วยฉนวนทดสอบ 75 kV ก่อนป้อนแรงดึง รูปที่ 4.32 แสดงการติดตั้งลูกถ้วยฉนวนเพื่อทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงร่วมทางกล และไฟฟ้าโดยที่สายอลูมิเนียมที่ต่อด้านบนฝาครอบโลหะของลูกถ้วยคอตตันยาวปีกสลักเคลื่อนขจรมาจะต่อไปที่หม้อแปลงทดสอบ 100 kV 5 kVA



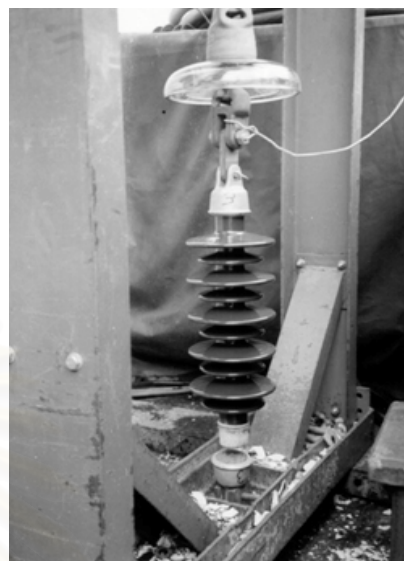
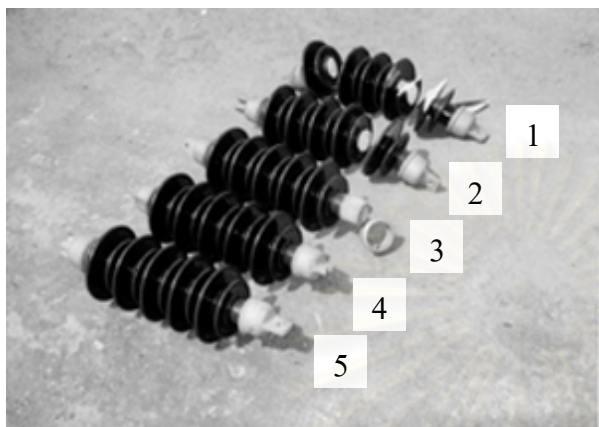
รูปที่ 4.32 การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนเพื่อทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงร่วมทางกลและไฟฟ้า

3) ผลการทดสอบ ผลการทดสอบหาค่าความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 4.38 และลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.33 ตารางที่ 4.38 ผลการทดสอบความแข็งแรงร่วมทางกล และทางไฟฟ้า

ลูกถ้วย ฉนวนลูกที่	แรงดึงทางกล (kN)	ลักษณะความเสียหาย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	78.4	เกิดการขาดในส่วนคอตัน	0.42
2	83.3	เกิดการขาดในส่วนคอตัน	
3	49	ฝาครอบด้านล่างลูกถ้วยฉนวนหลุดออกมา	
4	88.2	รูของหัวแคปในส่วนที่เป็นโลหะด้านบนขาด	
5	88.2	รูของหัวแคปในส่วนที่เป็นโลหะด้านบนขาด	
ค่าเฉลี่ย	84.53		

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคิดจากลูกถ้วยฉนวนลูกที่ 1 , 2 , 4 และ 5

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวน



(ก) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนทั้งหมด (ข) การหลุดของฝาโลหะที่ครอบลูกถ้วย

รูปที่ 4.33 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนเมื่อได้รับการทดสอบความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า (ก) ความเสียหายทั้งหมด (ข) ตัวอย่างความเสียหายในกรณีที่ป้อนแรงดึงจนฝาโลหะครอบด้านบนลูกถ้วยฉนวนหลุดออกมา

4.4.3 การทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลัน (Thermal shock)

การทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลันเป็นการตรวจสอบความสม่ำเสมอของเนื้อพอร์ซเลน การเปลี่ยนอุณหภูมิจากเย็นไปร้อนและจากร้อนไปเย็นโดยทันทีหากเนื้อไม่สม่ำเสมอก็จะทำให้เกิดรอยร้าวภายในได้

1) วิธีการทดลอง การทดลองปฏิบัติตาม ANSI C 29.1 [10] การทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลันสำหรับลูกถ้วยฉนวนที่ใช้กับระบบแรงดันเกิน 1000 V โดยที่ระดับอุณหภูมิในอ่างน้ำ ร้อนและอ่างน้ำเย็นแสดงในตารางที่ 4.39 และรูปที่ 4.34 แสดงการทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลันของลูกถ้วยฉนวน

2) ผลการทดลอง ในการทดสอบมีการกำหนดให้มีการตรวจสอบความมั่นคงทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนหลังจากมีการทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลัน ดังนั้นจึงได้มีการหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห่งความถี่ต่ำก่อนและหลังการทดลองการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลัน ผลการ

ทดสอบค่าแรงดันวาล์วไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนก่อนและหลังการทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิ โดยนับปล้นแสดงในตารางที่ 4. 40

ตารางที่ 4.39 ระดับอุณหภูมิในอ่างน้ำร้อนและอ่างน้ำเย็น

ครั้งที่	อุณหภูมิ (การทดสอบกับ 3 ตัวอย่าง)		อุณหภูมิ (การทดสอบกับ 2 ตัวอย่าง)	
	วัฏจักรร้อน	วัฏจักรเย็น	วัฏจักรร้อน	วัฏจักรเย็น
1	96.6	2.4	97.5	4.5
2	97.8	3.43	98	4.2
3	96.1	5.7	97	4.7
4	96.4	5.7	96.3	5
5	94	2.54	97.9	5
6	91.2	3.1	96	4.5
7	91.7	3.67	94.8	4.8
8	90.6	3.8	94.3	4.6
9	89.4	3.5	94	4.3
10	89	4.3	94	4.3



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.34 การทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยนับปล้นของลูกถ้วยฉนวน (ก) การทดสอบในวัฏจักรร้อน (ข) การทดสอบในวัฏจักรเย็น

โดยทั่วไปก่อนและหลังการทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิฉนวนจะต้องมีการทำการทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งเพื่อให้สามารถประเมินถึงความเสียหายทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื่อฉนวนได้ การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนตัวอย่างทั้ง 5 ลูกก่อนที่จะมีการนำไปทดลองการเปลี่ยนอุณหภูมิฉนวนมีรายละเอียดสภาพแวดล้อมขณะทดลองดังต่อไปนี้ ความดันอากาศ 758.8 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 63 เปอร์เซ็นต์ ผลการคำนวณค่าประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ ; Kd เท่ากับ 0.96 ค่าประกอบแปลงผันความชื้น ; Kh เท่ากับ 0.93 และ การทดสอบหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนตัวอย่างหลังจากมีการทดลองการเปลี่ยนอุณหภูมิฉนวนมีรายละเอียดสภาพแวดล้อมขณะทดลองมีดังนี้ ความดันอากาศ 757.5 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 32.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 56 เปอร์เซ็นต์ ผลการคำนวณค่าประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ ; Kd เท่ากับ 0.957 ค่าประกอบแปลงผันความชื้น ; Kh เท่ากับ 0.95 ผลการทดสอบวาบไฟตามผิวลูกถ้วยคอตันยาวปีกลับก่อนและหลังการทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉนวนแสดงในตารางที่ 4.40 ตารางที่ 4.40 ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนก่อนและหลังการทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉนวน

ลูกที่	แรงดันวาบไฟตามผิว (kV) ก่อนทำการทดลองการเปลี่ยนอุณหภูมิฉนวน						แรงดันวาบไฟตามผิว (kV) หลังทำการทดลองการเปลี่ยนอุณหภูมิฉนวน					
	แรงดันวาบไฟตามผิว					เฉลี่ย	แรงดันวาบไฟตามผิว					เฉลี่ย
1	200	207	203	202	205	203.4	203	203	203	203	203	203
2	205	203	205	207	202	204.4	205	205	203	203	203	203.8
3	200	207	203	209	205	204.8	203	203	203	207	207	204.6
4	202	209	203	205	203	204.4	203	205	202	205	203	203.6
5	205	201	203	205	203	203.4	201	201	199	202	199	200.4
เฉลี่ย	204 kV						203 kV					

3) วิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ ผลการทดสอบโดยอาศัยการสังเกต พบว่าไม่มีความเสียหายใดๆเกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนและเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งของลูกถ้วยฉนวนก่อนและหลังการทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉนวนพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงอาจจะสรุปได้ว่าลูกถ้วยคอตันยาวปีกลับผ่านกระบวนการเผาไหม้มาอย่างเหมาะสมทำให้ผ่านการทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉนวน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดาและแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำ ที่ได้ออกแบบและสร้างด้วยวัสดุคุณภาพในประเทศเกือบทั้งหมดยกเว้น สารกึ่งตัวนำที่ใช้เคลือบผิว เมื่อนำมาทดสอบหาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าในสภาพผิวแห้งสะอาด ผิวเปียกสะอาดและผิวเปียกเปรอะเปื้อน รวมทั้งลักษณะทางกลและอื่นๆ พบว่า

1) ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดามีค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ 50 Hz น้อยกว่า ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำ 14.13 % และน้อยกว่าพวงลูกถ้วยแขวน 52 – 4 4 ลูกเป็น 1 พวง 17.37 %

2) ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตชั่ววบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้งสองแบบและพวงลูกถ้วยแขวนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยพวงลูกถ้วยแขวนมีค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตชั่ววบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้งสองแบบ 4.5 % แต่จะมีค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตชั่ววบลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา 5.8 % และลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้งสองแบบมีค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตใกล้เคียงกันทั้งชั่ววบลูกและชั่ววบล

3) ในสภาวะเปรอะเปื้อนค่าแรงดันวาบไฟตามผิวลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดาจะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อระดับสิ่งเปรอะเปื้อนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะช่วง 8 เดือนแรกของการสะสมสิ่งเปรอะเปื้อน ในขณะที่ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

4) ในสภาวะเปรอะเปื้อนผิวสะอาดเปียก ที่ระดับแรงดันใช้งาน (30 kV) ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำมีค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดมากกว่าพวงลูกถ้วยแขวน และลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดาจะมีค่ากระแสรั่วไหลน้อยที่สุด กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยทั้งสามชนิดแบบที่ระดับแรงดันใช้งานมีค่า น้อยกว่า 1 mA

5) ในสภาวะเปรอะเปื้อนเมื่อระดับแรงดันสูงขึ้นกระแสรั่วไหลก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย เมื่อถึงระดับแรงดันค่าหนึ่งกระแสรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และอาจจะคงที่เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเกิดวาบไฟตามผิว

6) ผลการทดสอบหาคุณลักษณะทางกลและอื่นๆพบว่าลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับผ่านมาตรฐานการทดสอบที่ต้องการ

7) ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับพอร์ซเลนที่ได้ทำการศึกษาและสร้างขึ้น โดยบริษัทที่ผลิตลูกถ้วยภายในประเทศ เมื่อมีการพิจารณาลักษณะสมบัติทางวิศวกรรมของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ

พบว่าสามารถที่จะนำไปใช้แทนพวกลูกถ้วยแขวนในบริเวณเปราะเปื้อนปานกลางที่ระดับแรงดัน 33 kV ได้ และยังสามารถนำไปใช้กับระบบแรงดัน 69 kV ได้อีกด้วย แต่อาจจะต้องมีการพัฒนาปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการใช้งาน ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวของลูกถ้วยคอตันยาว ปีกกลับ เป็นการยืนยันว่าบริษัทผู้ผลิตลูกถ้วยภายในประเทศสามารถที่จะพัฒนาการผลิตในส่วนนี้ ขึ้นมาได้และน่าจะมีความพร้อมในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตลูกถ้วยฉนวนในขั้นสูงต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของกระ โจนและไอน้ำต่อการเกิดฉนวนไฟตามผิว ลูกถ้วย โดยที่กระ โจนอาจจะทำจากวัสดุหลายๆชนิด และมีขนาดมิติที่แตกต่างกัน และเพื่อการ ทดสอบที่เป็นมาตรฐานมากยิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถมั่นใจกับผลการทดลองที่ได้ควรที่จะมีการสร้าง ห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อนขึ้น โดยที่มีการติดตั้งเครื่องจ่ายไอน้ำที่ได้ มาตรฐาน ซึ่งอาจจะมีการควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ห้องทดลองดังกล่าวควรที่จะสามารถ ควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และแฟลคเตอร์อื่นๆ ที่ต้องการได้ ระบบวัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า ตามผิวและกระแสรั่วไหล รวมทั้งค่าอื่นๆที่ต้องการเช่นค่า RIV ควรจะเป็นระบบที่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง

2) การวัดค่า ESDD ควรจะทำให้ถี่ขึ้นอาจจะเป็ทุกๆเดือน เพราะสภาพภูมิอากาศ และ ฤดูกาลของประเทศไทยค่อนข้างที่จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และในการวัดการสะสมสิ่ง เปราะเปื้อนนั้นควรจะใช้ ลูกถ้วยฉนวนทุกชนิดที่จะนำไปใช้งานเพื่อเป็นการศึกษาเปรียบเทียบ โดยที่การวัดค่า ESDD นั้นควรที่จะกระทำเป็นระยะเวลานานพอสมควร เช่นอาจจะเป็ 3 - 5 ปี เป็นต้น

3) ควรจะมีการพัฒนาปรับปรุงให้ชุดวัดกระแสรั่วไหลมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สามารถทำเป็น ชุด Online Monitoring ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังได้ โดยที่แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับส่วน อิเล็กทรอนิกส์ควรจะใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และสายเคเบิลที่ใช้น้ำสัญญาณกระแสรั่วไหลควรจะเป็นแบบเคเบิลใยแก้วนำแสง เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนและระดับแรงดันเกินที่จะเกิดขึ้น ไม่ให้ ไปสู่ด้านเครื่องมือวัดและบันทึกผล

4) การพัฒนาลูกถ้วยคอตันยาวในขั้นต่อไปควรที่จะเป็นการพัฒนาทางด้านวัสดุที่จะนำมาใช้ เช่น อาจจะใช้โพลีเมอร์แทนพอร์ซเลนเพราะจะทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องน้ำหนัก หรืออาจจะออกแบบ ลูกถ้วยคอตันยาวให้มีขนาดเล็กและสั้นลง

รายการอ้างอิง

1. ตำราวย สังข์สะอาด. เทคโนโลยีการฉนวนในระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : 4-1 – 4-11.
2. IEC 383-1. Test on Insulators of Ceramic material of Glass for Overhead lines with a nominal Voltage operator than 1000 v Part 1. Ceramic or glass insulator unit for a.c. system-Definitions, test methods and acceptance criteria, 1976.
3. Samrauy Sangkasaad, Narongchai Limsethagan, and Tomorn Soonthornapa. Effect of steep front impulse voltage on insulators. Proceeding of xth Asian Conference on Electrical Discharge (ACED – 2000) Kyoto , November 2000 : 131 –143.
4. นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ตำราวย สังข์สะอาด . ลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับสำหรับระบบ 33 kV. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24 22 – 23 พฤศจิกายน 2544 : 89 – 94.
5. บุญเรือง มะรังศรี. ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยเปราะเป็น รายงานการวิจัย ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : 1 และ 54.
6. ยงยุทธ วชิรธาราภคร. ลูกถ้วยฉนวนที่เคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ. วารสาร กฟผ. ปีที่ 4 เล่ม 3 : 39-43.
7. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนลูกถ้วยในเขต 3. รายงานการวิจัย รหัสวิจัยเลขที่ 30-53 ,กันยายน 2536.
8. IEC 383-2. Insulators for overhead line with a nominal voltage above 1000 V Part 2 Insulator strings and insulator sets for a.c. systems-Definitions, testmethods and acceptance criteria, First edition , 1993-04.
9. IEC 507. Artificial pollution test on High-Voltage Insulators to be used on ac. System, second Edition, 1991-04.
10. ANSI C 29.1. American National Standard for electric power insulators - test methods,1988.
11. NGK INSULATORS. Technical Guide NGK. LTD. NAGOYA, JAPAN, First revision in 1989 : 33-36.
12. Tetsuo FUJIMURA, Katsuhiko NAITO; Takashi IRIE; Yoshihiro SUZUKI. Anti-contamination design of insulators. NGK Review overseas ,edition No.3, Aug 1979 : 12-23.
13. IEC 815. Guide for the selection of Insulator of Polluted conditions. First Edition ,1986.

14. J.L. Fierro - Chavez, I. Ramirez ; G. Montoya – Tena. On-line leakage current monitoring of 400 kV insulator strings in polluted areas. IEE Proc - Gener. Transm. Distrib, Vol. 143 , No. 6, November 1996.
15. K. Iwai, Y.Hase; E. Nakamura; H. Katsukawa. Development of a new apparatus for contamination measurement of overhead transmission line insulators. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998.
16. Electric Power Research Institute .Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, 1982 : 489-492.
17. Ramiro Hernandez - Corona, José' L. Fierro – Chavez; Jorge Gonzalez de la Vega
The mathematical modeling of experimental data for the design of anti -
contamination insulators : 334-336.
18. Dr. N. Alame, A / Prof. S. Shihab. A model for calculating the field distribution of polluted post insulators during flashover : 817-827.
19. Minesh Shah. Signature Analysis of Flash over Voltage Phenomena on contaminated Insulator Surface. IEEE Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, October 20-23, 1996.
20. P. Holtzhausen. AC Pollution Flashover Models : The Relation ship between Characteristic Parameters. 10th International Symposium on High Voltage Engineering August 25-29, 1997. Montreal, Quebec, Canada , 1997.
21. J.P. Holtzhausen. AC Pollution Flashover Models : Accuracy in Predicting Insulator Flashover. 10th International Symposium on High Voltage Engineering. August 25-29, 1997. Montreal, Quebec, Canada,1997.
22. P.S. Ghosh and N. Chatterjee. Polluted Insulator Flashover Model for ac Voltage. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation ,Vol. 2, No. 1 February, 1995.
23. M.G. Danikas, and I. Karafyllidis. Modelling of the dry band Problem on outdoor insulators : A new perspective. 1998 IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, June 22-25, 1998 ,Vasteras, Sweden,1998.
24. J.S.T. Looms. Insulator for HIGH VOLTAGES. IEE Power Engineering Series 7, 1990 : 195-215.

25. IEEE Dielectric and Electric Insulation Society's Outdoor Service Environment Committee S- 32-3. Protective coating for improving Contamination performance of outdoor high voltage ceramic insulator. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April, 1995.
26. Antonios E Vlastos and Elbadri Sherif . Experience from insulators with RTV silicon rubber sheds and shed coating .IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5, No.4 , November ,1990.
27. A.C. Baker , D. Zea . Operating Characteristics of Semi – Conductive Glazed Line Post Insulators . Lapp Insulator company.
28. A.S. Farag, F.M. Zedan; T.C. Cheng; C.Y.Wu;H.Nour ;M. Fazelian; M. Akbar; K. Al-Soufi. New dc Insulator Design for Use in the Desert Environment. IEEE Transactions on Electrical Insulation ,Vol. 25, No. 2, April ,1990.
29. R. Sundararajan, N.R. Sathureddy ,and R.S. Gorur. Computer - aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions. IEEE Transactions on Dielectrical Insulation , Vol. 2, No. 1, February ,1995.
30. IEC 60433 .Insulator for overhead lines with a nominal voltage above 1000 v - Ceramic insulators for a.c. systems - characteristics of insulator units of the long rod type, third edition, 1998-08.
31. Tetsuo Fujimura. The Evolution of Porcelain Insulator Technology in Japan. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No.3 May/June, 1995 : 26-36.
32. Hiroshi FUKUI ,Tetsuo Fujimura; Katsuhiko NAITO; Takashi IRIE. Studies on various performance of semiconducting glaze insulator. NGK Review overseas edition , No. 2, Nov, 1978 : 23-41.
33. S. Matsui, Y. Suzuki; N. Nakashima; F Kasaki; O.Fujii; E. Matsuda. State of the art of Semiconducting Glazed Insulators for Transmission lines in Heavily Contaminated area. Proceeding of the 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, May 25-30, 1997, Soul, Korea,1997.
34. T. Kondo, K. Yabu; J. Takemura; Y. Suzuki; Y. Nakashima; K. Kondo. Investigation into

performance of semiconducting glaze insulators after use on 33 kV lines over 20 years. CICRE SC 3399 (COLL)... IWD.

35. Samruay Sangkasaad, Bernhard Staub ; Boonruang Marangsree; Noraset Pattanadech.
Investigation on Electrical Performance of Semiconducting Glazed Insulators Under Natural Pollution in Thailand. Proceeding 2000 International Conference on Power System Technology (POWER – CON 2000) , Volume III ,4-7 December 2000,
The University of Western Australia , Perth, Australia, 2000: 1229 – 1232 .
36. Victor M. Moreno - villa, Marco A. Ponce – Velez; Ramiro Hernandez – Corona; Leonardo Rejon – Garcfa. Improvement in the pollution performance of standard suspension - type disc insulators by the use of semiconducting inserts. Conference Record of the 1998 IEEE international. Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia , USA, June 7-10, 1998.
37. Brian Pokaner, Colin Lee; Don Hawker. Leakage current monitoring of applications of Dielectric Materials. , Brisbane Australia. July 3-8, 1994.
38. Tomotaka Suda. Frequency Analysis for leakage Current Wave Forms of Polluted Insulators. NINTH international symposium on high voltage Engineering, August 28 - September 1, 1995.
39. D.F. Kawa, M.J. Chavez; T. Orbeck, and C. Lumb. Practical PCA-DA system for Measurements of Leakage Current Pulses on Polymer Insulators Under Wet Contaminated Conditions. IEE Electrical Insulation Magazine, March/April, Vol-8, No.2 ,1992 .
40. Arnaldo G. Kanashiro, Geraldo F. Burani, Leakage Current Monitoring of Insulators Exposed to Marine and Industrial Pollution. conference Record of the 1996 IEEE International symposium on Electrical Insulation. Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996.
41. Chang-Su Huh. Quantitative Method for Determining Surface Erosion of Silicon Rubber for outdoor Insulator by Measurement of Leakage Current Under Artificial salt Condition. Conference Second of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996.

42. Prof. M. Khalifa, A. El-Morshedy; O.E. Gouda S.E.-d Habib. A new monitor for pollution on power line insulators Part 2 : simulated field tests. IEE Proceedings, Vol. 135, Pt. C. No. 1, January 1988.
43. George G. Karady, Felix Amarch. Signature Analysis for Leakage Current Wave Forms of Polluted Insulator . IEEE , 1999.
44. R.Matsuoka, M. Ishiwari; H. Shinokubo, and K. Kondo. Field test Results of Polymer Insulators. 10th International symposium on High Voltage Engineering, August 25- 29, 1997 Montreal, Quebec, Canada,1999.
45. ISAIAS RAMIREZ-VAZQUEZ, JOSE LUIS FIERRO-CAVEZ. Criteria for the diagnostic of polluted ceramic insulators based on the leakage current monitoring technique. 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,1999.
46. กองวิศวกรรมไฟฟ้าและเครื่องกล ฝ่ายวิศวกรรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. หลักเกณฑ์การใช้ลูกถ้วยแรงสูงในระบบจำหน่าย 33 kV. แบบเลขที่ 5A 4-015/400016 : 1-3.
47. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. มอก. 1077-2535 ลูกถ้วยแท่งพอร์ซเลน.
48. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. มอก. 1251-2537 ลูกถ้วยแท่งก้านตรงพอร์ซเลน.
49. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. มอก. 354-2528 ลูกถ้วยแฉวนพอร์ซเลน.
50. Philips Semiconductor. Data sheet PCF 8591 8- bit A/D and D/A Converter. July 02,1998.
51. กฤษฎา ไชยเย็น , อรรถพล บุญยะ โภคา,ชัชวตรลิมพรจิตรวิไล. เรียนรู้และปฏิบัติการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตอนุกรม,บริษัท อินโนเวทีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด :145-163.
52. IEC 71 –1 .Insulation co-ordination Part 1 : Definitions, principles, and rules . Seventh edition ,1993-12.
53. IEC 60 - 2 . High – voltage test techniques part 2 : Test procedure ,1973.
54. E. Kuffel , W.S. Zaengl ; J. Kuffel. Highvoltage Engineering Fundamental. Second edition, 2000 : 428.
55. W.A. Chishlom (SM), PG Buchan; T. Jarv. Accurate Measurement of low insulator

- Contamination level. IEEE, Transaction on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994, :1552-1557.
56. X. Lin, Z. Chen ; X . Liu; K.Chu K Morita; R. Matsuoka ,and S.Ito. Natural Insulator Contamination Test Results on Various Shed Shapes in Heavy Industrial Contamination Areas. IEEE Transactions on Electrical Insulation ,Vol. 27, No.3 , June 1992.
57. IEC 471 . Dimention of clevis and tongue couplings of string insulator units,1977.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

หลักเกณฑ์การใช้ลูกถ้วยแรงสูงในระบบจำหน่าย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1. หลักเกณฑ์การใช้ลูกถ้วยสูงในระบบจำหน่าย 22 kV

1) พื้นที่ที่มีมลภาวะในระดับต่ำ เช่น บริเวณทั่วไป บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเกินกว่า 1 กม. และมีลมทะเลพัดถึงบ้าง ชนิดของลูกถ้วยที่ให้ใช้งานคือลูกถ้วยโพลีโพรพิลีนแบบ 57-2 ตาม มอก. 1077 (วัสดุเลขที่ 03010001) ลูกถ้วยพินโพลีโพรพิลีนแบบ 56/57-2 ตาม มอก. 1251 (วัสดุเลขที่ 03010100)

2) พื้นที่ที่มีมลภาวะในระดับปานกลาง เช่น บริเวณพื้นที่ที่มีมลภาวะจากโรงงานอุตสาหกรรมในระดับปานกลาง บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่เกิน 1 กม. และมีลมทะเลพัดถึงบ้าง ชนิดของลูกถ้วยที่ให้ใช้งานคือ ลูกถ้วยพินโพลีโพรพิลีนแบบ 56/57-2 ตาม มอก. 1251 (วัสดุเลขที่ 03010100)

3) พื้นที่ที่มีมลภาวะในระดับรุนแรง(ที่ใช้ลูกถ้วย พินโพลีโพรพิลีน 56/57-2 มาแล้วไม่ได้ผล) เช่น บริเวณพื้นที่ที่มีมลภาวะจากโรงงานอุตสาหกรรมในระดับรุนแรง บริเวณที่อยู่ชายฝั่งทะเลและมีลมทะเลพัดรุนแรง ชนิดของลูกถ้วยที่ให้ใช้งานคือ ลูกถ้วยพินโพลีโพรพิลีนแบบ 56/57-3 ตาม มอก. 1251 (วัสดุเลขที่ 03010103)

หมายเหตุ 1) สำหรับลูกถ้วยก้านตรง 22 กิโลโวลต์ ตาม มอก. 279 แบบ ข (แบบ 56-2) (วัสดุเลขที่ 03000001) ที่เหลือคงคลังพัสดุและใช้งานได้ ให้นำไปใช้สำหรับก่อสร้างสายระบบจำหน่ายในพื้นที่ทั่วไปที่มีมลภาวะในระดับต่ำ ซึ่งอยู่ในชนบท(ท้องถิ่นห่างไกล) และไม่ได้ครอบคลุมโหลดที่สำคัญ หรืออยู่ในเขตนิคมอุตสาหกรรมจนกว่าลูกถ้วยดังกล่าวจะหมดไป โดยไม่ต้องจัดซื้อมาใช้งานอีก

2) การใช้ลูกถ้วยแขวน

- ในพื้นที่ที่มีมลภาวะระดับต่ำ ให้ใช้ลูกถ้วยแขวน ตาม มอก. 354 แบบ ก (แบบ 52-1) (วัสดุเลขที่ 03020000) จำนวน 3 ลูกต่อชุด

- ในพื้นที่ที่มีมลภาวะระดับปานกลาง ให้ใช้ลูกถ้วยแขวน ตาม มอก. 354 แบบ ก (แบบ 52-1) (วัสดุเลขที่ 03020000) จำนวน 4 ลูกต่อชุด

- ในพื้นที่ที่มีมลภาวะระดับรุนแรง ให้ใช้ลูกถ้วยแขวน ตาม มอก. 354 แบบ ก (แบบ 52-1) (วัสดุเลขที่ 03020000) จำนวน 5 ลูกต่อชุด

2. หลักเกณฑ์การใช้ลูกถ้วยแรงสูงในระบบจำหน่าย 33 kV

1) พื้นที่ที่มีมลภาวะในระดับต่ำ เช่น บริเวณทั่วไป บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเกินกว่า 1 กม. และมีลมทะเลพัดถึงบ้าง ชนิดของลูกถ้วยที่ใช้ใช้งานคือ ลูกถ้วยไลน์โพลีไทพ์ แบบ 57-3 ตาม มอก. 1077 (วัสดุเลขที่ 03010003) ลูกถ้วยพินโพลีไทพ์ แบบ 56/57-3 ตาม มอก. 1251 (วัสดุเลขที่ 03010103)

2) พื้นที่ที่มีมลภาวะในระดับปานกลาง เช่น บริเวณพื้นที่ที่มีมลภาวะจากโรงงานอุตสาหกรรมในระดับปานกลาง บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่เกิน 1 กม. และมีลมทะเลพัดถึงบ้างชนิดของลูกถ้วยที่ใช้ใช้งานคือ ลูกถ้วยแบบฟ็อก 33 kV (วัสดุเลขที่ 03000003) ลูกถ้วยพินโพลีไทพ์ แบบ 56/57-4 ตาม มอก. 1251 (วัสดุเลขที่ 03010102)

3) พื้นที่ที่มีมลภาวะในระดับรุนแรง เช่นบริเวณพื้นที่ที่มีมลภาวะจากโรงงานอุตสาหกรรมในระดับรุนแรง บริเวณที่อยู่ชายฝั่งทะเลและมีลมทะเลพัดรุนแรง ชนิดของลูกถ้วยที่ใช้ใช้งานคือ ลูกถ้วยแบบฟ็อก 33 kV (วัสดุเลขที่ 03000003) ที่เคลือบด้วย RTV SILICONE (น้ำยาซิลิโคน แบบ ROOM TEMPERATURE VULCANIZING) ลูกถ้วยพินโพลีไทพ์ แบบ 56/57-4 ตาม มอก. 1251(วัสดุเลขที่ 03010102) ที่เคลือบด้วย RTV SILICONE ลูกถ้วยพินโพลีไทพ์ แบบ ผิวเคลือบสารกึ่งตัวนำ (วัสดุเลขที่ 03010005) โดยพิจารณาความเหมาะสมเป็นแห่งๆไป

หมายเหตุ 1) สำหรับลูกถ้วยก้านตรง 33 กิโลโวลต์ ตาม มอก. 279 แบบ ค (แบบ 56-3) (วัสดุเลขที่ 03000002) ที่เหลือคงคลังพัสดุและใช้งานได้ ให้นำไปใช้สำหรับก่อสร้างสายระบบจำหน่ายในพื้นที่ทั่วไปที่มีมลภาวะในระดับต่ำซึ่งอยู่ในชนบท(ท้องถิ่นห่างไกล)และไม่ได้ครอบคลุมโหลดที่สำคัญหรืออยู่ในเขตนิคมอุตสาหกรรม จนกว่าลูกถ้วยดังกล่าวจะหมดไป โดยไม่ต้องจัดซื้อมาใช้งานอีก

2) สำหรับลูกถ้วยไลน์โพลีไทพ์ แบบ 57- 4 ตาม มอก. 1077 (วัสดุเลขที่ 03010004) และ ลูกถ้วยพินโพลีไทพ์ แบบ 56 /57 – 4 ตาม มอก. 1051 (วัสดุเลขที่ 03010102)ในกรณีนำไปใช้ใน พื้นที่ที่มีมลภาวะระดับต่ำ ให้นำไปใช้งานที่ครอบคลุมโหลดที่มีความสำคัญ หรือภายในนิคมอุตสาหกรรมก่อน ทั้งนี้สำหรับลูกถ้วยไลน์โพลีไทพ์ แบบ 57 – 4 ให้ใช้งานจนหมดไป โดยไม่ต้องจัดซื้อมาใช้งานอีก

3) การใช้ลูกถ้วยแขวน

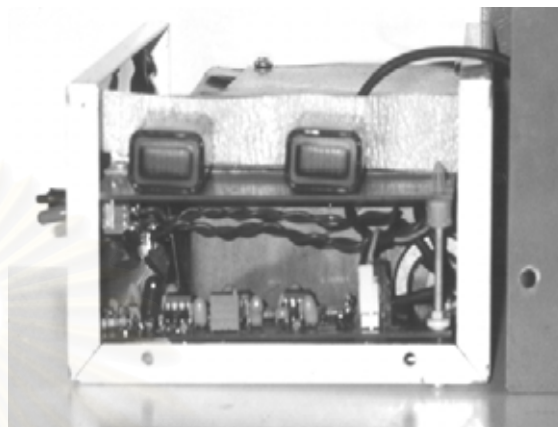
- ในพื้นที่ที่มีมลภาวะระดับต่ำ ให้ใช้ลูกถ้วยแขวนตาม มอก. 354 แบบ ง (แบบ 52-4) (วัสดุเลขที่ 03020002) จำนวน 3 ลูกต่อชุด

- ในพื้นที่ที่มีมลภาวะระดับปานกลาง ให้ใช้ลูกถ้วยแขวน ตาม มอก. 354 แบบ ง (แบบ 52-4) (วัสดุเลขที่ 03020002) จำนวน 4 ลูกต่อชุด

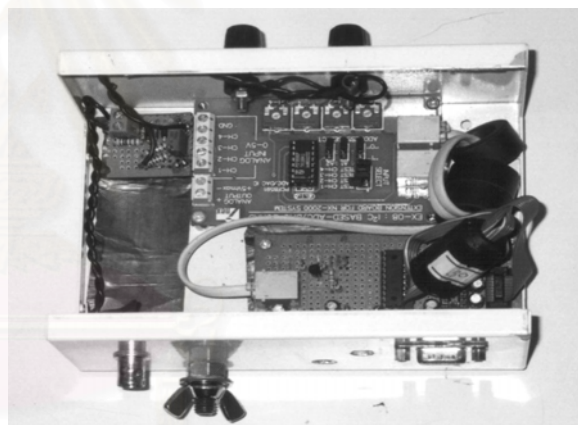
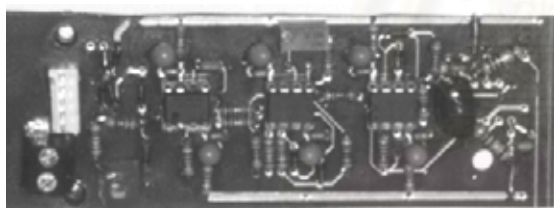
- ในพื้นที่ที่มีมลภาวะระดับรุนแรง ให้ใช้ลูกถ้วยแขวน ตาม มอก. 354 แบบ ง (แบบ 52-4) (วัสดุเลขที่ 03020000) ที่ทาเคลือบด้วย RTV SILICONE จำนวน 5 ลูกต่อชุด

ภาคผนวก ข
อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลและการเปรียบเทียบ

1. อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล



ก) ลักษณะภายนอกอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล ข) ลักษณะภายในอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล



ค) วงจรส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ง) วงจรในส่วน เหนือดี

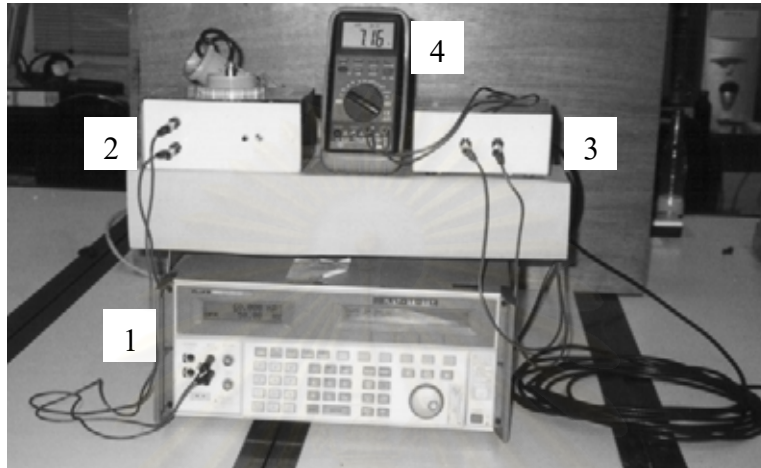


จ) ภาพด้านหน้าของ 1) อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล 2) เหนือดี
รูปที่ ข.1 อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล ส่วนประกอบและโครงสร้าง

2. การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล

2.1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล

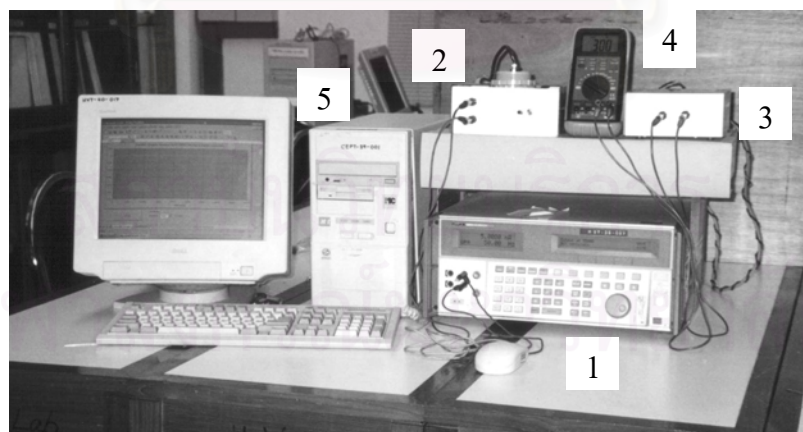
1) เปรียบเทียบเฉพาะอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลรุ่นที่ 1 (อ่านค่าแรงดันจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์แล้วทำการคำนวณเป็นกระแสรั่วไหล)



รูปที่ ข.2 การเปรียบเทียบเฉพาะอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล

- เมื่อ 1) Fluke 5500 A Calibrator 2) อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล
3) ชุดป้องกันแรงดันเกิน 4) Fluke digital multimeter

2) เปรียบเทียบอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลรุ่นที่ 2 (สามารถอ่านค่าแรงดันจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์แล้วทำการคำนวณเป็นกระแสรั่วไหลหรือใช้การบันทึกค่าและแสดงผลโดยคอมพิวเตอร์)



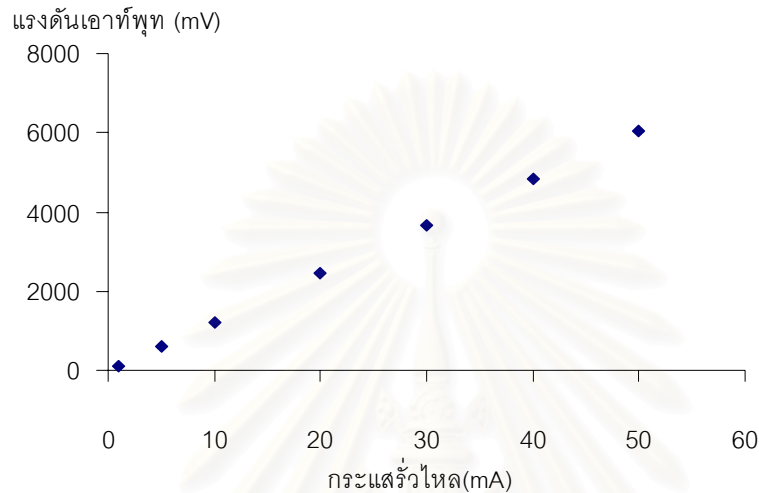
รูปที่ ข.3 การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลโดยทำการบันทึกค่าและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์

- เมื่อ 1) Fluke 5500 A Calibrator 2) อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล
3) ชุดป้องกันแรงดันเกินและเหตุคี 4) Fluke digital multimeter
5) คอมพิวเตอร์สำหรับการบันทึกค่าและแสดงผล

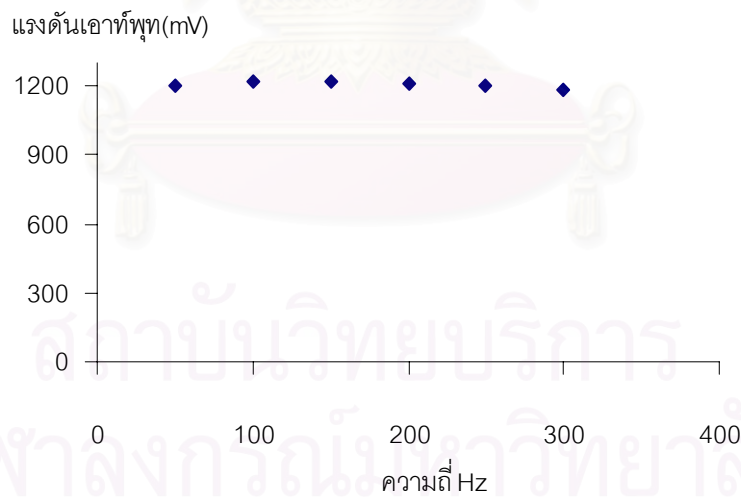
2.2 คุณลักษณะสมบัติของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล

บอร์ดสำหรับวัดกระแสรั่วไหลของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล แบ่งเป็น 2 บอร์ด คือ บอร์ด ที่ 1 มี ย่านวัด 0.5 - 60 mA บอร์ด ที่ 2 ย่านวัด 10 - 500 mA

1) บอร์ดที่ 1 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลและการตอบสนองต่อความถี่

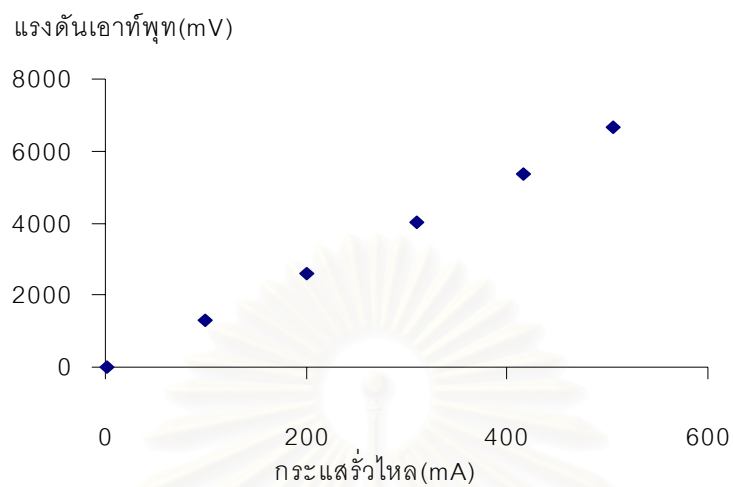


รูปที่ ข.4 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลบอร์ดที่ 1

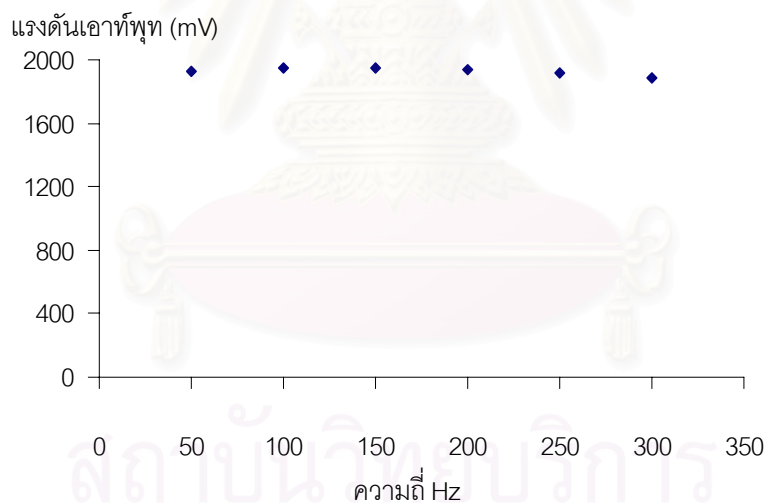


รูปที่ ข.5 การตอบสนองต่อความถี่ของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลบอร์ดที่ 1

2) บอร์ดที่ 2 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหลและการตอบสนองต่อความถี่



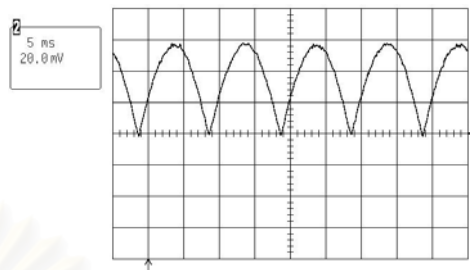
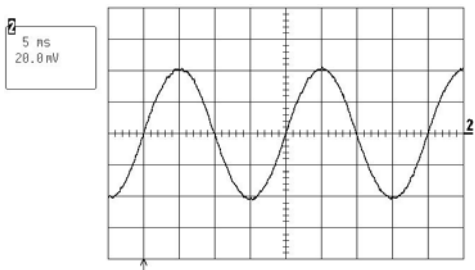
รูปที่ ข.6 ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล บอร์ดที่ 2



รูปที่ ข.7 การตอบสนองต่อความถี่ของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล บอร์ดที่ 2

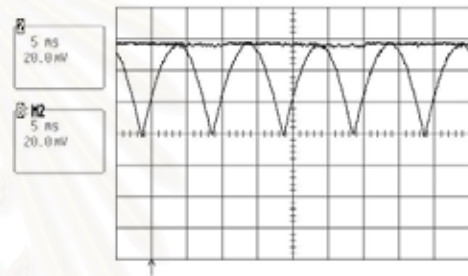
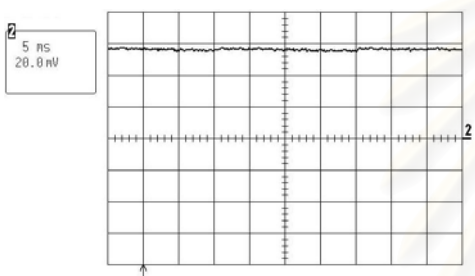
2.3 รูปสัญญาณแรงดันในส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล

1) สัญญาณแรงดันเมื่อกระแสรั่วไหลมีค่า 0.5 mA บอร์ด ที่ 1



(ก) แรงดันหลังจากผ่านวงจรขยาย

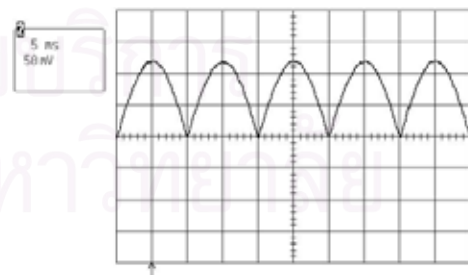
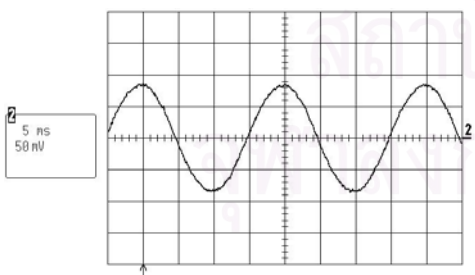
(ข) แรงดันหลังจากผ่านวงจรเรกติไฟาย



(ค) แรงดันหลังจากผ่านวงจรตรวจจับค่ายอด (ง) เปรียบเทียบแรงดันหลังจากผ่านวงจรเรกติไฟาย และวงจรตรวจจับค่ายอด

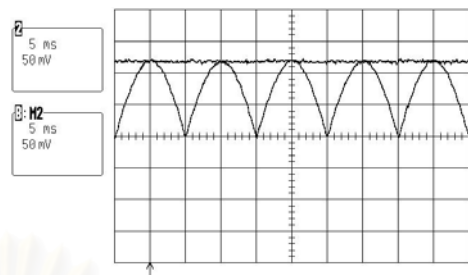
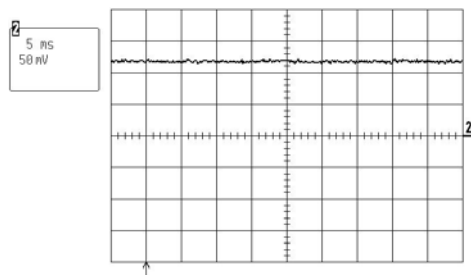
รูปที่ ข.8 สัญญาณแรงดันที่ส่วนต่างๆเมื่อมีกระแสรั่วไหล 0.5 mA

2) สัญญาณแรงดันเมื่อกระแสรั่วไหลมีค่า 1 mA บอร์ด ที่ 1



(ก) แรงดันหลังจากผ่านวงจรขยาย

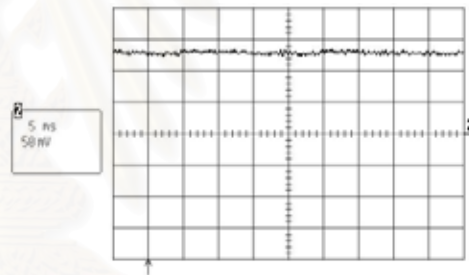
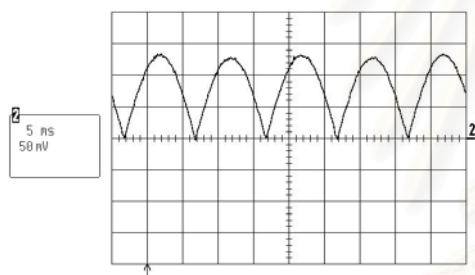
(ข) แรงดันหลังจากผ่านวงจรเรกติไฟาย



(ก) แรงดันหลังจากผ่านวงจรตรวจจับค่ายอด (ง) เปรียบเทียบแรงดันหลังจากผ่านวงจรเรคตีฟาย และวงจรตรวจจับค่ายอด

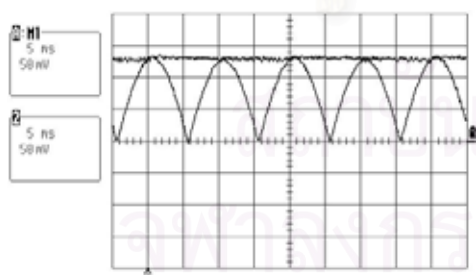
รูปที่ ข.9 สัญญาณแรงดันที่ส่วนต่างๆ เมื่อมีกระแสรั่วไหล 1 mA

3) สัญญาณแรงดันเมื่อกระแสรั่วไหลมีค่า 10 mA บอร์ด ที่ 1



(ก) แรงดันหลังจากผ่านวงจรเรคตีฟาย

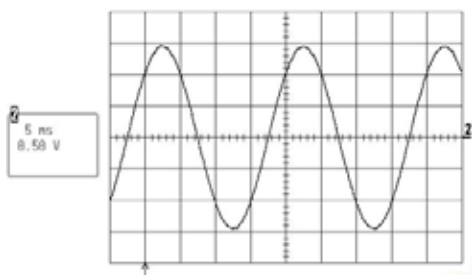
(ข) แรงดันหลังจากผ่านวงจรตรวจจับค่ายอด



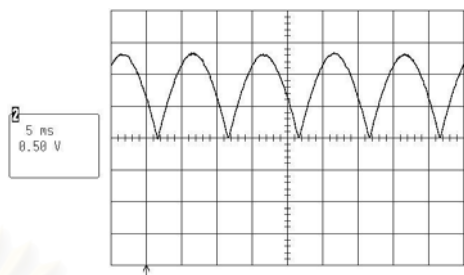
(ค) เปรียบเทียบ แรงดันหลังจากผ่านวงจรเรคตีฟายและวงจรตรวจจับค่ายอด

รูปที่ ข.10 สัญญาณแรงดันที่ส่วนต่างๆเมื่อมีกระแสรั่วไหล 10 mA

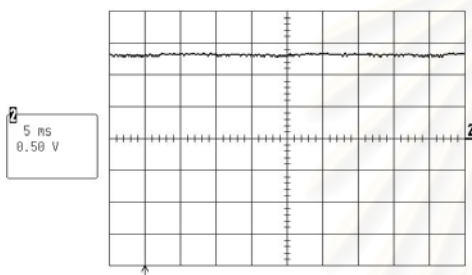
4) สัญญาณแรงดันเมื่อกระแสไหลมีค่า 100 mA บอร์ด ที่ 2



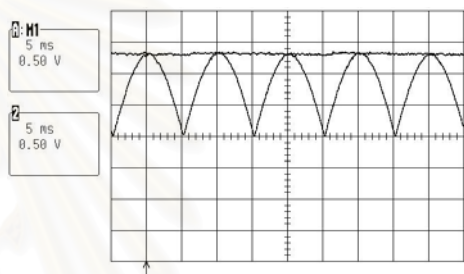
(ก) แรงดันหลังจากผ่านวงจรขยาย



(ข) แรงดันหลังจากผ่านวงจรเรกติฟาย



(ค) แรงดันหลังจากผ่านวงจรตรวจจับค่ายอด

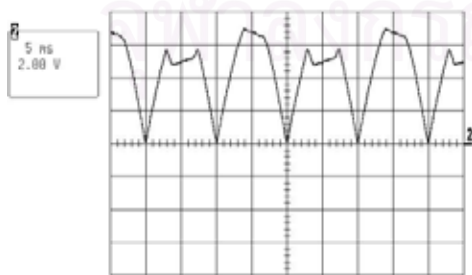


(ง) เปรียบเทียบแรงดันหลังจากผ่านวงจรเรกติฟาย และวงจรตรวจจับค่ายอด

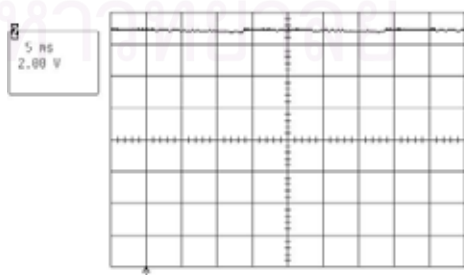
รูปที่ ข.11 สัญญาณแรงดันที่ส่วนต่างๆเมื่อมีกระแสไหล 100 mA

5) สัญญาณแรงดันเมื่อกระแสไหลมีค่า 550 mA บอร์ด ที่ 2

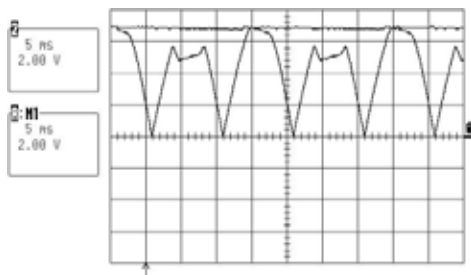
เมื่อมีกระแสไหล 550 mA การทำงานของวงจรผิดพลาดเนื่องจากองค์ประกอบของวงจรเช่นออปแอมป์และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวออปแอมป์ได้รับการออกแบบให้ทำงานที่กระแสอินพุทไม่เกิน 500 mA



(ก) แรงดันหลังจากผ่านวงจรเรกติฟาย

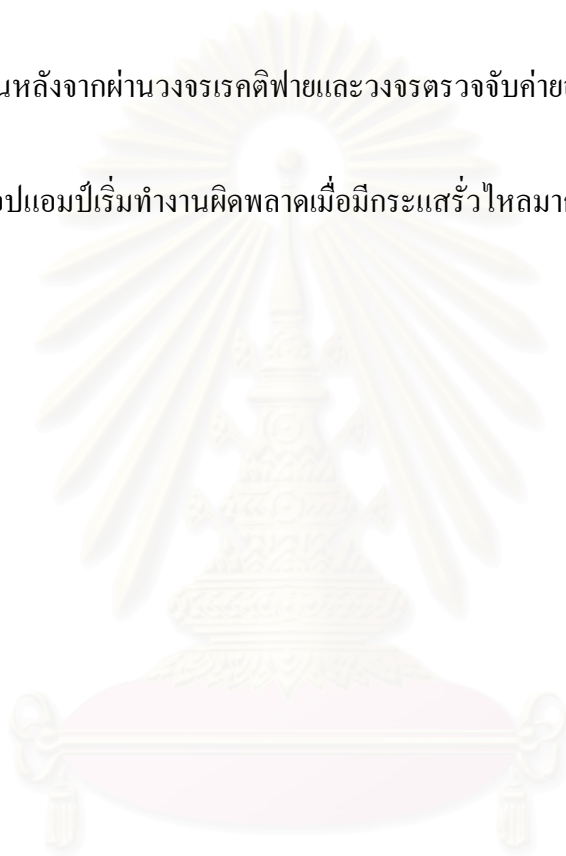


(ข) แรงดันหลังจากผ่านวงจรตรวจจับค่ายอด



(ค) เปรียบเทียบแรงดันหลังจากผ่านวงจรเรกติไฟและวงจรตรวจจับค่ายอด

รูปที่ ข.12 ออปแอมป์เริ่มทำงานผิดพลาดเมื่อมีกระแสรั่วไหลมากกว่า 550 mA



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

หลักการดำเนินงานของโปรแกรมวัดกระแสรั่วไหล

1. โปรแกรมเริ่มต้นทำงาน
2. กำหนดให้กราฟคุณสมบัติปรับเลื่อนแกนแบบอัตโนมัติ
3. รับค่าเวลาและนำไปเก็บที่ ชีท 2
4. กำหนดโหมดการทำงานของ ไอซี (ลักษณะการรับสัญญาณอินพุท)
5. ชีท 2 อยู่ในสถานะทำงาน แล้วทำการลบข้อมูลเดิมในชีท 2
6. ชีท 1 อยู่ในสถานะ ทำงาน
7. ส่งสัญญาณเริ่มต้นทำงานให้กับ ไอซี เอดีซี กำหนดช่องรับสัญญาณอินพุทให้แก่ไอซี
8. รับข้อมูลแรงดันจากชุด เอดีซี
9. แปลงข้อมูลแรงดันให้อยู่ในรูปกระแสรั่วไหลแล้วนำไปเก็บไว้ในสดมภ์ ที่ 2 ของชีท 2 พร้อมกับเริ่มนับเวลาที่รับเข้ามาในข้อ 3 และบันทึกค่าเวลาลงไปในสดมภ์ ที่ 1 ของชีท 2
10. ชีท 1 อ่านข้อมูลจากชีท 2 เพื่อนำมาแสดงในรูปกราฟ ถ้ากำหนดให้แสดงผลเป็นแบบเรียลไทม์ ถ้าหากไม่กำหนดให้แสดงผลแบบเรียลไทม์ ให้ทำข้อ 9 ซ้ำจนครบระยะเวลาที่กำหนด แล้วจึงแสดงผลในรูปกราฟ
11. ไอซี เอดีซี หยุดทำงาน
12. โปรแกรมหยุดทำงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

1. การทดลองแรงดันวาทไฟตามผิวความถี่ต่ำลูกถ้วยฉนวน ทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
 - 1) หม้อแปลงทดสอบ (Test transformer) พิกัด 500 kV 250 kVA บริษัท Haefely & Co Ltd
 - 2) คาปาซิเตอร์ โวลท์เตจ ดิไวเดอร์ (Capacitor voltage divider) พิกัด 600 kV บริษัท Haefely & Co Ltd
2. การทดลองแรงดันวาทไฟตามผิวความถี่ต่ำลูกถ้วยฉนวน ทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงบางพลี การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
 - 1) หม้อแปลงทดสอบ (Test transformer) พิกัด 1200 kV 300 kVA บริษัท Haefely & Co Ltd
 - 2) คาปาซิเตอร์ โวลท์เตจ ดิไวเดอร์ (Capacitor voltage divider) พิกัด 1, 200 kV บริษัท Haefely & Co Ltd
3. การทดลองแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤติ (U_b 50%) ทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
 - 1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse generator) พิกัด 1200 kV 36 kJ ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง
 - 2) อิมพัลส์ โวลท์เตจ ดิไวเดอร์ (Impulse voltage divider) แบบ คาปาซิเตอร์ 700 pF พิกัด 1200 kV บริษัท Haefely Trench
 - 3) ชุดควบคุมแรงดันอิมพัลส์ (Generator control GC 223) บริษัท Haefely Trench
 - 4) พิคโวลท์มิเตอร์ (SV 642 Precision impulse peak voltmeter) บริษัท Haefely Trench
 - 5) ออสซิลโลสโคป (LeCroy 9384 M 1 GHz Oscilloscope) บริษัท LeCroy Innovators in Instrumentation
4. การทดลองแรงดันวาทไฟตามผิวในสถานะเปราะเปื้อน ทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
 - 1) หม้อแปลงทดสอบ (Test transformer) พิกัด 500 kV 250 kVA บริษัท Haefely & Co Ltd
 - 2) คาปาซิเตอร์ โวลท์เตจ ดิไวเดอร์ (Capacitor voltage divider) พิกัด 600 kV บริษัท Haefely & Co Ltd
 - 3) อุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล (Leakage current meter) ย่านวัด 0.1 - 50 mA จัดทำขึ้นเอง
5. การทดลองความแข็งแรงทางกล ทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
 - 1) เครื่องทดสอบแรงดึง AMSLER พิกัด 40 ton บริษัท Wolpert Werkstoffprufmaschinen G.m.b.h CH – 8201 Schaffhausen

6. การทดลองความแข็งแรงรวมกลไฟฟ้า ทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 1) หม้อแปลงทดสอบ 100 kV 5 kVA บริษัท Haefely & Co Ltd
 - 2) คาปาซิเตอร์ โวลต์เตจ ดิไวเดอร์ (Capacitor voltage divider) พิกัด 100 kV
 - 3) เครื่องทดสอบแรงดึง พิกัด 50 ton
7. การวัดค่าความนำไฟฟ้า ทำการทดสอบที่ห้องทดลองเคมีปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยี ราช มงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ และ บริษัท ปีโตรเคมีแห่งชาติ จำกัด มหาชน
- 1) JENWAY Conductivity meter PCM 3 6640 – 026 คอ / 235
 - 2) CM – Conductivity meter CM – 40S Cell constant NO. 803F0055 TOA Electronic Ltd.
8. การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดกระแสรั่วไหล ทำการเปรียบเทียบที่ห้องปฏิบัติการ EMC คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 1) ออสซิลโลสโคป (LeCroy 9384 M 1 GHz Oscilloscope) บริษัท LeCroy Innovators in Instrumentation
 - 2) ออสซิลโลสโคป (Textronix TDS 220 1 GS/S 100 MHz Oscilloscope) บริษัท Textronix INC.
 - 3) Fluke 5500A Calibrator ID N 6675005 บริษัท Fluke corporation

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนรเศรษฐ์ พัฒนเดช สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 โดยศึกษาวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (Highvoltage engineering) และ EMC (Electromagnetic compatibility)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย