

แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงและสวิตซ์เชิงอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลง
ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์



นายชลวิทย์ วิณิชชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0181-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DC AND SWITCHING IMPULSE BREAKDOWN VOLTAGES OF TRANSFORMER OIL
UNDER INHOMOGENEOUS FIELDS



Mr. Chollawit Winitchai

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 2000

ISBN 974-13-0181-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงและสวิตซ์ซิมพัลส์
ของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์

โดย

นายชลวิทย์ วินิจชัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

..... กรรมการ
(คุณวรา จุ๋ฮอง)

ชลวิทย์ วินิจชัย : แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงและสวิตชิ่งอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลง
ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์ (DC and Switching Impulse Breakdown Voltages of
Transformer Oil under Inhomogeneous Fields)

อ. ที่ปรึกษา : ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ , 163 หน้า. ISBN 974-13-0181-2.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานผลกระทบของการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่มีต่อ
ลักษณะสมบัติการเกิดเบรกดาวนัของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์ เมื่อทดสอบ
ด้วยแรงดันกระแสตรงและสวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานทั้งชั่วบวกและชั่วลบ โดยเป็นการ
ศึกษาเชิงทดลองที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ แปรค่าความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า
(E_{max}/E_{avg}) ในช่วง 1.14-5.34 น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทำการทดลองได้ควบคุมขนาดอนุภาคเจือปน
ให้เล็กกว่า $1 \mu m$ และปริมาณความชื้นประมาณ 30 ppm ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรก
ดาวนัเฉลี่ย , ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนัและลักษณะการกระจายทางสถิติของข้อมูล
จากผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การกระจายแบบปกติสามารถแทนการกระจายของข้อมูลแรงดันเบรกดาวนัได้ดี
2. ค่าแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงและสวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานทั้งชั่วบวกและชั่ว
ลบเพิ่มขึ้นตามขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมที่ใหญ่ขึ้นและระยะแกปที่เพิ่มขึ้น โดยความเครียดสนาม
ไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนัมีค่าลดลงตามขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมที่เล็กลงและระยะแกปที่เพิ่มขึ้น
3. ค่าแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงและสวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานทั้งชั่วบวกและชั่ว
ลบมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง $30-80^{\circ}C$ โดยในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็ก
น้อยแรงดันเบรกดาวนัมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ขณะที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ
สูงแรงดันเบรกดาวนัมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากตามอุณหภูมิ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อผู้ผลิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2543.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4270273821 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : TRANSFORMER OIL / THERMAL EFFECT / INHOMOGENEOUS FIELDS /

DC BREAKDOWN VOLTAGE / SWITCHING IMPULSE BREAKDOWN VOLTAGE

CHOLLAWIT WINITCHAI : DC AND SWITCHING IMPULSE BREAKDOWN

VOLTAGES OF TRANSFORMER OIL UNDER INHOMOGENEOUS FIELDS

THESIS ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS , Dr. Sc.Techn.

163 pp. ISBN 974-13-0181-2.

This thesis deals mainly with the effect of field non-uniformity and the impact of temperature on the breakdown characteristic of transformer oil under inhomogeneous fields. The experiments are performed with DC and switching impulse voltages. The sphere-plane configuration is used to vary the degree of field non-uniformity , i.e. E_{max}/E_{avg} , in the range between 1.14 and 5.34. The quality of transformer oil is controlled such that it contains less than 1 μm impurities and moisture of less than 30 ppm. The average breakdown voltage , breakdown strength and distribution function of breakdown voltage are calculated. The results are as follows :

1. The normal distribution provide a good representation of DC and switching impulse breakdown voltages.
2. The average breakdown voltage of DC and switching impulse is increased with increasing sphere electrode size and increasing gap. The breakdown dielectric strength is decreased with decreasing sphere electrode size and increasing gap.
3. The average breakdown voltage of DC and switching impulse is increased with increasing temperature in the range between 30 and 80°C. Under slightly non-uniform fields , the breakdown voltage only slightly increase with temperature. However , it significantly increase with temperature under highly non-uniform fields.

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature.....

Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year.....2000.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชร
รักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้แนวทางการแก้ปัญหา , ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยและ
แก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ได้ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสารและ
คุณวรา จุห้อง ที่ตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ คุณมนตรี รัชารักษ์ ที่คอยให้คำปรึกษาตลอด
การวิจัย คุณถาวร เอื้อดี ที่ได้คำแนะนำวิธีการสร้างและวัดแรงดันสูง คุณเกรียงไกร โอสุธนู ที่ช่วย
แนะนำในการเลือกซื้ออุปกรณ์ คุณอำไพ ตั้งจิตปฏิภาณกุล ที่ช่วยพิมพ์วิทยานิพนธ์และเป็นกำลังที่
ดีเยี่ยม ตลอดจนพี่ๆและเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่อำนวยความสะดวกและให้
กำลังใจด้วยดีเสมอ รวมทั้งศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังที่ให้การ
สนับสนุนด้านเงินทุนอุดหนุนการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาและพี่สาว ผู้ให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง
และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดตลอดมา จนทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 ผลการศึกษาในอดีต.....	3
1.4 วัตถุประสงค์.....	5
1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	6
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	6
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	6
2. ฉนวนเหลว.....	7
2.1 ชนิดของฉนวนเหลว.....	7
2.2 น้ำมันหม้อแปลง.....	8
2.3 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	11
2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลง.....	12
2.3.2 ความชื้น.....	13
2.3.3 ก๊าซ.....	13
2.3.4 ประจุค้าง.....	15
2.3.5 การเคลื่อนที่.....	15

	หน้า
2.3.6 อุณหภูมิ.....	15
2.3.7 การกระจายสนามไฟฟ้า.....	15
2.3.8 อนุภาคเจ็อบนของแข็ง.....	16
2.3.9 ชนิดของรูปคลื่นแรงดัน	16
2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว.....	16
2.4.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลวบริสุทธิ์.....	17
2.4.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้า.....	18
3. การวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.1 การทดลองแรงดันเบรกดาวน.....	22
3.1.1 การทดลองแรงดันเพิ่ม.....	22
3.1.2 การหาค่าแรงดันเบรกดาวนที่ควอนไทล์อันดับต่ำ.....	26
3.2 การทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน.....	30
3.2.1 การสร้างกราฟเปรียบเทียบ.....	30
3.2.2 การคำนวณเพื่อการทดสอบสมมติฐาน.....	31
3.3 การหาฟังก์ชันการกระจายของข้อมูล.....	32
3.3.1 การสร้างตารางแจกแจงความถี่สะสมสัมพัทธ์.....	32
3.3.2 การสร้างกราฟการกระจายของข้อมูล.....	32
3.4 การเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี.....	33
3.4.1 ฟังก์ชันการกระจายทางทฤษฎี.....	33
3.4.2 วิธีการเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี.....	37
3.5 การหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม.....	41
4. วิธีดำเนินการทดลอง.....	44
4.1 น้ำมันหม้อแปลง.....	44
4.2 เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจ็อบนและปริมาณความชื้น.....	44
4.3 ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	46
4.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	49

	หน้า
4.5 วิธีการทดลองและรวบรวมข้อมูล.....	49
4.5.1 อีเล็กโตรด.....	49
4.5.2 การทำความสะอาดชุดทดลอง.....	49
4.5.3 การถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลงลงชุดทดลองและการตั้งระยะแกป.....	50
4.5.4 การควบคุมอุณหภูมิ.....	50
4.5.5 การทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	50
4.5.6 การทดลองความคงทนต่อแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์.....	51
4.5.7 การควบคุมคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลง.....	52
4.5.8 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	53
5. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนั้กระแสตรง.....	55
5.1 ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนั้กระแสตรง.....	55
5.1.1 ผลกระทบจากการเกิดเบรกดาวนั้.....	55
5.1.2 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติ.....	58
5.1.3 การเปรียบเทียบกับข้อมูลเพื่อการออกแบบ.....	63
5.1.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ.....	66
5.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนั้กระแสตรง.....	70
6. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนั้สวิตชิ่งอิมพัลส์.....	74
6.1 ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนั้สวิตชิ่งอิมพัลส์.....	74
6.1.1 ผลกระทบจากการเกิดเบรกดาวนั้.....	74
6.1.2 อันดับควอนไทล์ของแรงดันเบรกดาวนั้ที่ได้จากการทดลอง.....	77
6.1.3 ผลการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30°C	82
6.1.4 การเปรียบเทียบกับข้อมูลเพื่อการออกแบบ.....	86
6.1.5 ผลกระทบของอุณหภูมิ	88
6.2 การเปรียบเทียบแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ.....	92
6.2.1 แรงดันกระแสสลับที่ควอนไทล์อันดับที่ 22%และ 27%.....	92
6.2.2 แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับที่อันดับควอนไทล์ที่ 22%.....	92

	หน้า
6.2.3 แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับที่อันดับความถี่ที่ 27%.....	94
6.3 การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์.....	96
6.4 การเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนกับระยะแกปของรูปคลื่นแรงดันชนิดต่างๆ.....	98
6.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนสวิตชิ่งอิมพัลส์.....	101
7. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	105
7.1 สรุปวิธีการทดลอง.....	105
7.2 สรุปผลการทดลอง.....	106
7.2.1 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	106
7.2.2 แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน.....	107
7.2.3 สำนข้อมูลเพื่อการออกแบบ.....	108
7.3 ข้อเสนอแนะ.....	109
6.3.1 การนำผลของวิทยานิพนธ์ไปใช้งาน.....	109
6.3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	109
6.3.3 การวิจัยที่ควรศึกษาต่อไป.....	110
รายการอ้างอิง.....	111
ภาคผนวก ก ข้อมูลการศึกษาผลกระทบของอนุภาคคาร์บอนและผิวอิเล็กทรอนิกส์.....	115
ภาคผนวก ข ข้อมูลการศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติของแรงดันกระแสตรง.....	120
ภาคผนวก ค ข้อมูลการศึกษาลักษณะของอนุภาคของแรงดันกระแสตรง.....	140
ภาคผนวก ง ข้อมูลแรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน.....	149
ภาคผนวก จ ข้อมูลการศึกษ้อัตราส่วนแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ.....	160
ประวัติผู้เขียน.....	163

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโมเลกุลและสัดส่วนขององค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง.....	9
2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ , เคมีและไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง.....	10
2.3 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทดลอง.....	11
2.4 ค่าคงที่การละลายของก๊าซ (A) ตามกฎของเฮนรี ($\mu atm. / (\mu l / l)$).....	14
2.5 ความสามารถในการละลายของก๊าซ (K,%Vol)	14
3.1 ควอนไทล์ λ_q ของการกระจายแบบปกติมาตรฐาน.....	31
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การกระจาย(δ)กับแฟกเตอร์ปรับแก้ γ_b , k_b และ g_b	37
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $y = \Phi(z)$ ของการกระจายแบบปกติ.....	38
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $y = \Phi(z)$ ของการกระจาย Weibull.....	39
3.5 ค่าวิกฤต $k_{n,\alpha}$ ของการทดสอบ Kolmogorov test.....	40
4.1 แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (FF) ที่ระยะแกปและอิเล็กโตรดทรงกลมขนาดต่างๆ.....	47
4.2 แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบรีดแกป-ระนาบที่ระยะแกปต่างๆ.....	47
5.1 แรงดันเบรกดาวนของน้ำมันหม้อแปลงก่อนและหลังผ่านการทดลองเบรกดาวน.....	57
5.2 สภาวะที่ทำการทดลอง.....	58
5.3 สภาวะที่ทำการทดลอง.....	66
6.1 แรงดันเบรกดาวนของน้ำมันหม้อแปลงก่อนและหลังผ่านการทดลองเบรกดาวน.....	77
6.2 การหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม.....	79
6.3 การหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม.....	80
6.4 สภาวะที่ทำการทดลอง.....	82
6.5 สภาวะที่ทำการทดลอง.....	88

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ชนิดของฉนวนเหลว.....	8
2.2 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบกับน้ำมันหม้อแปลง.....	12
3.1 การทดลองแรงดันเพิ่ม กรณีแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับ.....	23
3.2 การทดลองแรงดันเพิ่ม กรณีแรงดันอิมพัลส์.....	23
3.3 ควอนไทล์อันดับต่ำสุดและสูงสุด ที่สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น $\beta = 0.95$	25
3.4 ควอนไทล์อันดับต่ำสุดและสูงสุด ที่สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นค่าต่างๆ.....	26
3.5 การป้อนแรงดันเพื่อหาแรงดันเบรกดาวนที่ควอนไทล์อันดับต่ำ ($m > 1$).....	27
3.6 ผลกระทบของ u_0 ที่มีต่อแฟกเตอร์ β , s_β และอันดับควอนไทล์ของ u_{dq}	28
3.7 ผลกระทบของ m ที่มีต่อแฟกเตอร์ β , s_β และอันดับควอนไทล์ของ u_{dq}	29
3.8 ผลกระทบของ $\Delta u/s$ ที่มีต่อแฟกเตอร์ β , s_β และอันดับควอนไทล์ของ u_{dq}	29
3.9 ตัวอย่างการตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันด้วยการสร้างกราฟเปรียบเทียบ.....	30
3.10 กราฟความน่าจะเป็นสะสมกับแรงดันเบรกดาวนกระแสตรงชั่วฉับ.....	33
3.11 ฟังก์ชันความหนาแน่น $\varphi(z)/\sigma$ และฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(z)$ เมื่อ $\mu = 0$ และ $\sigma^2 = 1$	34
3.12 ฟังก์ชันความหนาแน่น $f_w(x)$ และฟังก์ชันการกระจาย $F_w(x)$ ของการกระจาย Weibull.....	36
3.13 การเปลี่ยนแกนความน่าจะเป็นสะสมของการกระจายแบบปกติ.....	38
3.14 การเปลี่ยนแกนความน่าจะเป็นสะสมของการกระจาย Weibull เมื่อ $\delta = 10$	39
3.15 การเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี.....	41
3.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$ กับ $\sigma_{\Delta x}$ และ $\mu_{\Delta x}$	43
3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$ กับแรงดันเพิ่มแต่ละขั้น (ΔX).....	43
4.1 เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น.....	44
4.2 จุดเดือดของน้ำกับความดันไอ.....	45
4.3 ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	46
4.4 การกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 15 mm ระยะแกป 5 mm.....	48
4.5 กระบวนการควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลง.....	48

รูปที่	หน้า
4.6 วงจรทดลองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	51
4.7 วงจรทดลองแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน.....	52
4.8 กระบวนการทดลองด้วยวิธีแรงดันเพิ่ม.....	54
5.1 แรงดันเบรกดาวนั้กระแสตรงขั้วบวกของทรงกลมรัศมีขนาด 5 mm ระยะแกป 3 mm.....	56
5.2 แรงดันเบรกดาวนั้กระแสตรงขั้วบวกของทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ระยะแกป 5 mm....	56
5.3 \bar{U}_d และ v กับ g ที่รัศมีทรงกลมค่าต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30 °C ขั้วบวก.....	60
5.4 \bar{U}_d และ v กับ g ที่รัศมีทรงกลมค่าต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30 °C ขั้วลบ.....	60
5.5 \bar{U}_d กับ FF และขั้วแรงดัน.....	61
5.6 E_d กับ FF	62
5.7 ความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป.....	65
5.8 ความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป (อันดับควอนไทล์ที่เกิดเบรกดาวนั้ 1%).....	66
5.9 แรงดันเบรกดาวนั้ (U_d) ขั้วบวกกับอุณหภูมิ.....	67
5.10 แรงดันเบรกดาวนั้ (U_d) ขั้วลบกับอุณหภูมิ.....	68
5.11 % U_d กับ FF	69
6.1 แรงดันเบรกดาวนั้สวิตชิงอิมพัลส์ขั้วลบ (U_{dq}^-) ที่ $r=10$ mm และ $g=3$ mm.....	75
6.2 แรงดันเบรกดาวนั้สวิตชิงอิมพัลส์ขั้วบวก (U_{dq}^+) ที่ $r=10$ mm และ $g=3$ mm.....	76
6.3 การกระจายเชิงสถิติของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมขั้วลบเปรียบเทียบกับฟังก์ชัน ความน่าจะเป็นเมื่อแทนด้วยการกระจายแบบปกติ.....	78
6.4 การกระจายเชิงสถิติของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมขั้วบวกเปรียบเทียบกับฟังก์ชัน ความน่าจะเป็นเมื่อแทนด้วยการกระจายแบบปกติ.....	80
6.5 \bar{U}_{dq} และ v กับ g ที่รัศมีทรงกลมต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30 °C ขั้วบวก.....	83
6.6 \bar{U}_{dq} และ v กับ g ที่รัศมีทรงกลมต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30 °C ขั้วลบ.....	83
6.7 \bar{U}_{dq} กับ FF และขั้วแรงดัน.....	84
6.8 \bar{U}_{dq} กับ ระยะแกป (อิลีกโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ).....	84
6.9 \bar{E}_{dq} กับ FF	85
6.10 ความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป.....	87

รูปที่	หน้า
6.11 U_{dq} ซ้ำบวกกับอุณหภูมิจุด.....	89
6.12 U_{dq} ซ้ำลบกับอุณหภูมิจุด.....	90
6.13 $\%U_{dq}$ กับ FF	91
6.14 อัตราส่วนแรงดันกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่อันดับควอนไทล์ที่ 22%.....	94
6.15 อัตราส่วนแรงดันกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่อันดับควอนไทล์ที่ 27%.....	95
6.16 แรงดันเบรกดาวน์กับเวลาคงอยู่ของรูปคลื่นแรงดันชนิดต่างๆที่อันดับควอนไทล์ที่ 22%...98	
6.17 แรงดันเบรกดาวน์ค่ายอดกับระยะแกปที่อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ขนาดต่างๆ.....	100

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ของเหลวใดๆสามารถนำมาใช้เป็นฉนวนได้เสมอ ถ้าหากว่าของเหลวนั้นมีค่าความต้านทานสูงมากพอและไม่เปลี่ยนสภาพทางฟิสิกส์ , เคมี และไฟฟ้าในช่วงเวลาที่นานพอสมควร โดยหลักการแล้วฉนวนเหลวจะทำหน้าที่การฉนวนได้ดีกว่าฉนวนก๊าซและฉนวนของแข็ง ที่จัดว่าดีกว่าฉนวนก๊าซเพราะว่ามีความหนาแน่นสูงกว่าฉนวนก๊าซ จึงมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนก๊าซ ที่จัดว่าดีกว่าฉนวนของแข็ง เพราะว่าฉนวนเหลวจะแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างได้ง่ายกว่า และยิ่งกว่านั้นฉนวนเหลวสามารถกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนเองได้ (self-healing) หลังจากเบรกดาวนผ่านพ้นไปแล้ว

ฉนวนเหลวที่ดีจะต้องระบายความร้อนได้ดี , ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี , มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง , มีแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าในไดอิเล็กตริกต่ำ , ทนต่อความร้อนได้สูงหรือติดไฟได้ยาก , ไม่เกิดก๊าซพิษเมื่อติดไฟและมีความสามารถในการแทรกซึมแทนที่ช่องว่างของการทำฉนวนได้

อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่นำฉนวนเหลวมาใช้ ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง , หม้อแปลงวัดแรงดัน , หม้อแปลงวัดกระแส , เซอร์คิตเบรกเกอร์ , รีแอกเตอร์ , เคเบิลแรงสูง , ไดโอดและคาปาซิเตอร์ เป็นต้น โดยฉนวนเหลวทำหน้าที่ดังต่อไปนี้ [1]

- เป็นฉนวนทางไฟฟ้ากั้นระหว่างส่วนที่มีแรงดันไฟฟ้ากับส่วนที่เป็นกราวด์ในหม้อแปลงไฟฟ้า
- เป็นตัวระบายความร้อนด้วยการพาในหม้อแปลงไฟฟ้าและด้วยการไหลวนในเคเบิลแรงสูง
- เป็นฉนวนแทรกซึมในกระดาดหรือวัสดุอื่นๆในหม้อแปลงไฟฟ้า , เคเบิลแรงสูง , คาปาซิเตอร์
- เป็นตัวดับอาร์กในเซอร์คิตเบรกเกอร์ชนิดฉนวนน้ำมัน
- สร้างค่าความจุไฟฟ้าให้สูงสำหรับคาปาซิเตอร์กำลัง

ของเหลวหลายชนิดที่ได้จากแหล่งธรรมชาติและจากการสังเคราะห์สามารถนำมาใช้เป็นฉนวนเหลวได้ เช่น น้ำมันแร่ (โดยเฉพาะน้ำมันหม้อแปลง) , ไนโตรเจนเหลว , อาร์กอนเหลว , น้ำมันซิลิโคน , น้ำมันพีช เป็นต้น น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนเหลวที่สำคัญและนิยมใช้กันมากเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนเหลวชนิดอื่น มีคุณสมบัติของการเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและตัวระบายความร้อนที่ดี โดยยังมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนเหลวชนิดอื่น ลักษณะสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงใหม่โดยทั่วไปกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC296-1969 [2] ทั้งด้านฟิสิกส์ , เคมีและไฟฟ้า ใน

การนำมาใช้งานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและปลอดภัย วิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจกลไกการนำไฟฟ้า , การเกิดดิสชาร์จบางส่วนและลักษณะสมบัติด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเป็นอย่างดี และต้องออกแบบให้สามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันใช้งานซึ่งเป็นแรงดันกระแสตรง , แรงดันกระแสสลับและแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า , แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ เป็นต้น เพื่อให้อุปกรณ์นั้นทำงานได้ถูกต้องโดยไม่ทำให้เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

1.2 ที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น การผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องด้วยการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแรงดันสูงสามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ปริมาณมากและความสูญเสียต่ำจึงเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง โดยมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าอยู่ 2 รูปแบบคือ แรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันสูงกระแสตรง โดยที่ปัญหาในการใช้งานแรงดันสูงก็คือการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั่นเอง ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแรงดันสูงกระแสสลับในระดับแรงดันเกิน 300 kV การใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องมีการทดสอบการฉนวนด้วยแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน (250/2500 μ s) ก่อนนำไปใช้งานเสมอ ส่วนกรณีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแรงดันสูงกระแสตรงต้องมีการทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยแรงดันกระแสตรงก่อนนำไปใช้งานเช่นกัน จึงเป็นที่มาของการศึกษาผลของรูปคลื่นแรงดันทั้งสอง

ปัจจุบันฉนวนเหลวได้ถูกนำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าและตัวระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยเฉพาะน้ำมันหม้อแปลงซึ่งจัดเป็นฉนวนเหลวที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่ฐานข้อมูลเกี่ยวกับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลงที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมีน้อยมาก จึงสมควรจะศึกษาในเรื่องนี้เพื่อเป็นฐานข้อมูลเพื่อการออกแบบได้

การศึกษาวิจัยทางด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งจัดเป็นฉนวนเหลวเชิงการค้ำมีพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เช่น รูปร่างของอิเล็กโทรด , ระยะแก๊ป , ขนาดอนุภาคเจือปน , องค์ประกอบทางเคมี , อัตราการไหล , ปริมาณความชื้น , ปริมาณก๊าซและอุณหภูมิ เป็นต้น [3-9] ในการศึกษาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงครั้งนี้จะเน้นที่ผลกระทบของพารามิเตอร์ซึ่งพบมากในการใช้งานทางปฏิบัติคือ

1) การกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย เนื่องจาการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงถึงจะพยายามให้มีการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ แต่ในทางปฏิบัติมักมีการ

กระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย เช่น ส่วนแหลมคมภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง , ผิวของอิเล็กทรอนิกส์ที่ขรุขระไม่เรียบ , รอยต่อระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น จึงศึกษาเปรียบเทียบการกระจายตัวสนามไฟฟ้าที่ค่าความไม่สม่ำเสมอต่างๆ ว่าจะมีผลอย่างไรต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง

2) คุณณภูมิขณะใช้งาน ในสภาพการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทยภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะมีคุณณภูมิสูงกว่าคุณณภูมิห้อง โดยมีการเปลี่ยนแปลงคุณณภูมิตามขนาดของโหลด , กำลังสูญเสียภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงและสภาพอากาศภายนอก ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงคุณณภูมิจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง เช่น ความสามารถในการละลายของก๊าซและความชื้น , ความสามารถในการเป็นพาหะนำไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลง เป็นต้น จึงศึกษาถึงผลกระทบของคุณณภูมิของน้ำมันหม้อแปลงที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในช่วงคุณณภูมิ 30-80°C

เพื่อข้อมูลที่ถูกต้องการศึกษาวิจัยจะทำการทดลองภายในระบบปิด และทำการควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆให้ใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง โดยการควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น และทดสอบน้ำมันหม้อแปลงทั้งก่อนและหลังการทดลองให้คุณสมบัติใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง เพื่อการศึกษาถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงทั้งแรงดันกระแสตรงและแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ซึ่งจะเสริมข้อมูลด้านการเบรกดาวนของน้ำมันหม้อแปลงให้สมบูรณ์ [10] และเป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

1.3 ผลการศึกษาวิจัยในอดีต

การศึกษาวิจัยในอดีตทางด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง ส่วนใหญ่จะศึกษาภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า การศึกษาวิจัยภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์มีน้อยมาก จึงใช้เป็นแนวทางการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

Holle (1967) [1] ได้ทำการศึกษาวิจัยถึงความนำไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงโดยการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและคุณณภูมิ โดยปริมาณความชื้นที่ศึกษามี 4 ค่า คือ 3 , 20 , 44 และ 180 ppm ผลที่ได้คือความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นเจือปนเพิ่มขึ้น โดยปริมาณความชื้นที่ 180 ppm ให้ความนำไฟฟ้าสูงสุด โดยที่ผลกระทบจากคุณณภูมิให้ผลคือ ที่ปริมาณความชื้น 3 , 20 ppm ความนำไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มคุณณภูมิในช่วง 20- 100 °C , ที่ปริมาณความชื้น 44 ppm ที่คุณณภูมิ 20-40 °C ความนำไฟฟ้าจะลดลง แต่เมื่อคุณณภูมิในช่วง 40-100 °C ความนำไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้น และที่ปริมาณความชื้น 180 ppm ที่คุณณภูมิ 20-70 °C ความนำไฟฟ้าจะลดลง แต่เมื่อคุณณภูมิ 70-100 °C ความนำไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้น

Hauschild (1969) [1] ได้ทำการศึกษาวิจัยถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้แรงดันทดสอบ 3 ชนิดคือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz , แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอก ($1.2/50 \mu s$) และแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ชั่ววอก ($100/3000 \mu s$) ทำการทดสอบในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field) และในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) โดยในการทดลองที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ โดยที่ทรงกลมรัศมีขนาด 50 mm และระยะแกป(g) 0-50 mm โดยมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงสุด ($FF = E_{max}/E_{avg}$) ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 50 mm และระยะแกป 50 mm มีค่าเท่ากับ 1.75 โดยผลการทดลองที่ได้พบว่าเมื่อระยะแกปสูงขึ้นค่าแรงดันเบรกดาวนก็เพิ่มสูงขึ้นอย่างเชิงเส้นทุกชนิดแรงดันทดสอบ ยกเว้นช่วงระยะแกปน้อยกว่า 5 mm ที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้น โดยแรงดันเบรกดาวนอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอกจะมีค่าแรงดันเบรกดาวนสูงสุด ตามด้วยแรงดันเบรกดาวนสวิตชิ่งอิมพัลส์และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามลำดับ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน (E_d) ที่ระยะแกป 0-5 mm มีแนวโน้มลดลงตามแกปที่กว้างขึ้น และเมื่อระยะแกปกว้าง 5-50 mm ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 260 kV/cm สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอก , มีค่าเท่ากับ 185 kV/cm สำหรับแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ชั่ววอกและมีค่าเท่ากับ 50 kV/cm สำหรับแรงดันกระแสสลับที่ค่ายอดแรงดัน ส่วนในการทดลองที่สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงใช้อิเล็กโตรดแบบรีดแกป-ระนาบ โดยปลายรีดแกปมีรัศมี 1 mm และทำมุม 15° โดยทำการทดลองที่ระยะแกป 0-250 mm มีค่า $FF > 50$ ผลการทดลองพบว่าที่ระยะแกป 0-100 mm เมื่อทดลองด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวนกับระยะแกปไม่เป็นเชิงเส้น แรงดันเบรกดาวนอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวนสวิตชิ่งอิมพัลส์ และที่ระยะแกป 100-250 mm แรงดันเบรกดาวนอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาวนสวิตชิ่งอิมพัลส์ แต่เมื่อป้อนด้วยแรงดันกระแสสลับจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นที่แกปกว้างกว่า 40 mm โดยค่าเฉลี่ยความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนมีค่าประมาณ 10 kV/cm ต่ำกว่ากรณีของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยถึง 5 เท่า สาเหตุมาจากการเกิดดิซชาร์จบางส่วน

Takashima et al. (1988) [1] ได้ทำการศึกษาวิจัยถึงกระแสไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงและในโตรเจนเหลวภายใต้แรงดันกระแสตรงชั่ววอก โดยใช้อิเล็กโตรดแบบรีดแกป-ระนาบ ซึ่งรีดแกปทำจากแพลททินัมขนาดรัศมี 10 และ 25 μm และระนาบทำจากสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ที่ระยะแกปเท่ากับ 4 mm พบว่าจากการเพิ่มแรงดันกระแสตรงชั่ววอกทำให้กระแส

นำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น โดยรีดแก๊ปขนาดรัศมี $10\ \mu\text{m}$ ให้การเพิ่มของกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าขนาดรัศมี $25\ \mu\text{m}$ ณ อุณหภูมิ 20°C

M.R. Raghuveer , Z. Kolaczowski , Jin Weifang และ E. Kuffel (1990) [11] ได้ทำการศึกษาวิจัยถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามผิวของเพรสบอร์ด (pressboard) ในน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยใช้แรงดันกระแสตรงชั่ววอก , แรงดันกระแสสลับ , แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอก ($1.4/47\ \mu\text{s}$) และแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ชั่ววอก ($300/1750\ \mu\text{s}$) โดยใช้อิเล็กโตรดแบบวงแหวน (ring-shaped) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก $199.2\ \text{mm}$ และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $157\ \text{mm}$ ผลการทดลองพบว่าแรงดันเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นตามระยะแก๊ปที่เพิ่มขึ้นทุกชนิดรูปคลื่นแรงดัน โดยแรงดันเบรกดาวน์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอกมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ชั่ววอก , แรงดันกระแสตรงชั่ววอกและแรงดันกระแสสลับมีค่าต่ำที่สุด โดยอัตราส่วนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอกต่อแรงดันกระแสสลับมีค่าเท่ากับ 1.94 และอัตราส่วนแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ชั่ววอกต่อแรงดันกระแสสลับมีค่าเท่ากับ 1.8 ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาดังกล่าวถึงผลกระทบของกระบวนการแทรกซึมของน้ำมันหม้อแปลงในเพรสบอร์ด เช่นลดเวลาการอุ่นน้ำมันหม้อแปลง , การไม่การดูดอากาศขณะแทรกซึมน้ำมันหม้อแปลง , การทิ้งไว้ให้สัมผัสอากาศโดยตรง เป็นต้น พบว่าแรงดันเบรกดาวน์มีค่าลดลงเมื่อทำดังกล่าว

M.A. Abdallah (1999) [12] ได้ทำการศึกษาวิจัยถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly non-uniform field) เมื่อทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง , แรงดันกระแสสลับ , แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ($1/50\ \mu\text{s}$) และแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ ($200/2500\ \mu\text{s}$) โดยใช้อิเล็กโตรดแบบรีดแก๊ป-ระนาบ ซึ่งรีดแก๊ปทำจากนิกเกิล มีรัศมี $25\ \mu\text{m}$ และระนาบทำจาก Ni-Cr มีรัศมี $10\ \text{mm}$ ทำการปรับระยะแก๊ปในช่วง $400-1000\ \mu\text{m}$ พบว่าแรงดันเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นตามระยะแก๊ปที่เพิ่มขึ้นและที่ระยะแก๊ปเดียวกันแรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงมีค่าต่ำที่สุดตามด้วยแรงดันกระแสสลับ , แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์มีค่าสูงที่สุด โดยที่แรงดันเบรกดาวน์ชั่ววอกมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาวน์ชั่ววอกทุกกรณี

1.4 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม , ระยะแก๊ปและอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงในช่วง $30-80^\circ\text{C}$ ที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้แรงดันกระแสตรงทั้งชั่ววอกและชั่ววอก , แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ($250/2500\ \mu\text{s}$) ทั้งชั่ววอกและชั่ววอก

1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นลักษณะเชิงทดลองเพื่อหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงโดยการควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลองให้มีขนาดอนุภาคเจือปนของแข็งเล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ และปริมาณความชื้นประมาณ 30 ppm โดยชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ เพื่อศึกษาผลกระทบของการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงในช่วง $30-80^{\circ}\text{C}$ ในการศึกษาผลกระทบของการกระจายสนามไฟฟ้าจะศึกษาผ่านขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมและระยะแกป โดยการทดสอบภายใต้แรงดันกระแสตรงทั้งชั่วบวกและชั่วลบ , แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ($250/2500 \mu\text{s}$) ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง
- 2) ออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ($250/2500 \mu\text{s}$)
- 3) ออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น
- 4) ออกแบบและประกอบสร้างชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า
- 5) ทำการทดลองหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทั้งชั่วบวกและชั่วลบของน้ำมันหม้อแปลงที่สภาวะต่างๆ
- 6) ทำการทดลองหาความคงทนต่อแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ($250/2500 \mu\text{s}$) ทั้งชั่วบวกและชั่วลบของน้ำมันหม้อแปลงที่สภาวะต่างๆ
- 7) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองพร้อมทั้งเขียนรายงานวิทยานิพนธ์

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ทำให้ทราบถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทั้งชั่วบวกและชั่วลบ , แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ($250/2500 \mu\text{s}$) ทั้งชั่วบวกและชั่วลบของน้ำมันหม้อแปลงที่แปรตามขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม , ระยะแกปและอุณหภูมิในช่วง $30-80^{\circ}\text{C}$ พร้อมข้อมูลเบื้องต้นที่ควบคุมอย่างสมบูรณ์ได้แก่ ขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง
- 2) ใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่นำน้ำมันหม้อแปลงไปเป็นฉนวนและตัวระบายความร้อน
- 3) สามารถเปรียบเทียบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่แรงดันทดสอบชนิดต่างๆและทราบถึงผลของชั่วแรงดันด้วย

บทที่ 2 ฉนวนเหลว

บทนี้กล่าวถึง ชนิดของฉนวนเหลว , คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง , พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและอธิบายกลไกการเบรกดาวนในฉนวนเหลวบริสุทธิ์และฉนวนเหลวเชิงการค้าทำให้มีความเข้าใจฉนวนเหลวที่นำมาใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ดี

ของเหลวใดๆสามารถนำมาใช้เป็นฉนวนได้เสมอ ถ้าหากว่าของเหลวนั้นมีค่าความต้านทานสูงมากพอและไม่เปลี่ยนแปลงสภาพทางฟิสิกส์ , เคมี และไฟฟ้าในช่วงเวลาที่นานพอสมควร โดยฉนวนเหลวมีคุณสมบัติหลายอย่างที่เป็นประโยชน์ในการเป็นฉนวนมากกว่าฉนวนแข็งและฉนวนก๊าซ เพราะฉนวนเหลวคล้ายกับฉนวนแข็งที่มีความหนาแน่นมากกว่าฉนวนก๊าซประมาณ 1,000 เท่า ทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า และฉนวนเหลวยังคล้ายกับฉนวนก๊าซโดยสามารถเข้าไปแทนที่ในช่องว่างในการทำฉนวนได้ดีแต่คุณสมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนของฉนวนเหลวมีความสามารถมากกว่าฉนวนก๊าซ (อากาศ , ไนโตรเจน) ประมาณ 10 เท่าเมื่อใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า ถึงแม้ฉนวนเหลวบริสุทธิ์จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงมากถึง 10 MV/cm แต่ในฉนวนเหลวเชิงการค้าที่ใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจริงมีค่าประมาณ 100 kV/cm เท่านั้น

ฉนวนเหลวนำมาใช้เป็นฉนวนซีมีซาบในเคเบิลแรงสูงและคาปาซิเตอร์ และยังเป็นฉนวนกันด้านแรงดันสูงกับกราวด์ในหม้อแปลงไฟฟ้า , เซอร์คิตเบรกเกอร์ ฯลฯ นอกจากนี้ยังเป็นตัวระบายความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า และดับอาร์กในเซอร์คิตเบรกเกอร์อีกด้วย ฉนวนเหลวโดยทั่วไปมีส่วนผสมของสารไฮโดรคาร์บอนและมีส่วนเจือปนด้วย ฉนวนเหลวที่ดีที่นำมาใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องปราศจากสารเจือปนต่างๆให้ได้มากที่สุด ซึ่งขึ้นกับกระบวนการกลั่นและแยกสิ่งเจือปนออกจากฉนวนเหลวรวมทั้งการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งานด้วย โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามากเช่น ความชื้น ซึ่งความชื้นแค่ 0.01% ในน้ำมันหม้อแปลงสามารถลดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 20% [13]

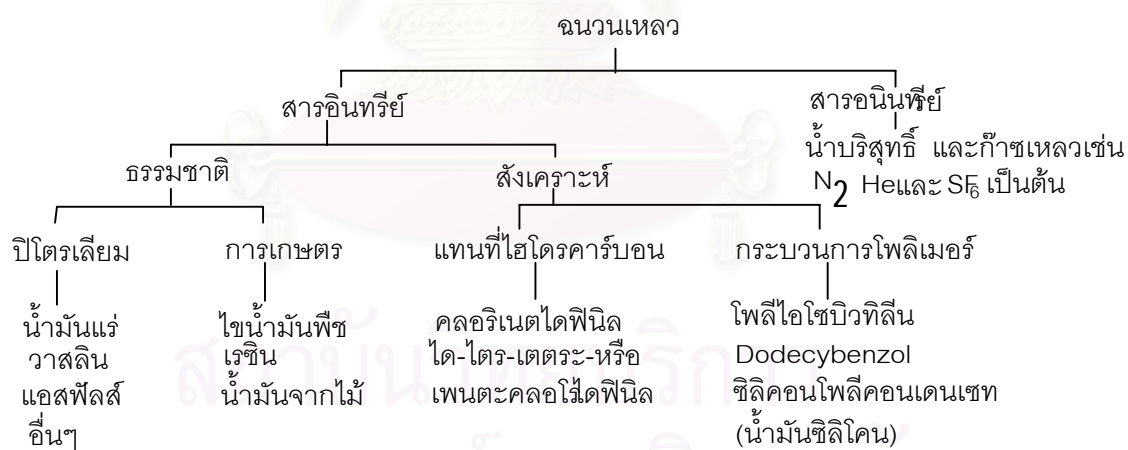
2.1 ชนิดของฉนวนเหลว

ปัจจุบันได้มีการผลิตฉนวนเหลวหลายชนิดทั้งที่ได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมและการสังเคราะห์ทางเคมี กระบวนการดังกล่าวทำให้โครงสร้างทางเคมีของฉนวนเหลวที่ได้มีความแตกต่างกัน สามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆได้ 2 ประเภทคือ สารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์ สารอินทรีย์มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ตัวอย่างฉนวนเหลวประเภทสารอินทรีย์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม , น้ำมันแร่ (mineral oils) หรือน้ำมันหม้อแปลง , แอลฟิลล์ , น้ำมันพืช , ไขมันและเรซินธรรมชาติ เป็นต้น [1]

ฉนวนเหลวประเภทสารอินทรีย์นอกจากจะได้จากธรรมชาติแล้วยังผลิตได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี เช่น จากกระบวนการแทนที่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในสถานะของเหลวและก๊าซ เช่น คลอรีเนตไดฟีนิล (chlorinated diphenyles) หรือเรียกว่าแอสเคอร์เวล(askerels) ปัจจุบันเลิกใช้เนื่องจากเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและเกิดสารที่เป็นพิษ และจากกระบวนการทำให้เกิดโครงสร้างโพลิเมอร์ เช่น โพลีไอโซบิวทิลีน (polyisobutylene) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนที่ดีกว่าน้ำมันหม้อแปลง จึงมีการนำไปใช้ในเคเบิลแรงสูงและคาปาซิเตอร์ และซิลิคอนโพลีคอนเดนเซทหรือน้ำมันซิลิโคนซึ่งมีเสถียรภาพสูงและติดไฟที่อุณหภูมิสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงแต่ราคาแพงกว่ามาก จึงนำน้ำมันซิลิโคนมาเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้งานภายในอาคารซึ่งกำหนดคุณสมบัติด้านความปลอดภัยไว้ (การติดไฟ) หรือ นำมาแทนน้ำมันหม้อแปลงเพราะในน้ำมันหม้อแปลงบางชนิดจะมีสาร PCB (polychlorinated biphenyls) ซึ่งเป็นพิษต่อสุขภาพ ทั้งนี้การใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงภายนอกอาคารส่วนใหญ่ยังคงใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนมากกว่า 80%

ส่วนฉนวนเหลวประเภทสารอนินทรีย์ เช่น น้ำบริสุทธิ์, ไนโตรเจนเหลว, อาร์กอนเหลว และออกซิเจนเหลว เป็นต้น น้ำบริสุทธิ์มีราคาถูกและผลิตได้ง่ายนำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริกได้ดี นำมาใช้ในพัลส์คาปาซิเตอร์แรงสูง, พัลส์มอดดูเรชั่น เป็นต้น ส่วนก๊าซเหลวนิยมใช้ในด้านโครโมกราฟี [1]

จากรายละเอียดข้างต้น สามารถสรุปประเภทฉนวนเหลวดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ชนิดของฉนวนเหลว [1]

2.2 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด สามารถจำแนกตามโครงสร้างโมเลกุลได้ 3 ประเภทคือ พาราฟินิก (paraffinic), แนฟทีนิก (naphthenic) และ อโรมาติก (aromatic) โดยพาราฟินิกและแนฟทีนิกเป็นประเภทที่มีเสถียรภาพเนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ส่วนอโรมาติกไม่มีเสถียรภาพเนื่องจาก

เป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว แต่จะประเภทยังประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีขนาดและความซับซ้อนของโครงสร้างต่างกัน ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กและมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนจะอยู่สถานะก๊าซที่อุณหภูมิห้อง ส่วนไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูงมากและมีโครงสร้างสลับซับซ้อนระเหยยาก และมีความหนืดสูงจะมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น ชี๊ฟิ่งพาราฟิน (parafin wax) , แอสฟัลท์ (asphaltic bitumen) เป็นต้น [14]

โดยทั่วไปในน้ำมันดิบจะมีองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ด้วยต้องกำจัดออกในกระบวนการกลั่นและในการใช้งานจริงจะพยายามให้อัตราส่วนของอโรมาติกน้อยที่สุดเพราะเป็นสาเหตุสำคัญของกาเสียหายทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยส่วนใหญ่นิยมให้มีอัตราส่วนแนฟทีนิกมากเพราะจะไม่เกิดซีฟี่ ซึ่งซีฟี่มีผลทำให้น้ำมันหม้อแปลงมีความหนืดสูงขึ้นที่อุณหภูมิต่ำทำให้มีปัญหาด้านการระบายความร้อน ส่วนพาราฟีนิกจะมีส่วนประกอบของซีฟี่จำนวนมาก [15] ทั้งนี้โครงสร้างโมเลกุลและสัดส่วนขององค์ประกอบของน้ำมันหม้อแปลงโดยทั่วไปสามารถแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลและสัดส่วนขององค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง [1]

พาราฟีนิก	แนฟทีนิก	อโรมาติก
<p>แบบลูกโซ่</p> $\text{--CH}_2\text{--CH}_2\text{--CH}_2\text{--CH}_2\text{--CH}_2\text{--}$ <p>หรือ</p> <p>แบบกิ่ง</p> $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ \\ \text{--CH}_2\text{--CH--CH}_2\text{--CH--CH}_2\text{--} \\ \qquad \qquad \\ \text{CH--} \qquad \qquad \text{CH} \\ \qquad \qquad \qquad \\ \text{CH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \\ \qquad \quad \\ \text{CH}_2 \quad \text{---} \text{C}_6 \text{---} \text{CH}_2 \\ \qquad \quad \\ \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \end{array}$ <p>หรือ</p> $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \\ \qquad \quad \\ \text{CH}_2 \quad \text{---} \text{C}_5 \text{---} \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH} \quad \text{CH} \\ \qquad \\ \text{CH} \quad \text{---} \text{C}_6 \text{---} \text{CH} \\ \qquad \\ \text{CH} \quad \text{CH} \end{array}$ <p>หรือ</p> $\begin{array}{c} \text{CH} \quad \text{CH} \quad \text{C} \quad \text{CH} \\ \qquad \qquad \qquad \\ \text{CH} \quad \text{---} \text{C}_{10} \text{---} \text{CH} \\ \qquad \qquad \qquad \\ \text{CH} \quad \text{C} \quad \text{CH} \end{array}$
40-60%	30-50%	5-20%

นอกจากนี้เมื่อองค์ประกอบดังกล่าวแล้ว ในน้ำมันหม้อแปลงยังมีการใส่สารเติมแต่ง (additive) เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง โดยเฉพาะสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน (oxidation inhibitor) ช่วยให้น้ำมันหม้อแปลงเกิดออกซิเดชันยากขึ้นจึงมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

ลักษณะสมบัติที่ต้องการของน้ำมันหม้อแปลงสำหรับการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ , เคมีและไฟฟ้า ซึ่งต้องทำให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน คุณสมบัติดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ , เคมีและไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง [15]

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	คุณสมบัติทางเคมี	คุณสมบัติทางไฟฟ้า
การระบายความร้อน - ความหนาแน่น - ความหนืด - สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (coefficient of thermal expansion) - ความนำไฟฟ้าเนื่องจากความร้อน (thermal conductivity) - ความถ่วงความร้อนจำเพาะ (specific heat) การเก็บรักษาและปฏิบัติงาน - จุดติดไฟ - จุดวาบไฟ - ความดันไอ - อุณหภูมิติดไฟทันที (auto ignition temperature)	องค์ประกอบทางเคมี - โครงสร้างโมเลกุล - อัตราส่วนปริมาณของพาราฟินิก , แนฟทีนิก และอโรมาติก - ค่าความเป็นกลาง - แรงตึงผิว (interfacial tension)	- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า - ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก - ค่าเปอร์มิติวิตีสัมพัทธ์ - ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า - ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ - การดิสชาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ในการศึกษาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์ด้วยการป้อนแรงดันกระแสตรงทั้งชั่ววอกและชั่วลบ , แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ ครั้งนี้จะใช้น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ จึงเลือกใช้น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าของบริษัทเจริญชัยหม้อแปลงจำกัด ซึ่งคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ได้ตามมาตรฐานต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.3

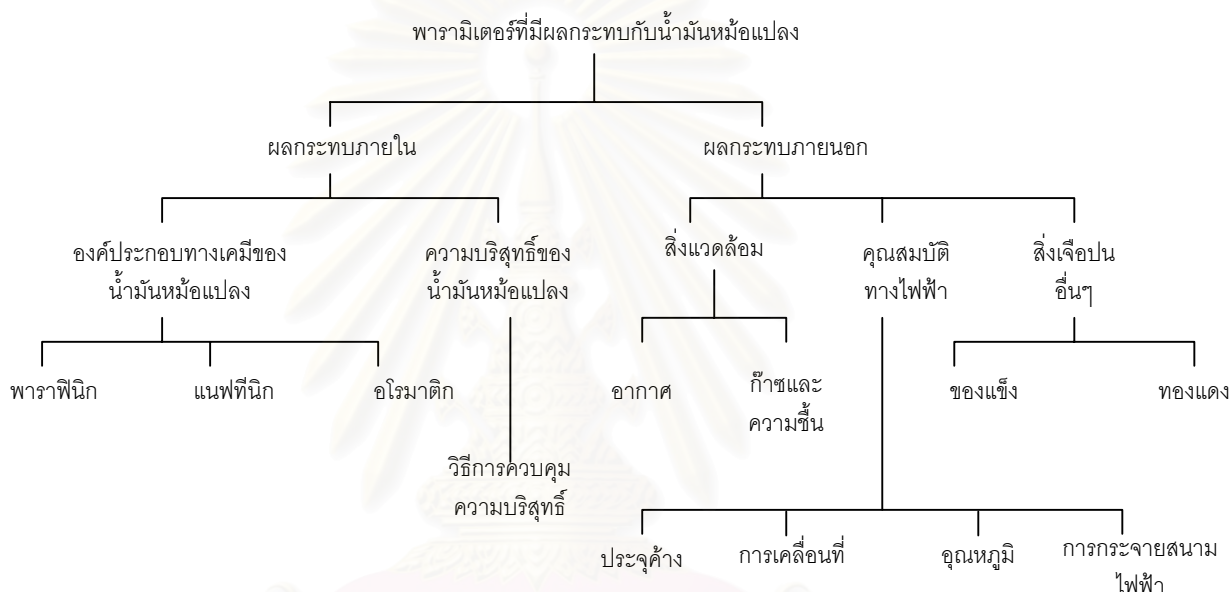
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติ	ตามมาตรฐาน ต่างๆ	ปริมาณที่ กำหนด	ปริมาณที่วัด ได้
ลักษณะที่มองเห็น	IEC 296:1969	---	ดี
สี (ASTM Color)	ASTM D 1500	≤ 0.5	L 0.5
ความหนาแน่น ที่ 20 °C kg/dm ³	ASTM D 1298	≤ 0.895	0.8682
จุดติดไฟ °C	ASTM D 92	≥ 140	148
จุดเยือกแข็ง °C	ASTM D 97	≤ -30	-30.0
ความหนืด ที่ 40°C mm ² /s	ASTM D 445	≤ 16.5	7.960
ความหนืด ที่ -15°C mm ² /s	ASTM D 445	≤ 800	104.7
ความตึงพื้นผิว ที่ 25°C N/m	ASTM D 971	$\geq 40 \times 10^{-3}$	48.7×10^{-3}
ค่าความเป็นกลาง mgKOH/g	ASTM D 974	≤ 0.03	< 0.01
ค่ากำมะถันกัดกร่อน (Corrosive Sulpher)	ASTM D 1275	ไม่กัดกร่อน	ไม่กัดกร่อน
ความชื้น ppm (mg/kg)	ASTM D 1533	≤ 40	9
ความมีเสถียรภาพต่อการเกิด ออกซิเดชัน (Oxidation Stability) - เลนน้ำมัน (sludge) % - ค่าความเป็นกลาง mgKOH/g	ASTM D 2440	≤ 0.10 ≤ 0.40	0.04 0.09
ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า -ไม่ผ่านการกำจัดอนุภาคเจือปน และปริมาณความชื้น kV -หลังผ่านการกำจัดอนุภาคเจือปน และปริมาณความชื้น kV	IEC 156:1969	≥ 30 kV ≥ 50 kV	72 75
ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ที่ 90°C	IEC 247:1969	≤ 0.005	0.00008
ค่าความต้านทาน ที่ 50°C ohm-cm	ASTM D 1169	$\geq 1 \times 10^{14}$	3×10^{15}

2.3 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

น้ำมันหม้อแปลงถูกนำไปใช้เป็นฉนวนและตัวระบายความร้อนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยน้ำมันหม้อแปลงต้องมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ , เคมีและไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยคุณ

สมบัติที่สำคัญของน้ำมันหม้อแปลงที่พิจารณาคือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและการระบายความร้อน โดยมีพารามิเตอร์หลายชนิดที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้แก่ชนิดและรูปร่างอิเล็กทรอนิกส์ , ระยะเวลา , อัตราการไหลของฉนวนเหลว , ความดัน , อุณหภูมิ อีกทั้งสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่เช่นฟองก๊าซ , อนุภาคเจือปนของแข็งและความชื้น เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติด้านการระบายความร้อนมีพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบได้แก่ ความหนาแน่น , ความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อน้ำมันหม้อแปลง

2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลง

องค์ประกอบทางเคมีมีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าอย่างยิ่ง โดยโครงสร้างโมเลกุลขององค์ประกอบทางเคมีมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสตริมเมอร์ซึ่งนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ เช่น ปริมาณของโครงสร้างอโรมาติกซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัวในน้ำมันหม้อแปลงมีผลต่อความสามารถในการละลายของก๊าซและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า นอกจากนั้นการเกิดออกซิเดชันก็มีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไปและกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วย แม้แต่การใส่สารเติมแต่งเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงยังส่งผลถึงคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง เช่น การมีสารประกอบโพลีอโรมาติก (polyaromatic) ที่มีความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยมีผลให้ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมันหม้อแปลงที่มีส่วนผสมของแนฟทีนิกมากมีค่าลดลงอย่างมาก [5,16]

2.3.2 ความชื้น

ความชื้นสามารถแทรกตัวอยู่ในฉนวนเหลวได้ 3 ลักษณะคือ [14]

- 1) dissolved water คือโมเลกุลของน้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของฉนวนเหลว
- 2) condensed water คือโมเลกุลของน้ำที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ในฉนวนเหลว
- 3) bound water คือโมเลกุลของน้ำที่ยึดเหนี่ยวอยู่กับโมเลกุลของฉนวนเหลว

ความชื้นมักจะละลายในฉนวนเหลวโดยอยู่ในรูปของ dissolved water จนถึงสภาวะอิ่มตัว ซึ่งเป็นสภาวะที่มีปริมาณความชื้นมากที่สุดที่สามารถอยู่ในรูปของ dissolved water ได้และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง ปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงที่เกินจากสภาวะอิ่มตัวจะอยู่ในรูปของ condensed water ส่วน bound water เกิดจากการกลั่นที่ไม่ดีพอหรือการเกิดปฏิกิริยาเมื่อน้ำมันหม้อแปลงมีการเสื่อมสภาพ ในน้ำมันหม้อแปลงสามารถคำนวณหาความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้นได้จากความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังสมการที่ 2.1 [3]

$$\log W = 7.0895 - \frac{1567}{T} \quad (2.1)$$

โดยที่

W = ความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้น (ppm)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (°K)

จากสมการที่ 2.1 สามารถคำนวณหาความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้นในอุณหภูมิ 30°C ได้เท่ากับ 82.77 ppm

ความชื้นที่เจือปนอยู่ในฉนวนเหลวจะทำให้ฉนวนเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฉนวนเหลวเกิดการเสื่อมสภาพ ถ้าเป็นหยดน้ำที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง หยดน้ำจะยึดออกตามแนวสนามไฟฟ้าทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เมื่อถึงค่าวิกฤติจะเกิดเบรกดาวน์ โดยแนวการเบรกดาวน์จะเริ่มที่ปลายของหยดน้ำไปสู่เล็กโตรด นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแยกน้ำออกเป็นก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ในรูปของฟองก๊าซทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและอาจทำให้เกิดเบรกดาวน์ตามมา

วิธีการป้องกันความชื้นไม่ให้เจือปนในฉนวนเหลวที่ดีที่สุดคือไม่ให้อากาศสัมผัสกับอากาศภายนอกด้วยการบรรจุในภาชนะที่ปิดมิดชิดแต่ต้องมีวิธีแก้ปัญหาคายตัวของฉนวนเหลวเมื่อได้รับความร้อนหรือให้สัมผัสกับอากาศโดยผ่านสารดูดความชื้น เช่นซิลิกาเจล (silicagel) ก็สามารถลดปริมาณความชื้นจากภายนอกได้

2.3.3 ก๊าซ [14]

ภายในน้ำมันหม้อแปลงอาจมีก๊าซปะปนอยู่ แต่ก๊าซจะถูกขจัดออกไปจากน้ำมันหม้อแปลงก่อนการเติมลงในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง แต่เนื่องจากสภาพใช้งานจริง เช่น การสัมผัสกับอากาศของกระดาดและน้ำมันหม้อแปลงจะมีการเสื่อมสภาพขึ้น (aging) หรือมีการลัดวงจรภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทำให้มีก๊าซเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงได้อีก ฟองก๊าซที่เข้าไปอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

อาจทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่เป็นสาเหตุของการทำให้ฉนวนเสื่อมคุณภาพและเกิดการเบรกดาวนนิ่งที่สุด

ก๊าซสามารถละลายอยู่ในฉนวนเหลวได้ โดยความสามารถในการละลายเป็นไปตามกฎของเฮนรี(Henry's law) ที่กล่าวว่า ความสามารถในการละลาย (saturation solubility, K_a) ของก๊าซใดๆ ที่อยู่เหนือฉนวนเหลวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันบางส่วนของก๊าซนั้น ดังสมการที่ 2.2

$$P_a = A_a K_a \quad (2.2)$$

โดยที่ A_a =ค่าคงที่การละลายของก๊าซ a ($\mu\text{atm.}/(\mu\text{l}/\text{l})$)

P_a =ความดันบางส่วนของก๊าซ a (atm)

K_a =ความสามารถในการละลาย(% Vol)

ในสภาวะสมดุลการละลาย ผลรวมของความดันบางส่วนของก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำมันทั้งหมด ($P_a + P_b + P_c + \dots$) จะเท่ากับผลรวมของความดันบางส่วนของก๊าซเหนือน้ำมัน ตารางที่ 2.4 และ 2.5 แสดงถึงค่าคงที่การละลาย (A) และความสามารถในการละลาย (K) ของก๊าซแต่ละชนิดที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลง ณ อุณหภูมิ 0-100°C ความดันบางส่วนของก๊าซเท่ากับ 760 mmHg และพบว่าก๊าซจะละลายได้มากขึ้นหรือน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่การละลายของก๊าซ (A) ตามกฎของเฮนรี($\mu\text{atm.}/(\mu\text{l}/\text{l})$) ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg

อุณหภูมิ(°C)	0	20	40	60	80	100
อากาศ	-	9.9	9.7	9.5	9.3	9.1
N ₂ ,ไนโตรเจน	13.0	11.6	11.4	11.1	10.3	10.3
O ₂ ,ออกซิเจน	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8
H ₂ ,ไฮโดรเจน	24.6	20.4	17.5	15.4	13.8	-
CO,คาร์บอนมอนอกไซด์	8.9	8.3	7.9	7.6	7.3	-
CO ₂ ,คาร์บอนไดออกไซด์	0.72	0.89	1.07	1.23	1.5	-

ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการละลายของก๊าซ(K,%Vol)ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg

อุณหภูมิ(°C)	0	20	40	60	80	100
อากาศ	-	10.1	10.3	10.5	10.8	10.9
N ₂ ,ไนโตรเจน	7.7	8.6	8.8	9.0	9.7	9.7
O ₂ ,ออกซิเจน	15.6	16.1	16.4	16.7	16.9	17.2
H ₂ ,ไฮโดรเจน	4.1	4.9	5.7	6.5	7.2	-
CO,คาร์บอนมอนอกไซด์	11.2	12.0	12.7	13.2	13.7	-
CO ₂ ,คาร์บอนไดออกไซด์	138.8	112.3	93.5	81.3	66.7	-

2.3.4 ประจุค้ำง

ประจุค้ำงเกิดจากการดิสชาร์จบางส่วนในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงหรือเกิดหลังจากมีการเบรกดาวนขึ้น ประจุค้ำงมีผลทำให้ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีผลกระทบจากแรงดันที่มีขั้วทางไฟฟ้า (เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง , แรงดันเกินอิมพัลส์) มากกว่าแรงดันที่ไม่มีขั้วทางไฟฟ้า [18] (เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ) นอกจากนี้ประจุค้ำงยังเกิดจากปรากฏการณ์ streaming electrification ที่น้ำมันหม้อแปลงเคลื่อนที่และเสียดสีกับฉนวนแข็ง เช่น กระดาษ , แผ่นไม้อัด เป็นต้น และทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างฉนวนแข็งกับน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการสะสมประจุที่ผิวฉนวนแข็งกับน้ำมันหม้อแปลงที่มีประจุตรงข้ามกัน ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและดิสชาร์จตามผิวซึ่งนำไปสู่การเบรกดาวนได้ [6]

2.3.5 การเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ , การทำงานของปั๊มหรือพัดลมในการระบายความร้อนและจากปรากฏการณ์ EHD (electrohydrodynamic) ทำให้เกิดฟองก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง , เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเจือปนและเกิดประจุอิสระเนื่องจากการเสียดสีระหว่างฉนวนเหลวกับฉนวนแข็งที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ streaming electrification [5,17] ซึ่งกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วย

2.3.6 อุณหภูมิ

คุณสมบัติของพารามิเตอร์หลายตัวที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เช่น ความหนืด , ความตึงผิวและความหนาแน่น ทำให้กระบวนการเกิดฟองก๊าซและลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย เช่นเดียวกับปริมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและมีผลกระทบโดยตรงต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า การทดลองลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันที่ได้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้น โดยทั่วไปจะมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 20-100 ppm เนื่องจากต้องพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของความชื้นกับน้ำมันหม้อแปลงด้วย [5] ในการศึกษาเราจึงควบคุมปริมาณความชื้นให้ใกล้เคียงกันในการทดลองแต่ละครั้ง และการทดลองผลกระทบของอุณหภูมิจะรอให้อุณหภูมินิ่งก่อนจะเริ่มทำการทดลอง

2.3.7 การกระจายสนามไฟฟ้า

ลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงคล้ายกับก๊าซกล่าวคืออิเล็กโตรดที่มีการกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าอิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะต่ำที่สุด โดยกลไกการเบรกดาวนของอิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวนโดยตรง ส่วนการเบรกดาวนของอิเล็กโตรดที่มีการ

กระจายของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมีการเกิดดิซชาร์จบางส่วนก่อนที่จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนั้ ดังนั้นการออกแบบฉนวนควรออกแบบให้มีการกระจายสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอเท่าๆกันในทุกจุดเพื่อให้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดที่ระยะแถบเดียวกัน

2.3.8 ชนิดของรูปคลื่นแรงดัน [19]

แรงดันเบรกดาวนั้ของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับชนิดของรูปคลื่นแรงดันที่ป้อน , วิธีการป้อนและช่วงเวลาการป้อน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงมีอยู่ ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นเรื่องสำคัญมาก วิธีการตรวจสอบคุณภาพการฉนวนที่ดีที่สุดคือการทดสอบจริง โดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าคงตัว (แรงดันกระแสตรงและแรงดันกระแสสลับ) ของฉนวนเหลวจะมีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

2.3.9 อนุภาคเจือปนของแข็ง

อนุภาคของแข็งอาจเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงในรูปของไฟเบอร์หรือฝุ่นละอองซึ่งเกิดมาจากกระบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรมหรือจากภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ไฟเบอร์ที่เป็นเยื่อของกระดาษฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า , เศษทองแดงหรือเศษเหล็กซิลิคอนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจากกระบวนการผลิต , อนุภาคคาร์บอนที่เกิดจากการทำงานของตัวเปลี่ยนจุดแยก (tap changer)หรือการดิซชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าหรือการดับอาร์กในเซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นต้น ซึ่งอนุภาคเจือปนของแข็งในน้ำมันหม้อแปลงนี้ไปสู่กลไกการเกิดเบรกดาวนั้ได้ ดังแสดงในหัวข้อ 2.4.2.1

2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนั้ในฉนวนเหลว

ถ้าพิจารณาจากโครงสร้างและองค์ประกอบของฉนวนเหลวอาจแยกออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์กับฉนวนเหลวเชิงการค้า ฉนวนเหลวบริสุทธิ์หมายถึงฉนวนเหลวที่มีองค์ประกอบทางเคมีง่าย ๆ ปราศจากสิ่งเจือปนหรือมีแต่น้อยกว่าค่าที่ยอมให้มี ตัวอย่างฉนวนเหลวที่มีโครงสร้างทางเคมีง่าย ๆ เช่น เฮกซะเซน (n-hexane) , เฮปทาเซน (n-heptane)และพาราฟินไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ[19] ส่วนฉนวนเหลวเชิงการค้าหมายถึงฉนวนเหลวที่มีองค์ประกอบทางเคมีไม่บริสุทธิ์ มีโครงสร้างหรือส่วนผสมของโมเลกุลยุ่งยากซับซ้อนและมีสิ่งเจือปนผสมอยู่ด้วย เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ร้อยเปอร์เซ็นต์หรือถ้าทำได้ก็มีราคาแพงมาก ซึ่งฉนวนเหลวที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติส่วนใหญ่มักเป็นฉนวนเหลวเชิงการค้า จากหัวข้อ 2.3 เนื่องจากมีพารามิเตอร์หลายตัวที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลว จึงไม่สามารถอธิบายกลไกการเกิดเบรกดาวนั้และคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนั้ได้อย่างถูกต้องโดยใช้ทฤษฎีเพียงทฤษฎีเดียวดังเช่นกรณีการเกิดเบรกดาวนั้ในฉนวนก๊าซ [10] โดยทั่วไปกลไกการเกิดเบรก

ดาวนีในฉนวนเหลวสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ กลไกการเกิดเบรกดาวนซ์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์และกลไกการเกิดเบรกดาวนซ์ของฉนวนเหลวเชิงการค้ำ สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.4.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนซ์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์

กลไกการเกิดเบรกดาวนซ์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์มีหลักการแบบเดียวกับกรณีของฉนวนก๊าซคือเกิดจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ซึ่งเกิดจากการชนกันของอนุภาคและของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนเริ่มแรกมาจากแคโทดตามกลไกของสนามไฟฟ้า (field emission) หรือโดยความร้อน (thermionic emission) ซึ่งอธิบายอย่างละเอียดได้ดังนี้ [14]

จากการศึกษาการนำไฟฟ้าในฉนวนเหลว เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูง พบว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดโดยสนามไฟฟ้า (field emission) และการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดด้วยความร้อน (field enhanced thermionic emission) สามารถคำนวณขนาดกระแสได้ด้วยสมการชอตต์กี (Schottky) และเป็นที่น่าสังเกตว่าขนาดกระแสขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ

การศึกษาการเบรกดาวนซ์ในฉนวนเหลว โดยทำการทดลองแปรค่าอุณหภูมิในช่วงกว้าง พบว่าแรงดันเบรกดาวนซ์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย แตกต่างจากการนำไฟฟ้า จึงมีความเป็นไปได้ว่ากระบวนการแคโทดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดโดยสนามไฟฟ้ามากกว่าที่จะเป็นการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดด้วยความร้อน การเกิดเบรกดาวนซ์จึงน่าจะเกิดจากการที่ไอออนบวกและประจุบวกของอนุภาคเจือปนเคลื่อนที่มาสู่แคโทด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในบริเวณใกล้ผิวแคโทดเพิ่มสูงขึ้นเพียงพอที่อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวแคโทดได้ อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาเหล่านี้จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด ทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางไปสู่ขั้ววาโนด ระหว่างทางจะชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลวทำให้พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าสูญเสียไปกับการชน ในกระบวนการนี้จะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่สูญเสียพลังงานไปกับการชนต่ำกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและก่ออวาลานซ์ได้ จนมีโอกาสทำให้เกิดเบรกดาวนซ์ [20]

สภาวะที่อิเล็กตรอนสามารถก่ออวาลานซ์เป็นไปตามความสัมพันธ์ที่ว่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่ได้รับในระยะอิสระ (mean free path) จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลฉนวนเหลว

$$eE\lambda \geq chv$$

โดยที่

E = สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด

λ = ระยะอิสระของอิเล็กตรอน

$h\nu$ = ควอนตัมของพลังงานที่สูญเสียในการไอออไนซ์โมเลกุล

c = ค่าคงตัว (arbitrary constant)

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่คำนวณโดยใช้ทฤษฎีนี้มีแนวโน้มเดียวกับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน แต่สำหรับการคำนวณเวลาล่าช้าในการรวมตัว (formative time lag) ยังมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองอยู่มาก

2.4.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้ำ

โดยทั่วไปฉนวนเหลวเชิงการค้ำที่นำมาใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงไม่สามารถที่จะทำให้มีความบริสุทธิ์สูงได้เหมือนฉนวนเหลวบริสุทธิ์ กลไกการเกิดเบรกดาวนจึงขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลว ตัวอย่างเช่น ความชื้น, เศษโลหะ, ปริมาณก๊าซ และไฟเบอร์ เป็นต้น สามารถจำแนกกลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้ำได้ดังนี้

2.4.2.1. กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง (suspended particles)

2.4.2.2. กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากฟองก๊าซ

2.4.2.3. กลไกการเกิดเบรกดาวนจากหยดของเหลวเจือปน

2.4.2.4. กลไกการเกิดเบรกดาวนจากความร้อน

2.4.2.5. กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง (stressed oil volume)

2.4.2.6. กลไกการเกิดเบรกดาวนจากปรากฏการณ์ EHD (electrohydrodynamic)

2.4.2.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง [20]

สิ่งเจือปนของแข็งที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลว อาจเป็นอนุภาคตัวนำ, ไฟเบอร์หรือฝุ่นละออง เมื่อมีสนามไฟฟ้าอนุภาคเจือปนเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วภายใต้สนามไฟฟ้าทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาค ถ้าอนุภาคเจือปนของแข็งเป็นทรงกลมขนาดรัศมี r และมีค่าเพอมีตติวิตี ϵ_2 ปะปนอยู่ในฉนวนเหลวที่มีค่าเพอมีตติวิตี ϵ_1 ขนาดของแรงมีค่าตามสมการที่ 2.3

$$F_e = r^3 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} E \nabla E \quad (2.3)$$

โดยที่

r = รัศมีของอนุภาคเจือปน

ϵ_1 = เพอมีตติวิตีฉนวนเหลว

ϵ_2 = เพอมีตติวิตีของอนุภาค

E = ความเครียดสนามไฟฟ้าเมื่อละเลยผลของอนุภาคเจือปน

ถ้า $\epsilon_2 > \epsilon_1$ โดยทั่วไปจะเป็นเช่นนี้ แรงจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่า ผลนี้จะเห็นชัดเจนมากในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ส่วนกรณีของ $\epsilon_2 < \epsilon_1$ แรงจะกระทำในทิศตรงข้ามคือเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ และแรงที่กระทำบนอนุภาคจะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า ϵ_2 ดังนั้นกรณีที่อนุภาคมีค่า $\epsilon_2 \gg \epsilon_1$ แรงสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ 2.4 โดยผลของแรงที่เกิดขึ้นจะทำให้อนุภาคเจือปนของแข็งเรียงตัวกันเป็นลูกโซ่เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรดทำให้เกิดเบรกดาวนได้

$$F_e = F_\infty = r^3 E \nabla E \quad (2.4)$$

ในกรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เช่น อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ หรือ ทรงกลม-ทรงกลม ที่แกปแคบค่า ∇E จะเท่ากับศูนย์ ทำให้แรงกระทำต่ออนุภาคเจ็อบนเป็นศูนย์ด้วย อย่างไรก็ตามถ้า $\epsilon_2 > \epsilon_1$ จะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าสูงขึ้นที่บริเวณผิวของอนุภาคเหล่านั้น และทำให้เกิดการเคลื่อนที่และเรียงต่อกันของอนุภาค เกิดเป็นสายโซ่เรียงตามแนวของสนามไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายโซ่อนุภาคทั้งสองข้างจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุนำมาสู่การเกิดเบรกดาวน ดังนั้นความหนาแน่นของอนุภาคเจ็อบนจึงมีผลต่อการเกิดเบรกดาวน

2.4.2.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากฟองก๊าซ

โดยทั่วไปก๊าซสามารถละลายในฉนวนเหลวได้ในปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาวะความดันและอุณหภูมิขณะนั้น เนื่องจากก๊าซที่ละลายได้จะมีปริมาณไม่เกินสภาวะอิ่มตัวดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.3.3 ฟองก๊าซจึงไม่เกิดจากการละลายของก๊าซ ซึ่งเกิดจากสาเหตุต่อไปนี้ [13]

- 1) ฉนวนมีคุณภาพต่ำหรือเสื่อมคุณภาพ
- 2) ก๊าซจับอยู่ที่ผิวอิเล็กโตรดที่ขรุขระหรือร่องผิวอิเล็กโตรดเก็บฟองก๊าซไว้ขณะเติมฉนวน
- 3) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในฉนวนเหลวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, ความดัน และการชนของไอออนและอิเล็กตรอนทำให้ฉนวนเหลวสลายตัวให้ก๊าซ
- 4) การกลายเป็นไอของฉนวนเหลว จากผลของดิสชาร์จบางส่วนบริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากสาเหตุที่กล่าวมา เมื่อมีฟองก๊าซเกิดขึ้นก็จะขยายตัวยึดตามแนวสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า สมมุติว่าปริมาตรของฟองก๊าซคงตัวในขณะที่ยึดออก การเบรกดาวนจะเกิดเมื่อแรงดันตกคร่อมความยาวของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้นโค้งพาสเชน (Paschen's curve) ของฟองก๊าซนั้น [19] ถ้ามีฟองก๊าซรูปร่างเป็นทรงกลมสามารถคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฟองก๊าซได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.5

$$E_b = \frac{3E}{\epsilon_1 + 1} \quad (2.5)$$

โดยที่

E = ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลว (kV/cm)

E_b = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฟองก๊าซ (kV/cm)

ϵ_1 = เพอมีตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว

เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของก๊าซนั้นจะเกิดดิสชาร์จผ่านฟองก๊าซเป็นผลให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลวนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนได้

นอกจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น ฟองก๊าซยังสามารถเกิดที่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเช่น ปลายแหลมของอิเล็กโตรด เป็นต้น เนื่องจากบริเวณนั้นจะมีความร้อนสูง ทำให้ฉนวน

เหลวกลายเป็นไอ ณ จุดนั้นจนเกิดดิซซาร์จผ่านฟองไอทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนั้ได้เช่นกัน

2.4.2.3 กลไกการเกิดเบรกดาวนั้จากหยดของเหลวเจือปน [19]

ฉนวนเหลวที่มีหยดของเหลวต่างชนิดเจือปนอยู่ สามารถทำให้เกิดเบรกดาวนั้ได้ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของหยดของเหลวเจือปน โดยมีการยืดออกตามแนวของสนามไฟฟ้า ความยาวของการยืดออกแปรตามค่าเพอมีตติวิตี ยิงเพอมีตติวิตีที่มีค่าสูงกว่าของฉนวนเหลวมากเท่าใด หยดของเหลวที่เจือปนก็จะยืดออกมากเท่านั้น ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายทั้งสองของหยดของเหลวมีค่าสูงขึ้น ถ้าค่าสูงเกินค่าวิกฤตจะทำให้เกิดดิซซาร์จบางส่วน เกิดโพรงก๊าซและนำมาสู่การเกิดเบรกดาวนั้ในที่สุด

2.4.2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนั้จากความร้อน [13]

กลไกนี้ใช้อธิบายการเกิดเบรกดาวนั้เมื่อป้อนแรงดันชนิดพัลส์ จากการทดลองวัดพัลส์กระแสแล้วพบว่ากระแสมีค่าสูงก่อนเกิดเบรกดาวนั้ โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ $1\text{A}/\text{cm}^2$ ซึ่งเชื่อว่ามีแหล่งกำเนิดจากปลายของฉนวนเล็กโตรดขั้วลบหรือคาโทด ทำให้ฉนวนเหลวบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงและกลายเป็นไอหรือฟองก๊าซ โดยทั่วไปฟองก๊าซจะเกิดขึ้นได้เมื่อพลังงานที่ถ่ายเทให้กับฉนวนเหลวมีค่าสูงกว่า $10^7\text{W}/\text{cm}^2$ เมื่อเกิดฟองก๊าซที่มีความยาวเกินความยาววิกฤติหรือเกิดโพรงตลอดแนวระยะแถบของฉนวนเล็กโตรดจะเกิดเบรกดาวนั้ตามมา โดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความดันและโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนเหลว กลไกการเกิดเบรกดาวนั้นี้ใช้อธิบายการเกิดเบรกดาวนั้ในระยะแถบแคบ ($\leq 100\mu\text{m}$) เท่านั้น และไม่สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนั้ลดลงเมื่อระยะแถบกว้างขึ้น

2.4.2.5 กลไกการเกิดเบรกดาวนั้เนื่องจากปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง [13]

เนื่องจากในฉนวนเหลวเชิงการค้ำจะมีสิ่งเจือปนปะปนอยู่เสมอ โอกาสเกิดเบรกดาวนั้จึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งของอนุภาคเจือปนถ้าพบในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ โอกาสที่จะเกิดเบรกดาวนั้ก็ต่ำ เมื่อใดก็ตามที่อนุภาคเจือปนอยู่ในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โอกาสเกิดเบรกดาวนั้ก็มีความเป็นไปได้สูง โดยโอกาสเกิดเบรกดาวนั้จะขึ้นกับจุดที่อ่อนแอที่สุด (weak link) หรือบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในปริมาตรของฉนวนเหลวนั้นเพราะปริมาตรของฉนวนเหลวสัมพันธ์กับปริมาณสิ่งเจือปนทั้งหมดที่มีอยู่ ถ้าสมมติว่าอนุภาคเจือปนกระจายอยู่ในฉนวนเหลวอย่างสม่ำเสมอแล้ว บริเวณที่มีความอ่อนแอที่สุดในฉนวนเหลวคือปริมาตรของน้ำมันที่อยู่ในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงคือ ปริมาตรที่อยู่ระหว่างแนวความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับแนว 90%ของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด โดยปริมาตรยิ่งมากเท่าใด โอกาสที่พบสิ่งเจือปน หรือ จุดอ่อนแอ (weak link) ยิ่งมากตามไปด้วย และมีโอกาสเกิดเบรกดาวนั้ง่ายขึ้น

การเกิดเบรกดาวนั้มีอิทธิพลมาจากทั้งปริมาณก๊าซ , ความหนืด , ปริมาณความชื้นและสิ่งเจือปนอื่นในน้ำมันหม้อแปลง โดยให้การกระจายของสิ่งเจือปนเหล่านี้สม่ำเสมอ แรงดันเบรกดาวนั้จะ

มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับปริมาณความเครียดสนามไฟฟ้าคือ แรงดันเบรกดาวน์ลดลงเมื่อ ปริมาณความเครียดสนามไฟฟ้าสูง

2.4.2.6 กลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากปรากฏการณ์ EHD

เมื่อป้อนแรงดันสูงให้ฉนวนเหลวที่มีความบริสุทธิ์สูง จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ประมาณ 100-300kV/cm ทำให้เกิดการปล่อยอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าจะหลุดออกมาจากผิวอิเล็กโทรดและได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าตามกฎของคูลอมบ์ ทำให้อนุภาคประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในฉนวนเหลวนั้นเป็นสาเหตุของการนำไฟฟ้าแบบมีพาหะพา (electroconvection) อนุภาคประจุไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าเหล่านี้ยังทำให้เกิดกระแสไหลวนภายในฉนวนเหลว (eddy motion) ด้วยการไหลของอนุภาคนี้อาจช่วยทำให้เนื้อฉนวนเองไหลวนด้วยทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของฉนวนเหลว (EHD instability) หมายถึงเนื้อฉนวนไหลวนและมีการพาประจุไหลวนไปด้วย ทำให้ฉนวนเหลวขาดเสถียรภาพและมีทิศทางไปยังอิเล็กโทรดตรงข้าม [14]

การเคลื่อนที่ของฉนวนเหลวแบบไหลวนทำให้เกิดฟองก๊าซตามทฤษฎีที่ได้มีการสันนิษฐานไว้ 2 ทฤษฎี ทฤษฎีแรกอธิบายว่าการเคลื่อนที่ของฉนวนเหลวที่มีประจุมีความรุนแรงเพียงพอที่จะทำให้ความดันบริเวณนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง อีกทฤษฎีคือการที่ประจุชนิดออกจากอิเล็กโทรดอย่างรวดเร็วและรุนแรง(burst) ทำให้ฉนวนเหลวที่สัมผัสกับผิวอิเล็กโทรดได้รับประจุที่ฉีดออกมาและได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าจึงเคลื่อนตัวออกจากผิวอิเล็กโทรดอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นที่ผิวอิเล็กโทรด และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ [21]

การเกิดปรากฏการณ์ EHD ไม่ได้เกิดขึ้นในทันทีที่มีแรงดันสูงแต่ต้องใช้เวลาในระดับ มิลลิวินาที ดังนั้นการเบรกดาวน์เนื่องจากปรากฏการณ์นี้จึงมีโอกาสเกิดได้เฉพาะการป้อนแรงดัน กระแสตรง , กระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงที่มีช่วงเวลายาวพอเท่านั้น

บทที่ 3 การวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้ในการทดลอง

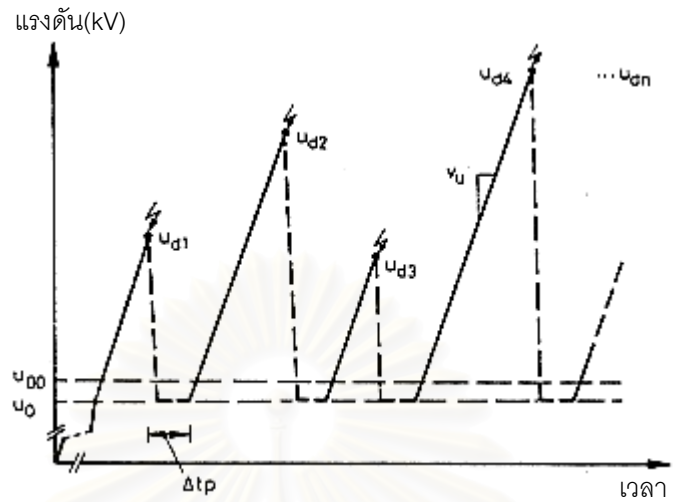
บทนี้กล่าวถึงวิธีการป้อนแรงดันที่เหมาะสมกับการทดลองหาแรงดันเบรกดาวนของน้ำมันหม้อแปลง , การเลือกพารามิเตอร์สำหรับการทดลองและรวบรวมข้อมูล , การวิเคราะห์ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกันหรือไม่และวิธีการเลือกการกระจายทางทฤษฎีที่เหมาะสมกับการกระจายของข้อมูล เพื่อคำนวณหาลักษณะสมบัติทางสถิติและเป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

3.1 การทดลองแรงดันเบรกดาวน [18]

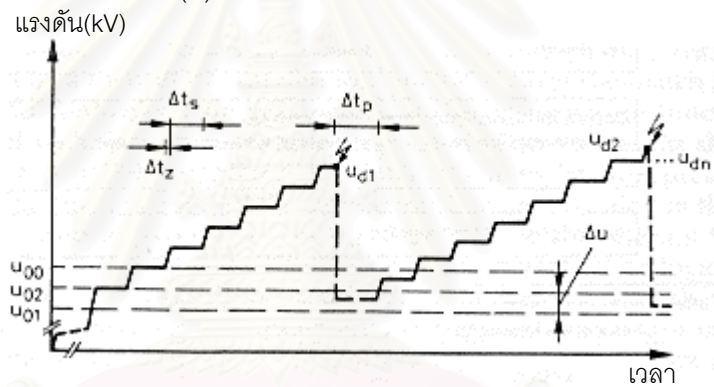
ในการทดลองหาแรงดันเบรกดาวนมีวิธีการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวนหลายวิธี เช่น การทดลองแรงดันคงที่ (constant voltage) , การทดลองแรงดันเพิ่ม (rising voltage) , การทดลองแบบแรงดันขึ้นและลง (up and down) เป็นต้น โดยการทดลองที่เลือกใช้จะเป็นการทดลองแรงดันเพิ่ม ข้อดีของการทดลองด้วยวิธีแรงดันเพิ่มคือผลการทดลองเบรกดาวนไม่มีผลกระทบของประจุค้าง (space charge) ที่เกิดขึ้นหลังการเกิดเบรกดาวนแม้ว่าประจุค้างเหล่านี้จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ในน้ำมันหม้อแปลงต่ำก็ตาม เหตุที่การทดลองแบบแรงดันเพิ่มไม่มีผลกระทบของประจุค้างเพราะภายหลังการเกิดเบรกดาวนการป้อนแรงดันครั้งต่อไปจะเริ่มต้นจากแรงดันขั้นต่ำขึ้นไป ทำให้ประจุค้างที่เกิดขึ้นจากการเกิดเบรกดาวนครั้งก่อนคืนตัว (recombine) เพราะฉะนั้นผลการทดลองที่ได้จึงมีแนวโน้มเป็นอิสระต่อกันเนื่องจากไม่มีผลกระทบจากประจุค้างมาเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเบรกดาวน จึงได้ลักษณะสมบัติทางสถิติที่ถูกต้องกว่าการป้อนแรงดันด้วยวิธีอื่น และการเสียสภาพของฉนวนเล็กโตรดและน้ำมันหม้อแปลงก็น้อยกว่าวิธีอื่นเนื่องจากการทดลองแรงดันเพิ่มใช้จำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวนน้อยครั้งก็สามารถได้ลักษณะสมบัติเชิงสถิติ ทั้งนี้วิธีแก้ปัญหาการเกิดประจุค้างหลังการเกิดเบรกดาวนถ้าไม่ใช้วิธีการทดลองแรงดันเพิ่มทำได้ 2 แนวทางคือเปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลงทุกครั้งหลังการเกิดเบรกดาวนหรือป้อนแรงดันกระแสลับให้ฉนวนเหลว เพื่อให้ฉนวนเหลวมีการคืนตัวแต่กระบวนการทดลองจะยากขึ้น

3.1.1 การทดลองแรงดันเพิ่ม (rising voltage)

การทดลองแรงดันเพิ่มสามารถใช้ได้กับการป้อนแรงดันทุกรูปคลื่นแรงดัน โดยกรณีแรงดันกระแสตรงและกระแสลับสามารถป้อนแรงดันได้ 2 วิธี ดังแสดงในรูปที่ 3.1 วิธีแรกเป็นการป้อนแรงดันแบบต่อเนื่องโดยมีอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ โดยมีแรงดันเริ่มต้น (u_0) มีค่าเท่ากับศูนย์ และอัตราการเพิ่มแรงดัน (v_0) อยู่ในช่วง 2 – 5 kV/s วิธีที่สองเป็นการป้อนแรงดันโดยมีการเพิ่มแรงดันเป็นขั้นๆ แต่ละขั้นมีแรงดันเพิ่มขึ้น Δu และคงค่าแรงดันนั้นไว้เป็นเวลา Δt_1 ซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการนำผลการทดลองไปใช้งาน เช่น 10 วินาที , 1 นาที , 1 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมง เป็นต้น โดยเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนระดับแรงดันแต่ละขั้น Δt_2 ต้องมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ Δt_1



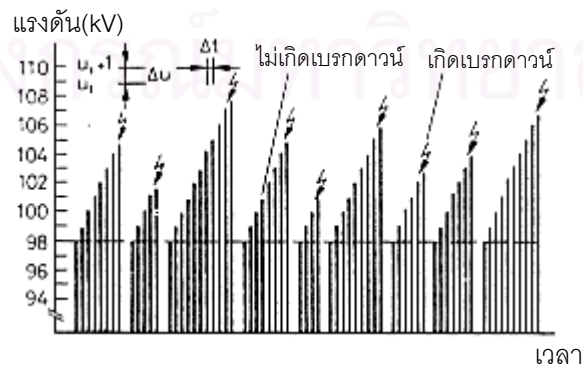
(ก) แรงดันเพิ่มแบบต่อเนื่อง



(ข) แรงดันเพิ่มแบบขั้น

รูปที่ 3.1 การทดลองแรงดันเพิ่ม กรณีแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับ

ส่วนแรงดันอิมพัลส์ ลักษณะการป้อนแรงดันแสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือแรงดันเริ่มต้น(u_0)ซึ่งไม่จำเป็นต้องเท่ากับศูนย์แต่ต้องเป็นค่าแรงดันที่ไม่มีโอกาสเกิดเบรกดาวนจึงเป็นค่าแรงดันเริ่มต้นได้ , แรงดันเพิ่มแต่ละขั้น(Δu)และช่วงเวลารอก่อนการทดลองครั้งต่อไป(Δt_p)



รูปที่ 3.2 การทดลองแรงดันเพิ่ม กรณีแรงดันอิมพัลส์

เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่สามารถแทนลักษณะสมบัติของวัสดุทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปได้อย่างถูกต้อง ในการทดลองแต่ละครั้งพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวนั ต้องทำการควบคุมให้เหมือนกันในทุกการทดลอง เช่น รูปคลื่นแรงดันที่ใช้ทดลอง , สภาวะที่ทำการทดลอง , อุปกรณ์วัดแรงดันและส่วนแสดงผล เป็นต้น โดยพารามิเตอร์ของการทดลองแรงดันเพิ่มประกอบด้วย

- จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง (n)
- ช่วงเวลาระหว่างการทดลองแต่ละครั้ง (Δt_p)
- แรงดันเริ่มต้น (u_0)
- อัตราการเพิ่มแรงดัน (v_u)
- แรงดันเพิ่มแต่ละขั้น (Δu)
- ช่วงเวลาคงแรงดันแต่ละขั้น (Δt_s)
- เวลาที่ใช้เพิ่มแรงดันแต่ละขั้น ($\Delta t_z \ll \Delta t_s$)

มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แรงดันเริ่มต้น (u_0) จะเริ่มต้นจากศูนย์หรือมากกว่าก็ได้ โดยที่ต้องเป็นค่าแรงดันที่ไม่มีโอกาสเกิดเบรกดาวนัจึงเป็นค่าแรงดันเริ่มต้นได้ โดยทั่วไปกำหนดจากค่าแรงดันเบรกดาวนัต่ำสุด (u_{dmin}) ที่พบจากการทดลองในเบื้องต้น ตามความสัมพันธ์ $u_{dmin} > 1.1u_0$ หรือ u_0 ควรต่ำกว่า u_{dmin} อย่างน้อย 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นก่อนทำการทดลองจริงควรทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อสามารถกำหนด u_0 ได้อย่างเหมาะสม

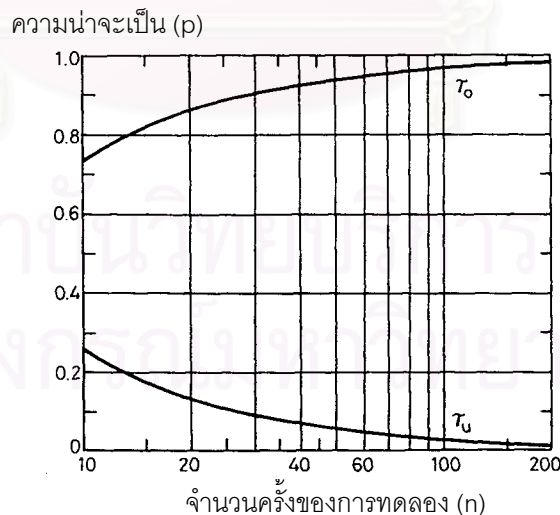
- แรงดันเพิ่มแต่ละขั้น (Δu) โดยค่าต่ำสุดขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์จ่ายแรงดัน ส่วนค่าสูงสุดไม่ควรมีค่ามากกว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) ของแรงดันเบรกดาวนัของวัสดุทดสอบ โดยทั่วไปกำหนดไว้ประมาณ 0.5s

- ช่วงเวลาคงแรงดันแต่ละขั้น (Δt_s) ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลองเช่น การทดสอบความคงทนอยู่ได้ของวัสดุทดสอบใช้เวลาคงแรงดันเท่ากับ 1 นาที หรือจะกำหนดเป็นชั่วโมงก็ได้แล้วแต่วัตถุประสงค์การใช้งาน แต่เวลาที่ใช้เพิ่มแรงดันแต่ละขั้น Δt_z ควรสั้นกว่า Δt_s มากๆ ($\Delta t_z \ll \Delta t_s$) มิฉะนั้น Δt_z จะมีผลกระทบต่อผลการทดลอง

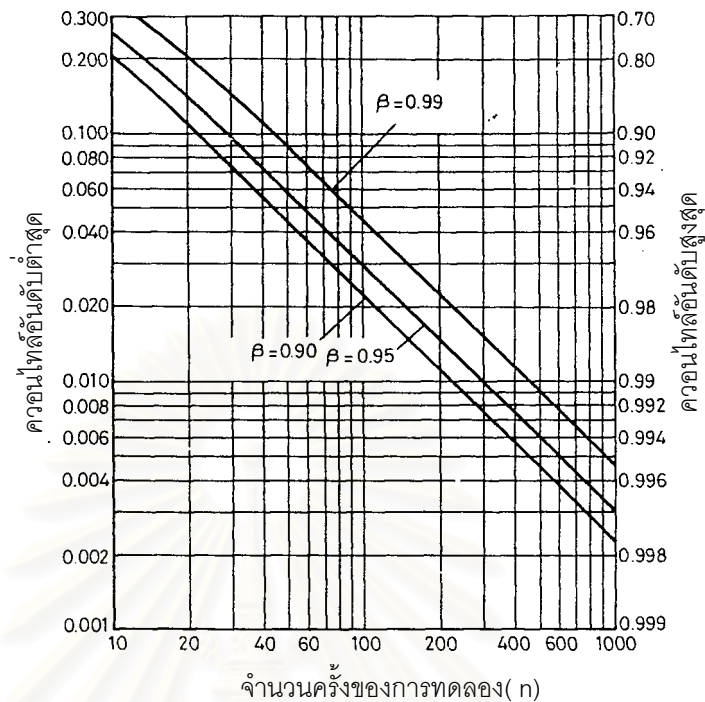
- อัตราการเพิ่มแรงดัน (v_u) กำหนดจากวัตถุประสงค์การทดลองโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 2 – 5 kV/s เช่น การทดลองเบรกดาวนัของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC 156-1963 กำหนดอัตราการเพิ่มแรงดันเท่ากับ 2 kV/s เป็นต้น โดยที่อัตราการเพิ่มแรงดันในช่วง 3-5 kV/s อัตราการเพิ่มแรงดันในช่วงนี้ไม่มีผลกระทบต่อผลการทดลอง [18] โดยในการทดลองแรงดันกระแสตรงใช้อัตราการเพิ่มแรงดันเท่ากับ 5 kV/s (ค่าเฉลี่ยจากการวัดจริงในช่วงที่ใช้ทดลอง)

- จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง (n) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแม่นยำของผลการทดลอง กล่าวคือจำนวนครั้งที่ทำการทดลองยิ่งมากผลการทดลองที่ได้ยิ่งมีความแม่นยำสูง การกำหนดจำนวนครั้งที่ทำการทดลองสามารถทำได้โดยใช้วิธีการกำหนดจากขอบเขตความคลาดเคลื่อนการกระจาย (distribution free tolerance limits) ทั้งนี้จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง (n) มากกว่าหรือเท่ากับ 20 ครั้ง สามารถหาลักษณะสมบัติเชิงสถิติได้ทุกกรณี โดยจำนวนครั้งการทดลองน้อยกว่านี้เหมาะสมสำหรับการคำนวณค่าเฉลี่ยเท่านั้น ไม่เพียงพอที่จะใช้หาลักษณะสมบัติเชิงสถิติ

วิธีการกำหนดจากขอบเขตความคลาดเคลื่อนการกระจาย (distribution free tolerance limits) แสดงดังกราฟรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงอันดับควอนไทล์ที่เกิดขึ้นที่จำนวนครั้งการทดลองต่างๆที่สัมพันธ์กับความเชื่อมั่น $\beta = 0.95$ ทั้งควอนไทล์อันดับต่ำสุด (lower tolerance limit τ_L) และสูงสุด (upper tolerance limit τ_U) ที่เกิดขึ้นได้จากการทดลองจำนวน n ครั้ง เช่น จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง 100 ครั้ง ที่สัมพันธ์ความเชื่อมั่น $\beta = 0.95$ ค่าแรงดันเบรกดาวนต่ำสุด (u_{dmin}) จะไม่ต่ำกว่าควอนไทล์อันดับที่ 3% (u_{d03}) และถ้าทำการทดลอง 28 ครั้ง แรงดันเบรกดาวนต่ำสุด (u_{dmin}) จะไม่ต่ำกว่าควอนไทล์อันดับที่ 10% (u_{d10}) เป็นต้น จากความสัมพันธ์ข้างต้นเมื่อจัดกราฟในสเกลล็อก-ล็อก กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 3.4 ทำให้การเลือกจำนวนครั้งการทดลองมีความสะดวกขึ้นมาก เช่น ทำการทดลองหาแรงดันเบรกดาวนของอากาศในอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบด้วยแรงดันกระแสสลับ โดยให้แรงดันเริ่มต้นเท่ากับ 0 kV , ระยะเวลารอหลังการเกิดเบรกดาวนก่อนทำการทดลองครั้งต่อไปเท่ากับ 1 นาที จะพบว่าจากกราฟในรูปที่ 3.4 ที่สัมพันธ์ความเชื่อมั่น $\beta=0.90$ โดยต้องการค่าแรงดันเบรกดาวนต่ำสุด (u_{dmin}) ไม่ต่ำกว่าควอนไทล์อันดับที่ 5% (u_{d05}) จะต้องทำการทดลองการเกิดเบรกดาวนเท่ากับ 44 ครั้ง เป็นต้น



รูปที่ 3.3 ควอนไทล์อันดับต่ำสุดและสูงสุด ที่สัมพันธ์ความเชื่อมั่น $\beta = 0.95$



รูปที่ 3.4 ความน่าจะเป็นที่ล้มเหลวขั้นต่ำและขั้นสูงสุด ที่สัมพันธ์กับความเชื่อมั่นค่าต่างๆ

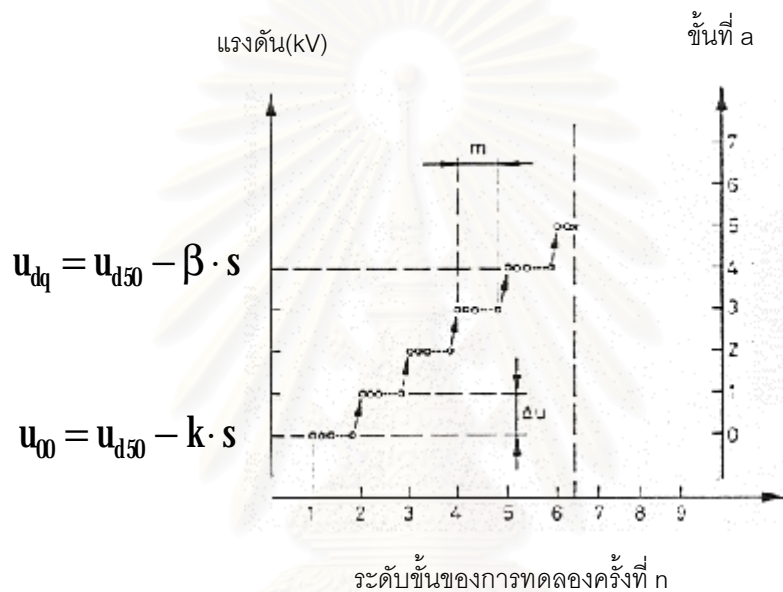
3.1.2 การหาค่าแรงดันเบรกตาวาน์ที่ความน่าจะเป็นที่ล้มเหลวขั้นต่ำ (lower order quantile) [18]

ในการทดลองการเกิดเบรกตาวาน์ที่จะได้ค่าทางสถิตินั้นต้องใช้จำนวนครั้งการเกิดเบรกตาวาน์มาก แต่ในการทดลองการเกิดเบรกตาวาน์ของน้ำมันหม้อแปลงนั้นมีผลกระทบจากการเกิดเบรกตาวาน์ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงและผิวอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ผลการทดลองครั้งต่อไปมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นการทดลองจึงควรจะใช้จำนวนครั้งการเกิดเบรกตาวาน์ไม่มากครั้งเกินไปเพื่อให้ผลการทดลองที่ได้ถูกต้องและมีความเป็นอิสระต่อกัน

การทดลองหาแรงดันเบรกตาวาน์ที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกตาวาน์ต่ำหรือความน่าจะเป็นที่ล้มเหลวขั้นต่ำนั้น วิธีการทดลองใช้จำนวนครั้งที่เกิดเบรกตาวาน์ไม่มากครั้งก็ได้ค่าทางสถิติที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกตาวาน์ต่ำแล้ว อีกทั้งเป็นวิธีการทดลองแบบแรงดันเพิ่มซึ่งไม่มีผลกระทบของประจุค้างจึงเลือกวิธีการทดลองนี้ทดลองการเกิดเบรกตาวาน์ของน้ำมันหม้อแปลงด้วยแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์

วิธีการทดลองหาแรงดันเบรกตาวาน์ที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกตาวาน์ต่ำหรือความน่าจะเป็นที่ล้มเหลวขั้นต่ำนั้น ใช้วิธีป้อนแรงดันเพิ่มโดยแต่ละขั้นแรงดันจะป้อนแรงดันจำนวน m ครั้งเพิ่มแรงดันเป็นขั้นขึ้นไปเรื่อยๆ จนเกิดเบรกตาวาน์ก็จะจบการทดลองหนึ่งครั้ง แล้วทำการทดลองครั้งต่อไปเริ่มต้นป้อนที่แรงดันเริ่มต้น (u_0) ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ถ้าจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันทั้งหมดจนเกิดเบรกตาวาน์เท่ากับ n ครั้ง เราจะได้แรงดันเบรกตาวาน์ซึ่งเป็นความน่าจะเป็นสะสมของการเกิดเบรกตาวาน์ (U_{dq}) โดยเป็นแรงดันในขั้นสูงสุดที่ไม่เกิดเบรกตาวาน์จากการป้อนแรงดัน m ครั้ง ถ้าจำนวน n ครั้งมีมากพอและถ้าแรงดันเริ่มต้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จะได้ว่าค่าคาดหวัง (Expectation) หรือค่าเฉลี่ย $E(U_{dq}) = U_{dq}$ ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกตาวาน์ต่ำ

วิธีการหาแรงดันเบรกดาวนของวัสดุทดสอบได้มีการศึกษาค้นคว้าโดยนักวิจัยหลายท่าน วิธีเหล่านี้มักมีจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวนน้อยครั้งและมีจำนวนครั้งที่ทำการป้อนแรงดันไม่แตกต่างกัน ก็สามารถหาค่าแรงดันเบรกดาวนของวัสดุทดสอบที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวนต่ำจนถึงค่าควอนไทล์อันดับที่ 10% ($q \leq 0.1$) เช่น การหาค่าแรงดันคงทนอยู่ได้เชิงสถิติ (statistical withstand voltages) เป็นต้น นอกจากนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้หาค่าแรงดันเบรกดาวนที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนสูงถึงควอนไทล์อันดับที่ 90% ($q \geq 0.9$) เช่น การหาแรงดันเบรกดาวนเชิงสถิติของอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกลมหรือแรงดันเชิงสถิติที่กับดักเสิร์จทำงาน เป็นต้น



รูปที่ 3.5 การป้อนแรงดันเพื่อหาแรงดันเบรกดาวนที่ควอนไทล์อันดับต่ำ ($m > 1$)

ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด เช่น จากวิธีการทดลองแรงดันเพิ่มสามารถคำนวณหาแรงดันเริ่มต้น (u_0) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญได้

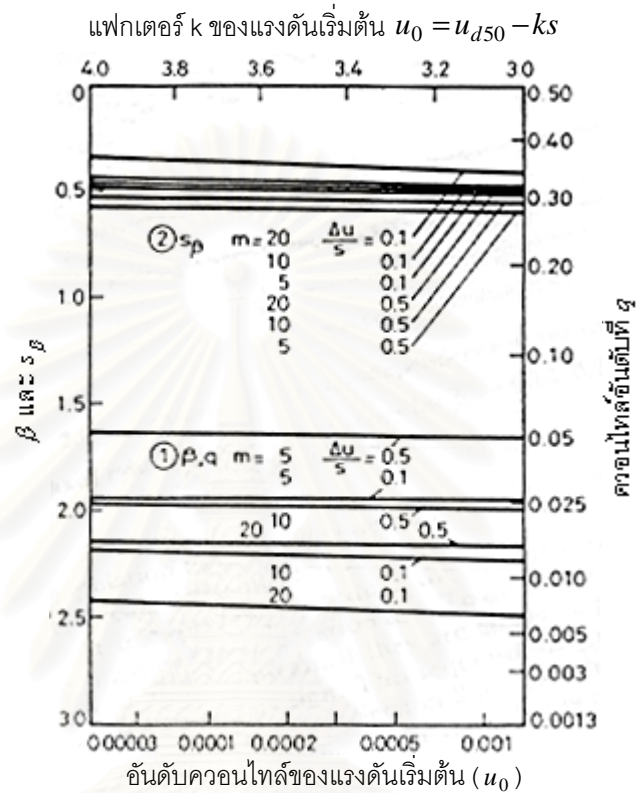
$$u_0 = u_{d50} - ks \tag{3.1}$$

เมื่อป้อนแรงดันจำนวน $m > 1$ ครั้ง ที่แรงดันขั้นต่างๆ ($m=1$ จะใช้สำหรับการประมาณหา u_{d50} และ s เมื่อ $k > 0$) แรงดันคงทนอยู่ได้เชิงสถิติจะอยู่ที่แรงดันขั้นสูงสุดที่ยังไม่เกิดเบรกดาวนในการป้อนแรงดัน m ครั้ง สามารถคำนวณได้

$$U_{dq} = u_{d50} - \beta s \tag{3.2}$$

เพื่อการเลือกพารามิเตอร์การทดลองได้อย่างเหมาะสมจำเป็นต้องทราบผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีต่อการทดลองที่ประกอบด้วย แรงดันเริ่มต้น (u_{00}) , จำนวนครั้งการป้อนแรงดันแต่ละขั้น (m) และขนาดแรงดันเพิ่มแต่ละขั้น (Δu) ด้วยการใช้วิเคราะห์แฟกเตอร์ β และ s_β (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ β) ที่พารามิเตอร์ค่าต่างๆ ถ้าเราตั้งสมมติฐานว่าความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวนที่ระดับขั้นแรงดันต่างๆ มีการกระจายแบบปกติ จะได้ผลของพารามิเตอร์ดังนี้

- u_0 ถ้าป้อนแรงดันเริ่มต้น $u_0 < u_{d50} - 3s$ ค่าแรงดันเริ่มต้นจะไม่มีผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวนและค่าความเบี่ยงเบนของแรงดันเบรกดาวน แสดงผลทางแฟกเตอร์ β และ s_β (จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.2) ดังแสดงในรูปที่ 3.6

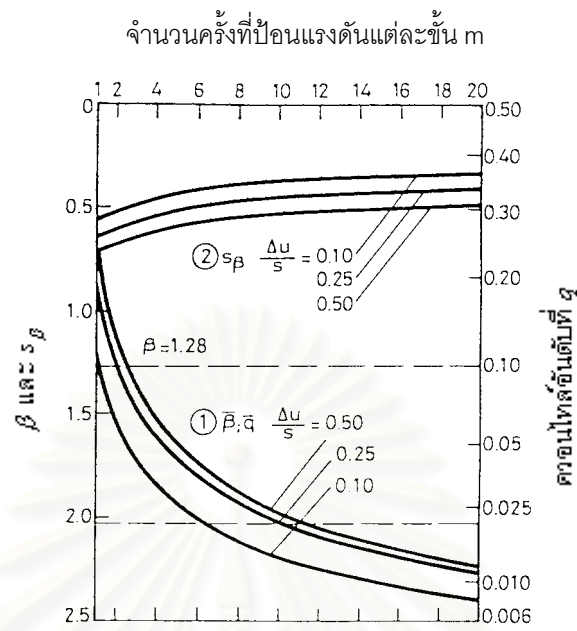


รูปที่ 3.6 ผลกระทบของ u_0 ที่มีต่อแฟกเตอร์ β , s_β และอันดับควอนไทล์ของ u_{dq} ที่ค่า m

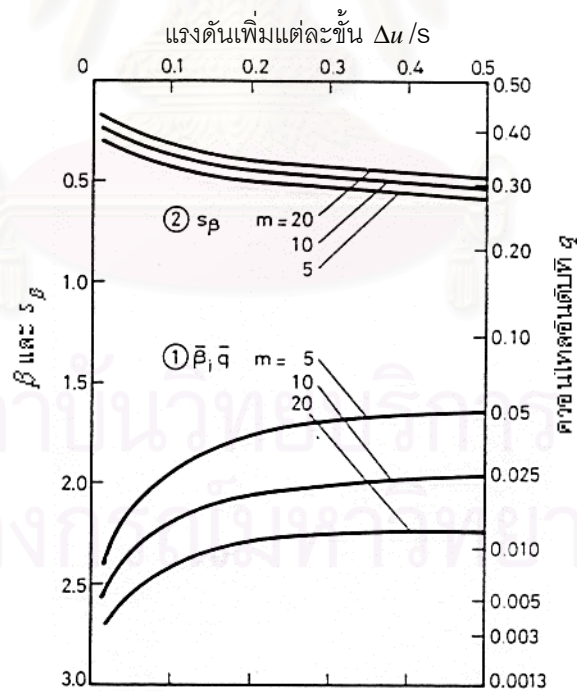
และ $\Delta u/s$ ค่าต่างๆ

- m จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันแต่ละชั้น จะมีผลต่อค่าแรงดันคงทนอยู่ได้อย่างมากจากผลของแฟกเตอร์ β , ส่วนผลต่อความเบี่ยงเบน s_β มีเพียงเล็กน้อย และสังเกตว่าจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันแต่ละชั้น (m) ยิ่งมากอันดับควอนไทล์ของผลการทดลองที่ได้ยิ่งมีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

- $\Delta u/s$ มีผลกระทบต่อทั้งค่าแรงดันคงทนอยู่ได้และค่าความเบี่ยงเบน s_β ทำให้ β มีค่าลดลง และ s_β มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดแรงดันเพิ่มแต่ละชั้น โดยค่า $\Delta u/s$ ยิ่งต่ำค่าแรงดันคงทนอยู่ได้จะอยู่ในอันดับควอนไทล์ที่ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ผลกระทบของ m ที่มีต่อแฟกเตอร์ β , s_β และอันดับควอนไทล์ของ u_{dq} ที่ $\Delta u/s$ ค่าต่างๆ



รูปที่ 3.8 ผลกระทบของ $\Delta u/s$ ที่มีต่อแฟกเตอร์ β , s_β และอันดับควอนไทล์ของ u_{dq} ที่ m ค่าต่างๆ

3.2 การทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน [18]

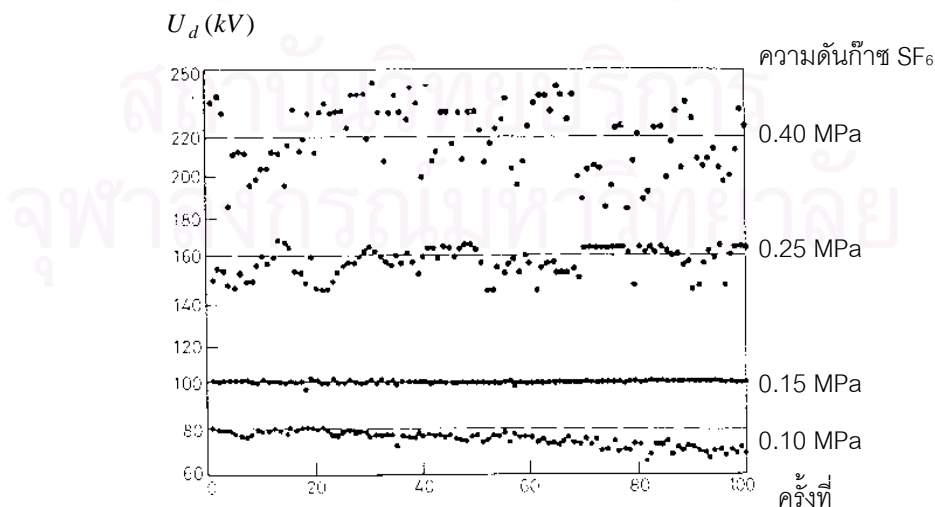
ความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลนั้นมีความสำคัญยิ่งในการหาค่าทางสถิติ ซึ่งผลการทดลองที่ได้เพื่อใช้ในทางสถิตินั้นจะต้องเป็นแบบสุ่ม (random variable) โดยทุกค่าต้องเป็นอิสระต่อกัน ความเป็นอิสระต่อกันของค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ขึ้นอยู่กับจำนวนที่ใช้ทำการทดลองว่ามีกรณีตัวกลับเป็นกรณีอื่นครั้งหลังการเกิดเบรกดาวนีย์อย่างไร , นานเท่าใดและมีคุณสมบัติใดของจำนวนที่เปลี่ยนไปจนส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ ทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ที่ได้ผิดเพี้ยนและไม่เป็นอิสระต่อกัน โดยมีตัวแปรอื่นที่ทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ในน้ำมันหม้อแปลงผิดเพี้ยน เช่น อุณหภูมิคาร์บอน , การขรุขระของผิวอิเล็กทรอนิกส์และประจุค้าง เป็นต้น วิธีการทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน ที่เลือกใช้มีอยู่ 2 วิธี คือ

3.2.1 การสร้างกราฟเปรียบเทียบ

3.2.2 การคำนวณเพื่อการทดสอบสมมติฐาน

3.2.1 การสร้างกราฟเปรียบเทียบ

เริ่มด้วยการสร้างกราฟแรงดันที่ได้จากการทดลองทุกค่าและเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของข้อมูล ถ้าแต่ละกลุ่มของข้อมูลการทดลองที่เรียงลำดับกันมีการกระจายตัวรอบค่าเฉลี่ยแบบสุ่มก็เพียงพอที่จะสมมติได้ว่า ข้อมูลการทดลองแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน (ควรตรวจสอบด้วยวิธีทดสอบสมมติฐานด้วย) ในทางกลับกัน ถ้าแรงดันเบรกดาวนีย์มีแนวโน้มสูงขึ้น , ต่ำลง หรือมีการเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นรายคาบต่อเนื่องกัน ข้อมูลการทดลองที่ได้จะไม่เป็นอิสระต่อกันและไม่สามารถนำมาใช้หาการกระจายทางสถิติได้ ดังเช่นตัวอย่างการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ของก๊าซ SF₆ ที่ความดันก๊าซค่าต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.9 พบว่าที่ความดันก๊าซ 0.15 , 0.25 และ 0.40 MPa ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ที่ได้มีความเป็นอิสระต่อกันมีการกระจายตัวของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ยแบบสุ่ม ส่วนที่ความดันก๊าซ 0.10 MPa ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ที่ได้ไม่เป็นอิสระต่อกันโดยมีการลดลงอย่างต่อเนื่องแสดงว่ามีผลกระทบจากตัวแปรอื่นทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ที่ได้ผิดเพี้ยนไป



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันด้วยการสร้างกราฟเปรียบเทียบ

3.2.2 การคำนวณเพื่อการทดสอบสมมติฐาน

การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันด้วยการคำนวณเพื่อทดสอบสมมติฐานมีอยู่หลายวิธี เช่น การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสองค่า (double t test) , การเปรียบเทียบค่าความเบี่ยงเบนสองค่า (F test) , การทดสอบการเกิดซ้ำ (iteration test) ฯลฯ ในการวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการทดสอบการเกิดซ้ำ (iteration test) จากค่าแรงดันเบรกดาวนที่ได้จากการทดลอง โดยกลุ่มของข้อมูลที่เป็นเหตุการณ์ลักษณะเดียวกันเราเรียกว่า การเกิดซ้ำ เช่น กลุ่มข้อมูลของแรงดันที่เกิดเบรกดาวนหรือไม่เกิดเบรกดาวน หรือกลุ่มข้อมูลของแรงดันเบรกดาวนที่มีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวนเฉลี่ย เป็นต้น จำนวนครั้งของการเกิดเหตุการณ์ลักษณะเดียวกันหรือการเกิดซ้ำจะเป็นตัวแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าของข้อมูล จึงใช้จำนวนการเกิดซ้ำเป็นตัวทดสอบว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันหรือเกิดขึ้นแบบสุ่มหรือไม่

สมมติฐาน: ข้อมูลการทดลองแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน

$$\text{ตัวทดสอบ: } z^* = \frac{r - \frac{2(n-k)k}{n}}{\frac{2(n-k)k}{n\sqrt{n}}} \quad (3.3)$$

โดยที่ n = จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง

k = จำนวนเหตุการณ์ที่มากกว่าค่าเฉลี่ย

r = จำนวนการเกิดซ้ำ

ค่าวิกฤติ: ค่าวิกฤติ λ_q ได้จากการกระจายแบบปกติมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยอันดับควอนไทล์มีค่าเท่ากับ $q = 1 - \frac{\alpha}{2}$ (การทดสอบ 2 ด้าน ที่ระดับความน่าเชื่อถือ α)

การตัดสินใจ: สมมติฐานไม่เป็นจริง ถ้า $|z^*| > \lambda_q$

ตารางที่ 3.1 ควอนไทล์ λ_q ของการกระจายแบบปกติมาตรฐาน

อันดับ q	ควอนไทล์ λ_q	ควอนไทล์ λ_q	อันดับ q
0.9	1.281552	0	0.500000
0.95	1.644854	0.5	0.691462
0.975	1.959964	1	0.841345
0.99	2.326348	1.5	0.933193
0.995	2.575829	2	0.977250
0.999	3.090232	2.5	0.993790
		3	0.998650

3.3 การหาฟังก์ชันการกระจายของข้อมูล [18]

หลังจากที่ข้อมูลผ่านการทดสอบความเป็นอิสระต่อกันตามวิธีในหัวข้อ 3.2 แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำข้อมูลที่ได้อามาทำเป็นตารางแจกแจงความถี่สะสมสัมพัทธ์ เพื่อหาลักษณะการกระจายของข้อมูลในรูปความน่าจะเป็นสะสมเพื่อเปรียบเทียบกับ การกระจายทางทฤษฎี โดยการแสดงผลเป็นกราฟ ซึ่งมี 2 ขั้นตอนคือ

3.3.1 การสร้างตารางแจกแจงความถี่สะสมสัมพัทธ์

3.3.2 การสร้างกราฟการกระจายของข้อมูล

3.3.1 การสร้างตารางแจกแจงความถี่สะสมสัมพัทธ์

นำผลการทดลองที่ได้มาเรียงลำดับจากค่าน้อยไปมาก ทำการคำนวณความถี่สัมพัทธ์หรือความน่าจะเป็นสัมพัทธ์(h_k) จากความถี่ของข้อมูล (h_{mk}) ตามความสัมพันธ์

$$h_k = \frac{h_{mk}}{n+1} \quad (3.4)$$

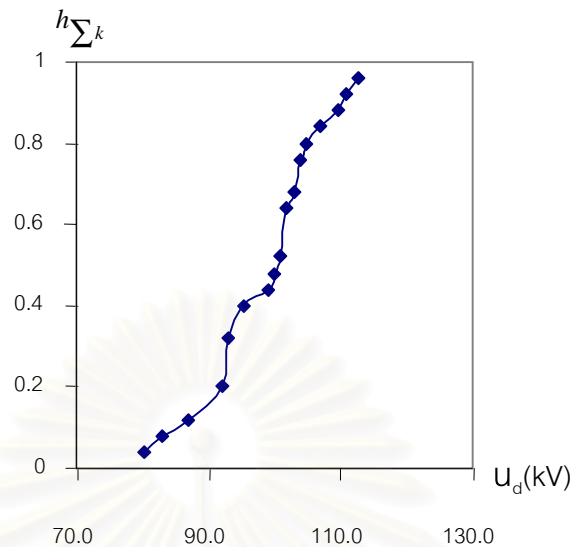
และคำนวณความถี่สะสมสัมพัทธ์($h_{\Sigma k}$) หรือความน่าจะเป็นสะสมสัมพัทธ์ ตามความสัมพันธ์

$$h_{\Sigma k} = \sum_{j=1}^k h_j \quad (3.5)$$

สังเกตว่าสมการคำนวณความน่าจะเป็นสัมพัทธ์ใช้ตัวหารเท่ากับ $n+1$ แทนที่จะเท่ากับ n ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับจำนวนข้อมูลน้อยค่า ถ้าจำนวนข้อมูลมีมากกว่า 50 ค่า สามารถแทน $n+1$ ด้วย n ได้

3.3.2 การสร้างกราฟการกระจายของข้อมูล

ทำการสร้างกราฟระหว่างความถี่สะสมสัมพัทธ์หรือความน่าจะเป็นสะสมกับค่าแรงดันเบรกดาวนโดยใช้ข้อมูลจากตารางแจกแจงความถี่สะสมสัมพัทธ์ เพื่อดูลักษณะการกระจายของข้อมูล สำหรับการสร้างกราฟที่มีสเกลเป็นเชิงเส้นแสดงในรูปที่ 3.10 ขั้นตอนต่อไปคือการเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี สำหรับการหาฟังก์ชันการกระจายทางทฤษฎีที่สามารถแทนการกระจายของข้อมูลได้อย่างเหมาะสมมีหลายฟังก์ชัน ดังอธิบายในหัวข้อ 3.4



รูปที่ 3.10 กราฟความน่าจะเป็นสะสมกับแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วเวลาของอิเล็กโตรดทรงกลมรัศมี 15 mm , ระยะแก๊ป 3 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

3.4 การเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี [18]

เพื่อให้ข้อมูลการทดลองสามารถนำมาใช้ทำการตัดสินใจด้านการออกแบบการฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ จึงควรแทนการกระจายของข้อมูลด้วยการกระจายทางทฤษฎีถ้าสามารถแทนได้เพราะจะทำให้การคำนวณง่ายและมีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น เพราะฉะนั้นการนำกระบวนการนี้มาใช้จะต้องมีความเข้าใจการกระจายทางทฤษฎีแบบต่างๆและมีหลักเกณฑ์การเลือกใช้ให้เหมาะสมกับวิธีการทดลอง

3.4.1 ฟังก์ชันการกระจายทางทฤษฎี

เนื่องจากการกระจายทางทฤษฎีมีหลายแบบ เช่น การกระจายแบบปกติ , การกระจายแบบ Weibull , การกระจายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล , การกระจายแบบล็อกปกติ เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการกระจายแบบปกติและการกระจายแบบ Weibull เท่านั้น เนื่องจากว่าเป็นการกระจายทางทฤษฎีที่นิยมใช้โดยทั่วไปทางวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาแรงดันเบรกดาวนัในอดีตมีการใช้ฟังก์ชันทั้งสองในการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยการกระจายแบบปกตินิยมใช้ในสภาวะที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform) หรือจำนวนครั้งการทดลองน้อยครั้ง ส่วนการกระจายแบบ Weibull นิยมใช้ในสภาวะที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform) และสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform)

3.4.1.1 การกระจายแบบปกติ

รูปแบบ : การกระจายแบบสุ่มของข้อมูลจะสร้างลักษณะการกระจายแบบปกติ โดยเมื่อข้อมูลมีคุณสมบัติที่ว่าผลบวกของข้อมูลจำนวนมากที่มีความเป็นอิสระต่อกันและมีการกระจายแบบสุ่ม

เมื่อแต่ละค่าของการกระจายมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่าผลบวกของข้อมูลจำนวนมาก (central limiting value statement) โดยรูปแบบการกระจายแบบปกติใช้ในกระบวนการที่มีการกระจายแบบสุ่มหลายอย่างเช่น กระบวนการดิฟฟิวชัน, การวัดความผิดพลาดของการวัดคุม ฯลฯ

ฟังก์ชันความหนาแน่น (density function):

$$\varphi(x; \mu; \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (3.6)$$

ฟังก์ชันการกระจาย (distribution function)

$$\Phi(x; \mu; \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^x e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2} dt \quad (3.7)$$

พารามิเตอร์

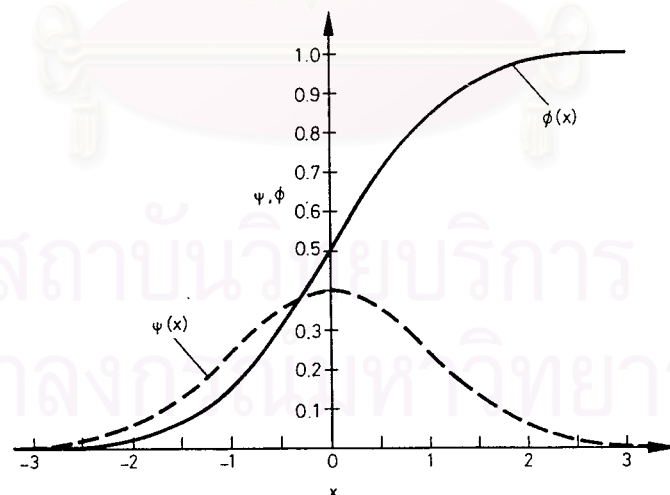
μ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

σ = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

ค่ามาตรฐาน

$$z = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \quad (3.8)$$

โดยทั่วไปฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(x; \mu; \sigma^2)$ นิยมเขียนแทนด้วย $N(\mu; \sigma^2)$ สำหรับการกระจายแบบปกติที่มีค่า $\mu=0$ และ $\sigma^2=1$ หรือ $N(0;1)$ เรียกว่า การกระจายแบบปกติมาตรฐาน จาก $N(0;1)$ ทำให้สามารถแทนฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(x; \mu; \sigma^2)$ ด้วย $\Phi(z)$ และฟังก์ชันความหนาแน่น $\varphi(x; \mu; \sigma^2)$ ด้วย $\varphi(z)/\sigma$ ลักษณะกราฟของฟังก์ชันการกระจายและของฟังก์ชันความหนาแน่นแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ฟังก์ชันความหนาแน่น $\varphi(z)/\sigma$ และฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(z)$ ของการกระจายแบบ

ปกติมาตรฐานเมื่อ $\mu=0$ และ $\sigma^2=1$

จากการสังเกตพบว่าการกระจายแบบปกติมาตรฐานมีลักษณะสมมาตรรอบค่าเฉลี่ย จึงมีคุณสมบัติความสมมาตรคือ

$$\varphi(-z) = \varphi(z) \quad (3.9)$$

$$\Phi(-z) = 1 - \Phi(z) \quad (3.10)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างพหามิเตอร์ของฟังก์ชันการกระจายกับฟังก์ชันการกระจายมาตรฐาน ทำให้การคำนวณหาค่าของฟังก์ชันการกระจายมีความสะดวก เนื่องจากสามารถคำนวณโดยใช้ค่าที่คำนวณจากฟังก์ชันการกระจายมาตรฐาน $N(0;1)$ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.4.1.2 การกระจายแบบ Weibull

รูปแบบ : การกระจายแบบ Weibull เป็นกระจายของข้อมูลค่าสุดขีด(ค่าสูงสุดหรือต่ำสุด) การหาฟังก์ชันการกระจายค่าสุดขีดจะหามาจากทุกกรณีที่เป็นไปได้ เริ่มจากการพิจารณาเหตุการณ์จำนวน n ครั้งที่เกิดขึ้น และมีค่าของเหตุการณ์คือ X_j ที่มีลักษณะการกระจายสอดคล้องกับฟังก์ชัน $F_A(x)$ ค่าของเหตุการณ์ที่มีค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ X สามารถหาได้จากค่าของเหตุการณ์ X_j เช่น การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนตามระยะแก๊ปจะเกิดแบบสุ่มและมีทิศทางขนานกับจุดที่อ่อนแอที่สุดของฉนวน เป็นต้น

$$X = \min(X_j) \quad (3.11)$$

ความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์ X จะไม่เกิดขึ้นเท่ากับ

$$P(X \geq x) = [1 - F_A(x)]^n \quad (3.12)$$

และความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ X เท่ากับ

$$F_n(x) = P(X < x) = 1 - [1 - F_A(x)]^n \quad (3.13)$$

ฟังก์ชันการกระจายค่าสุดขีดได้รับจากการหาขอบเขตของสมการข้างต้นเมื่อ $n \rightarrow \infty$ และขณะเดียวกันกับ $F_A(x) \rightarrow 0$

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ F_A(x) \rightarrow 0}} \{1 - [1 - F_A(x)]^n\} = F(x) \quad (3.14)$$

ฟังก์ชันการกระจายเริ่มต้นของการกระจายแบบ Weibull สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$F_A(x) = \frac{1}{n} \left(\frac{x - x_0}{\eta} \right)^\delta \quad (3.15)$$

โดยที่ $x > x_0, \eta > 0, \delta > 0$

ฟังก์ชันความหนาแน่น

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\delta}{\eta} \left(\frac{x - x_0}{\eta} \right)^{\delta-1} e^{-\left(\frac{x - x_0}{\eta} \right)^\delta} \\ 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

ฟังก์ชันการกระจาย

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x - x_0}{\eta} \right)^\delta} & x > x_0 \\ 0 & x \leq x_0 \end{cases} \quad (3.17)$$

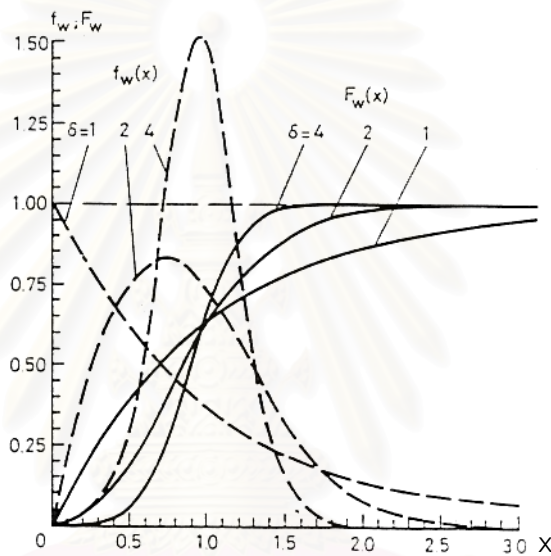
โดยที่

$\eta = x_{63} - x_0$ (อันดับควอนไทล์ที่ 63% สำหรับการกระจาย Weibull แบบ 2 พารามิเตอร์)

$\delta =$ สัมประสิทธิ์การกระจาย (ตัวชี้วัดการกระจายของข้อมูลแบบ Weibull)

$x_0 =$ ค่าเริ่มต้น

ส่วนกรณี $x_0=0$ และ $\delta=1$ จะเป็นฟังก์ชันการกระจายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ส่วนกรณีที่ $x_0=0$ นั้นฟังก์ชันการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ (มีพารามิเตอร์ 3 ตัวคือ η, δ และ x_0) สามารถลดรูปพารามิเตอร์เรียกฟังก์ชันนี้ว่า ฟังก์ชันการกระจาย Weibull แบบ 2 พารามิเตอร์ (มีพารามิเตอร์ 2 ตัวคือ η, δ) ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ฟังก์ชันความหนาแน่น $f_w(x)$ และฟังก์ชันการกระจาย $F_w(x)$ ของการกระจาย Weibull

แบบ 2 พารามิเตอร์ ด้วยพารามิเตอร์ $x_0=0$ และ $\eta = x_{63} - x_0 = 1$

การหาควอนไทล์อันดับใดๆของฟังก์ชันการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์นิยมคำนวณจากฟังก์ชันการกระจาย Weibull แบบ 2 พารามิเตอร์ จากความสัมพันธ์ของ $w_{q,\delta,\eta,x_0} = x_0 + \eta w_{q,\delta}$ โดยค่า $w_{q,\delta}$ คือค่าควอนไทล์ที่ควอนไทล์อันดับที่ q และมีค่าพารามิเตอร์ $\eta=1, x_0=0$ อาศัยความสัมพันธ์นี้ก็สามารถหาควอนไทล์ของฟังก์ชันการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ได้เช่นเดียวกับการกระจายแบบปกติที่คำนวณจากการกระจายแบบปกติมาตรฐาน

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของการกระจายแบบ Weibull

-การกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์

ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ประกอบด้วย x_0, η และ δ วิธีการคำนวณมีหลายวิธี แต่วิธีที่มีความถูกต้องมากที่สุดสำหรับประมาณค่าทั้ง 3 พารามิเตอร์คือวิธีโมเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณโดยตรงจากผลการทดลองโดยการกำหนดให้ค่าความลาดเอียงของการกระจายของข้อมูล (g) มีค่าเท่ากับค่าความลาดเอียง (skewness, γ_b) ของฟังก์ชันการกระจายแบบ Weibull ที่มี

สัมประสิทธิ์การกระจาย (δ) เมื่อคำนวณค่าความลาดเอียงของการกระจายของข้อมูล (g) ตามสมการที่ 3.18 ทำให้สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (δ) ได้โดยใช้ตารางที่ 3.2 พร้อมทั้งคำนวณค่า η และ x_0 ตามสมการดังต่อไปนี้

$$g = \frac{\frac{n}{(n-1)(n-2)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s^3} \quad (3.18)$$

$$\eta^* = \frac{s}{g_b} \quad (3.19)$$

$$x_0^* = \bar{x} - \eta^* k_b \quad (3.20)$$

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (δ) กับแฟกเตอร์ปรับแก้ k_b , g_b และ γ_b ของการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์

ส.ป.ส.การกระจาย (δ)	$k_b = \Gamma(1 + 1/\delta)$	$g_b = \sqrt{\Gamma(1 + 2/\delta) - k_b^2}$	$\gamma_b = (1/g_b^3)(\Gamma(1 + 3/\delta) - 3k_b \cdot \Gamma(1 + 2/\delta) + 2k_b^3)$
1.00	1.000	1.000	2.000
1.20	0.9407	0.787	1.521
1.40	0.9114	0.659	1.198
1.50	0.9027	0.613	1.072
1.70	0.8922	0.540	0.865
2.00	0.8862	0.463	0.631
2.50	0.8873	0.379	0.359
3.00	0.8930	0.325	0.168
3.50	0.8997	0.285	0.025
4.00	0.9064	0.254	-0.087
4.50	0.9126	0.230	-0.178
5.00	0.9182	0.210	-0.254
6.00	0.9277	0.179	-0.373
7.00	0.9354	0.157	-0.463
8.00	0.9417	0.139	-0.534
10.00	0.9514	0.115	-0.638
12.00	0.9583	0.097	-0.711
15.00	0.9657	0.079	-0.787

3.4.2 วิธีการเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี

ในการทดลองเพื่อความสะดวกในการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลองจะทำการแทนการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี โดยวิธีการพิจารณาการกระจายทางทฤษฎีที่เหมาะสมกับการกระจายของข้อมูลทำได้ 2 วิธี คือ

3.4.2.1 การสร้างกราฟเปรียบเทียบ

3.2.4.2 การคำนวณด้วยการทดสอบสมมติฐาน

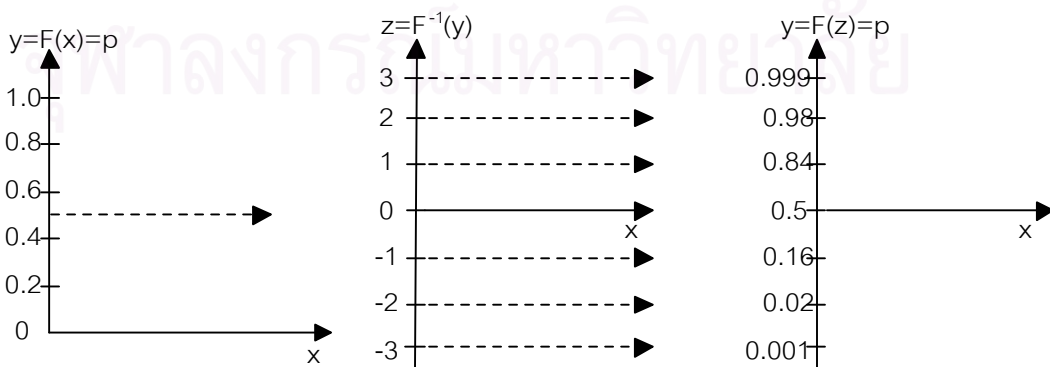
3.4.2.1 การสร้างกราฟเปรียบเทียบ

เริ่มด้วยการสร้างกราฟความน่าจะเป็นสะสมของการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎีที่คาดว่าสามารถนำมาใช้แทนได้ เพื่อให้ทำการเปรียบเทียบทำได้ง่ายจึงนิยามที่จะเปลี่ยนสเกลความน่าจะเป็นสะสมให้มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับข้อมูลที่น่านำมาแทน(ค่าแรงดันเบรกดาว์น)ด้วยการเปลี่ยนสเกลแกน y เป็นสเกลแกน z โดยใช้อินเวอร์สฟังก์ชันของการกระจายทางทฤษฎีที่น่าเปรียบเทียบ ตามความสัมพันธ์ $F^{-1}(y) = z$ เพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของข้อมูลทางแกน x สัมพันธ์กับค่าของข้อมูลทางแกน y แบบเชิงเส้น ดังนี้

- การกระจายแบบปกติที่มีฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2\sigma^2} dt = \Phi(z)$
 =y ดังนั้นอินเวอร์สฟังก์ชันของการกระจายแบบปกติคือ $z = \frac{x-\mu}{\sigma} = \Phi^{-1}(y)$ ทำให้สเกลความน่าจะเป็นสะสมเปลี่ยนจากสเกลแกน y เป็นสเกลแกน z และสามารถเปลี่ยนเป็นค่าความน่าจะเป็นสะสมได้ดังความสัมพันธ์ $y = F(z) = p$ (ความน่าจะเป็นสะสม) โดยแสดงในตารางที่ 3.3 ทั้งนี้การเปลี่ยนแกนความน่าจะเป็นสะสมของการกระจายแบบปกติแสดงในรูปที่ 3.13

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $y = \Phi(z)$ ของการกระจายแบบปกติ

Z	y = Φ(z)
-3	0.001
-2	0.023
-1	0.159
0	0.500
1	0.841
2	0.977
3	0.999



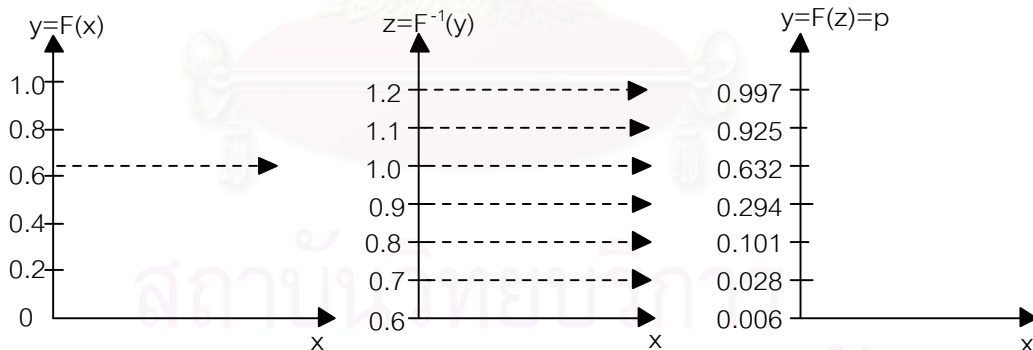
รูปที่ 3.13 การเปลี่ยนแกนความน่าจะเป็นสะสมของการกระจายแบบปกติ

- การกระจายแบบ Weibull มีฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(x, \eta, \delta) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\delta} & x > x_0 \\ 0 & x \leq x_0 \end{cases} = y = \Phi(z)$

ดังนั้นอินเวอร์สฟังก์ชันของการกระจายแบบ Weibull คือ $z = \frac{x}{\eta} = \Phi^{-1}(y) = [-\ln(1 - \Phi(z))]^{1/\delta}$ เมื่อ δ คงที่ ทำให้สเกลความน่าจะเป็นสะสมเปลี่ยนเป็นสเกลแกน z และสามารถเปลี่ยนเป็นค่าความน่าจะเป็นสะสมได้ดังความสัมพันธ์ $y = F(z) = p$ (ความน่าจะเป็นสะสม) ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ทั้งนี้ที่ $\delta = 10$ การเปลี่ยนแกนความน่าจะเป็นสะสมของการกระจายแบบ Weibull แสดงในรูปที่ 3.14

ตารางที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $y = \Phi(z)$ ของการกระจายแบบ Weibull

Z	$y = \Phi(z)$
0.6	0.006
0.7	0.028
0.8	0.101
0.9	0.294
1.0	0.632
1.1	0.925
1.2	0.997



รูปที่ 3.14 การเปลี่ยนแกนความน่าจะเป็นสะสมของการกระจายแบบ Weibull ที่ $\delta = 10$

3.4.2.2 การคำนวณด้วยการทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานใช้วิธี Kolmogorov test ซึ่งเป็นการใช้วิธีทางสถิติในการทดสอบว่าการกระจายทางทฤษฎีสามารถที่จะแทนการกระจายของข้อมูลได้อย่างเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการพิจารณาผลต่างของความน่าจะเป็นสะสมของการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎีที่มากที่สุด (d_{max}) ถ้ามีค่าเกินค่าวิกฤตก็ถือว่าการกระจายของข้อมูลแทนด้วยการกระจายทางทฤษฎีนั้นไม่ได้

สมมุติฐานของวิธี Kolmogorov test : ฟังก์ชันการกระจายแบบต่อเนื่องที่ไม่รู้ลักษณะการกระจาย $F_n(x)$ ที่ได้จากการทดลองเป็นจำนวน n ครั้ง สามารถแทนได้ด้วยการกระจายทางทฤษฎี $F_0(x)$ ได้

ตัวทดสอบ : ตัวทดสอบที่ใช้คือ ผลต่างของความน่าจะเป็นที่มากที่สุด (d_{\max}) ระหว่างการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี

$$d_{\max} = \max|F_n(x) - F_0(x)|, \quad -\infty < x < +\infty \quad (3.21)$$

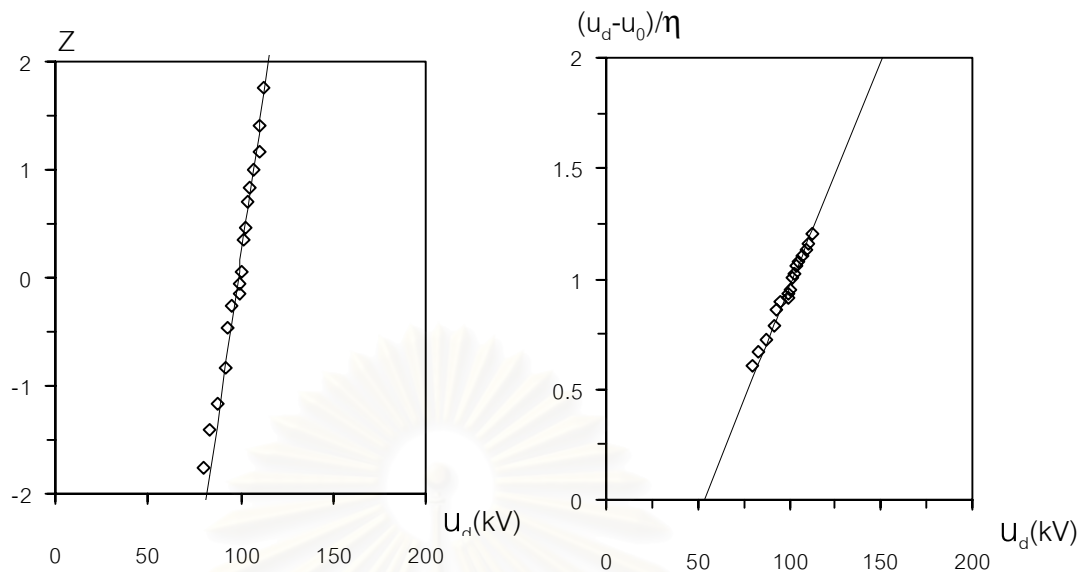
ค่าวิกฤต : ค่าวิกฤต $k_{n,\alpha}$ สามารถอ่านได้จากตารางที่ 3.5 สำหรับการทดสอบแบบสองด้าน (two-side test)

เกณฑ์ตัดสินใจ : สมมุติฐานไม่เป็นจริงเมื่อ $d_{\max} > k_{n,\alpha}$

ตารางที่ 3.5 ค่าวิกฤต $k_{n,\alpha}$ ของการทดสอบวิธี Kolmogorov test

จำนวนครั้ง ทดลอง (n)	$k_{n,\alpha}$ ที่ระดับความสำคัญ		
	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
8	0.410	0.454	0.507
12	0.338	0.375	0.420
16	0.295	0.327	0.366
20	0.265	0.294	0.329
24	0.242	0.269	0.301
50	0.170	0.188	0.211
100	0.121	0.134	0.150
$\rightarrow \infty$	$\frac{1.224}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.358}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.517}{\sqrt{n}}$

จากวิธีการหาการกระจายทางทฤษฎีที่เหมาะสมทั้ง 2 วิธี การวิจัยครั้งนี้จะใช้ทั้ง 2 วิธีในการเปรียบเทียบความเหมาะสม จากวิธีการสร้างกราฟเปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนสเกลให้การกระจายทางทฤษฎีมีลักษณะเป็นเส้นตรงแล้ว ทำการสร้างกราฟความน่าจะเป็นสะสมของข้อมูลการทดลองที่ได้จากตารางแจกแจงความถี่สะสมสัมพัทธ์เปรียบเทียบกับกราฟการกระจายทางทฤษฎีที่พารามิเตอร์ค่าต่างๆที่คำนวณจากผลการทดลอง และหาผลต่างของความน่าจะเป็นสะสมที่มากที่สุด (d_{\max}) ที่ข้อมูลค่าเดียวกัน และดูลักษณะกราฟทั้งสองเปรียบเทียบกัน กราฟการกระจายทางทฤษฎีที่เหมาะสมจะมีค่า d_{\max} ต่ำและลักษณะกราฟการกระจายทางทฤษฎีกับการกระจายของข้อมูลมีลักษณะใกล้เคียงกัน ตัวอย่างการสร้างกราฟเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.15 ที่สร้างเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลกับการกระจายแบบปกติและการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์โดยใช้ข้อมูลแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงขั้วลบที่อิเล็กทรอนิกส์โทรตรงกลมรัศมี 15 mm , ระยะแกป 3 mm



(ก) การกระจายแบบปกติ

$$\bar{U}_d = 98.55 \text{ kV}, s = 8.39 \text{ kV}$$

$$d_{\max} = 0.09 \text{ ที่ } U_d = 100.9 \text{ kV}$$

(ข) การกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์

$$U_{d0} = 53.29 \text{ kV}, \delta = 6.29, \eta = 48.67 \text{ kV}$$

$$d_{\max} = 0.08 \text{ ที่ } U_d = 95 \text{ kV}$$

รูปที่ 3.15 การเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี

จากรูปที่ 3.15 พบว่าการกระจายแบบปกติและการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ สามารถแทนการกระจายของข้อมูลได้ดี และเมื่อพิจารณาผลต่างที่สูงที่สุดของการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี (d_{\max}) ทั้งสองกรณี พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระจายแบบปกติค่า $d_{\max} = 0.09$ และเมื่อเปรียบเทียบกับกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ค่า $d_{\max} = 0.08$ ซึ่งทั้งสองกรณีใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎีทั้ง 2 แบบ มีความแตกต่างกันไม่มาก การกระจายของข้อมูลผลการทดลองจึงแทนด้วยการกระจายแบบปกติ หรือ แบบ Weibull ก็ได้

3.5 การหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม [18]

ในการศึกษาหาค่าแรงดันเบรกดาวนโดยการป้อนแรงดันแบบแรงดันเพิ่มมีข้อดีคือฉนวนและผิวฉนวนเล็กโตรดเสียหายน้อย เนื่องจากใช้จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวนไม่มากก็สามารถหาค่าเชิงสถิติได้ แต่ข้อเสียคือผลการทดลองที่ได้เป็นฟังก์ชันของความถี่สะสม การศึกษาลักษณะสมบัติการเบรกดาวนซึ่งมีการกระจายเป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน จึงไม่สามารถทำได้โดยตรง ต้องทำการคำนวณย้อนกลับโดยอาศัยทฤษฎีทางสถิติ จากความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวนกับฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนสามารถอธิบายได้ชัดเจนในกรณีการเพิ่มแรงดันเป็นระดับขั้น เช่นจากการป้อนหาแรงดันคงทนอยู่ได้ของแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ การทดลองเริ่มป้อนแรงดันจากระดับแรงดัน u_0 จากนั้นจึงเพิ่มแรงดันขั้นต่อไปทีละ Δu คำนวณหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นได้ดังนี้

กำหนดให้

$S_{\Delta u}(u_d)$ คือ ความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวนที่ระดับแรงดัน u_d

$V(u_d)$ คือ ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนเมื่อป้อนแรงดัน u_d

โดยที่ $V(u_0)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะ u_0 เป็นค่าของแรงดันเริ่มต้นที่ไม่มีโอกาสในการเกิดเบรกดาวนจะได้ว่า

$$V_{u_d} = \frac{S_{\Delta u}(u_d) - S_{\Delta u}(u_d - \Delta u)}{1 - S_{\Delta u}(u_d - \Delta u)} \quad (3.22)$$

กรณีฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมมีการกระจายแบบปกติ เมื่อแทนฟังก์ชันการกระจายแบบปกติลงในสมการที่ 3.22 จะพบว่าการหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นทำได้ยากต้องใช้การคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงแก้ปัญหาได้

จึงใช้วิธีตั้งสมมุติฐานให้ผลการทดลองจากการป้อนแรงดันเพิ่มแบบขั้นและการป้อนแรงดันคงที่แบบหลายระดับเป็นการกระจายแบบปกติ มีตัวแปรคือ U_d , $U_{d\Delta u}$ และพารามิเตอร์คือ μ, σ^2 และ $\mu_{\Delta u}, \sigma_{\Delta u}^2$ ตามลำดับ คำนวณค่ามาตรฐานโดยใช้พารามิเตอร์ μ, σ^2 ในการคำนวณได้ดังนี้

$$X = \frac{U_d - \mu}{\sigma} \quad (3.23)$$

$$X_{\Delta x} = \frac{U_{d\Delta u} - \mu}{\sigma} \quad (3.24)$$

โดยแปลงฟังก์ชันความน่าจะเป็น ($V(u_d)$) ให้เป็นการกระจายแบบปกติมาตรฐาน $\Phi(x)$ ที่มีพารามิเตอร์คือ $\mu = 0$ และ $\sigma^2 = 1$ และฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม ($S_{\Delta u}(u_d)$) เป็นการกระจายแบบปกติ ($F_{\Delta x}(x)$) ที่มีพารามิเตอร์ $\mu_{\Delta x}$ และ $\sigma_{\Delta x}^2$ ขนาดแรงดันเพิ่มแต่ละขั้น (Δu) สามารถแปลงให้เป็นค่ามาตรฐานได้ดังนี้

$$\Delta x = \frac{\Delta u}{\sigma} \quad (3.25)$$

และค่ามาตรฐาน X และ $X_{\Delta x}$ สัมพันธ์กันดังนี้

$$X_{\Delta x} = \sigma_{\Delta x} X + \mu_{\Delta x} \quad (3.26)$$

ถ้าต้องการทราบความน่าจะเป็น ($V(u_d)$) ที่ได้มาจากการคำนวณจากความน่าจะเป็นสะสม ($S_{\Delta u}(u_d)$) โดยใช้หลักการที่ว่า $\Phi(x)$ สามารถเกิดขึ้นจากการแปลงเป็นค่ามาตรฐานดังนี้

$$X = \frac{U_{d\Delta u} - \mu_{\Delta u}}{\sigma_{\Delta u}} \quad (3.27)$$

และจากสมการที่ 3.26 และ สมการที่ 3.27 จะได้

$$X_{\Delta x} = \frac{U_{d\Delta u} - \mu_{\Delta u}}{\sigma_{\Delta u}} \sigma_{\Delta x} + \mu_{\Delta x} \quad (3.28)$$

ถ้าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 3.24 และสมการที่ 3.27 จะได้พารามิเตอร์ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นเท่ากับ

$$\sigma = \frac{\sigma_{\Delta u}}{\sigma_{\Delta x}} \quad (3.29)$$

$$\mu = \mu_{\Delta u} - \mu_{\Delta x} \frac{\sigma_{\Delta u}}{\sigma_{\Delta x}} \quad (3.30)$$

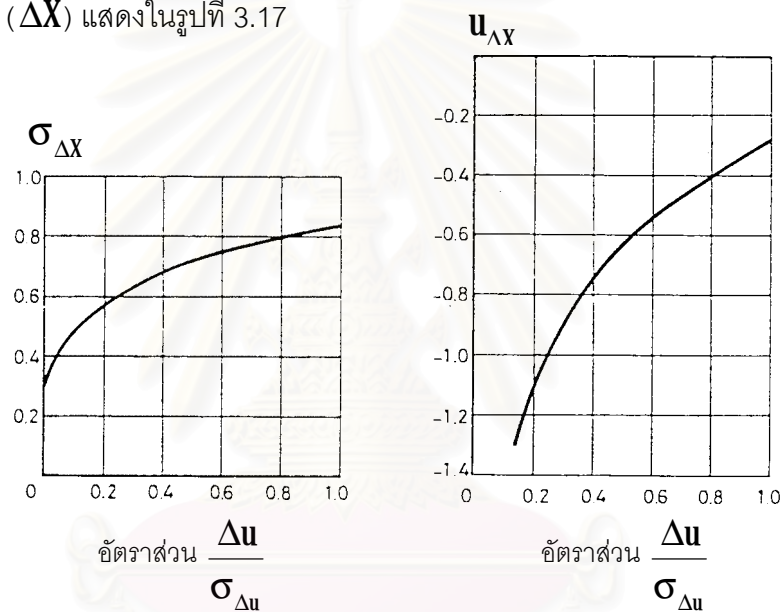
ขนาดแรงดันเพิ่มแต่ละชั้นของการกระจายแบบปกติมาตรฐานจากสมการ 3.25 คือ

$$\Delta X = \frac{\sigma_{\Delta x}}{\sigma_{\Delta u}} \Delta u \quad (3.31)$$

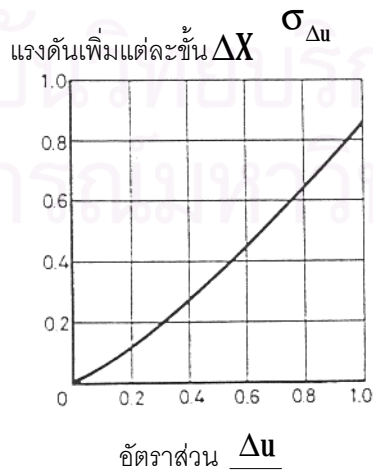
จัดรูปใหม่ได้

$$\frac{\Delta X}{\sigma_{\Delta x}} = \frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}} \quad (3.32)$$

ทั้งนี้การหาค่าพารามิเตอร์ σ และ μ ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนจ์จำเป็นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ $\sigma_{\Delta x}$ และ $\mu_{\Delta x}$ ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวนจ์ ซึ่งได้จากการคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ $\frac{\Delta X}{\sigma_{\Delta x}} = \frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ส่วนขนาดแรงดันเพิ่มแต่ละชั้น (ΔX) แสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$ กับ $\sigma_{\Delta x}$ และ $\mu_{\Delta x}$



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$ กับแรงดันเพิ่มแต่ละชั้น (ΔX)

บทที่ 4 วิธีดำเนินการทดลอง

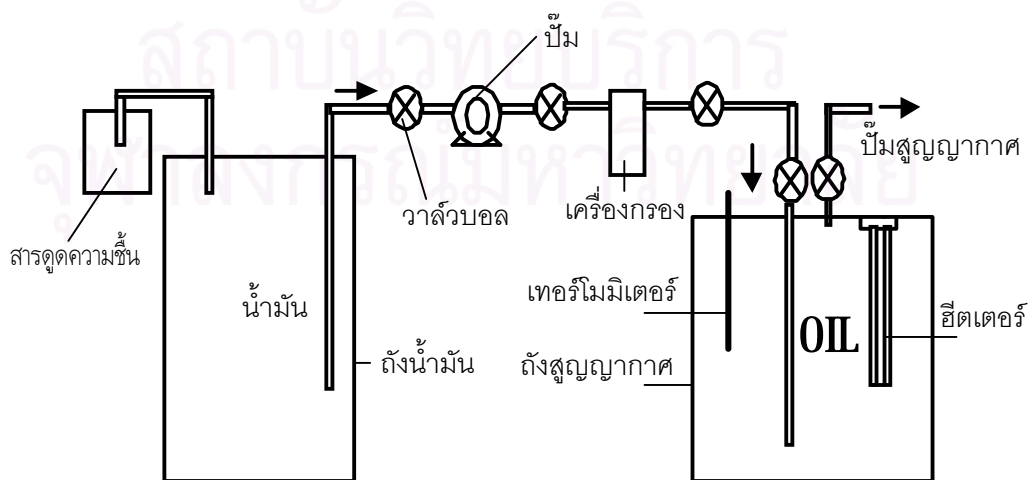
บทนี้กล่าวถึงวิธีควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลง , การศึกษาการกระจายตัวสนามไฟฟ้า , อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิธีการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดอิเล็กโทรดทรงกลม , ระยะแกปและอุณหภูมิ ที่มีต่อลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์

4.1 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทำการทดลองเป็นชนิดน้ำมันแร่ โดยเป็นน้ำมันหม้อแปลงเชิงการค้ามีชื่อทางการค้าว่า Sun-Ohm นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่นซึ่งเป็นน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าของบริษัทเจริญชัยหม้อแปลงจำกัด มีคุณสมบัติตามมาตรฐานกำหนดดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยบรรจุในถังน้ำมันหม้อแปลงขนาด 200 ลิตร การนำน้ำมันหม้อแปลงเข้าออกจะมีการควบคุมปริมาณความชื้นที่อาจเข้าไปในถังน้ำมันหม้อแปลงโดยผ่านสารดูดความชื้น (silicagel) ก่อน เพื่อไม่ให้น้ำมันหม้อแปลงสัมผัสกับอากาศโดยตรงทำให้น้ำมันหม้อแปลงไม่เสียสภาพก่อนการทดลอง โดยในการทดลองต้องควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันเพื่อสามารถนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันได้ ดังนั้นก่อนการทดลองจึงทำการควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงให้มีขนาดอนุภาคเจือปนเล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ และปริมาณความชื้นประมาณ 30 ppm โดยใช้เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้นดังแสดงในหัวข้อ 4.2

4.2 เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น

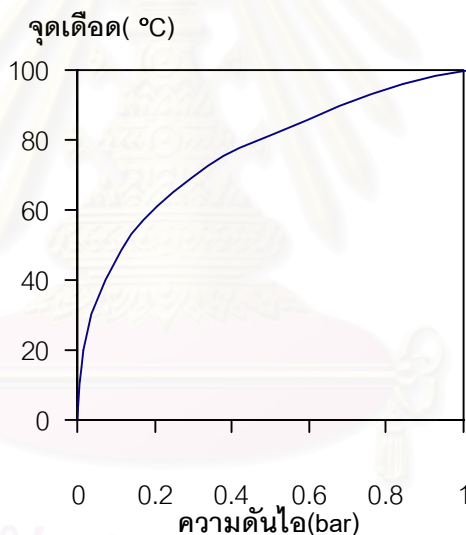
เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 มีหลักการทำงาน 2 ขั้นตอนคือ



รูปที่ 4.1 เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น

ขั้นตอนที่1 การควบคุมอนุภาคเจือปนด้วยการบีมน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุอยู่ในถังน้ำมันขนาด 200 ลิตร ผ่านเครื่องกรอง CUNO แบบคาร์ทริด ได้กรอง MICRO-KLEAN III เกรด Y ผลิตจากเส้นใยเซลลูโลสผสมกับเรซินเมลามีน (melamine) กรองอนุภาคเจือปนให้มีขนาดเล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ แล้วส่งน้ำมันหม้อแปลงลงถังสูญญากาศที่มีปริมาตร 20 ลิตร

ขั้นตอนที่2 การควบคุมปริมาณความชื้นและปริมาณก๊าซ โดยให้ความร้อนจากฮีตเตอร์ที่ติดตั้งภายในถังสูญญากาศจนน้ำมันหม้อแปลงมีอุณหภูมิ $70-75^{\circ}\text{C}$ พร้อมกับลดความดันภายในถังให้ต่ำกว่า 0.03 bar สถานะนี้น้ำจะกลายเป็นไอตามความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดของน้ำกับความดันไอดังแสดงในรูปที่ 4.2 และแยกตัวออกจากน้ำมันหม้อแปลง ในที่นี้ใช้เวลาประมาณ 0.5 ชั่วโมงในการให้ความร้อนแก่น้ำมันจากอุณหภูมิห้องประมาณ 30°C จนมีอุณหภูมิ $70-75^{\circ}\text{C}$ และควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ $70-75^{\circ}\text{C}$ คงที่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยการปรับแรงดันที่ป้อนเข้าฮีตเตอร์ให้เหมาะสม จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงโดยรักษาความดันในถังให้ต่ำกว่า 0.03 bar อีก 10 ชั่วโมงเพื่อลดการละลายของก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง แล้วจึงนำไปใช้ทำการทดลองได้



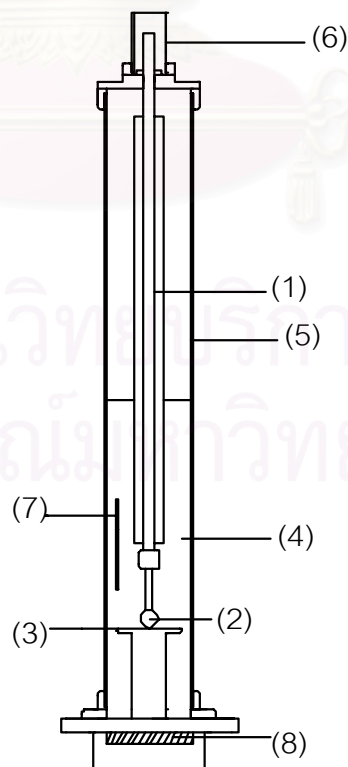
รูปที่ 4.2 จุดเดือดของน้ำกับความดันไอ [10]

เนื่องจากการตรวจสอบปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงหลังการควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลง ทางห้องวิจัยไม่มีเครื่องมือตรวจวัดจึงใช้วิธีเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอดีต โดยใช้เครื่องทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 156-1963 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในอัตราเท่ากับ 2 kV/s จนเกิดเบรกดาวน์จำนวน 6 ครั้ง พบว่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยมีค่าในช่วง $56-60 \text{ kV}$ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอดีตที่ศึกษาผลกระทบของปริมาณความชื้นที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง ที่ทำการทดลองตามมาตรฐาน VDE 0370 ที่ปริมาณความชื้นประมาณ 30 ppm ได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์เท่ากับ 56.9 kV [1] ซึ่งแตกต่างกับค่าแรงดันเบรกดาวน์จากการทดลองไม่เกิน 5% จึงสมมุติได้ว่าปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทดลองนี้มีค่าประมาณ 30 ppm โดยทำการทดสอบทั้งก่อนและหลังการทดลอง

4.3 ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.3 ได้ทำการออกแบบให้มีพิกัดแรงดันกระแสตรงประมาณ 200 kV และแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ประมาณ 400 kV มีส่วนประกอบคือ

- 1) สายนำแรงสูง ตัวนำไฟฟ้าทำจากทองเหลืองหุ้มด้วยฉนวนเทฟลอน
- 2) อิเล็กโตรดแรงสูงแบบทรงกลม ทำจากเม็ดลูกป็นชุบด้วยอาร์กโคโรม ทรงกลมมีรัศมีขนาด 2.5 , 5 , 10 และ 15 mm ความคลาดเคลื่อน ± 0.01 mm
- 3) อิเล็กโตรดกราวด์แบบระนาบแผ่นวงกลม ทำจากสแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 mm
- 4) น้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านกระบวนการควบคุมอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้นแล้ว โดยใส่น้ำมันหม้อแปลงประมาณ $\frac{1}{2}$ ของความสูงชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า
- 5) ถังครอบประกอบด้วยท่ออะคริลิกใสปลายท่อปิดด้วยฝาอะลูมิเนียม เพื่อสามารถดูดูอากาศภายในจนเหลือความดัน 0.03 bar และอาศัยความแตกต่างของความดันในการถ่ายน้ำมันหม้อแปลงเข้าสู่ชุดทดลอง โดยชุดทดลองสามารถปรับระยะแกปในช่วง 0-30 mm ความคลาดเคลื่อนในการปรับระยะแกป ± 0.05 mm
- 6) ถังครอบตัวปรับระยะแกป ประกอบด้วยท่อพีวีซีปลายตัน 1 ข้าง ปลายท่ออีกข้างปิดด้วยฝาอะลูมิเนียม มีไว้เพื่อป้องกันการรั่วของอากาศผ่านตัวปรับระยะแกป
- 7) เทอร์โมมิเตอร์
- 8) ฮีตเตอร์วางอยู่ใต้ฝาอะลูมิเนียมของชุดทดลอง ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำมันหม้อแปลง



รูปที่ 4.3 ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

ในชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.3 สามารถใช้โปรแกรม Maxwell [22] คำนวณหาการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสถิตย์ (Electrostatic field) ระหว่างอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5-15mm และระยะแกป 3-15mm โดยกำหนดค่าเพอมิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของเทฟลอน , น้ำมันหม้อแปลง , อะคริลิกและตัวนำไฟฟ้าเท่ากับ 2.2 , 2.2 , 2.5 และ 1 ตามลำดับ จากนั้นคำนวณค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าตามสมการที่ 4.1

$$FF = \frac{E_{\max}}{E_{\text{avg}}} \quad (4.1)$$

โดยที่

FF = แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

E_{avg} = ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย (kV/cm)

E_{max} = ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm)

ได้ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ใช้ทำการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 1.14-5.34 โดยรูปภาพตัวอย่างการใช้โปรแกรม Maxwell ในการคำนวณหาการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสถิตย์ (Electrostatic field) ระหว่างอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

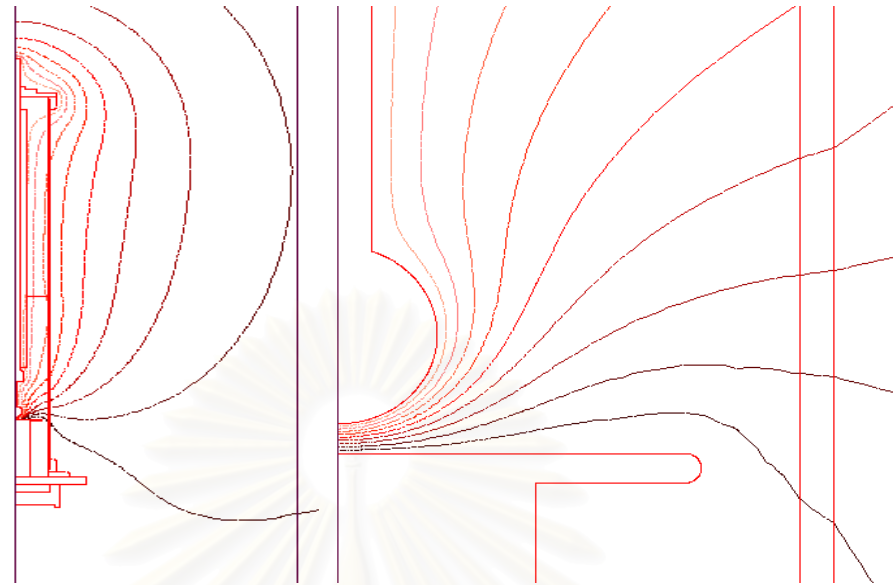
ตารางที่ 4.1 แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (FF) ที่ระยะแกปและอิเล็กโตรดทรงกลมขนาดต่างๆ

รัศมี (mm)	ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ระยะแกป (mm)					
	3	5	7	10	13	15
2.5	1.90	2.53	3.16	4.02	4.84	5.34
5	1.43	1.74	2.06	2.60	-	-
10	1.21	1.35	-	-	-	-
15	1.14	1.23	-	-	-	-

ทั้งนี้เพื่อการอธิบายผลของขั้วแรงดันในการทดลองแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์จึงมีการศึกษาผลของอิเล็กโตรดแบบรีดแกป-ระนาบ โดยปลายรีดแกปมียอดสูงเอียง 3.5 mm และทำมุม 50° สามารถคำนวณการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสถิตย์ระหว่างอิเล็กโตรดแบบรีดแกป-ระนาบ ที่ระยะแกป 20 , 30 และ 40 mm ได้ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.2

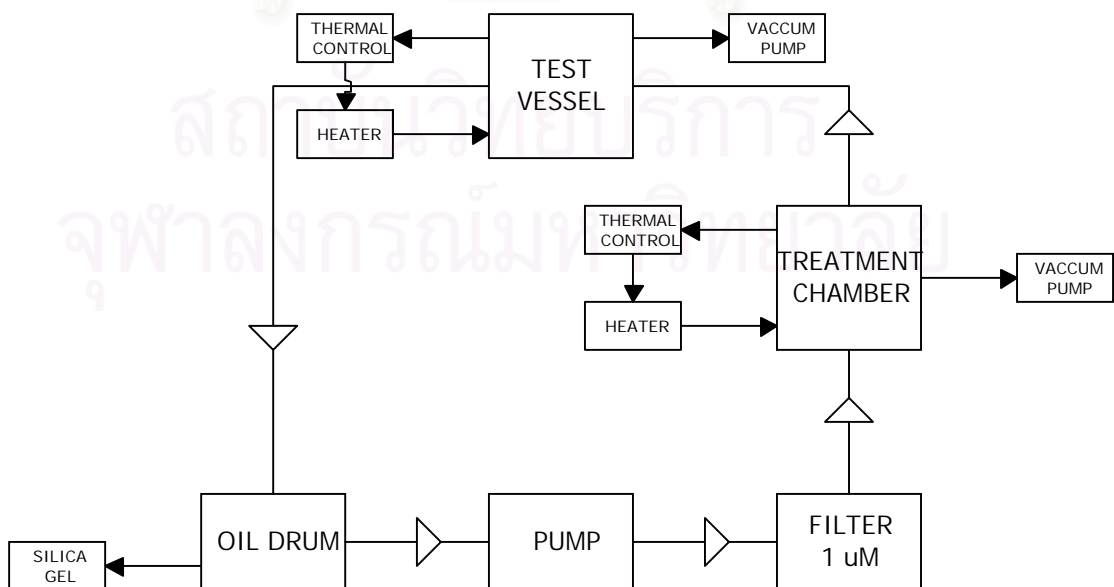
ตารางที่ 4.2 แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (FF) ของอิเล็กโตรดแบบรีดแกป-ระนาบที่ระยะแกปต่างๆ

ระยะแกป (mm)	ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า
20	39.51
30	48.49
40	58.43



รูปที่ 4.4 การกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทรงกลมรัศมี 15 mm , ระยะแกป 5 mm

กระบวนการควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงเริ่มตั้งแต่การกรองผ่านเครื่องกรองอนุภาค เจือปนให้มีขนาดเล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ แล้วส่งน้ำมันหม้อแปลงลงถึงตู้ญญากาศ จากนั้นก็ทำการควบคุม ปริมาณความชื้นและปริมาณก๊าซด้วยการให้ความร้อนจากฮีตเตอร์และดูดอากาศภายในถังให้มี ความดันต่ำกว่า 0.03 bar โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดของน้ำกับความดันไอเพื่อลด ปริมาณความชื้น แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงโดยรักษาความดันภายในถังให้ต่ำกว่า 0.03 bar อีก 10 ชั่วโมงเพื่อลดการละลายของก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงจึงนำไปใช้ทำการทดลองได้ การถ่ายเทน้ำมัน หม้อแปลงเข้าสู่ชุดทดลองอาศัยหลักการความแตกต่างของความดันในการถ่ายเท โดยหลังการ ทดลองเสร็จน้ำมันหม้อแปลงจะถูกส่งลงถึงน้ำมัน 200 ลิตรต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กระบวนการควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลง

4.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 250/2500 μ s พิกัด 400kV , 4 kJ
- 2) หม้อแปลงทดสอบแรงดันกระแสสลับพิกัด 100 kV , 5 kVA
- 3) โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงใช้ในการวัดแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ พิกัดแรงดัน 400kV
- 4) โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน ใช้ในการวัดแรงดันกระแสตรงพิกัดแรงดัน 200 kV
- 5) โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับพิกัด 100 pF , 100 kV
- 6) ไดโอดแรงสูงพิกัด 100 kV , 280 mA และตัวเก็บประจุพิกัด 50 nF , 100 kV
- 7) ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า
- 8) เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจ็อบนและปริมาณความชื้นประกอบด้วยเครื่องกรองของเหลวแบบคาร์ทริดขนาดกรอง 1 μ m , บีมสตูมยูกาต , ฮีตเตอร์ , เทอร์โมมิเตอร์และตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (variac)

4.5 วิธีการทดลองและรวบรวมข้อมูล

4.5.1 อิเล็กโตรด

ในการทดลองหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงภายหลังการทดลองฉนวนอิเล็กโตรดอาจชำรุดได้เนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ ซึ่งความเรียบของผิวอิเล็กโตรดมีผลอย่างยิ่งต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ ฉนวนอิเล็กโตรดที่ชำรุดอาจทำให้แรงดันเบรกดาวน์ที่ได้เปลี่ยนแปลงไป เป็นปัจจัยให้ผลการทดลองที่ได้ไม่เป็นอิสระต่อกันเพราะฉะนั้นก่อนการทดลองทุกครั้งต้องตรวจเช็คความเรียบของผิวอิเล็กโตรด โดยขัดผิวอิเล็กโตรดทั้งแบบทรงกลมและระนาบให้เรียบ ในที่นี้ใช้กระดาษทราย MIKRON P2000 ขัดผิวอิเล็กโตรดให้เรียบและจากการทดสอบผลกระทบของการเกิดเบรกดาวน์ พบว่าจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์ไม่เกิน 32 ครั้ง และ 20 ครั้ง จากการป้อนแรงดันกระแสตรงและแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ตามลำดับ ไม่มีผลทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้เปลี่ยนแปลงไป โดยความรุนแรงจากการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์จะสูงกว่าของแรงดันกระแสตรงอันเนื่องมาจากการใช้ความต้านทานจำกัดกระแสและผลจากการตัดวงจรขณะเกิดเบรกดาวน์ของอุปกรณ์ป้องกันที่ต่างกัน

4.5.2 การทำความสะอาดชุดทดลอง

ก่อนการถ่ายน้ำมันหม้อแปลงลงในชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า จะต้องทำความสะอาดชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าให้สะอาดเสียก่อน โดยทำความสะอาดในส่วนของอิเล็กโตรดทรงกลม , อิเล็กโตรดระนาบ , พื้นผิวฝาปิดอะลูมิเนียม , ท่ออะคิลิกและสายนำแรงสูง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆที่อาจมีอยู่จากการทดลองครั้งก่อน ทั้งนี้ก่อนทำการทดลองครั้งแรกจะล้างทำความสะอาดทุกๆส่วนโดยใช้แปรงจุ่มผงซักฟอกที่ละลายในน้ำสะอาดขัดทำความสะอาดทุกส่วนอย่างละ 2 ครั้ง โดยในแต่ละรอบที่ล้างด้วยผงซักฟอกเสร็จจะล้างด้วยน้ำสะอาดอย่างละ 2

ครั้ง หลังจากล้างด้วยน้ำสะอาดเสร็จจะล้างด้วยน้ำร้อนประมาณ 80°C อีก 2 ครั้งแล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากแห้งแล้วเช็ดทุกส่วนด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ 2 ครั้ง จึงจัดเก็บไว้เพื่อการทดลองต่อไป โดยส่วนที่ต้องทำการเปลี่ยนเช่น อิเล็กโตรดทรงกลมและอิเล็กโตรดระนาบ หลังการทดลองเสร็จทุกครั้งต้องทำความสะอาดดังวิธีข้างต้นอีก ส่วนท่ออะคิลิกและสายนำแรงสูงทำความสะอาดเฉพาะครั้งแรก ทั้งนี้ก่อนเริ่มการทดลองครั้งแรกจะถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการควบคุมคุณภาพแล้วเข้าออกที่ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าให้ทั่วทั้งหมดโดยทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อการทำความสะอาดก่อนการทดลองครั้งแรก

4.5.3 การถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลงลงชุดทดลองและการตั้งระยะแกป

เมื่อได้ทำความสะอาดชุดทดลองดังหัวข้อ 4.5.2 แล้วจะทำการถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลงจากถังควบคุมปริมาณความชื้นและปริมาณก๊าซลงชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการความแตกต่างของความดันและใส่น้ำมันหม้อแปลงสูงประมาณ $\frac{1}{2}$ ของความสูงชุดทดลอง ทั้งนี้การทดลองทุกครั้งจะใช้ปริมาณน้ำมันหม้อแปลงเท่ากันประมาณ 7 ลิตร ส่วนการปรับระยะแกปเริ่มจากการปรับหาตำแหน่งระยะแกปเท่ากับศูนย์ คืออิเล็กโตรดทรงกลมกับอิเล็กโตรดระนาบ ติดกันพอดีด้วยการหมุนเกลียวที่ปลายสายนำแรงสูงที่ติดตั้งอยู่กลางฝาปิดอะลูมิเนียมของท่ออะคิลิกและใช้มัลติมิเตอร์วัดความต้านทานระหว่างด้านแรงสูงกับด้านกราวด์ด้วยการตั้งมัลติมิเตอร์ในระบบส่งเสียง การตั้งตำแหน่งระยะแกปเท่ากับศูนย์จะใช้จิ้งหระที่ขันแหวนยึดสายนำแรงสูงให้แน่นกับฝาปิดอะลูมิเนียมแล้วมัลติมิเตอร์ส่งเสียงพอดี จากนั้นปรับระยะแกปตามที่ต้องการโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดระยะในแนวตั้งจากปลายสายนำแรงสูงถึงขอบแหวนยึดโดยเทียบระยะกับตำแหน่งระยะแกปเท่ากับศูนย์ ความคลาดเคลื่อนของระยะแกปไม่เกิน ± 0.05 mm ในการทดลองจะปล่อยอากาศเข้าสู่ชุดทดลองจนมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ

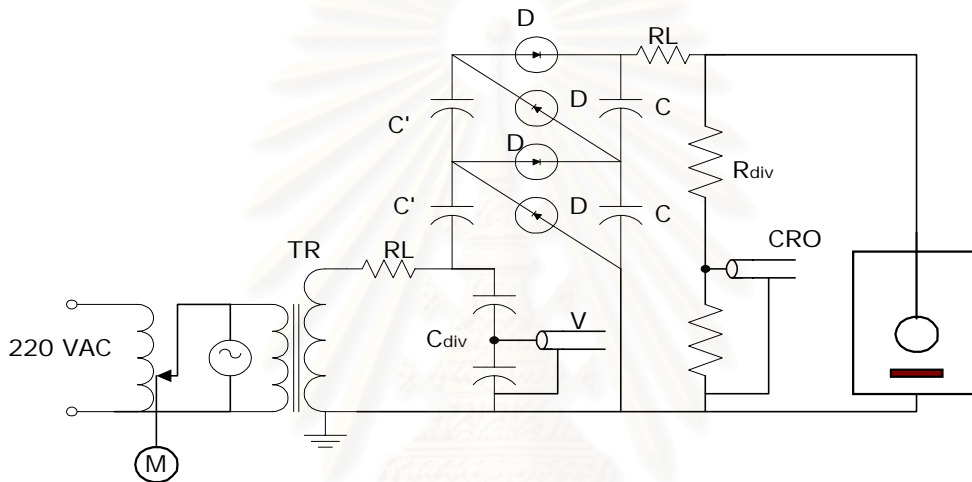
4.5.4 การควบคุมอุณหภูมิ

การทดลองผลกระทบของอุณหภูมิต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ควบคุมการให้ความร้อนแก่น้ำมันหม้อแปลงโดยใช้วารีเอกปรับขนาดแรงดันป้อนเข้าฮีตเตอร์ให้เหมาะสม เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงในชุดทดลองค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่าใกล้เคียงกันในทุกจุดของชุดทดลอง เมื่อใกล้ถึงอุณหภูมิที่ต้องการทำการปรับลดขนาดแรงดันลงให้เหมาะสมอีกครั้งเพื่อรักษาอุณหภูมิให้ได้ค่าที่ต้องการ รอเวลาให้อุณหภูมิต่อการเริ่มนิ่งก่อนจะเริ่มต้นทำการทดลอง ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิกำหนดให้อยู่ในช่วง $\pm 2^{\circ}\text{C}$ และต้องคอยสังเกตบ่อยๆเพื่อความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด

4.5.5 การทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรถดลอง การทดลองหาลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ใช้แหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรงประมาณ 200 kV โดยการใช้น้ำมันหม้อแปลงทดสอบ 220 V/100 kV , 5 kVA 1 ตัว และวงจรเรียงกระแสแบบทวิแรงดัน 2 เท่าจำนวน 2 ชั้น โดยจำกัดกระแสลัดวงจรขณะเกิด

เบรกดาวนเพื่อลดการเสียหายของน้ำมันหม้อแปลงและความเสียหายของฉนวนอิเล็กทรอนิกส์โดย
ความต้านทานน้ำขนาด $120\text{ k}\Omega$ โดยต่อระหว่างหม้อแปลงทดสอบกับวงจรเรียงกระแสและวงจร
เรียงกระแสกับชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า การวัดแรงดันสูงใช้วิธีแบ่งแรงดันด้วยโวล
เตจดีไวเดอร์ โดยวัดแรงดันกระแสลับก่อนจะผ่านวงจรเรียงกระแสด้วยโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัว
เก็บประจุ 100 pF พิกัดแรงดัน 100 kV ส่วนการวัดแรงดันกระแสตรงใช้โวลเตจดีไวเดอร์แบบความ
ต้านทาน $800\text{ M}\Omega$ พิกัดแรงดัน 200 kV โดยมีค่าแฟกเตอร์ระลอก (ripple factor) ในวงจร
ประมาณ 1% ด้านแรงดันต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์วัดด้วยออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอลของบริษัท
Tektronix รุ่น TDS360 , 200 MHz , 1Gs/s ลักษณะวงจรแสดงในรูปที่ 4.6



TR = หม้อแปลงทดสอบ $220\text{ V}/100\text{ kV}$, 5kVA $R_L = 120\text{ k}\Omega$
 C_{div} = โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 100 kV D = ไดโอดแรงสูง 100 kV 280 mA
 R_{div} = โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน 200 kV V = มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล
 C, C' = ตัวเก็บประจุกรองและตัวเก็บประจุพิกัด 50 nF , 100 kV CRO = ออสซิลโลสโคป

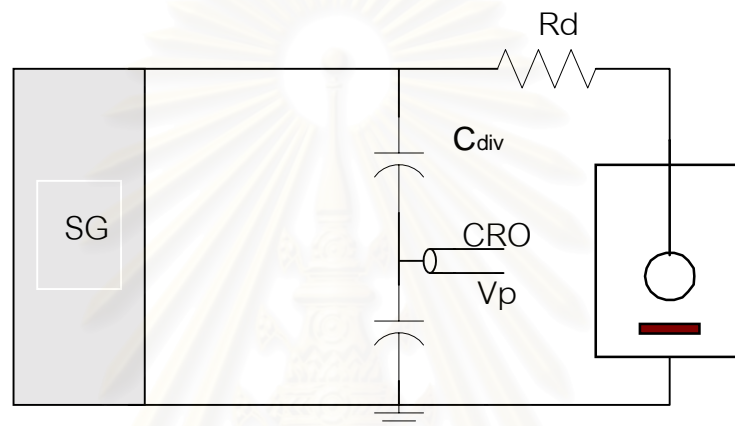
รูปที่ 4.6 วงจรทดลองแรงดันกระแสตรง

การป้อนแรงดัน ทำการป้อนแรงดันกระแสตรงโดยวิธีแรงดันเพิ่มแบบต่อเนื่อง (rising voltage) ที่แรงดันเริ่มต้น (u_0) เท่ากับ 0 kV , อัตราการเพิ่มแรงดัน (v_0) เท่ากับ 5 kV/s จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน ช่วงเวลารอหลังการเกิดเบรกดาวนก่อนจะทำการทดลองครั้งต่อไปใช้เวลา (Δt_p) ประมาณ 1.5 นาที โดยจำนวนครั้งที่ทำการทดลอง (n) กรณีศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติที่อุณหภูมิห้องทำการทดลองจำนวน 24 ครั้ง ส่วนการศึกษามลกระทบของอุณหภูมิทำการทดลองจำนวน 8 ครั้ง

4.5.6 การทดลองความคงทนต่อแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์

วงจรทดลอง การทดลองหาลักษณะความคงทนต่อแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ($250/2500\text{ }\mu\text{s}$) เนื่องจากขนาดแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์สูงสุดที่ทำการทดลองประมาณ 400 kV จึงใช้เครื่องกำเนิดแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ 4 ชั้น พิกัดแรงดัน 400 kV , 4 kJ โดยต่อความต้านทาน

หน่วยขนาด $1\text{ k}\Omega$ อนุกรมชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรขณะเกิดเบรกดาวนเพื่อลดความเสียหายของมิวอิเล็คโตรด โดยการวัดแรงดันใช้โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วยของบริษัท Haefely พิกัดแรงดัน 400 kV ที่ต่อขนานกับเครื่องกำเนิดแรงดันสวิตซิ่งอิมพัลส์ ส่วนภาคแรงดันต่ำใช้ออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอลของบริษัท Lecroy Corpolation รุ่น 9310AM , 400MHz , 100 Ms/s วัดรูปคลื่นแรงดัน และวัดค่ายอดแรงดันด้วยโวลมิเตอร์วัดค่ายอดแรงดันของบริษัท Haefely รุ่น 68M ลักษณะวงจรแสดงในรูปที่ 4.7



SG = เครื่องกำเนิดแรงดันสวิตซิ่งอิมพัลส์ 400 kV , 16 kJ V_p = โวลมิเตอร์วัดค่ายอดแรงดัน

C_{div} = โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วย 400 kV

R_d = ความต้านทานหน่วยจำกัดกระแส $1\text{ k}\Omega$ CRO = ออสซิลโลสโคป

รูปที่ 4.7 วงจรทดลองแรงดันสวิตซิ่งอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ($250/2500\ \mu\text{s}$)

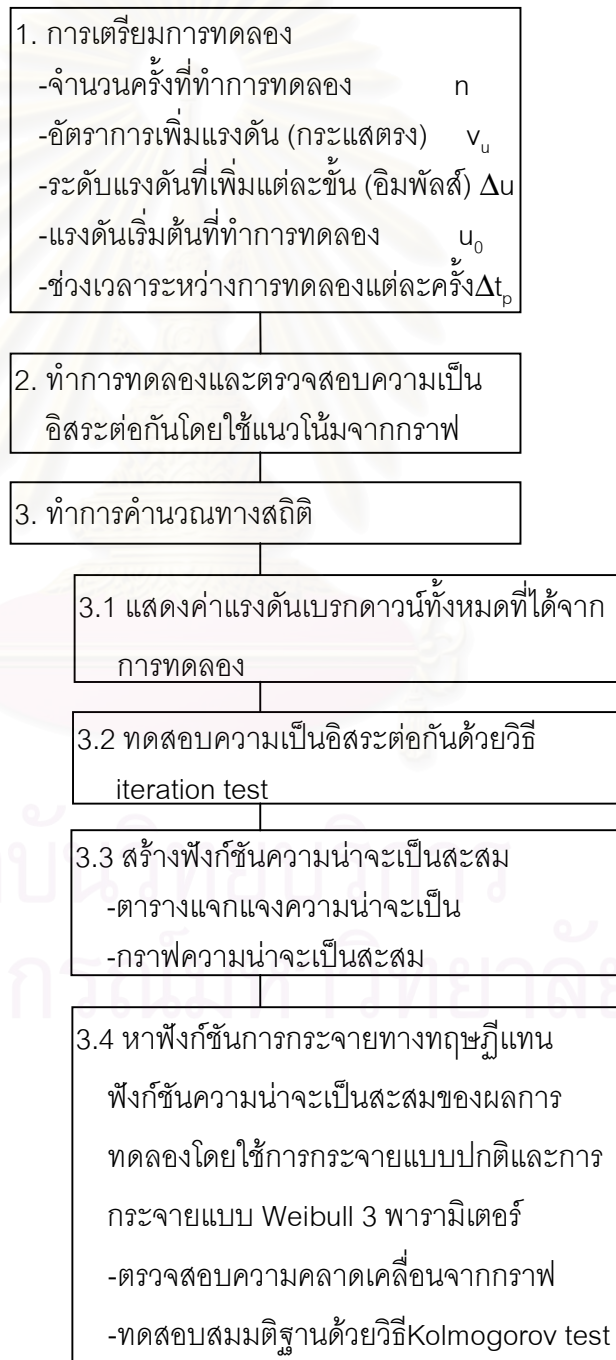
การป้อนแรงดัน ทำการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวนที่ควอนไทล์อันดับต่ำ ด้วยวิธีแรงดันเพิ่ม โดยแรงดันเพิ่มแต่ละขั้น (Δu) เท่ากับ 7 kV , แรงดันเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันที่คาดว่าจะเกิดเบรกดาวนประมาณ 3 s (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) , จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันแต่ละขั้น(m) เท่ากับ 5 ครั้ง , ช่วงเวลาระหว่างการป้อนแรงดันแต่ละครั้งประมาณ 20 วินาที และหลังการเกิดเบรกดาวนรอเวลาประมาณ 2 นาทีก่อนเริ่มป้อนแรงดันเริ่มต้นครั้งต่อไป โดยหาค่าแรงดันเบรกดาวนเฉลี่ยจากการทดลองจำนวน 6 ครั้ง

4.5.7 การควบคุมคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลง

ในการทดลองที่สภาวะต่างๆก่อนการทดลองในแต่ละครั้งจะทำการเปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการควบคุมคุณภาพแล้วลงในชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เพื่อความน่าเชื่อถือของผลการทดลองจึงทำการตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงให้มีคุณภาพใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง ด้วยการวัดคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยเครื่องทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสลัดตามมาตรฐาน IEC 156:1963 ทั้งก่อนและหลังการทดลองของน้ำมันหม้อแปลงในสภาวะนั้น

4.5.8 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขนาดอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์ , ระยะแก๊ป , ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าและสภาวะอุณหภูมิกับค่าแรงดันเบรกดาวนของน้ำมันหม้อแปลงโดยใช้แนวโน้มของกราฟ โดยที่การทดลองแต่ละครั้งต้องเป็นอิสระต่อกันและนำไปเปรียบเทียบกับการกระจายทางทฤษฎีเพื่อความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง โดยสามารถวิเคราะห์หาเหตุผลที่เกิดขึ้นได้ ทั้งนี้กระบวนการทดลองด้วยวิธีแรงดันเพิ่มมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 4.8



3.5 รวบรวมผลการทดลองที่ได้

4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

รูปที่ 4.8 กระบวนการทดลองด้วยวิธีแรงดันเพิ่ม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนักระแสตรง

บทนี้จะนำเสนอผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์ ที่ได้จากการทดลองแรงดันกระแสตรงทั้งชั่ววงและชั่วลบโดยใช้วิธีแรงดันเพิ่มแบบต่อเนื่อง (rising voltage) ที่แรงดันเริ่มต้น (u_0) เท่ากับ 0 kV , อัตราการเพิ่มแรงดัน (v_0) เท่ากับ 5 kV/s จนกระทั่งเกิดเบรกดาวนั ช่วงเวลาหลังจากการเกิดเบรกดาวนัก่อนจะทำการทดลองครั้งต่อไปใช้เวลา (Δt_p) ประมาณ 1.5 นาที โดยแสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนัที่สภาวะต่างๆ รวมทั้งการวิเคราะห์หาเหตุผลที่เกิดขึ้นจากผลการทดลอง

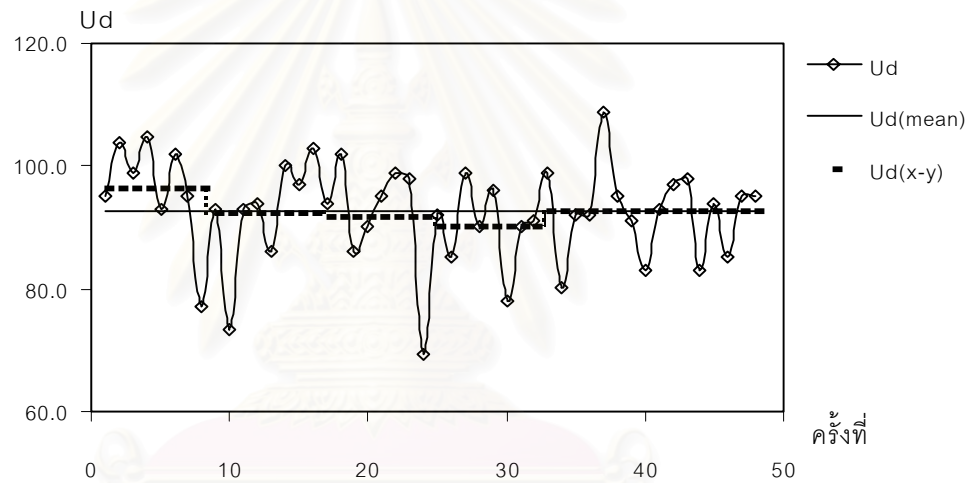
5.1 ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนักระแสตรง

5.1.1 ผลกระทบจากการเกิดเบรกดาวนั

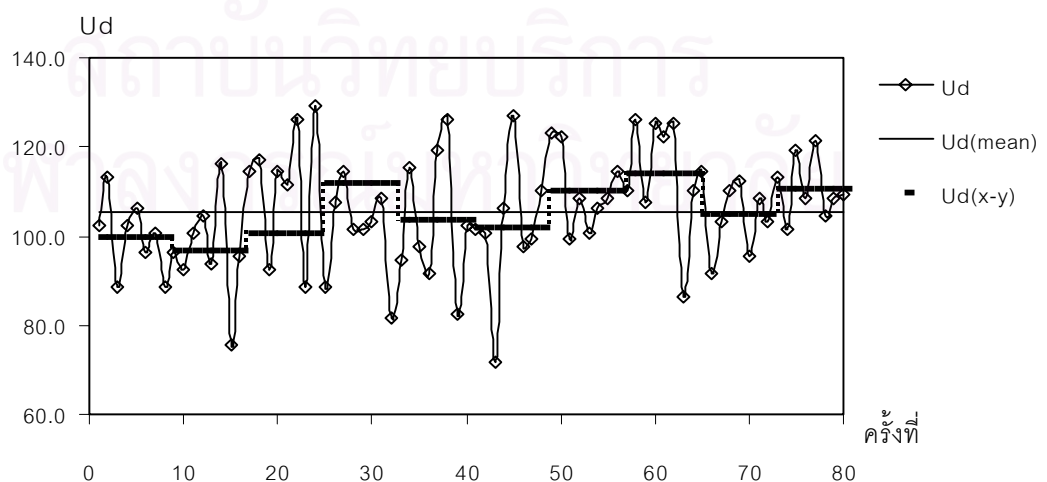
โดยทั่วไปเมื่อเกิดเบรกดาวนัในน้ำมันหม้อแปลงจะทำให้น้ำมันบางส่วนเสียสภาพและผิวฉนวนเล็กโตรดเสียหาย ทั้งนี้ความรุนแรงของเหตุการณ์ทั้งสองขึ้นกับขนาดแรงดันเบรกดาวนั (ขนาดกระแส) และจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวนั การเสียสภาพของน้ำมันหม้อแปลงคือการเกิดขึ้นของอนุภาคคาร์บอนเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงหลังการเบรกดาวนัทุกครั้ง คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับปริมาณอนุภาคคาร์บอนที่เจือปน และการที่ผิวฉนวนเล็กโตรดเสียหายก็เนื่องจากกระแสจากการเกิดเบรกดาวนั แม้จะใส่ความต้านทานเพื่อจำกัดกระแสขนาด 120 k Ω ก็ยังมีพื้นผิวฉนวนเล็กโตรดบางส่วนเสียหาย เพราะฉะนั้นในการทดลองต้องทราบสภาวะที่อนุภาคคาร์บอนและผิวฉนวนเล็กโตรดที่เสียหายเริ่มมีผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวนั

ทำการทดลองเพื่อดูผลกระทบของจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวนัว่ามีผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวนัอย่างไรบ้าง โดยการทดลองใช้ฉนวนเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ ทรงกลมรัศมีขนาด 5 mm ระยะเวลา 3 mm และทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ระยะเวลา 5 mm ณ อุณหภูมิ 30°C จากนั้นป้อนแรงดันกระแสตรงชั่ววงจนเกิดเบรกดาวนัจำนวน 48 และ 80 ครั้งตามลำดับ ในการทดลองจะควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ตลอดการทดลองให้เหมือนกันด้วยการควบคุมอนุภาคเจือปนของแข็งให้มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนและปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 30 ppm ผลการทดลองปรากฏว่าแรงดันเบรกดาวนัแต่ละช่วงมีความแตกต่างกับแรงดันเบรกดาวนัเฉลี่ย (\bar{U}_d) น้อยมากดังแสดงในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ซึ่งค่าความแตกต่างของแรงดันเบรกดาวนัแต่ละช่วงกับแรงดันเบรกดาวนัเฉลี่ย (\bar{U}_d) ที่ทรงกลมขนาด 5 mm ระยะเวลา 3 mm ที่

อุณหภูมิ 30°C มีค่าความแตกต่างมากที่สุดเท่ากับ 3.92% และสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน (V) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีทรงกลมขนาด 2.5 mm ระยะแกป 5 mm ที่อุณหภูมิ 30°C มีค่าความแตกต่างมากที่สุดเท่ากับ 8.24% และสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน (V) มีค่าใกล้เคียงกันแต่เบี่ยงเบนมากกว่ากรณีแรก นอกจากนี้ผลการทดลองทั้งสองกรณี que แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 มีความเป็นอิสระต่อกัน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.) จึงคาดว่าแรงดันเบรกดาวนัที่ทำการทดลองจำนวน 24-32 ครั้ง จะไม่ได้รับผลกระทบจากอนุภาคคาร์บอนและผิวอิเล็กทรอนิกส์ที่เสียหายจนทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวนัเปลี่ยนแปลง , ในที่นี้ $\bar{U}_d(x-y)$ คือ ค่าเฉลี่ยของการเกิดเบรกดาวนัครั้งที่ x ถึง y



รูปที่ 5.1 แรงดันเบรกดาวนักระแสดรขั้วบวกของทรงกลมรัศมี 5 mm ระยะแกป 3 mm



รูปที่ 5.2 แรงดันเบรกดาวนักระแสดรขั้วบวกของทรงกลมรัศมี 2.5 mm ระยะแกป 5 mm

เพื่อเป็นการยืนยันว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการทดลองจำนวน 24-32 ครั้งแล้วไม่ได้รับผลกระทบของอนุภาคคาร์บอนที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง โดยมีคุณสมบัติด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเหมือนเดิม จึงได้ทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงก่อนและหลังผ่านการทดลองเบรกดาว์น 24-32 ครั้ง ตามวิธีทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 156-1963 พบว่าค่า \bar{U}_d แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงมั่นใจได้ว่าการทดลองด้วยวิธีนี้ไม่มีผลกระทบจากอนุภาคคาร์บอนที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลงดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แรงดันเบรกดาว์นของน้ำมันหม้อแปลงก่อนและหลังผ่านการทดลองเบรกดาว์นจำนวน 24-32 ครั้ง ตามมาตรฐาน IEC 156-1963

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	\bar{U}_d (kV)	v
น้ำมันหม้อแปลงก่อนการทดลอง	60	60	60	60	60	58	59.6	0.01
น้ำมันหม้อแปลงหลังการทดลอง								
r=15mm, g=3mm ขั้วลบ	60	60	56	60	60	60	59.3	0.03
r=2.5mm, g=3mm ขั้วบวก	60	60	60	60	60	60	60	0.00
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	\bar{U}_d (kV)	v
น้ำมันหม้อแปลงก่อนการทดลอง	60	60	60	59	60	60	59.8	0.01
น้ำมันหม้อแปลงหลังการทดลอง								
r=10, g=5mm ขั้วบวก	60	60	60	54	60	60	59	0.04
r=10, g=5mm ขั้วลบ	59	60	60	60	60	54	58.8	0.04
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	\bar{U}_d (kV)	v
น้ำมันหม้อแปลงก่อนการทดลอง	59	60	60	60	55	57	58.5	0.04
น้ำมันหม้อแปลงหลังการทดลอง								
r=5mm, g=5mm ขั้วลบ	60	57	60	51	60	60	58	0.06
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	\bar{U}_d (kV)	v
น้ำมันหม้อแปลงก่อนการทดลอง	57	60	60	60	60	59	59.3	0.02
น้ำมันหม้อแปลงหลังการทดลอง								
r=5mm, g=5mm ขั้วบวก	60	60	57	53	60	55	57.5	0.05
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	\bar{U}_d (kV)	v
น้ำมันหม้อแปลงก่อนการทดลอง	60	60	53	51	60	60	57.3	0.07

น้ำมันหม้อแปลงหลังการทดลอง r=5mm, g=7mm ไข้วลป	58	56	51	60	60	58	57.2	0.06
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	\bar{U}_d (kV)	v
น้ำมันหม้อแปลงก่อนการทดลอง	60	60	60	60	55	60	59.2	0.03
น้ำมันหม้อแปลงหลังการทดลอง r=2.5mm, g=7mm ไข้วบวค	56	60	60	60	60	60	59.3	0.03
r=2.5mm, g=7mm ไข้วลป	60	60	60	60	60	60	60	0.00

5.1.2 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติ

เพื่อหาลักษณะการกระจายเชิงสถิติ ณ อุณหภูมิห้อง ($T \sim 30^{\circ}\text{C}$) ได้ทำการทดลองที่สภาวะต่างๆดังแสดงในตารางที่ 5.2 โดยทำการทดลองเบรกดาวนจำนวน 24 ครั้ง

ตารางที่ 5.2 สภาวะที่ทำการทดลอง

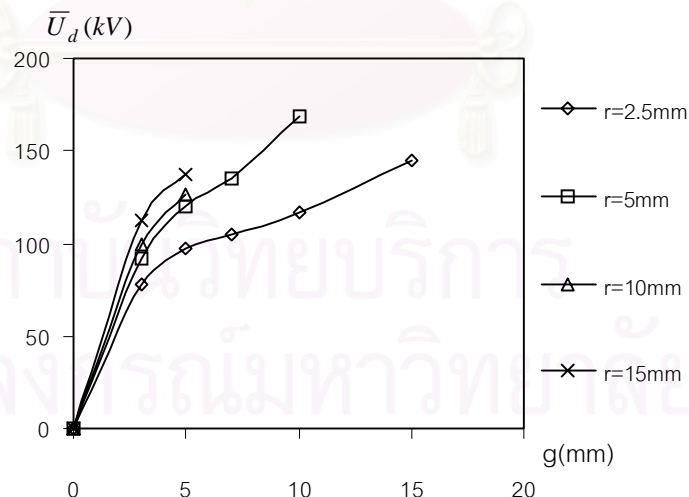
r (mm)	g (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)
2.5	3 5 7 10 15	28-32
5	3 5 7 10	
10	3 5	
15	3 5	

ความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูล จากค่าแรงดันเบรกดาวนที่ได้ ดังแสดงในภาคผนวก ข หัวข้อ ข.1 และการทดสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลโดยใช้วิธีสร้างกราฟเปรียบเทียบดังแสดงในภาคผนวก ข หัวข้อ ข.2 พบว่า ค่าแรงดันเบรกดาวนมีการแกว่งตัวขึ้นและลงรอบค่าเฉลี่ยสลับกันและไม่มีลักษณะเป็นรายคาบ และเมื่อทดสอบการเกิดซ้ำ (iteration test) จากค่าแรงดันเบรกดาวนที่ได้พบว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน โดยที่ค่า Z^* ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤตที่ระดับความน่าเชื่อถือ $\alpha = 0.10$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.959964 ดังแสดงในภาคผนวก ข หัวข้อ ข.3 เพราะฉะนั้นผลการทดลองที่ได้จึงมีความเป็นอิสระต่อกันจากการทดสอบสองวิธีดังกล่าว

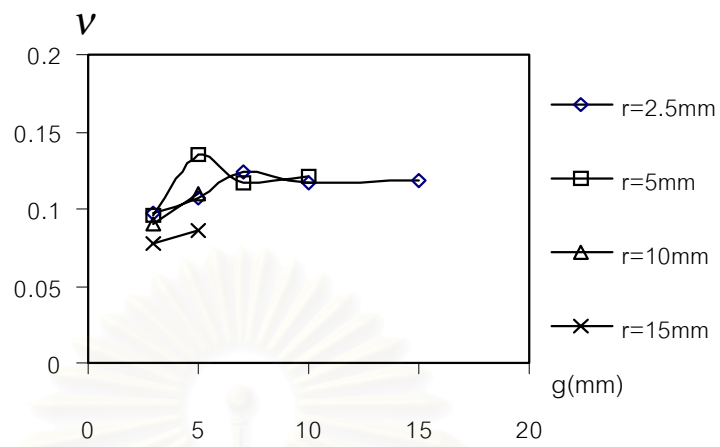
ลักษณะการกระจายเชิงสถิติของ \bar{U}_d ทำการคำนวณหาฟังก์ชันการกระจายของข้อมูลแรงดันเบรกดาวนที่ได้จากการทดลองและทำการเปรียบเทียบกับการกระจายแบบปกติและการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ ค่าพารามิเตอร์ของการกระจายทั้งสองแบบแสดงในภาคผนวก ข หัวข้อ ข.4 และการสร้างกราฟเปรียบเทียบแสดงในภาคผนวก ข หัวข้อ ข.5

เนื่องจากผลต่างของความน่าจะเป็นของการกระจายของข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎีที่มากที่สุด (d_{\max}) เมื่อเปรียบเทียบกับ การกระจายแบบปกติและการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ พบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.16 สำหรับการกระจายแบบปกติ และมีค่าน้อยกว่า 0.14 สำหรับการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ และจากการทดสอบสมมติฐานด้วยวิธี Kolmogorov พบว่าฟังก์ชันการกระจายแบบต่อเนื่องที่ได้จากการทดลองเป็นจำนวน n ครั้ง สามารถแทนด้วยการกระจายทางทฤษฎีได้ก็ต่อเมื่อ $d_{\max} < k_{n,\alpha}$, ค่าวิกฤต $k_{n,\alpha}$ เมื่อทำการทดลองเป็นจำนวน 24 ครั้ง ที่ระดับความสำคัญ $\alpha = 0.10$ มีค่าเท่ากับ 0.242 ซึ่ง d_{\max} มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นการกระจายที่ได้จากการทดลองแรงดันเบรกดาวนจึงสามารถแทนด้วยการกระจายแบบปกติและการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ได้เป็นอย่างดี แต่เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ U_{d0} ของการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ ที่ $r = 2.5 \text{ mm}$ $g = 15 \text{ mm}$ ขั้วบวก, $r = 5 \text{ mm}$ $g = 3 \text{ mm}$ ขั้วบวกและ $r = 5 \text{ mm}$ $g = 10 \text{ mm}$ ขั้วลบ พบว่ามีค่าต่ำกว่าศูนย์ ซึ่งเป็นไปไม่ได้จึงไม่เหมาะสมต่อการใช้คำนวณเปรียบเทียบต่อไป การวิเคราะห์เปรียบเทียบต่างๆจึงอยู่บนสมมติฐานที่ว่าแรงดันเบรกดาวนที่ได้จากการทดลองมีการกระจายแบบปกติ

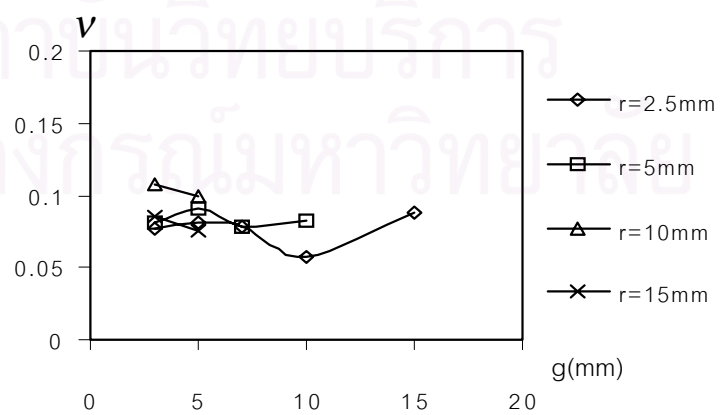
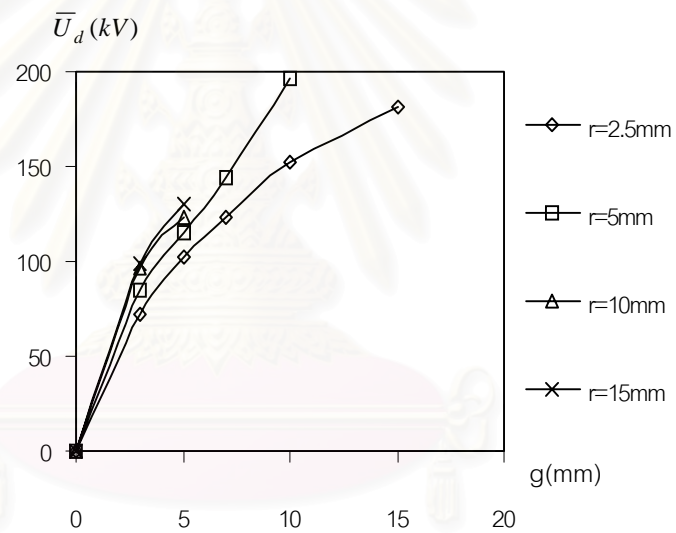
แรงดันเบรกดาวน (\bar{U}_d) และสัมประสิทธิ์ความเปียงเบน (v) กับระยะแกป (g) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง \bar{U}_d และ v กับระยะแกป พบว่า \bar{U}_d มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดรัศมีทรงกลมและระยะแกปที่เพิ่มขึ้นทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดย v มีค่าอยู่ในช่วง 0.08-0.13 สำหรับขั้วบวก และ v มีค่าอยู่ในช่วง 0.06-0.11 สำหรับขั้วลบดังแสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 \bar{U}_d และ v กับ g ที่ทรงกลมขนาดต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30 °C ขั้วบวก

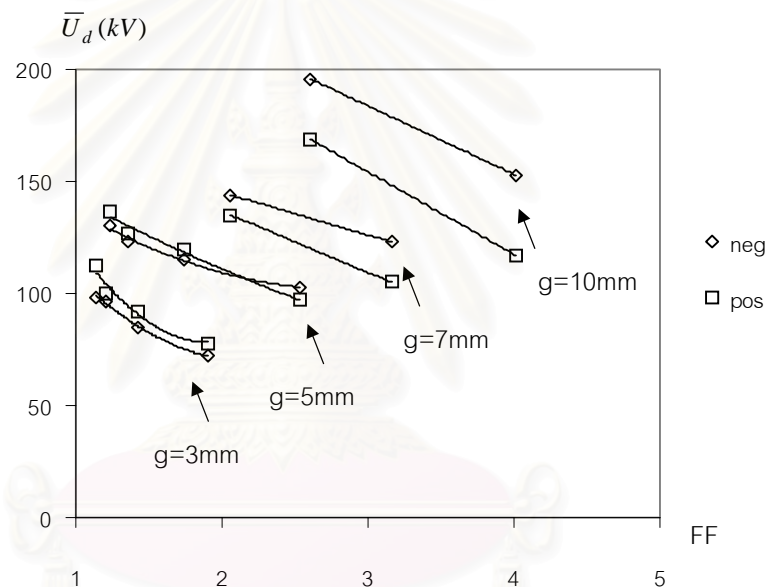


รูปที่ 5.3 \bar{U}_d และ v กับ g ที่ทรงกลมขนาดต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30°C ซ้ำบวก (ต่อ)



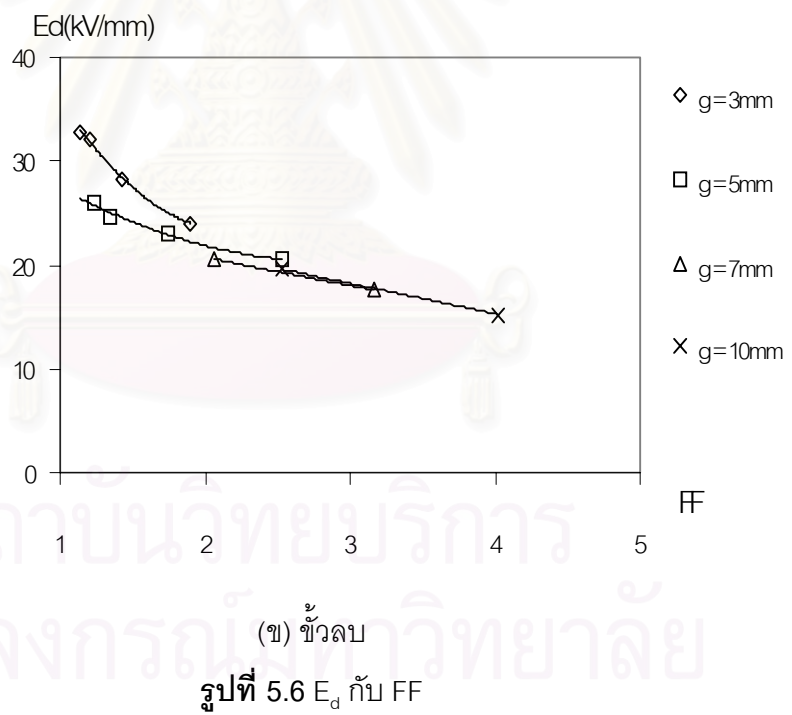
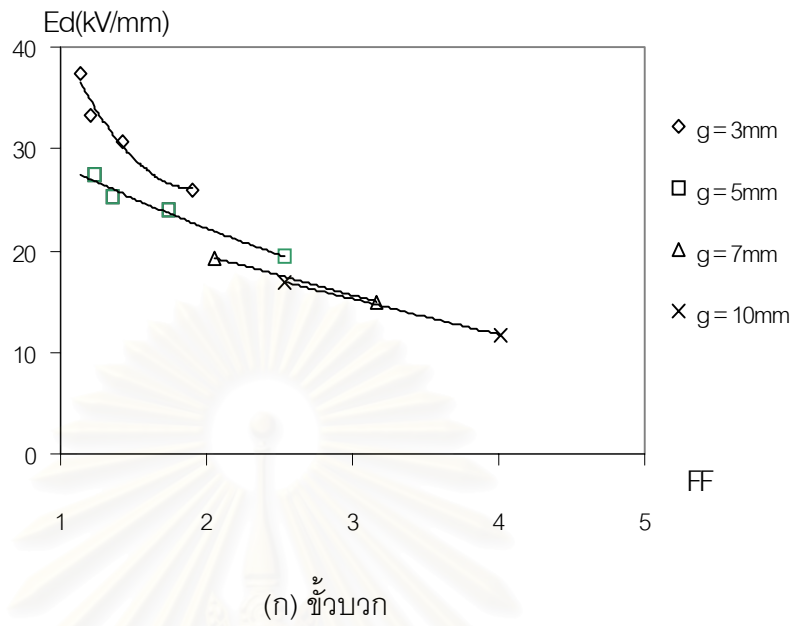
รูปที่ 5.4 \bar{U}_d และ v กับ g ที่ทรงกลมขนาดต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30°C ซ้ำลบ

แรงดันเบรกดาวน (\bar{U}_d) กับชั่วแรงดันและแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณาผลกระทบของชั่วแรงดันและแรงดันเบรกดาวน (\bar{U}_d) ที่อิเล็กโตรดทรงกลมขนาดต่างๆ พบว่าที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าคงที่เมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้นแรงดันเบรกดาวนจะสูงขึ้นทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ส่วนกรณีเมื่อระยะแกปคงที่พบว่าแรงดันเบรกดาวนมีค่าลดลงตามขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมที่เล็กลงหรือแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงขึ้นทั้งชั่วบวกและชั่วลบ โดยที่แรงดันเบรกดาวนชั่วลบจะมากกว่าแรงดันเบรกดาวนชั่วบวกเมื่อการกระจายตัวสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงที่ค่า FF มากกว่า 2.1 และแรงดันเบรกดาวนชั่วบวกจะมากกว่าแรงดันเบรกดาวนชั่วลบเมื่อการกระจายตัวสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยที่ค่า FF น้อยกว่า 2.1 ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 \bar{U}_d กับ FF และชั่วแรงดัน

ความเครียดสนามไฟฟ้า (E_d) กับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (FF) จากการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนตามความสัมพันธ์ $E = \frac{U_d}{g}$ พบว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดทรงกลมหรือตามค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ลดลง โดยที่ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ระยะแกป 3 mm มีค่าสูงกว่าที่ระยะแกป 5 mm , ระยะแกป 7 mm และระยะแกป 10 mm ตามลำดับ หรือที่ระยะแกปแคบมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่ระยะแกปกว้างดังแสดงในรูปที่ 5.6

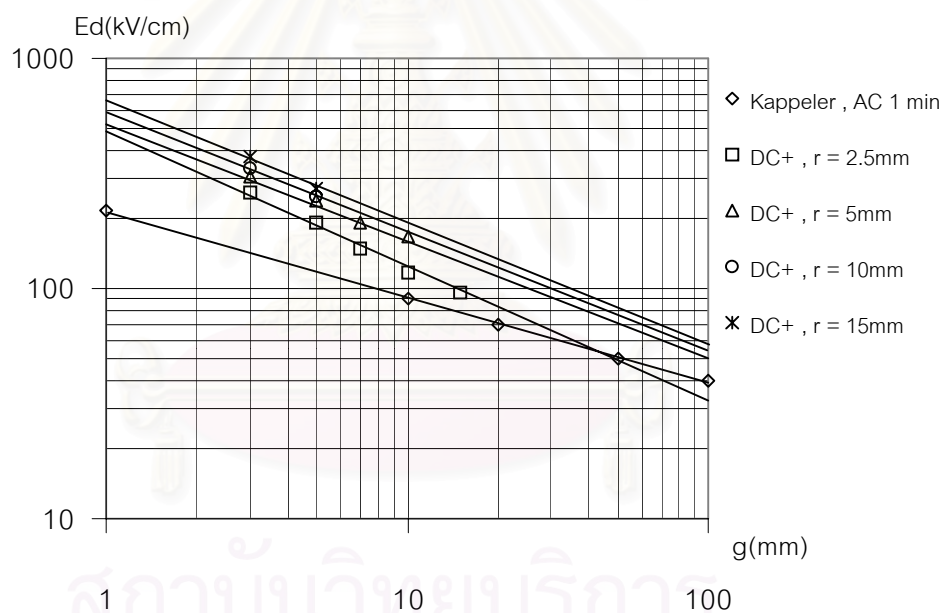


5.1.3 การเปรียบเทียบกับข้อมูลเพื่อการออกแบบ

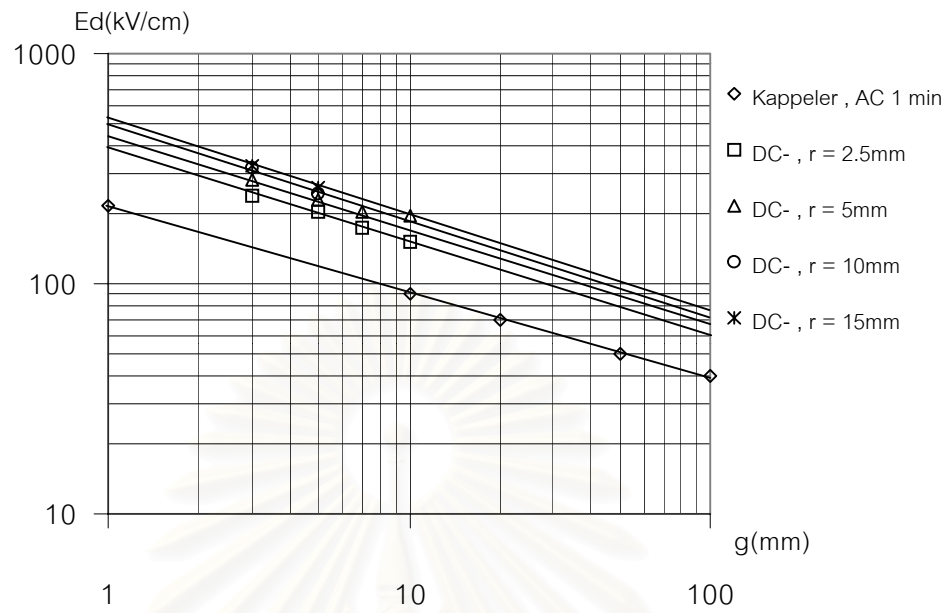
ผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดลองแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงสามารถนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อการออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ดีเพียงใด จึงนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอดีตที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยเปรียบเทียบกับแรงดันกระแสสลับเพราะฐานข้อมูลเกี่ยวกับแรงดันกระแสตรงเพื่อการออกแบบที่เก็บค่าเป็นสถิติหาไม่ได้ จึงพิจารณาจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนของแรงดันกระแสสลับจากผลการทดลองของ Kappeler [23] เนื่องจากเป็นผลการทดลองที่ได้นำมาใช้ในการออกแบบการฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าของบริษัท H. Weidmann AG Ltd. ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ซึ่งแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนกับระยะแกปเมื่อทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับในเวลา 1 นาที ผลการเปรียบเทียบพบว่า กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนัของแรงดันกระแสตรงกับระยะแกปมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเมื่อสร้างในสเกลล็อก-ล็อกทุกขนาดอิเล็กโตรดทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เส้นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนัของแรงดันกระแสตรงขั้วบวกที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5, 10 และ 15 mm มีลักษณะขนานกับกราฟความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนจากการทดลองของ Kappeler ส่วนที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ของแรงดันกระแสตรงขั้วบวกเส้นกราฟจะมีความชันมากกว่าผลการทดลองของ Kappeler และเส้นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนัของแรงดันกระแสตรงขั้วลบที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5, 5, 10 และ 15 mm มีลักษณะขนานกับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนจากการทดลองของ Kappeler ทั้งนี้อาจเนื่องจากอิเล็กโตรดที่ใช้ทดลองมีลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าแตกต่างกันทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนัลดลงเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากหรืออิเล็กโตรดมีขนาดเล็กและตามระยะแกปที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.7

จากผลการทดลองเบรกดาวนัด้วยวิธีแรงดันเพิ่มของแรงดันกระแสตรง สามารถแทนด้วยการกระจายแบบปกติได้ดีมีค่า $d_{\max} < \text{ค่าวิกฤต } k_{n,\alpha}$ ดังนั้นการกระจายของผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนัจึงแทนด้วยการกระจายแบบปกติได้ดี โดยใช้พารามิเตอร์ \bar{U}_d และ v ของฟังก์ชัน ความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวนัมาคำนวณหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนั แต่เนื่องจากการทดลองของแรงดันกระแสตรงเป็นแบบแรงดันเพิ่มแบบต่อเนื่องมีอัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 5 kV/s การคำนวณหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวนัต้องทำการคำนวณด้วยวิธีในหัวข้อ 3.5 โดยการกำหนดให้ $\Delta u = 5 \text{ kV}$ โดยค่าที่ได้จะเป็นความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนัต่อแรงดันกระแสตรงในเวลา 1 วินาที จากการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่

ข.11และตารางที่ ข.12 ได้ความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาว์นของแรงดันกระแสตรงชั่วบวกประมาณอันดับควอนไทล์ที่ 22% และได้ความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาว์นของแรงดันกระแสตรงชั่วลบประมาณอันดับควอนไทล์ที่ 26% ซึ่งเป็นข้อมูลเพื่อการออกแบบได้เพราะมีแนวโน้มขนานกับผลการทดลองของ Kappeler แต่เนื่องจากเป็นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาว์นของแรงดันกระแสตรงกับระยะแถบที่มีอันดับควอนไทล์ประมาณ 22-26% จึงลองใช้วิธีทางสถิติคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาว์นของแรงดันกระแสตรงกับระยะแถบที่มีอันดับควอนไทล์ที่ 1% ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.11และตารางที่ ข.12 พบว่าสามารถเป็นข้อมูลเพื่อการออกแบบได้เช่นกันและมีโอกาสเกิดเบรกดาว์นเพียง 1% ทำให้นำข้อมูลไปออกแบบได้โดยและยังลดค่าตัวคูณแฟกเตอร์เพื่อความปลอดภัยด้วย แต่อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเป็นวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติจึงควรระมัดระวัง ดังแสดงในรูปที่ 5.8

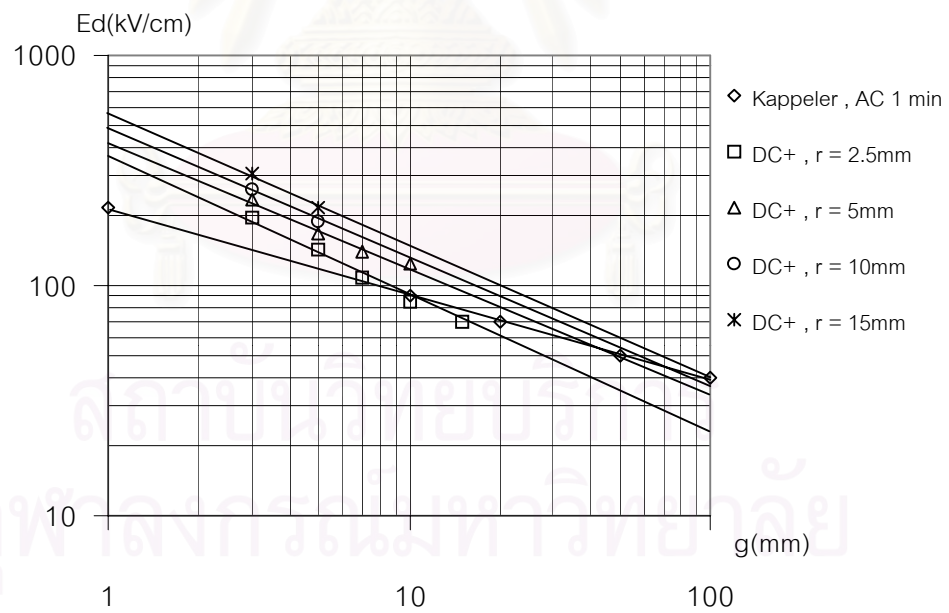


(ก) ชั่วบวก (อันดับควอนไทล์ที่เกิดเบรกดาว์นประมาณ 22%)

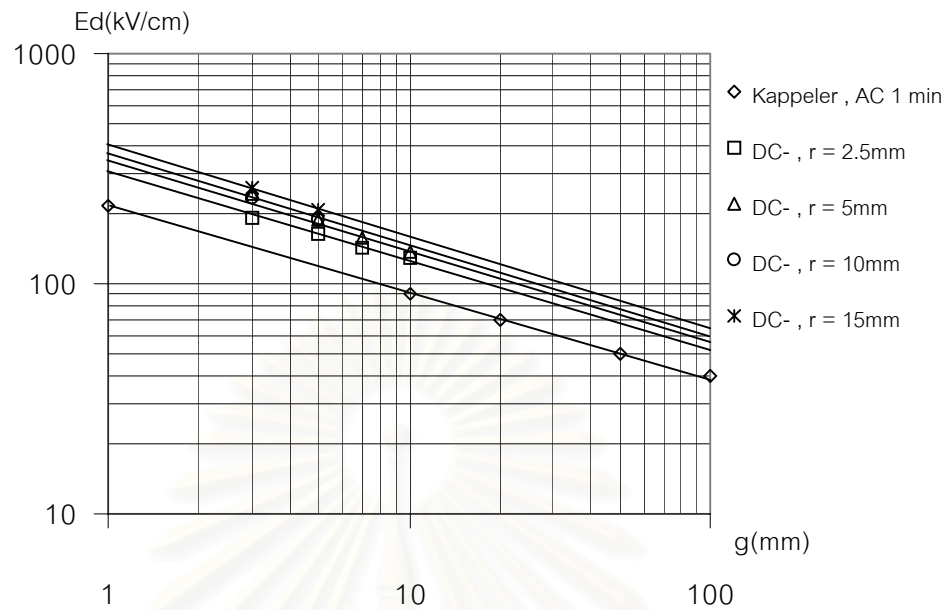


(ข) ขั้วลบ (อันดับควอนไทล์ที่เกิดเบรกดาว์นประมาณ 26%)

รูปที่ 5.7 ความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป



(ก) ขั้วบวก (อันดับควอนไทล์ที่เกิดเบรกดาว์น 1%)



(ข) ขั้วลบ (อันดับควอนไทล์ที่เกิดเบรกดาวน 1%)

รูปที่ 5.8 ความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป

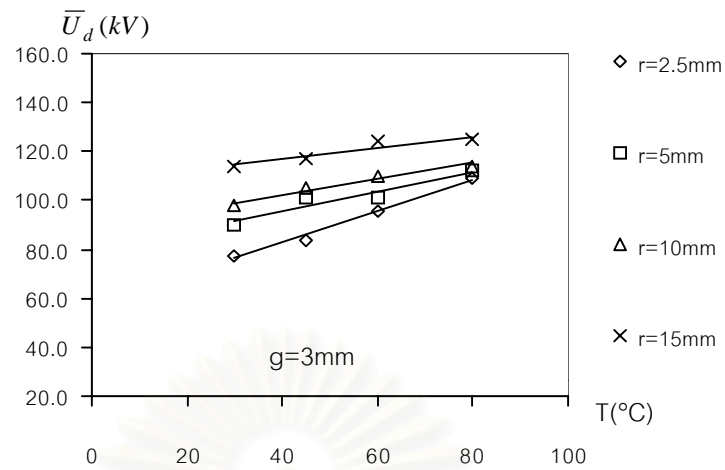
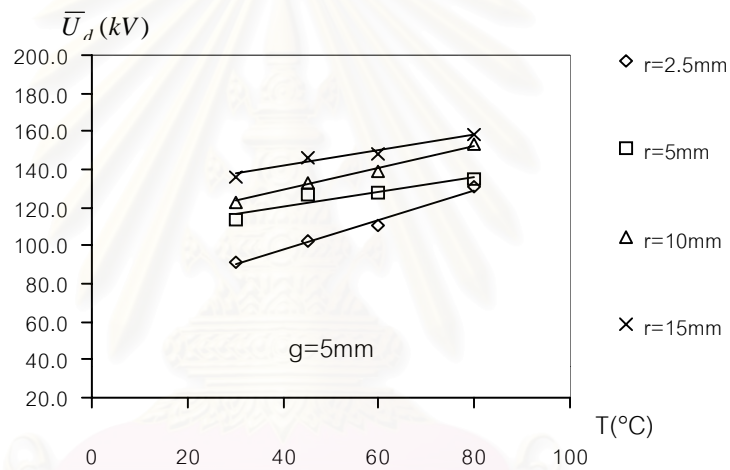
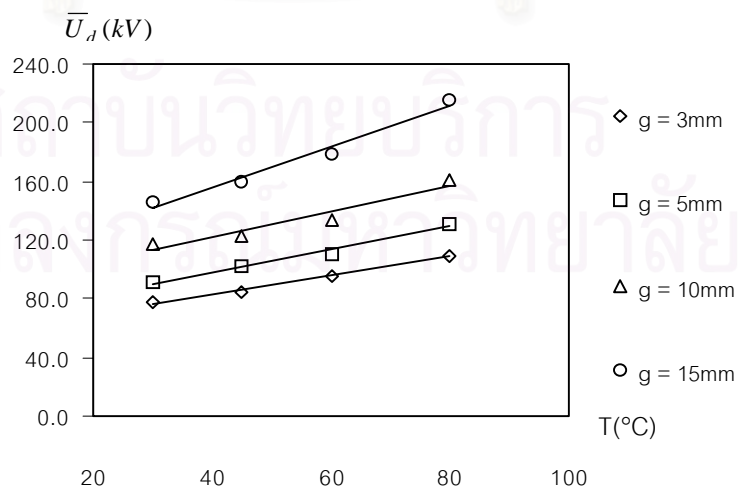
5.1.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในช่วง $30-80^{\circ}\text{C}$ จะป้อนแรงดันจำนวน 8 ครั้ง ที่สภาวะต่างๆดังแสดงในตารางที่ 5.3 ค่าแรงดันเบรกดาวนแต่ละครั้ง , ค่าแรงดันเบรกดาวนเฉลี่ย (U_d) และสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน (V) แสดงในภาคผนวก ค

ตารางที่ 5.3 สภาวะที่ทำการทดลอง

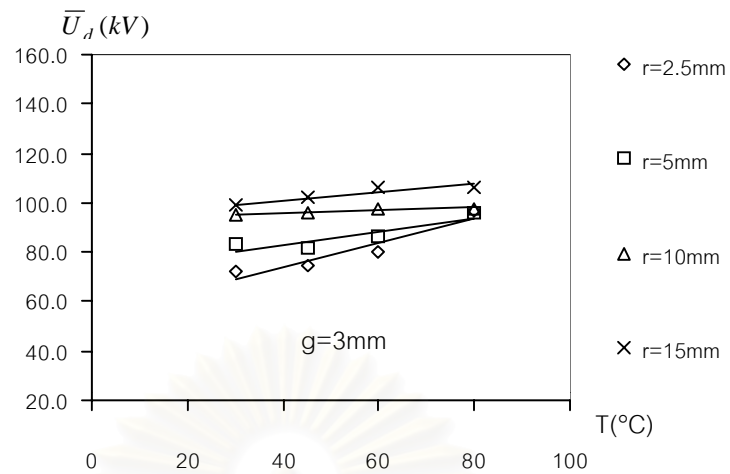
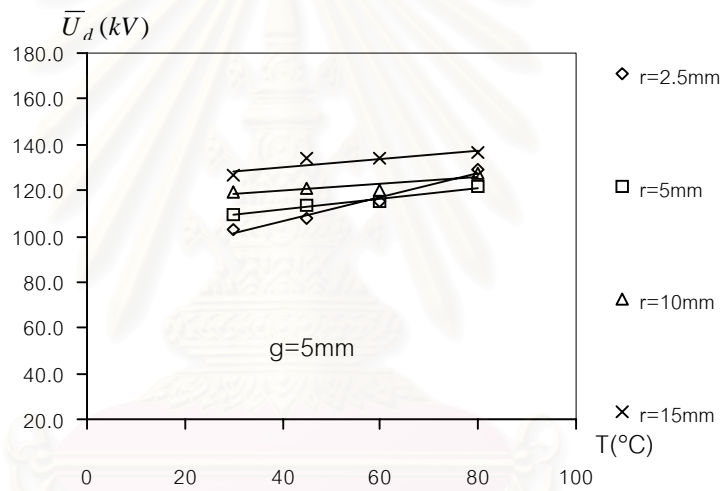
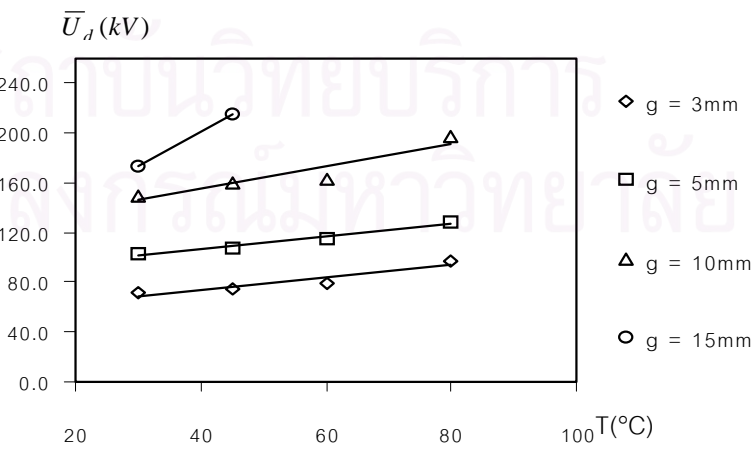
r(mm)	g(mm)	T($^{\circ}\text{C}$)
2.5	3 5 10 15	30 45 60 และ 80
5	3 5	
10	3 5	
15	3 5	

U_d กับอุณหภูมิ ความสัมพันธ์ระหว่าง U_d กับอุณหภูมิที่อิเล็กโตรดทรงกลมและระยะแกปต่างๆ พบว่า U_d เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และ U_d มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 80°C ทุกขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมและระยะแกปทั้งขั้วบวกและขั้วลบดังแสดงในรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10

(ก) ระยะแกป (g) = 3 mm ชั่วบวก(ข) ระยะแกป (g) = 5 mm ชั่วบวก

(ค) ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ชั่วบวก

รูปที่ 5.9 แรงดันเบรกดาวน์ (\bar{U}_d) ชั่วบวกกับอุณหภูมิ

(ก) ระยะแกป (g) = 3 mm ขั้วลบ(ข) ระยะแกป (g) = 5 mm ขั้วลบ

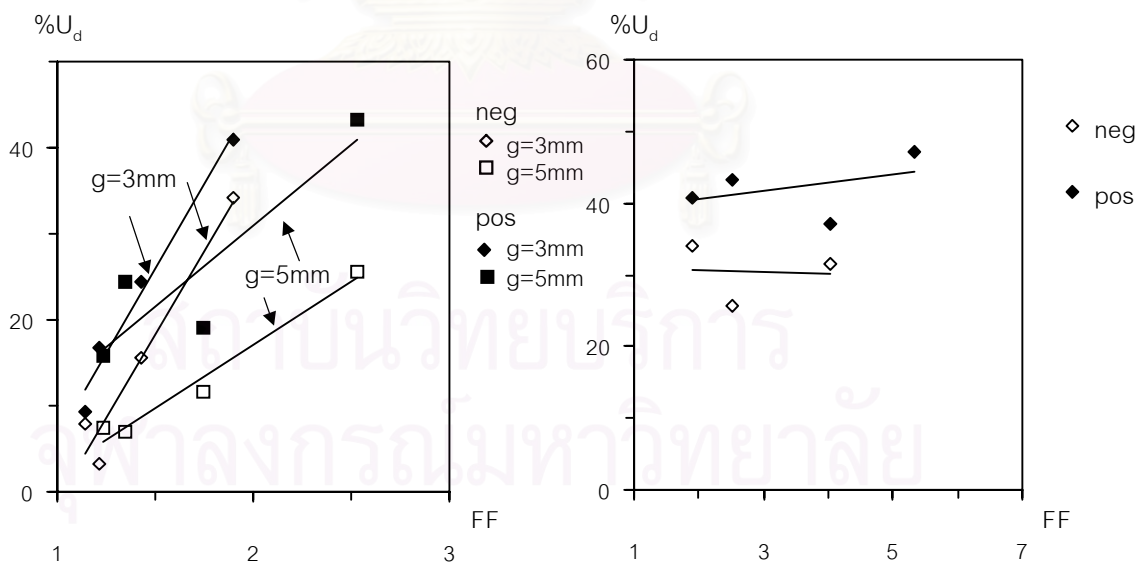
(ค) ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ขั้วลบ

รูปที่ 5.10 แรงดันเบรกดาวน (\bar{U}_d) ขั้วลบกับอุณหภูมิ

เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดันตามอุณหภูมิ(% U_d)กับFF พิจารณาผลกระทบของแพ็คเกจอร์สนามไฟฟ้าที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันกระแสตรงทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยเปรียบเทียบ $\%U_d$ ที่คำนวณจากผลต่างของ $U_{d,80^\circ C}$ กับ $U_{d,30^\circ C}$ ตามสมการ

$$\%U_d = \frac{U_{d,80^\circ C} - U_{d,30^\circ C}}{U_{d,30^\circ C}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ ค.12 และตารางที่ ค.24 โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\%U_d$ กับแพ็คเกจอร์สนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.11 พบว่าเมื่อทรงกลมมีขนาดเล็กกลงหรือแพ็คเกจอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น $\%U_d$ มีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.11(ก) โดยที่ค่าแพ็คเกจอร์สนามไฟฟ้าต่ำกว่า 1.3 $\%U_d$ ที่ระยะแกป 3 mm มีค่าใกล้เคียงกับ $\%U_d$ ที่ระยะแกป 5 mm แต่เมื่อค่าแพ็คเกจอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 1.3 $\%U_d$ ที่ระยะแกป 3 mm มีค่ามากกว่า $\%U_d$ ที่ระยะแกป 5 mm อย่างชัดเจนทั้งกรณีขั้วบวกและขั้วลบ ส่วนการเปรียบเทียบเฉพาะทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ที่ระยะแกปต่างๆ พบว่า $\%U_d$ มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเกือบคงที่โดย $\%U_d$ ขั้วบวกมีค่าประมาณ 40% และ $\%U_d$ ขั้วลบมีค่าประมาณ 30% ซึ่ง $\%U_d$ ขั้วบวกมีค่ามากกว่า $\%U_d$ ขั้วลบ ดังแสดงในรูปที่ 5.11(ข)



(ก) ระยะแกป 3 และ 5mm

(ข) ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm

รูปที่ 5.11 $\%U_d$ กับ FF

5.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนั้กระแสดตรง

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวนั้กับระยะแกป ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 พบว่าการเพิ่มขึ้นของระยะแกปมีผลทำให้แรงดันเบรกดาวนั้มีค่าสูงขึ้นทั้งชั่วบวกและชั่วลบ โดยกราฟมีลักษณะโค้งแบบโพลิโนเมียลดังความสัมพันธ์ [8]

$$V = kg^n$$

โดยที่

V = ค่าแรงดันเบรกดาวนั้

k = ค่าคงที่

g = ระยะแกป

n = แฟกเตอร์โพลิโนเมียล มีค่าระหว่าง 0-1

มีความหมายว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนั้มีขนาดลดลงตามระยะแกปที่กว้างขึ้น การเพิ่มระยะแกปเป็นการเพิ่มปริมาณของสิ่งเจือปนหรือจุดอ่อนแอ (weak link) ที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรด อีกทั้งความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณผิวทรงกลมมีค่าสูงขึ้นและมีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนั้ที่ระยะแกปแคบจึงมีค่าสูงกว่าที่ระยะแกปกว้าง ซึ่งใช้อธิบายความสัมพันธ์ของความเครียดสนามไฟฟ้า (E_d) กับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (FF) ในรูปที่ 5.6

เมื่อระยะแกปคงที่ การทำให้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วยการลดขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม ทำให้แรงดันเบรกดาวนั้มีค่าลดลงตามขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.5 สามารถอธิบายโดยพิจารณาการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด กล่าวคือที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวทรงกลมมีค่าสูงและการกระจายสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูง ทำให้โอกาสเกิดเบรกดาวนั้ตามกลไกการเกิดเบรกดาวนั้เกิดขึ้นได้ง่าย

ในการพิจารณาผลของชั่วแรงดัน เมื่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงการกระจายของสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง ดังกรณีทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ที่ระยะแกปมากกว่าหรือเท่ากับ 5 mm แรงดันเบรกดาวนั้ชั่วลบจะมีค่าสูงกว่าแรงดันชั่วบวก แต่ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ดังกรณีทรงกลมรัศมีขนาด 15 mm แรงดันเบรกดาวนั้ชั่วบวกจะมีค่าสูงกว่าแรงดันชั่วลบ แนวโน้มลักษณะนี้อธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวนั้กับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ระยะแกปคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าน้อยกว่า 2.1 แรงดันเบรกดาวนั้ชั่วบวกจะสูงกว่าแรงดันชั่วลบ แต่เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามากกว่า 2.1 แรงดันเบรกดาวนั้ชั่วลบจะสูงกว่าแรงดันชั่วบวก กล่าวคือในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะมีผลกระทบของประจุค้าง

(space charge) เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายทรงกลมถึงค่าเริ่มต้นเกิดดิสชาร์จบางส่วน การเกิดเบรกดาวนซ์ของแรงดันขั้วบวกประจุจะวิ่งจากน้ำมันหม้อแปลงมาที่ขั้วอิเล็กโตรดทรงกลม ทำให้ประจุบวกซึ่งมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำจับกลุ่มอยู่บนผิวทรงกลม เป็นผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาวนซ์ง่ายขึ้น ส่วนกรณีการเกิดเบรกดาวนซ์ของแรงดันขั้วลบอิเล็กโตรดทรงกลมจะฉีดอิเล็กตรอนให้กับน้ำมันหม้อแปลง ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณผิวทรงกลมลดลง เพราะฉะนั้นการเกิดเบรกดาวนซ์ของขั้วลบจึงเกิดยากกว่าของขั้วบวก ทำให้แรงดันเบรกดาวนซ์ขั้วลบสูงกว่าแรงดันขั้วบวกในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ส่วนกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยเช่นกรณีอิเล็กโตรดทรงกลมขนาดใหญ่การเกิดเบรกดาวนซ์จะเป็นการเบรกดาวนซ์โดยตรง (direct breakdown) ไม่มีผลกระทบของประจุค้างการเกิดเบรกดาวนซ์ของแรงดันขั้วบวกจะสูงกว่าแรงดันขั้วลบ

ทางด้านผลกระทบของอุณหภูมิ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิต่างๆกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติหลายตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ได้แก่

-คุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น ความหนืด , ความหนาแน่น เป็นต้น

-คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ แรงตึงผิว , ความสามารถในการละลายของความชื้นและก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งพบว่ามีความเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น [3,25]

-คุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น การนำกระแส , ความสูญเสียไดอิเล็กตริก เป็นต้น

จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 30-80°C ค่าแรงดันเบรกดาวนซ์จะสูงขึ้นทุกขนาดอิเล็กโตรดและระยะแก๊ปทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยแรงดันเบรกดาวนซ์สูงสุดที่อุณหภูมิ 80°C

การเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาวนซ์ตามอุณหภูมิอาจเกิดจากผลกระทบของคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งในคุณสมบัติที่กล่าวมานี้ ซึ่งเมื่อมองที่คุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการนำกระแสและความสูญเสียไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น ความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะสูงขึ้นค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ควรจะมีค่าต่ำลงแต่ผลการทดลองที่ได้ไม่ใช่ จึงใช้เหตุผลนี้อธิบายไม่ได้

จากคุณสมบัติทางเคมีที่ว่าความสามารถในการละลายของความชื้นและก๊าซจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจากกลไกการเกิดดิสชาร์จหรือเบรกดาวนซ์ของแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงโดยทั่วไป จะปรากฏเมื่อมีฟองก๊าซเกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงจากปรากฏการณ์ EHD หรือความร้อนจากความหนาแน่นกระแสสูงในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง และเมื่อน้ำมันหม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายของก๊าซเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ทำให้ปริมาณฟองก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงลดลงโอกาสเกิดเบรกดาวนซ์จึงยากขึ้น การที่แรงดันเบรกดาวนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นก็สามารถอธิบายได้

จากรูปที่ 5.11(ก) พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาวนั้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายความสัมพันธ์นี้โดยใช้ทฤษฎีปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง (stress volume หรือ critical volume)

เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ (อิเล็กโตรดทรงกลมมีขนาดใหญ่) แม้ว่าความสามารถในการละลายของก๊าซจะมีค่าสูงที่สุดสูงก็ตาม แต่เนื่องจากการกระจายสนามไฟฟ้ามีลักษณะเกือบสม่ำเสมอ ปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีบริเวณกว้าง บริเวณส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงนี้จึงยังคงมีฟองก๊าซอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้แรงดันเบรกดาวเปลี่ยนแปลงน้อยตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูง (อิเล็กโตรดทรงกลมมีขนาดเล็ก) การกระจายสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงบริเวณผิวทรงกลม เนื่องจากทรงกลมมีขนาดเล็กปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีบริเวณแคบ เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้นความสามารถในการละลายของฟองก๊าซเพิ่มขึ้น ทำให้ฟองก๊าซที่อยู่ในบริเวณปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีจำนวนน้อยกว่าที่อุณหภูมิห้องมาก การเกิดเบรกดาวจึงยากขึ้นทำให้แรงดันเบรกดาวมีค่าเพิ่มขึ้นมากตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

แนวโน้มลักษณะนี้ได้รับการพิสูจน์อีกครั้งจากผลการทดลองที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5mm ที่ระยะแกปต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.11(ข) พบว่า $%U_d$ มีลักษณะเกือบคงที่มีค่าเพิ่มตามแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย โดย $%U_d$ ขั้วบวกมีค่าประมาณ 40% และ $%U_d$ ขั้วลบมีค่าประมาณ 30% การที่ทรงกลมขนาดเล็กปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเพิ่มขึ้นน้อยเมื่อระยะแกปกว้างขึ้นเพราะความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงจะอยู่บริเวณปลายทรงกลม (sphere tip) ทำให้ $%U_d$ มีค่าเกือบคงที่ ทั้งนี้การที่ $%U_d$ ขั้วบวกมีค่ามากกว่า $%U_d$ ขั้วลบ สามารถอธิบายด้วยผลของขั้วแรงดันต่อลักษณะของสตรีมเมอร์ โดยส่วนใหญ่ลักษณะของสตรีมเมอร์ขั้วลบจะเป็นสตรีมเมอร์ความเร็วต่ำ (slow streamer) มีรูปร่างแบบพุ่ม (bushy) หรือต้นไม้ (tree) โดยคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความเร็ว , จำนวนพัลส์กระแสและพัลส์แสงที่เปล่งออกมาจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนสตรีมเมอร์ขั้วบวกส่วนใหญ่เป็นสตรีมเมอร์ความเร็วสูง (fast streamer) มีรูปร่างแบบแนวเดี่ยว (filamentary) [16,34] โดยคุณสมบัติต่างๆ ไม่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโอกาสเกิดเบรกดาวของขั้วบวกจะยากขึ้นกว่าของขั้วลบเพราะขั้วลบมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วและพัลส์กระแสเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ $%U_d$ ของขั้วบวกมีค่ามากกว่า $%U_d$ ของขั้วลบ

นอกจากนี้ที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าใกล้เคียงกัน โดยปกติปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากขึ้นตามระยะแกปที่กว้างขึ้น ทำให้ที่ระยะแกปสูงมีปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนาม

ไฟฟ้าสูงมากกว่าที่ระยะแกปแคบ ดังนั้น $%U_d$ ที่ระยะแกป 5 mm จึงมีค่าต่ำกว่า $%U_d$ ที่ระยะแกป 3 mm ดังแสดงในรูปที่ 5.11(ก)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนส์วิตชิงอิมพัลส์

กล่าวถึงผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนส์วิตชิงอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน (250/2500 μ s) ของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์ ที่ได้จากการทดลองแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ทั้งชั่วคราวและชั่วถาวรโดยหาค่าแรงดันเบรกดาวนส์ที่ควอนไทล์อันดับต่ำ (lower order quantile) ด้วยวิธีแรงดันเพิ่ม (rising voltage) แรงดันเพิ่มแต่ละขั้น (Δu) เท่ากับ 7 kV , แรงดันเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันที่คาดว่าจะเกิดเบรกดาวนส์ประมาณ 3s (ประมาณ 30-40 kV) , จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันแต่ละขั้น (m) เท่ากับ 5 ครั้งและหลังการเกิดเบรกดาวนส์รอบประมาณ 2 นาทีก่อนเริ่มป้อนแรงดันเริ่มต้นครั้งต่อไป หาค่าเฉลี่ยจากค่าแรงดันเบรกดาวนส์จำนวน 6 ครั้ง และแสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนส์ที่สภาวะต่างๆ รวมทั้งการวิเคราะห์หาเหตุผลที่เกิดขึ้นจากผลการทดลอง

6.1 ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนส์วิตชิงอิมพัลส์

6.1.1 ผลกระทบจากการเกิดเบรกดาวนส์

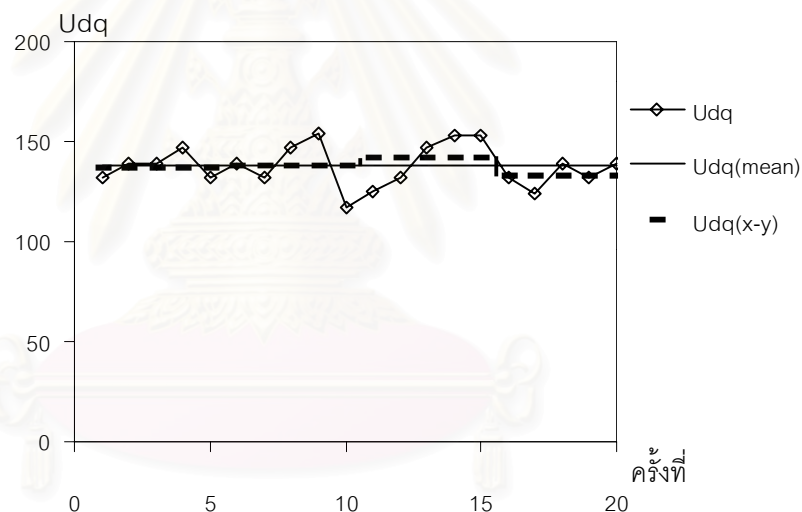
โดยทั่วไปเมื่อเกิดเบรกดาวนส์ในน้ำมันหม้อแปลงจะทำให้น้ำมันบางส่วนเสียสภาพและฉนวนอิเล็กทรอนิกส์เสียหาย ทั้งนี้ความรุนแรงของเหตุการณ์ทั้งสองขึ้นกับขนาดแรงดันเบรกดาวนส์ (ขนาดกระแส) และจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวนส์ เช่นเดียวกับการทดลองการเกิดเบรกดาวนส์ของแรงดันกระแสตรง แต่การทดลองการเกิดเบรกดาวนส์ด้วยแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์จะมีความเสียหายของฉนวนอิเล็กทรอนิกส์มากกว่าเนื่องจากขนาดแรงดันเบรกดาวนส์ของแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์จะสูงกว่าแรงดันกระแสตรง ซึ่งเป็นไปตามกลไกการเกิดเบรกดาวนส์ของแรงดันแต่ละชนิด ในการทดลองจะจำกัดขนาดกระแสจากการเกิดเบรกดาวนส์เพื่อลดความเสียหายของฉนวนอิเล็กทรอนิกส์โดยการใส่ความต้านทานขนาด 1 k Ω อนุกรมกับชุดทดลอง โดยก่อนอื่นต้องทราบสภาวะที่อุณหภูมิคาร์บอนและฉนวนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายเริ่มมีผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวนส์

ทำการทดลองเพื่อดูผลกระทบของจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวนส์ว่ามีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวนส์อย่างไรบ้าง การทดลองใช้ฉนวนแบบทรงกลม-ระนาบ ทรงกลมรัศมีขนาด 10 mm ระยะแกบ 3 mm ที่อุณหภูมิ 30 $^{\circ}$ C ป้อนแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราวและชั่วคราวเพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาวนส์ที่ควอนไทล์อันดับต่ำ จำนวน 20 และ 13 ครั้ง ตามลำดับ

การทดลองด้วยแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราวที่ทรงกลมรัศมี 10 mm ระยะแกบ 3 mm มีพารามิเตอร์ในการทดลองดังนี้

- $u_0 = -102.56$ kV
- $\Delta u \approx -7$ kV
- $m = 5$
- $n = 20$ ครั้ง

ผลการทดลองพบว่า แรงดันเบรกดาวนส์วิตชิงอิมพัลส์ (U_{dq}) มีค่าแกว่งตัวขึ้นและลงรอบค่าแรงดันเบรกดาวนส์เฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 6.1 เมื่อดูจากรูปกราฟและทดสอบด้วยวิธี iteration test แล้วมีความเป็นอิสระต่อกัน (รายละเอียดในภาคผนวก ง หัวข้อ ง.1 และ ง.2) ทั้งนี้ค่าแรงดันเบรกดาวนส์แต่ละช่วง ($\bar{U}_{dq(x-y)}$) มีความแตกต่างกับแรงดันเบรกดาวนส์เฉลี่ยน้อยมากดังแสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งมีความแตกต่างมากที่สุดเท่ากับ 3.27 % และสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน (V) มีค่าแกว่งตัวรอบค่าเฉลี่ย ในที่นี้ $\bar{U}_{dq(x-y)}$ คือ ค่าเฉลี่ยของการเกิดเบรกดาวนส์ครั้งที่ x ถึง y

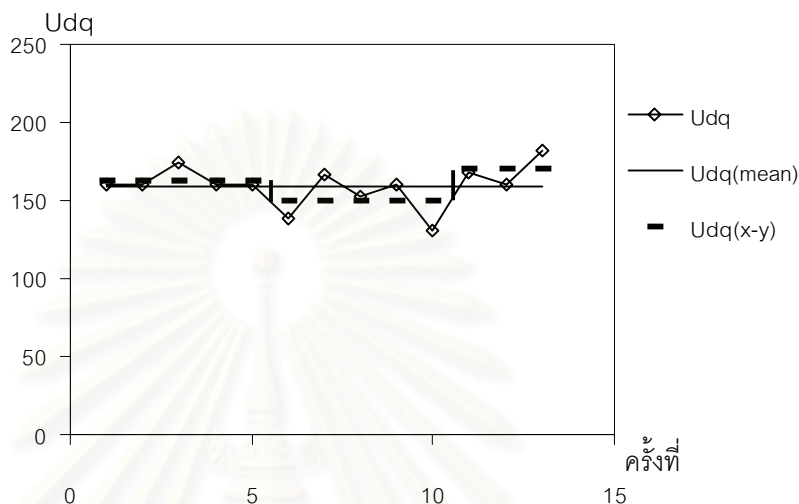


รูปที่ 6.1 แรงดันเบรกดาวนส์วิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลา (U_{dq}) ที่ทรงกลมรัศมี 10 mm ระยะแกป 3 mm การทดลองด้วยแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลาที่ทรงกลมรัศมี 10 mm ระยะแกป 3 mm มีพารามิเตอร์ในการทดลองดังนี้

- $u_0 = 116.48$ kV
- $\Delta u \approx 7$ kV
- $m = 5$
- $n = 13$ ครั้ง

ผลการทดลองพบว่า U_{dq} มีค่าแกว่งตัวขึ้นและลงรอบค่าแรงดันเบรกดาวนส์เฉลี่ยเช่นเดียวกับกรณีชั่วเวลาดังแสดงในรูปที่ 6.2 เมื่อดูจากรูปกราฟและทดสอบด้วยวิธี iteration test แล้วมีความเป็นอิสระต่อกัน (รายละเอียดในภาคผนวก ง หัวข้อ ง.1 และ ง.2) ทั้งนี้ค่าแรงดันเบรกดาวนส์แต่ละ

ช่วงมีความแตกต่างกับแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยไม่มากนักดังแสดงในรูปที่ 6.2 ซึ่งมีความแตกต่างมากที่สุดเท่ากับ 6.48 % และสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน(V) มีค่าแกว่งตัวรอบค่าเฉลี่ยเช่นกัน



รูปที่ 6.2 แรงดันเบรกดาวน์สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^+) ที่ทรงกลมรัศมี 10 mm ระยะแกป 3mm

จากการทดลองทั้งสองกรณีจึงคาดว่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ทำการทดลองจำนวน 20 ครั้ง ไม่ได้รับผลกระทบจากอนุภาคคาร์บอนและผิวอิเล็กโทรดที่เสียหายจนเป็นเหตุให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์เปลี่ยนแปลงและเนื่องจากค่าเฉลี่ยจากการทดลองประมาณ 5-10 ครั้งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยจาก 20 ครั้ง จึงเลือกที่จะทำการทดลองเบรกดาวน์จำนวน 6 ครั้งในแต่ละสถานะแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย (ค่าการทดลองเบรกดาวน์ 1 ครั้งใช้เวลาในการทดลองประมาณ 30 นาที) โดยการทดลองชั่วคราวและชั่วคราวจะใช้อิเล็กโทรดเดิมเปลี่ยนแปลงเฉพาะชั่วคราวเท่านั้น

เพื่อเป็นการยืนยันว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการทดลองเบรกดาวน์มาเป็นจำนวน 12-20 ครั้ง ไม่ได้รับผลกระทบจากอนุภาคคาร์บอนที่เกิดจากการเบรกดาวน์ โดยมีคุณสมบัติด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเหมือนเดิม จึงได้ทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงก่อนและหลังผ่านการทดลองเบรกดาวน์ด้วยเครื่องทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 156-1963 พบว่า U_d มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงมั่นใจได้ว่าการทดลองด้วยวิธีนี้ไม่มีผลกระทบจากอนุภาคคาร์บอนที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง ดังแสดงในตารางที่ 6.1

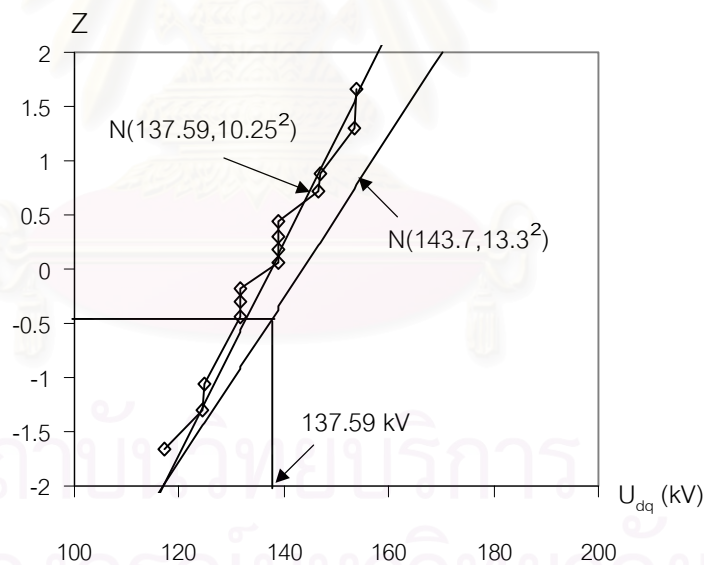
ตารางที่ 6.1 แรงดันเบรกดาวนซ์ของน้ำมันหม้อแปลงก่อนและหลังผ่านการทดลองเบรกดาวนซ์จำนวน 20 ครั้ง ตามมาตรฐาน IEC 156-1963

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	\bar{U}_d (kV)	v
น้ำมันหม้อแปลงก่อนการทดลอง	59	60	51	60	55	59	57.3	0.06
น้ำมันหม้อแปลงหลังการทดลอง $r=15\text{mm}$, $g=3\text{mm}$ ขั้วบวก, ขั้วลบ	58	53	52	54	59	55	55.2	0.05
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	\bar{U}_d (kV)	v
น้ำมันหม้อแปลงก่อนการทดลอง	60	60	52	58	60	52	57	0.07
น้ำมันหม้อแปลงหลังการทดลอง $r=10\text{mm}$, $g=3\text{mm}$ ขั้วบวก	60	55	50	60	54	59	56.3	0.07
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	\bar{U}_d (kV)	v
น้ำมันหม้อแปลงก่อนการทดลอง	55	53	59	57	51	59	55.7	0.06
น้ำมันหม้อแปลงหลังการทดลอง $r=10\text{mm}$, $g=5\text{mm}$ ขั้วบวก, ขั้วลบ	60	51	51	54	60	55	55.2	0.07
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	\bar{U}_d (kV)	v
น้ำมันหม้อแปลงก่อนการทดลอง	58	60	60	60	60	60	59.7	0.01
น้ำมันหม้อแปลงหลังการทดลอง $r=5\text{mm}$, $g=5\text{mm}$ ขั้วบวก, ขั้วลบ	56	60	56	60	60	56	58.7	0.03
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	\bar{U}_d (kV)	v
น้ำมันหม้อแปลงก่อนการทดลอง	57	60	58	52	59	58	57.3	0.05
น้ำมันหม้อแปลงหลังการทดลอง $r=2.5\text{mm}$, $g=10\text{mm}$ ขั้วบวก, ขั้วลบ	59	60	56	57	60	57	58.2	0.03

6.1.2 อันดับความไวของแรงดันเบรกดาวนซ์ที่ได้จากการทดลอง

การทดลองหาค่าแรงดันที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนซ์ต่ำหรือความไวอันดับต่ำนั้นเป็นวิธีการทดลองแบบแรงดันเพิ่ม ซึ่งมีข้อดีคือน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนฉนวนไฟฟ้าเสียหายน้อย แต่ข้อเสียก็คือผลการทดลองที่ได้จะเป็นฟังก์ชันของความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวนซ์ การหาลักษณะสมบัติความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนซ์ต้องแปลงจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวนซ์เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนซ์จากความสัมพันธ์ในหัวข้อ 3.5

การกระจายเชิงสถิติของแรงดันเบรกดาวร์สวิตซ์อิมพัลส์ชั่วเวลาที่ทรงกลมรัศมี 10 mm ระยะ
 แยก 3 mm สามารถแทนฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวร์นี้ได้ดังนี้ N
 $(137.59, 10.25^2)$ จากรูปที่ 6.3 เป็นการเปรียบเทียบการกระจายของผลการทดลองกับการกระจาย
 แบบปกติ โดยผลต่างที่มากที่สุดของการกระจายทั้งสอง (d_{\max}) มีค่าเท่ากับ 0.14 จากการทดสอบ
 สมมุติฐานด้วยวิธี Kolmogorov พบว่า $d_{\max} < k_{n,\alpha}$ ซึ่งค่าวิกฤต $k_{n,\alpha}$ เมื่อทำการทดลองเป็นจำนวน
 20 ครั้ง ที่ระดับความสำคัญ $\alpha = 0.10$ มีค่าเท่ากับ 0.265 ดังนั้นการกระจายแบบปกติจึงแทนการ
 กระจายของผลการทดลองได้ดี จากนั้นทำการคำนวณหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรก
 ดาวร์จากฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวร์ ซึ่งได้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการ
 เกิดเบรกดาวร์คือ $N(143.7, 13.3^2)$ วิธีการหาแสดงในตารางที่ 6.2 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดัน
 เบรกดาวร์เฉลี่ย (\bar{U}_{dq}) ที่ได้จากวิธีการหาอันดับควอนไทล์ค่าต่ำ ที่ทรงกลมรัศมี 10 mm ระยะแยก
 3 mm พบว่า $\bar{U}_{dq} = 137.59$ kV ตรงกับค่า $Z = -0.46$ หรืออันดับควอนไทล์ที่ 32% ของฟังก์ชัน
 ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวร์ ดังแสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ลักษณะการกระจายเชิงสถิติของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวร์
 $(\bar{U}_{dq}, \text{cumulative})$ ที่ได้จากวิธีหาค่าแรงดันเบรกดาวร์ควอนไทล์อันดับต่ำชั่วเวลาและแทนด้วยการ
 กระจายแบบปกติเปรียบเทียบกับฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวร์ $(\bar{U}_{dq}, \text{performance})$

ตารางที่ 6.2 การหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมของแรงดันเบรกดาวนส์วิตชิงอิมพัลส์ชั่วพลที่ทรงกลมรัศมี 10 mm , ระยะแปก 3 mm

\bar{U}_{dq} , cumulative (kV)	v	$\sigma_{\Delta u}$ (s)	$\frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$	$\sigma_{\Delta x}$	$u_{\Delta x}$	\bar{U}_{dq} , performance (kV)	σ	ΔX	U_{d32}
137.59	0.07	10.25	0.68	0.77	-0.46	143.7	13.3	0.5	137.5

จากผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนส์ที่ควอนไทล์อันดับต่ำพบว่าค่าแรงดันเบรกดาวนส์ที่ได้มีอันดับควอนไทล์ที่ 32% เมื่อคำนวณหาอันดับควอนไทล์จากพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ข้างต้นตามหัวข้อ 3.1.2 ได้ผลดังนี้ เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ $m=5$ และ $\frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$ หรือ $\Delta u/s = 0.68$, จากรูปที่ 3.7 สามารถอ่านค่า $\beta = 1.55$, $s_{\beta} = 0.70$ และจากรูปที่ 3.8 แรงดันคงทนอยู่ได้อย่างในตำแหน่งอันดับควอนไทล์ที่ 0.05 , เมื่อคำนวณที่ความเชื่อมั่น 90% แรงดันคงทนอยู่ได้มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนส์ต่ำกว่า U_{d27} ดังนี้

ที่อันดับควอนไทล์เท่ากับ 10% ได้ค่า $\beta = 1.28$

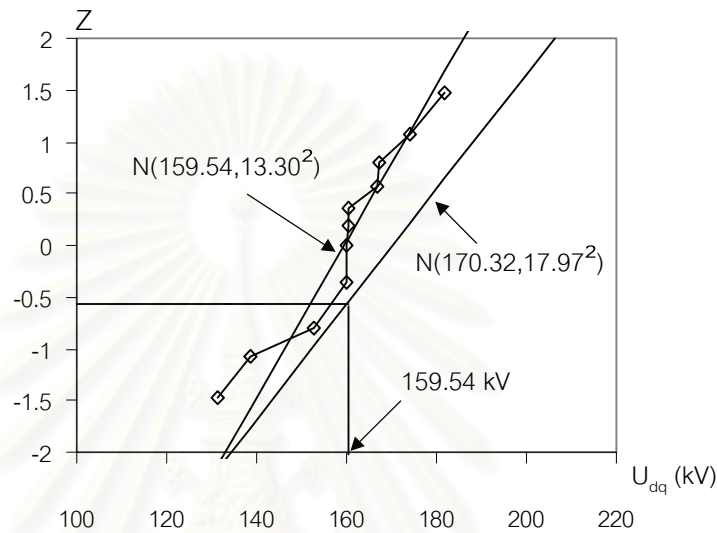
ดังนั้น $U_{d10} : U_{d50} - \beta s ; \beta = 1.28 ; s_{\beta} = 0.70$

สถานะที่ทำการทดลองได้ค่า $\beta = 1.55 : U_{d50} - (\beta - 1.28 s_{\beta})s = U_{d50} - 0.654s = U_{d27}$

พบว่าผลการคำนวณได้อันดับควอนไทล์ที่ 27% ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งมีอันดับควอนไทล์ที่ 32% เล็กน้อย จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองกรณีทรงกลมรัศมี 10 mm ระยะแปก 3 mm ชั่วพลด้วย เพื่อความแน่ใจในผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณตามพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ตามหัวข้อ 3.1.2

การกระจายเชิงสถิติของแรงดันเบรกดาวนส์วิตชิงอิมพัลส์ชั่วพลที่ทรงกลมรัศมี 10 mm ระยะแปก 3 mm สามารถแทนฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวนส์ได้ดังนี้ $N(159.54, 13.30^2)$ จากรูปที่ 6.4 เป็นการเปรียบเทียบการกระจายของผลการทดลองกับการกระจายแบบปกติ โดยผลต่างที่มากที่สุดของการกระจายทั้งสอง (d_{max}) มีค่าเท่ากับ 0.15 จากการทดสอบสมมุติฐานด้วยวิธี Kolmogorov พบว่า $d_{max} < k_{n,\alpha}$ ซึ่งค่าวิกฤต $k_{n,\alpha}$ เมื่อทำการทดลองเป็นจำนวน 13 ครั้ง ที่ระดับความสำคัญ $\alpha = 0.10$ มีค่าเท่ากับ 0.338 ดังนั้นการกระจายแบบปกติจึงแทนการกระจายของผลการทดลองได้ดี จากนั้นทำการคำนวณหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนส์จากฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวนส์ ซึ่งได้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนส์คือ $N(170.32, 17.97^2)$ วิธีการหาแสดงในตารางที่ 6.3 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรง

ต้นเบรกดาวนจ์เฉลี่ย (\bar{U}_{dq}) ที่ได้จากวิธีการหาอันดับควอนไทล์ค่าต่ำ ที่ทรงกลมรัศมี 10 mm ระยะแกป 3 mm พบว่า $\bar{U}_{dq} = 159.54$ kV ตรงกับค่า $Z = -0.60$ หรืออันดับควอนไทล์ที่ 27% ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนจ์ ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ลักษณะการกระจายเชิงสถิติของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวนจ์ (\bar{U}_{dq} , cumulative) ที่ได้จากวิธีหาค่าแรงดันเบรกดาวนจ์ควอนไทล์อันดับต่ำชั่วคราวและแทนด้วยการกระจายแบบปกติเปรียบเทียบกับฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนจ์ (\bar{U}_{dq} , performance)

ตารางที่ 6.3 การหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมของแรงดันเบรกดาวนจ์สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราวที่ทรงกลมรัศมี 10 mm , ระยะแกป 3 mm

\bar{U}_{dq} , cumulative (kV)	ν	σ (s)	$\frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$	$\sigma_{\Delta x}$	$u_{\Delta x}$	\bar{U}_{dq} , performance (kV)	σ	ΔX	U_{d27}
159.54	0.08	13.30	0.53	0.74	-0.6	170.3	18.0	0.4	159.5

จากผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนจ์ที่ควอนไทล์อันดับต่ำพบว่าค่าแรงดันเบรกดาวนจ์ที่ได้มีอันดับควอนไทล์ที่ 27% เมื่อคำนวณหาอันดับควอนไทล์จากพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ข้างต้นตามหัวข้อ 3.1.2 ได้ผลดังนี้ เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ $m=5$ และ $\frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$ หรือ $\Delta u/s = 0.53$, จากรูปที่ 3.7 สามารถอ่านค่า $\beta = 1.6$, $s_{\beta} = 0.62$ และจากรูปที่ 3.8 แรงดันคงทนอยู่ได้อย่างอยู่ในตำแหน่งอันดับ

ควอนไทล์ที่ 0.05 , เมื่อคำนวณที่ความเชื่อมั่น 90% แรงดันคงทนอยู่ได้จะมีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนต่ำกว่า U_{d22} ดังนี้

ที่อันดับควอนไทล์เท่ากับ 10% ได้ค่า $\beta = 1.28$

ดังนั้น $U_{d10} : U_{d50} - \beta s ; \beta = 1.28 ; s_{\beta} = 0.62$

สภาวะที่ทำการทดลองได้ค่า $\beta = 1.6 : U_{d50} - (\beta - 1.28 s_{\beta})s = U_{d50} - 0.806s = U_{d22}$

พบว่าผลการคำนวณได้อันดับควอนไทล์ที่ 22% ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งมีอันดับควอนไทล์ที่ 27% เล็กน้อยเช่นเดียวกับกรณีชั่วคราวที่มีอันดับควอนไทล์แตกต่างกันประมาณ 5% โดยอันดับควอนไทล์ที่ต่างกัน 5% นี้เมื่อคิดเป็นค่าแรงดันเบรกดาวนจะแตกต่างกันประมาณ 2-3 kV เท่านั้นซึ่งเมื่อเทียบกับค่าแรงดันเบรกดาวนแล้วน้อยมาก ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแรงดันคงทนอยู่ได้จากการทำการทดลองด้วยวิธีการหาควอนไทล์อันดับต่ำด้วยพารามิเตอร์ที่กำหนด จะมีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนที่ควอนไทล์อันดับต่ำกว่า 22-27% ตามที่ได้จากการคำนวณตามหัวข้อ 3.1.2 ทั้งนี้อันดับควอนไทล์จะแปรตามส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) ของผลการทดลอง

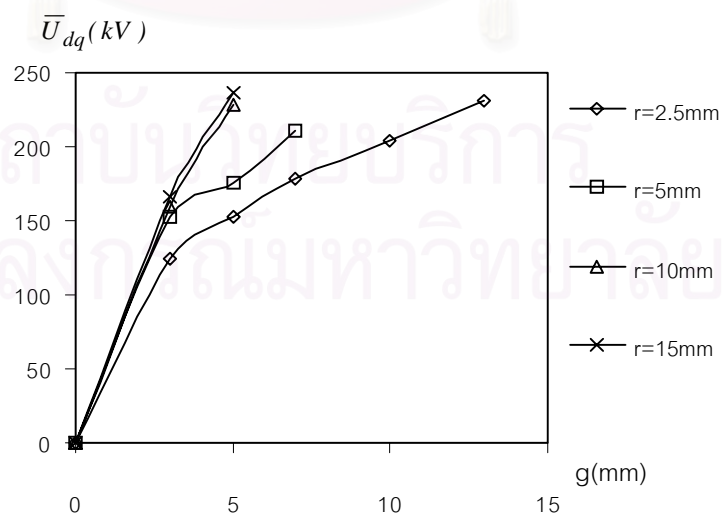
6.1.3 ผลการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30°C

การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดอิเล็กโทรดทรงกลม , ระยะแกป จากการทดลอง แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ทั้งชั่วบวกและชั่วลบด้วยวิธีในหัวข้อ 3.1.2 ณ อุณหภูมิห้อง (~30°C) ตามสภาวะต่างๆแสดงในตารางที่ 6.4 และรายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ง หัวข้อ 3

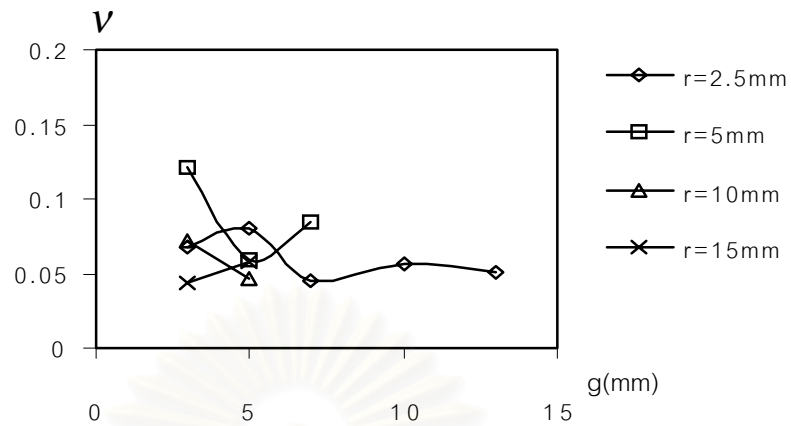
ตารางที่ 6.4 สภาวะที่ทำการทดลอง

r(mm)	g(mm)	อุณหภูมิ(°C)
2.5	3 5 7 10 13	28-32
5	3 5 7	
10	3 5	
15	3 5	

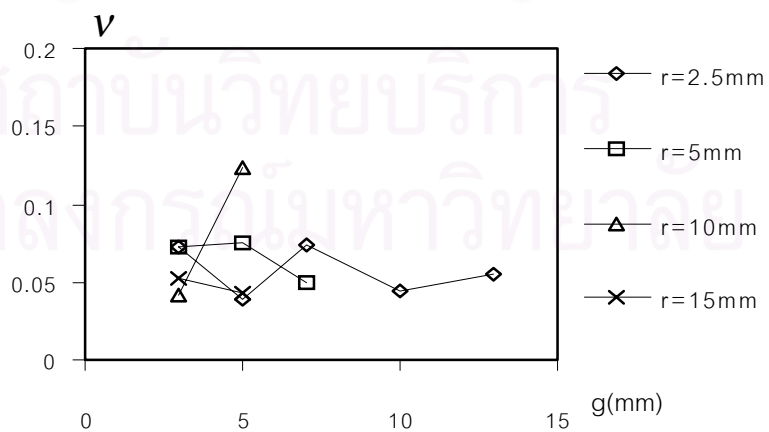
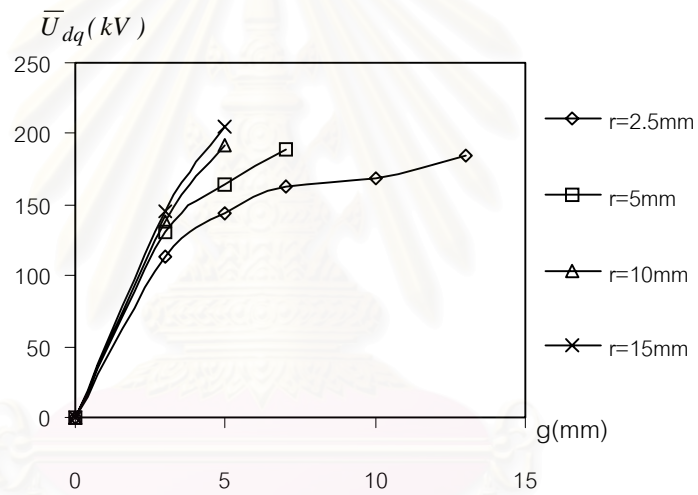
แรงดันเบรกดาวน์ (\bar{U}_{dq}) และสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน (V) กับระยะแกป (g) ณ อุณหภูมิ 30°C พบความสัมพันธ์ว่า \bar{U}_{dq} มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดรัศมีทรงกลมและระยะแกปที่เพิ่มขึ้นทั้งชั่วบวกและชั่วลบ โดยมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีแรงดันกระแสตรงแต่เนื่องจากจำนวนครั้งการทดลองเพียง 6 ครั้งเท่านั้นทำให้ค่า V ที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่ากรณีแรงดันกระแสตรง โดย V มีค่าอยู่ในช่วง 0.04-0.12 สำหรับชั่วบวกและ V มีค่าอยู่ในช่วง 0.04-0.12 สำหรับชั่วลบ ดังแสดงในรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.5 \bar{U}_{dq} และ V กับ g ที่ทรงกลมขนาดต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30°C ชั่วบวก

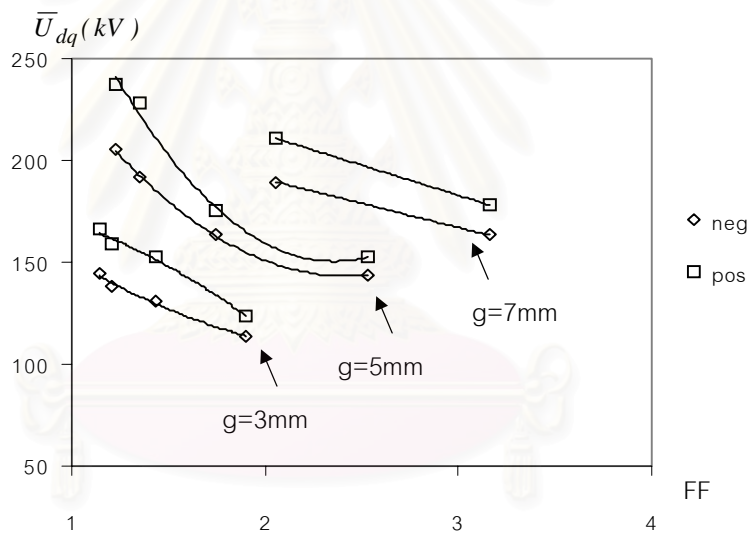


รูปที่ 6.5 \bar{U}_{dq} และ V กับ g ที่ทรงกลมขนาดต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30°C ขั้วบวก (ต่อ)

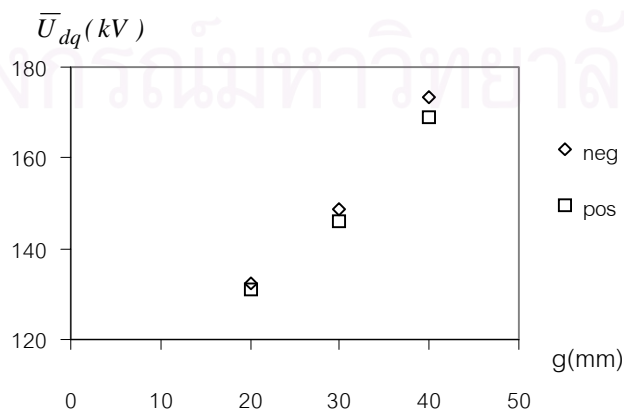


รูปที่ 6.6 \bar{U}_{dq} และ V กับ g ที่ทรงกลมขนาดต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30°C ขั้วลบ

แรงดันเบรกดาวน (\bar{U}_{dq}) กับชั่วแรงดันและแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า การพิจารณาผลของชั่วแรงดันและแรงดันเบรกดาวน (\bar{U}_{dq}) ที่อิเล็กโตรดขนาดต่างๆ พบว่าเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าคงที่และระยะแก๊ปเพิ่มขึ้นแรงดันเบรกดาวนจะสูงขึ้นทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ส่วนกรณีระยะแก๊ปคงที่พบว่าแรงดันเบรกดาวนมีค่าลดลงตามขนาดทรงกลมที่เล็กลงหรือแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงขึ้นทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ดังแสดงในรูปที่ 6.7 โดยเมื่อระยะแก๊ปและแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าคงที่แรงดันเบรกดาวนชั่วบวกมีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาวนชั่วลบทุกกรณี เพื่อศึกษาผลกระทบจากชั่วแรงดันต่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าจึงทำการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดแบบรีดแก๊ป-ระนาบ โดยปลายรีดแก๊ปมียอดสูงเพียง 3.5 mm และทำมุม 50° ที่ระยะแก๊ป 20 , 30 และ 40 mm ดังแสดงในรูปที่ 6.8 พบว่าแรงดันเบรกดาวนชั่วลบมากกว่าชั่วบวกเล็กน้อย แสดงว่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีผลต่อแรงดันเบรกดาวนและชั่วแรงดัน โดยรีดแก๊ป-ระนาบมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามากกว่า 40



รูปที่ 6.7 \bar{U}_{dq} กับ FF และชั่วแรงดัน

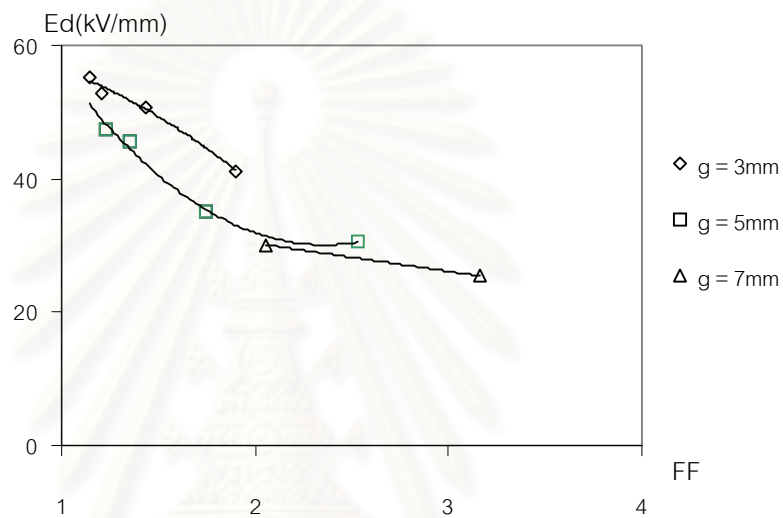


รูปที่ 6.8 \bar{U}_{dq} กับระยะแก๊ป (อิเล็กโตรดแบบรีดแก๊ป-ระนาบ)

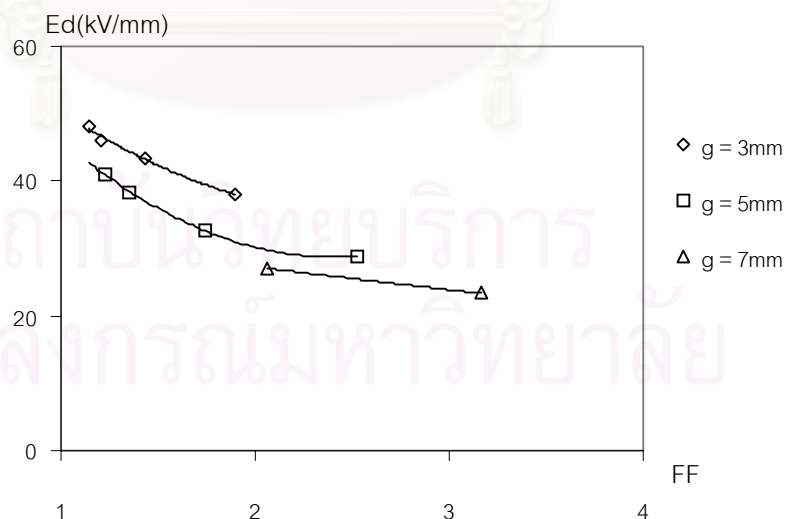
ความเครียดสนามไฟฟ้า (E_{dq}) กับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (FF)

จากการคำนวณ

ความเครียดสนามไฟฟ้าตามความสัมพันธ์ $E_{dq} = U_{dq} / g$ เปรียบเทียบกับ FF พบว่า E_{dq} มีค่าลดลงตามขนาดทรงกลมที่เล็กลงหรือแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดย E_{dq} ที่ระยะแกป 3 mm มีค่าสูงกว่าที่ระยะแกป 5 mm และระยะแกป 7 mm ตามลำดับ หรือที่ระยะแกปแคบมี E_{dq} สูงกว่าที่ระยะแกปกว้างทั้งซี่บวกและซี่ลบ ดังแสดงในรูปที่ 6.9



(ก) ซี่บวก



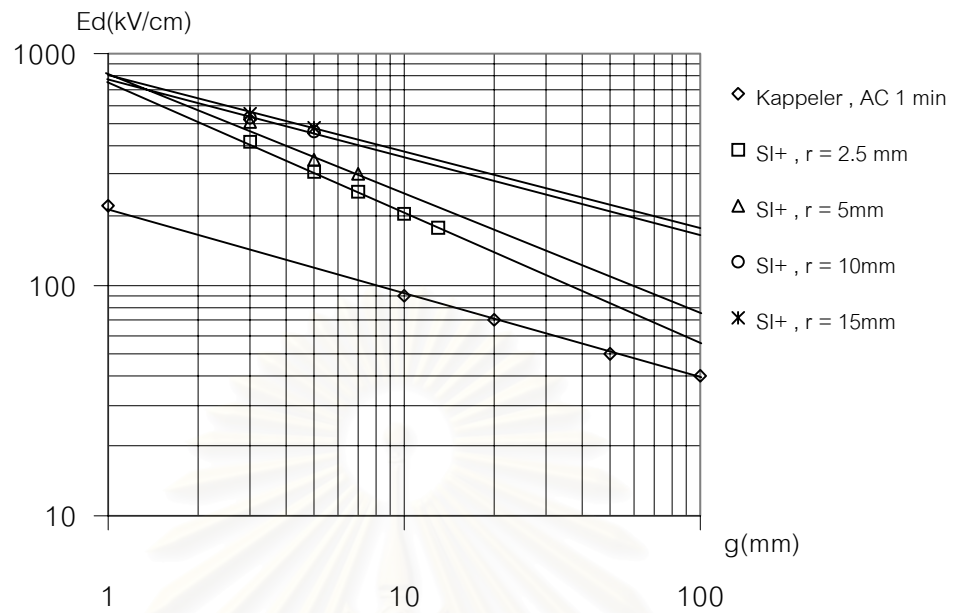
(ข) ซี่ลบ

รูปที่ 6.9 E_{dq} กับ FF

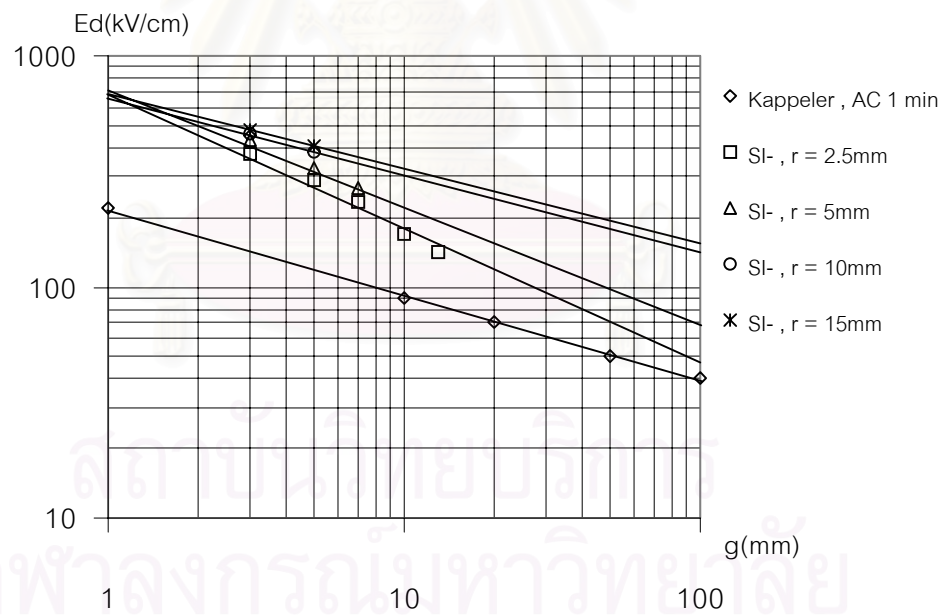
6.1.4 การเปรียบเทียบกับข้อมูลเพื่อการออกแบบ

ผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดลองแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์สามารถนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อการออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ดีทีเดียว จึงนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอดีตที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยเปรียบเทียบกับแรงดันกระแสสลับเพราะฐานข้อมูลเกี่ยวกับแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์เพื่อการออกแบบที่เก็บค่าเป็นสถิติหายากมาก จึงพิจารณาจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนองแรงดันกระแสสลับจากผลการทดลองของ Kappeler [23] เนื่องจากเป็นผลการทดลองที่ได้นำมาใช้ในการออกแบบการฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าของบริษัท H. Weidmann Ltd. ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ซึ่งแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนกับระยะแกปเมื่อทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับในเวลา 1 นาที ผลการเปรียบเทียบพบว่า กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าของแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์กับระยะแกปมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเมื่อสร้างในสเกลล็อก-ล็อกทุกขนาดอิเล็กโตรดทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เส้นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้าของแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบที่ทรงกลมรัศมีขนาด 10 mm และ 15 mm มีลักษณะขนานกับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนจากการทดลองของ Kappeler ส่วนที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm และ 5 mm ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เส้นกราฟจะมีความชันมากกว่าผลการทดลองของ Kappeler ทั้งนี้เนื่องจากอิเล็กโตรดที่ใช้ทดลองมีลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าแตกต่างกันทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ลดลงเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามี่ค่ามากหรืออิเล็กโตรดมีขนาดเล็กและตามระยะแกปที่มากขึ้น โดยที่แกปแคบๆ ความแตกต่างของขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าน้อยทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ขั้วบวก



(ข) ขั้วลบ

รูปที่ 6.10 ความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป

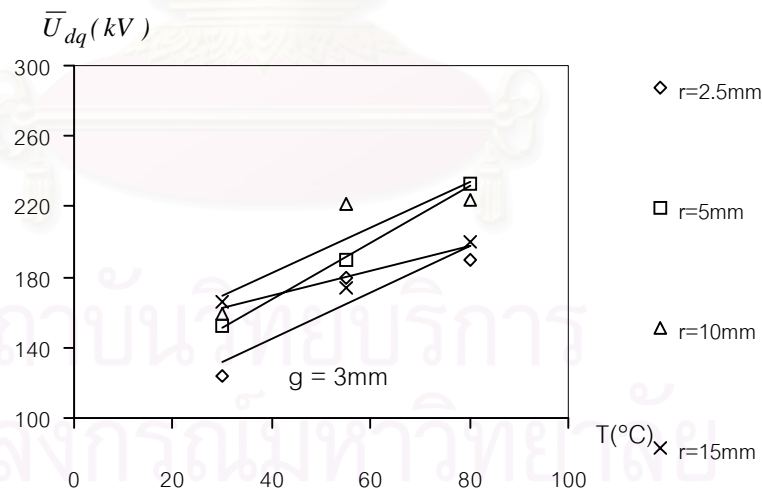
6.1.5 ผลกระทบของอุณหภูมิ

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในช่วง 30-80 °C ที่มีต่อค่าแรงดันเบรกดาวนในสภาวะการทดลองต่างๆดังแสดงในตารางที่ 6.5 และรายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ง หัวข้อ 3

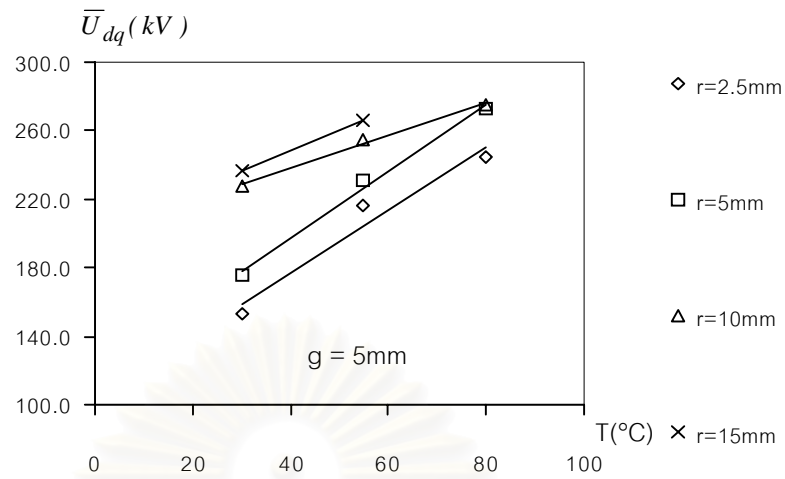
ตารางที่ 6.5 สภาวะที่ทำการทดลอง

r(mm)	g(mm)	T(°C)
2.5	3 5 7 10	30 55 และ 80
5	3 5	
10	3 5	
15	3 5	

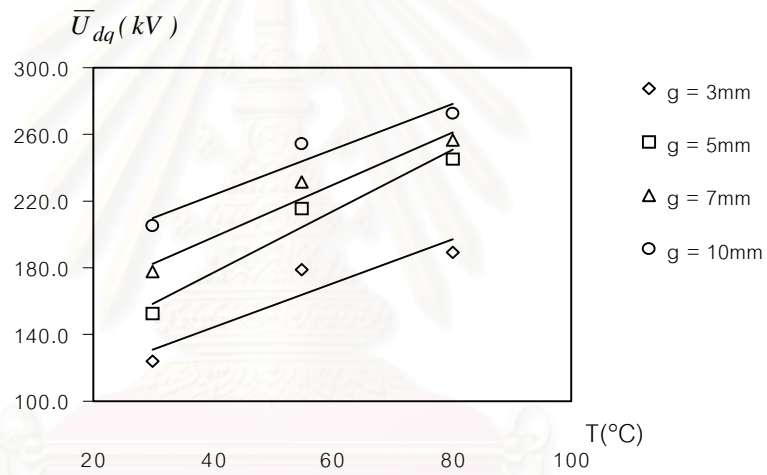
\bar{U}_{dq} กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 30 ไปถึง 80 °C ความสัมพันธ์ระหว่าง \bar{U}_{dq} กับอุณหภูมิที่ขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมและระยะแกปต่างๆ พบว่า \bar{U}_{dq} มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและ \bar{U}_{dq} มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 80 °C ทุกขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมและระยะแกปทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ดังแสดงในรูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12



(ก) ระยะแกป(g) = 3 mm ขั้วบวก

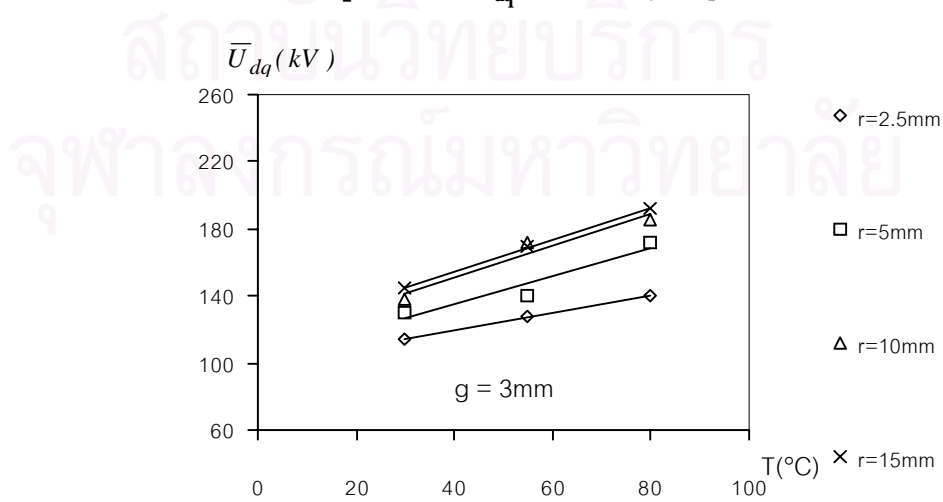


(ข) ระยะแกป(g) = 5 mm ชั่วบวก

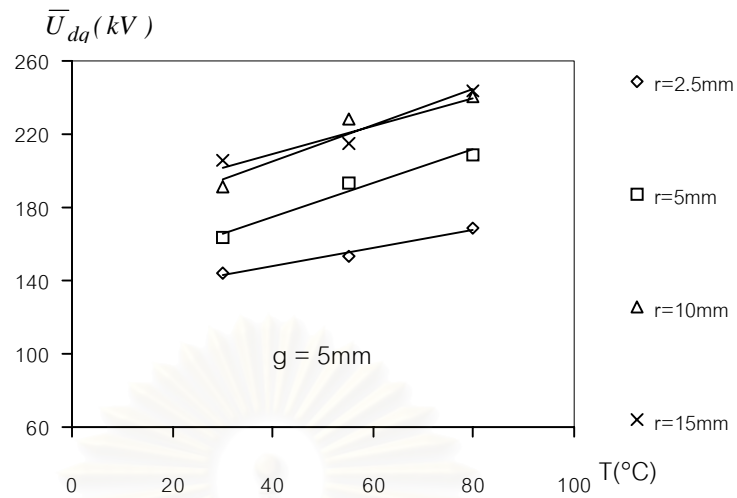


(ค) ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ชั่วบวก

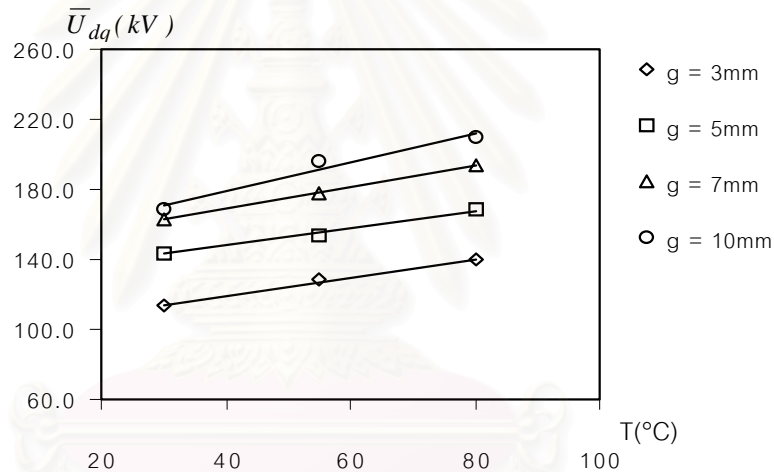
รูปที่ 6.11 \bar{U}_{dq} ชั่วบวกกับอุณหภูมิ



(ก) ระยะแกป(g) = 3 mm ชั่วลบ



(ข) ระยะแกป(g) = 5 mm ขั้วลบบ



(ค) ทรงแทงลมีรัศมีขนาด 2.5 mm ขั้วลบบ

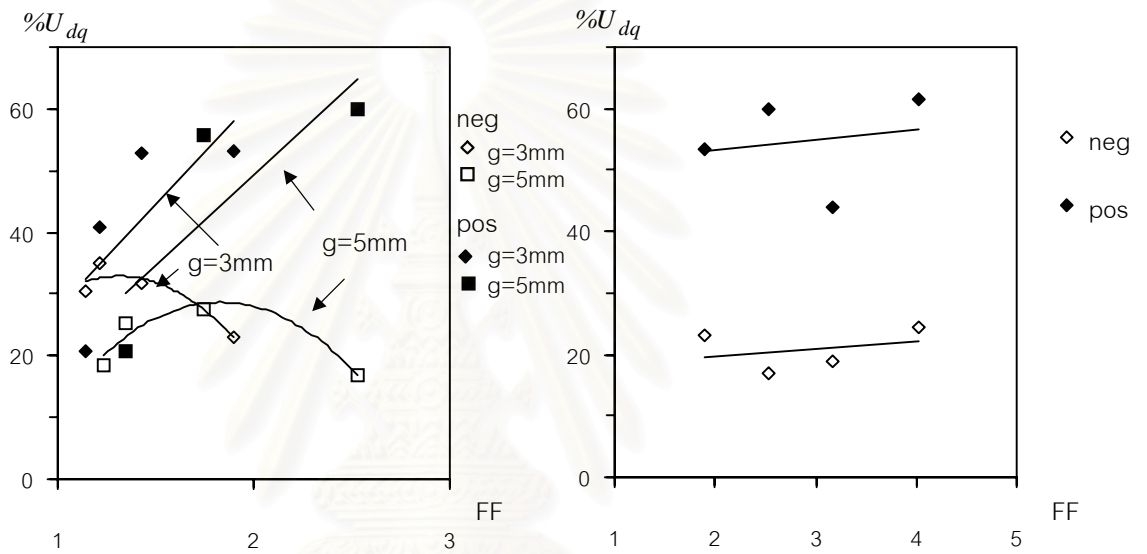
รูปที่ 6.12 \bar{U}_{dq} ขั้วลบบกับอุณหภูมิ

เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดันตามอุณหภูมิ($\%U_{dq}$)กับFF พิจารณาผลกระทบของแพกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบบ โดยเปรียบเทียบ $\%U_{dq}$ ที่คำนวณจากผลต่างของ $\bar{U}_{dq,80^{\circ}\text{C}}$ กับ $\bar{U}_{dq,30^{\circ}\text{C}}$ ตามสมการ

$$\%U_{dq} = \frac{\bar{U}_{dq,80^{\circ}\text{C}} - \bar{U}_{dq,30^{\circ}\text{C}}}{\bar{U}_{dq,30^{\circ}\text{C}}} \cdot 100 \tag{6.1}$$

ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาคผนวก ง หัวข้อ ง.3 เมื่อดูกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\%U_{dq}$ กับ FF ดังแสดงในรูปที่ 6.13 พบว่ากรณีขั้วบวกเมื่อระยะแกปคงที่และแพกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น $\%U_{dq}$ มีค่าสูงขึ้น ส่วนกรณีขั้วลบบเมื่อระยะแกปคงที่และแพกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น $\%U_{dq}$ มีค่าสูงขึ้นถึง FF ค่าหนึ่งแล้ว $\%U_{dq}$ มีค่าลดลง โดยที่ $\%U_{dq}$ ที่ระยะแกป 3 mm มีค่ามาก

กว่า $\%U_{dq}$ ที่ระยะแกป 5 mm อย่างชัดเจนในกรณีขั้วบวกแต่ในกรณีขั้วลบ $\%U_{dq}$ ที่ระยะแกป 3 mm มีค่ามากกว่า $\%U_{dq}$ ที่ระยะแกป 5 mm เช่นกันแต่เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงขึ้น $\%U_{dq}$ ที่ระยะแกป 3 mm มีค่าใกล้เคียงกับ $\%U_{dq}$ ที่ระยะแกป 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 6.13(ก) ส่วนการเปรียบเทียบเฉพาะทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ที่ระยะแกปต่างๆ พบว่า $\%U_{dq}$ มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเกือบคงที่ โดย $\%U_{dq}$ ขั้วบวกมีค่าประมาณ 55% และ $\%U_{dq}$ ขั้วลบมีค่าประมาณ 20% ซึ่ง $\%U_{dq}$ ขั้วบวกมีค่ามากกว่า $\%U_{dq}$ ขั้วลบ ดังแสดงในรูปที่ 6.13(ข)



(ก) ระยะแกป 3 และ 5 mm

(ข) ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm

รูปที่ 6.13 $\%U_{dq}$ กับ FF

6.2 การเปรียบเทียบแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ

6.2.1 แรงดันกระแสสลับที่ควอนไทล์อันดับที่ 22% (u_{d22}) และ 27% (u_{d27})

การเปรียบเทียบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงจะให้ดีที่สุดต้องศึกษาทุกความน่าจะเป็นในการกระจายเชิงสถิติ แต่วิธีนี้จำเป็นต้องใช้จำนวนครั้งการทดลองมากและคุณสมบัติของฉนวนอาจเปลี่ยนแปลงไปก่อนที่จะได้ค่าดังกล่าวเนื่องจากผลกระทบจากการเกิดเบรกดาวน์ ในการศึกษาครั้งนี้จะเปรียบเทียบเฉพาะขนาดแรงดันที่ความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์ค่าเดียวกันค่าหนึ่ง ซึ่งจากการคำนวณจากพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้จากการทดลองด้วยแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์พบว่ามีความน่าจะเป็นที่ 22-27 % ซึ่งอันดับควอนไทล์ที่แตกต่างกันมีระดับแรงดันต่างกันประมาณ 2-3 kV จึงทำการวิเคราะห์ค่าควอนไทล์ทั้งสองอันดับ โดยข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์ของแรงดันกระแสสลับได้จากการทดลองในอดีต [10]

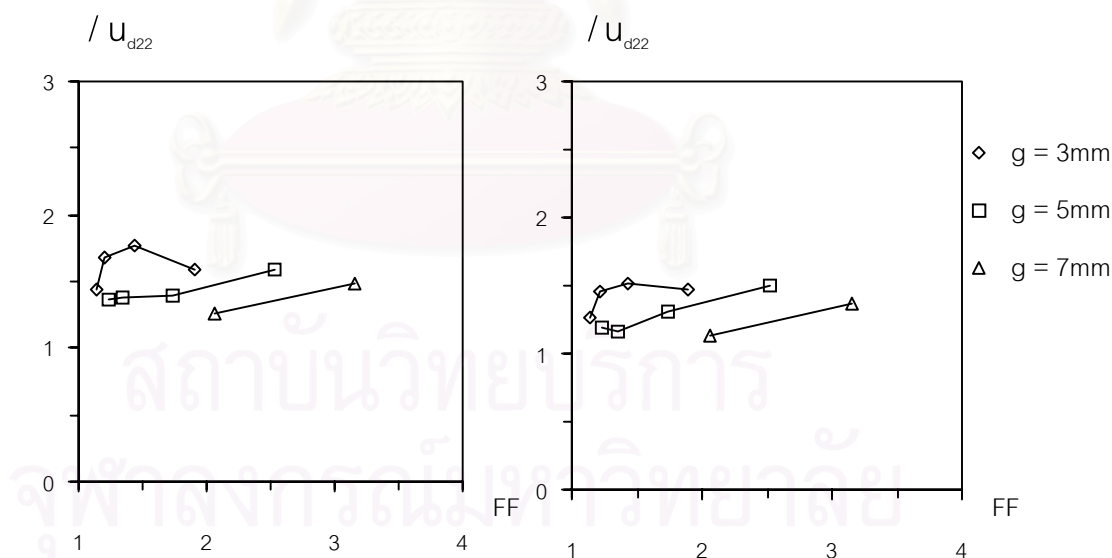
จากผลการทดลองเบรกดาวน์ด้วยวิธีแรงดันเพิ่มของทั้งแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์และแรงดันกระแสสลับ สามารถแทนด้วยการกระจายแบบปกติได้ดีมีค่า $d_{max} < \text{ค่าวิกฤต}_{k,\alpha}$ ดังนั้นการคำนวณหาแรงดันเบรกดาวน์ที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ค่าเดียวกัน จึงอยู่บนสมมุติฐานว่า ลักษณะการกระจายแรงดันเบรกดาวน์เป็นการกระจายแบบปกติ โดยใช้พารามิเตอร์ \bar{U}_d และ v ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวน์มาคำนวณหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ แต่เนื่องจากการทดลองของแรงดันกระแสสลับเป็นแบบแรงดันเพิ่มต่อเนื่องมีอัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2 kV/s การคำนวณหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ต้องทำการคำนวณด้วยวิธีในหัวข้อ 3.5 โดยการกำหนดให้ $\Delta u = 2$ kV โดยค่าที่ได้จะเป็นความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ต่อแรงดันกระแสสลับในเวลา 1 วินาที ทำการคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ที่อันดับควอนไทล์ที่ 22% และ 27% (เนื่องจากความแตกต่างของอันดับควอนไทล์แรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมีความแตกต่างกัน) ผลที่ได้แสดงในภาคผนวก จ ตาราง จ.1

6.2.2 แรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับที่อันดับควอนไทล์ที่ 22% (u_{d22})

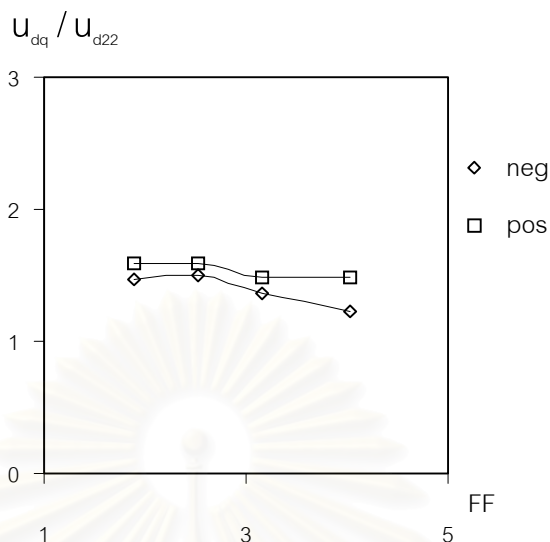
อัตราส่วนแรงดัน คำนวณหาอัตราส่วนแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับในช่วงเวลา 1 วินาที ได้ผลแสดงในภาคผนวก จ ตารางที่ จ.2 พบว่าอัตราส่วนแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ชั้วบวกต่อแรงดันกระแสสลับ(ค่ายอดแรงดัน) มีค่าอยู่ในช่วง 1.27-1.78 สำหรับชั้วบวกและมีค่าอยู่ในช่วง 1.14-1.52 สำหรับชั้วลบ จากผลการทดลองในอดีต [26] พบว่าได้อัตราส่วนแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับช่วงเวลา 1 วินาทีต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับในช่วงเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1.3

เหตุที่แรงดันเบรกดาวนักระแสสลับช่วงเวลาทดสอบ 1 วินาทีที่มีค่าสูงกว่าช่วงเวลา 1 นาที อาจเป็นเพราะการที่อนุภาคเจ็อบนต้องการเวลาในการเคลื่อนที่มาเชื่อมต่อกันตามกลไกการเกิดเบรกดาวนัของอนุภาคเจ็อบนหรืออาจเป็นเพราะการเกิดดิซชาร์จบางส่วนเป็นเวลานานอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนั เพราะฉะนั้นจะได้อัตราส่วนของแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ(ค่ายอดแรงดัน) ที่ช่วงเวลาการทดสอบ 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1.65-2.31 สำหรับขั้วบวกและมีค่าเท่ากับ 1.48-1.98 สำหรับขั้วลบ

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า พบว่าเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราส่วนแรงดันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าเดียวกันอัตราส่วนแรงดันทั้งขั้วบวกและขั้วลบมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะแก๊ปเพิ่มขึ้น โดยที่รูปภาพของอัตราส่วนแรงดันต่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของขั้วบวกและขั้วลบมีลักษณะคล้ายกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 6.14(ก) ส่วนกรณีใช้อิเล็กโตรดขนาด 2.5 mm ที่ระยะแก๊ป 3-10 mm พบว่าอัตราส่วนแรงดันทั้งขั้วบวกและขั้วลบมีค่าลดลงเล็กน้อยตามแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนแรงดันขั้วบวกมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนแรงดันขั้วลบ ดังแสดงในรูปที่ 6.14(ข)



(ก) ระยะแก๊ป 3 , 5 และ 7 mm



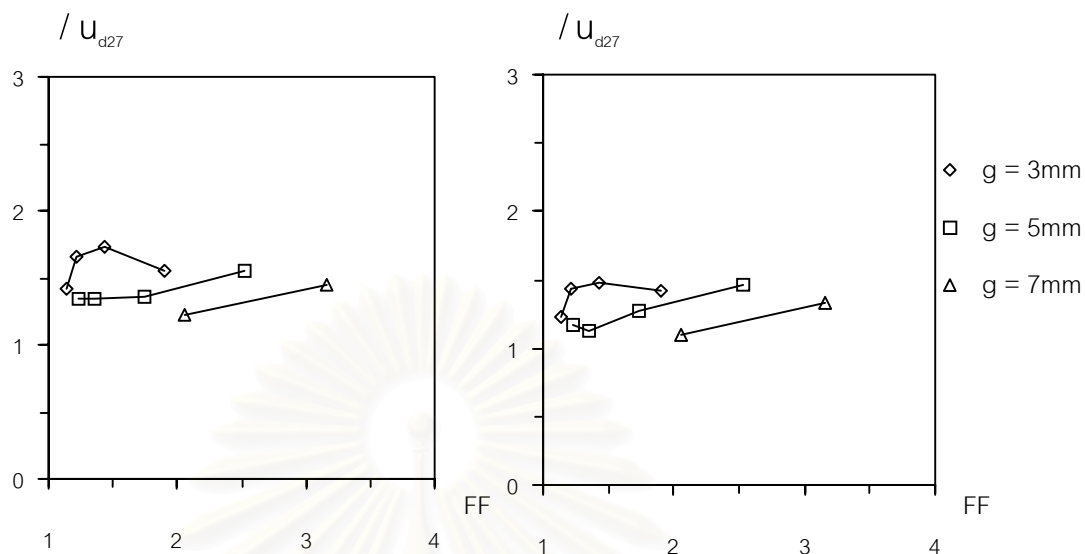
(ข) ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm

รูปที่ 6.14 อัตราส่วนแรงดันกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่อันดับควอนไทล์ที่ 22%

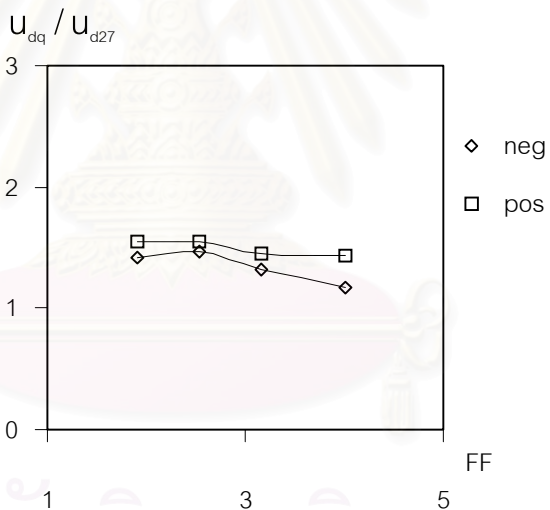
6.2.3 แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับที่อันดับควอนไทล์ที่ 27% (u_{d27})

อัตราส่วนแรงดัน คำนวณหาอัตราส่วนแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับในช่วงเวลา 1 วินาที ได้ผลแสดงในภาคผนวก จ ตารางที่ จ.3 พบว่าอัตราส่วนแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ(ค่ายอดแรงดัน) มีค่าอยู่ในช่วง 1.22-1.73 สำหรับขั้วบวกและมีค่าอยู่ในช่วง 1.10-1.48 สำหรับขั้วลบ จากผลการทดลองในอดีต [26] พบว่าได้อัตราส่วนแรงดันเบรกดาวร์กระแสสลับช่วงเวลา 1 วินาทีต่อแรงดันเบรกดาวร์กระแสสลับในช่วงเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1.3 เพราะฉะนั้นจะได้อัตราส่วนของแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ(ค่ายอดแรงดัน) ที่ช่วงเวลากการทดสอบ 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1.59-2.25 สำหรับขั้วบวกและมีค่าเท่ากับ 1.43-1.92 สำหรับขั้วลบ

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า พบว่าเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราส่วนแรงดันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าเดียวกันอัตราส่วนแรงดันทั้งขั้วบวกและขั้วลบมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะแก๊ปเพิ่มขึ้น โดยที่รูปกราฟของอัตราส่วนแรงดันต่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของขั้วบวกและขั้วลบมีลักษณะคล้ายกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 6.15(ก) ส่วนกรณีใช้อิเล็กทรอนิกส์ขนาด 2.5 mm ที่ระยะแก๊ป 3-10 mm พบว่าอัตราส่วนแรงดันทั้งขั้วบวกและขั้วลบมีค่าลดลงเล็กน้อยตามแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนแรงดันขั้วบวกมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนแรงดันขั้วลบ ดังแสดงในรูปที่ 6.15(ข)



(ก) ระยะแกป 3 , 5 และ 7 mm

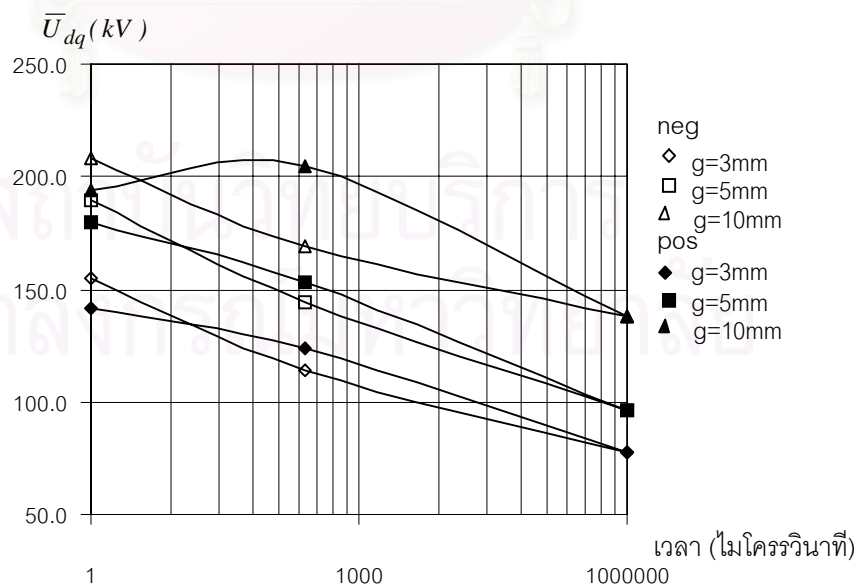


(ข) ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm

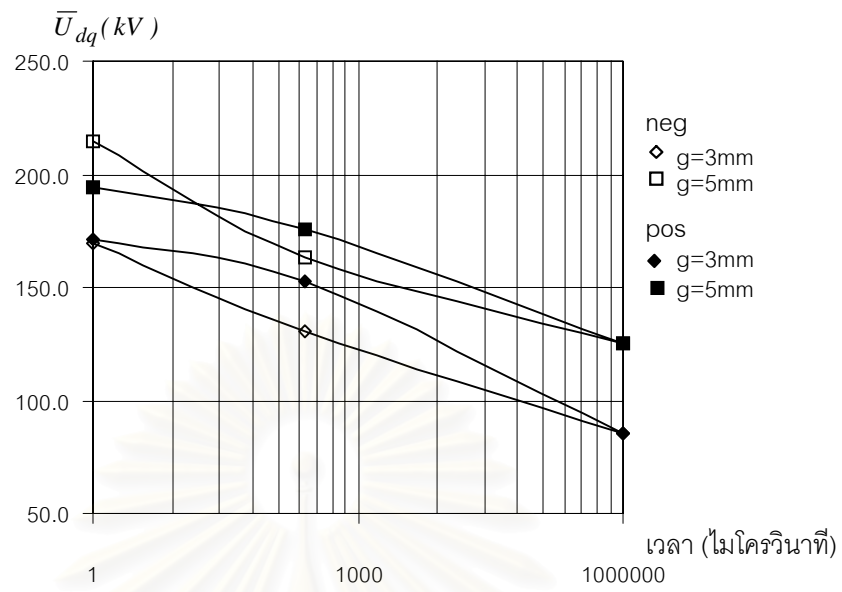
รูปที่ 6.15 อัตราส่วนแรงดันกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่อันดับควอนไทล์ที่ 27%

6.3 การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์

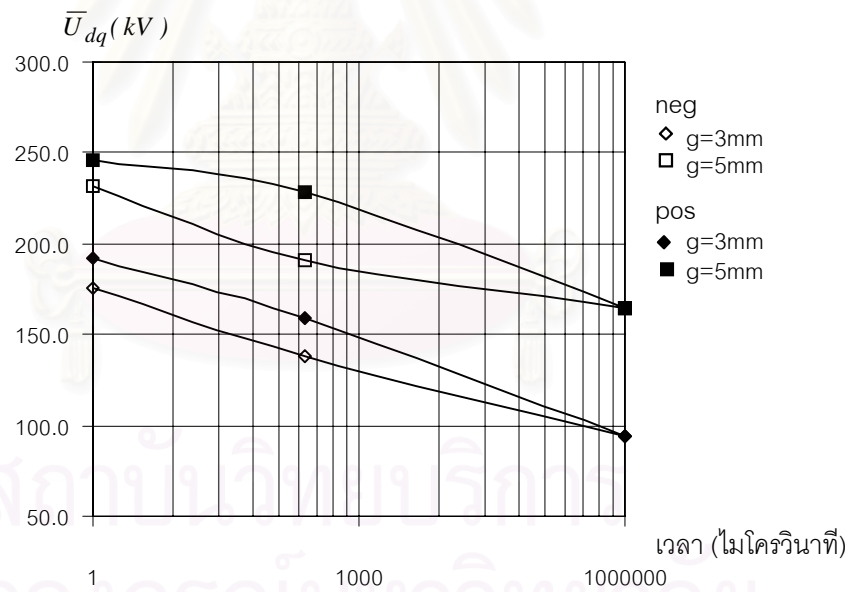
การเปรียบเทียบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งการคำนวณจากพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ในตารางทดลองด้วยแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์พบว่ามีความน่าเชื่อถืออันดับที่ 22-27 % ส่วนการคำนวณพารามิเตอร์จากการทดลองในอดีตของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า [10] พบว่ามีความน่าเชื่อถือใกล้เคียงกัน จึงนำเอาข้อมูลทั้งสองมาหาความสัมพันธ์พบว่าอัตราส่วนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.95-1.31 สำหรับขั้วบวกและมีค่าอยู่ในช่วง 1.21-1.46 สำหรับขั้วลบ (รายละเอียดในภาคผนวก จ ตารางที่ จ.4) แสดงว่าโดยส่วนใหญ่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีค่าสูงกว่าแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ และจากหัวข้อ 6.2 พบว่าแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์มีค่าสูงกว่าแรงดันกระแสสลับ ปรากฏการณ์เช่นนี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์หรือความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงมีอยู่ ซึ่งชนิดของรูปคลื่นแรงดันที่ต่างกันมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงมีอยู่ต่างกัน เช่น แรงดันกระแสสลับจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงมีอยู่มากที่สุดเพราะมีเวลาคงอยู่ของแรงดันค่ายอดนานที่สุดตามด้วยแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์และอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.16 ที่กำหนดช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันค่ายอดเท่ากับ 1.2 ไมโครวินาทีสำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า , 250 ไมโครวินาทีสำหรับแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์และ 1 วินาทีสำหรับแรงดันกระแสสลับ(ค่ายอดแรงดัน) โดยทุกรูปคลื่นแรงดันอยู่ในอันดับความน่าเชื่อถือที่ 22 %



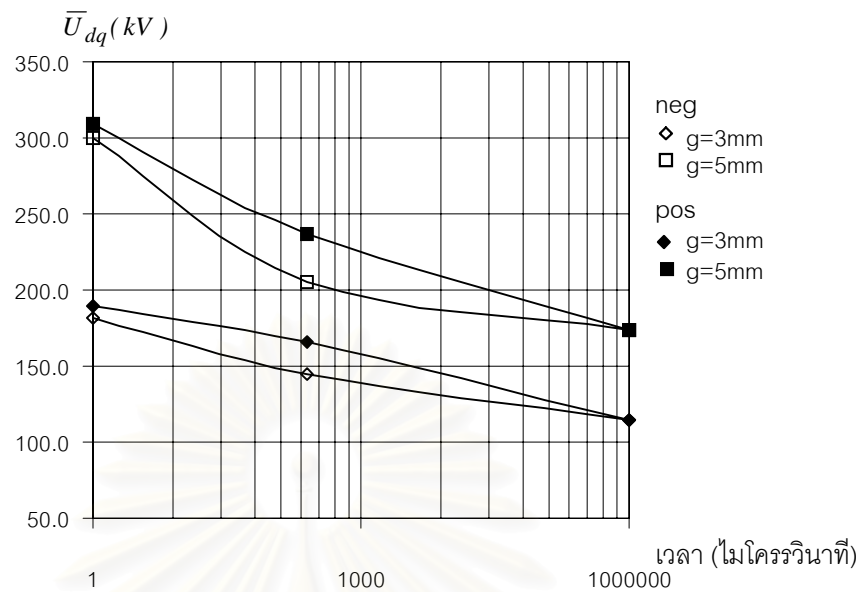
(ก) ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm



(ข) ทรงกลมรัศมีขนาด 5 mm



(ค) ทรงกลมรัศมีขนาด 10 mm

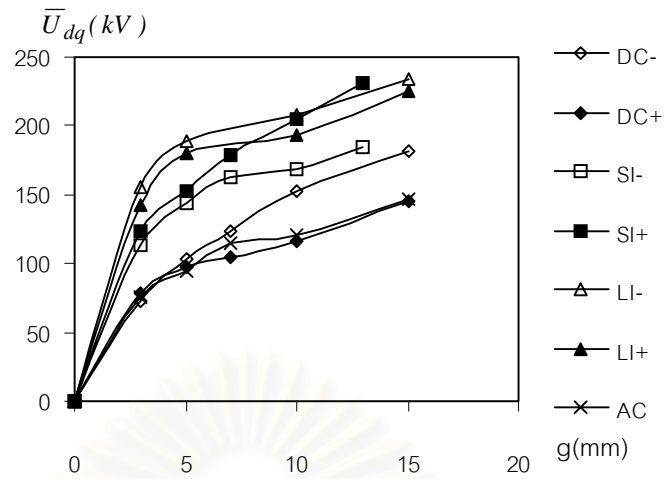


(ง) ทรงกลมรัศมีขนาด 15 mm

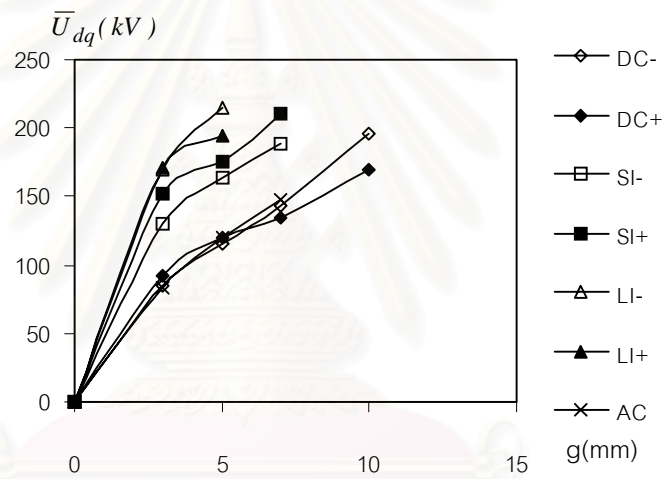
รูปที่ 6.16 แรงดันเบรกดาวนกับเวลาคงอยู่ของรูปคลื่นแรงดันชนิดต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30°C ที่อันดับควอนไทล์ที่ 22%

6.4 การเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนกับระยะแกปของรูปคลื่นแรงดันชนิดต่างๆ

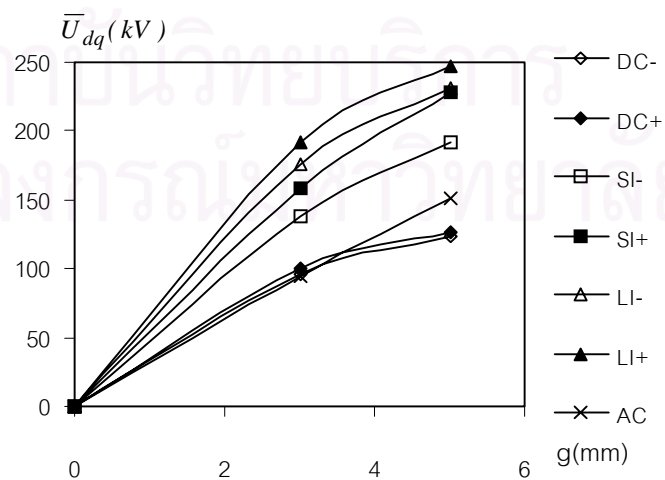
การเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนค่ายอดแรงดันกับระยะแกปของรูปคลื่นแรงดันชนิดต่างๆ ในน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์ พบว่าแรงดันเบรกดาวนของรูปคลื่นแรงดันทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะแกปที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.17 ซึ่งในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง เช่น อิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 2.5 mm พบว่าค่าแรงดันเบรกดาวนในช่วงระยะแกปไม่เกิน 7 mm ค่าแรงดันเบรกดาวนอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบมีค่าสูงที่สุดตามด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก , แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ชั่วบวก , แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ชั่วพลบ , แรงดันกระแสตรงชั่วพลบ , แรงดันกระแสสลับและแรงดันกระแสตรงชั่วบวก ตามลำดับ โดยแรงดันเบรกดาวนที่ได้มีผลกระทบจากประจุค้าง (space charge) มาเกี่ยวข้องทำให้แรงดันเบรกดาวนชั่วพลบที่ค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาวนชั่วบวกยกเว้นแรงดันเบรกดาวนสวิตชิ่งอิมพัลส์ที่ชั่วบวกมากกว่าชั่วพลบ และที่ระยะแกปมากกว่า 7 mm พบว่าแรงดันเบรกดาวนสวิตชิ่งอิมพัลส์ชั่วบวกมีค่าสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6.17(ก) ส่วนในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย เช่น อิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 15 mm พบว่าค่าแรงดันเบรกดาวนอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวกมีค่าสูงที่สุดตามด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบ , แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ชั่วบวก , แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ชั่วพลบ , แรงดันกระแสสลับ , แรงดันกระแสตรงชั่วบวกและแรงดันกระแสตรงชั่วพลบ ตามลำดับ โดยค่าแรงดันเบรกดาวนที่ได้ไม่ได้รับผลของประจุค้างและการเกิดเบรกดาวนเป็นการเบรกดาวนโดยตรง ทำให้แรงดันเบรกดาวนชั่วบวกมีค่าสูงกว่าแรงดันชั่วพลบ



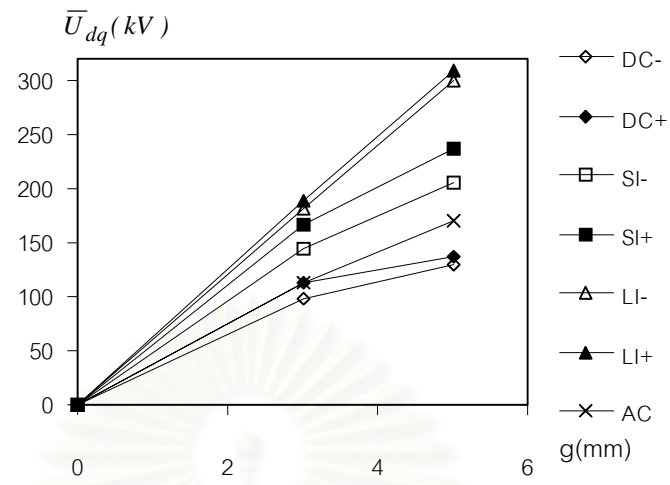
(ก) ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm



(ข) ทรงกลมรัศมีขนาด 5 mm



(ค) ทรงกลมรัศมีขนาด 10 mm



(ง) ทรงกลมรัศมีขนาด 15 mm

รูปที่ 6.17 แรงดันเบรกดาวกับระยะแก๊ปที่อิเล็กโทรดทรงกลมขนาดต่างๆ ณ อุณหภูมิ 30°C

6.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองแรงดันเบรกดาวนส์วิตซ์ซิมพัลส์

พิจารณาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวนส์วิตซ์ซิมพัลส์กับระยะแกป ดังแสดงในรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6 พบว่าการเพิ่มระยะแกปมีผลทำให้แรงดันเบรกดาวนส์มีค่าสูงขึ้นทั้งชั่ววอกและชั่วลบ โดยกราฟมีลักษณะโค้งแบบโพลีโนเมียลดังความสัมพันธ์ [8]

$$V = kg^n$$

โดยที่

V = ค่าแรงดันเบรกดาวนส์

K = ค่าคงที่

g = ระยะแกป

n = แฟกเตอร์โพลีโนเมียล มีค่าระหว่าง 0-1

มีความหมายว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนส์มีขนาดลดลงตามระยะแกปที่กว้างขึ้น การเพิ่มระยะแกปเป็นการเพิ่มปริมาณของลิงจือปนหรือจุดอ่อนแอ (weak link) ที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรด อีกทั้งความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณผิวทรงกลมมีค่าสูงขึ้นและมีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนส์ที่ระยะแกปแคบจึงมีค่าสูงกว่าที่ระยะแกปกว้าง ซึ่งใช้อธิบายความสัมพันธ์ของความเครียดสนามไฟฟ้า (E_{dq}) กับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (FF) ดังแสดงในรูปที่ 6.9

เมื่อระยะแกปคงที่ การทำให้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วยการลดขนาดอิเล็กโทรดทรงกลม ทำให้แรงดันเบรกดาวนส์มีค่าลดลงตามขนาดอิเล็กโทรดทรงกลมที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6.7 สามารถอธิบายโดยพิจารณาการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด กล่าวคือที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวทรงกลมมีค่าสูงและการกระจายสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูง ทำให้โอกาสเกิดเบรกดาวนส์ตามกลไกการเกิดเบรกดาวนส์เกิดขึ้นได้ง่าย

ในการพิจารณาผลของชั่วแรงดัน พบว่าแรงดันเบรกดาวนส์ชั่ววอกมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาวนส์ชั่วลบทุกขนาดอิเล็กโทรดทรงกลมและระยะแกปดังแสดงในรูปที่ 6.7 เพื่ออธิบายผลการทดลองดังกล่าวจึงเปลี่ยนอิเล็กโทรดเป็นอิเล็กโทรดแบบรีดแกป-ระนาบ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมาก โดยปลายรีดแกปมียอดสูงเพียง 3.5 mm และทำมุม 50° ที่ระยะแกป 20 , 30 และ 40 mm พบว่าแรงดันเบรกดาวนส์ชั่ววอกมีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาวนส์ชั่ววอกเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 6.8 แสดงว่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีผลต่อแรงดันเบรกดาวนส์และชั่วแรงดัน โดยอิเล็กโทรดแบบรีดแกปซึ่งก่อนเกิดเบรกดาวนส์มีการเกิดดิสชาร์จบางส่วนสูงมากกว่าแบบอิเล็กโทรดทรงกลม จึงได้รับผลของประจุค้าง (space charge) มากกว่าจนทำให้

ดาวนซ์ข้าวลบมีค่าสูงกว่าแรงดันข้าวบวก ซึ่งจากการคำนวณหาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Maxwell พบว่าค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของรีดเกบ-ระนามมีค่ามากกว่า 40 แต่กรณีอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์มีขนาด 2.5 mm ระยะเกบ 13 mm มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเพียง 4.84 เท่านั้น

ทางด้านผลกระทบของอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 30-80°C แรงดันเบรกดาวนซ์จะสูงขึ้นทุกขนาดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์และระยะเกบทั้งข้าวบวกและข้าวลบ โดยแรงดันเบรกดาวนซ์สูงสุดที่อุณหภูมิ 80°C

จากคุณสมบัติทางเคมีที่ว่าความสามารถในการละลายของควีนและก๊าซจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [3,25] และจากกลไกการเกิดดิสชาร์จหรือเบรกดาวนซ์ของแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงโดยทั่วไป จะปรากฏเมื่อมีฟองก๊าซเกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงด้วยความร้อนจากความร้อนแฝงในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง และเมื่อน้ำมันหม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายของก๊าซเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ทำให้ปริมาณฟองก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงลดลงโอกาสเกิดเบรกดาวนซ์จึงยากขึ้น การที่แรงดันเบรกดาวนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นก็สามารถอธิบายได้

จากรูปที่ 6.13(ก) ในกรณีข้าวบวก พบว่าอัตราค่าเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาวนซ์($\%U_{dq}$) มีค่าสูงขึ้นเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายความสัมพันธ์นี้โดยใช้ทฤษฎีปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง (stress volume หรือ critical volume)

เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ (อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์มีขนาดใหญ่) แม้ว่าความสามารถในการละลายของก๊าซจะมีค่าสูงที่อุณหภูมิสูงก็ตาม แต่เนื่องจากการกระจายสนามไฟฟ้ามีลักษณะเกือบสม่ำเสมอ ปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีบริเวณกว้าง บริเวณส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงนี้จึงยังคงมีฟองก๊าซอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้แรงดันเบรกดาวนซ์เปลี่ยนแปลงน้อยตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูง (อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็ก) การกระจายสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงบริเวณผิวทรานซิสเตอร์ เนื่องจากทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็กปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีบริเวณแคบ เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงสามารถในการละลายของฟองก๊าซเพิ่มขึ้น ทำให้ฟองก๊าซที่อยู่ในบริเวณปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีจำนวนน้อยกว่าที่อุณหภูมิห้องมาก การเกิดเบรกดาวนซ์จึงยากขึ้นทำให้แรงดันเบรกดาวนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นมากตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 6.13(ก) ในกรณีข้าวลบ พบว่าเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงขึ้นผลของปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเริ่มมีผลกระทบของปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้องกับการเกิดเบรกดาวนซ์โดยเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงทำให้ $\%U_{dq}$ มีค่าลดลง สามารถอธิบายโดยการเกิดเบรกดาวนซ์อิมพัลส์มี

กลไกเริ่มต้นจากพองอากาศที่เกิดจากพัลส์กระแสที่มีความหนาแน่นสูงในบริเวณพื้นผิวที่ขรุขระขนาดเล็ก (micro surface roughness) ซึ่งมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงทำให้น้ำมันหม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาอยู่ในอันดับของไมโครวินาที เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำมันหม้อแปลงทำให้บริเวณนั้นเกิดเป็นพองอากาศขึ้น [27] ถ้าพองอากาศอยู่ในบริเวณปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในพองอากาศมีค่าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของอากาศ ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและอาจเกิดเบรกดาวนื้ต่อมา โดยที่การเกิดพองอากาศมีความสัมพันธ์กับจำนวนพัลส์กระแส [28] และส่วนใหญ่มีเฉพาะช่วงเวลานั้นที่มีผลจากการเพิ่มขึ้นของพัลส์กระแสเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โอกาสเกิดเบรกดาวนื้ของช่วงบ่ง่ายขึ้น ทั้งนี้ในช่วงที่การกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยเนื่องจากอิเล็กโตรดทรงกลมมีขนาดใหญ่ ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวที่ขรุขระมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับขนาดอิเล็กโตรด ทำให้เกิดพองอากาศยากแม้ว่าอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงจะสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวขรุขระจึงมีผลกระทบต่อกลไกการเกิดเบรกดาวนื้ น้อย ค่า $\%P_{dq}$ จึงมีผลจากปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงอย่างเดียว แต่เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นเนื่องจากอิเล็กโตรดทรงกลมมีขนาดเล็กบริเวณพื้นผิวขรุขระจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมาก เนื่องจากดูเหมือนว่ามีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม โอกาสเกิดพองอากาศจึงง่ายกว่าและก่อให้เกิดการเบรกดาวนื้ได้ ทำให้ผลของปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงลดลงและเกิดแนวโน้มการลดลงของ $\%P_{dq}$ เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ซึ่งเกิดเฉพาะช่วงบ่ง่ายขึ้นเนื่องมาจากความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดพองอากาศกับพัลส์กระแส

แนวโน้มลักษณะนี้ได้รับการพิสูจน์อีกครั้งจากผลการทดลองที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5mm ที่ระยะแกปต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.13(ข) พบว่า $\%P_{dq}$ มีลักษณะเกือบคงที่ที่มีค่าเพิ่มตามแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย โดย $\%P_{dq}$ ช่วงบ่ง่ายมีค่าประมาณ 55% และ $\%P_{dq}$ ช่วงลบมีค่าประมาณ 20% การที่ทรงกลมขนาดเล็กปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเพิ่มขึ้นน้อยเมื่อระยะแกปกว้างขึ้นเพราะความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงจะอยู่บริเวณปลายทรงกลม (sphere tip) ทำให้ $\%P_{dq}$ มีค่าเกือบคงที่ ทั้งนี้การที่ $\%P_{dq}$ ช่วงบ่ง่ายมีค่ามากกว่า $\%P_{dq}$ ช่วงลบ สามารถอธิบายด้วยผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้สตรีมเมอร์ช่วงบ่ง่ายมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วและพัลส์กระแสทำให้เกิดเบรกดาวนื้ได้ง่ายขึ้นแต่สตรีมเมอร์ช่วงลบไม่มีผลดังกล่าว จึงทำให้ $\%P_{dq}$ ของช่วงบ่ง่ายสูงกว่า $\%P_{dq}$ ของช่วงลบเช่นเดียวกับกรณีแรงดันกระแสตรง

นอกจากนี้ที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าใกล้เคียงกัน โดยปกติปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากขึ้นตามระยะแกปที่กว้างขึ้น ทำให้ที่ระยะแกปสูงมีปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนาม

ไฟฟ้าสูงมากกว่าที่ระยะแถบแคบ ดังนั้น $\%P_{dq}$ ที่ระยะแถบ 5 mm จึงมีค่าต่ำกว่า $\%P_{dq}$ ที่ระยะแถบ 3 mm ดังแสดงในรูปที่ 6.13(ก)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปวิธีการทดลอง

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงและสวิตชิงอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์ เริ่มจากความต้องการที่จะทราบแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงและสวิตชิงอิมพัลส์ที่สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ และทำการศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่พบมากในทางปฏิบัติ 2 พารามิเตอร์ คือ การกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิขณะใช้งาน ภายหลังจากการศึกษาควรทราบว่า การกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิขณะใช้งานของน้ำมันหม้อแปลงมีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงอย่างไร และสามารถนำค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามาใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้

การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นลักษณะเชิงทดลองเพื่อหาลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยการควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทดลองให้ขนาดอนุภาคเจือปนของแข็งเล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ และปริมาณความชื้นประมาณ 30 ppm เพื่อให้ น้ำมันหม้อแปลงมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันในทุกทดลอง โดยชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าใช้ฉนวนเกรดแบบทรงกลม-ระนาบ เพื่อศึกษาผลกระทบของการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงในช่วง $30\text{-}80^{\circ}\text{C}$ ในศึกษาผลกระทบของการกระจายสนามไฟฟ้าจะศึกษาผ่านตัวแปรขนาดอิเล็กโตรดและระยะแคป โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทั้งชั่ววอกและชั่วลบ , แรงดันสวิตชิงอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ($250/2500 \mu\text{s}$) ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ

น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทำการทดลองเป็นชนิดน้ำมันแร่ โดยเป็นน้ำมันหม้อแปลงเชิงการค้ามีชื่อทางการค้าว่า Sun-Ohm นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่นซึ่งเป็นน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าของบริษัทเจริญชัยหม้อแปลงจำกัด มีคุณสมบัติตามมาตรฐานกำหนดดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยทั้งก่อนและหลังการทดลองจะตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงด้วยการวัดคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามมาตรฐาน IEC 156:1963

การทดลองกรณีแรงดันกระแสตรงใช้วิธีป้อนแรงดันเพิ่มแบบต่อเนื่อง ที่แรงดันเริ่มต้น (u_0) เท่ากับ 0 kV , อัตราการเพิ่มแรงดัน (v_0) เท่ากับ 5 kV/s จนกระทั่งเกิดเบรกดาวนั ช่วงเวลารอหลังการเกิดเบรกดาวนัก่อนจะทำการทดลองครั้งต่อไปใช้เวลา (Δt_p) ประมาณ 1.5 นาที โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติของแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงที่อุณหภูมิประมาณ 30°C และทำการแทนการกระจายของผลการทดลองด้วยการกระจายทางทฤษฎีที่เหมาะสมเพื่อใช้คำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนัที่มีความน่าจะเป็นในการเกิด

เบรกดาวนิต่ำ โดยเลือกจำนวนครั้งที่ทำการทดลองจากขอบเขตความคลาดเคลื่อนการกระจายดังแสดงในรูปที่ 3.3 ได้ค่าที่เหมาะสมเท่ากับ 24 ครั้ง ค่าแรงดันเบรกดาวนิต่ำที่จะผ่านการทดสอบความเป็นอิสระต่อกันโดยใช้การสร้างกราฟเปรียบเทียบและวิธีทดสอบการเกิดซ้ำ (iteration test) และแทนฟังก์ชันการกระจายของผลการทดลองด้วยการกระจายทางทฤษฎี 2 แบบคือการกระจายแบบปกติ และการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ โดยค่าแรงดันเบรกดาวนิต่ำเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนที่คำนวณได้จากการทดลองจะนำมาใช้ศึกษาผลกระทบของขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกลมและระยะแกป ช่วงที่สองเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ทำการทดลองที่แต่ละสภาวะโดยใช้จำนวนครั้งการทดลองเท่ากับ 8 ครั้ง เปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิต่อขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกลมและระยะแกปโดยใช้ค่าแรงดันเบรกดาวนิต่ำเฉลี่ย

การทดลองกรณีแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์หาค่าแรงดันเบรกดาวนิต่ำควอนไทล์อันดับต่ำด้วยวิธีแรงดันเพิ่ม โดยแรงดันเพิ่มแต่ละขั้น (Δu) เท่ากับ 7 kV , แรงดันเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันที่คาดว่าจะเกิดเบรกดาวนิต่ำประมาณ 3s (ประมาณ 30-40 kV) , จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันแต่ละขั้น (m) เท่ากับ 5 ครั้งและหลังการเกิดเบรกดาวนิต่ำประมาณ 2 นาทีก่อนเริ่มป้อนแรงดันเริ่มต้นครั้งต่อไป โดยค่าแรงดันคงทนอยู่ได้ (ค่าแรงดันระดับขั้นสูงสุดที่ยังไม่เกิดเบรกดาวนิต่ำจากการป้อนแรงดันที่ระดับแรงดันนั้นเป็นจำนวน 5 ครั้ง) อยู่ในตำแหน่งควอนไทล์อันดับที่ 22%-27% (จากการคำนวณทางทฤษฎี) ค่าแรงดันคงทนอยู่ได้เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองเบรกดาวนิต่ำจำนวน 6 ครั้ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกลม , ระยะแกปและอุณหภูมิ

7.2 สรุปผลการทดลอง

หลังจากที่ทำการทดลองตามสภาวะต่างๆแล้ว ได้ทำการสร้างกราฟเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวนิต่ำและความเครียดสนามไฟฟ้ากับขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรด , ระยะแกป , แพกเตอริสสนามไฟฟ้า , อุณหภูมิและชั่วแรงดัน ได้ผลดังต่อไปนี้

7.2.1 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ในการทดลองหาแรงดันเบรกดาวนิต่ำกระแสตรง พบว่าสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนของการทดลองชั่วบวกลบอยู่ในช่วง 0.08-0.13 และชั่วลบบอยู่ในช่วง 0.06-0.11 โดยลักษณะสมบัติเชิงสถิติของการกระจายของข้อมูลแทนด้วยการกระจายแบบปกติได้อย่างเหมาะสมกว่าการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ แม้ว่าผลต่างของค่าความน่าจะเป็นที่มากที่สุด (d_{max}) ของฟังก์ชันการกระจายของผลการทดลองกับการกระจายทางทฤษฎีทั้งสองจะมีค่าใกล้เคียงกันแต่เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ U_{00} ของการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์บางกรณี พบว่ามีค่าต่ำกว่าศูนย์ ซึ่งเป็นไปไม่ได้จึงไม่เหมาะสมต่อการเปรียบเทียบต่อไป การวิเคราะห์เปรียบเทียบต่างๆจึงอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าค่าแรงดันเบรกดาวนิต่ำที่ได้จากการทดลองมีการกระจายแบบปกติ

ค่าแรงดันเบรกดาวนิต่ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกลมและระยะแกปที่เพิ่มขึ้นทั้งชั่วบวกลบและชั่วลบ โดยความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนิต่ำลดลงตามระยะแกปที่กว้างขึ้น ส่วน

ผลของการกระจายสนามไฟฟ้าพบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาว์นลดลงเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงขึ้น

เมื่อระยะแกปคงที่ การทำให้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วยการลดขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม ทำให้แรงดันเบรกดาว์นมีค่าลดลงตามขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมที่ลดลง

ผลของขั้วแรงดันพบว่า เมื่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงหรืออิเล็กโตรดทรงกลมขนาดเล็กการกระจายของสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูงแรงดันเบรกดาว์นขั้วลบมีค่าสูงกว่าแรงดันขั้วบวก แต่ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรืออิเล็กโตรดทรงกลมขนาดใหญ่ขึ้น แรงดันเบรกดาว์นขั้วบวกกลับมีค่าสูงกว่าขั้วลบ

ทางด้านผลกระทบของอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง $30-80^{\circ}\text{C}$ ค่าแรงดันเบรกดาว์นจะสูงขึ้นทุกขนาดอิเล็กโตรดและระยะแกปทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยค่าแรงดันเบรกดาว์นสูงสุดที่อุณหภูมิ 80°C

เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาว์น($\%U_d$)ที่อุณหภูมิ 80°C เทียบกับอุณหภูมิ 30°C พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาว์นมีค่าสูงขึ้นเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ส่วนที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ที่ระยะแกปต่างๆ พบว่า $\%U_d$ มีลักษณะเกือบคงที่ โดย $\%U_d$ ขั้วบวกมีค่าประมาณ 40% และ $\%U_d$ ขั้วลบมีค่าประมาณ 30% ซึ่ง $\%U_d$ ขั้วบวกมีค่ามากกว่า $\%U_d$ ขั้วลบ

นอกจากนี้ที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าใกล้เคียงกัน โดยปกติปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากขึ้นตามระยะแกปที่กว้างขึ้น ทำให้ที่ระยะแกปสูงมีปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากกว่าที่ระยะแกปแคบ ดังนั้น $\%U_d$ ที่ระยะแกป 5 mm จึงมีค่าต่ำกว่า $\%U_d$ ที่ระยะแกป 3 mm

7.2.2 แรงดันสวิตชิงอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน

ในการทดลองหาแรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์พบว่า สัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนของการทดลองขั้วบวกอยู่ในช่วง $0.04-0.12$ และขั้วลบอยู่ในช่วง $0.04-0.12$ เช่นกัน

แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมและระยะแกปที่เพิ่มขึ้นทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาว์นลดลงตามระยะแกปที่กว้างขึ้น ส่วนผลของการกระจายสนามไฟฟ้าพบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาว์นลดลงเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงขึ้น

เมื่อระยะแกปคงที่ การทำให้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วยการลดขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมทำให้แรงดันเบรกดาว์นมีค่าลดลงตามขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมที่ลดลง

ในการพิจารณาผลของขั้วแรงดัน พบว่าแรงดันเบรกดาว์นขั้วบวกมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาว์นขั้วลบทุกขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมและระยะแกป เพื่ออธิบายผลการทดลองดังกล่าวจึงเปลี่ยนอิเล็กโตรดเป็นอิเล็กโตรดแบบรีดแกป-ระนาบ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง พบว่าแรงดันเบรกดาว์นขั้วลบมีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาว์นขั้วบวกเล็กน้อย แสดงว่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีผลต่อแรงดันเบรกดาว์นและขั้วแรงดัน

ทางด้านผลกระทบของอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 30-80°C ค่าแรงดันเบรกดาวนจะสูงขึ้นทุกขนาดอิเล็กโตรดและระยะแกปทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยค่าแรงดันเบรกดาวนสูงสุดที่อุณหภูมิ 80°C

เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาวน(% U_{dq})ที่อุณหภูมิ 80°C เทียบกับอุณหภูมิ 30°C พบว่าในกรณีขั้วบวกอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาวนมีค่าสูงขึ้นเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น แต่ในกรณีขั้วลบเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงขึ้นผลของปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเริ่มมีผลกระทบจากปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้องกับการเกิดเบรกดาวนทำให้ % U_{dq} มีค่าลดลง ส่วนที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ที่ระยะแกปต่างๆ พบว่า% U_{dq} มีลักษณะเกือบคงที่ โดย% U_{dq} ขั้วบวกมีค่าประมาณ 55% และ % U_{dq} ขั้วลบมีค่าประมาณ 20% ซึ่ง% U_{dq} ขั้วบวกมีค่ามากกว่า% U_{dq} ขั้วลบ

นอกจากนี้ที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าใกล้เคียงกัน โดยปกติปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากขึ้นตามระยะแกปที่กว้างขึ้น ทำให้ที่ระยะแกปสูงมีปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากกว่าที่ระยะแกปแคบ ดังนั้น% U_{dq} ที่ระยะแกป 5 mm จึงมีค่าต่ำกว่า% U_{dq} ที่ระยะแกป 3 mm

7.2.3 ฐานข้อมูลเพื่อการออกแบบ

ผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดลองแรงดันเบรกดาวนกระแสตรงสามารถนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อการออกแบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ดี โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนองแรงดันกระแสสลับจากผลการทดลองของ Kappeler พบว่ามีแนวโน้มขนานกัน โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนมีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนช่วงเวลา 1 วินาที ที่อันดับควอนไทล์ที่ 22% สำหรับแรงดันกระแสตรงขั้วบวก และเท่ากับ 26% สำหรับแรงดันกระแสตรงขั้วลบ

เมื่อใช้วิธีการทางสถิติคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนซึ่งมีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนช่วงเวลา 1 วินาที ที่อันดับควอนไทล์ที่ 1% พบว่าสามารถเป็นข้อมูลเพื่อการออกแบบได้เช่นกันแต่อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการคำนวณทางสถิติจึงควรระมัดระวัง

ส่วนกรณีผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดลองแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ พบว่าเส้นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนของแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบที่ทรงกลมรัศมีขนาด 10 mm และ 15 mm มีลักษณะขนานกับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนองแรงดันกระแสสลับจากการทดลองของ Kappeler ส่วนที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm และ 5 mm ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เส้นกราฟจะมีความชันมากกว่า ซึ่งจากการคำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง พบว่าค่าแรงดันคงทนอยู่ได้มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวนที่อันดับควอนไทล์ที่ 22-27 % โดยอันดับควอนไทล์ที่ 22% พบว่าอัตราส่วนแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ (ค่ายอดแรงดัน) มีค่าอยู่ในช่วง 1.27-1.78 สำหรับขั้วบวกและมีค่าอยู่ในช่วง 1.14-1.52 สำหรับขั้ว

ลบ ส่วนอันดับควอนไทล์ที่ 27% พบว่าอัตราส่วนแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ(ค่ายอดแรงดัน) มีค่าอยู่ในช่วง 1.22-1.73 สำหรับขั้วบวกและมีค่าอยู่ในช่วง 1.10-1.48 สำหรับขั้วลบ

จากผลการทดลองในอดีต [26] พบว่าอัตราส่วนแรงดันเบรกดาว์นกระแสสลับช่วงเวลา 1 วินาทีต่อแรงดันเบรกดาว์นกระแสสลับช่วงเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1.3 เมื่อใช้ความสัมพันธ์นี้จะได้อัตราส่วนของแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ(ค่ายอดแรงดัน) ช่วงเวลา 1 นาที ในกรณีอันดับควอนไทล์ที่ 22% มีค่าอยู่ในช่วง 1.65-2.31 สำหรับขั้วบวกและมีค่าอยู่ในช่วง 1.48-1.98 สำหรับขั้วลบ ส่วนกรณีอันดับควอนไทล์ที่ 27% มีค่าอยู่ในช่วง 1.59-2.25 สำหรับขั้วบวกและมีค่าอยู่ในช่วง 1.43-1.92 สำหรับขั้วลบ

7.3 ข้อเสนอแนะ

7.3.1 การนำผลของวิทยานิพนธ์ไปใช้งาน

จากผลการศึกษาการกระจายสนามไฟฟ้า (ขนาดอิเล็กโตรดและระยะแกป) และอุณหภูมิขณะใช้งาน สามารถนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ดี โดยใช้ผลการวิจัยดังนี้

1) การออกแบบฉนวนน้ำมันหม้อแปลงสำหรับแรงดันกระแสตรงหรือแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์สามารถใช้ข้อมูลของน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิห้องไปใช้ออกแบบได้ โดยไม่ต้องคิดผลของสถานะที่น้ำมันหม้อแปลงขณะใช้งานมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากแรงดันเบรกดาว์นของน้ำมันหม้อแปลงมีค่าสูงขึ้นเมื่อน้ำมันหม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง $30-80^{\circ}\text{C}$ ทั้งการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและไม่สม่ำเสมอสูง

2) การออกแบบฉนวนน้ำมันหม้อแปลงโดยใช้งานในแรงดันกระแสตรงควรใช้เส้นกราฟที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาว์น 1% ออกแบบแต่ควรมีแฟกเตอร์เพื่อความปลอดภัยเผื่อไว้ด้วยเพราะอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการคำนวณทางสถิติ (การคำนวณทางสถิติใช้ข้อมูลจากผลการทดลองมาคิด)

7.3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ มีอุปสรรคที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองซึ่งควรจะกล่าวไว้เพื่อประโยชน์แก่การศึกษาวิจัยต่อไปดังนี้

1) การตรวจสอบคุณภาพน้ำมันหม้อแปลง เนื่องจากในการทดลองเราทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงด้วยการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามมาตรฐาน IEC 156:1963 ซึ่งมีเหตุผลพอที่จะเชื่อถือได้ แต่การวัดปริมาณความชื้นเราทำการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันเบรกดาว์นในอดีตที่ศึกษาผลกระทบบของปริมาณความชื้นกับแรงดันเบรกดาว์น ไม่ได้ทำการใช้เครื่องมือวัดปริมาณความชื้นจริงเนื่องจากไม่มีเครื่องมือดังกล่าวในห้องวิจัย การศึกษาต่อไปควรจะวัดปริมาณความชื้นและปริมาณก๊าซด้วยถ้าเป็นไปได้

2) ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ในชุดทดลองมีปัญหา คือ เมื่ออุณหภูมิในชุดทดลองสูงประมาณ 80°C เป็นเวลานานสารฮีฟอกซีเรซินที่คอยเชื่อม

ระหว่างฝาอะลูมิเนียมและท่ออะคริลิกเริ่มอ่อนตัวจนทำให้เกิดการรั่วได้และเมื่อชุดทดลองยังร้อนอยู่การเคลื่อนย้ายชุดทดลองต้องทำอย่างระมัดระวังเพราะอาจเกิดการแตกร้าวของสารอีพ็อกซีเรซิน จากผลกระทบดังกล่าวควรใช้วงแหวนโอรังคอยเชื่อมระหว่างฝาอะลูมิเนียมและท่ออะคริลิกแทนสารอีพ็อกซีเรซิน

3) ในการทดลองหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของแรงดันกระแสตรงและแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ เนื่องจากแรงดันทั้งสองเป็นประเภทมีขั้วโดยภายหลังการเกิดเบรกดาวน์จะมีประกจุค้างเกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลง ทำให้ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้รับ การทดลองจึงควรใช้วิธีการทดลองแบบแรงดันเพิ่ม โดยการทดลองด้วยวิธีนี้จะไม่ได้รับผลของประกจุค้าง

4) ในการทดลองการเกิดเบรกดาวน์ควรจะทำกักกระแสในการเกิดเบรกดาวน์เพื่อลดความเสียหายของน้ำมันหม้อแปลงและผิวฉนวนเล็กโตรด โดยในการทดลองแรงดันกระแสตรงทำได้โดยการใส่ความต้านทานจำกัดกระแสและการใช้อุปกรณ์ตัดวงจรขณะเกิดเบรกดาวน์ที่มีความไว เช่น อุปกรณ์ตัดวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะช่วยลดพลังงานขณะเกิดเบรกดาวน์ลง ส่วนการทดลองแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ทำได้โดยการใส่ความต้านทานจำกัดกระแสและพยายามทำให้ชุดกำเนิดแรงดันมีตัวเก็บประจุที่น้อยที่สุดเช่น ไม่ใช้ตัวเก็บประจุไหลด , ลดขนาดตัวเก็บประจุของเครื่องกำเนิดแรงดัน เป็นต้น

7.3.3 งานวิจัยที่ควรศึกษาต่อไป

การศึกษาค้นคว้าทางด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลง ขณะนี้ทางห้องวิจัยมีครบทั้ง 4 รูปคลื่นแล้ว โดยทำการศึกษผลกระทบของการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิขณะใช้งาน การวิจัยต่อไปขอเสนอไว้ดังนี้

1) ศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหนวนชนิดอื่น เช่น น้ำมันซิลิโคน , น้ำมันพีช , ก๊าซเหลวและน้ำมันสังเคราะห์อื่นๆ เป็นต้น โดยเฉพาะในน้ำมันซิลิโคนที่ขั้วแรงดันมีผลอย่างมากต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ขั้วลบสูงกว่าขั้วบวกมาก)

2) ศึกษาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงชนิดต่างๆที่มีใช้ในท้องตลาดเพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลต่อไปเพราะการเปรียบเทียบแค่ใช้เครื่องทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตาม IEC 156:1963 นั้นเปรียบเทียบได้น้อยเหมาะสำหรับใช้ตรวจสอบคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงในสถานที่ปฏิบัติงานเท่านั้น

3) การทดลองหาแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนในทุกรูปคลื่นแรงดัน อีกทั้งการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ

4) การใส่พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเช่น ความชื้น , ความดัน , อุณหภูมิคาร์บอน , เศษทองแดงหรือเหล็กซิลิกอน , การเคลื่อนที่ ฯลฯ ซึ่งเกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติเพื่อการเปรียบเทียบผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

รายการอ้างอิง

- 1 Ravindra, A. and Wolfgang, M. Liquids dielectrics in high-voltage application:High-voltage insulation engineering. India:Wiley Eastern,1995.
- 2 IEC 296 Specification for new insulating oils for transformers and switchgear,1969.
- 3 Yilmaz, H. , and Guler, S. The effect of electrode shape, gap and moisture on dielectric breakdown of transformer oil. International Conference on conduction and breakdown in dielectric liquids12th(1996) : 354-357.
- 4 Jayaram, S. Effect of thermal and viscous drag forces on ac breakdown characteristics of transformer oil. Proceedings of the Electrical and Dielectric Phenomena Conference (1993) : 396-401.
- 5 Nelson, J.K. An assessment of the physical basis for the application of design criteria for dielectric structures. IEEE tran.EI vol.24(1989): 835-847.
- 6 Oommen, T.V. , and Lindgren , S.R. Streaming electrification study of transformer insulation system using a paper tube model. IEEE Trans. on Power Delivery vol.5, no.2(1990): 972-973.
- 7 E.O.Forster, H.Yamashita, C.Mazzetti, M.Pompili, L.Caroli and S.Patrissi , The effect of the electrode gap on breakdown in liquid dielectrics,IEEE tran. Diel. And Elect. Ins. , Vol.1,No.3,June 1994.
- 8 Danikas, M.G. Breakdown of transformer oil: IEEE EI magazine vol. 6, no. 5(1990) : 27-34.
- 9 El-zeftawy, L.A. , El-Kholy, S.M. , and Eish, T.D. Impulse breakdown of transformer oil under uniform fields. International conference on Conduction and Breakdown in dielectric liquids10th(1990): 584-587.
- 10 มนต์วี ระชารักษ์ , ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ , วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2542.
- 11 M.R.Raghuveer, Z.Kolaczowski, Jin Weifang and E.kuffel , Surface electric strength of processed pressboard under composite ac and dc and conventional stresses , IEEE tran.on EI , Vol.25,No.2, April 1990.
- 12 M.A. Abdallah , Properties of Transformer Oil under Different Types of Voltages , High

Voltage Engineering Symposium , 22-27 August 1999. : 349-351.

- 13 Naidu, M.S. , and Kamaraju, S. Conduction and breakdown in liquid dielectrics: High-voltage engineering. New Delhi:Tata Mcgraw-Hill publishing company limited, 1995.
- 14 สุรพล ดำรงกิตติกุล. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. พิมพ์ครั้งที่1. เชียงใหม่:มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2535.
- 15 Amanpreet Singh Gill , The Design of Transformer oil , IEEE Conf. Elect. Ins. , Anaheim , CA USA , April 5-5 , 2000 : 247-250.
- 16 Beroual, A. and et al. , Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics, IEEE EI magazine vol.14, no.2, March/April 1998 : 6-17.
- 17 Lee, M.J. and Nelson, J.K. Dielectric integrity associated with circulating insulating fluids. IEEE trans. on EI, vol.23, no.4 August 1988 : 712.
- 18 Hauschild, W. , and Mosch, W. , Statistical techniques for high voltage engineering. Peter Peregrinus Ltd, 1992.
- 19 สำรวย สังข์สะอาด , วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร , สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ , 2528.
- 20 Kuffel, E. , and Zaengl, W.S. Electrical breakdown in gases ,solids and liquids: High voltage engineering fundamentals. Oxford:Pergamon Press, 1984.
- 21 Cross, J.D. Breakdown across a dielectric spacer in insulating oil and the role of electrohydrodynamics in liquid breakdown. IEEE trans. on EI vol.EI-17, no.6 ,1982 : 496-497.
- 22 Maxwell 2D field simulator. Ansoft corporation, 1995.
- 23 Kirch, H.J. , and Robinson, I. , เอกสารประกอบการอบรมทางวิชาการเรื่อง High voltage insulation for transformer. , 8-9 มกราคม 2540.
- 24 H.P.Moser , Transformerboard. , 1979.
- 25 Kaufman, R.B., Pierce, J.L. , and Uhlig, E.R. The effect of transformer oil preservation methods on dielectric strength of oil. AIEE transactions (1958): 1316.
- 26 Blume, L.F., Boyajian, A. and et.al. Insulations:Transformer engineering. New York : J.Willy&Sons,Inc. ,1951.
- 27 Khalifa, M. Insulating luquids:High voltage engineering –theory and practice. New York and Basel:Marcel Dekker,Inc., 1990.

- 28 P. Keith Watson. , The growth of pre-breakdown cavities in silicone fluids and the frequency of the accompanying discharge pulses. , IEEE trans. on Dielectric. and Electrical Insulation, vol.5, no.3, 1998 : 345.
- 29 Badent, R. , Kist, K.A. , Schwaband, J. , and Wurster, M. Light emission measurement of pre-discharges in insulating oil. Annual Report on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 1998 : 452-455.
- 30 Chadband, W.G. The electrical breakdown of insulating oil. Power engineering Journal 1992 : 61-67.
- 31 Ikeda, M. , and Menju, S. Breakdown probability distribution and equi-probabilistic V-t characteristic of transformer oil. IEEE trans. on PAS vol.PAS-98,No.4 1978 :1430-1438.
- 32 Rouse, T.O., Mineral Insulating Oil in Transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine ,Vol.143, May-June, 1998 : 6-16.
- 33 H.P.Moser and V.Dahinden , Transformerboard II , 1987.
- 34 A.Badent,K.Kist and et al. , Preliminary report for the IEEE DEIS liquid dielectrics Committee International Study Group on streamer propagation in liquids. , International Conference on conduction and breakdown in dielectric liquids 12th(1996) : 375-378.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการศึกษาผลกระทบของอนุภาคคาร์บอนและผิวอิเล็กทรอนิกส์

ก.1 ค่าแรงดันเบรกดาวนสำหรับศึกษาผลกระทบของอนุภาคคาร์บอนและผิวอิเล็กทรอนิกส์
ตารางที่ ก.1 แรงดันเบรกดาวนกระแสตรงขั้วบวกของน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการทดลอง 48 ครั้ง

โดยใช้ทรงกลมรัศมีขนาด 5mm , ระยะแกป 3 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน	ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน	ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน
1	95.0	17	94.0	33	99.0
2	103.9	18	101.9	34	80.2
3	99.0	19	86.1	35	92.0
4	104.9	20	90.1	36	92.0
5	93.0	21	95.0	37	108.9
6	101.9	22	99.0	38	95.0
7	95.0	23	98.0	39	91.0
8	77.2	24	69.3	40	83.1
U_d (kV)	96.24	U_d (kV)	91.7	U_d (kV)	92.65
s(kV)	8.86	s(kV)	10.35	s(kV)	8.93
v	0.09	v	0.11	v	0.096
9	93.0	25	92.0	41	93.0
10	73.2	26	85.1	42	97.0
11	93.0	27	99.0	43	98.0
12	94.0	28	90.1	44	83.1
13	86.1	29	96.0	45	94.0
14	99.9	30	78.2	46	85.1
15	97.0	31	90.1	47	95.0
16	102.9	32	91.0	48	95.0
U_d (kV)	92.4	U_d (kV)	90.18	U_d (kV)	92.53
s(kV)	9.25	s(kV)	6.38	s(kV)	5.45
v	0.10	v	0.07	v	0.059

ตารางที่ ก.2 แรงดันเบรกดาวนั้กระแสดรงขั้วบวกของน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการทดลอง 80 ครั้ง โดยใช้ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5mm , ระยะแกป 5 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวนั้	ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวนั้	ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวนั้
1	102.4	17	88.6	33	94.5
2	113.3	18	107.4	34	115.3
3	88.6	19	114.3	35	97.5
4	102.4	20	101.4	36	91.5
5	106.4	21	101.4	37	119.2
6	96.5	22	103.4	38	126.2
7	100.4	23	108.4	39	82.6
8	88.6	24	81.6	40	102.4
U_d (kV)	99.83	U_d (kV)	100.82	U_d (kV)	103.66
s(kV)	8.48	s(kV)	10.74	s(kV)	15.11
v	0.08	v	0.11	v	0.15
9	96.5	25	114.3	41	101.4
10	92.5	26	117.3	42	100.4
11	100.4	27	92.5	43	71.7
12	104.4	28	114.3	44	106.4
13	93.5	29	111.3	45	127.2
14	116.3	30	126.2	46	97.5
15	75.7	31	88.6	47	99.5
16	95.5	32	129.1	48	110.3
U_d (kV)	96.86	U_d (kV)	111.70	U_d (kV)	101.81
s(kV)	11.50	s(kV)	14.45	s(kV)	15.43
v	0.12	v	0.13	v	0.15

ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน	ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน
49	123.2	65	114.3
50	122.2	66	91.5
51	99.5	67	103.4
52	108.4	68	110.3
53	100.4	69	112.3
54	106.4	70	95.5
55	108.4	71	108.4
56	114.3	72	103.4
U_d (kV)	110.34	U_d (kV)	104.89
s(kV)	8.96	s(kV)	8.07
v	0.08	v	0.08
57	110.3	73	113.3
58	126.2	74	101.4
59	107.4	75	119.2
60	125.2	76	108.4
61	122.2	77	121.2
62	125.2	78	104.4
63	86.6	79	108.4
64	110.3	80	109.4
U_d (kV)	114.18	U_d (kV)	110.71
s(kV)	13.56	s(kV)	6.85
v	0.12	v	0.06

ตารางที่ ก.3 \bar{U}_d และ v ของน้ำมันหม้อแปลงที่จำนวนครั้งการทดลอง 48 ครั้ง ของทรงกลมรัศมี
ขนาด 5 mm ระยะแกป 3 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

ครั้งที่	$\bar{U}_d(x-y)(kV)$	v	$((\bar{U}_d(x-y) - \bar{U}_d) / \bar{U}_d) * 100$
1-8	96.24	0.09	3.92
9-16	92.40	0.10	-0.22
17-24	91.7	0.11	-1.02
25-32	90.18	0.07	-2.63
33-40	92.65	0.10	0.04
41-48	92.53	0.06	-0.09
1-48	$\bar{U}_d = 92.61 \text{ kV}$, $s = 8.13 \text{ kV}$, $v = 0.09$		

* โดยที่ $\bar{U}_d(x-y)$ คือ ค่าเฉลี่ยของการเกิดเบรกดาวน์ครั้งที่ x ถึง y

ตารางที่ ก.4 \bar{U}_d และ v ของน้ำมันหม้อแปลงที่จำนวนครั้งการทดลอง 80 ครั้ง ของทรงกลมรัศมี
ขนาด 2.5 mm ระยะแกป 5 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

ครั้งที่	$\bar{U}_d(x-y)(kV)$	v	$((\bar{U}_d(x-y) - \bar{U}_d) / \bar{U}_d) * 100$
1-8	99.83	0.08	-5.36
9-16	96.86	0.12	-8.17
17-24	100.82	0.11	-4.42
25-32	111.70	0.13	5.90
33-40	103.66	0.15	-1.72
41-48	101.81	0.15	-3.48
49-56	110.34	0.08	4.61
57-64	114.18	0.12	8.24
65-72	104.90	0.08	-0.55
73-80	110.71	0.06	4.96
1-80	$\bar{U}_d = 105.48 \text{ kV}$, $s = 13.33 \text{ kV}$, $v = 0.13$		

ก.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันโดยใช้วิธี iteration test

เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลแรงดันเบรกดาวนในการศึกษาผลกระทบของอนุภาคคาร์บอนและผิวอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากการเบรกดาวน โดยใช้วิธี iteration test แสดงดังตารางที่ ก.5

ตารางที่ ก.5 การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันโดยใช้วิธี iteration test

รัศมี (mm)	ระยะแกป (mm)	หัวแรงดัน	จำนวนครั้งที่ ทำการทดลอง (n)	จำนวนเหตุการณ์ ที่มากกว่าค่าเฉลี่ย (k)	จำนวน การเกิดซ้ำ (r)	$ Z^* $
5	3	หัวบวก	48	29	23	0.013
2.5	5	หัวบวก	80	41	40	0.813

* จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าแรงดันเบรกดาวนแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน โดยที่ค่า $|Z^*|$ ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่า $|Z^*|$ วิฤตที่ระดับความน่าเชื่อถือ $\alpha=0.10$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.959964

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติของแรงดันกระแสตรง

ข.1 ค่าแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงสำหรับลักษณะสมบัติเชิงสถิติ

ตารางที่ ข.1 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงขั้วบวก ที่ $r = 2.5 \text{ mm}$ ณ อุณหภูมิ $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ครั้งที่	ระยะแกป(mm)				
	3	5	7	10	15
1	76.2	95.0	96.5	120.7	140.0
2	79.2	99.0	89.6	119.7	147.0
3	79.2	78.2	108.4	124.7	146.0
4	73.2	86.1	114.3	96.0	137.1
5	85.1	83.1	101.4	135.6	157.8
6	77.2	97.0	91.5	111.8	148.9
7	78.2	86.1	96.5	125.7	132.1
8	71.3	107.9	88.6	103.9	161.8
9	64.3	82.1	121.2	99.9	115.3
10	86.1	98.0	109.4	112.8	157.8
11	90.1	103.9	125.2	127.7	134.1
12	84.1	89.1	87.6	112.8	135.1
13	76.2	107.9	113.3	99.9	143.0
14	69.3	105.9	125.2	124.7	150.9
15	77.2	110.8	109.4	111.8	151.9
16	79.2	90.1	94.5	95.0	157.8
17	80.2	87.1	109.4	129.6	104.4
18	70.3	108.9	125.2	108.9	153.9
19	79.2	113.8	92.5	138.5	162.8
20	81.1	93.0	91.5	108.9	159.8
21	95.0	101.9	93.5	131.6	105.4
22	71.3	90.1	122.2	114.8	162.8
23	64.3	100.9	114.3	103.9	164.8
24	86.1	110.8	97.5	142.5	152.9
U_d (kV)	78.05	96.94	104.94	116.73	145.14
s(kV)	7.53	10.42	12.98	13.57	17.24
v	0.0965	0.1075	0.1237	0.1163	0.1188

ตารางที่ ข.2 แรงแดันเบรกดาวนักระแสตรงขั้วลบ ที่ $r = 2.5 \text{ mm}$ ณ อุณหภูมิ $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ครั้งที่	ระยะแกป(mm)				
	3	5	7	10	15
1	68.3	109.4	113.8	146.0	187.0
2	72.2	96.0	132.6	139.0	151.4
3	76.2	103.9	110.8	144.0	179.1
4	62.3	99.9	123.7	152.9	174.7
5	76.2	106.9	134.6	151.9	160.8
6	76.2	121.7	123.7	155.9	169.7
7	78.2	89.1	137.6	160.8	154.9
8	68.3	94.0	112.8	148.9	204.4
9	73.2	101.9	122.7	142.0	197.4
10	74.2	99.0	113.8	138.0	184.6
11	68.3	97.0	116.8	147.9	212.3
12	64.3	99.0	117.8	158.8	196.4
13	77.2	96.0	133.6	154.9	157.8
14	75.2	90.1	118.8	156.9	181.6
15	73.2	111.8	122.7	160.8	186.5
16	63.3	107.9	118.8	172.7	201.4
17	79.2	99.9	122.7	164.8	168.7
18	72.2	111.8	130.6	152.9	187.5
19	66.3	99.9	123.7	144.0	185.6
20	71.3	101.9	145.5	164.8	193.5
21	82.1	98.0	130.6	148.9	165.8
22	62.3	121.7	107.9	148.9	185.6
23	76.2	106.9	108.9	157.8	184.6
24	74.2	100.9	127.7	147.0	186.5
$\bar{U}_d \text{ (kV)}$	72.12	102.69	123.00	152.52	181.57
s(kV)	5.55	8.39	9.66	8.67	15.96
v	0.0769	0.0817	0.0786	0.0568	0.0879

ตารางที่ ข.3 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วคราวที่ $r = 5, 10$ และ 15 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

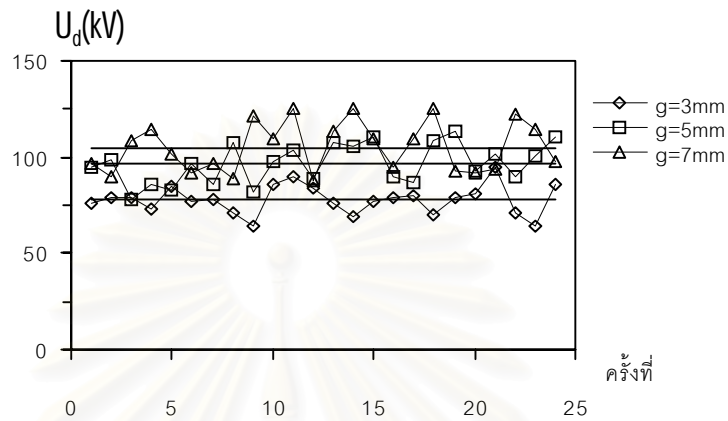
ครั้งที่	ระยะแกป(mm)							
	r=5 mm				r=10 mm		r=15 mm	
	3	5	7	10	3	5	3	5
1	93.0	100.4	131.1	142.0	107.4	109.8	111.8	121.7
2	101.9	99.5	119.2	141.0	101.4	137.6	111.8	124.7
3	95.0	117.3	118.0	159.8	95.5	123.7	114.8	150.4
4	77.2	119.2	124.2	170.7	78.7	117.8	132.6	137.6
5	93.0	111.3	122.2	149.9	97.5	127.7	108.9	134.6
6	73.2	112.3	141.0	137.1	98.5	115.8	106.9	115.8
7	93.0	116.3	143.0	164.8	99.5	122.7	119.7	158.3
8	94.0	131.1	119.2	154.9	103.4	129.6	106.9	146.5
9	86.1	106.4	121.2	180.6	102.4	103.9	102.9	143.5
10	99.9	131.1	162.8	176.6	85.6	134.6	90.1	159.3
11	97.0	126.2	123.2	188.5	93.5	119.7	114.8	129.6
12	102.9	138.0	131.1	157.3	107.4	150.4	109.8	127.7
13	94.0	107.4	123.2	173.2	88.6	128.6	112.8	137.6
14	101.9	105.4	139.0	173.2	90.5	141.5	111.8	136.6
15	86.1	142.0	117.3	207.8	100.4	120.7	115.8	117.8
16	90.1	145.0	165.8	153.4	100.4	131.6	109.8	144.5
17	95.0	123.2	140.0	163.3	112.3	150.4	106.9	141.5
18	99.0	100.4	141.0	184.1	97.5	106.9	107.9	139.5
19	98.0	142.0	152.9	188.0	111.3	126.7	117.8	125.7
20	69.3	86.6	120.2	162.3	105.4	108.9	118.8	132.6
21	92.0	127.2	155.9	142.5	98.5	155.4	116.8	132.6
22	85.1	140.0	164.8	178.1	101.4	128.6	127.7	137.6
23	99.0	109.4	135.1	208.8	121.2	113.8	98.0	134.6
24	90.1	133.1	129.1	197.9	99.5	134.8	116.8	153.4
U_d (kV)	91.91	119.62	135.03	168.99	99.91	126.72	112.15	136.81
s(kV)	8.79	16.11	15.70	20.40	8.98	13.90	8.75	11.69
v	0.0957	0.1346	0.1163	0.1207	0.0898	0.1097	0.0780	0.0854

ตารางที่ ข.4 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วเวลา ที่ $r = 5, 10$ และ 15 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

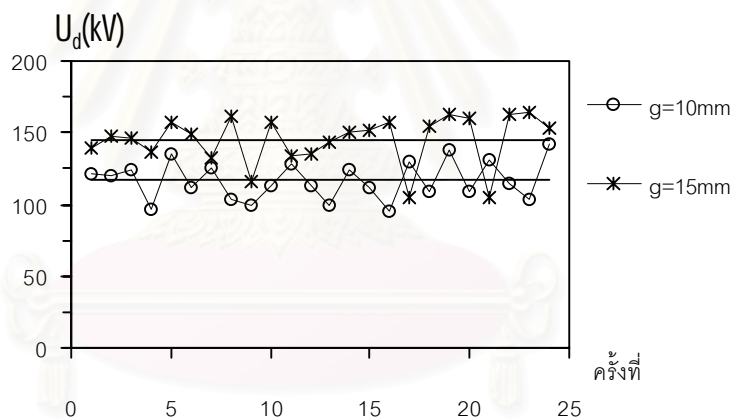
ครั้งที่	ระยะแกป(mm)							
	r=5 mm				r=10 mm		r=15 mm	
	3	5	7	10	3	5	3	5
1	76.2	104.4	140.0	216.7	89.6	132.6	101.9	124.7
2	85.1	95.5	164.8	195.9	91.5	130.6	99.9	118.8
3	78.2	100.4	141.0	165.3	85.6	111.8	106.9	138.5
4	85.1	122.2	137.1	210.8	80.7	113.8	93.0	113.8
5	93.0	114.3	138.0	166.3	108.4	126.7	92.0	143.5
6	77.2	122.2	147.9	209.8	87.6	122.7	92.0	129.6
7	80.2	102.4	153.9	201.9	110.3	113.8	100.9	124.7
8	88.1	111.3	138.0	191.0	104.4	102.9	103.9	118.8
9	90.1	99.5	161.8	200.9	83.6	119.7	112.8	140.5
10	91.0	113.3	149.9	177.1	96.5	112.8	95.0	136.6
11	92.0	107.4	155.9	217.7	102.4	114.8	87.1	123.7
12	94.0	125.2	145.0	189.0	97.5	130.6	101.9	131.6
13	83.1	134.1	132.1	206.8	106.4	136.6	93.0	125.7
14	90.1	112.3	135.1	194.0	79.7	134.6	95.0	121.7
15	86.1	115.3	133.1	185.1	85.6	123.7	104.9	136.6
16	69.3	117.3	143.0	201.9	77.7	148.4	109.8	120.7
17	78.2	120.2	159.8	197.9	96.5	114.8	83.1	123.7
18	93.0	111.3	124.2	158.3	99.5	121.7	99.0	132.6
19	85.1	131.1	146.0	190.5	109.4	102.9	101.9	143.5
20	83.1	128.2	146.0	212.8	96.5	138.5	93.0	147.5
21	91.0	127.2	119.2	202.9	105.4	138.5	103.9	118.8
22	86.1	107.4	143.0	222.7	108.4	113.8	80.2	131.6
23	90.1	121.2	143.0	193.0	95.5	110.8	110.8	132.6
24	72.2	123.2	157.8	220.2	106.4	136.6	102.9	147.5
U_d (kV)	84.90	115.29	143.99	197.01	96.03	123.08	98.55	130.30
s(kV)	6.89	10.53	11.38	17.40	10.34	12.23	8.39	9.80
v	0.0812	0.0913	0.0790	0.0883	0.1077	0.0993	0.0852	0.0752

ข.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันโดยใช้การวาดกราฟเปรียบเทียบ

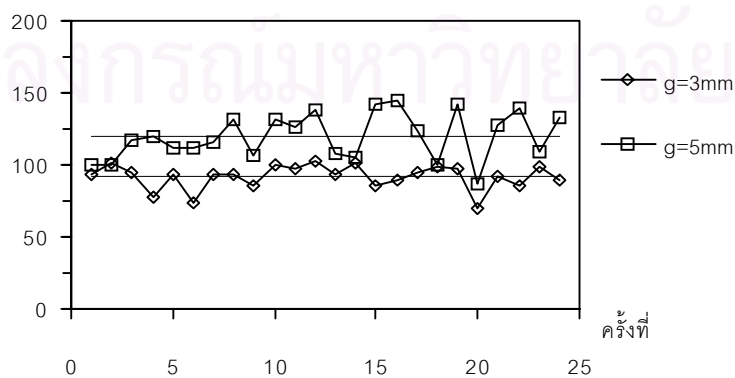
การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลแรงดันเบรกคาวนกระแสตรงชั่วบวก สำหรับการศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติ โดยสร้างกราฟเปรียบเทียบจากข้อมูลในตารางที่ ข.1 และ ข.3



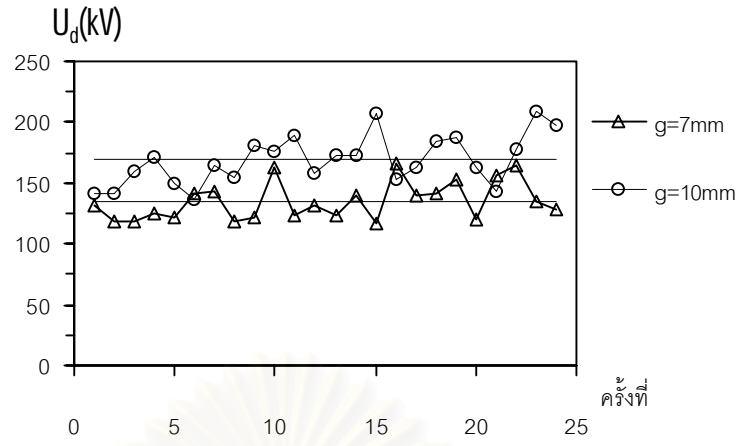
รูปที่ ข.1 $r=2.5$ mm และ $g=3, 5, 7$ mm



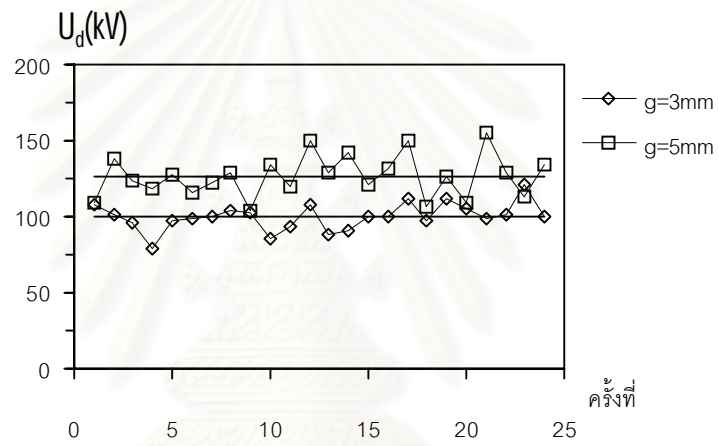
รูปที่ ข.2 $r=2.5$ mm และ $g=10, 15$ mm



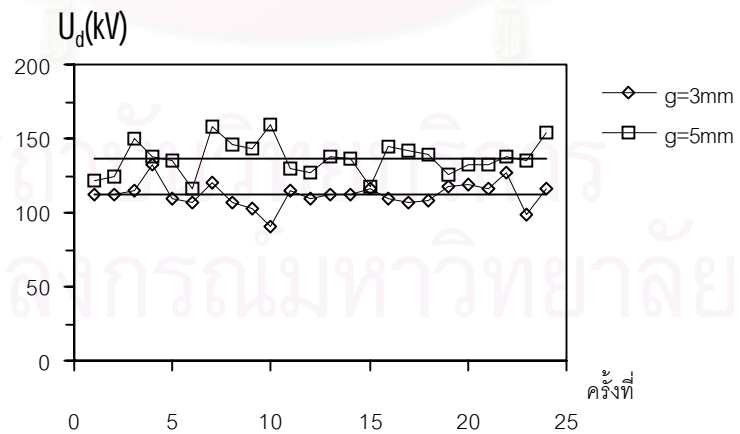
รูปที่ ข.3 $r=5$ mm และ $g=3, 5$ mm



รูปที่ 1.4 r=5 mm และ g=7, 10 mm

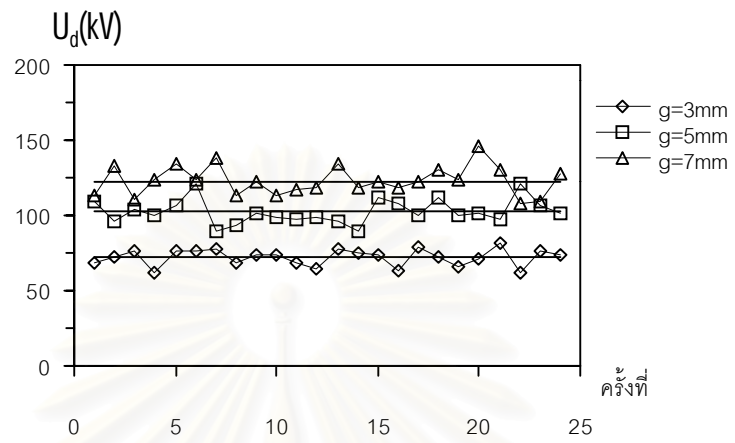


รูปที่ 1.5 r=10 mm และ g=3, 5 mm

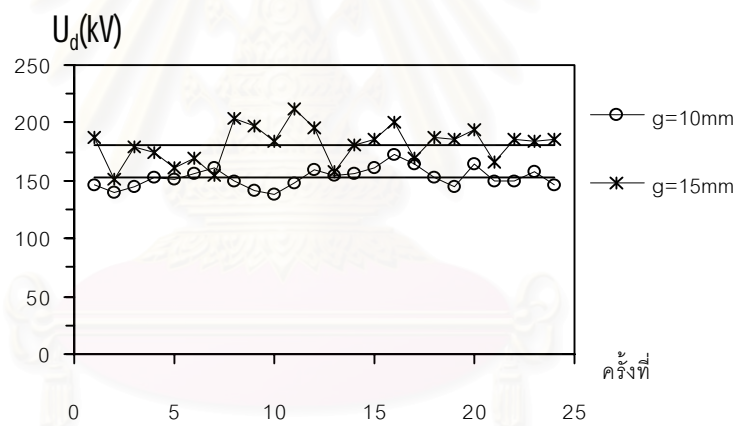


รูปที่ 1.6 r=15 mm และ g=3-5 mm

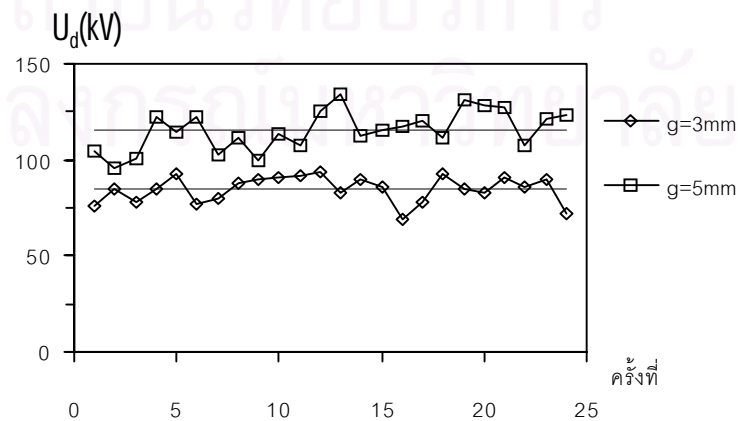
การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงชั่วเวลา สำหรับการศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติ โดยสร้างกราฟเปรียบเทียบจากข้อมูลในตารางที่ ข.2 และ ข.4



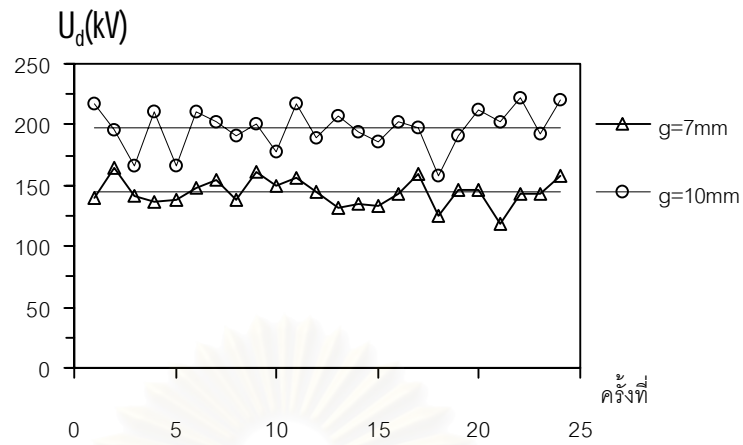
รูปที่ ข.7 $r=2.5$ mm และ $g=3, 5, 7$ mm



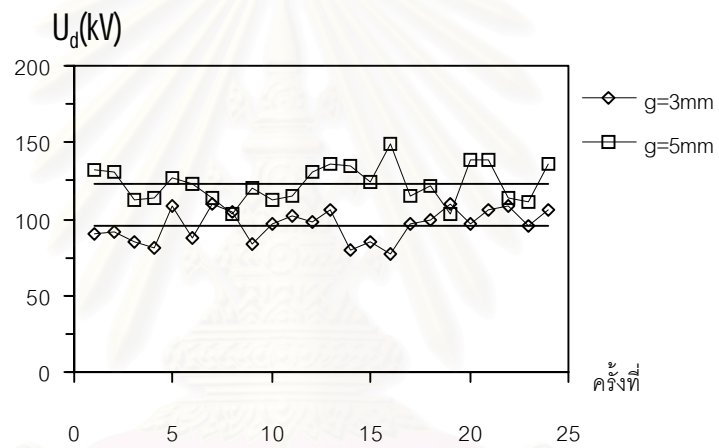
รูปที่ ข.8 $r=2.5$ mm และ $g=10, 15$ mm



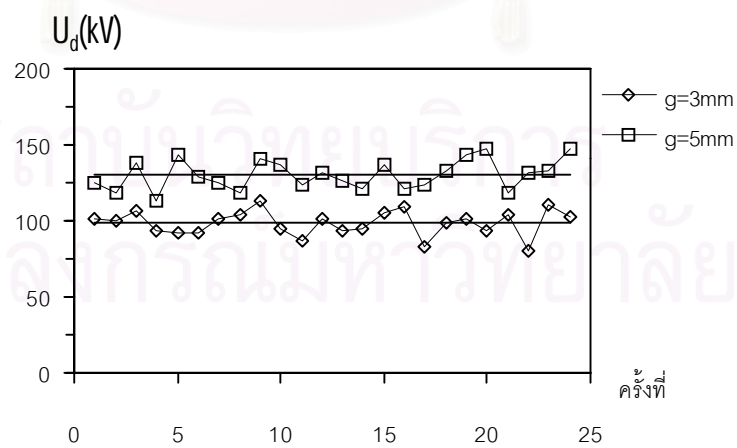
รูปที่ ข.9 $r=5$ mm และ $g=3, 5$ mm



รูปที่ ข.10 r=5 mm และ g =7 , 10 mm



รูปที่ ข.11 r=10 mm และ g =3 , 5 mm



รูปที่ ข.12 r=15 mm และ g =3 , 5 mm

ข.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันโดยใช้วิธี iteration test

การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์สำหรับการศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติ โดยใช้วิธี iteration test โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ ข.1 และ ข.3 สำหรับช่วงวงแสดงดังตารางที่ ข.5

ตารางที่ ข.5 การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันโดยใช้วิธี iteration test สำหรับช่วงวง

รัศมี (mm)	ระยะแกป (mm)	จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง (n)	จำนวนเหตุการณ์ที่มากกว่าค่าเฉลี่ย (k)	จำนวนของการเกิดซ้ำ (r)	$ Z^* $
2.5	3	24	13	14	0.856
	5	24	13	16	1.679
	7	24	12	11	0.408
	10	24	11	15	1.268
	15	24	15	14	1.198
5	3	24	16	14	1.531
	5	24	11	12	0.034
	7	24	11	11	0.377
	10	24	12	10	0.817
10	3	24	12	12	0
	5	24	12	16	1.633
15	3	24	11	14	0.856
	5	24	12	12	0

* จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์แต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน โดยที่ค่า $|Z^*|$ ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่า $|Z^*|$ วิฤตที่ระดับความน่าเชื่อถือ $\alpha = 0.10$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.959964

การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์สำหรับการศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติ โดยใช้วิธี iteration test โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ ข.2 และ ข.4 สำหรับช่วง แสดงดังตารางที่ ข.6

ตารางที่ ข.6 การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันโดยใช้วิธี iteration test สำหรับช่วง

รัศมี (mm)	ระยะแกป (mm)	จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง (n)	จำนวนเหตุการณ์ที่มากกว่าค่าเฉลี่ย (k)	จำนวนของการเกิดซ้ำ (r)	$ Z^* $
2.5	3	24	15	14	1.198
	5	24	9	12	0.327
	7	24	11	10	0.788
	10	24	12	11	0.408
	15	24	15	9	0.979
5	3	24	15	13	0.762
	5	24	12	12	0
	7	24	11	12	0.034
	10	24	13	15	1.268
10	3	24	14	10	0.699
	5	24	11	9	1.199
15	3	24	14	13	0.559
	5	24	12	14	0.816

* จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์แต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน โดยที่ค่า $|Z^*|$ ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่า $|Z^*|$ วิฤตที่ระดับความน่าเชื่อถือ $\alpha=0.10$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.959964

ข.4 พารามิเตอร์ของผลการทดลองเปรียบเทียบกับการกระจายทางทฤษฎี

ตารางที่ ข.7 พารามิเตอร์ของการกระจายแบบปกติของแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วบวก

r(mm)	g(mm)	\bar{U}_d (kV)	v	d _{max}
2.5	3	78.05	0.10	0.08
	5	96.94	0.11	0.10
	7	104.94	0.12	0.16
	10	116.73	0.12	0.09
	15	145.14	0.12	0.12
5	3	91.91	0.10	0.14
	5	119.62	0.13	0.08
	7	135.03	0.12	0.15
	10	168.99	0.12	0.06
10	3	99.91	0.09	0.07
	5	126.72	0.11	0.06
15	3	112.15	0.08	0.07
	5	136.81	0.09	0.07

ตารางที่ ข.8 พารามิเตอร์ของการกระจายแบบปกติของแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วลบ

r(mm)	g(mm)	\bar{U}_d (kV)	v	d _{max}
2.5	3	72.12	0.08	0.08
	5	102.69	0.08	0.14
	7	123.00	0.08	0.11
	10	152.52	0.06	0.10
	15	181.57	0.09	0.10
5	3	84.90	0.08	0.08
	5	115.29	0.09	0.08
	7	143.99	0.08	0.07
	10	197.01	0.08	0.10

10	3	96.03	0.11	0.11
	5	123.08	0.10	0.15
15	3	98.55	0.09	0.09
	5	130.30	0.08	0.12

ตารางที่ ข.9 พารามิเตอร์ของการกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์ของแรงดันเบรกดาวน์
กระแสตรงชั่ววอก

r(mm)	g(mm)	U_{d0} (kV)	η (kV)	δ	d_{max}
2.5	3	56.61	23.97	3.13	0.08
	5	60.80	39.94	3.89	0.10
	7	72.37	36.59	2.72	0.14
	10	79.25	41.95	3.02	0.08
	15*	-17.51	165.30	12.59	0.07
5	3*	-54.50	150.33	19.45	0.09
	5	62.14	63.42	4.00	0.08
	7	107.26	31.22	1.85	0.12
	10	119.76	55.42	2.60	0.07
10	3	68.62	34.56	3.91	0.08
	5	94.4	36.42	2.48	0.05
15	3	80.11	35.29	4.13	0.08
	5	105.08	35.55	2.96	0.06

ตารางที่ ข.10 พารามิเตอร์ของการกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์ของแรงดันเบรกดาวน์
กระแสตรงชั่ววอก

r(mm)	g(mm)	U_{d0} (kV)	η (kV)	δ	d_{max}
2.5	3	43.27	31.09	6.03	0.08
	5	88.04	16.46	1.82	0.08
	7	101.29	24.47	2.41	0.09
	10	132.26	22.84	2.49	0.08
	15	115.09	72.61	4.76	0.09

5	3	24.35	63.48	10.71	0.08
	5	76.79	42.39	4.12	0.07
	7	102.61	45.59	4.09	0.08
	10*	-108.12	311.33	19.49	0.09
10	3	49.60	50.48	5.17	0.10
	5	90.33	36.71	2.92	0.14
15	3	53.29	48.67	6.29	0.08
	5	105.47	27.89	2.75	0.10

ตารางที่ ข.11 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วคราวที่ควอนไทล์อันดับที่ 22% และ 1%

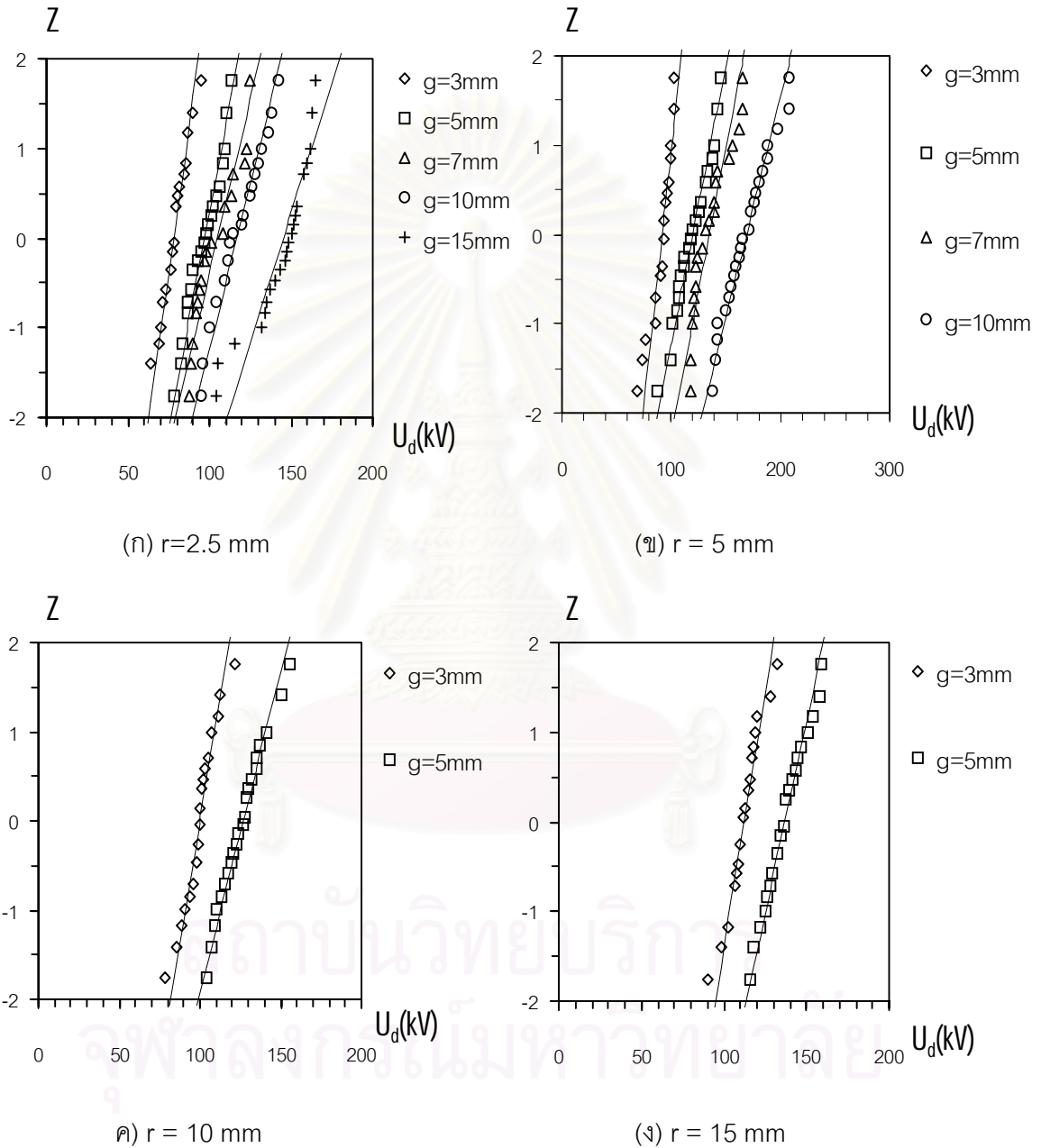
r (mm)	g (mm)	\bar{U}_d, cum (kV)	$\sigma_{\Delta u}$ (s)	$\frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$	$\sigma_{\Delta x}$	$u_{\Delta x}$	$\bar{U}_d, perf$ (kV)	σ	U_{d22} (kV)	U_{d1} (kV)
2.5	3	78.05	7.8	0.64	0.76	-0.50	83.2	10.3	75.3	59.3
	5	96.94	10.7	0.47	0.72	-0.65	106.6	14.8	95.1	72.1
	7	104.94	12.6	0.40	0.69	-0.75	118.6	18.3	104.5	76.2
	10	116.73	14.0	0.36	0.67	-0.80	133.5	20.9	117.3	84.8
	15	145.14	17.4	0.29	0.62	-0.90	170.4	28.1	148.7	105.1
5	3	91.91	9.2	0.54	0.74	-0.60	99.4	12.4	89.8	70.5
	5	119.62	15.6	0.32	0.64	-0.90	141.5	24.3	122.7	85.0
	7	135.03	16.2	0.31	0.63	-0.90	158.2	25.7	138.3	98.3
	10	168.99	20.3	0.25	0.61	-1.00	202.2	33.2	176.6	124.9
10	3	99.91	9.0	0.56	0.75	-0.58	106.9	12.0	97.6	79.0
	5	126.72	13.9	0.36	0.67	-0.80	143.4	20.8	127.3	95.0
15	3	112.15	9.0	0.56	0.75	-0.60	119.3	12.0	110.1	91.5
	5	136.81	12.3	0.41	0.7	-0.71	149.3	17.6	135.7	108.4

ตารางที่ ข.12 แรงดันเบรกดาวนกระแสตรงชั่วคราวที่ควอนไทล์อันดับที่ 26% และ 1%

r (mm)	g (mm)	$\bar{U}_{d,cum}$ (kV)	$\sigma_{\Delta u}$ (s)	$\frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$	$\sigma_{\Delta x}$	$u_{\Delta x}$	$\bar{U}_{d,perf}$ (kV)	σ	U_{d26} (kV)	U_{d1} (kV)
2.5	3	72.12	5.8	0.87	0.81	-0.35	74.6	7.1	70.0	58.0
	5	102.69	8.2	0.61	0.75	-0.55	108.7	11.0	101.7	83.2
	7	123	9.8	0.51	0.73	-0.62	131.4	13.5	122.7	100.0
	10	152.52	9.2	0.55	0.74	-0.58	159.7	12.4	151.7	130.9
	15	181.57	16.3	0.31	0.63	-0.90	204.9	25.9	188.2	144.6
5	3	91.91	7.4	0.68	0.77	-0.47	96.4	9.5	90.3	74.2
	5	119.62	10.8	0.46	0.72	-0.65	129.3	15.0	119.7	94.6
	7	135.03	10.8	0.46	0.72	-0.65	144.8	15.0	135.1	109.9
	10	168.99	13.5	0.37	0.67	-0.80	185.1	20.2	172.2	138.2
10	3	96.03	10.6	0.47	0.72	-0.65	105.6	14.7	96.1	71.4
	5	123.08	12.3	0.41	0.70	-0.71	135.6	17.6	124.3	94.7
15	3	98.55	8.9	0.56	0.75	-0.58	105.4	11.8	97.8	77.9
	5	130.3	10.4	0.48	0.72	-0.64	139.6	14.5	130.3	105.9

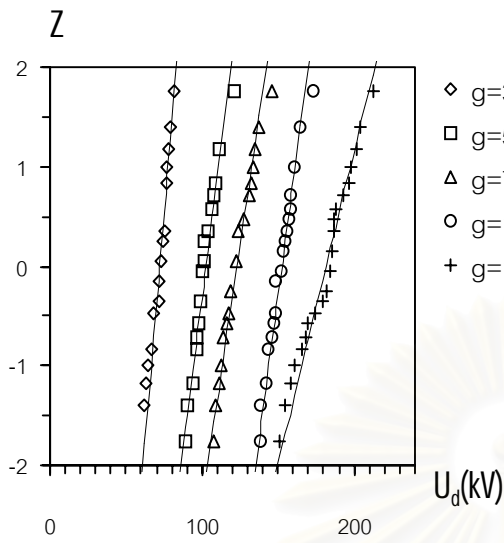
ข.5 รูปกราฟเปรียบเทียบข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงกับการกระจายทางทฤษฎี

เป็นการเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงกับการกระจายแบบปกติและการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ ได้ผลดังนี้

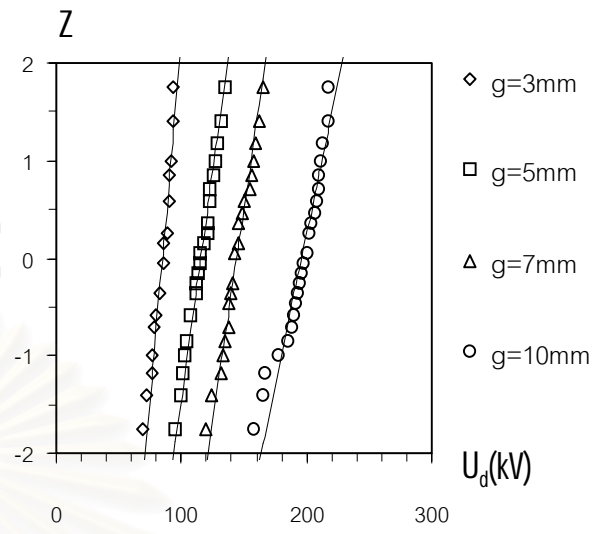


รูปที่ ข.13 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับการกระจายแบบปกติ

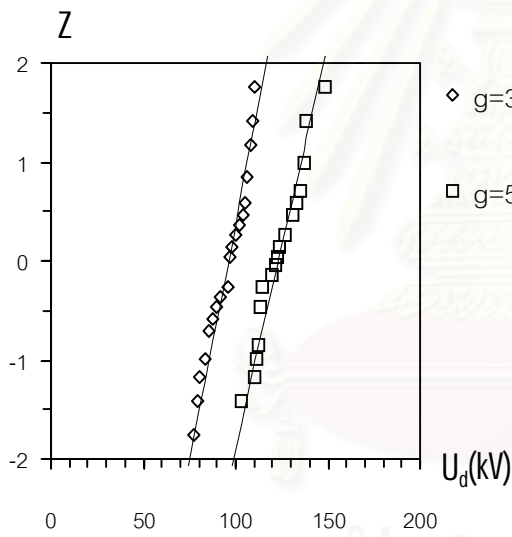
เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30°C สำหรับขั้วบวก



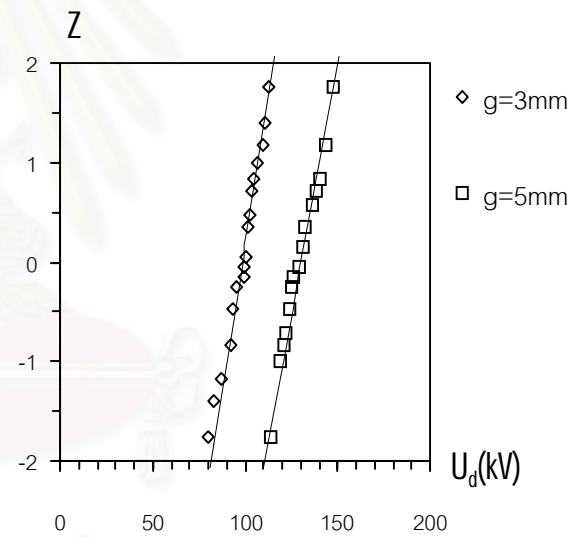
(ก) $r = 2.5 \text{ mm}$



(ข) $r = 5 \text{ mm}$

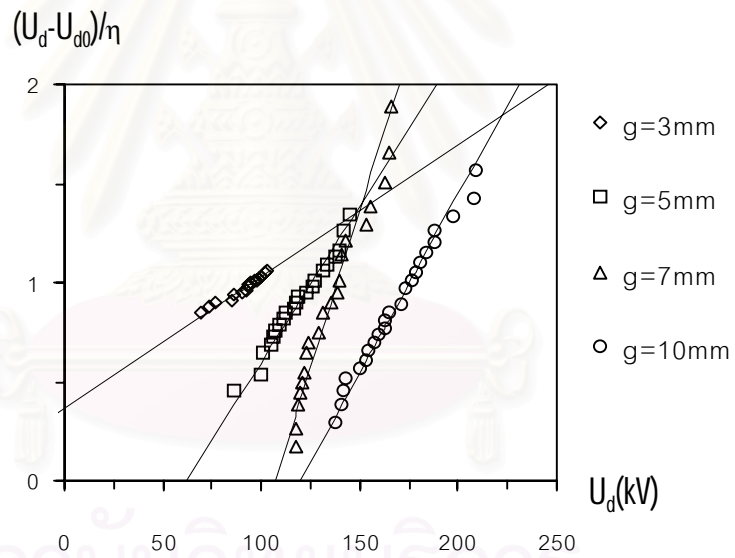
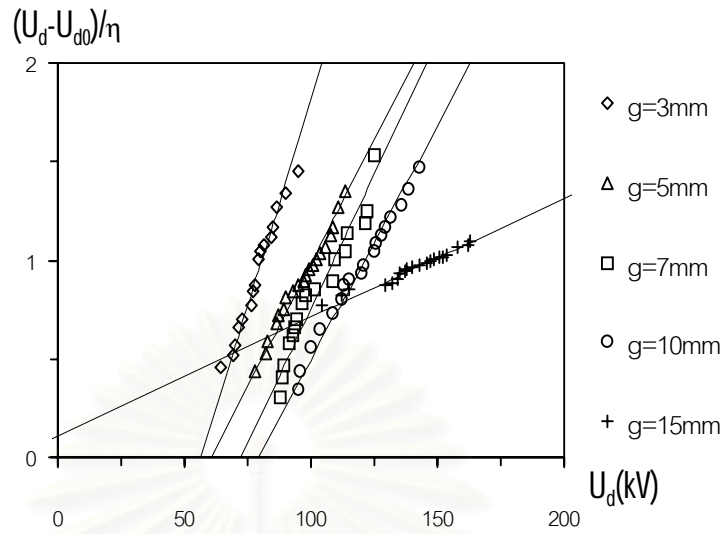


(ค) $r = 10 \text{ mm}$

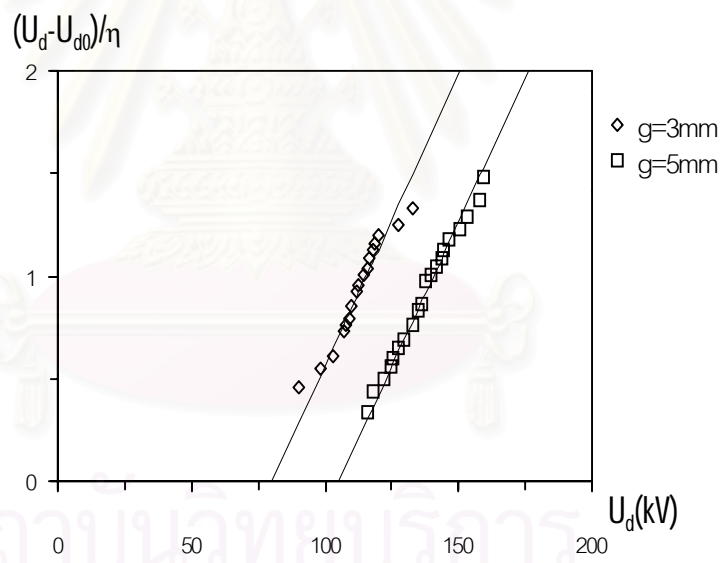
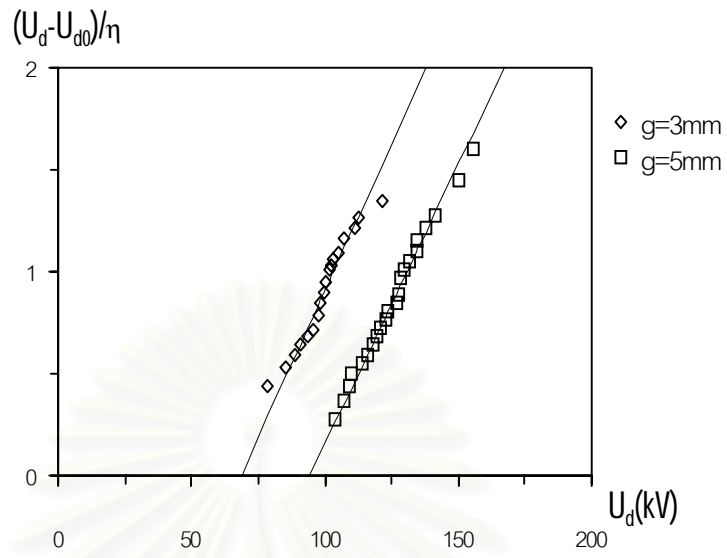


(ง) $r = 15 \text{ mm}$

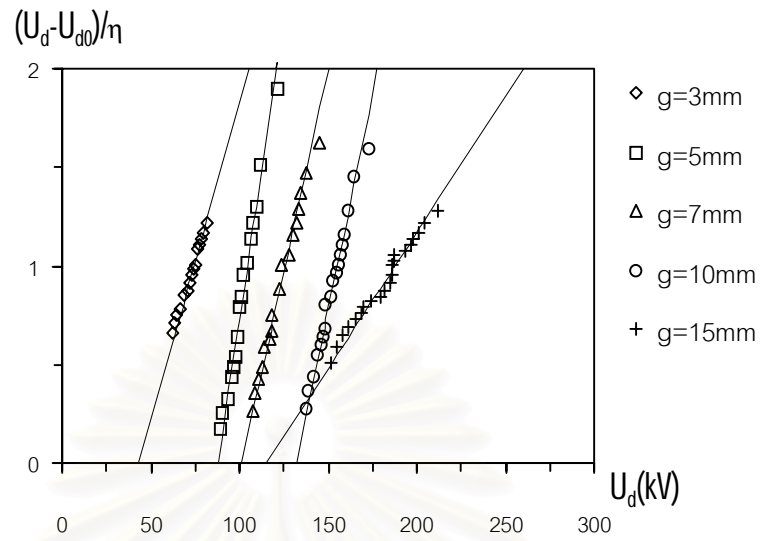
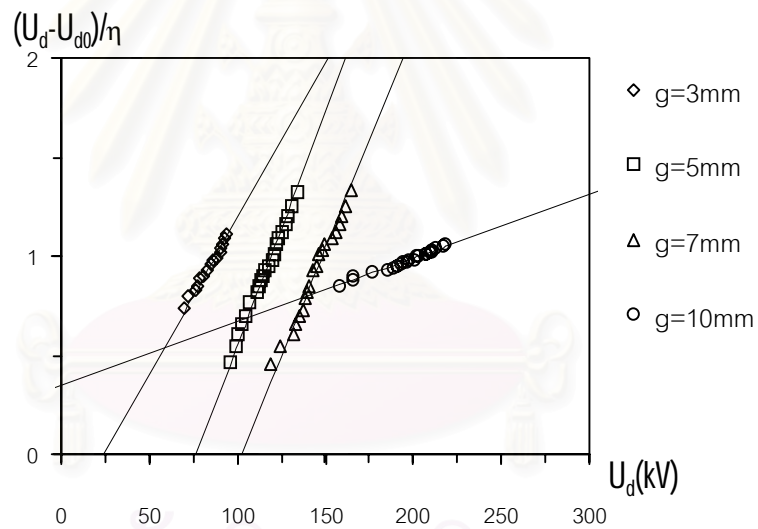
รูปที่ ข.14 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับกระจายแบบปกติ
เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30°C สำหรับขั้วลบ



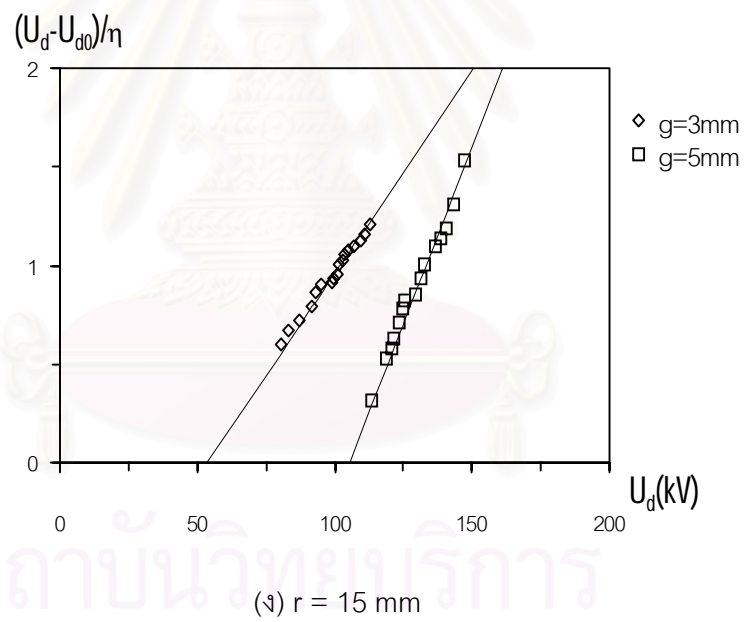
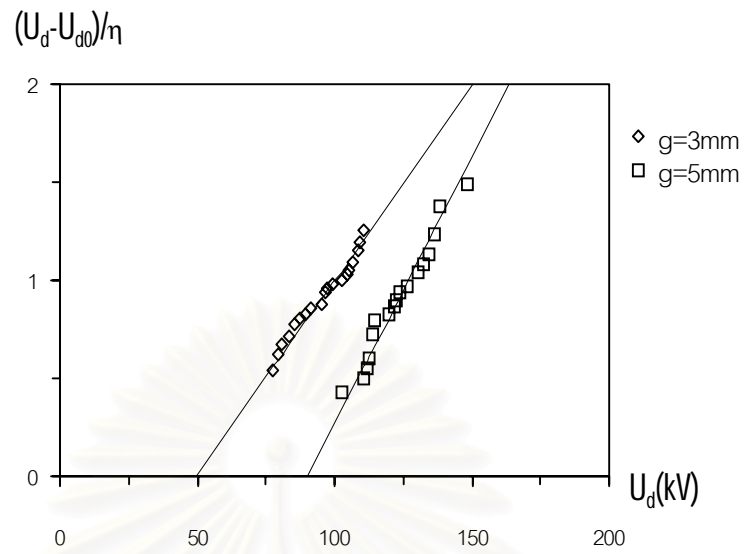
รูปที่ ข.15 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับ การกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30°C สำหรับขั้วบวก



รูปที่ ข.16 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับ การกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30°C สำหรับขั้วบวก (ต่อ)

(ก) $r = 2.5$ mm(ข) $r = 5$ mm

รูปที่ ข.17 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30°C สำหรับขั้วลอบ



รูปที่ ข.18 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30°C สำหรับขั้วลบ (ต่อ)

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของแรงดันกระแสตรง

ตารางที่ ค.1 แรงดันเบรกดาวนกระแสตรงชั่วบวก ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=2.5\text{mm}$ และ $g=3\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	76.2	79.2	79.2	73.2	85.1	77.2	78.2	71.3	77.4	0.05
45	90.1	83.1	80.2	78.2	90.1	87.1	83.1	79.2	83.9	0.06
60	104.9	83.1	91	84.1	94	96	103.9	109.8	95.9	0.10
80	120.2	104.4	95.5	103.4	115.3	101.4	114.3	117.3	109.0	0.08

ตารางที่ ค.2 แรงดันเบรกดาวนกระแสตรงชั่วบวก ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=2.5\text{mm}$ และ $g=5\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	95.0	99.0	78.2	86.1	83.1	97.0	86.1	107.9	91.5	0.11
45	104.4	95.5	121.2	109.4	89.6	84.6	115.3	96.5	102.1	0.12
60	109.8	119.7	97.0	104.9	112.8	118.8	115.8	102.9	110.2	0.07
80	109.8	146.5	115.8	136.6	138.5	126.7	141.5	133.6	131.1	0.10

ตารางที่ ค.3 แรงดันเบรกดาวนกระแสตรงชั่วบวก ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=2.5\text{mm}$ และ $g=10\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	120.7	119.7	124.7	96.0	135.6	111.8	125.7	103.9	117.3	0.11
45	140.0	131.1	106.4	136.1	111.3	118.3	113.3	127.2	123.0	0.10
60	118.3	163.8	141.0	140.0	113.3	130.1	128.2	137.1	134.0	0.12
80	191.0	133.6	141.5	161.3	132.6	185.1	177.1	165.3	160.9	0.14

ตารางที่ ค.4 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วบวก ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=2.5\text{mm}$ และ $g=15\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	140.0	147.0	146.0	137.1	157.8	148.9	132.1	161.8	146.3	0.07
45	169.5	144.7	144.7	157.1	152.9	140.0	180.6	186.5	159.5	0.11
60	150.4	196.9	216.7	192.0	175.2	168.2	172.2	162.3	179.2	0.12
80	222.7	210.3	136.1	237.5	232.6	230.1	217.7	237.5	215.5	0.16

ตารางที่ ค.5 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วบวก ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=5\text{mm}$ และ $g=3\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	93.0	101.9	95.0	77.2	93.0	73.2	93.0	94.0	90.1	0.11
40	90.5	91.5	94.5	113.3	124.2	98.5	101.4	93.5	100.9	0.12
60	104.4	87.6	102.4	107.4	105.4	93.5	101.4	108.4	101.3	0.07
80	109.8	125.7	106.9	116.8	120.7	105.9	103.9	107.9	112.2	0.07

ตารางที่ ค.6 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วบวก ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=5\text{mm}$ และ $g=5\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	100.4	99.5	117.3	119.2	111.3	112.3	116.3	131.1	113.4	0.09
40	113.3	153.9	133.1	117.3	127.2	104.4	145.0	122.2	127.0	0.13
60	128.6	136.6	126.7	115.8	129.6	131.6	118.8	131.6	127.4	0.05
80	122.2	152.9	124.2	136.1	153.9	116.3	127.2	147.0	135.0	0.11

ตารางที่ ค.7 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วบวก ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=10\text{mm}$ และ $g=3\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	107.4	101.4	95.5	78.7	97.5	98.5	99.5	103.4	97.7	0.09
40	110.3	98.5	114.3	97.5	100.4	97.5	103.4	119.2	105.1	0.08
60	120.7	103.9	118.8	91.0	102.9	123.7	103.9	116.8	110.2	0.10
80	116.8	110.8	121.7	105.4	108.4	118.3	113.3	117.3	114.0	0.05

ตารางที่ ค.8 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วบวก ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=10\text{mm}$ และ $g=5\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	109.8	137.6	123.7	117.8	127.7	115.8	122.7	129.6	123.1	0.07
45	142.0	117.3	152.9	105.4	143.0	132.1	111.3	160.8	133.1	0.15
60	144.0	124.2	134.1	123.2	160.8	158.8	150.9	118.3	139.3	0.12
80	160.3	161.3	150.4	166.3	162.3	151.4	115.8	157.3	153.1	0.10

ตารางที่ ค.9 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วบวก ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=15\text{mm}$ และ $g=3\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	111.8	111.8	114.8	132.6	108.9	106.9	119.7	106.9	114.2	0.08
45	120.2	100.4	115.3	95.5	138.0	120.2	117.3	127.2	116.8	0.12
60	100.9	123.7	125.7	126.7	135.6	133.6	123.7	122.7	124.1	0.08
80	121.2	126.2	131.1	117.3	123.2	128.2	117.3	133.1	124.7	0.05

ตารางที่ ค.10 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วคราว ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=15\text{mm}$ และ $g=5\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	121.7	124.7	150.4	137.6	134.6	115.8	158.3	146.5	136.2	0.11
45	140.0	152.9	134.1	142.0	140.0	145.0	149.9	166.7	146.3	0.07
60	134.1	160.8	138.0	161.8	135.1	168.7	132.1	157.8	148.6	0.10
80	152.9	170.7	159.8	176.6	149.9	152.9	155.9	144.0	157.8	0.07

ตารางที่ ค.11 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วคราวและ v ณ อุณหภูมิต่างๆ

r (mm)	g (mm)	U_d (kV) ที่อุณหภูมิ (°C)				v ที่อุณหภูมิ (°C)			
		30	45	60	80	30	45	60	80
2.5	3	77.4	83.9	95.9	109	0.05	0.06	0.10	0.08
	5	91.5	102.1	110.2	131.1	0.11	0.12	0.07	0.10
	10	117.3	123.0	134.0	160.9	0.11	0.10	0.12	0.14
	15	146.3	159.5	179.2	215.5	0.07	0.11	0.12	0.16
5	3	90.1	100.9	101.3	112.2	0.11	0.12	0.07	0.07
	5	113.4	127.0	127.4	135.0	0.09	0.13	0.05	0.11
10	3	97.7	105.1	110.2	114.0	0.09	0.08	0.10	0.05
	5	123.1	133.1	139.3	153.1	0.07	0.15	0.12	0.10
15	3	114.2	116.8	124.1	124.7	0.08	0.12	0.08	0.05
	5	136.2	146.3	148.6	157.3	0.11	0.07	0.10	0.07

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.12 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่ววอก ($\%U_d$)

r(mm)	g(mm)	$\%U_d$
2.5	3	40.83
	5	43.28
	10	37.24
	15	47.29
5	3	24.53
	5	19.05
10	3	16.68
	5	24.37
15	3	9.19
	5	15.86

ตารางที่ ค.13 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่ววอก ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=2.5mm และ g=3mm

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	68.3	72.2	76.2	62.3	76.2	76.2	78.2	68.3	72.2	0.08
45	75.7	75.7	73.7	70.8	72.7	74.7	78.7	74.7	74.6	0.03
60	74.7	86.6	79.7	85.6	81.6	74.7	74.7	81.6	79.9	0.06
80	90.5	90.5	100.4	97.0	106.9	93.0	102.9	93.0	96.8	0.06

ตารางที่ ค.14 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่ววอก ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=2.5mm และ g=5mm

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	109.4	96.0	103.9	99.9	106.9	121.7	89.1	94.0	102.6	0.10
45	114.3	114.3	111.3	102.4	111.3	115.3	92.5	101.4	107.9	0.08
60	104.4	119.2	122.2	108.4	113.3	128.2	117.3	107.4	115.0	0.07
80	129.1	108.4	143.0	125.2	132.1	143.0	110.3	139.0	128.8	0.11

ตาราง ค.15 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วเวลา ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=2.5\text{mm}$ และ $g=10\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	146.0	139.0	144.0	152.9	151.9	155.9	160.8	148.9	149.9	0.05
45	157.3	154.4	160.3	147.5	147.5	168.2	171.2	173.2	159.9	0.06
60	154.9	147.9	160.8	151.9	175.7	156.9	190.5	160.8	162.4	0.09
80	191.7	201.6	214.0	191.7	191.7	189.3	204.1	194.2	197.3	0.04

ตารางที่ ค.16 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วเวลา ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=2.5\text{mm}$ และ $g=15\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	187.0	151.4	179.1	174.7	160.8	169.7	154.9	204.4	172.7	0.10
45	181.1	230.1	193.0	242.5	237.5	207.8	215.2	215.2	215.3	0.10
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ค.17 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วเวลา ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=5\text{mm}$ และ $g=3\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	76.2	85.1	78.2	85.1	93.0	77.2	80.2	88.1	82.9	0.07
40	81.6	79.7	85.6	76.7	78.7	80.7	86.6	86.6	82.0	0.05
60	81.6	88.6	91.5	86.6	89.6	81.6	83.6	88.6	86.5	0.04
80	89.1	99.0	99.0	93.0	97.0	94.0	98.0	98.0	95.9	0.04

ตารางที่ ค.18 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วเวลา ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=5\text{mm}$ และ $g=5\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	104.4	95.5	100.4	122.2	114.3	122.2	102.4	111.3	109.1	0.09
40	108.9	109.8	105.9	113.8	120.7	113.8	117.8	120.7	113.9	0.05
60	113.3	114.3	125.2	111.3	105.4	114.3	110.3	128.2	115.3	0.07
80	128.6	115.8	111.8	127.7	117.8	121.7	125.7	124.7	121.7	0.05

ตารางที่ ค.19 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วเวลา ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=10\text{mm}$ และ $g=3\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	89.6	91.5	85.6	80.7	108.4	87.6	110.3	104.4	94.8	0.12
40	92.5	88.6	91.5	92.5	109.4	91.5	101.4	101.4	96.1	0.07
60	100.4	88.6	95.5	96.5	97.5	94.5	100.4	104.4	97.2	0.05
80	97.5	101.4	98.5	96.5	99.5	97.5	93.5	98.5	97.8	0.02

ตารางที่ ค.20 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วเวลา ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=10\text{mm}$ และ $g=5\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	132.6	130.6	111.8	113.8	126.7	122.7	113.8	102.9	119.4	0.09
45	122.2	112.3	117.3	111.3	121.2	138.0	130.1	113.3	120.7	0.08
60	120.2	121.2	126.2	114.3	108.4	115.3	129.1	123.2	119.7	0.06
80	125.2	130.1	112.3	134.1	128.2	124.2	136.1	131.1	127.7	0.06

ตารางที่ ค.21 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วเวลา ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=15\text{mm}$ และ $g=3\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	101.9	99.9	106.9	93.0	92.0	92.0	100.9	103.9	98.8	0.06
45	116.3	96.5	106.4	86.6	98.5	100.4	105.4	105.4	101.9	0.09
60	109.8	92.0	102.9	97.0	113.8	99.9	124.7	107.9	106.0	0.10
80	101.4	111.3	98.5	104.4	107.4	108.4	103.4	117.3	106.5	0.06

ตารางที่ ค.22 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วเวลา ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ $r=15\text{mm}$ และ $g=5\text{mm}$

T (°C)	U_d (kV)								\bar{U}_d (kV)	v
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	124.7	118.8	138.5	116.3	143.5	129.6	124.7	118.8	126.9	0.08
45	128.2	155.9	110.3	138.0	131.1	139.0	138.0	129.1	133.7	0.10
60	125.7	142.5	136.6	117.8	124.7	140.5	130.6	151.4	133.7	0.08
80	141.0	117.3	131.1	145.0	138.0	142.0	131.1	145.0	136.3	0.07

ตารางที่ ค.23 แรงดันเบรกดาวนักระแสตรงชั่วเวลาและ v ณ อุณหภูมิต่างๆ

r (mm)	g (mm)	U_d (kV) ที่อุณหภูมิ (°C)				v ที่อุณหภูมิ (°C)			
		30	45	60	80	30	45	60	80
2.5	3	72.2	74.6	79.9	96.8	0.08	0.03	0.06	0.06
	5	102.6	107.9	115.0	128.8	0.10	0.08	0.07	0.11
	10	149.9	159.9	162.4	197.3	0.05	0.06	0.09	0.04
	15	172.7	215.3	-	-	0.10	0.10	-	-
5	3	82.9	82.0	86.5	95.9	0.07	0.05	0.04	0.04
	5	109.1	113.9	115.3	121.7	0.09	0.05	0.07	0.05
10	3	94.8	96.1	97.2	97.8	0.12	0.07	0.05	0.02
	5	119.4	120.7	119.7	127.7	0.09	0.08	0.06	0.06
15	3	98.8	101.9	106.0	106.5	0.06	0.09	0.10	0.06
	5	126.9	133.7	133.7	136.3	0.08	0.10	0.08	0.07

ตารางที่ ค.24 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาวนกระแสดตรงหัวลบ (%U_d)

r(mm)	g(mm)	%U _d
2.5	3	34.07
	5	25.54
	10	31.6
	15	-
5	3	15.68
	5	11.55
10	3	3.16
	5	6.95
15	3	7.79
	5	7.41

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ข้อมูลแรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน (250/2500 μ s)

ง.1 ค่าแรงดันคงทนอยู่ได้สำหรับศึกษาผลกระทบของอนุภาคคาร์บอนและผิวอิเล็กทรอนิกส์
ตารางที่ ง.1 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วพล (U_{dq}^-) ของน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการทดลอง
20 ครั้ง โดยใช้ทรงกลมรัศมีขนาด 10 mm , ระยะแก๊ป 3 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

ครั้งที่	U_{dq}^- (kV)				
1 - 5	131.6	138.8	138.9	146.6	131.6
6 - 10	139.1	131.8	146.6	154.0	117.2
11 - 15	124.8	131.7	147.0	153.5	153.5
16 - 20	131.6	124.4	138.8	131.6	139.0
1 - 20	\bar{U}_{dq}^- (kV) = 137.59 kV , s(kV) = 10.25 kV , v = 0.0745				

ตารางที่ ง.2 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วพล (U_{dq}^+) ของน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการทดลอง
13 ครั้ง โดยใช้ทรงกลมรัศมีขนาด 10 mm , ระยะแก๊ป 3 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

ครั้งที่	U_{dq}^+ (kV)				
1 - 5	160.46	160.1	174.12	159.98	160
6 - 10	138.46	166.98	152.92	160.14	131.26
11 - 13	167.4	160.3	181.96	-	-
1 - 13	\bar{U}_{dq}^+ (kV) = 159.54 kV , s(kV) = 13.30 kV , v = 0.0834				

ตารางที่ ง.3 \bar{U}_{dq} และ v ของน้ำมันหม้อแปลงที่จำนวนครั้งการทดลอง 20 ครั้ง ของการทดลอง
ด้วยแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ชั่วพล ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 10 mm ระยะแก๊ป 3 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

ครั้งที่	$\bar{U}_{dq(x-y)}$ (kV)	v	$((\bar{U}_{dq(x-y)} - \bar{U}_{dq}) / \bar{U}_{dq}) * 100$
1-5	137.48	0.05	-0.09
6-10	137.74	0.10	0.11
11-15	142.07	0.09	3.25
15-20	133.09	0.05	-3.27
1-20	$\bar{U}_{dq} = 137.59$ kV , s = 10.25 kV , v = 0.07		

ตารางที่ ง.4 \bar{U}_{dq} และ v ของน้ำมันหม้อแปลงที่จำนวนครั้งการทดลอง 13 ครั้งของการทดลองด้วยแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราวที่ทรงกลมรัศมีขนาด 10 mm ระยะแก๊ป 3 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

ครั้งที่	$\bar{U}_{dq(x-y)}$ (kV)	v	$((\bar{U}_{dq(x-y)} - \bar{U}_{dq}) / \bar{U}_{dq}) * 100$
1-5	162.93	0.04	2.12
6-10	149.95	0.10	-6.01
11-13	169.89	0.06	6.48
1-13	$\bar{U}_{dq} = 159.54 \text{ kV}$, $s = 13.3 \text{ kV}$, $v = 0.08$		

* ในที่นี้ $\bar{U}_{dq(x-y)}$ คือ ค่าเฉลี่ยของการเกิดเบรกดาวนครั้งที่ x ถึง y

ง.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันโดยใช้วิธี iteration test

เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลแรงดันคงทนอยู่ได้ในการศึกษาผลกระทบของอนุภาคคาร์บอนและผิวอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากการเบรกดาวนโดยใช้วิธี iteration test แสดงดังตารางที่ ง.5

ตารางที่ ง.5 การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันโดยใช้วิธี iteration test

รัศมี (mm)	ระยะแก๊ป (mm)	ชั่วคราว	จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง (n)	จำนวนเหตุการณ์ที่มากกว่าค่าเฉลี่ย (k)	จำนวนการเกิดซ้ำ (r)	$ Z^* $
10	3	ชั่วคราว	20	10	10	0.00
10	3	ชั่วคราว	13	10	7	1.863

* จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าแรงดันเบรกดาวนแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน โดยที่ค่า $|Z^*|$ ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่า $|Z^*|$ วิกฤตที่ระดับความน่าเชื่อถือ $\alpha = 0.10$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.959964

ง.3 ค่าแรงดันคงทนอยู่ได้สวิตซ์ซิมพัลส์ ณ อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ ง.6 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตซ์ซิมพัลส์หัวบวก (U_{dq}^+) ที่ $r = 2.5$ mm และ $g = 3$ mm

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	122.28	129.8	115.42	123.16	115.3	136.54	123.8	0.07
55	179.88	193.2	165.14	186.4	193	158.46	179.3	0.08
80	192.6	200.6	193.6	179.12	172.18	200	189.7	0.06

ตารางที่ ง.7 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตซ์ซิมพัลส์หัวบวก (U_{dq}^+) ที่ $r = 2.5$ mm และ $g = 5$ mm

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	167.06	143	157.12	164.36	135.5	150.26	152.9	0.08
55	193.4	235.8	228.6	199.8	222.8	215	215.9	0.08
80	250	235	228	256.2	235	263.8	244.7	0.06

ตารางที่ ง.8 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตซ์ซิมพัลส์หัวบวก (U_{dq}^+) ที่ $r = 2.5$ mm และ $g = 7$ mm

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	179.34	193	179.42	172.46	172.02	172.54	178.1	0.05
55	215	214.8	234.8	223	235.2	264	231.1	0.08
80	263.8	277.4	264	235.2	256.2	242	256.4	0.06

ตารางที่ ง.9 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตซ์ซิมพัลส์หัวบวก (U_{dq}^+) ที่ $r = 2.5$ mm และ $g = 10$ mm

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	207	192.8	193.2	199.8	213.8	221	204.6	0.04
55	256.6	250	256.6	228.8	257	277.8	254.5	0.06
80	265.4	257	299.6	272.4	256	284.2	272.4	0.06

ตารางที่ ง.10 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^+) ที่ $r = 5$ mm และ $g = 3$ mm

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	145.68	152.9	138.66	167.92	129.8	179.46	152.4	0.12
55	172.52	208	193	193.4	185.8	185.8	189.8	0.06
80	235.6	250.4	230	229.6	222.4	229.2	232.9	0.04

ตารางที่ ง.11 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^+) ที่ $r = 5$ mm และ $g = 5$ mm

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	179.18	172.18	185.48	172.16	158.02	185.6	175.4	0.06
55	228.6	249.6	221.6	221.2	235.4	228.2	230.8	0.05
80	279.2	256.2	263	270.8	292.2	278.6	273.3	0.05

ตารางที่ ง.12 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^+) ที่ $r = 10$ mm และ $g = 3$ mm

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	160.46	160.1	174.12	159.98	160	138.46	158.9	0.07
55	237	229	200	236.2	200.4	229.4	222.0	0.08
80	222.8	216.4	221.8	222.6	229	228.4	223.5	0.02

ตารางที่ ง.13 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^+) ที่ $r = 10$ mm และ $g = 5$ mm

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	214.6	235.2	235.4	214.2	235	234.8	228.2	0.05
55	222.4	280.4	279.4	258.2	265	222.8	254.7	0.10
80	298.8	271.6	271.2	263.8	264.4	284.2	275.7	0.05

ตารางที่ ง.14 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตซ์อิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^+) ที่ $r = 15 \text{ mm}$ และ $g = 3 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	172.86	172.38	157.1	164.62	157.66	171.54	166.0	0.04
55	173.82	179.78	172.54	165.28	179.88	172.46	174.0	0.03
80	193	208.4	207.4	193	193	207.2	200.3	0.04

ตารางที่ ง.15 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตซ์อิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^+) ที่ $r = 15 \text{ mm}$ และ $g = 5 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	235.6	235.8	228.4	228.8	264	228.8	236.9	0.06
55	285	256.6	270.4	263.4	251	271.6	266.3	0.05
80	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ง.16 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตซ์อิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^+) ที่ $r = 2.5 \text{ mm}$ และ $g = 13 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	228.8	214	228.4	250	235.6	228.8	230.9	0.04

ตารางที่ ง.17 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตซ์อิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^+) ที่ $r = 5 \text{ mm}$ และ $g = 7 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	193	221.6	221.6	192.8	200	234.8	210.6	0.08

ตารางที่ ง.18 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^+) และ V ณ อุณหภูมิต่างๆ

r (mm)	g (mm)	\bar{U}_{dq} (kV) ที่อุณหภูมิ($^{\circ}C$)			V ที่อุณหภูมิ($^{\circ}C$)		
		30	55	80	30	55	80
2.5	3	123.8	179.3	189.7	0.07	0.08	0.06
	5	152.9	215.9	244.7	0.08	0.08	0.06
	7	178.1	231.1	256.4	0.05	0.08	0.06
	10	204.6	254.5	272.4	0.04	0.06	0.06
5	3	152.4	189.8	232.9	0.12	0.06	0.04
	5	175.4	230.8	273.3	0.06	0.05	0.05
10	3	158.9	222.0	223.5	0.07	0.08	0.02
	5	228.2	254.7	275.7	0.05	0.10	0.05
15	3	166.0	174.0	200.3	0.04	0.03	0.04
	5	236.9	266.3	-	0.06	0.05	-

ตารางที่ ง.19 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราว ($\%U_{dq}$)

r(mm)	g(mm)	$\%U_{dq}$
2.5	3	53.28
	5	60.03
	7	43.96
	10	61.51
5	3	52.80
	5	55.80
10	3	40.70
	5	20.80
15	3	20.66
	5	-

ตารางที่ ง.20 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^-) ที่ $r = 2.5 \text{ mm}$ และ $g = 3 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	122.02	122.24	115.22	100.6	114.88	108.3	113.9	0.07
55	122.18	129.54	122.24	136.26	129.18	129.02	128.1	0.04
80	135.34	142.6	135.06	142.56	149.68	135.22	140.1	0.04

ตารางที่ ง.21 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^-) ที่ $r = 2.5 \text{ mm}$ และ $g = 5 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	143.3	149.74	149.82	142.2	134.86	143.12	143.8	0.04
55	157.84	157.88	150.56	158.46	143.64	151.12	153.3	0.04
80	170.84	170.9	163.54	163.42	170.38	170.5	168.3	0.02

ตารางที่ ง.22 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^-) ที่ $r = 2.5 \text{ mm}$ และ $g = 7 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	171.8	164.74	157.56	163.36	143.42	178.44	163.2	0.07
55	180.08	186	179.44	164.58	185.6	171.32	177.8	0.05
80	185.74	186.8	206.2	207	191.8	185.16	193.8	0.05

ตารางที่ ง.23 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วคราว (U_{dq}^-) ที่ $r = 2.5 \text{ mm}$ และ $g = 10 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	165.0	172.2	165.2	172.5	179.4	157.8	168.7	0.04
55	200.8	200.2	207.2	193	185.62	192.4	196.5	0.04
80	207	213.4	199.4	222.4	216.8	200	209.8	0.04

ตารางที่ ง.24 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลา (U_{dq}^-) ที่ $r = 5 \text{ mm}$ และ $g = 3 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	122.44	122.18	136.22	143.5	136.52	122.24	130.5	0.07
55	136.56	143.84	136.42	143.78	143.7	136.36	140.1	0.03
80	164.96	171.42	172.3	179.84	178.74	163.96	171.9	0.04

ตารางที่ ง.25 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลา (U_{dq}^-) ที่ $r = 5 \text{ mm}$ และ $g = 5 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	172.08	164.98	157.56	164.64	178.98	143.42	163.6	0.08
55	199.6	207	185.38	185	192.4	192	193.6	0.04
80	208.6	208.6	213.8	215.2	201.2	206.2	208.9	0.02

ตารางที่ ง.26 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลา (U_{dq}^-) ที่ $r = 10 \text{ mm}$ และ $g = 3 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	131.56	138.76	138.86	146.64	131.56	139.08	137.7	0.04
55	185.2	164.54	185.44	157.42	156.98	178.26	171.3	0.08
80	179.56	200.2	171.88	179.1	192.6	192.2	185.9	0.06

ตารางที่ ง.27 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลา (U_{dq}^-) ที่ $r = 10 \text{ mm}$ และ $g = 5 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
30	185.56	179.58	192.4	157.84	206	227.6	191.5	0.12
55	250	222.6	214.2	230	236.6	214.4	228.0	0.06
80	228.8	242.4	250	243	242	234.2	240.1	0.03

ตารางที่ ง.28 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลา (U_{dq}^-) ที่ $r = 15 \text{ mm}$ และ $g = 3 \text{ mm}$.

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	149.9	135.2	134.52	149.78	149.78	149.38	144.8	0.05
55	180	172.06	172.76	157.32	179.44	157.78	169.9	0.06
80	199.6	178.24	198.8	185.78	178.5	191.8	188.79	0.05

ตารางที่ ง.29 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลา (U_{dq}^-) ที่ $r = 15 \text{ mm}$ และ $g = 5 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	219.4	205.6	198	198.6	198.4	212	205.3	0.04
55	207	214.2	200.4	215.2	214	235.4	214.4	0.05
80	242.2	242	248.8	241.2	228.8	256	243.2	0.04

ตารางที่ ง.30 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลา (U_{dq}^-) ที่ $r = 2.5 \text{ mm}$ และ $g = 13 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	185.4	171.8	199.2	178.7	192.2	178.4	184.3	0.05

ตารางที่ ง.31 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลา (U_{dq}^-) ที่ $r = 5 \text{ mm}$ และ $g = 7 \text{ mm}$

T (°C)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	V
	1	2	3	4	5	6		
30	179.62	185.6	192.8	178.88	199.4	199.6	189.3	0.05

ตารางที่ ง.32 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลา (U_{dq}) และ V ณ อุณหภูมิต่างๆ

r (mm)	g (mm)	\bar{U}_{dq} (kV) ที่อุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)			V ที่อุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)		
		30	55	80	30	55	80
2.5	3	113.9	128.1	140.1	0.07	0.04	0.04
	5	143.8	153.3	168.3	0.04	0.04	0.02
	7	163.2	177.8	193.8	0.07	0.05	0.05
	10	168.7	196.5	209.8	0.04	0.04	0.04
5	3	130.5	140.1	171.9	0.07	0.03	0.04
	5	163.6	193.6	208.9	0.08	0.04	0.02
10	3	137.7	171.3	185.9	0.04	0.08	0.06
	5	191.5	228.0	240.1	0.12	0.06	0.03
15	3	144.8	169.9	188.8	0.05	0.06	0.05
	5	205.3	214.4	243.2	0.04	0.05	0.04

ตารางที่ ง.33 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่วเวลา ($\%U_{dq}$)

r(mm)	g(mm)	$\%U_{dq}$
2.5	3	23.01
	5	16.98
	7	18.73
	10	24.39
5	3	31.68
	5	27.70
10	3	34.98
	5	25.38
15	3	30.41
	5	18.43

ตารางที่ ง.34 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่ววอก (U_{dq}^+) ที่อิเล็กทรอนิกส์แบบรีดแกป-ระนาบ โดยปลายรีดแกปมียอดสูงเฉียง 3.5 mm และทำมุม 50° ที่ระยะแกป 20 , 30 และ 40 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

ระยะแกป (mm)	U_{dq}^+ (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
20	137.18	115.18	129.88	129.68	144.24	129.7	130.98	0.07
30	164.1	142.76	149.68	157.14	134.98	127.64	146.05	0.09
40	178.76	156.98	177.94	171.24	163.68	164.06	168.78	0.05

ตารางที่ ง.35 แรงดันคงทนอยู่ได้สวิตชิงอิมพัลส์ชั่ววอก (U_{dq}^-) ที่อิเล็กทรอนิกส์แบบรีดแกป-ระนาบ โดยปลายรีดแกปมียอดสูงเฉียง 3.5 mm และทำมุม 50° ที่ระยะแกป 20 , 30 และ 40 mm ณ อุณหภูมิ 30°C

ระยะแกป (mm)	U_{dq}^- (kV)						\bar{U}_{dq} (kV)	v
	1	2	3	4	5	6		
20	129.1	149.7	128.92	128.8	128.68	128.94	132.36	0.06
30	164.34	142.82	142.78	150.04	150.12	142.24	148.72	0.06
40	171.56	171.9	185.1	177.48	163.9	171.08	173.50	0.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการศึกษาอัตราส่วนแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ

ตารางที่ จ.1 แรงดันเบรกดาวนกระแสสลับควอนไทล์อันดับที่ 22% และ 27% [10]

r (mm)	g (mm)	$\bar{U}_{d,cum}$ (kV)	$\sigma_{\Delta u}$ (s)	$\frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$	$\sigma_{\Delta x}$	$u_{\Delta x}$	$\bar{U}_{d,perf}$ (kV)	σ	u_{d22} (kV)	u_{d27} (kV)
2.5	3	53.8	6.2	0.32	0.64	-0.90	62.5	9.6	55.0	56.6
	5	66.8	6.2	0.32	0.64	-0.90	75.5	9.6	68.0	69.6
	7	80.9	8.5	0.23	0.6	-1.05	95.8	14.2	84.8	87.1
	10	87.5	13.0	0.15	0.55	-1.20	115.8	23.6	97.6	101.4
5	3	59.4	6.3	0.32	0.64	-0.90	68.2	9.8	60.7	62.2
	5	84.7	8.6	0.23	0.6	-1.05	99.8	14.4	88.7	91.0
	7	104	14.3	0.14	0.53	-1.28	138.7	27.2	117.7	122.0
10	3	67.2	4.8	0.42	0.70	-0.71	72.1	6.8	66.8	67.9
	5	107.4	12.0	0.17	0.55	-1.20	133.6	21.8	116.7	120.2
15	3	79.3	7.5	0.27	0.61	-0.93	90.7	12.3	81.2	83.1
	5	120.6	7.8	0.26	0.61	-0.93	132.4	12.8	122.6	124.6

ตารางที่ จ.2 อัตราส่วนแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับที่ควอนไทล์อันดับที่ 22%

r(mm)	g(mm)	u_{d22} (kVrms)	u_{dp22} (kVpeak)	U_{dq}^- (kV)	U_{dq}^+ (kV)	U_{dq}^- / u_{dp22}	U_{dq}^+ / u_{dp22}
2.5	3	55.0	77.8	113.9	123.75	1.46	1.59
	5	68.0	96.2	143.8	152.88	1.50	1.59
	7	84.8	120.0	163.2	178.13	1.36	1.48
	10	97.6	138.0	168.7	204.6	1.22	1.48
5	3	60.7	85.8	130.52	152.4	1.52	1.78
	5	88.7	125.4	163.61	175.44	1.30	1.40
	7	117.7	166.4	189.32	210.63	1.14	1.27

10	3	66.8	94.4	137.74	158.85	1.46	1.68
	5	116.7	165.0	191.49	228.2	1.16	1.38
15	3	81.2	114.8	144.76	166.03	1.26	1.45
	5	122.6	173.3	205.33	236.9	1.18	1.37

ตารางที่ ๑.3 อัตราส่วนแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ ที่ควอนไทล์อันดับที่ 27%

r(mm)	g(mm)	U_{d27} (kV _{rms})	U_{dp27} (kV _{peak})	U_{dq}^- (kV)	U_{dq}^+ (kV)	U_{dq}^- / U_{dp27}	U_{dq}^+ / U_{dp27}
2.5	3	56.56872	80.0	113.9	123.75	1.42	1.55
	5	69.56415	98.4	143.8	152.88	1.46	1.55
	7	87.10939	123.2	163.2	178.13	1.33	1.45
	10	101.3587	143.3	168.7	204.6	1.18	1.43
5	3	62.21703	88.0	130.52	152.4	1.48	1.73
	5	90.97403	128.6	163.61	175.44	1.27	1.36
	7	122.0111	172.5	189.32	210.63	1.10	1.22
10	3	67.86491	96.0	137.74	158.85	1.44	1.66
	5	120.1979	170.0	191.49	228.2	1.13	1.34
15	3	83.14578	117.6	144.76	166.03	1.23	1.41
	5	124.5844	176.2	205.33	236.9	1.17	1.34

ตารางที่ ๑.3 อัตราส่วนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์ ที่ควอนไทล์อันดับที่ 22%

r(mm)	g(mm)	U_{dq}^- (LI) (kV)	U_{dq}^+ (LI) (kV)	U_{dq}^- (SI) (kV)	U_{dq}^+ (SI) (kV)	U_{dq}^- (LI)/ U_{dq}^- (SI)	U_{dq}^+ (LI)/ U_{dq}^+ (SI)
2.5	3	155.1	141.98	113.88	123.75	1.36	1.15
	5	189.3	179.6	143.84	152.88	1.32	1.17
	10	208.1	193.9	168.68	204.6	1.23	0.95
5	3	169.8	171.4	130.52	152.4	1.30	1.12
	5	215	193.9	163.61	175.44	1.31	1.11

10	3	175.7	191.6	137.74	158.85	1.28	1.21
	5	231.7	246.5	191.49	228.2	1.21	1.08
15	3	181.7	189.1	144.76	166.03	1.26	1.14
	5	299.8	309.6	205.33	236.9	1.46	1.31



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชลวิทย์ วินิจชัย เกิดเมื่อวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2521 ที่อำเภอหนองโดน จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 จนถึงปัจจุบัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย