ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

นายมนตรี ระชารักษ์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-490-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BREAKDOWN STRENGTH OF TRANSFORMER OIL IN INHOMOGENEOUS FIELDS

Mr. Montree Rasaruk

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 1999

ISBN 974-333-490-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ
โดย	นายมนตรี ระษารักษ์
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธัชชัย สุมิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด)

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

....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

....กรรมการ
(คุณวรา จูห้อง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มนตรี ระษารักษ์ : ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (BREAKDOWN STRENGTH OF TRANSFORMER OIL IN INHOMOGENEOUS FIELDS) อ. ที่ปรึกษา : ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ , 111 หน้า. ISBN 974-333-490-4.

วิทยานิพนธ์นี้รายงานผลกระทบของการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงทั้งแรงดันกระแสสลับและอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน การทดลองใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ แปรค่าความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า(E_{max}/E_{avg})ในช่วง 1.1-5.0 คำนวณค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์ สัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนของค่าแรงดันเบรกดาวน์ ลักษณะการกระจายทางสถิติของแรงดันเบรกดาวน์ และความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ ผลการวิเคราะห์ได้ข้อสรุปดังนี้

1.การกระจายแบบปกติสามารถแทนฟังก์ชันการกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์ได้ดี และสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนของข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์โดยทั่วไปมีค่าต่ำกว่า 0.11

2.แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 30-80°C ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย แรงดันเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ขณะที่ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอสูง แรงดันเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากตามอุณหภูมิ

3.แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์มีลักษณะแปรตามอุณหภูมิและความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย แรงดันเบรกดาวน์มีการเพิ่มขึ้นประมาณ10-20% ตามการเพิ่มของอุณภูมิน้ำมัน ขณะที่ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ไม่มีการเพิ่มตามอุณหภูมิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต มนตรี ระษารักษ์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา คมสัน เพ็ชรรักษ์

ปีการศึกษา 2542 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4070380021: ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD:TRANSFORMER OIL / THERMAL EFFECT / INHOMOGENEOUS FIELD /AC BREAKDOWN VOLTAGE/ IMPULSE BREAKDOWN VOLTAGE
MONTREE RASARUK : BREAKDOWN STRENGTH OF TRANSFORMER OIL IN INHOMOGENEOUS FIELDS THESIS ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS, Dr. Sc.Techn. 111 pp. ISBN 974-333-490-4.

This thesis deals mainly with the effect of field non-uniformity and the impact of temperature on the breakdown characteristic of transformer oil under AC, positive and negative impulse voltages. The sphere-plane configuration was used to vary the degree of field non-uniformity, i.e., E_{max}/E_{avg}, in the range between 1.1 and 5.0. The average breakdown voltage distribution function of breakdown voltage and breakdown field strength were calculated. The finding were as follows:

1. The normal distribution provided the best representation of AC breakdown voltages. The variation coefficient generally was less than 0.11.

2. Under AC stress, the breakdown strength of transformer oil was increased with increasing temperature in the range between 30 and 80°C. However, under slightly non-uniform fields, the breakdown strength only slightly increased with temperature, but it significantly increased with temperature under highly non-uniform fields.

3. The impulse breakdown strength seemed to vary with both temperature and field non-uniformities. Under slightly non-uniform fields, the impulse breakdown strength increased by 10 to 20% with increasing oil temperature, but there was no such increase in breakdown strength with temperature under highly non-uniform fields.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต M. Rasaruk.
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา K. Petcharaks.
ปีการศึกษา 2542 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก ดร.คม่สัน เพ็ชรรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้แนวทาง ข้อคิดเห็นที่สำคัญต่อการศึกษาวิจัยและตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำในการออกแบบชุดทดลองและกระบวนการทดลอง คุณถาวร เอื้อดี ที่ให้คำแนะนำทางด้านเทคนิคในสร้างและวัดแรงดันสูง คุณเกรียงไกร โอฐธนู ที่ให้ความช่วยเหลือในการประกอบสร้างชุดควบคุมคุณภาพน้ำมันและชุดทดลอง คุณวิทวัส งามประดิษฐ์ สำหรับคำแนะนำในการเลือกซื้อวัสดุอุปกรณ์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่อำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายสุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ผู้ให้การสนับสนุนและกำลังใจตลอดมา รวมทั้งศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังที่ทำให้ผู้เขียนได้มีโอกาสศึกษาและสัมผัสกับความรู้ทางวิชาการด้านนี้ โดยให้การสนับสนุนด้านทุนทรัพย์และเทคโนโลยีเป็นอย่างดีในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..จ

กิตติกรรมประกาศ...ฉ

สารบัญ..ช

สารบัญตาราง...ฏ

สารบัญรูป..ฏ

บทที่

1 บทนำ...1

1.1 บทนำทั่วไป...1

1.2 ที่มาของปัญหา..1

1.3 ผลการศึกษาในอดีต...2

1.4 การศึกษาวิจัยในครั้งนี้..5

1.5 วัตถุประสงค์การทำวิทยานิพนธ์...5

1.6 ขอบข่ายวิทยานิพนธ์...5

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ..7

2. ฉนวนเหลว...8

2.1 ชนิดของฉนวนเหลว..8

2.2 น้ำมันแร่..9

2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า.......................................11

2.3.1 รูปร่างอิเล็กโตรด...11

2.3.2 องค์ประกอบทางเคมี..11

2.3.3 การเคลื่อนที่..12

2.3.4 อนุภาคเจือปนของแข็ง...12

2.3.5 ความชื้น...12

หน้า

2.3.6 ก๊าซ....13
2.3.7 อุณหภูมิ....14
2.3.8 ประจุค้าง....15
2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวน์....15
2.4.1 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์....15
2.4.2 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวเชิงการค้า....16
3 สถิติที่ใช้ในการทดลอง....20
3.1 การทดลองแรงดันเบรกดาวน์....20
3.1.1 การทดลองแรงดันเพิ่ม....20
3.1.2 การหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ควอนไทล์อันดับต่ำ....25
3.2 การทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน....28
3.2.1 การสร้างกราฟเปรียบเทียบ....28
3.2.2 การคำนวณด้วยการทดสอบสมมติฐาน....29
3.3 การหาฟังก์ชันการกระจายข้อมูล....30
3.3.1 การสร้างตารางแจกแจงปฐมภูมิ....30
3.3.2 การสร้างกราฟการกระจายข้อมูล....30
3.4 การแทนการกระจายข้อมูลด้วยการกระจายทางทฤษฎี....31
3.4.1 ฟังก์ชันการกระจายทางทฤษฎี....31
3.4.2 วิธีการเปรียบเทียบ....37
3.5 การหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม....41
4 วิธีดำเนินการทดลอง....45
4.1 น้ำมันหม้อแปลง....45
4.2 เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น....45
4.3 ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า....47
4.4 วิธีการทดลองและรวบรวมข้อมูล....48
4.4.1 อิเล็กโตรด....48
4.4.2 การทำความสะอาดชุดทดลอง....48

หน้า

4.4.3 การบรรจุน้ำมันลงชุดทดลองและการตั้งแกป..49
4.4.4 การควบคุมอุณหภูมิ..49
4.4.5 การทดลองความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ..49
4.4.6 การทดลองความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.......................................50
4.4.7 การควบคุมคุณภาพของน้ำมัน..51
5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง...52
5.1 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ...52
5.1.1 ผลกระทบของอนุภาคคาร์บอน...52
5.1.2 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติ...54
5.1.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ...60
5.2 แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์..62
5.2.1 ผลกระทบของการเกิดเบรกดาวน์...62
5.2.2 อันดับควอนไทล์ของแรงดันเบรกดาวน์...63
5.2.3 ผลการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิห้อง...65
5.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ...68
5.3 การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์กับแรงดันกระแสสลับ......................................72
5.3.1 แรงดันกระแสสลับที่ควอนไทล์อันดับที่ 20%(U_{d20})..................................72
5.3.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์และกระแสสลับ......................72
5.4 การเปรียบเทียบกับข้อมูลการออกแบบ..74
5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง...75
5.5.1 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ..75
5.5.2 แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์...79
5.5.3 อัตราส่วนแรงดันอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ..82
5.5.4 การเปรียบเทียบกับข้อมูลการออกแบบ...82
6 สรุปและข้อเสนอแนะ...84
6.1 ส่วนนำ...84
6.2 สรุปผลการทำวิทยานิพนธ์...85

หน้า

6.2.1 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ..85
6.2.2 แรงดันเบรกาดวน์อิมพัลส์...86
6.2.3 ฐานข้อมูลเพื่อการออกแบบ...87
6.3 ข้อเสนอแนะ..87
6.3.1 การนำผลการทำวิทยานิพนธ์ไปใช้งาน.....................................87
6.3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย..88
6.3.3 การวิจัยต่อไป...90
รายการอ้างอิง...91
ภาคผนวก...94
ภาคผนวก ก ข้อมูลการศึกษาผลกระทบของอนุภาคคาร์บอน.......................95
ภาคผนวก ข ข้อมูลการศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติ.................................98
ภาคผนวก ค ข้อมูลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ...............................104
ภาคผนวก ง ข้อมูลแรงดันอิมพัลส์...108
ภาคผนวก จ ข้อมูลการศึกษาอัตราส่วนอิมพัลส์.......................................116
ประวัติผู้เขียน...117

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 สรุปการศึกษาวิจัยในอดีต....................6

2.1 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงตาม IEC 296:1969....................11

2.2 ค่าคงที่การละลายของก๊าซ(A)ตามกฎของเฮนรี($\mu atm./(\mu l/l)$) ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมัน 760 mmHg....................14

2.3 ความสามารถในการละลายของก๊าซ(K,%Vol) ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมัน 760 mmHg....................14

3.1 ควอนไทล์ λ_q ของการกระจายแบบปกติ....................30

3.2 แฟกเตอร์ปรับแก้(M)ตามจำนวนข้อมูล(n)....................35

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง δ กับ γ_b k_b และ g_b....................36

3.4 ค่าวิกฤต $k_{n,\alpha}$ ของการทดสอบKolmogorov....................40

4.1 แสดงแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า(FF)ที่แกป(g)และอิเล็กโตรดทรงกลมรัศมี(r)ขนาดต่างๆ....................48

5.1 $\overline{U}_d$ และ ν ของน้ำมันใหม่(A)และน้ำมันที่ผ่านการทดลองประมาณ 170 ครั้ง(B) ที่ ทรงกลมรัศมีขนาด 5mm และอุณหภูมิ 30°C....................53

5.2 แรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5mm....................53

5.3 $\overline{U}_d$ และ ν ที่จำนวนครั้งการทดลอง 6 8 และ 24 ครั้ง ที่ r=2.5mmและอุณหภูมิ 30°C....................54

5.4 แรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันใหม่(A)และน้ำมันที่ผ่านการทดลอง 32 ครั้ง(B) ตามมาตรฐาน IEC 156-1963....................54

5.5 สภาวะที่ทำการทดลอง....................55

5.6 สภาวะที่ทำการทดลอง....................60

5.7 สภาวะที่ทำการทดลอง....................65

5.8 สภาวะที่ทำการทดลอง....................68

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ชนิดของฉนวนเหลว....9

2.2 ลักษณะการแทรกตัวของความชื้นในน้ำมัน....12

3.1 การทดลองแรงดันเพิ่ม กรณีแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับ....20

3.2 การทดลองแรงดันเพิ่ม กรณีแรงดันอิมพัลส์....21

3.3 ความกว้างสัมพัทธ์ของช่วงความเชื่อมั่นสำหรับค่าเฉลี่ย ที่ส.ป.ส.ความเบี่ยงเบนต่างๆ......23

3.4 ควอนไทล์อันดับต่ำสุดและสูงสุด ที่ส.ป.ส.ความเชื่อมั่น $\beta = 0.95$ 24

3.5 ควอนไทล์อันดับต่ำสุดและสูงสุด ที่ส.ป.ส.ความเชื่อมั่นค่าต่างๆ....24

3.6 ลักษณะการป้อนแรงดันเพื่อหาแรงดันเบรกดาวน์ที่ควอนไทล์อันดับต่ำ....25

3.7 ผลกระทบของ u_0 ที่มีต่อ $\bar{\beta}$ s_β และอันดับควอนไทล์ของ u_{dq} 26

3.8 ผลกระทบของ m ที่มีต่ออันดับควอนไทล์ของ u_{dq} β และ s_β 27

3.9 ผลกระทบของ Δu ที่มีต่ออันดับควอนไทล์ของ u_{dq} $\bar{\beta}$ และ s_β 28

3.10 การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันด้วยการวาดกราฟเปรียบเทียบ....29

3.11 กราฟความถี่สะสมกับแรงดันเบรกดาวน์....31

3.12 ฟังก์ชันความหนาแน่น $\varphi(z)/\sigma$ และฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(z)$ เมื่อ $\mu = 0$ และ $\sigma^2 = 1$......32

3.13 การกระจาย Weibull แบบ 2 พารามิเตอร์....34

3.14 การเปลี่ยนแกนความน่าจะเป็นของการกระจายแบบปกติ....37

3.15 การเปลี่ยนแกนความน่าจะเป็นของการกระจายWeibull เมื่อ δ =10 38

3.16 การเปรียบเทียบการกระจายข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี....39

3.17 แผนภาพแสดงการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่าง $V(u_d)$ และ $S_{\Delta u}(u_d)$ 42

3.18 σ และ μ 43

3.19 ขนาดแรงดันเพิ่มแต่ละขั้น 44

4.1 เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น....45

4.2 จุดเดือดกับความดันไอของน้ำ....46

4.3 ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า....47

รูปที่ หน้า

4.4 วงจรทดลองแรงดันกระแสสลับ..50

4.5 วงจรทดลองแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า..51

5.1 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับการกระจายแบบปกติ 55
เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30°C

5.2 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับการกระจายWeibull........................56
แบบ 3 พารามิเตอร์ เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30 °C

5.3 $\bar{U}_d$ และ ν กับ g ที่ r ค่าต่างๆ และอุณหภูมิ 30 °C..58

5.4 $\bar{U}_d$ กับ $r \cdot g$ 59

5.5 E กับ FF 59

5.6 แรงดันเบรกดาวน์($\bar{U}_d$)กับอุณหภูมิ..60

5.7 $\%U_d$ กับ FF..62

5.8 การกระจายค่าแรงดันเบรกดาวน์..63

5.9 ลักษณะการกระจายเชิงสถิติของ U_d เมื่อแทนด้วยการกระจายแบบปกติ........................63
เทียบกับ $\bar{U}_{dq}$ ที่ได้จากวิธีหาอันดับควอนไทล์ต่ำ

5.10 $\bar{U}_{dq}$ และ ν กับ g..65

5.11 $\bar{U}_{dq}$ กับ FF..66

5.12 $\bar{U}_{dq}$ กับ $r \cdot g$ 67

5.13 $\bar{E}_{dq}$ กับ FF..68

5.14 $\bar{U}_{dq}$ กับอุณหภูมิ..69

5.15 $\%U_{dq}$ กับ FF..71

5.16 อัตราส่วนแรงดันกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า..73

5.17 ความเครียดสนามไฟฟ้ากับแกป..75

6.1 กระบวนการทดลองที่นำเสนอ..86

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ฉนวนเหลวนำมาใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง หม้อแปลงวัดแรงดัน หม้อแปลงวัดกระแส เซอร์กิตเบรกเกอร์ รีแอกเตอร์ เคเบิลและคาปาซิเตอร์ เป็นต้น โดยทำหน้าที่ดังต่อไปนี้[1]

-เป็นฉนวนกั้นระหว่างส่วนที่มีแรงดันกับตัวถังที่เป็นกราวด์

-เป็นตัวระบายความร้อนด้วยการพาในหม้อแปลงไฟฟ้าและด้วยการไหลวนในเคเบิล

-ดับอาร์กในเซอร์กิตเบรกเกอร์

-สร้างค่าความจุไฟฟ้าให้สูงและต่ำได้ตามที่ต้องการสำหรับคาปาซิเตอร์กำลัง

ของเหลวหลายชนิดที่ได้จากแหล่งธรรมชาติและจากการสังเคราะห์สามารถนำมาใช้เป็นฉนวนเหลวได้ เช่น น้ำมันแร่(mineral oils) ไนโตรเจนเหลว น้ำมันซิลิโคน น้ำมันพืช เป็นต้น โดยต้องมีคุณสมบัติทั่วไปคือ มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง การนำมาใช้งานกับอุปกรณ์ต่างๆ พิจารณาจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และไฟฟ้า ให้เหมาะสมกับความต้องการใช้งาน

น้ำมันหม้อแปลงเป็นน้ำมันแร่ที่สำคัญและนิยมใช้กันมากเมื่อเปรียบเทียบกับของเหลวชนิดอื่น ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าและระบายความร้อน เป็นองค์ประกอบที่สำคัญและมีความอ่อนแอที่สุดในโครงสร้างภายในของหม้อแปลงเนื่องจากมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าในฉนวนแข็ง ยิ่งกว่านั้นความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันก็มีค่าต่ำกว่าฉนวนแข็ง ลักษณะสมบัติของน้ำมันใหม่โดยทั่วไปกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC296-1969 ทั้งด้านฟิสิกส์ เคมี และไฟฟ้า ในการนำมาใช้งานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและปลอดภัย วิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจกลไกการนำไฟฟ้า การเกิดเบรกดาวน์และลักษณะสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเป็นอย่างดี

1.2 ที่มาของปัญหา

ปัจจุบันการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงได้มีการศึกษาวิจัยทั้งที่ต้องการอธิบายกลไกการนำไฟฟ้า การเกิดเบรกดาวน์และผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อการนำไฟฟ้าและการเกิดเบรกดาวน์ เช่น รูปร่างของอิเล็กโตรด อนุภาคของแข็ง องค์ประกอบทาง

เคมี อัตราการไหล ความชื้น ก๊าซ และอุณหภูมิ เป็นต้น[3-9] ในกระบวนการศึกษาทดลองของนักวิจัยแต่ละท่านพารามิเตอร์ที่ทำการควบคุมให้คงที่และวิธีการทดลองมีความแตกต่างกัน เช่น การควบคุมอนุภาคเจือปน และปริมาณความชื้นที่ผสมอยู่ในน้ำมัน ลักษณะการป้อนแรงดัน จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง เป็นต้น จึงยากต่อการที่จะนำผลการทดลองเหล่านี้มาเปรียบเทียบกันว่าพารามิเตอร์ใดมีผลกระทบที่รุนแรงต่อลักษณะสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงและนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบหรือใช้งาน

จากเหตุดังกล่าว จึงเป็นที่มาของการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่มีพารามิเตอร์ที่ทำการควบคุมใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานในทางปฏิบัติ และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่จำเป็นสำหรับการนำไปใช้งาน ประกอบด้วย การนำไฟฟ้า การเกิดดิสชาร์จบางส่วน และการเกิดเบรกดาวน์ ในที่นี้เน้นศึกษาเฉพาะการเกิดเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง โดยศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่จำลองสภาวะการณ์ที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ 2 ประการคือ

1) การกระจายสนามไฟฟ้า เนื่องจากการออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยส่วนใหญ่จะจำกัดด้วยแฟกเตอร์หลายประการ ทำให้โครงสร้างในทางปฏิบัติมักจะมีการกระจายของสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ แม้ว่าจะพยายามหลีกเลี่ยงก็ตาม แต่ก็มีโอกาสเกิดได้เสมอ เช่น ผิวของอิเล็กโตรดที่มีความขรุขระ เป็นต้น

2) อุณหภูมิ ในสภาพการใช้งานอุณหภูมิภายในอุปกรณ์จะสูงกว่าอุณหภูมิห้องและมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จากการเปลี่ยนขนาดของโหลดและกำลังสูญเสีย การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลทำให้คุณสมบัติของน้ำมัน เช่น ความสามารถในการละลายของความชื้นและก๊าซ การกลายเป็นไอของน้ำมันและหยดของเหลวเจือปน เป็นต้น เปลี่ยนแปลงไป

ก่อนทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ดังกล่าวที่มีต่อการเกิดเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง จะต้องศึกษาก่อนว่าพารามิเตอร์เหล่านี้ มีนักวิจัยท่านใดศึกษามาแล้วบ้างและศึกษาไว้อย่างไรบ้าง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัย ดังจะกล่าวในหัวข้อ 1.3

1.3 ผลการศึกษาวิจัยในอดีต

Holle(1967) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ทำการทดลองตามมาตรฐาน VDE-0370 ที่อุณหภูมิ 20-100 °C และความชื้น 5-200 ppm ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่า 20 ppm แรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ย ($\bar{U}_d$) มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ความชื้นในช่วง 20-100 ppm $\bar{U}_d$ เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิใน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ช่วง 20-80 ^{o}C และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 80^{o}C และที่ความชื้น 200 ppm $\bar{U}_d$ จะมีแนวโน้มคงที่อีกครั้งแต่มีค่าต่ำมาก

Hauschild(1969) ได้ศึกษาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย(slightly nonuniform field)และสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง(highly nonuniform field) โดยทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวก(1.2/50 μ s) แรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งขั้วบวก (100/3000μs) และแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 Hz กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ ทรงกลมรัศมี (r) ขนาด 50 mm ที่แกป(g) 0-50 mm มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงสุด(FF=E_{max}/E_{avg})~1.75 ที่แกป 50 mm ผลการศึกษาพบว่า ที่แกป 0-5 mm ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์(E_d)มีแนวโน้มลดลงตามแกปที่กว้างขึ้น และเมื่อแกปกว้างกว่า 5 mm E_d มีแนวโน้มคงที่ มีค่าเท่ากับ 700 kV/cm สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเท่ากับ 260 kV/cm สำหรับแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งและเท่ากับ 50 kV/cm สำหรับแรงดันกระแสสลับ ในการทดลองที่สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงใช้อิเล็กโตรดแบบเข็ม-ระนาบ ทดลองที่แกป 0-250 mm มีค่า FF>50 ผลการทดลองพบว่า ที่แกป 0-100 mm เมื่อทดลองด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและ สวิตชิ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับแกปไม่เป็นเชิงเส้น แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ ฟ้าผ่าจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง แต่เมื่อป้อนด้วยแรงดันกระแสสลับจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นที่แกปกว้างกว่า 40 mm ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์มีค่าประมาณ 10 kV/cm ต่ำกว่ากรณีของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยถึง 5 เท่า สาเหตุมาจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

Danikas(1990) ได้ศึกษาผลกระทบของรูปร่างอิเล็กโตรดและแกปที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้อิเล็กโตรด 3 แบบ คือ อิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม ทำจากเหล็กอ่อน รัศมีขนาด 10 mm ที่แกป 0.1-0.5 mm อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ ทำจากทองเหลืองมีพื้นที่ผิวเรียบ 2.56 cm^2 ที่แกป 1-4 mm และอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ทำจากเหล็กอ่อน ที่แกป 1-6 mm ทดลองป้อนแรงดันกระแสสลับ พบว่า แรงดันเบรกดาวน์($\bar{U}_d$)ที่ได้จากการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดทั้ง 3 แบบ มีความสัมพันธ์กับแกปดังสมการ $\bar{U}_d$=kg^n โดยที่ k =ค่าคงที่ g = แกป และ n =แฟกเตอร์เอ็กซ์โปเนนเชียล มีค่าระหว่าง 0-1 จากสมการดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า E_d มีค่าลดลงเมื่อแกปเพิ่มขึ้น เขาอธิบายว่าอาจจะเกิดจากเมื่อแกปกว้างขึ้นทำให้ปริมาณสิ่งเจือปนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดมากขึ้นจึงเกิดเบรกดาวน์ง่ายขึ้น

El-Zeftawy และคณะ(1990) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยทดลองป้อนแรงดันอิมพัลส์(ไม่ได้บอกขั้วแรงดัน)ให้กับอิเล็กโตรด

แบบทรงกลม-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม และเหล็กกล้า รัศมีขนาด 10 mm น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้มีทั้งที่ผ่านการกำจัดน้ำและที่มีส่วนผสมของหยดน้ำอิมัลชัน(emulsion droplets of water) กับไฟเบอร์ ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าลดลง ไม่ได้อธิบายว่าทำไมจึงเกิดปรากฏการณ์นี้

Jayaram(1990) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราการไหลที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงชนิดแนฟทีนิก โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM 1816 ทำการทดลองโดยป้อนแรงดันกระแสสลับ ที่อุณหภูมิ 20-105 ^{o}C และอัตราการไหล 0-65 mL/s ก่อนทดลองน้ำมันจะผ่านการกำจัดก๊าซด้วยการลดความดันให้เหลือ 0.8 Pa เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 μm และให้ความร้อนที่สภาวะสุญญากาศจนมีอุณหภูมิ ~70 ^{o}C เป็นเวลา 15 นาที เพื่อควบคุมให้ความชื้นขณะทำการทดลองมีค่าคงที่ประมาณ 30 ppm ผลที่ได้คือ $\overline{U}_d$ เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ ~80°C จากนั้นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 80°C เขาอธิบายว่าน้ำมันที่มีอุณหภูมิต่างกันคุณสมบัติทางฟิสิกส์เช่น ความหนืด ความตึงผิว ความหนาแน่น เป็นต้น และคุณสมบัติทางเคมี เช่น ความเข้มข้นของน้ำและอากาศที่ละลายอยู่ เป็นต้น จะมีค่าต่างกัน การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เหล่านี้ทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนไป

Yilmaz และ Guler(1996) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของรูปร่างอิเล็กโตรดและแกปที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า โดยใช้อิเล็กโตรดแบบต่างๆคือ อิเล็กโตรดแบบVDE ตามมาตรฐาน ASTM D1816-84a อิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม ตามมาตรฐาน TS3989 อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ ตามมาตรฐาน ASTM D 877-87 อิเล็กโตรด ร็อด-เข็ม(rod-needle) ตามมาตรฐาน ASTM D 3756-79 และอิเล็กโตรดเข็ม-ระนาบ(disk-needle) ทำการทดลองที่แกป 0.5-4 mm. ป้อนแรงดันกระแสสลับด้วยอัตราการเพิ่มแรงดัน 2 kV/s ผลการทดลองพบว่า $\overline{U}_d$ เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นกับแกปไม่ว่าจะทดลองด้วยรูปร่างแบบใดก็ตาม $\overline{U}_d$ สูงที่สุดเมื่อทดลองด้วยอิเล็กโตรดแบบ VDE และ $\overline{U}_d$ ต่ำที่สุดเมื่อทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดแบบ เข็ม-ระนาบ เขาอธิบายว่าการที่แรงดันเบรกดาวน์มีค่าแตกต่างกันเมื่ออิเล็กโตรดมีรูปร่างต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ $\overline{U}_d$ จะสูง) และการที่แรงดันเบรกดาวน์จากการทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดแบบ เข็ม-ระนาบ ต่ำกว่าเมื่อใช้อิเล็กโตรดแบบร็อด-เข็ม เนื่องจากความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนที่อิเล็กโตรดแบบเข็มแปรตามพื้นที่ผิวของอิเล็กโตรด

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 การศึกษาวิจัยในครั้งนี้

จากการศึกษาวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับพารามิเตอร์การกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ ได้แก่ อิเล็กโตรด แกป และอุณหภูมิ ดังที่กล่าวมาข้างต้น ได้นำมาสรุปเป็นตารางที่ 1.1 จะเห็นว่า การศึกษาวิจัยในอดีตเกี่ยวกับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงยังมีบางส่วนที่ยังไม่ครบสมบูรณ์กล่าวคือ

1) ผลการทดลองเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า มักจะทดลองป้อนแรงดันกระแสสลับโดยใช้อิเล็กโตรดมาตรฐานที่มีการกระจายของสนามไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอ เช่น อิเล็กโตรดแบบ VDE มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ~1.03 ไม่มีการศึกษากรณีที่อิเล็กโตรดมีการกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย(slightly nonuniform fields) และแบบไม่สม่ำเสมอสูง(highly nonuniform fields)ที่จะมีผลของประจุค้างจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

2) ผลการทดลองที่ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ขัดแย้งกัน[4,5]

3) การศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง ส่วนใหญ่ทำการเปรียบเทียบโดยใช้ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์ การนำผลที่ได้เหล่านี้มาใช้ทำการออกแบบการฉนวนเป็นไปได้ยาก เนื่องจากในความเป็นจริงแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวมีความไม่แน่นอน จำเป็นต้องหาลักษณะสมบัติเชิงสถิติเพื่อใช้หาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ต่ำ

จากการทดลองของนักวิจัยในอดีตและเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นการศึกษาครั้งนี้ จึงมุ่งเน้นที่ลักษณะสมบัติเชิงสถิติของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ รวมถึงผลกระทบของการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ ทั้งแรงดันกระแสสลับ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวกและขั้วลบ

1.5 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของแกปและอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง

1.6 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นลักษณะเชิงทดลอง ทำการหาลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการควบคุมให้มีอนุภาคเจือปนขนาดเล็กกว่า 1 μm และปริมาณความชื้นประมาณ 30 ppm ชุดทดลองใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ ตัวแปรที่ศึกษาคือ ขนาด อิเล็กโตรด แกปและอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง แรงดันทดสอบทั้งแรงดันกระแสสลับ อิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ

ตารางที่ 1.1 สรุปการศึกษาวิจัยในอดีต

ผู้วิจัย	รูปร่างอิเล็กโตรด	อุณหภูมิ(°C)	ชนิดแรงดัน	การควบคุมคุณภาพน้ำมัน	แกป(mm)
Holle(1967)	VDE(FF~1.03)	20-100	Ac	-	2.5
Hauschild(1969)	ทรงกลม-ระนาบ (FF≤1.75) ทรงกลมรัศมี=50mm	ห้อง	Ac,Li+,Si+	-	0-50
	เข็ม-ระนาบ(FF≥50)	ห้อง	Ac,Li+,Si+	-	0-250
Danikas(1990)	ทรงกลม-ทรงกลม(r=5mm) ระนาบ-ระนาบแบบบรูซ ทรงกระบอกซ้อน	ห้อง	Ac	เครื่องกรองขนาด 6μm ซิลิกาเจลดูดความชื้น	0.1-0.5 1-4 1-6
El-zeftawy และคณะ(1990)	ทรงกลม-ทรงกลม(r=10mm)	20-80	Li	-	0-12
Jayaram(1990)	VDE	25-105	Ac	เครื่องกรองขนาด 0.45μm ความชื้น 35 ppm	2.5
Yilmaz และ Guler(1996)	อิเล็กโตรด VDE ตาม ASTM D1816-84a ทรงกลม-ทรงกลม ตาม TS3989 ระนาบ-ระนาบ ตาม ASTM D 877-87 ร็อด-เข็ม ตามASTM D 3756-79 เข็ม-ระนาบ	~23	Ac	-	0.5-4

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1)ทำให้ทราบถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่แปรตามแกป ขนาดอิเล็กโตรด และอุณหภูมิ พร้อมข้อมูลเบื้องต้นที่สมบูรณ์ได้แก่ ขนาดอนุภาคและปริมาณความชื้น

2) ใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ฉนวนเหลว

บทนี้กล่าวถึง ชนิดของฉนวนเหลว พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เช่น รูปร่างอิเล็กโตรด องค์ประกอบทางเคมี การเคลื่อนที่ เป็นต้น รวมทั้งอธิบายกลไกการเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว

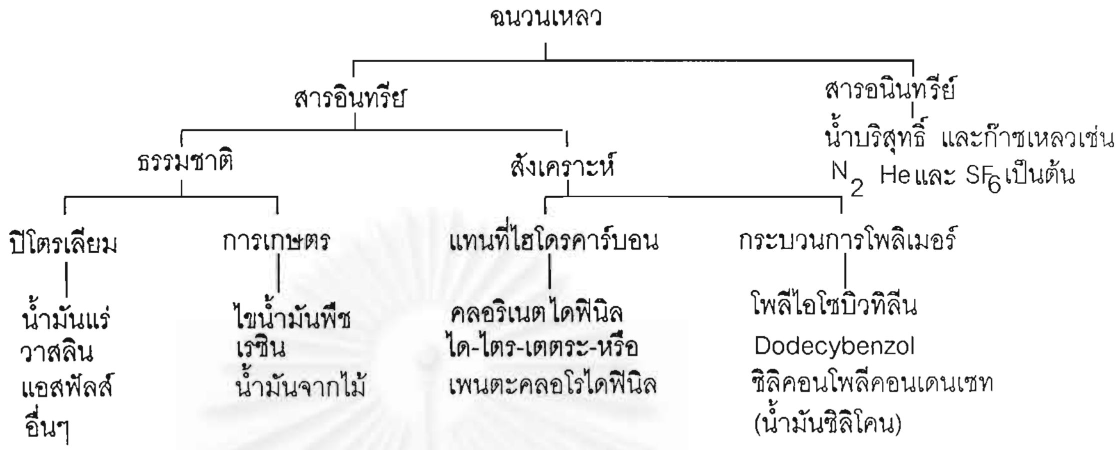
2.1 ชนิดของฉนวนเหลว[1]

ปัจจุบันได้มีการผลิตฉนวนเหลวหลายชนิดทั้งที่ได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมและการสังเคราะห์ทางเคมี กระบวนการดังกล่าวทำให้โครงสร้างทางเคมีของฉนวนเหลวที่ได้มีความแตกต่างกัน สามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆได้ 2 ประเภท คือ ประเภทสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์ สารอินทรีย์มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ตัวอย่างฉนวนเหลวประเภทสารอินทรีย์ที่ได้จากทางธรรมชาติ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันแร่(mineral oils) แอลฟัลส์ น้ำมันพืช ไขมัน(wax) และเรซินธรรมชาติ เป็นต้น

ฉนวนเหลวประเภทสารอินทรีย์นอกจากจะได้จากธรรมชาติแล้วยังผลิตได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี จากกระบวนการแทนที่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในสถานะของเหลวและก๊าซ เช่น คลอริเนทไดฟีนิล(chlorinated diphenyles) ปัจจุบันเลิกใช้เนื่องจากเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและมีราคาแพง เป็นต้น และจากกระบวนการทำให้เกิดโครงสร้างโพลิเมอร์ เช่น โพลีไอโซบิวทิลีน(Polyisobutylene)มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนดีกว่าน้ำมันแร่ จึงมีการนำไปใช้ในเคเบิลแรงสูงและคาปาซิเตอร์ และซิลิคอนโพลีคอนเดนเซทมีเสถียรภาพสูง(ทำปฏิกริยากับสารอื่นยาก)และคุณสมบัติทางความร้อนดีกว่าน้ำมันแร่(ติดไฟที่อุณหภูมิสูง) เป็นต้น

ส่วนฉนวนเหลวประเภทสารอนินทรีย์ เช่น น้ำบริสุทธิ์ ไนโตรเจนเหลว อาร์กอนเหลว และออกซิเจนเหลว เป็นต้น น้ำบริสุทธิ์มีราคาถูกและผลิตได้ง่ายสามารถนำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริกได้ ส่วนก๊าซเหลวนิยมใช้ในด้านไครโอจีนิก(cryogenic)

จากรายละเอียดข้างต้น สามารถสรุปประเภทฉนวนเหลวเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่2.1



รูปที่ 2.1 ชนิดของฉนวนเหลว[1]

2.2 น้ำมันแร่(mineral oil)

น้ำมันแร่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด สามารถจำแนกตามโครงสร้างโมเลกุลได้ 3 ประเภทคือ พาราฟินิก(parafinic) แนฟทีนิก (napthenic) และ อโรมาติก(aromatic) พาราฟินิกและแนฟทีนิกเป็นประเภทที่มีเสถียรภาพเนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ส่วนอโรมาติกไม่มีเสถียรภาพเนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว แต่ละประเภทยังประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีขนาดและความซับซ้อนของโครงสร้างต่างกัน ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กและมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนจะอยู่สถานะก๊าซที่อุณหภูมิห้อง ไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูงจะระเหยยากและมีความหนืดต่ำ ส่วนที่มีมวลโมเลกุลสูงมากและมีโครงสร้างสลับซับซ้อนจะระเหยยากและมีความหนืดสูงหรือมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น ขี้ผึ้งพาราฟิน(parafin wax)หรือแอสฟัลท์(asphaltic bitumen) เป็นต้น[18]

น้ำมันดิบนอกจากจะมีองค์ประกอบทั้ง 3 ชนิดแล้ว ประกอบด้วยสารที่ไม่ใช่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นไฮโดรคาร์บอนอยู่ด้วย เรียกได้ว่าเป็นสิ่งเจือปนหรือสิ่งแปลกปลอม ที่ต้องกำจัดออกระหว่างกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม

โดยทั่วไปน้ำมันดิบจะจำแนกออกเป็น 3 ชนิดคือ[18]

1) น้ำมันดิบที่มีพาราฟินิกเป็นมูลฐาน(parafin base crude) ประกอบด้วยพาราฟินิกและแนฟทีนิกที่มวลโมเลกุลมีค่ามากและซับซ้อน สัดส่วนของพาราฟินิกมากกว่า และสัดส่วนของอโรมาติกต่ำ ดังนั้นจึงมีขี้ผึ้ง(wax)เป็นจำนวนมาก ส่วนแอสฟัลส์มีจำนวนน้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) น้ำมันดิบที่มีแนฟทีนิกเป็นมูลฐาน(naphtene base crude) มีสัดส่วนของแนฟทีนิกและอโรมาติกมากกว่าชนิดแรก และมีสัดส่วนของพาราฟินิกต่ำ แนฟทีนิกที่ผสมอยู่มีมวลโมเลกุลสูง จึงมีสัดส่วนของปริมาณแอสฟัลส์มาก

3) น้ำมันดิบผสม(mixed base crude) มีสัดส่วนของพาราฟินิกและแนฟทีนิกใกล้เคียงกัน น้ำมันที่ได้จากน้ำมันดิบชนิดนี้จะคล้ายกับที่ได้จากน้ำมันดิบสองชนิดแรกขึ้นอยู่กับว่าไฮโดรคาร์บอนประเภทใดมีสัดส่วนมากกว่า

การผลิตน้ำมันแร่ สามารถใช้น้ำมันได้ทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมาเป็นวัตถุดิบเบื้องต้น แต่กระบวนการที่ใช้สำหรับน้ำมันดิบแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน เพื่อควบคุมอัตราส่วนขององค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้ง 3 ประเภทให้เหมาะสม โดยทั่วไปจะมีสัดส่วนพาราฟีนิก 40-60% แนฟทีนิก 30-50%และ อโรมาติก 5-20%โดยน้ำหนัก[1] เพื่อให้น้ำมันแร่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเป็นฉนวนทางไฟฟ้า

นอกจากนี้ ยังมีการเติมสารเติมแต่ง(additive)เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันแร่ โดยเฉพาะสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชั่น(oxidation inhibitor) ช่วยให้น้ำมันเกิดออกซิเดชันยากขึ้น น้ำมันแร่จึงมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

น้ำมันแร่ที่นิยมใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง อาจจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและการใช้งานกับอุปกรณ์ชนิดใด เช่น น้ำมันหม้อแปลงเป็นน้ำมันแร่ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนและระบายความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง น้ำมันคาปาซิเตอร์มีคุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันหม้อแปลงเพียงแต่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า ใช้เป็นตัวกลางแช่กระดาษฉนวนและฟิล์มโพลิเมอร์ในการสร้างคาปาซิเตอร์ เป็นต้น

คุณสมบัติบางประการของน้ำมันแร่ใหม่ที่ใช้กับหม้อแปลงและสวิตช์เกียร์ตามมาตรฐาน IEC 296:1969 แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงตาม IEC 296:1969[2]

คุณสมบัติ	ปริมาณที่กำหนด
สีและลักษณะที่มองเห็น	ใส
ความหนืด ที่ 20°C	
-ประเภท I	40cst
-ประเภท II	25 cst
จุดติดไฟ	
-ประเภท I	140°C
-ประเภท II	130°C

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงตาม IEC 296:1969(ต่อ)

คุณสมบัติ	ปริมาณที่กำหนด
จุดเยือกแข็ง -ประเภท I -ประเภท II	 -30°C -45°C
ค่าความเป็นกลาง	≤ 0.03mgKOH/g
ค่ากำมะถันกัดกร่อน(corrosive sulpher)	>2
แรงดันเบรกดาวน์ -ไม่ผ่านการกำจัดอนุภาคเจือปนและความชื้น -ผ่านการกำจัดอนุภาคเจือปนและความชื้น	 ≥30kV ≥50kV
แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็ตริก ที่ 90°C	≤0.005
ความมีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน(oxidation stability) -น้ำมันที่ไม่เติมสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน(uninhibited oil) -การทำให้เป็นกลาง -เลนน้ำมัน(sludge) -น้ำมันที่เติมสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน(inhibited oil)	 ≤0.40mgKOH/g 0.10%โดยน้ำหนัก -

2.3 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

ชนิดและรูปร่างอิเล็กโตรด คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของฉนวนเหลว อีกทั้งสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่เช่น ฟองก๊าซ อนุภาคของแข็งและน้ำ เป็นต้น มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.3.1. รูปร่างอิเล็กโตรด

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวคล้ายกับก๊าซกล่าวคืออิเล็กโตรดที่มีการกระจายของสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าอิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย โดยกลไกการเบรกดาวน์จะไม่เกิดดิสชาร์จบางส่วน และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโตรดมีการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะต่ำที่สุดและมีการเกิดดิสชาร์จบางส่วนก่อนที่จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์[1]

2.3.2. องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีมีผลกระทบต่อความสามารถในการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตย์ (triboelectric) ปริมาณของโครงสร้างอโรมาติกในน้ำมันแร่ก็มีผลต่อความสามารถในการละลายของก๊าซ นอกจากนั้นการเกิดออกซิเดชันจะมีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของฉนวนเหลวเปลี่ยนไปและกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า[12]

2.3.3. การเคลื่อนที่ของฉนวนเหลว

การเคลื่อนที่ของฉนวนเหลวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฉนวนเหลว การทำงานของปั๊ม และจากปรากฏการณ์ EHD(Electrohydrodynamic) ทำให้เกิดฟองก๊าซ เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเจือปนและเกิดประจุอิสระเนื่องจากการเสียดสีระหว่างฉนวนเหลวกับฉนวนแข็ง ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์streaming electrification [12]

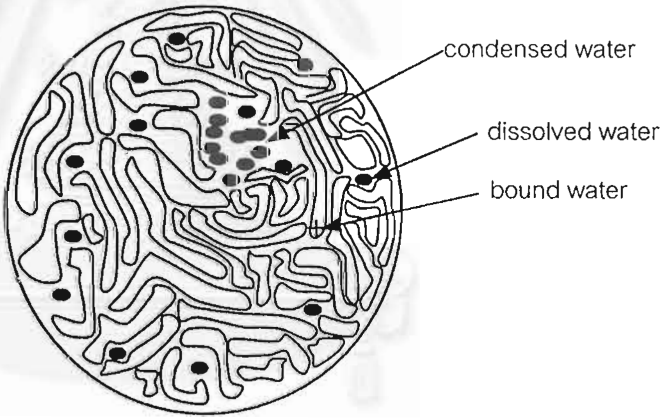
2.3.4. อนุภาคเจือปน(ของแข็ง)

อนุภาคของแข็งอาจเจือปนมาจากกระบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรมที่สามารถควบคุมได้จำกัด หรือจากภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ไฟเบอร์ที่เป็นเยื่อของกระดาษฉนวนในหม้อแปลง อนุภาคคาร์บอนที่เกิดจากการทำงานของตัวเปลี่ยนจุดแยก(tap changer) หรือการเบรกดาวน์ภายในหม้อแปลง เป็นต้น กลไกการเกิดเบรกดาวน์ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ2.4

2.3.5. ความชื้น

ความชื้นสามารถแทรกตัวอยู่ในฉนวนเหลวได้ 3 ลักษณะคือ[13]

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



รูปที่2.2 ลักษณะการแทรกตัวของความชื้นในน้ำมัน

ความชื้นมักจะละลายในฉนวนเหลวโดยอยู่ในรูปของ dissolved water จนถึงสภาวะอิ่มตัว ซึ่งเป็นสภาวะที่ปริมาณความชื้นที่มากที่สุดที่จะสามารถอยู่ในรูปของdissolved waterได้ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำมัน สำหรับน้ำมันแร่สามารถคำนวณความสามารถการละลายที่สภาวะอิ่มตัวได้จากความสัมพันธ์[6]

$$\log W = 7.0895 - \frac{1567}{T}$$

โดยที่

W =ความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้น(ppm)

T =อุณหภูมิสมบูรณ์(K)

ปริมาณน้ำในน้ำมันที่เกินจากสภาวะอิ่มตัวจะอยู่ในรูปของ condensed water ส่วน bound water เกิดจากการกลั่นที่ไม่ดีพอหรือการเกิดปฏิกริยาในเมื่อน้ำมันมีการเสื่อมสภาพ

ความชื้นที่เจือปนอยู่ในฉนวนเหลวจะทำให้ฉนวนเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฉนวนเหลวเกิดการเสื่อมสภาพ ถ้าเป็นหยดน้ำที่อยู่ในน้ำมัน หยดน้ำจะยืดออกตามแนวของสนามไฟฟ้า ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เมื่อถึงค่าวิกฤติ จะเกิดเบรกดาวน์โดยแนวการเบรกดาวน์จะเริ่มที่ปลายของหยดน้ำไปสู่อิเล็กโตรด นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแยกน้ำออกเป็นก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ในรูปของฟองก๊าซ ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและอาจทำให้เกิดเบรกดาวน์ตามมา

วิธีการป้องกันความชื้นไม่ให้เจือปนในฉนวนเหลวที่ดีที่สุดคือไม่ให้ฉนวนเหลวสัมผัสกับอากาศภายนอกด้วยการบรรจุในภาชนะที่ปิดมิดชิดที่ภายในเป็นสุญญากาศ หรือให้สัมผัสกับอากาศโดยผ่านซิลิกาเจล(silica gel)หรือสารดูดความชื้น(desiccator)อื่นๆ ก็สามารถลดความชื้นจากภายนอกได้บ้าง

2.3.6 **ก๊าซ**[13]

ก๊าซสามารถละลายอยู่ในฉนวนเหลวได้ โดยความสามารถในการละลายเป็นไปตามกฎของเฮนรี่(Henry's law) ที่กล่าวว่า ความสามารถในการละลาย(saturation solubility,K_a)ของก๊าซใดๆที่อยู่เหนือฉนวนเหลวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันบางส่วนของก๊าซนั้น ดังสมการ

$$P_a = A_a K_a$$

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

P_a =ความดันบางส่วนของก๊าซ a (atm)

K_a =ความสามารถในการละลาย(% Vol)

ในสภาวะสมดุลการละลาย ผลรวมของความดันบางส่วนของก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำมันทั้งหมด ($P_a + P_b + P_c + ...$) จะเท่ากับผลรวมของความดันบางส่วนของก๊าซเหนือน้ำมัน ตารางที่ 2.2 และ 2.3 แสดงถึงค่าคงที่การละลาย(A)และความสามารถในการละลาย(K)ของก๊าซแต่ละชนิดที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิ 0-100 °C ความดันบางส่วนของก๊าซเท่ากับ 760 mmHg เราจะได้ว่าก๊าซจะละลายได้มากขึ้นหรือน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่การละลายของก๊าซ(A)ตามกฎของเฮนรี($\mu atm./(\mu l/l)$) ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมัน 760 mmHg

อุณหภูมิ(^{o}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 2.3 ความสามารถในการละลายของก๊าซ(K,%Vol) ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมัน 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	-

ตัวอย่างการหาปริมาณก๊าซในน้ำมันเช่น น้ำมันที่อยู่ในสภาวะอากาศที่มีความดัน 0.03 bar หรือ 20 mmHg และมีอุณหภูมิ 20°C จากตารางที่ 2.3 ความสามารถในการละลายของก๊าซในน้ำมันเท่ากับ 10.1 %Vol ที่ความดันของอากาศเหนือน้ำมัน 760 mmHg และอุณหภูมิของน้ำมันเท่ากับ 20°C ดังนั้นปริมาณอากาศที่ละลายอยู่ในสภาวะสมดุลที่ความดัน 20 mmHg เท่ากับ $10.1*(\frac{20}{760})=0.265$%Vol. และถ้าน้ำมันมีอุณหภูมิ 80°C เนื่องจากความสามารถในการละลายของอากาศเท่ากับ 10.8%Vol. ที่ความดันอากาศเหนือน้ำมัน 760 mmHg และอุณหภูมิของน้ำมันเท่ากับ 80°C ดังนั้นความสามารถในการละลายของก๊าซ เท่ากับ $10.8*(\frac{20}{760})=0.28$%Vol เป็นต้น สังเกตว่าความสามารถในการละลายของอากาศในน้ำมันเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย

2.3.7. อุณหภูมิของฉนวนเหลว

อุณหภูมิมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของน้ำมันหลายตัวเช่น ความหนืด ความตึงผิว เป็นต้น ทำให้กระบวนการเกิดฟองก๊าซและลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำมันเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย เช่นเดียวกับปริมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

การทดลองหาลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันที่ได้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้น โดยทั่วไปจะมีน้ำเจือปนอยู่เป็นปริมาณมากและที่สำคัญคือผลของอุณหภูมิเป็นแบบพลวัตดังนั้นจะต้องพิจารณาถึงเวลาที่ต้องใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของน้ำกับน้ำมันด้วย[12]

2.3.8. ประจุค้าง

ประจุค้างเกิดจากการดิสชาร์จบางส่วนในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง มีผลทำให้ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป และจากปรากฏการณ์streaming electrification ที่น้ำมันเคลื่อนที่และเสียดสีกับฉนวนแข็งเช่น กระดาษ แผ่นไม้อัด เป็นต้น หรือ ทำให้เกิดความ ต่างศักย์ระหว่างฉนวนแข็งกับน้ำมันเนื่องจากการสะสมประจุที่ผิวฉนวนแข็งกับน้ำมันที่มีประจุตรงข้ามกัน ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและดิสชาร์จตามผิว[14]

2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวน์

จากหัวข้อ 2.3 เนื่องจากมีพารามิเตอร์หลายตัวที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลว จึงไม่สามารถอธิบายกลไกการเกิดเบรกดาวน์และคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์ได้อย่างถูกต้องโดยใช้ทฤษฎีเพียงทฤษฎีเดียวได้ดังเช่นกรณีก๊าซ โดยทั่วไปกลไกการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์ และกลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวเชิงการค้า สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.4.1 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์[15]

จากการศึกษาการนำไฟฟ้าในฉนวนเหลว เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูง พบว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากคาร์โทดโดยสนามไฟฟ้า (field emission) และ การปล่อยอิเล็กตรอนจากคาร์โทดด้วยความร้อน(field enhanced thermionic emission) สามารถคำนวณขนาดกระแสได้ด้วยสมการชอตต์กี(Schottky) และเป็นที่น่าสังเกตว่าขนาดกระแสขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ

การศึกษาการเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว โดยทำการทดลองแปรค่าอุณหภูมิในช่วงกว้าง พบว่าแรงดันเบรกดาวน์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย แตกต่างจากการนำไฟฟ้า จึงมีความเป็นไปได้ว่ากระบวนการคาโทดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากคาร์โทดโดยสนามไฟฟ้ามากกว่าที่จะเป็นการปล่อยอิเล็กตรอนจากคาร์โทดด้วยความร้อน การเกิดเบรกดาวน์จึงน่าจะเกิดจากการที่ไอออนบวกและประจุบวกของอนุภาคเจือปนเคลื่อนที่มาสู่คาโทด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในบริเวณใกล้ผิวคาโทดเพิ่มสูงขึ้นเพียงพอที่อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวคาโทดได้ อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาเหล่านี้จะได้รับ พลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด ทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยมี ทิศทางไปสู่ขั้วอาโนด ระหว่างทางจะชนกับโมเลกุลของเหลวทำให้พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าสูญเสียไปกับการชน ในกระบวนการนี้จะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่สูญเสียพลังงานไปกับการชนต่ำกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า ถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและก่ออวาลานซ์ได้ และสามารถที่จะมีโอกาสทำให้เกิดเบรกดาวน์

สภาวะที่อิเล็กตรอนสามารถก่ออวาลานซ์เป็นไปตามความสัมพันธ์ที่ว่า พลังงานของอิเล็กตรอน ที่ได้รับในระยะอิสระ(mean free path) จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลฉนวนเหลว

$$eE\lambda \geq ch\nu$$

โดยที่

E =สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด

λ = ระยะอิสระของอิเล็กตรอน

$h\nu$ =ควอนตัมของพลังงานที่สูญเสียในการไอออไนซ์โมเลกุล

c =ค่าคงตัว(arbitrary constant)

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่คำนวณโดยใช้ทฤษฎีนี้มีแนวโน้มเดียวกับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ แต่สำหรับการคำนวณเวลาล่าช้าในการรวมตัว(formative time lag) ยังมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองอยู่มาก

2.4.2 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวเชิงการค้า

โดยทั่วไปฉนวนเหลวเชิงการค้าที่นำมาใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ไม่สามารถที่จะทำให้มีความบริสุทธิ์สูงได้เหมือนฉนวนเหลวบริสุทธิ์ กลไกการเกิดเบรกดาวน์จึงขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลว ตัวอย่างเช่น ความชื้น อนุภาคตัวนำ ก๊าซ และไฟเบอร์ เป็นต้น สามารถจำแนกได้ดังนี้

2.4.2.1. กลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง(suspended particles)

2.4.2.2. กลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากฟองก๊าซ

2.4.2.3 กลไกการเกิดเบรกดาวน์จากหยดของเหลวเจือปน

2.4.2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวน์จากความร้อน

2.4.2.5 กลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง (stressed oil volume)

2.4.2.6 กลไกการเกิดเบรกดาวน์จากปรากฏการณ์EHD (Electrohydrodynamic)

2.4.2.1 กลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง[15]

สิ่งเจือปนของแข็งที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลว อาจเป็นอนุภาคตัวนำ ไฟเบอร์ หรือฝุ่นละอองเมื่อมีสนามไฟฟ้าอนุภาคเหล่านี้จะเกิดขั้วจากการเหนี่ยวนำภายใต้สนามไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงกระทำบนอนุภาค กรณีอนุภาคเป็นทรงกลม แรงมีค่าเท่ากับ

$$F_e = r^3 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} E\nabla E \quad (2.1)$$

โดยที่

r=รัศมีของอนุภาค

ε_1 =เพอมิตติวิตี้ฉนวนเหลว

ε_2 =เพอมิตติวิตี้ของอนุภาค

E = ความเครียดสนามไฟฟ้าเมื่อละเลยผลของอนุภาคเจือปน

ถ้า $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ เช่น น้ำ เป็นต้น แรงจะมีทิศทางไปยังบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ถ้า $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ เช่น ฟองก๊าซ เป็นต้น แรงจะกระทำในทิศตรงข้าม และขนาดแรงจะเพิ่มขึ้นตามค่าเพอมิตติวิตี้ กรณี $\varepsilon_2 >> \varepsilon_1$ เช่น อนุภาคตัวนำ เป็นต้น แรงสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ 2.2

$$F_e = F_\infty = r^3 E\nabla E \quad (2.2)$$

ในกรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เช่น อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ หรือ ทรงกลม-ทรงกลมที่แกปแคบ ∇E เท่ากับศูนย์ ทำให้ไม่มีแรงกระทำต่ออนุภาคเจือปน อย่างไรก็ตามถ้า $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ผิวของอนุภาคจะมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่น จึงเกิดการเคลื่อนที่และเรียงต่อกันของอนุภาค เกิดเป็นสายโซ่เรียงตามแนวของสนามไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายโซ่อนุภาคทั้งสองข้างจะเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับรูปร่างของอนุภาค ดังตัวอย่างผลการคำนวณเมื่ออนุภาคเจือปนเป็นตัวนำรูปร่างต่างๆดังนี้[16]

1) อนุภาคทรงกลม ($\gamma = 1$) $E_1 = 3E$
2) อนุภาคทรงกลมเรียว(prolate spheroidal particle, $\gamma = 2$) $E_1 = 5.8E$
3) อนุภาคทรงกลมเรียว ($\gamma = 5$) $E_1 = 18E$

โดยที่

γ =อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนที่ยาวที่สุดต่อส่วนที่สั้นที่สุดของอนุภาค

E_1 =ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายอนุภาค

E = ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวเมื่อละเลยผลของอนุภาคเจือปน

เมื่อ $E_1 \geq$ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทนได้ของฉนวนเหลวหรือความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนบริเวณนั้น เกิดฟองก๊าซและอาจนำมาสู่การเกิดเบรกดาวน์

2.4.2.2 กลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากฟองก๊าซ

โดยทั่วไปก๊าซสามารถละลายในฉนวนเหลวได้ในปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาวะความดันและอุณหภูมิขณะนั้น เนื่องจากก๊าซที่ละลายจะมีปริมาณไม่เกินสภาวะอิ่มตัวดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.3.6 ฟองก๊าซจึงไม่เกิดจากการละลายของก๊าซ แต่เกิดจากสาเหตุต่อไปนี้[17]

1) ก๊าซจับอยู่ที่ผิวอิเล็กโตรด
2) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดัน
3) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของโมเลกุลฉนวนเหลวเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอน
4) การกลายเป็นไอของฉนวนเหลว จากผลของโคโรนาบริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากสาเหตุที่กล่าวมา ถ้ามีรูปร่างเป็นทรงกลมสามารถคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฟองกาซได้จากความสัมพันธ์

$$E_b = \frac{3E}{\varepsilon_1 + 1} \tag{2.3}$$

โดยที่

E =ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลว(kV/cm.)

E_b =ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวก๊าซ(kV/cm.)

ε_1 =เพอมิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเหลว

ถ้าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฟองก๊าซสูงเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ก๊าซเกิดไอออไนเซชั่น ทำให้เกิดดิสชาร์จ เกิดปฏิกิริยาเคมีและการขยายตัวของฟองก๊าซ จากความร้อนที่เกิดขึ้นและนำมาสู่การเกิดเบรกดาวน์

นอกจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น ฟองก๊าซยังสามารถเกิดที่บริเวณที่มีความหนาแน่นกระแสสูง เช่น ปลายแหลมของอิเล็กโตรด เป็นต้น เนื่องจากบริเวณนั้นจะมีความร้อนสูง ทำให้ฉนวนเหลวกลายเป็นไอเกิดเป็นฟองก๊าซ เกิดดิสชาร์จและเบรกดาวน์ได้เช่นกัน

2.4.2.3 **กลไกการเกิดเบรกดาวน์จากหยดของเหลวเจือปน**[16]

ฉนวนเหลวที่มีหยดของเหลวต่างชนิดเจือปนอยู่ สามารถทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของหยดของเหลวเจือปน โดยมีการยืดออกตามแนวของสนามไฟฟ้า ความยาวแปรตามค่าเพอมิตติวิตี้ ยิ่งเพอมิตติวิตี้มีค่าสูงกว่าของฉนวนเหลวมากเท่าใด หยดของเหลวที่เจือปนก็จะยืดออกมากเท่านั้น ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายทั้งสองของหยดของเหลวมีค่าสูงขึ้น ถ้าค่าสูงเกินค่าวิกฤตจะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน เกิดโพรงก๊าซ และนำมาสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด

2.4.2.4 **กลไกการเกิดเบรกดาวน์จากความร้อน**[17]

กลไกนี้ใช้อธิบายการเกิดเบรกดาวน์เมื่อป้อนแรงดันชนิดพัลส์ จากการทดลองวัดพัลส์กระแสแล้วพบว่ากระแสมีค่าสูงก่อนเกิดเบรกดาวน์ โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ $1 A/cm^3$ ซึ่งเชื่อว่ามีแหล่งกำเนิดจากปลายของผิวอิเล็กโตรดขั้วลบหรือคาโทด ทำให้ฉนวนเหลวบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงและกลายเป็นไอหรือฟองก๊าซ โดยทั่วไปฟองก๊าซจะเกิดขึ้นได้เมื่อพลังงานที่ถ่ายเทให้กับฉนวนเหลวมีค่าสูงกว่า 10^7 W/cm^3 เมื่อเกิดฟองก๊าซที่มีความยาวเกินความยาววิกฤติหรือเกิดโพรงตลอดแนวอิเล็กโตรด อาจเกิดเบรกดาวน์ตามมา ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการเกิด

เบรกดาวน์ในแกปแคบ($\leq 100\mu m.$)เท่านั้น และไม่สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ลดลงเมื่อแกปกว้างขึ้น

2.4.2.5 **กลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง**[17]

เนื่องจากในฉนวนเหลวเชิงการค้ามีสิ่งเจือปนปะปนอยู่ โอกาสเกิดเบรกดาวน์จึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งของอนุภาคเจือปนถ้าพบในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ โอกาศที่จะเกิดเบรกดาวน์ก็ต่ำ เมื่อใดก็ตามที่อนุภาคเจือปนอยู่ในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โอกาสเกิดเบรกดาวน์ก็มีความเป็นไปได้สูง ถ้าสมมติว่าอนุภาคเจือปนกระจายอยู่ในฉนวนเหลวอย่างสม่ำเสมอแล้ว บริเวณที่มีความอ่อนแอที่สุดในฉนวนเหลวคือปริมาตรของน้ำมันที่อยู่ในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงคือ ปริมาตรที่อยู่ระหว่างแนวค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเท่าที่สูงที่สุดกับแนว90%ของค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ปริมาตรยิ่งมากเท่าใด โอกาสที่พบสิ่งเจือปนหรือ จุดอ่อนแอ(weak link)ยิ่งมากตามไปด้วย และมีโอกาสเกิดเบรกดาวน์ง่ายขึ้น

2.4.2.6 **กลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากปรากฏการณ์**EHD[18]

เมื่อป้อนแรงดันระหว่างอิเล็กโตรดที่มีฉนวนเหลวที่มีความบริสุทธิ์สูงหรือมีความนำไฟฟ้าต่ำเป็นตัวกลาง .จนมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าประมาณ≈100-300kV/cm ทำให้เกิดการปล่อยอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า ประจุค้างจะหลุดออกมาจากอิเล็กโตรด และได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าตาม กฎของคูลอมบ์ ทำให้ฉนวนเหลวเกิดการเคลื่อนที่แบบไหลวน และมีทิศทางไปยังอิเล็กโตรด ตรงข้าม

การเคลื่อนที่ของฉนวนเหลวแบบไหลวน ทำให้เกิดฟองก๊าซตามทฤษฏีที่ได้มีการสันนิษฐานไว้ 2 ทฤษฏี ทฤษฏีแรกอธิบายว่าการเคลื่อนที่ของฉนวนเหลวที่มีประจุมีความรุนแรงเพียงพอที่จะทำให้ความดันบริเวณนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง อีกทฤษฏีคือการที่ประจุฉีดออกจากอิเล็กโตรดอย่างรวดเร็วและรุนแรง(burst) ทำให้ฉนวนเหลวที่สัมผัสกับผิวอิเล็กโตรดได้รับประจุที่ฉีดออกมาและได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าจึงเคลื่อนตัวออกจากผิวอิเล็กโตรดอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นที่ผิวอิเล็กโตรด

การเกิดปรากฏการณ์ EHD ไม่ได้เกิดขึ้นในทันทีที่มีแรงดันสูงแต่ต้องใช้เวลาในระดับมิลลิวินาที ดังนั้นการเบรกดาวน์เนื่องจากปรากฏการณ์นี้จึงมีโอกาสเกิดได้เฉพาะการป้อนแรงดันกระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งที่มีช่วงเวลายาวพอเท่านั้น

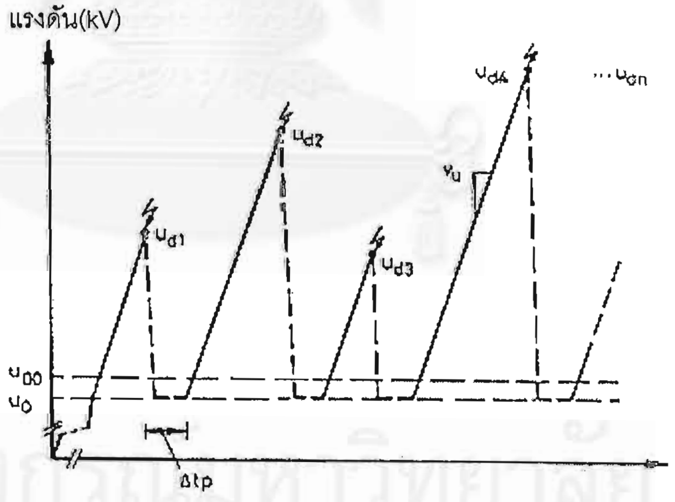
บทที่ 3
สถิติที่ใช้ในการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงวิธีการป้อนแรงดันที่เหมาะสมในการทดลองเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง การเลือกพารามิเตอร์สำหรับการทดลองและรวบรวมข้อมูล เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาลักษณะสมบัติทางสถิติ การตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้ทำการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ และวิธีการเลือกการกระจายทางทฤษฎีที่เหมาะสมกับการกระจายของข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง

3.1 การทดลองแรงดันเบรกดาวน์[19]

3.1.1 การทดลองแรงดันเพิ่ม(Rising voltage test)

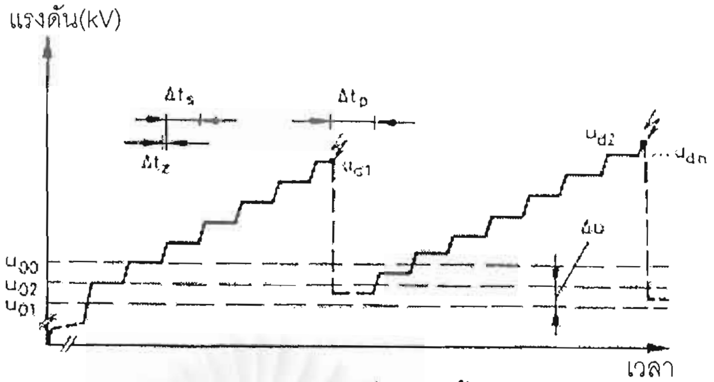
การทดลองแรงดันเพิ่มสามารถใช้ได้กับการป้อนแรงดันทุกรูปคลื่นแรงดัน กรณีแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับสามารถป้อนแรงดันได้ 2 วิธี ดังรูปที่ 3.1 วิธีแรกเป็นการป้อนแบบต่อเนื่องโดยมีอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ วิธีที่สองทำการป้อนแรงดันแบบขั้น แต่ละขั้นมีขนาดต่างกัน Δu และคงค่าแรงดันไว้เป็นเวลา Δt_s ซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละการทดลอง



(ก) แรงดันเพิ่มแบบต่อเนื่อง

รูปที่ 3.1 การทดลองแรงดันเพิ่ม กรณีแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับ

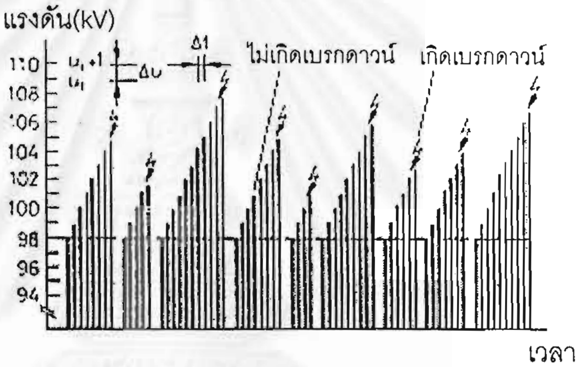
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข) แรงดันเพิ่มแบบขั้น

รูปที่ 3.1 การทดลองแรงดันเพิ่ม กรณีแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับ(ต่อ)

ส่วนแรงดันอิมพัลส์ ลักษณะการป้อนแรงดันแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การทดลองแรงดันเพิ่ม กรณีแรงดันอิมพัลส์

เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แทนลักษณะสมบัติของอุปกรณ์หรือวัสดุที่ต้องการและสามารถนำไปใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบต่อไปได้อย่างถูกต้อง พารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ต้องทำการควบคุมให้เหมือนกันในการทดลองแต่ละครั้งและมีค่าที่เหมาะสม ที่กล่าวถึงโดยทั่วไป เช่น แรงดันที่ใช้ทดลอง สภาวะที่ทำการทดลอง และอุปกรณ์วัดแรงดัน เป็นต้น สำหรับพารามิเตอร์ของการทดลองแรงดันเพิ่มก็ต้องกำหนดเช่นเดียวกัน ประกอบด้วย

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

- แรงดันเริ่มต้น(u_0) จะเริ่มต้นจากศูนย์หรือมากกว่าก็ได้ โดยทั่วไปกำหนดจากค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำสุด(u_{dmin})ที่พบจากการทดลองในเบื้องต้น ตามความสัมพันธ์ $u_{dmin}>1.1u_0$ หรือ u_0 ควรต่ำกว่า u_{dmin} อย่างน้อย 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นก่อนทำการทดลองจริงจึงควรทำการทดลองคร่าวๆเพื่อให้สามารถกำหนด u_0 ได้อย่างเหมาะสม และต้องคำนึงถึงแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นป้อนแรงดันด้วย

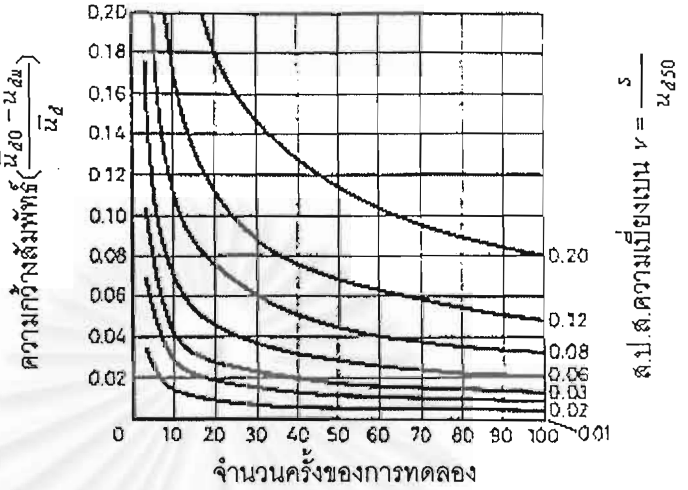
- แรงดันเพิ่มแต่ละขั้น(Δu) ค่าต่ำสุดขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ป้อนแรงดันกระแสสลับ ส่วนค่าสูงสุดไม่ควรมีค่ามากกว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(s)ของแรงดันเบรกดาวน์ของวัสดุทดสอบ โดยทั่วไปนิยมกำหนดไว้ที่ประมาณ 0.5 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ช่วงเวลาคงแรงดันแต่ละขั้น(Δt_s) ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลองเช่น การทดสอบความคงทนอยู่ได้ของวัสดุทดสอบ เวลาในการทดสอบเท่ากับ 1 นาที เป็นต้น และต้องคำนึงถึงเวลาเพิ่มแรงดันแต่ละขั้น Δt_zควรสั้นกว่าΔt_sมากๆ($\Delta t_z << \Delta t_s$)

- อัตราการเพิ่มแรงดัน(v_u) กำหนดจากวัตถุประสงค์การทดลอง เช่น การทดลองเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC 156-1963 กำหนดอัตราการเพิ่มแรงดันเท่ากับ 2 kV/s เป็นต้น โดยทั่วไปการเพิ่มแรงดันโดยใช้ actuator มักจะมีอัตราการเพิ่มแรงดันไม่เป็นเชิงเส้น โดยเฉพาะกรณีที่ใช้วิธีการเลื่อนหรือหมุนเปลี่ยนจำนวนขดลวดของหม้อแปลง ก่อนการทดลองจริงจึงควรทำการวัดแรงดันกับเวลาที่เพิ่มขึ้นที่แท้จริงก่อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตรา-การเพิ่มแรงดันอาจมีผลกระทบต่อการเกิดเบรกดาวน์ และควรทดลองเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ ที่อัตราการเพิ่มแรงดันค่าต่างๆ เพื่อให้แน่ใจว่าอัตราการเพิ่มแรงดันของเครื่องกำเนิดแรงดันสามารถนำมาใช้หาลักษณะสมบัติของวัสดุทดสอบได้อย่างถูกต้อง

- จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง(n) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเที่ยงตรงของผลการทดลองที่ต้องการ กล่าวคือจำนวนครั้งที่ทำการทดลองยิ่งมาก ผลการทดลองก็จะมีความเที่ยงตรงสูง จึงนิยมกำหนดจากความเที่ยงตรงที่ต้องการ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

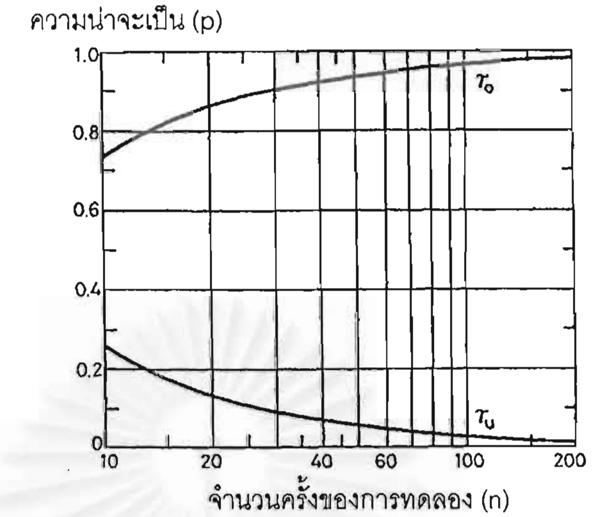
1)จากความกว้างสัมพัทธ์ของช่วงความเชื่อมั่นสำหรับค่าเฉลี่ย(the relative width of the confidence region for the mean value) โดยมีการคิดคำนึงถึงค่าส.ป.ส.ความเบี่ยงเบน .(variation coefficient)ของข้อมูลด้วย ดังรูปที่ 3.3



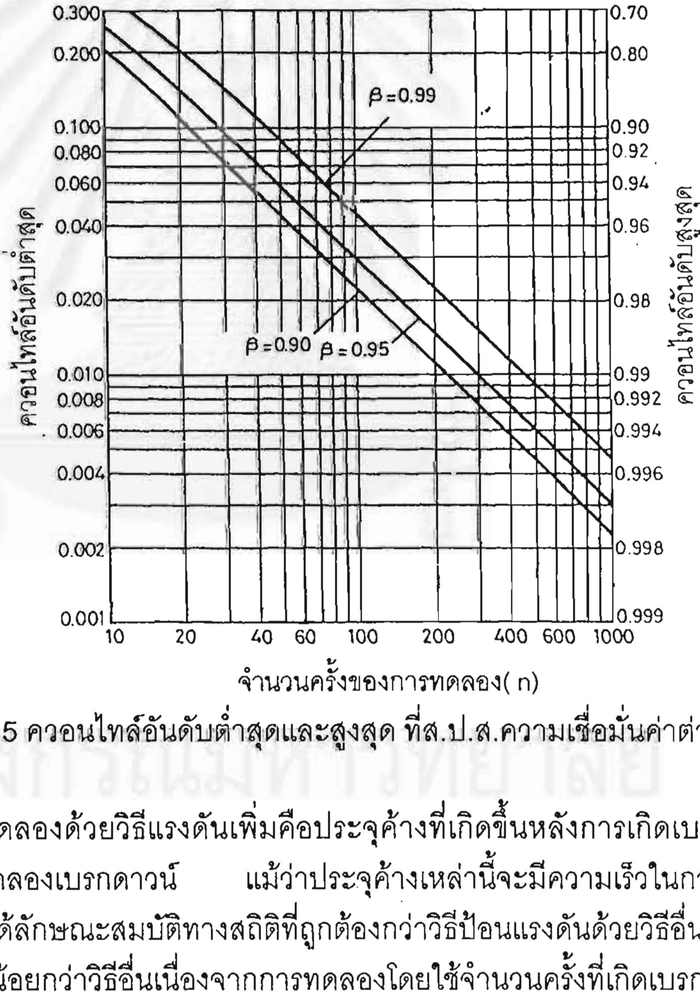
รูปที่ 3.3 ความกว้างสัมพัทธ์ของช่วงความเชื่อมั่นสำหรับค่าเฉลี่ย ที่ส.ป.ส.ความเบี่ยงเบนต่างๆ

โดยทั่วไปความกว้างสัมพัทธ์ของช่วงความเชื่อมั่น($\frac{\bar{u}_{d0}-\bar{u}_{du}}{\bar{u}_d}$)ที่มีค่าต่ำกว่า 0.02 ก็เพียงพอแล้วสำหรับการหาลักษณะสมบัติเชิงสถิติ แต่จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง(n)ควรจะมากกว่าหรือเท่ากับ 20 ครั้ง เพื่อความเที่ยงตรงของผลการทดลองที่ได้ จำนวนครั้งการทดลองน้อยกว่านี้ก็สามารถใช้ได้เพียงแต่ผลการทดลองที่ได้เหมาะสำหรับการคำนวณค่าเฉลี่ยเท่านั้น ไม่เพียงพอที่จะใช้หาลักษณะสมบัติเชิงสถิติ

2) กำหนดจากขอบเขตความคลาดเคลื่อนการกระจาย(distribution free tolerance limits) ดังเช่นกราฟรูปที่ 3.4 แสดงอันดับของควอนไทล์ที่เกิดขึ้นที่จำนวนครั้งการทดลองต่างๆที่ ส.ป.ส.ความเชื่อมั่น $\beta = 0.95$ ทั้งควอนไทล์อันดับต่ำสุด(lower tolerance limit τ_u)และสูงสุด (upper tolerance limit τ_0)ที่เกิดขึ้นได้จากการทดลองจำนวน n ครั้ง เช่น จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง 100 ครั้ง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำสุด(u_{dmin})จะไม่ต่ำกว่าควอนไทล์อันดับที่ 3%(u_{d03}) ที่ ส.ป.ส.ความเชื่อมั่น β=0.95 และถ้าทำการทดลอง 28 ครั้ง แรงดันเบรกดาวน์ต่ำสุด(u_{dmin}) จะอยู่ในตำแหน่งไม่ต่ำกว่าควอนไทล์อันดับที่ 10% (u_{d10}) เป็นต้น เมื่อทำการสร้างกราฟในสเกลล็อก-ล็อก จะได้ลักษณะเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 3.5 ทำให้การเลือกจำนวนครั้งการทดลองมีความสะดวกเนื่องจากกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง



รูปที่ 3.4 ควอนไทล์อันดับต่ำสุดและสูงสุด ที่ส.ป.ส.ความเชื่อมั่น $\beta = 0.95$



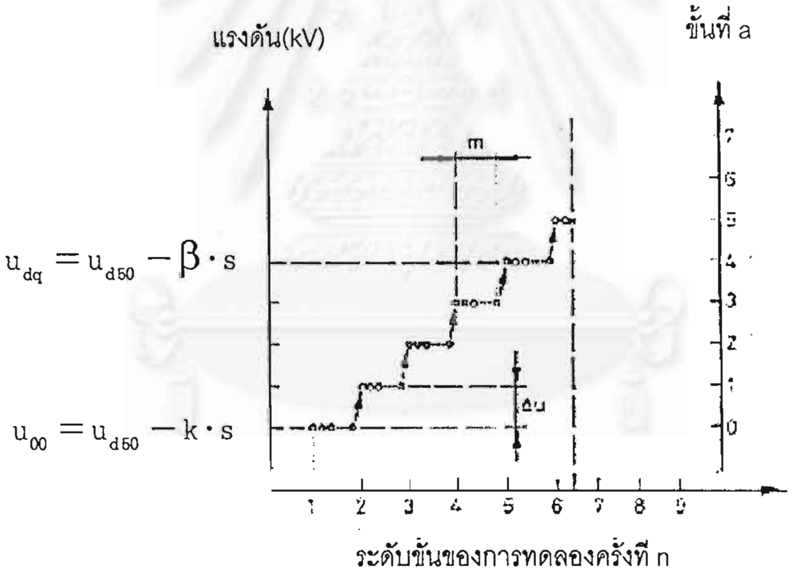
รูปที่ 3.5 ควอนไทล์อันดับต่ำสุดและสูงสุด ที่ส.ป.ส.ความเชื่อมั่นค่าต่างๆ

ข้อดีของการทดลองด้วยวิธีแรงดันเพิ่มคือประจุค้างที่เกิดขึ้นหลังการเกิดเบรกดาวน์จะไม่มีผลกระทบต่อการทดลองเบรกดาวน์ แม้ว่าประจุค้างเหล่านี้จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำในน้ำมันก็ตาม จึงได้ลักษณะสมบัติทางสถิติที่ถูกต้องกว่าวิธีป้อนแรงดันด้วยวิธีอื่น และการเสียสภาพของ น้ำมันน้อยกว่าวิธีอื่นเนื่องจากการทดลองโดยใช้จำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์น้อยครั้งก็สามารถได้ลักษณะสมบัติเชิงสถิติ

3.1.2 **การหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ควอนไทล์อันดับต่ำ**(lower order quantile)

การทดลองหาแรงดันเบรกดาวน์ที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ต่ำหรือควอนไทล์อันดับต่ำนั้น ใช้วิธีป้อนแรงดันเพิ่มโดยที่แต่ละขั้นแรงดันจะป้อนแรงดันจำนวน m ครั้ง เมื่อเกิดเบรกดาวน์ก็จะเริ่มที่แรงดันเริ่มต้น(u_0)ใหม่ ดังรูปที่ 3.6 ถ้าจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันทั้งหมดจนเกิดเบรกดาวน์เท่ากับ n ครั้ง เราจะได้ความน่าจะเป็นสะสมของการทดลองของแรงดันเบรกดาวน์ U_{dq} ซึ่งเป็นแรงดันในขั้นสูงสุดที่ไม่เกิดเบรกดาวน์จากการป้อนแรงดัน m ครั้ง ถ้า n มีจำนวนมากพอ และถ้าแรงดันเริ่มต้น u_0 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จะได้ว่าค่าคาดหวัง(Expectation)หรือค่าเฉลี่ย $E(U_{dq}) = \bar{U}_{dq}$ เป็นค่าแรงดันที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์ต่ำ

วิธีการหาแรงดันเบรกดาวน์ของวัสดุทดสอบที่ต้องการได้มีการศึกษาค้นคว้าโดยนักวิจัยหลายท่าน วิธีเหล่านี้มักมีจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์น้อยครั้งและมีจำนวนครั้งที่ทำการทดลองไม่แตกต่างกันมากนัก สามารถที่จะหาค่าแรงดันของวัสดุทดสอบที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์ต่ำถึงค่าควอนไทล์อันดับที่ 10% ($q \le 0.1$) เช่น การหาค่าแรงดันคงทนอยู่ได้เชิงสถิติ (statistical withstand voltages) เป็นต้น นอกจากนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้หาค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์สูงถึงควอนไทล์อันดับที่ 90% ($q \ge 0.9$) เช่น การหาแรงดันที่แกปทรงกลมเกิดเบรกดาวน์เชิงสถิติ เป็นต้น



รูปที่ 3.6 ลักษณะการป้อนแรงดันเพื่อหาแรงดันเบรกดาวน์ที่ควอนไทล์อันดับต่ำ

ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนที่สุด คือ การคำนวณหาแรงดันเริ่มต้น(u_0) ที่เป็นพารามิเตอร์การทดลองแรงดันเพิ่ม

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

เมื่อป้อนแรงดันจำนวน m>1 ครั้ง ที่แรงดันขั้นต่างๆ (m=1 จะใช้สำหรับการประมาณหา u_{d50} และ s เมื่อ k>0) แรงดันคงทนอยู่ได้เชิงสถิติจะอยู่ที่แรงดันขั้นสูงสุด ที่ยังไม่เกิดเบรกดาวน์ในการป้อนแรงดัน m ครั้ง คำนวณได้จากความสัมพันธ์

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

สามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

กำหนดให้จำนวนขั้นแรงดันที่ป้อนแรงดันจนเกิดเบรกดาวน์ครั้งแรกเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม(random variable)แทนด้วยA แรงดันคงทนอยู่ได้จะมีค่าเท่ากับ

$$U_{dq} = u_{00} + (A-1)\Delta u \tag{3.3}$$

มีค่าคาดหวังเท่ากับ

$$E(U_{dq}) = u_{00} - \Delta u + \Delta u E(A) = \bar{u}_{dq} \tag{3.4}$$

ความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์ขึ้นครั้งแรกที่ระดับขั้น a เท่ากับ

$$P(A=a) = [1-(1-V(a)^m]\prod_{i=0}^{a-1}(1-V(i))^m \tag{3.5}$$

โดย $V(a)$ และ V(i) คือความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์ที่ระดับขั้นแรงดันต่างๆ มีค่าคาดหวังเท่ากับ

$$E(A) = \sum_{a=1}^{\infty} a[1-(1-V(a)^m]\prod_{i=0}^{a-1}(1-V(i))^m \tag{3.6}$$

จากสมการ (3.1) (3.4) และ(3.6) จะได้ค่าคาดหวังของแรงดันคงทนอยู่ได้เชิงสถิติเท่ากับ

$$E(U_{dq}) = \bar{u}_{dq} = u_{d50} - s\left\{ k + \frac{\Delta u}{s} - \frac{\Delta u}{s}\sum_{a=1}^{\infty} a[1-(1-V(a))^m] * \prod_{i=0}^{a-1}(1-V(i))^m \right\} = u_{d50} - \bar{\beta} s \tag{3.7}$$

สังเกตว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับการคำนวณค่าแรงดันเริ่มต้น u_{00} (สมการ(3.1))

ความแปรปรวนของระดับขั้นที่เกิดเบรกดาวน์ครั้งแรก(A)เท่ากับ

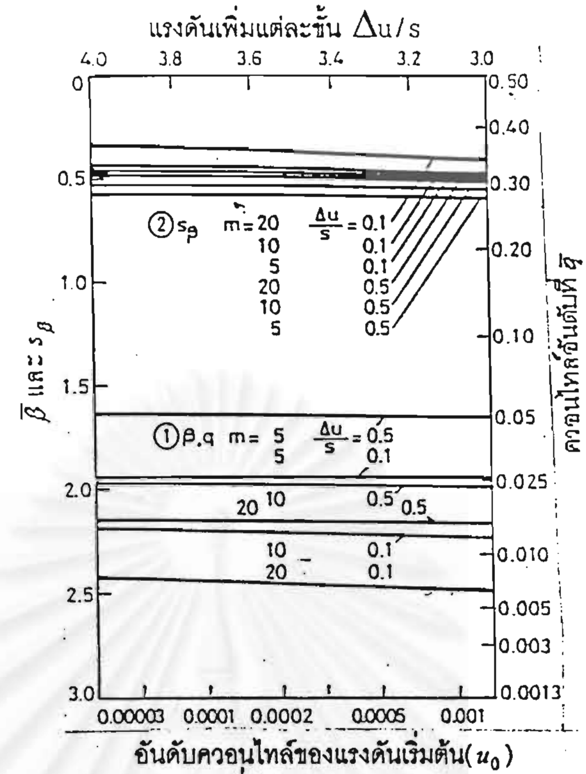
$$D^2(A) = E(A^2) - [E(A)]^2 \tag{3.8}$$

และความแปรปรวนของแรงดันคงทนอยู่ได้(U_{dq}) เท่ากับ

$$D^2(U_{dq}) = (\Delta u)^2 \left\{ \sum_{a=1}^{\infty} a^2[1-(1-V(a))^m]\prod_{i=0}^{a-1}(1-V(i))^m - \left[\sum_{a-1}^{\infty} a[1-(1-V(a))^m]\prod_{i=0}^{a-1}(1-V(i))^m \right]^2 \right\} \tag{3.9}$$

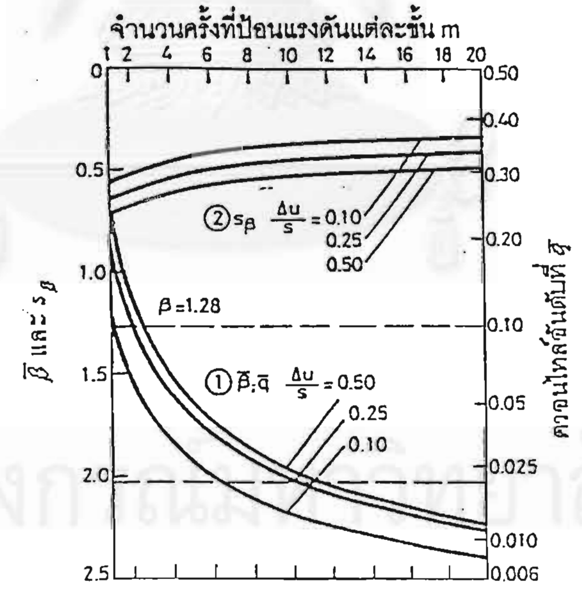
เพื่อที่จะทำการเลือกพารามิเตอร์การทดลองได้อย่างเหมาะสมจำเป็นต้องทราบผลกระทบของพารามิเตอร์การทดลองที่ประกอบด้วย แรงดันเริ่มต้น(u_{00}) จำนวนครั้งของการป้อนแรงดันแต่ละขั้น(m) และแรงดันเพิ่มแต่ละขั้น Δu ด้วยการวิเคราะห์ค่า $\bar{\beta}$ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ β ซึ่งแทนด้วย s_β ที่พารามิเตอร์มีค่าต่างๆ ถ้าเราตั้งสมมติฐานว่า $V(u_d)$ และ V(a) มีการกระจายแบบปกติ จะได้ผลดังนี้

-u_0 ถ้าป้อนแรงดันเริ่มต้น $u_0 < u_{d50} - 3s$ จะมีผลกระทบน้อยมาก ต่อแฟกเตอร์ $\bar{\beta}$ และ s_β ของแรงดันคงทนอยู่ได้ทางสถิติดังรูปที่ 3.7



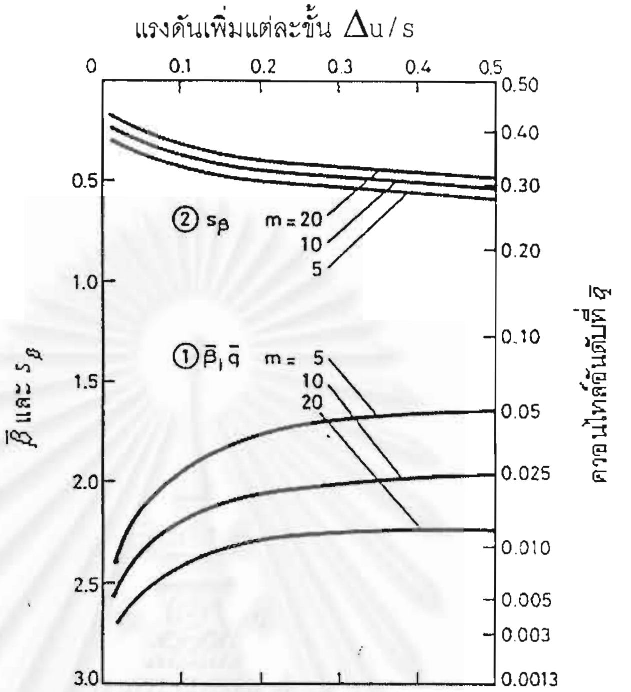
รูปที่ 3.7 ผลกระทบของ u_0 ที่มีต่อ $\bar{\beta}$ s_β และอันดับควอนไทล์ของ u_{dq}

-m จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันแต่ละขั้น จะมีผลกระทบต่อ $\bar{\beta}$ มาก ส่วน s_β เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และสังเกตว่า m ยิ่งมาก อันดับควอนไทล์ที่ได้ก็จะยิ่งมีค่าต่ำ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ผลกระทบของ m ที่มีต่ออันดับควอนไทล์ของ u_{dq} β และ s_β

- Δu มีผลทำให้ s_β มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดแรงดันเพิ่มแต่ละขั้น และค่า Δu ยิ่งต่ำ ค่าแรงดันที่ได้ก็จะอยู่ในตำแหน่งอันดับควอนไทล์ต่ำ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ผลกระทบของ Δu ที่มีต่ออันดับควอนไทล์ของ u_{dq} $\bar{\beta}$ และ s_{β}

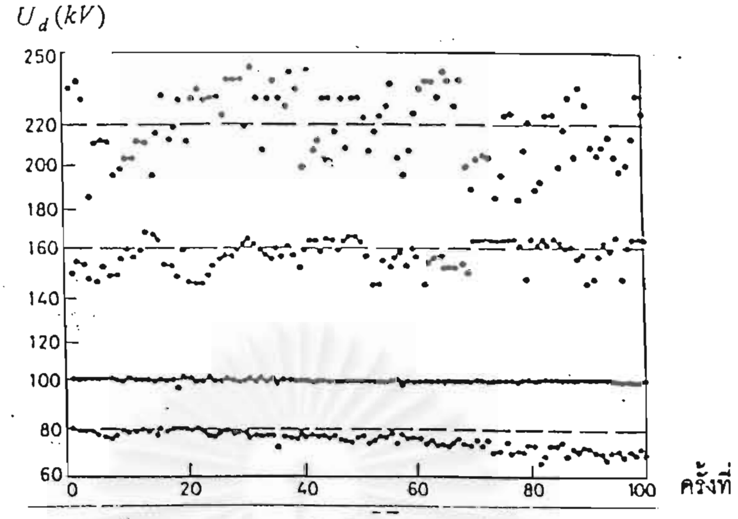
3.2 **การทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน**[19]

ความเป็นอิสระต่อกันของค่าแรงดันเบรกดาวน์ขึ้นอยู่กับฉนวนที่ใช้ทำการทดลองมีการคืนตัวเป็นฉนวนอีกครั้งหลังเกิดเบรกดาวน์อย่างไร วิธีการทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน มีอยู่ 2 วิธี คือ

3.2.1 การสร้างกราฟเปรียบเทียบ

3.2.2 การคำนวณด้วยการทดสอบสมมติฐาน

3.2.1. **การสร้างกราฟเปรียบเทียบ** โดยการสร้างกราฟแรงดันที่ได้จากการทดลองทุกค่าและเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของข้อมูล ถ้าแต่ละกลุ่มของข้อมูลการทดลองมีการกระจายตัวรอบค่าเฉลี่ยแบบสุ่มก็เพียงพอที่จะสมมติได้ว่า ข้อมูลการทดลองแต่ละค่าเป็นอิสระต่อกัน ในทางกลับกัน ถ้าแรงดันเบรกดาวน์มีแนวโน้มสูงขึ้น ต่ำลง หรือ มีการเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นรายคาบ ข้อมูลการทดลองที่ได้จะไม่เป็นอิสระต่อกันและไม่สามารถนำมาใช้หาการกระจายทางสถิติได้ ดังเช่นลักษณะในรูปที่3.10



รูปที่ 3.10 การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันด้วยการวาดกราฟเปรียบเทียบ

3.2.2. การคำนวณด้วยการทดสอบสมมติฐาน

ในที่นี้กล่าวถึงการทดสอบการเกิดซ้ำ(iteration test) จากค่าแรงดันที่ได้จากการทดลอง กลุ่มของข้อมูลที่เป็นเหตุการณ์ชนิดหรือลักษณะเดียวกัน เราเรียกว่า การเกิดซ้ำ เช่น กลุ่มข้อมูลของแรงดันที่มีการเกิดเบรกดาวน์หรือไม่เกิดเบรกดาวน์ หรือกลุ่มข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์ที่มีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ย เป็นต้น จำนวนครั้งของการเกิดเหตุการณ์ลักษณะเดียวกันหรือการเกิดซ้ำจะเป็นตัวแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าของข้อมูล จึงสามารถใช้จำนวนการเกิดซ้ำเป็นตัวทดสอบว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันหรือเกิดขึ้นแบบสุ่มหรือไม่

สมมติฐาน: ข้อมูลการทดลองแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน

ตัวทดสอบ: $$z^{*} = \frac{r - \frac{2(n-k)k}{n}}{\frac{2(n-k)k}{n\sqrt{n}}} \qquad (3.10)$$

โดยที่ n = จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง

k = จำนวนของเหตุการณ์ที่พิจารณา

r = จำนวนของการเกิดซ้ำ

ค่าวิกฤติ: ค่าวิกฤติ λ_q ได้จากการกระจายปกติ ดังตารางที่ 2.1ที่อันดับของควอนไทล์ $q = 1 - \frac{\alpha}{2}$ (การทดสอบ 2 ด้าน ที่ระดับความสำคัญ α)

การตัดสิน: สมมติฐานไม่เป็นจริง ถ้า $|z^{*}| > \lambda_q$

ตารางที่ 3.1 ควอนไทล์ λ_q ของการกระจายแบบปกติ

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 การหาฟังก์ชันการกระจายข้อมูล[19]

หลังจากที่ข้อมูลผ่านการทดสอบความเป็นอิสระต่อกันตามวิธีในหัวข้อ 3.2 แล้ว ขั้นตอนต่อมาจะเป็นการนำข้อมูลมาพล็อตหาลักษณะการกระจายเชิงสถิติในรูปของความน่าจะเป็นสะสม มี 2 ขั้นตอนคือ

3.3.1 การสร้างตารางแจกแจงปฐมภูมิ

3.3.2 การสร้างกราฟการกระจายข้อมูล

3.3.1 การสร้างตารางแจกแจงปฐมภูมิ

นำข้อมูลการทดลองที่ได้มาเรียงลำดับจากค่าน้อยไปมาก ทำการคำนวณความถี่สัมพัทธ์หรือความน่าจะเป็นสัมพัทธ์(h_k) จากความถี่ของค่าข้อมูล(h_{mk})ตามความสัมพันธ์

$$h_k = \frac{h_{mk}}{n+1} \qquad (3.11)$$

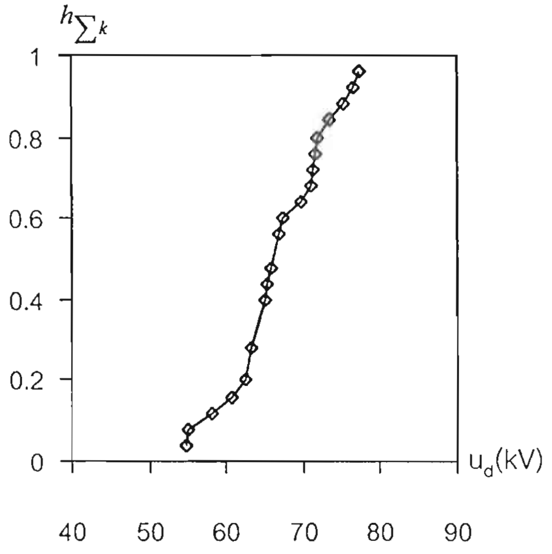
และคำนวณความถี่สะสมสัมพัทธ์($h_{\Sigma k}$)หรือความน่าจะเป็นสะสมสัมพัทธ์ ตามความสัมพันธ์

$$h_{\Sigma k} = \sum_{j=1}^{k} h_j \qquad (3.12)$$

สังเกตว่าสมการคำนวณความน่าจะเป็นสะสมสัมพัทธ์ ใช้ตัวหารเท่ากับ n+1 แทนที่จะเท่ากับจำนวนข้อมูลคือเท่ากับ n ซึ่งเหมาะสำหรับจำนวนข้อมูลน้อย ถ้าจำนวนข้อมูลมีมากกว่า 50 ค่า ก็สามารถแทน n+1 ด้วย n ได้

3.3.2 การสร้างกราฟการกระจายข้อมูล

ทำการวาดกราฟระหว่างความถี่สะสมสัมพัทธ์หรือความน่าจะเป็นสะสมกับค่าแรงดันเบรกดาวน์โดยใช้ข้อมูลจากตารางแจกแจงปฐมภูมิ เพื่อดูลักษณะการกระจายเชิงสถิติของข้อมูลการทดลอง การสร้างกราฟที่มีสเกลเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 3.11 จึงไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากยากต่อการเปรียบเทียบกับการกระจายทางทฤษฎี สำหรับการหาฟังก์ชันทางสถิติที่สามารถแทนการกระจายของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะอธิบายต่อไปในหัวข้อ 3.4



รูปที่ 3.11 กราฟความถี่สะสมกับแรงดันเบรกดาวน์

3.4 การแทนการกระจายข้อมูลด้วยการกระจายทางทฤษฎี

เพื่อให้ข้อมูลการทดลองสามารถนำมาใช้ทำการตัดสินใจด้านการออกแบบการฉนวน ควรแทนการกระจายของข้อมูลด้วยการกระจายทางทฤษฎีเพราะจะทำให้การคำนวณง่ายขึ้น การนำมาใช้จะต้องมีความเข้าใจการกระจายทางทฤษฎีและมีหลักเกณฑ์การเลือกใช้ให้เหมาะสม

3.4.1 ฟังก์ชันการกระจายทางทฤษฎี

เนื่องจากการกระจายทางทฤษฎีมีหลายแบบ เช่น การกระจายแบบปกติ การกระจาย Weibull การกระจายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล เป็นต้น ในที่นี้กล่าวเฉพาะ การกระจายแบบปกติและการกระจายWeibull เท่านั้น เนื่องจากว่าเป็นการกระจายทางทฤษฎีที่นิยมใช้โดยทั่วไปทางด้านวิศวกรรม

3.4.1.1 การกระจายแบบปกติ

รูปแบบ: ข้อมูลมีลักษณะการกระจายแบบปกติ เมื่อข้อมูลมีคุณสมบัติที่ว่าผลบวกของค่าข้อมูลจำนวนมากที่มีความเป็นอิสระต่อกันและมีการกระจายแบบสุ่ม มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่าผลบวก (central limiting value statement)

ฟังก์ชันความหนาแน่น(density function):

$$\varphi(x;\mu;\sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \qquad (3.13)$$

ฟังก์ชันการกระจาย(distribution function)

$$\Phi(x;\mu;\sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{x} e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2} dt \qquad (3.14)$$

พารามิเตอร์

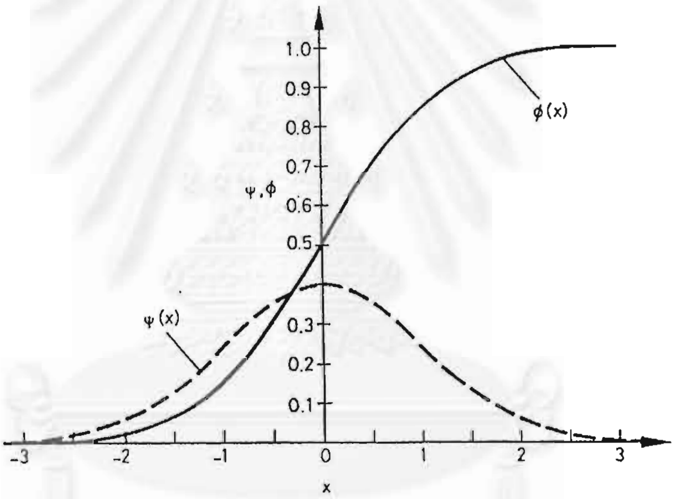
μ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูลประชากร

σ = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลประชากร

ค่ามาตรฐาน

$$z = \frac{(x-\mu)}{\sigma} \tag{3.15}$$

โดยทั่วไปฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(x;\mu;\sigma^2)$ นิยมเขียนแทนด้วย $N(\mu;\sigma^2)$ สำหรับการกระจายแบบปกติที่มีค่า $\mu=0$ และ $\sigma^2=1$ หรือ N(0;1) เรียกว่า การกระจายแบบปกติมาตรฐาน ทำให้สามารถแทนฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(x;\mu;\sigma^2)$ ด้วย $\Phi(z)$ และฟังก์ชันความหนาแน่น $\varphi(x;\mu;\sigma^2)$ ด้วย $\varphi(z)/\sigma$ ลักษณะกราฟของฟังก์ชันการกระจายและของฟังก์ชันความหนาแน่น แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ฟังก์ชันความหนาแน่น $\varphi(z)/\sigma$ และฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(z)$ เมื่อ $\mu=0$ และ $\sigma^2=1$

จะสังเกตได้ว่าการกระจายแบบปกติมาตรฐานและการกระจายแบบปกติ มีลักษณะสมมาตรรอบค่าเฉลี่ย จึงมีคุณสมบัติความสมมาตรคือ

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

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

จากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของฟังก์ชันการกระจายกับฟังก์ชันการกระจายมาตรฐาน ทำให้การคำนวณหาค่าของฟังก์ชันการกระจายมีความสะดวก เนื่องจากสามารถคำนวณโดยใช้ค่าที่คำนวณจากฟังก์ชันการกระจายมาตรฐาน N(0;1) ดังตารางที่ 3.1

3.4.1.2 **การกระจาย** Weibull

รูปแบบ: การกระจายWeibull เป็นประเภทหนึ่งของการกระจายค่าสุดขีด(ค่าสูงสุดหรือต่ำสุด) การหาฟังก์ชันการกระจายค่าสุดขีด เริ่มจากการพิจารณาเหตุการณ์จำนวน n ครั้งที่เกิดขึ้น และมีค่าของเหตุการณ์คือ X_j ที่มีลักษณะการกระจายสอดคล้องกับฟังก์ชัน $F_A(x)$ ค่าของเหตุการณ์ที่มีค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ X สามารถหาได้จากค่าของเหตุการณ์ X_j

$$X=\min(X_j)$$

ความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์ X จะไม่เกิดขึ้นเท่ากับ

$$P(X \ge x) = [1 - F_A(x)]^n$$

และความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ X เท่ากับ

$$F_n(x) = P(X < x) = 1 - [1 - F_A(x)]^n \qquad (3.18)$$

ฟังก์ชันการกระจายค่าสุดขีดสามารถได้รับจากการหาลิมิตของสมการข้างต้นเมื่อ $n \to \infty$ และขณะเดียวกันกับ $F_A(x) \to 0$

$$\lim_{\substack{n\to\infty \\ F_A(x)\to\infty}} \{1 - [1 - F_A(x)]^n\} = F(x) \qquad (3.19)$$

ฟังก์ชันการกระจาย F(x)ที่ได้แปรตามฟังก์ชัน $F_A(x)$ ซึ่งเรียกว่าฟังก์ชันเริ่มต้น อาจมีหลายฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติตามเงื่อนไขข้างต้น อย่างไรก็ตามลักษณะของฟังก์ชัน F(x) ก็สามารถที่จะแบ่งแยกได้ 3 ชนิดคือ

ชนิดที่ 1 ฟังก์ชันไม่มีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด

ชนิดที่ 2 ฟังก์ชันมีค่าสูงสุดแต่ไม่มีค่าต่ำสุด

ชนิดที่ 3 ฟังก์ชันไม่มีค่าสูงสุด แต่มีค่าต่ำสุด

ฟังก์ชันการกระจายเริ่มต้นของการกระจายWeibull สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$F_A(x) = \frac{1}{n}\left(\frac{x - x_0}{\eta}\right)^{\delta} \qquad (3.20)$$

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

ฟังก์ชันความหนาแน่น

$$f(x) = \begin{cases} \dfrac{\delta}{\eta}\left(\dfrac{x - x_0}{\eta}\right)^{\delta-1} e^{\left(-\frac{x-x_0}{\eta}\right)^{\delta}} \\ 0 \end{cases} \qquad (3.21)$$

ฟังก์ชันการกระจาย

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-(\frac{x-x_0}{\eta})^{\delta}} & x > x_0 \\ 0 & x \le x_0 \end{cases} \qquad (3.22)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

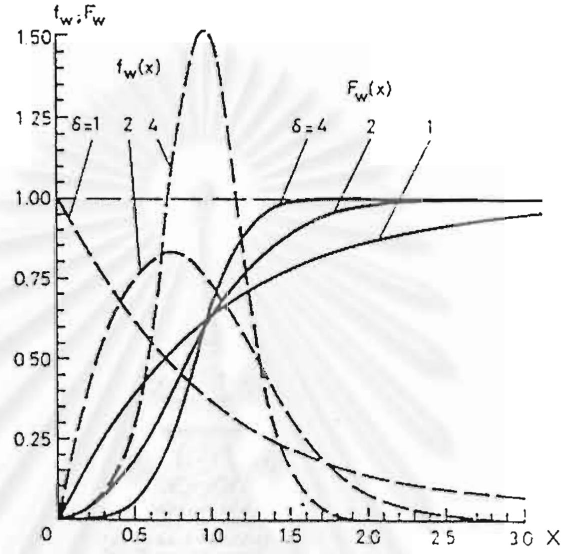
พารามิเตอร์

$\eta = x_{63} - x_0$

δ = สัมประสิทธิ์การกระจาย

x_0 = ค่าเริ่มต้น

กรณีที่ $x_0 = 0$ ฟังก์ชันการกระจายสามารถลดรูปลงพารามิเตอร์ เรียกว่า ฟังก์ชันการกระจาย Weibull แบบ 2 พารามิเตอร์ (2 parameter Weibull distribution) ลักษณะดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การกระจาย Weibull แบบ 2 พารามิเตอร์

การหาควอนไทล์อันดับใดๆของฟังก์ชันการกระจายแบบ 3 พารามิเตอร์(η, δ และ x_0)นิยมคำนวณจากฟังก์ชันการกระจายแบบ 2 พารามิเตอร์ เช่นเดียวกับการกระจายแบบปกติ จากความสัมพันธ์ $w_{q,\delta,\eta,x_0} = x_0 + \eta w_{q,\delta}$ โดยค่า $w_{q,\delta}$ คือค่าควอนไทล์ที่ควอนไทล์อันดับที่ q และมีค่าพารามิเตอร์ $\eta = 1, x_0 = 0$

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของข้อมูล

-การกระจายWeibull แบบ 2 พารามิเตอร์

เนื่องจากเรากำหนด x_0 มีค่าเท่ากับศูนย์ การประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหลือ คือ η และ δ สามารถทำได้ 2 วิธี

1) การประมาณจากค่าของข้อมูลที่ควอนไทล์อันดับต่างๆที่ทราบจากกราฟการกระจายข้อมูล โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\delta^{*} = \frac{\log(\ln\frac{1}{1-F(x_1)}) - \log(\ln\frac{1}{1-F(x_2)})}{\log\left(\frac{x_1}{x_2}\right)} \tag{3.23}$$

โดยที่ $F(x_1)$ และ $F(x_2)$ คือ ค่าของฟังก์ชันการกระจายสำหรับควอนไทล์ x_1 และ x_2

$$\eta^* = x_{63} \tag{3.24}$$

สำหรับกรณีค่าข้อมูลที่ควอนไทล์อันดับเท่ากับ 5% และ 63% จะได้

$$\delta^* = \frac{1.2898}{\log\left(\frac{x_{63}}{x_{05}}\right)} \tag{3.25}$$

2) **วิธีโมเมนต์** ทำการคำนวณโดยตรงจากข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง ดังสมการ

$$\delta^* = \frac{\pi}{\sqrt{6}s_y} M \tag{3.26}$$

$$\eta^* = e^{(\bar{y} + \frac{C}{\delta^*})} \tag{3.27}$$

โดยที่ $\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \ln(x_i - x_0)$

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\ln(x_i - x_0) - \bar{y})^2}{n-1}}$$

M = แฟกเตอร์ปรับแก้แปรตามจำนวนข้อมูล(n) ดังตารางที่ 3.6

C = ค่าคงที่ของออยเลอร์=0.577226

ตารางที่ 3.2 แฟกเตอร์ปรับแก้(M)ตามจำนวนข้อมูล(n)

n	M
5	0.738
7	0.808
10	0.863
15	0.906
20	0.928
30	0.950
40	0.961
50	0.969
60	0.974
80	0.980
100	0.984
120	0.986

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19255043

-การกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์

ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ประกอบด้วย x_0 η และ δ วิธีการคำนวณมีหลายวิธี แต่ที่มีความถูกต้องมากที่สุดคือวิธีโมเมนต์ โดยการพิจารณาค่าความลาดเอียง(skewness)ของฟังก์ชันกระจายทางทฤษฎีที่มีความสัมพันธ์กับส.ป.ส.การกระจาย(δ) ถ้าสมมติให้ความลาดเอียงของการกระจายข้อมูล(g)เท่ากับค่าความลาดเอียงทางทฤษฎี(γ_b)แล้ว เมื่อคำนวณค่าความลาดเอียงของการกระจายข้อมูล(g)ตามสมการ(3.28) เราสามารถประมาณค่า ส.ป.ส.การกระจาย(δ) ได้โดยใช้ตารางที่ 3.7 พร้อมทั้งคำนวณค่า η และ x_0 ตามสมการต่อไปนี้

$$g = \frac{\frac{n}{(n-1)(n-2)} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^3}{s^3} \qquad (3.28)$$

$$\eta^* = \frac{s}{g_b} \qquad (3.29)$$

$$x_0^* = \bar{x} - \eta^* k_b \qquad (3.30)$$

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง δ กับ γ_b k_b และ g_b

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 **วิธีการเปรียบเทียบ**

วิธีการเลือกการกระจายทางทฤษฎีที่เหมาะสมกับการกระจายข้อมูลทำได้ 2 วิธี คือ

3.4.2.1 การสร้างกราฟเปรียบเทียบ

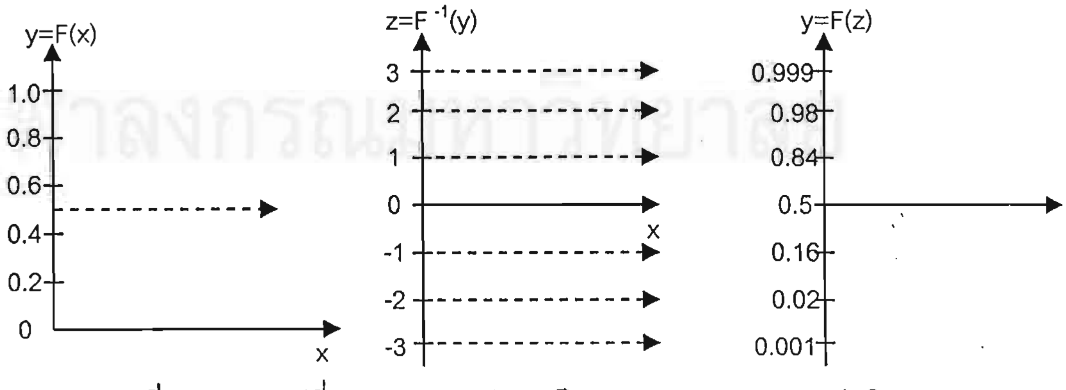
3.2.4.2 การคำนวณด้วยการทดสอบสมมติฐาน

3.4.2.1 **การสร้างกราฟเปรียบเทียบ**

ทำการสร้างกราฟความน่าจะเป็นสะสมของการกระจายข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎีที่คาดว่าสามารถนำมาใช้แทนได้ เพื่อให้ทำการเปรียบเทียบทำได้ง่ายจึงนิยมที่จะเปลี่ยนสเกลความน่าจะเป็นสะสมให้มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยการเปลี่ยนสเกลทางแกน y เป็น สเกล z โดยใช้อินเวอร์สของฟังก์ชันการกระจายทางทฤษฎีที่จะทำการเปรียบเทียบตามความสัมพันธ์ $F^{-1}(y) = z$ เพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของข้อมูลทางแกน x สัมพันธ์กับค่าทางแกน y แบบเชิงเส้น ดังนี้

- การกระจายแบบปกติ ที่มีฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(x,\mu,\sigma^2) = \dfrac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}\int_{-\infty}^{x} e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2}\,dt = \Phi(z)$ =y ดังนั้นอินเวอร์สฟังก์ชันการกระจายแบบปกติคือ $z = \dfrac{x-\mu}{\sigma} = \Phi^{-1}(y)$ ทำให้สเกลความน่าจะเป็นสะสมเปลี่ยนเป็นสเกล z และสามารถเปลี่ยนเป็นค่าความน่าจะเป็นได้ดังการแทนค่าด้านล่าง ลักษณะแกนความน่าจะเป็นสะสมแสดงดังรูปที่ 3.14

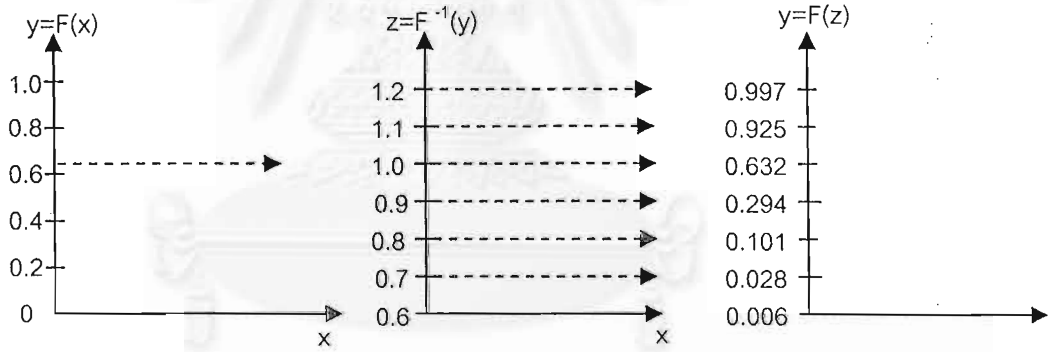
Z	$y = \Phi(z)$
-3	0.001
-2	0.023
-1	0.159
0	0.5
1	0.841
2	0.977
3	0.999



รูปที่ 3.14 การเปลี่ยนแกนความน่าจะเป็นของการกระจายแบบปกติ

- การกระจายWeibull แบบ 2 พารามิเตอร์ มีฟังก์ชันการกระจาย $\Phi(x,\eta,\delta)=\begin{cases}1-e^{\left[-(\frac{x}{\eta})^{\delta}\right]} & x>x_0\\ 0 & x\leq x_0\end{cases}$ = y ดังนั้นอินเวอร์สฟังก์ชันคือ $z=\frac{x}{\eta}=\Phi^{-1}(y)$ เมื่อ δ คงที่ ทำให้สเกลความน่าจะเป็นเปลี่ยนเป็นเสกล z และสามารถแปลงเป็นค่าความน่าจะเป็นได้ดังการแทนค่าด้านล่าง ที่ δ =10 ลักษณะแกนความน่าจะเป็นที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.15

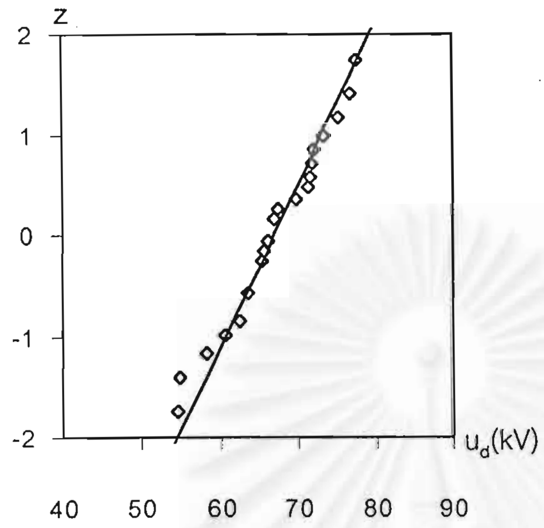
Z	$y=\Phi(z)$
0.6	0.006
0.7	0.028
0.8	0.101
0.9	0.294
1.0	0.632
1.1	0.925
1.2	0.997



รูปที่ 3.15 การเปลี่ยนแกนความน่าจะเป็นของการกระจายWeibull เมื่อ δ=10

เมื่อเปลี่ยนสเกลที่ทำให้การกระจายทางทฤษฎีมีลักษณะเป็นเส้นตรงแล้ว ทำการสร้างกราฟความน่าจะเป็นสะสมของข้อมูลที่ได้จากตารางแจกแจงความถี่สะสมสัมพัทธ์ เปรียบเทียบกับกราฟการกระจายทฤษฎีที่ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันได้มาจากการคำนวณจากข้อมูล หาผลต่างของความน่าจะเป็นสะสมที่มากที่สุด(d_{max})ที่ข้อมูลค่าเดียวกัน และดูจากลักษณะกราฟเปรียบเทียบกัน กราฟการกระจายทางทฤษฎีที่เหมาะสมจะมีค่า d_{max} ต่ำและลักษณะกราฟทางทฤษฎีกับข้อมูลใกล้เคียงกัน ตัวอย่างการสร้างกราฟเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 3.16 ที่สร้างเปรียบเทียบการกระจายข้อมูลกับการกระจายแบบปกติ การกระจายWeibull แบบ 2 พารามิเตอร์

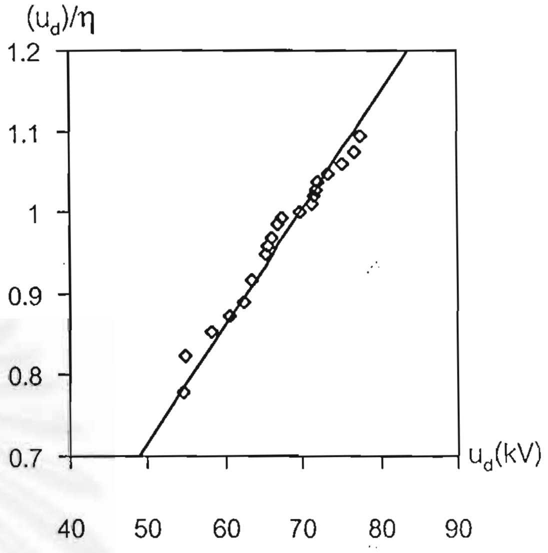
และการกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์โดยใช้ข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm แกป 5 mm ดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข.1



(ก) การกระจายแบบปกติ

($\bar{u}_d = 66.9kV$ s=6.2kV)

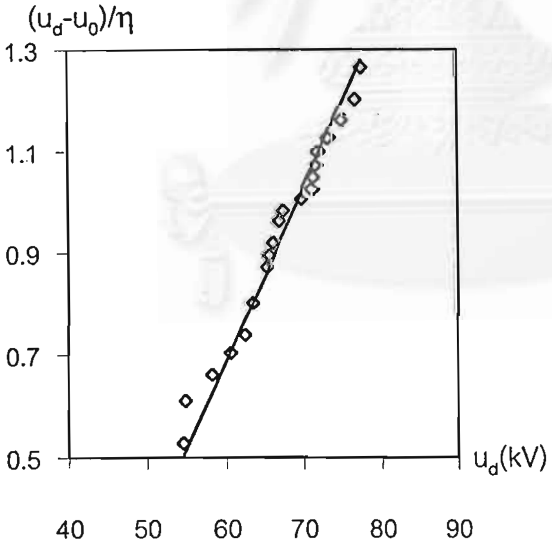
d_{max}=0.08 ที่ u_d=71.2 kV



(ข) การกระจายWeibullแบบ 2 พารามิเตอร์

u_{d0}=0kV δ=12.84 η=69.6kV

d_{max}=0.12 ที่ u_d=67.4kV



(ค) การกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์

u_{d0}=39.9kV δ=5 η=29.3kV

d_{max}=0.08 ที่ u_d=67.4kV

รูปที่ 3.16 การเปรียบเทียบการกระจายข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎี

จากกราฟสังเกตว่าการกระจายแบบปกติและการกระจายทางทฤษฎีสามารถแทนการกระจายของข้อมูลได้ดี และเมื่อพิจารณาผลต่างของความน่าจะเป็นสะสมของข้อมูลกับการกระจายทฤษฎีสูงสุด(d_{max})ทั้งสามพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระจายแบบปกติค่า d_{max}=0.08 เช่นเดียวกับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์ และต่ำกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับการกระจายWeibull แบบ 2 พารามิเตอร์เพียง 30 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการกระจายข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎีทั้ง 3 ฟังก์ชัน มีความแตกต่างกันไม่มาก การกระจายข้อมูลนี้จึงแทนด้วยการกระจายแบบปกติหรือWeibullก็ได้

3.4.2.2 การคำนวณด้วยการทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานด้วยวิธี Kolmogorov เป็นการใช้วิธีทางสถิติในการทดสอบว่าการกระจายทางทฤษฎีสามารถที่จะแทนการกระจายข้อมูลได้อย่างเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการพิจารณาผลต่างของความน่าจะเป็นของการกระจายข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎีที่มากที่สุด

สมมติฐาน: ฟังก์ชันการกระจายแบบต่อเนื่องที่ไม่รู้ลักษณะการกระจาย $F_n(x)$ ที่ได้จากการทดลองเป็นจำนวน n ครั้ง สามารถแทนได้ด้วยการกระจายทางทฤษฎี $F_0(x)$

ตัวทดสอบ: ตัวทดสอบที่ใช้คือ ผลต่างของความน่าจะเป็นที่มากที่สุดระหว่างฟังก์ชันการทดลองกับทางทฤษฎี

$$d_{\max} = \max|F_n(x) - F_0(x)| \ , \ -\infty < x < +\infty \tag{3.31}$$

ค่าวิกฤต: ค่าวิกฤต $k_{n,\alpha}$ สามารถอ่านได้จากตารางที่ 3.7 สำหรับการทดสอบแบบสองด้าน(two-side test)

เกณฑ์ตัดสิน: สมมติฐานไม่เป็นจริงเมื่อ $d_{max} > k_{n,\alpha}$

ตารางที่ 3.4 ค่าวิกฤต $k_{n,\alpha}$ ของการทดสอบKolmogorov

จำนวนครั้งทดลอง(n)	$k_{n,\alpha}$ ที่ระดับความสำคัญ		
	α=0.10	α=0.05	α=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
$\to \infty$	$\frac{1.224}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.358}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.517}{\sqrt{n}}$

3.5 การหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม

การทดลองแบบแรงดันเพิ่มมีข้อดีคือวัสดุทดสอบเกิดความเสียหายน้อย และข้อเสียคือผลการทดลองที่ได้เป็นฟังก์ชันความถี่สะสม การศึกษาลักษณะสมบัติการเบรกดาวน์ซึ่งมีการกระจายเป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์(performance function) จึงไม่สามารถทำได้โดยตรง ต้องทำการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ทฤษฎีทางสถิติ ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวน์กับฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์สามารถอธิบายได้ชัดเจนในกรณีของการเพิ่มแรงดันเป็นระดับขั้น การทดลองเริ่มป้อนแรงดันจากระดับแรงดัน u_0 จากนั้นจึงเพิ่มแรงดันขั้นต่อไปทีละ Δu สามารถคำนวณหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นได้ดังนี้

กำหนดให้

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

$V(u_0)$ คือ ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์เมื่อป้อนแรงดัน u_0

$V(u_0+\Delta u)$ คือ ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ที่แรงดัน $u_0+\Delta u$

$$a_i = V(u_0 + i\Delta u) \qquad i=0,1,2,3,\ldots$$

$$b_k = S_{\Delta u}(u_0 + k\Delta u) \qquad k=0,1,2,3,\ldots$$

ถ้าเกิดเบรกดาวน์เมื่อทำการป้อนแรงดันถึงระดับขั้นที่ 1 2 ... k ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์กับความน่าจะเป็นสะสมในการเกิดเบรกดาวน์มีค่าดังสมการ

$$b_1 = V(u_0 + \Delta u)[1 - V(u_0)]$$

$$b_2 = V(u_0 + 2\Delta u)[1 - V(u_0)][1 - V(u_0 + \Delta u)]$$

$$\vdots$$

$$b_k = V(u_0 + k\Delta u)\prod_{j=0}^{k-1}[1 - V(u_0 + j\Delta u)] \qquad (3.32)$$

สามารถดัดแปลงสมการให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$\begin{aligned} b_{k+1} &= b_k + a_{k+1}\prod_{j=0}^{k}(1-a_j) \\ &= b_k + a_{k+1}\left[1 - a_0 - \sum_{i=1}^{k} a_i \prod_{j=0}^{i-1}(1-a_j)\right] \\ &= b_k + a_{k+1}(1 - a_0 - b_k) \end{aligned}$$

ที่ $a_0 = V(u_0)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรกดาวน์ต่ำมาก จะได้ว่า

$$a_{k+1} = \frac{b_{k+1} - b_k}{1 - b_k}$$

หรือ

$$V_{u_d} = \frac{S_{\Delta u}(u_d) - S_{\Delta u}(u_d - \Delta u)}{1 - S_{\Delta u}(u_d - \Delta u)} \quad (3.33)$$

กรณีฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมมีการกระจายแบบปกติ เมื่อแทนฟังก์ชันการกระจายแบบปกติลงในสมการ 3.33 จะพบว่าการหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นทำได้ยาก ต้องใช้การคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สมมติให้ผลการการป้อนแรงดันเพิ่มแบบขั้นและการป้อนแรงดันแบบหลายระดับ (constant voltage test) เป็นการกระจายปกติ มีตัวแปรคือ U_d ,$U_{d\Delta u}$ และพารามิเตอร์คือ μ,σ^2 และ $\mu_{\Delta u},\sigma^2_{\Delta u}$ ตามลำดับ คำนวณค่ามาตรฐานโดยใช้พารามิเตอร์ μ,σ^2 ได้ดังนี้

$$X = \frac{U_d - \mu}{\sigma} \quad (3.34)$$

$$X_{\Delta x} = \frac{U_{d\Delta u} - \mu}{\sigma} \quad (3.35)$$

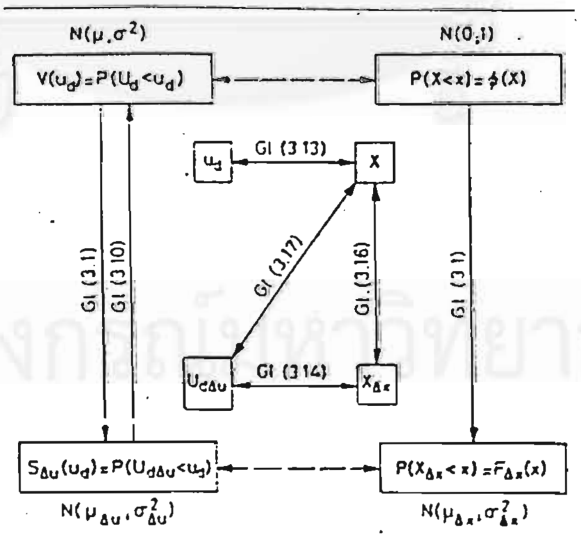
สมการข้างต้นจะแปลงฟังก์ชันความน่าจะเป็นให้เป็นการกระจายแบบปกติมาตรฐาน $\Phi(x)$ ที่มีพารามิเตอร์คือ $\mu = 0$ และ $\sigma^2 = 1$ และฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม $S_{\Delta u}(u_d)$ เป็นการกระจายแบบปกติมาตรฐาน $F_{\Delta x}(x)$ ที่มีพารามิเตอร์ $\mu_{\Delta x}$ และ $\sigma^2_{\Delta x}$ ขนาดแรงดันเพิ่มแต่ละขั้น (Δu) ก็สามารถแปลงให้อยู่ในแบบมาตรฐานได้ดังความสัมพันธ์

$$\Delta x = \frac{\Delta u}{\sigma} \quad (3.36)$$

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

$$X_{\Delta x} = \sigma_{\Delta x} X + \mu_{\Delta x} \quad (3.37)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Phi(x)$ และ $F_{\Delta x}(x)$ ตามสมการ (3.32) สามารถแสดงเป็นแผนภาพการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แผนภาพแสดงการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่าง $V(u_d)$ และ $S_{\Delta u}(u_d)$

ถ้าต้องการทราบความน่าจะเป็น $V(u_d)$ ที่ได้มาจากการคำนวณจากความน่าจะเป็นสะสม $S_{\Delta u}(u_d)$ เริ่มจากการใช้หลักการที่ว่า $\Phi(x)$ สามารถเกิดขึ้นจากการแปลงเป็นค่ามาตรฐานตามความสัมพันธ์

$$X = \frac{U_{d\Delta u} - \mu_{\Delta u}}{\sigma_{\Delta u}} \tag{3.38}$$

และจากสมการที่ 3.37 และ 3.38 จะได้

$$X_{\Delta x} = \frac{U_{d\Delta u} - \mu_{\Delta u}}{\sigma_{\Delta u}}\sigma_{\Delta x} + \mu_{\Delta x} \tag{3.39}$$

ถ้าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 3.35 และ 3.38 จะได้พารามิเตอร์ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นเท่ากับ

$$\sigma = \frac{\sigma_{\Delta u}}{\sigma_{\Delta x}} \tag{3.40}$$

$$\mu = \mu_{\Delta u} - \mu_{\Delta x}\frac{\sigma_{\Delta u}}{\sigma_{\Delta x}} \tag{3.41}$$

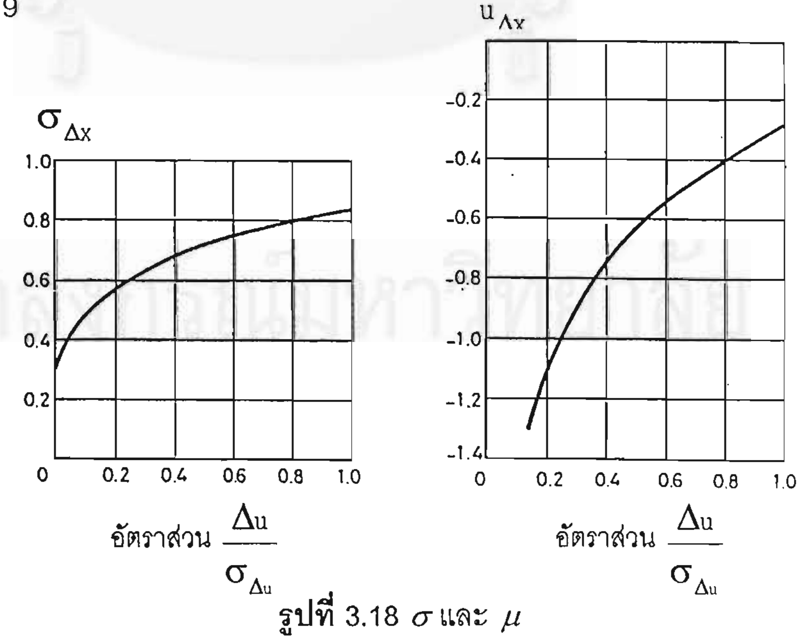
ขนาดแรงดันเพิ่มแต่ละขั้นของการกระจายแบบปกติมาตรฐาน(สมการ 3.35)คือ

$$\Delta X = \frac{\sigma_{\Delta x}}{\sigma_{\Delta u}}\Delta u \tag{3.42}$$

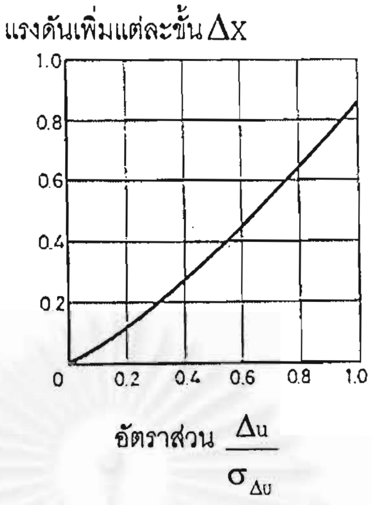
จัดรูปใหม่ได้

$$\frac{\Delta X}{\sigma_{\Delta x}} = \frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}} \tag{3.43}$$

การหาค่าพารามิเตอร์ σ และ μ ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์จำเป็นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ $\sigma_{\Delta x}$ และ $\mu_{\Delta x}$ ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมซึ่งหาได้จากการคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ $\frac{\Delta X}{\sigma_{\Delta x}} = \frac{\Delta u}{\sigma_{\Delta u}}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ส่วนขนาดแรงดันเพิ่มแต่ละขั้น แสดงในกราฟรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 σ และ μ



รูปที่ 3.19 ขนาดแรงดันเพิ่มแต่ละขั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
วิธีดำเนินการทดลอง

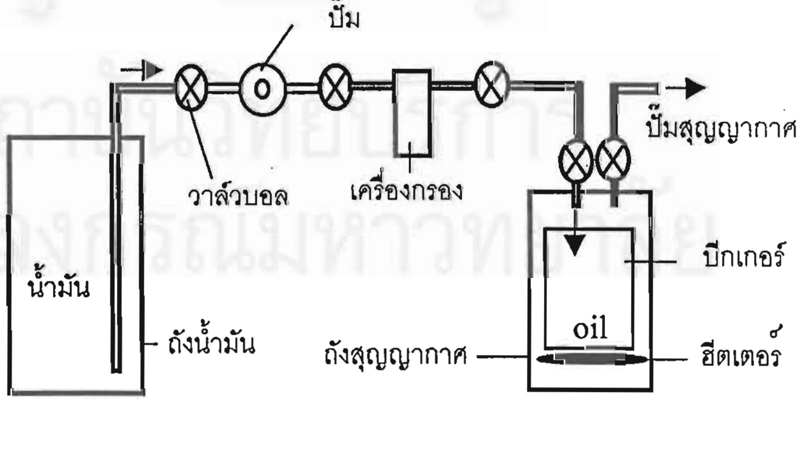
บทนี้กล่าวถึงน้ำมันหม้อแปลง อุปกรณ์เครื่องมือที่นำมาใช้ในการทดลองและวิธีการทดลอง เพื่อศึกษาผลกระทบของอิเล็กโตรด แกป และอุณหภูมิ ที่มีต่อลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง

4.1 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทดลองเป็นชนิดน้ำมันแร่ ชื่อทางการค้าว่า Sun-Ohm มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC 296:1969 โดยบรรจุอยู่ในถังน้ำมันขนาด 200 L เมื่อทำการเปิดฝาทำให้อากาศและความชื้นสามารถเข้าไปเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงทำให้คุณสมบัติของน้ำมันเปลี่ยนแปลง จึงต้องควบคุมน้ำมันที่นำมาใช้ทำการทดลองให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เพื่อให้การทดลองสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่สำคัญและสามารถควบคุมได้คืออนุภาคเจือปน ปริมาณความชื้นและปริมาณก๊าซที่ละลายในน้ำมัน ดังนั้นจึงทำการควบคุมน้ำมันที่จะนำมาทำการทดลองให้มีขนาดอนุภาคเจือปนเล็กกว่า 1 μm และปริมาณความชื้นประมาณ 30 ppm โดยใช้เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น รายละเอียดดังหัวข้อถัดไป

4.2 เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น

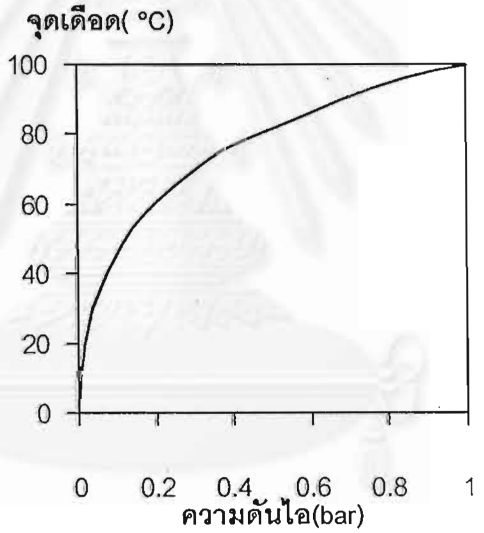
เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น มีลักษณะดังรูปที่ 4.1 มีหลักการทำงาน 2 ขั้นตอน คือ



รูปที่ 4.1 เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น

ขั้นตอนที่ 1 การควบคุมอนุภาคเจือปนด้วยการปั๊มน้ำมันที่บรรจุอยู่ในถังน้ำมันขนาด 200 L ผ่านเครื่องกรองCUNOแบบคาร์ทริด ไส้กรอง MICRO-KLEAN III เกรด Y ผลิตจากเส้นใยเซลลูโลสผสมกับเรซินเมลามีน(melamine) ขนาด 1 μm ลงสู่บีกเกอร์บรรจุน้ำมันขนาด 5 L ที่วางอยู่ในถังสุญญากาศ

ขั้นตอนที่ 2 การควบคุมปริมาณความชื้น โดยให้ความร้อนจากเตาไฟฟ้าที่วางอยู่ใต้ก้นบีกเกอร์ จนน้ำมันมีอุณหภูมิ 70-75 °C พร้อมกับลดความดันในถังให้ต่ำกว่า 0.03 bar สภาวะนี้น้ำจะกลายเป็นไอตามความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดของน้ำกับความดันไอดังรูปที่ 4.2 และแยกตัวออกจากน้ำมัน ในที่นี้ใช้เวลาประมาณ $\frac{1}{2}$ ชั่วโมง ในการให้ความร้อนแก่น้ำมันจากอุณหภูมิห้องประมาณ 30 °C จนมีอุณหภูมิ 70-80 °C และควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ 70-75°C คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยการปรับแรงดันที่ป้อนให้กับเตาไฟฟ้าให้พอเหมาะ แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงโดยรักษาความดันในถังไว้ที่ต่ำกว่า 0.03 bar จนกว่าจะนำไปใช้ทำการทดลอง



รูปที่ 4.2 จุดเดือดกับความดันไอของน้ำ[11]

เพื่อให้มั่นใจว่าเครื่องควบคุมนี้สามารถควบคุมคุณภาพน้ำมันได้ใกล้เคียงกันจึงทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วิธีตามมาตรฐาน IEC 156:1963 พบว่าแรงดันเบรกดาวน์ >55kV เปรียบเทียบกับผลการทดลองในอดีตที่ศึกษาผลกระทบของปริมาณความชื้นที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง ที่ทำการทดลองตามมาตรฐาน VDE 0370 ที่ปริมาณความชื้น 30 ppm ได้แรงดันเบรกดาวน์เท่ากับ 57.9 kV แตกต่างกัน 5% [1] เราจึงสมมติฐานได้ว่า ปริมาณความชื้นในน้ำมันที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าประมาณ 30 ppm

4.3 ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.3 ได้ทำการออกแบบให้มีพิกัดแรงดันกระแสสลับ 150 kV และแรงดันอิมพัลส์ 300 kV มีส่วนประกอบคือ

(1) สายนำแรงสูง ตัวนำไฟฟ้าทำจากทองเหลืองหุ้มด้วยฉนวนเทฟลอน

(2) อิเล็กโตรดแรงสูงแบบทรงกลม ทำจากเม็ดลูกปืนชุบโครเมียม ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 5 10 และ 15 mm มีความคลาดเคลื่อน ±0.01 mm

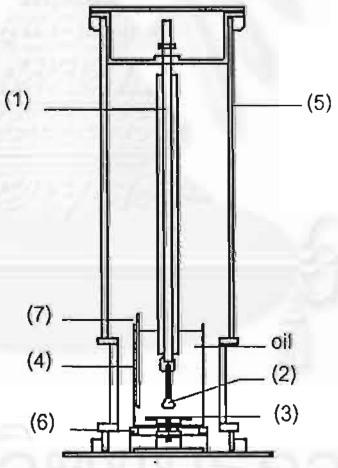
(3) อิเล็กโตรดกราวด์แบบระนาบ เป็นแผ่นวงกลมทำจากเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm

(4) บีกเกอร์บรรจุน้ำมันขนาด 5 L

(5) ถังครอบ ประกอบด้วยท่อ พี วี ซี ปลายท่อปิดด้วยฝาอลูมิเนียม สามารถดูดอากาศภายในถังจนเหลือความดัน 0.02 bar และปรับแกป(g)ในช่วง 0-20 mm ความคลาดเคลื่อน ±0.05 mm

(6) เตาไฟฟ้า วางอยู่ใต้ก้นบีกเกอร์ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำมัน

(7) เทอร์โมมิเตอร์



รูปที่ 4.3 ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

จากการใช้โปรแกรม[20]คำนวณการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสถิต(Electrostatic field) ระหว่างอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ ที่ทรงกลมรัศมี(r) ขนาด 2.5-15mm และแกป 3-15mm โดยใช้แบบจำลองตามรูปที่ 4.3 โดยกำหนดค่าเพอมิตติวิตี้สัมพัทธ์(ε_r)ของเทฟลอน น้ำมัน พีวีซี และบีกเกอร์แก้ว เท่ากับ 2.2 2.2 2.3 และ 5.0 ตามลำดับ จากนั้นคำนวณค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าตามสมการที่ 4.1

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

โดยที่

FF = แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

E_{avg} = ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย(kV/cm)

E_{max} = ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด(kV/cm)

ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.1 สังเกตว่าค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ทำการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 1.1-5.0

ตารางที่ 4.1 แสดงแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า(FF)ที่แกป(g)และอิเล็กโตรดทรงกลมรัศมี(r)ขนาดต่างๆ

r(mm)	g(mm)					
	3	5	7	9	10	15
2.5	1.9	2.5	-	-	4.0	5.0
5	1.4	1.8	2.0	2.4	-	-
10	1.2	1.4	-	-	-	-
15	1.1	1.2	-	-	-	-

4.4.วิธีการทดลองและรวบรวมข้อมูล

4.4.1 อิเล็กโตรด

ความเรียบของผิวอิเล็กโตรดมีบทบาทสำคัญต่อแรงดันเบรกดาวน์ พื้นผิวที่ขรุขระอาจจะทำให้ลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันเปลี่ยนไป จึงต้องขัดผิวอิเล็กโตรดทั้งทรงกลมและระนาบให้เรียบ ในที่นี้ใช้กระดาษทรายMIKRON P2000 ขัดผิวอิเล็กโตรดบริเวณที่เกิดเบรกดาวน์ทุกๆ จำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวน์ไม่เกิน 40 ครั้ง และ 10-15 ครั้ง จากการป้อนแรงดัน กระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ ตามลำดับ

4.4.2 การทำความสะอาดชุดทดลอง

การบรรจุน้ำมันลงในชุดทดลองจะต้องทำความสะอาดชุดทดลองในส่วนของ บีกเกอร์ อิเล็กโตรดทรงกลม อิเล็กโตรดระนาบ และสายนำแรงสูง(เฉพาะส่วนที่จุ่มอยู่ในน้ำมัน)ก่อน เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆที่อาจเกาะอยู่ ก่อนทำการทดลองครั้งแรก จะล้างทำความสะอาดทุกๆส่วนโดยใช้แปรงจุ่ม ผงซักฟอกที่ละลายในน้ำอุ่นขัดทำความสะอาด จากนั้นล้างด้วยน้ำประปา 2 ครั้ง และล้างด้วย น้ำกลั่นอีก 2 ครั้ง ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง

ก่อนบรรจุน้ำมันลงในบีกเกอร์เพื่อทดลอง จะประกอบอิเล็กโตรดระนาบเข้ากับบีกเกอร์ เทน้ำมันที่ผ่านเครื่องควบคุมขนาดประมาณ 100 mL ลงในบีกเอร์เขย่าให้น้ำมันกระจายทั่วบีกเกอร์ แล้วเทออก ทำซ้ำ 2 ครั้ง

ส่วนอิเล็กโตรดทรงกลมทำการประกอบเข้ากับสายนำแรงสูง เช็ดที่ผิวอิเล็กโตรดและสายนำแรงสูงบริเวณที่ จะจุ่มอยู่ในน้ำมันด้วยแอลกอฮอล์ 2 ครั้ง แล้วใช้หลอดฉีดยาขนาด 20 mL ภายในบรรจุน้ำมันที่ผ่านเครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้นแล้ว ฉีดล้างอิเล็กโตรดและสายนำแรงสูงให้ทั่วอีก 2 ครั้ง

4.4.3 การบรรจุน้ำมันลงชุดทดลองและการตั้งแกป

เมื่อได้ทำความสะอาดชุดทดลองดังข้อ 4.4.2 แล้ว ทำการติดตั้งบีกเกอร์ชุดทดลองลงบนฐานของชุดทดลองซึ่งด้านล่างมีตัวทำความร้อนวางอยู่ เทน้ำมันที่อยู่ในบีกเกอร์ของเครื่องควบคุมลงในบีกเกอร์ของชุดทดลองปริมาณ 4.5 L จากนั้นครอบบีกเกอร์ชุดทดลองด้วยถังครอบที่ทำจากท่อ พี วี ซี ขันน้อตยึดฝาด้านล่างกับท่อให้แน่น

ทำการปรับแกปเริ่มจากการปรับหาตำแหน่งแกปเท่ากับศูนย์ ด้วยการหมุนเกลียวที่ปลายสายนำแรงสูงที่อยู่บริเวณปากท่อ พี วี ซี และใช้มัลติมิเตอร์วัดความต้านทานระหว่างด้านกราวด์กับด้านแรงสูง ที่ตำแหน่งแกปเท่ากับศูนย์ มัลติมิเตอร์จะส่งเสียงแสดงว่าอิเล็กโตรดทรงกลมและระนาบแตะกันพอดี จากนั้นปรับแกปที่ต้องการโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์วัดระยะในแนวดิ่งจากปลายสายนำแรงสูงถึงขอบกลียวใน ความคลาดเคลื่อนของแกปไม่เกิน $\pm$ 0.1 mm จากนั้นทำการดูดอากาศในถังออกจนเหลือความดัน 0.08 bar เพื่อให้อากาศที่เกาะอยู่ตามผิวอิเล็กโตรดและที่ลดการละลายของก๊าซกับน้ำมันที่อยู่ภายในถัง ทำให้น้ำมันมีคุณภาพใกล้เคียงกับที่เพิ่งผ่านเครื่องควบคุม คงค่านี้ไว้จนกว่าจะเริ่มทำการป้อนแรงดันจึงปล่อยอากาศเข้าภายในถังให้เท่ากับสภาวะบรรยากาศ

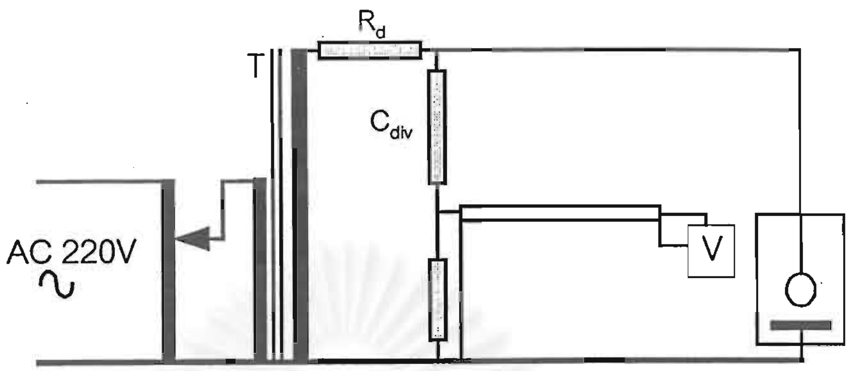
4.4.4 การควบคุมอุณหภูมิ

ใช้วาริแอกปรับขนาดแรงดันที่ตัวทำความร้อนให้เหมาะสมเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำมันในบีกเกอร์มีค่าใกล้เคียงกันและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง พร้อมกับดูดอากาศในถังออกและรักษาไว้ที่ประมาณ 0.08 bar เพื่อลดการเกิดออกซิเดชั่นและการละลายของก๊าซ เมื่อใกล้ถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ปรับลดขนาดแรงดันลงให้เหมาะสมอีกครั้งเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ได้ค่าที่ต้องการ ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเมื่อควบคุมด้วยวิธีนี้อยู่ในช่วง $\pm$ 2°C

4.4.5 การทดลองความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ

<u>วงจรทดลอง</u> เนื่องจากแรงดันกระแสสลับสูงสุดที่ทำการทดลองประมาณ 150 kV จึงใช้หม้อแปลงทดสอบ 220V/100kV 5kVA 2ตัว ต่อคาสเคด จำกัดกระแสลัดวงจรขณะเกิดเบรกดาวน์และลดการเสียสภาพของน้ำมันและความเสียหายของผิวอิเล็กโตรดด้วยความต้านทานน้ำขนาด 120 kΩ ต่อระหว่างหม้อแปลงทดสอบกับชุดทดลอง การวัดแรงดันใช้วิธีแบ่งแรงดันด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ แบบคาปาซิเตอร์พิกัดแรงดัน 200 kV โดยทำการปรับเทียบกับหม้อแปลงวัดแรงดันของบริษัท TETTEX AG ZURICH ที่มีความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดัน $\pm$0.03% ได้อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ 2495:1 วัดค่าแรงดันทางด้าน แรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

ด้วยมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลของบริษัทฟลุค ความคลาดเคลื่อน ±0.1% ลักษณะวงจรทดลองดังรูปที่ 4.5



T=หม้อแปลงทดสอบ 200 kV 10kVA R_d=120kΩ

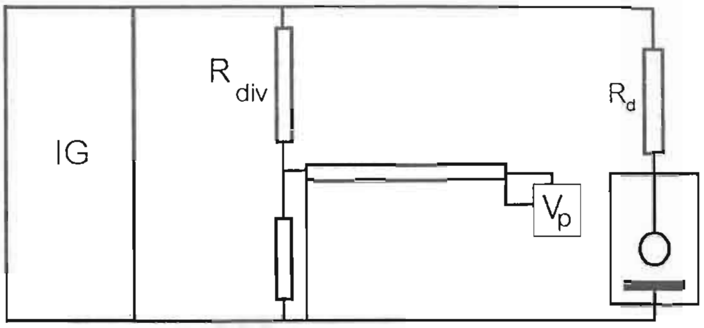
C=โวลเตจดิไวเดอร์แบบคาปาซิเตอร์ 200 kV V=มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล

รูปที่ 4.4 วงจรทดลองแรงดันกระแสสลับ

__การป้อนแรงดัน__ หลังจากเตรียมชุดทดลองตามขั้นตอนที่ 4.4.1-4.4.4 จะทำการปล่อยอากาศเข้าถังจนความดันภายในเท่ากับความดันบรรยากาศ จากนั้นจึงป้อนแรงดันกระแสสลับโดยใช้วิธีแรงดันเพิ่มแบบต่อเนื่องที่แรงดันเริ่มต้น(u_0) 0 kV อัตราการเพิ่มแรงดัน(v_u) 2 kV/s จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ ช่วงเวลาระหว่างการเกิดเบรกดาวน์แต่ละครั้ง(Δt_p)ประมาณ 1 นาที จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง(n) กรณีศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเท่ากับ 8 ครั้งเป็นอย่างต่ำ ส่วนการศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติเพื่อให้ข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้มีการกระจายตัวของความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์อยู่ในช่วง 10%-90% ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% จึงกำหนดจำนวนครั้งที่ทำการทดลอง(n) 24 ครั้ง (รูปที่ 3.5)

4.4.6 การทดลองความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

__วงจรทดลอง__ การทดลองหาลักษณะความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน (1.2/50 μs) เนื่องจากขนาดแรงดันอิมพัลส์สูงสุดที่ทำการทดลองเท่ากับ 300 kV จึงใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 14 ชั้น พิกัด 1400kV 70kJ ของบริษัท Haefely โดยปรับลดใช้เพียง 8-10 ชั้น ต่อขนานกับโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานของบริษัทHaefely พิกัดแรงดัน 600 kV อัตราส่วนแรงดัน 588.7:1 และชุดทดลองที่ต่อความต้านทานหน่วง 420 Ω อนุกรมเพื่อจำกัดกระแสขณะเกิดเบรกดาวน์ บันทึกสัญญาณด้วย ออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอลของบริษัท Lecroy Corporation รุ่น 9384M และอ่านค่ายอดแรงดันด้วยโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดแรงดันของบริษัทHaefely รุ่น 68M ลักษณะวงจรทดลองดังรูปที่ 4.6



IG=เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ R_d=ความต้านทานจำกัดกระแส

R_{div}=โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน 600 kV V_p =โวลท์มิเตอร์วัดค่ายอดแรง

รูปที่ 4.5 วงจรทดลองแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

<u>การป้อนแรงดัน</u> ทำการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ควอนไทล์อันดับต่ำ(หัวข้อ 3.1.2) ด้วยวิธีแรงดันเพิ่ม โดยที่แรงดันเริ่มต้น(u_0)มีค่าต่ำกว่าแรงดันที่คาดว่าจะเกิดเบรกดาวน์ประมาณ 40 kV แรงดันเพิ่มแต่ละขั้น(Δu) 10 kV ช่วงเวลาระหว่างการป้อนแรงดันแต่ละครั้ง(Δt_p)ไม่ต่ำกว่า 40 วินาที และจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันแต่ละขั้น(m) 5 ครั้ง

4.4.7 การควบคุมคุณภาพของน้ำมัน

ในการทดลองที่สภาวะต่างๆ จะทำการเปลี่ยนน้ำมันใหม่ที่ผ่านการควบคุมลงในชุดทดลองก่อนเริ่มต้นการทดลองในแต่ละวัน และระหว่างที่ทำการทดลองทำการดูดอากาศในชุดทดลองให้ต่ำกว่า 0.2 bar เป็นเวลาประมาณ 5 นาที ทุกๆ 10 นาทีของการทดลอง ประกอบกับการสุ่มตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันว่ามีคุณสมบัติเปลี่ยนไปอย่างไร ด้วยการวัดคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 156:1963 ทั้งก่อนและหลังการทดลองน้ำมันตัวอย่างชุดนั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงผลการทดลองเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง ที่ได้จากการทำการทดลองตามวิธีการทดลองในบทที่ 4 แบ่งรายละเอียดออกตามชนิดแรงดัน คือ กระแสสลับ อิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ และผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ของรูปคลื่นแรงดันทั้งสอง รวมทั้งวิเคราะห์หาเหตุของผลการทดลองที่ได้

5.1 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ

5.1.1 ผลกระทบของอนุภาคคาร์บอน

โดยทั่วไปเมื่อเกิดเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลง จะทำให้น้ำมันบางส่วนเสียสภาพ และเกิดอนุภาคคาร์บอนที่เจือปนอยู่ในน้ำมันขึ้น อนุภาคคาร์บอนอาจทำให้คุณสมบัติของน้ำมันเปลี่ยนไป ในการศึกษาทดลองจึงต้องทราบสภาวะที่อนุภาคคาร์บอนเริ่มมีผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์

เมื่อทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อดูผลกระทบที่จะมีต่อการทดลอง ด้วยการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันที่บรรจุในชุดทดลอง ใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ ที่ทรงกลมรัศมี(r) ขนาด 5 mm แกป(g) 3-7 mm และอุณหภูมิ(T) 30-80°C ป้อนแรงดันจนเกิดเบรกดาวน์จำนวน 24 ครั้งที่แต่ละสภาวะ เริ่มจากอุณหภูมิ 30°C ทำการควบคุมคุณภาพน้ำมันระหว่างการทดลองตามวิธีในหัวข้อ 4.7 โดยน้ำมันที่ใช้ทดลองเป็นน้ำมันใหม่ที่ผ่านการควบคุมแล้วและไม่มีการเปลี่ยนใหม่ตลอดการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอนุภาคคาร์บอน พบว่า ค่าความแตกต่างของแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ย($\overline{U}_d$)ของน้ำมันใหม่กับน้ำมันที่ผ่านการทดลองมาแล้วประมาณ 170 ครั้ง ที่สภาวะอุณหภูมิ 30°C มีค่ามากที่สุด 6.6% ส่วนส.ป.ส.ความเบี่ยงเบน(ν) แตกต่างกันมากที่สุดประมาณ 35 % จึงคาดว่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ทำการทดลองเบรกดาวน์จำนวน 24-32 ครั้ง จะได้รับผลกระทบจากอนุภาคคาร์บอนน้อยมาก ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.1 (ข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์(U_d)แสดงอยู่ในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1)

ตารางที่ 5.1 $\overline{U}_d$ และ ν ของน้ำมันใหม่(A)และน้ำมันที่ผ่านการทดลองประมาณ 170 ครั้ง(B) ที่ ทรงกลมรัศมีขนาด 5mm และอุณหภูมิ 30°C

g(mm)	A		B		$\frac{\overline{U}_{dB}-\overline{U}_{dA}}{\overline{U}_{dA}}*100$
	$\overline{U}_d$ (kV)	ν	$\overline{U}_d$ (kV)	ν	
3	59.4	0.11	63.3	0.09	6.6
5	83.8	0.09	84.7	0.10	1.1
7	104.0	0.14	102.9	0.19	-1.1

ที่อุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้น $\overline{U}_d$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 60-70°C สอดคล้องกับการทดลองในอดีต[21] ที่พบว่า น้ำมันที่มีคาร์บอนจะได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 50-60°C ขณะที่น้ำมันใหม่แรงดันเบรกดาวน์สูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 80 °C ส่วน ν มีการเปลี่ยนแปลงสูงที่สุด ทีแกป 7mm โดย ν_{30C}มีค่าเป็น 2เท่าของ ν_{80C} ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5mm

g(mm)	พารามิเตอร์	อุณหภูมิ(°C)					
		30	40	50	60	70	80
3	$\overline{U}_d$ (kV)	59.4	66.2	73.0	75.9	76.9	70.7
	ν	0.11	0.10	0.12	0.08	0.09	0.09
7	$\overline{U}_d$ (kV)	104.0	124.7	117.7	126.1	113.1	110.9
	ν	0.14	0.14	0.16	0.08	0.12	0.07

ดังนั้นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติการกระจายเชิงสถิติของน้ำมันใหม่โดยหลีกเลี่ยงผลกระทบของอนุภาคคาร์บอน จะต้องทำการเปลี่ยนน้ำมันที่ใช้ทดลองบ่อยครั้ง ใช้น้ำมันปริมาณมากและใช้เวลามากเกินไป จึงเลือกทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 45 60 และ 80°C และทำการศึกษาหาจำนวนครั้งที่พอเหมาะ โดยใช้ผลการทดลองเบรกดาวน์ข้างต้นที่อุณหภูมิ 30°C (ภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1)คำนวณ$\overline{U}_d$ และν ที่จำนวนครั้งการทดลอง 6 และ 8 ค่าแรกเปรียบเทียบกับ$\overline{U}_d$ และνที่คำนวณจากข้อมูลทั้ง 24 ค่า พบว่า$\overline{U}_d$ และνที่จำนวนครั้งการทดลอง 6 และ 8 ครั้ง มีความแตกต่างกับค่าที่จำนวนครั้ง

การทดลอง 24 ครั้ง เพียงเล็กน้อย และความแตกต่างจะลดลงตามจำนวนครั้งที่ทำการทดลอง ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.3 จึงเลือกจำนวนครั้งการทดลอง 8 ครั้งที่แต่ละอุณหภูมิ เริ่มทำการทดลองจากอุณหภูมิสูงมาต่ำทำให้ลดจำนวนครั้งการทดลองสำหรับน้ำมันใหม่ที่ผ่านการควบคุมลงเหลือ 32 ครั้ง และทำการเปรียบเทียบเฉพาะค่า $\overline{U}_d$ เท่านั้น

ตารางที่ 5.3 $\overline{U}_d$ และ ν ที่จำนวนครั้งการทดลอง 6 8 และ 24 ครั้ง ที่ r=2.5mmและอุณหภูมิ 30°C

g(mm)	6		8		24	
	$\overline{U}_d$ (kV)	ν	$\overline{U}_d$ (kV)	ν	$\overline{U}_d$ (kV)	ν
3	51.7	0.18	52.5	0.15	59.4	0.11
7	82.3	0.13	81.8	0.12	80.9	0.11

เพื่อเป็นการยืนยันว่าน้ำมันที่ผ่านการทดลองมาเป็นจำนวน 32 ครั้ง คุณสมบัติด้านความคงทนต่อการเบรกดาวน์ไม่เปลี่ยนไป จึงได้ทำการทดสอบความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 156-1963 ของน้ำมันใหม่และน้ำมันที่ผ่านการทดลองเบรกดาวน์ 32 ครั้ง ค่า $\overline{U}_d$ แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงมั่นใจได้ว่าการทำการทดลองด้วยวิธีนี้ ไม่มีผลกระทบจากอนุภาคคาร์บอน รายละเอียดดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันใหม่(A)และน้ำมันที่ผ่านการทดลอง 32 ครั้ง(B) ตามมาตรฐาน IEC 156-1963

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	$\overline{U}_d$ (kV)	ν
น้ำมันใหม่	56	>60	>60	59	>60	53	58	0.04
r=5mm, g=3mm	59	>60	58	>60	>60	49	57.7	0.07
r=10mm, g=5mm	57	49	>60	>60	>60	>60	57.7	0.08

5.1.2 ลักษณะสมบัติเชิงสถิติ

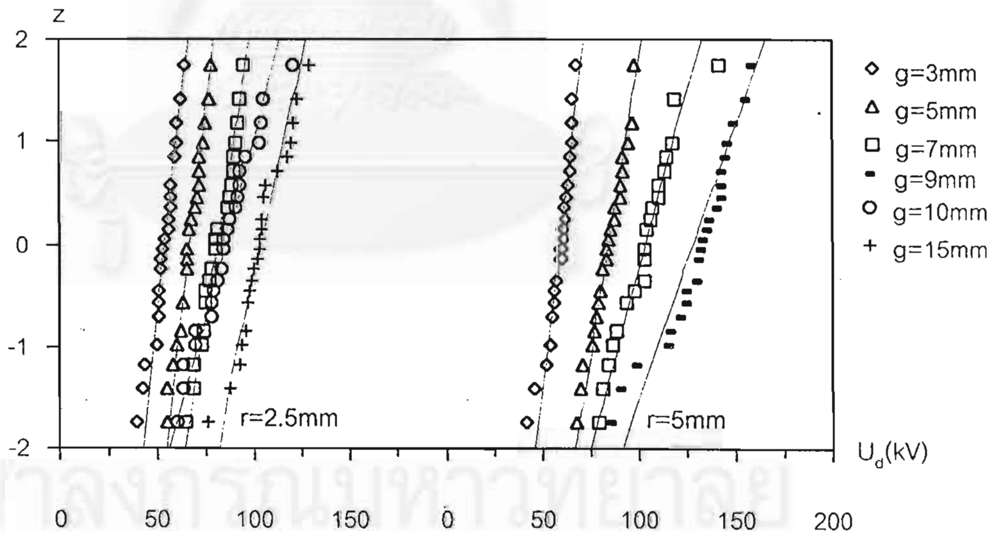
เพื่อหาลักษณะการกระจายเชิงสถิติที่อุณหภูมิห้อง(T~30°C) จะทำการทดลองที่สภาวะต่างๆ ดังตารางที่ 5.5 โดยใช้วิธีการทดลองดังหัวข้อ 4.4.5

ตารางที่ 5.5 สภาวะที่ทำการทดลอง

r(mm)	g(mm)	T(∘C)
2.5	3 5 7 10 15	28-32
5	3 5 7 9	
10	3 5	
15	3 5	

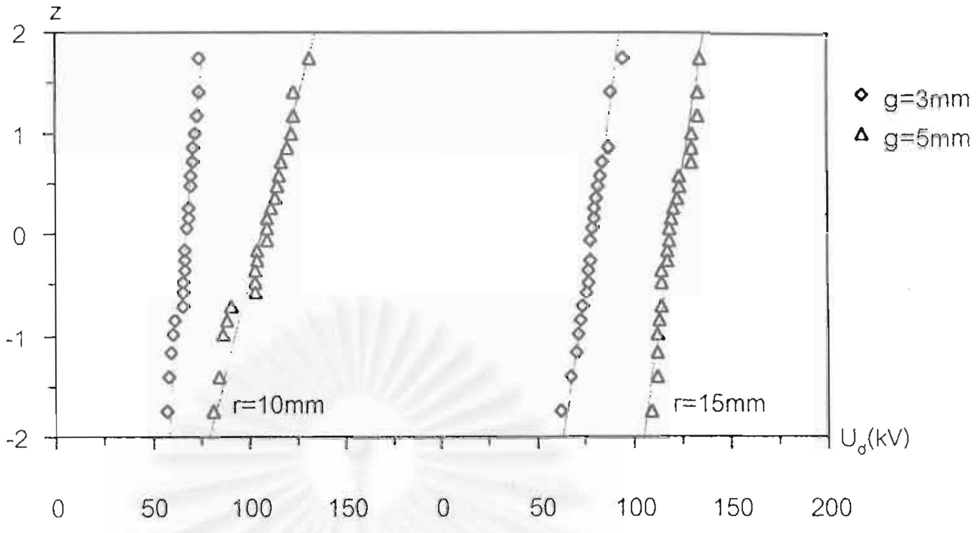
ความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูล จากค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้ ดังภาคผนวก.ข ตารางที่ ข.1 และ ข.2 ทดสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลโดยใช้วิธีสร้างกราฟเปรียบเทียบในหัวข้อ 3.2 ได้ผลดังภาคผนวก ข หัวข้อ ข.2 สังเกตได้ว่า ค่าแรงดันเบรกดาวน์มีการแกว่งตัวขึ้นและลงรอบค่าเฉลี่ยสลับกันและไม่มีลักษณะเป็นรายคาบ จึงคาดว่าผลการทดลองที่ได้มีความเป็นอิสระต่อกัน

ลักษณะการกระจายเชิงสถิติของ $\overline{U}_d$ คำนวณหาฟังก์ชันลักษณะการกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์(หัวข้อ 3.3) และทำการเปรียบเทียบกับการกระจายแบบปกติและWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์(หัวข้อ 3.4) ค่าพารามิเตอร์ของการกระจายทั้งสองแบบแสดงดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข.3 และ ข.4 สร้างกราฟเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 5.1และ5.2



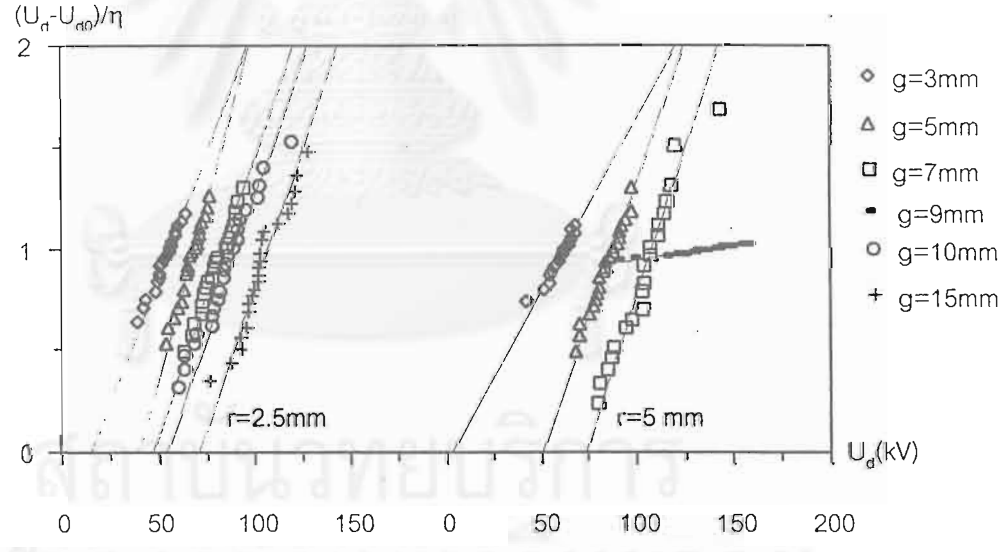
(ก) r=2.5 และ 5mm

รูปที่ 5.1 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับการกระจายแบบปกติ เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30∘C



(ข) r=10 และ 15mm

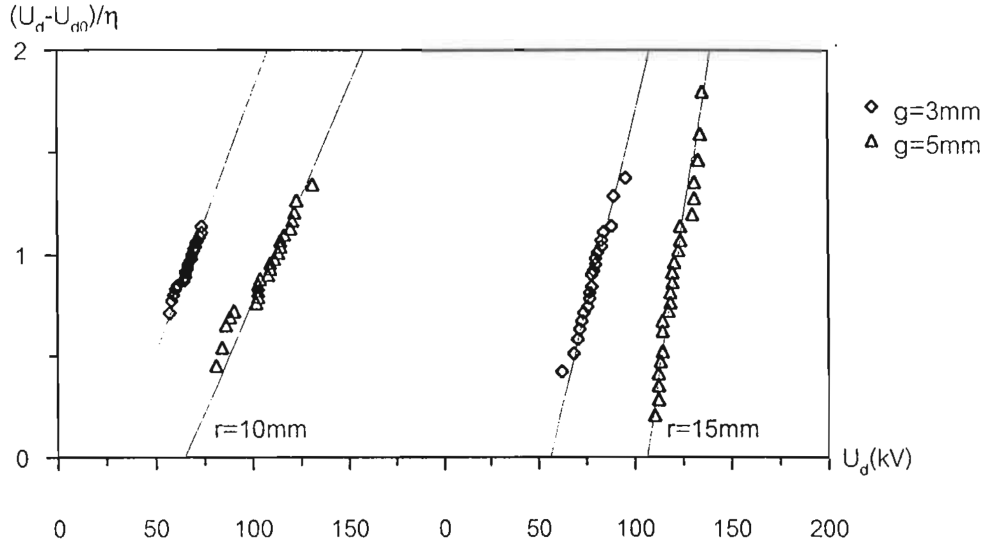
รูปที่ 5.1 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับการกระจายแบบปกติ เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30oC(ต่อ)



(ก) r=2.5 และ 5mm

รูปที่ 5.2 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับการกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์ เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30 ^{o}C

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

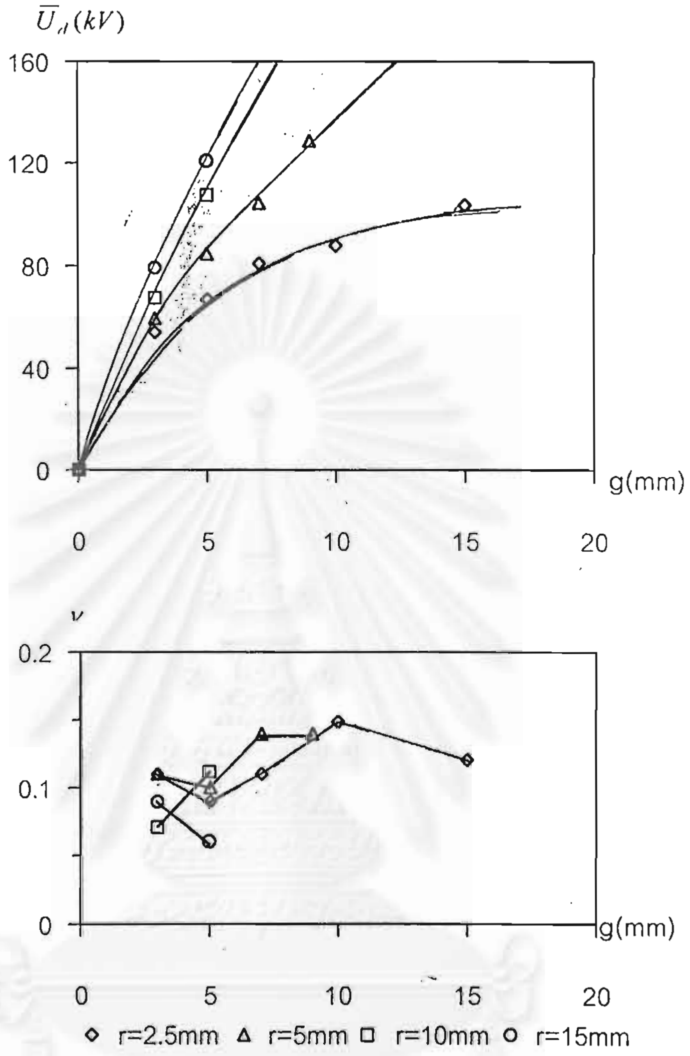


(ข) r=10 และ 15mm

รูปที่ 5.2 การกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับการกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์ เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ 30 °C (ต่อ)

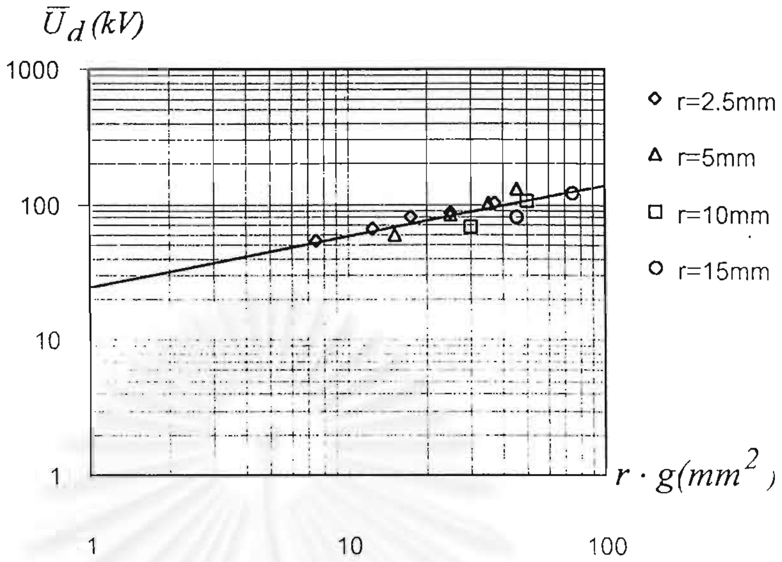
เนื่องจากผลต่างของความน่าจะเป็นของการกระจายข้อมูลกับการกระจายทางทฤษฎีที่มากที่สุด(d_{max}) เมื่อเปรียบเทียบกับการกระจายทางทฤษฎีทั้งสองแบบ มีค่าน้อยกว่า 0.15 กราฟการกระจายทางทฤษฎีทั้งสองจึงสามารถใช้แทนการกระจายของแรงดันเบรกดาวน์ได้ดีพอกัน แต่เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ U_{d0} ของการกระจายWeibull ที่ r=5mm และ g=3 และ9mm ที่มีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น จึงไม่เหมาะสมต่อการใช้คำนวณเปรียบเทียบต่อไป การวิเคราะห์เปรียบเทียบต่างๆที่จะทำต่อไปจึงอยู่สมมติฐานว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดลองตามสภาวะต่างๆ มีการกระจายแบบปกติ

$\bar{U}_d$ *และ* ν *กับ* g เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\bar{U}_d$ และ ν กับแกป พบว่า $\bar{U}_d$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดรัศมีทรงกลมและแกป ขณะที่ ν มีค่าอยู่ในช่วง 0.06-0.15 และไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับขนาดทรงกลมและแกป ดังรายละเอียดในรูปที่ 5.3



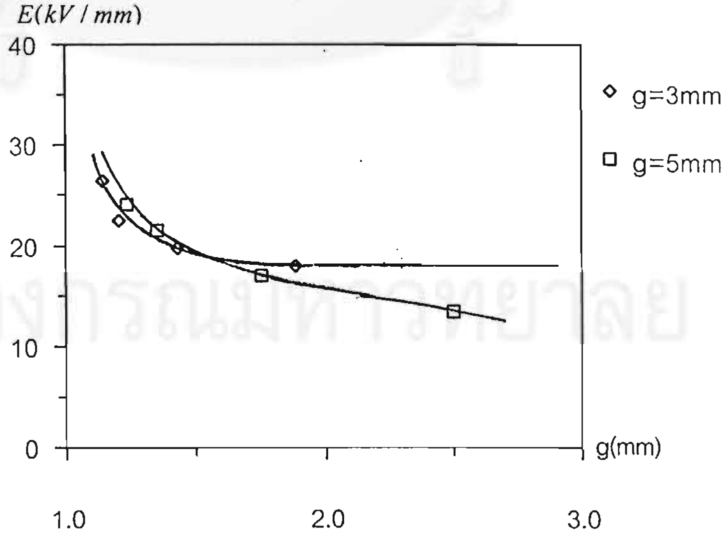
รูปที่ 5.3 $\overline{U}_d$ และ ν กับ g ที่ r ค่าต่างๆ และอุณหภูมิ 30 °C

แรงดันเบรกดาวน์($\overline{U}_d$)กับผลคูณของแกปกับขนาดทรงกลม $(r \cdot g)$ เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ในสเกลล็อก-ล็อก พบว่า แรงดันเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้นตามผลคูณระหว่างขนาดรัศมีทรงกลม(r) กับแกป(g) และมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 $\overline{U}_d$ กับ $r \cdot g$

ความเครียดสนามไฟฟ้า(E)กับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า(FF) จากการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ตามความสัมพันธ์ $E = \frac{\overline{U}_d}{g}$ พบว่า ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดทรงกลมหรือตามค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ลดลง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แกป 3 mm มีค่าสูงกว่าที่แกป 5 mm เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 1.5 และมีแนวโน้มตรงข้ามเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามากกว่า 1.5 ดังรายละเอียดในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 E กับ FF

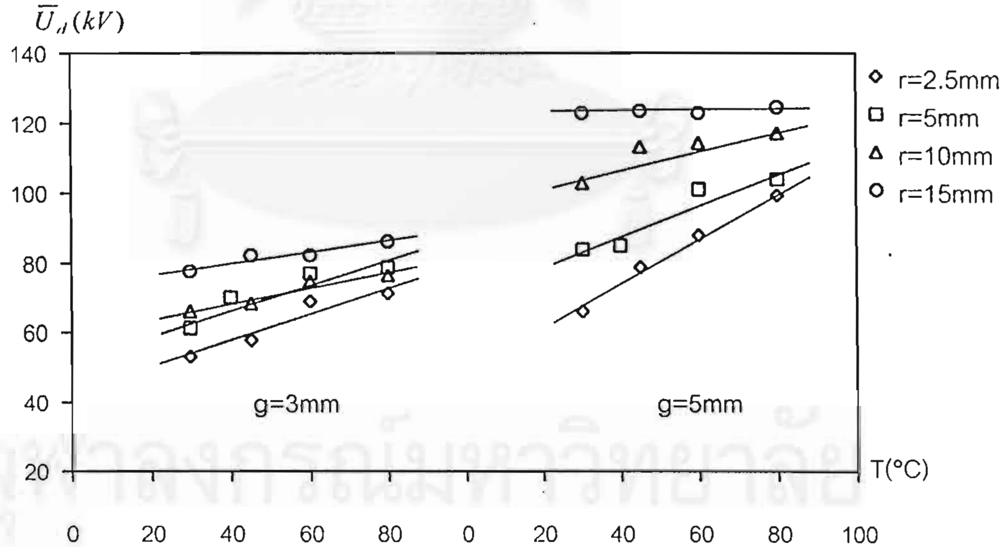
5.1.3 **ผลกระทบของอุณหภูมิ**

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ในอุณหภูมิช่วง 30-80 ∘C จะป้อนแรงดันเพิ่มจำนวน 8 ครั้ง ที่สภาวะต่างๆดังตารางที่ 5.6 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้ ดังภาคผนวก ค หัวข้อ ค.1 และคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ย($\bar{U}_d$) และส.ป.ส.ความเบี่ยงเบน(ν) ดังตารางที่ ค.2

ตารางที่ 5.6 สภาวะที่ทำการทดลอง

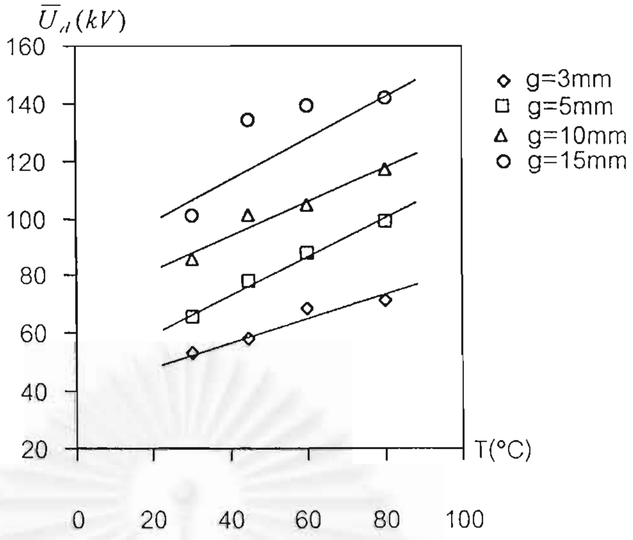
r(mm)	g(mm)	T(∘C)
5	3 5 10 15	30 45 60 และ80
10	3 5	
20	3 5	
30	3 5	

$\bar{U}_d$ *กับอุณหภูมิ* ความสัมพันธ์ระหว่าง $\bar{U}_d$ กับอุณหภูมิที่ทรงกลมและแกปต่างๆพบว่า $\bar{U}_d$ เพิ่มตามอุณหภูมิ ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 80∘C ทุกขนาดทรงกลมและแกป ดังรายละเอียดในรูปที่ 5.6



(ก) แกป 3 และ 5mm

รูปที่ 5.6 แรงดันเบรกดาวน์($\bar{U}_d$)กับอุณหภูมิ



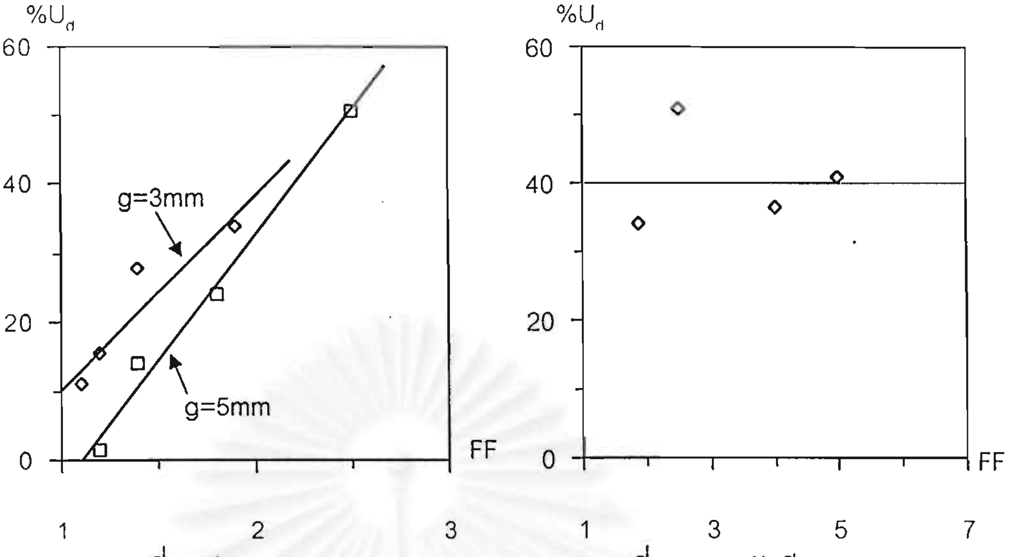
(ข) ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5mm

รูปที่ 5.6 แรงดันเบรกดาวน์($\overline{U}_d$)กับอุณหภูมิ(ต่อ)

เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดันตามอุณหภูมิ(%U_d)กับFF พิจารณาผลกระทบของแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ โดยเปรียบเทียบ %U_d ที่คำนวณจากผลต่างของ $\overline{U}_{d,80°C}$ กับ $\overline{U}_{d,30°C}$ ตามสมการ

$$\%U_d = \frac{\overline{U}_{d,80°C} - \overline{U}_{d,30°C}}{\overline{U}_{d,30°C}} \cdot 100 \qquad (5.1)$$

ได้ผลดังตารางที่ ค.3 วาดกราฟความสัมพันธ์กับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ได้ดังรูปที่ 5.7 สังเกตว่าเมื่อทรงกลมมีขนาดเล็กลงหรือแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น %U_d มีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 5.7 (ก) ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าต่ำกว่า 2 %U_d ที่แกป 3 mm มีค่าสูงกว่า %U_d ที่แกป 5 mm อย่างชัดเจน และความแตกต่างจะมีเพียงเล็กน้อย เมื่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 2 ส่วนที่ ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm %U_d มีการเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ g=5mm โดยมีค่าสูงถึง ~50% และเมื่อแกปกว้างขึ้น %U_d จะมีแนวโน้มคงตัวที่ 40% ดังรายละเอียดในรูปที่ 5.7 (ข)



รูปที่ 5.7 %U_d กับ FF

5.2 แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์

5.2.1 ผลกระทบของการเกิดเบรกดาวน์

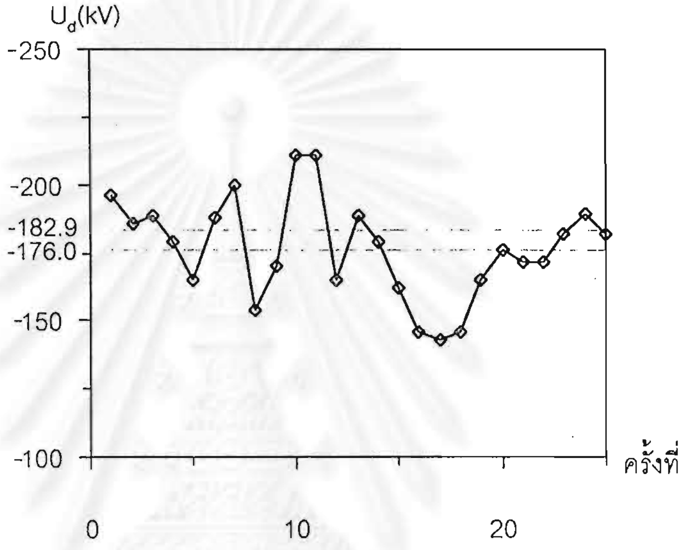
การทดลองเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ ทุกครั้งที่เกิดเบรกดาวน์จะทำให้ผิวอิเล็กโตรดเสียหายมากเมื่อเปรียบเทียบกับการเกิดเบรกดาวน์จากการป้อนแรงดันกระแสสลับ ความเสียหายของอิเล็กโตรด ขึ้นอยู่กับขนาดกระแส(ขนาดแรงดัน)และจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวน์ ขนาดกระแสจำกัดโดยการใส่ความต้านทานขนาด 400 Ω อนุกรมกับชุดทดลอง ส่วนจำนวนครั้งที่ทำการทดลองพิจารณาจากการตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันของผลการทดลองเบรกดาวน์ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบด้วยวิธีแรงดันเพิ่มตามลักษณะดังในรูปที่ 3.2 ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm และ แกป 5 mm โดยใช้พารามิเตอร์การทดลองดังนี้

- u_0 =-93 kV
- $\Delta u \approx$ -7kV
- $\Delta t_p \geq 40s$
- n=25 ครั้ง

พบว่า $\bar{U}_d$ ที่คำนวณจาก U_d (ภาคผนวก ง ตารางที่ ง.1) ที่ค่าแรงดันเบรกดาวน์ 10 15 และ 20 ค่าแรก มีค่าเท่ากับ -183.8 -182.9 และ -176 kV ตามลำดับ และ ν มีค่าเท่ากับ 0.093 0.095

และ 0.12 ตามลำดับ สังเกตว่า $\bar{U}_d$ และ ν ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูล 10 และ 15 ค่าแรก มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณโดยใช้ข้อมูล 20 ค่าแรก $\bar{U}_d$ ต่ำกว่า ประมาณ 7kV

เมื่อพิจารณาความเป็นอิสระต่อกันของ U_d แต่ละค่า พบว่า U_d 15 ค่าแรกแกว่งตัวรอบ $\bar{U}_d$ ที่คำนวณจากข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์ 10 และ 15 ค่าแรก ลำดับข้อมูลที่เกินจากจำนวนนี้ไปมีค่าต่ำกว่า โดยตลอด ดังรายละเอียดในรูปที่ 5.8



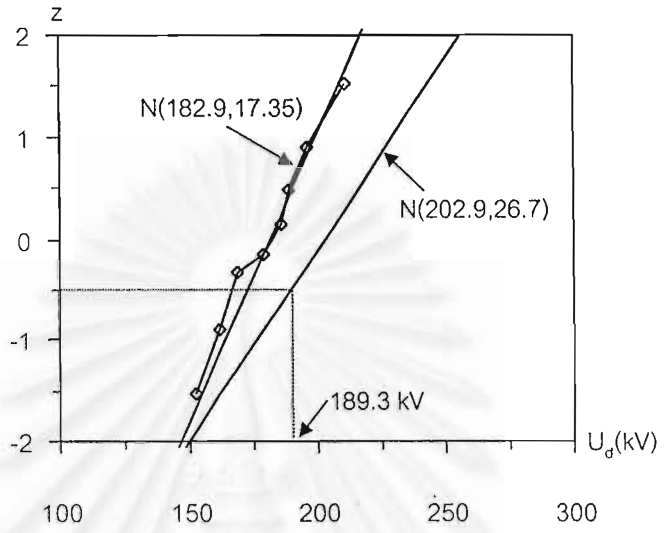
รูปที่ 5.8 การกระจายค่าแรงดันเบรกดาวน์

แสดงให้เห็นว่า แรงดันเบรกดาวน์ เริ่มมีผลกระทบจากการเกิดเบรกดาวน์ครั้งก่อน เมื่อจำนวนครั้งการทดลองมากกว่า 15 ครั้ง ดังนั้นการทดลองแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์จึงทำการเปลี่ยนอิเล็กโตรดหลังจากเกิดเบรกดาวน์ไม่เกิน 15 ครั้ง

5.2.2 อันดับควอนไทล์ของแรงดันเบรกดาวน์

การหาลักษณะการกระจายเชิงสถิติของแรงดันเบรกดาวน์ 15 ค่าแรกที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 5.2.1 โดยแทนด้วยฟังก์ชัน N(182.9,17.35) การกระจายแบบปกติสามารถใช้แทนได้อย่างเหมาะสม ทำการคำนวณหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์(หัวข้อ 3.5) โดยสมมติให้มีการกระจายแบบปกติเช่นเดียวกับฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมของการเกิดเบรกดาวน์ได้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นคือ N(202.9,26.7) เปรียบเทียบกับค่าแรงดันคงทนอยู่ได้เฉลี่ย($\bar{U}_{dq}$)ที่ได้จากวิธีการหาอันดับควอนไทล์ค่าต่ำดังตารางที่ ง.2 ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm และแกป 5

mm พบว่า $\bar{U}_{dq}$ =189.3 kV ตรงกับค่า z=-0.5 หรือ อันดับควอนไทล์ 31% ของฟังก์ชัน ความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์ ดังรายละเอียดในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ลักษณะการกระจายเชิงสถิติของ $U_{\bar{d}}$ เมื่อแทนด้วยการกระจายแบบปกติ เทียบกับ $\bar{U}_{dq}$ ที่ได้จากวิธีหาอันดับควอนไทล์ต่ำ

จากการคำนวณหาอันดับควอนไทล์(หัวข้อ 3.1.2) เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ m=5 และ $\frac{\Delta u}{s} \approx 0.5$ อ่านค่า $\bar{\beta}$ =1.6 s_β =0.7(รูปที่ 3.8) และแรงดันคงทนอยู่ได้อยู่ในตำแหน่งอันดับ ควอนไทล์ที่ 0.05 (รูปที่ 3.9) เมื่อคำนวณที่ความเชื่อมั่น 90% แรงดันคงทนอยู่ได้จะมี ความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์ต่ำกว่า U_{d20} ดังนี้

$u_{d10}:u_{d50^-}$; $\bar{\beta}$ =1.6 ; s_β =0.60

$$: u_{d50} - (\beta - 1.28 s_\beta)s = u_{d50} - 0.83s = u_{d20}$$

จะเห็นว่าผลการคำนวณได้อันดับควอนไทล์ที่ 20% ต่ำกว่า จากการทดลองที่ได้อันดับควอนไทล์ที่ 30% ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่า แรงดันคงทนอยู่ได้จากการทำการทดลองด้วยวิธีการหาอันดับควอนไทล์ต่ำ จะมีความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์ต่ำกว่า 20% ตามที่ได้คาดการณ์จากการคำนวณตามหัวข้อ 3.1.2

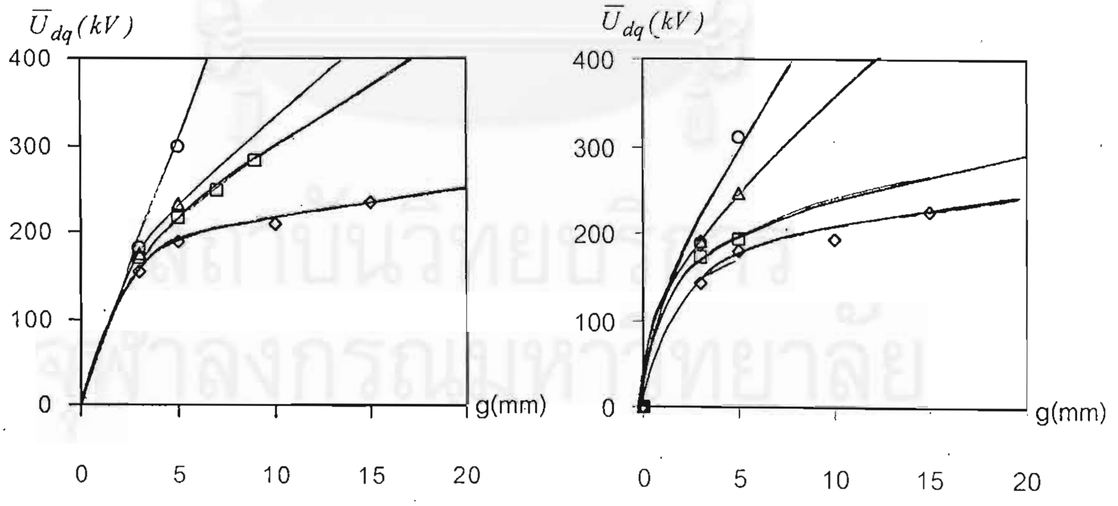
5.2.3 ผลการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30 °C

การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของ อิเล็กโตรด แกป จะทดลองป้อนแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบตามวิธีที่กล่าวในหัวข้อ 3.1.2 ที่อุณหภูมิห้อง(~30 °C) ตามสภาวะต่างๆดังตารางที่ 5.7 ผลการทดลองดังภาคผนวก ง ตารางที่ ง.3

ตารางที่ 5.7 สภาวะที่ทำการทดลอง

r(mm)	g(mm)	อุณหภูมิ(°C)
2.5	3 5 10 15	28-30
5	3 5	
10	3 5	
15	3 5	

$\bar{U}_{dq}$ *และ* ν *กับแกป* ที่อุณหภูมิ 30°C $\bar{U}_{dq}$ มีการเพิ่มขึ้นตามขนาดทรงกลมและแกป ทั้งแรงดันขั้วบวกและขั้วลบลักษณะเช่นเดียวกับกรณีแรงดันกระแสสลับ ส่วน ν เนื่องจากจำนวนครั้งการทดลองเพียง 5- 6 ค่าเท่านั้น ค่า ν ที่คำนวณได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูง การใช้วิเคราะห์แนวโน้มความสัมพันธ์กับขนาดทรงกลมและแกปจะมีความเชื่อมั่นต่ำ แต่สังเกตว่าส่วนใหญ่จะมีค่าต่ำกว่า 0.10 ดังรายละเอียดในรูปที่ 5.10

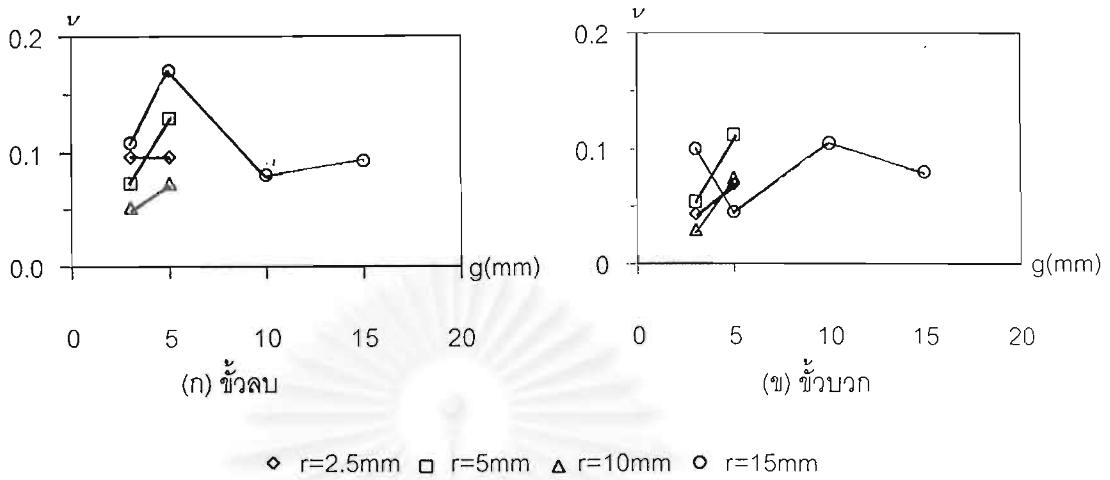


(ก) ขั้วลบ (ข) ขั้วบวก

◇ r=2.5mm □ r=5mm △ r=10mm ○ r=15mm

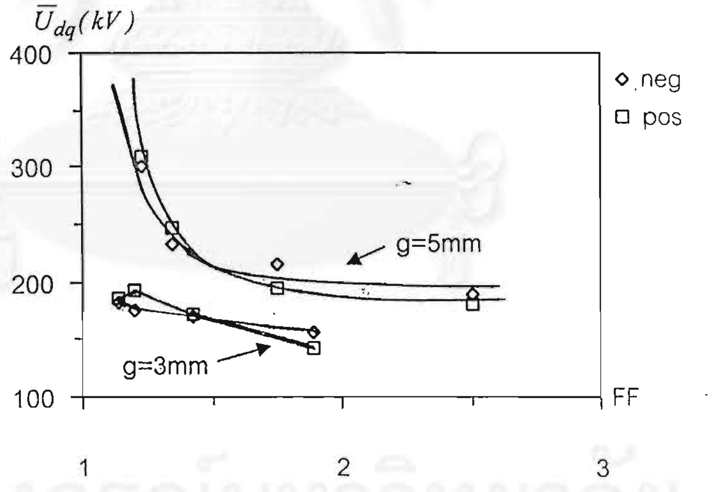
รูปที่ 5.10 $\bar{U}_{dq}$ และ ν กับ g

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.10 $\bar{U}_{dq}$ และ ν กับ g(ต่อ)

$\bar{U}_{dq}$ *กับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า* เมื่อแกปคงที่ พบว่า $\bar{U}_{dq}$ มีค่าลดลงตามขนาดทรงกลมที่เล็กลงหรือค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ทั้งแรงดันขั้วบวกและขั้วลบ ที่ค่า FF<1.5 $\bar{U}_{dq,pos}$ มีค่าสูงกว่า $\bar{U}_{dq,neg}$ ขณะที่ FF>1.5 $\bar{U}_{dq,neg}$ มีค่าสูงกว่า $\bar{U}_{dq,pos}$ ดังรายละเอียดในรูปที่ 5.11

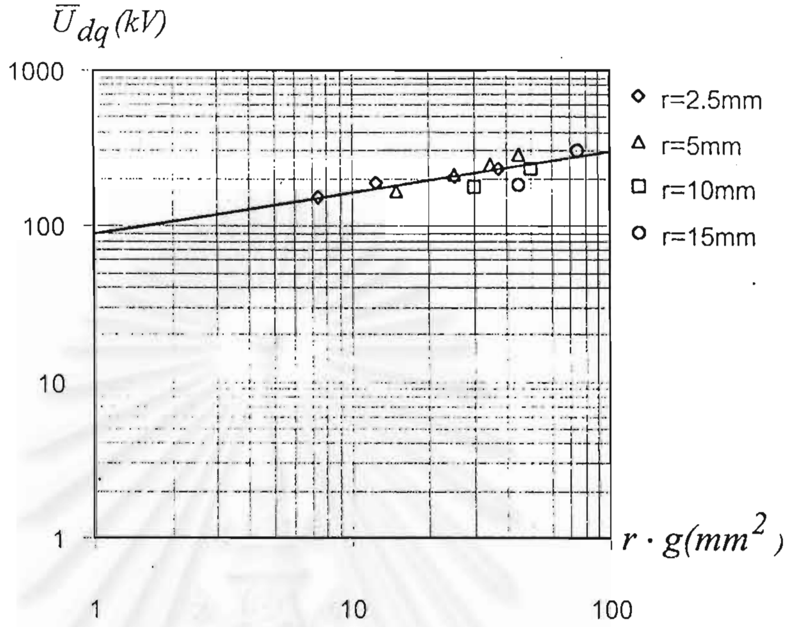


รูปที่ 5.11 $\bar{U}_{dq}$ กับ FF

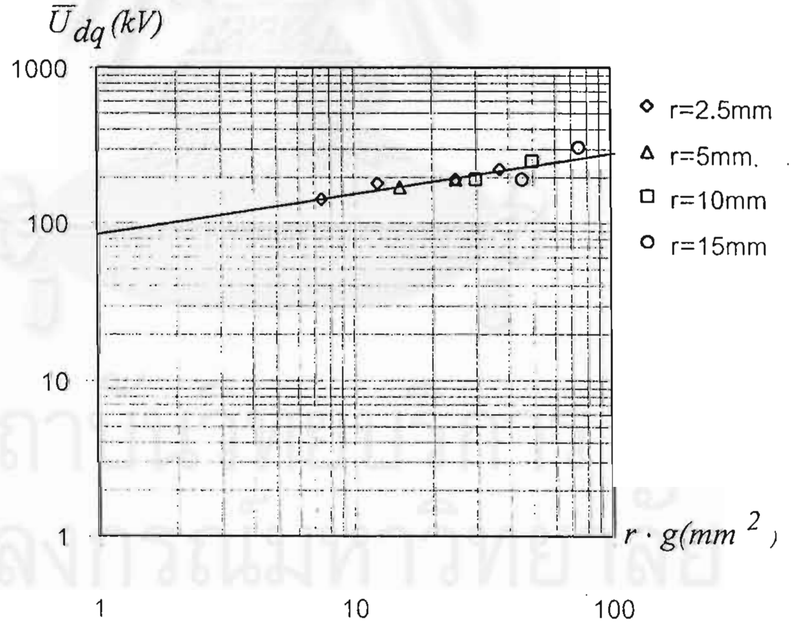
แรงดันเบรกดาวน์($\bar{U}_{dq}$)*กับผลคูณของขนาดทรงกลมกับแกป* ($r \cdot g$) กราฟความสัมพันธ์ในสเกลล็อก-ล็อก มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีแรงดันกระแสสลับ กล่าวคือ แรงดันเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้นตามผลคูณระหว่างขนาดรัศมีทรงกลม(r)กับแกป(g) มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 5.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และความชันของเส้นกราฟแรงดันขั้วบวก ขั้วลบ เปรียบเทียบกับเส้นกราฟแรงดันกระแสสลับ(รูปที่ 5.5)มีค่าใกล้เคียงกัน



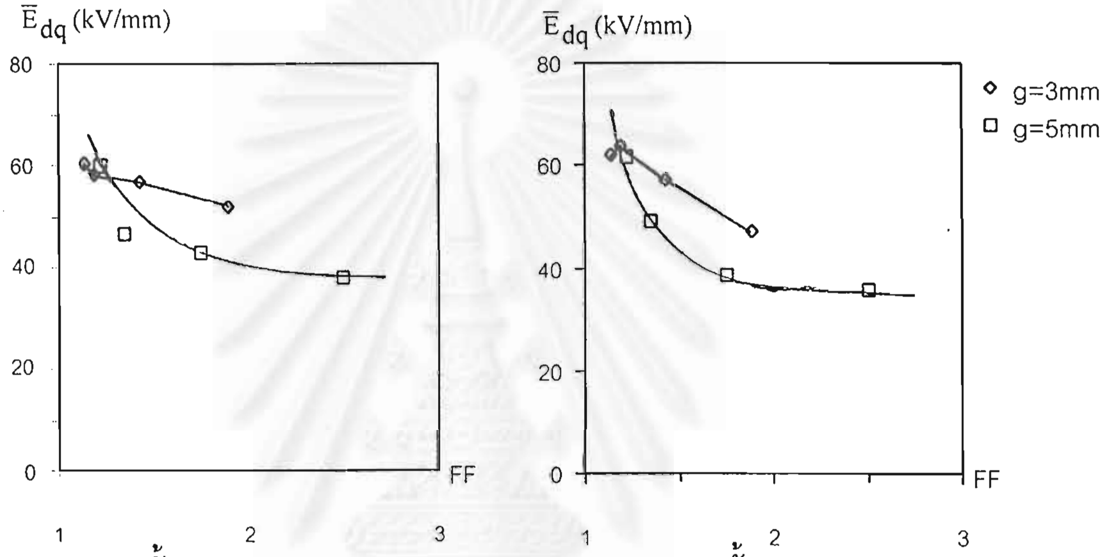
(ก) ขั้วลบ



(ข) ขั้วบวก

รูปที่ 5.12 $\overline{U}_{dq}$ กับ $r \cdot g$

$\bar{E}_{dq}$ *กับ FF* เมื่อคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าคงทนอยู่ได้ตามความสัมพันธ์ $\bar{E}_{dq} = \bar{U}_{dq}/g$ เทียบกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า พบว่า $\bar{E}_{dq}$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าลดลงเข้าใกล้ 1 หรือเมื่อทรงกลมมีขนาดโตขึ้น $\bar{E}_{dq,g=3mm}$ มีค่าสูงกว่า $\bar{E}_{dq,g=5mm}$ อย่างชัดเจนที่ FF มีค่ามาก และมีแนวโน้มว่า $\bar{E}_{dq,g=3mm}$ มีค่าต่ำกว่า $\bar{E}_{dq,g=5mm}$ เมื่อ FF<1.2 ทั้งแรงดันขั้วบวกและขั้วลบ ดังรูปที่ 5.13



(ก) ขั้วลบ (ข) ขั้วบวก

รูปที่ 5.13 $\bar{E}_{dq}$ กับ FF

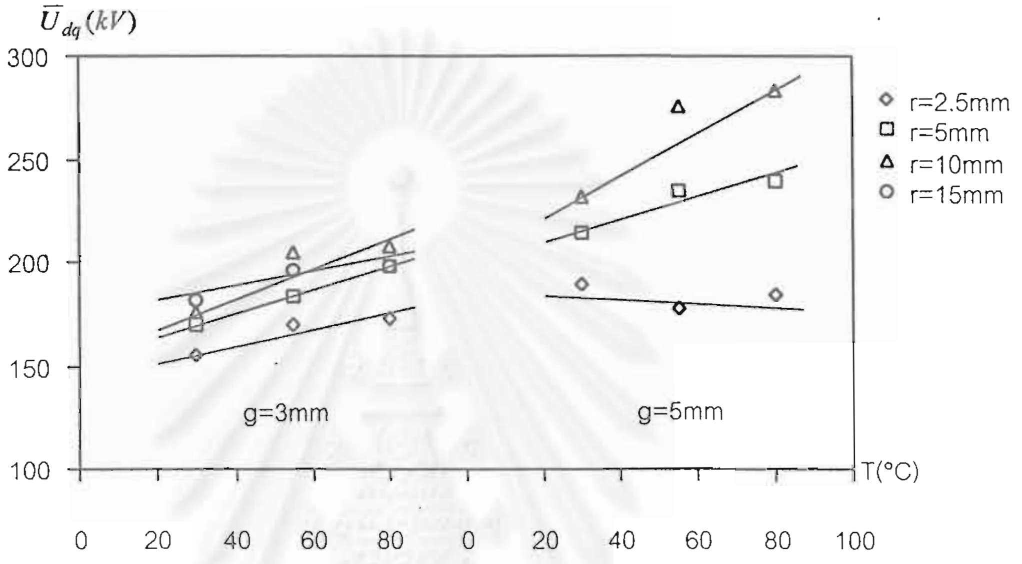
5.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ

ทำการทดลองเพื่อดูผลกระทบของอุณหภูมิดังสภาวะต่างๆตามตารางที่ 5.11 ผลการทดลองดังในภาคผนวก ง ตารางที่ ง.4

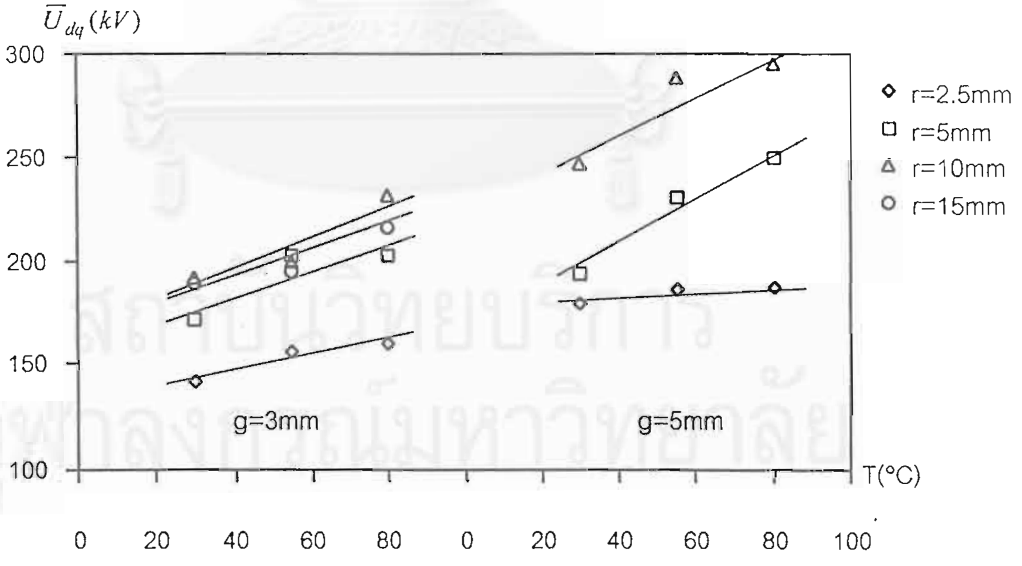
ตารางที่ 5.8 สภาวะที่ทำการทดลอง

r(mm)	g(mm)	T(°C)
2.5	3 5 10 15	30 55 และ80
5	3 5	
10	3 5	
15	3 5	

$\bar{U}_{dq}$ กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 30 ไปถึง 80 °C $\bar{U}_{dq}$ มีการเปลี่ยนแปลง 2 ลักษณะ ลักษณะแรก $\bar{U}_{dq}$ มีการเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 80 °C พบเมื่อทำการทดลองที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5-15 mm และแกป 3 และ 5 mm ทั้งกรณีแรงดันขั้วบวกและขั้วลบ และที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm และแกป 3 mm เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก ลักษณะที่สอง $\bar{U}_{dq}$ มีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เกิดขึ้นเมื่อป้อนแรงดันขั้วลบ ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm และแกป 5-15 mm รายละเอียดดังรูปที่ 5.14

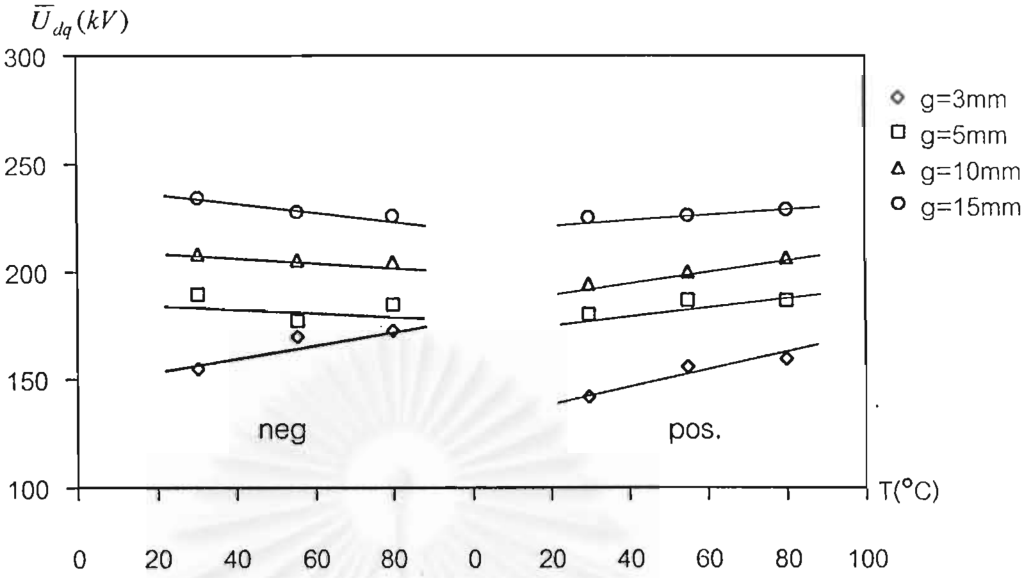


(ก) ขั้วลบ ที่ g=3 และ 5 mm



(ข) ขั้วบวก ที่ g=3 และ 5 mm

รูปที่ 5.14 $\bar{U}_{dq}$ กับอุณหภูมิ



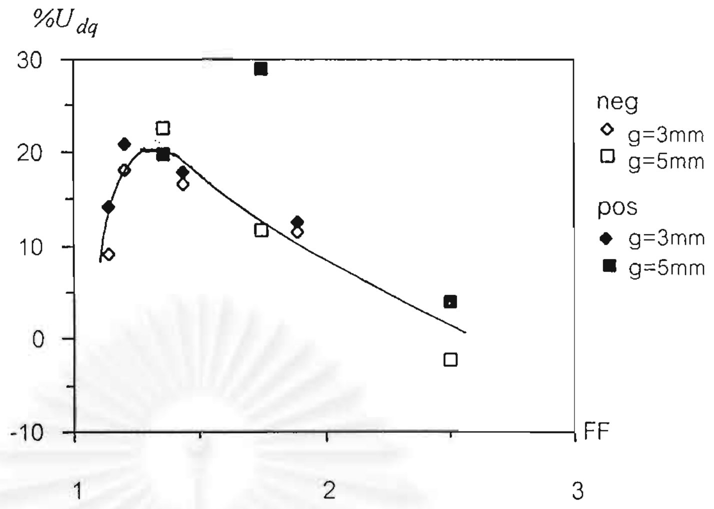
(ค) ขั้วบวกและขั้วลบ ที่ r=2.5mm

รูปที่ 5.14 $\bar{U}_{dq}$ กับอุณหภูมิ(ต่อ)

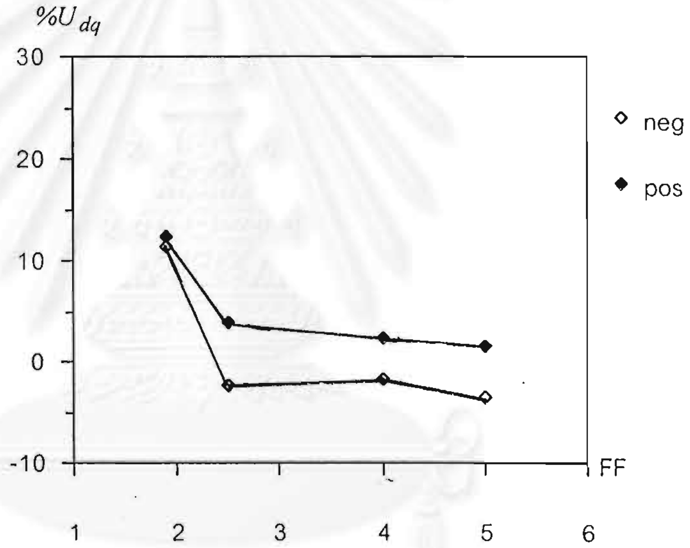
เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดันตามอุณหภูมิ(%U_{dq})กับFF พิจารณาผลกระทบของแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ โดยเปรียบเทียบ %U_{dq} ที่คำนวณจากผลต่างของ $\bar{U}_{dq,80^\circ C}$ กับ $\bar{U}_{dq,30^\circ C}$ ตามสมการ

$$\%U_{dq} = \frac{\bar{U}_{dq,80^\circ C} - \bar{U}_{dq,30^\circ C}}{\bar{U}_{dq,30^\circ C}} \cdot 100 \qquad (5.2)$$

พบว่า เมื่อแกปคงที่ %U_{dq} มีแนวโน้มแบบเดียวกับกรณีแรงดันกระแสสลับคือ จะมีค่าสูงขึ้นตามแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าและมีค่าสูงสุดที่ FF_m(~1.3) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงกว่า FF_m ยกเว้นเมื่อทดลองด้วยแรงดันขั้วบวกที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5mm แกป 5mm หรือแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเท่ากับ 1.8 ดังรายละเอียดในรูปที่ 5.15(ก)



(ก) ที่แกป 3 และ 5 mm



(ข) ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5mm

รูปที่ 5.15 %U_{dq} กับ FF

ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm เปลี่ยนแกปในช่วง 3-15 mm พบว่า กรณีการป้อนแรงดันขั้วบวก %U_{dq} มีการลดลงตามแกปที่กว้างขึ้น ส่วนขั้วลบ %U_{dq} มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าเป็นลบเมื่อแกปเพิ่มจาก 3mm เป็น 5mm และค่าเริ่มคงตัว แม้ว่าแกปจะกว้างขึ้นจนถึง g=15mm นอกจากนี้ %U_{dq} ที่ได้จากการป้อนแรงดันขั้วบวกก็มีค่าสูงกว่าแรงดันขั้วลบ รายละเอียดดังรูปที่ 5.15 (ข)

5.3 การเปรียบเทียบความคงทนต่อการเบรกดาวน์กระแสสลับและอิมพัลส์

5.3.1 แรงดันกระแสสลับที่ควอนไทล์อันดับที่ 20%(U_{d20})

การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลง เพื่อให้ได้รับรายละเอียดมากที่สุด ควรเปรียบเทียบลักษณะการกระจายเชิงสถิติ แต่วิธีนี้จำเป็นต้องใช้จำนวนครั้งการทดลองมาก ในที่นี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบขนาดแรงดันที่ความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์ค่าเดียวกัน

จากผลการทดลองเบรกดาวน์ด้วยวิธีป้อนแรงดันเพิ่ม สามารถแทนด้วการกระจายแบบปกติที่มีพารามิเตอร์เท่ากับ $\bar{U}_d$ และ ν ได้ดี ดังนั้นการคำนวณหาแรงดันเบรกดาวน์ที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์จึงอยู่บนสมมติฐานว่า ลักษณะการกระจายแรงดันเบรกดาวน์เป็นการกระจายแบบปกติ

เนื่องจากพารามิเตอร์ $\bar{U}_d$ และ ν ที่คำนวณได้จากการทดลองป้อนแรงดันกระแสสลับเป็นพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมของการเกิดเบรกดาวน์ การคำนวณหาความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์จากฟังก์ชันความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์ต้องทำการคำนวณด้วยวิธีในหัวข้อ 3.5 โดยการสมมติให้กำหนด Δu =2kV ทำการคำนวณแรงดันที่ความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์เท่ากับ 20% และ 30% (เนื่องจากความแตกต่างของอันดับควอนไทล์แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎีมีความขัดแย้งกัน) ผลที่ได้ดังภาคผนวก จ ตาราง จ.1 ความแตกต่างของค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่า 8% ทำให้การคำนวณอัตราส่วนอิมพัลส์มีความแตกต่างกันเล็กน้อย จึงเลือกใช้ผลการคำนวณแรงดันกระแสสลับที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์อยู่ในอันดับควอนไทล์ที่ 20% ซึ่งเท่ากับอันดับควอนไทล์ที่คำนวณได้ทางทฤษฎีในการเปรียบเทียบกับแรงดันอิมพัลส์

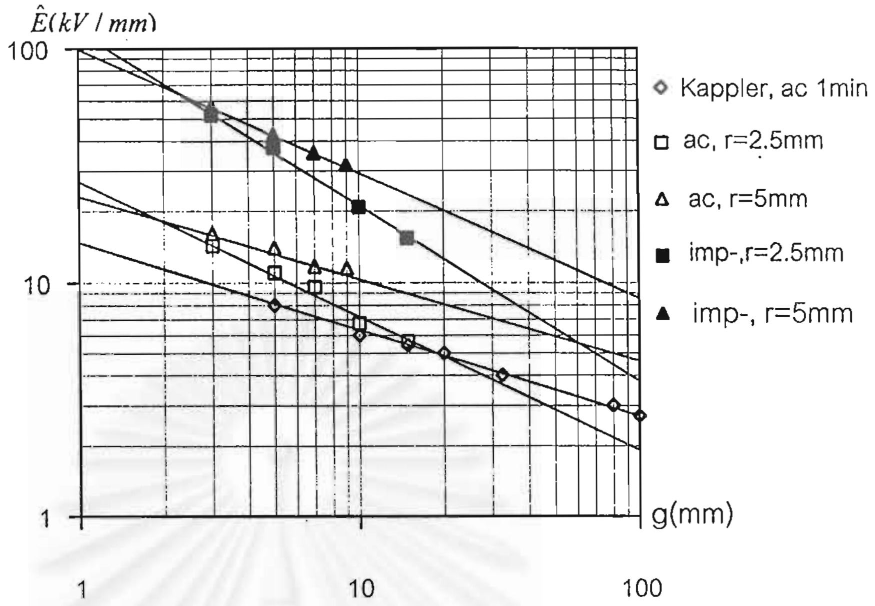
5.3.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับและอิมพัลส์

อัตราส่วนแรงดัน คำนวณหาอัตราส่วนแรงดันอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับได้ ผลดังภาคผนวก จ ตารางที่ จ.2 สังเกตว่า $\frac{\bar{U}^{-}_{dq,imp}}{\hat{U}_{d20,ac}}$ และ $\frac{\bar{U}^{+}_{dq,imp}}{\hat{U}_{d20,ac}}$ หรือ ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลงมีค่าสูงกว่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับมีค่าอยู่ในช่วง 1.4-2.0 ที่ทรงกลมขนาดเดียวกัน $\frac{\bar{U}^{-}_{dq,imp}}{\hat{U}_{d20,ac}}$ และ $\frac{\bar{U}^{+}_{dq,imp}}{\hat{U}_{d20,ac}}$ มีแนวโน้มลดลงเมื่อแกปเพิ่มขึ้นยกเว้นที่ r=15mm

5.4 การเปรียบเทียบกับข้อมูลการออกแบบ

ผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการป้อนแรงดันกระแสสลับและอิมพัลส์ เพื่อให้ทราบว่าสิ่งที่ได้ทดลองไปแล้วมีความเหมาะสมเพียงใดต่อการใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อการนำไปใช้ในการออกแบบการฉนวนน้ำมันที่โดยทั่วไปพิจารณาจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในที่นี้จึงทำการเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองกรณีแรงดันกระแสสลับคำนวณจากค่ายอดแรงดันที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ 2%(E_{d02}) ส่วนแรงดันอิมพัลส์คำนวณจากแรงดันคงทนอยู่ได้เฉพาะขั้วลบ เปรียบเทียบกับค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจากผลการทดลองของ Kappler[22] เนื่องจากเป็นผลการทดลองที่ได้นำมาใช้ในการออกแบบการฉนวนหม้อแปลงของบริษัท Weidmann เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่ำเมื่อทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับเป็นเวลา 1 นาที ผลการเปรียบเทียบพบว่า กราฟความเครียดสนามไฟฟ้ากับแกปมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเมื่อสร้างในสเกลล็อก-ล็อก เส้นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5 mm มีลักษณะขนานกับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองของKappler และมีค่าสูงกว่าประมาณ 2.5 เท่า ส่วนที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5mm เส้นกราฟจะมีความชันมากกว่าของทรงกลมรัศมีขนาด 5mm และของKappler และยังมีแนวโน้มที่จะมีค่ามากกว่าที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5mm เมื่อแกปแคบกว่า 2mm สำหรับแรงดันอิมพัลส์กราฟมีความชันมากกว่ากรณีแรงดันกระแสสลับเล็กน้อย ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm และ 5 mm ดังรายละเอียดรูปที่ 5.17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.17 ความเครียดสนามไฟฟ้ากับแกป

5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.5.1 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ

ที่อิเล็กโตรดและแกปขนาดต่างๆดังรูปที่ 5.3 ค่าส.ป.ส.ความเบี่ยงเบนของแรงดันเบรกดาวน์ส่วนใหญ่(ร้อยละ 70%)มีค่าต่ำกว่า 0.11 ส่วนที่เหลือมีค่าอยู่ในช่วง 0.12-0.15 และพบที่แกปกว้างกว่า 5mm ส่วนการกระจายแรงดันเบรกดาวน์สามารถแทนด้วยการกระจายแบบปกติและการกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์ได้ดีดังรูปที่ 5.1 แต่มีบางสภาวะที่การกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์มีความไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เปรียบเทียบ ตัวอย่างเช่น ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5 mm แกป 9 mm เป็นต้น

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอดีตที่ศึกษาลักษณะสมบัติทางสถิติ ดังเช่นผลการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกดาวน์เมื่อระยะเวลาป้อนแรงดันต่างกันของ Ikeda และ Menju [23] ที่ได้จากการทดลองเบรกดาวน์น้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ คำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์มีส.ป.ส.ความเบี่ยงเบน(ν) อยู่ในช่วง 0.14-0.15 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ป้อนแรงดัน และการกระจายข้อมูลสามารถแทนด้วยการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ ได้เป็นอย่างดี โดยมีค่า δ อยู่ในช่วง 7-9 ส่วนของนักวิจัยท่านอื่นเมื่อทดลองที่สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอสูง ได้ค่า ส.ป.ส.การกระจายอยู่ในช่วง 0.10-0.18 [19]

ความแตกต่างที่เกิดขึ้น มีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยได้แก่ วิธีการป้อนแรงดัน คุณสมบัติของน้ำมันที่นำมาใช้ในการทดลอง กระบวนการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกระจายสนามไฟฟ้า และจำนวนครั้งที่ทำการทดลองซึ่งการกระจายแบบปกติจะใช้แทนการกระจายข้อมูลที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง ส่วนการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย การกระจายแบบปกติจะสามารถแทนได้ดีที่จำนวนครั้งที่ทำการทดลองน้อย เมื่อจำนวนครั้งที่ทำการทดลองมาก การกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์ สามารถใช้แทนได้ถูกต้องกว่า[19]

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับแกป ดังรูปที่ 5.3 การเพิ่มแกปมีผลทำให้แรงดันเบรกดาวน์มีค่าสูงขึ้น มีลักษณะโค้งแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังความสัมพันธ์[3]

$$V = kg^n$$

โดยที่

V= ค่าแรงดันเบรกดาวน์

k=ค่าคงที่

g=แกป

n= แฟกเตอร์เอ็กซ์โปเนนเชียล มีค่าระหว่าง 0-1

มีหมายความโดยนัยว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ มีขนาดลดลง ตามแกปที่กว้างขึ้น สามารถอธิบายจากผลกระทบของแกป[3] กล่าวคือ การเพิ่มระยะแกปเป็นการเพิ่มปริมาณของสิ่งเจือปนหรือจุดอ่อนแอ(weak link)ที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรด อีกทั้งความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณผิวทรงกลมมีค่าสูงขึ้นและมีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น โอกาสเกิดเบรกดาวน์จึงง่ายขึ้น

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับผลคูณของขนาดรัศมีทรงกลมกับแกป ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงในสเกลล็อก-ล็อก และมีค่าเพิ่มขึ้นตามผลคูณของขนาดรัศมีทรงกลมกับแกป สามารถอธิบายได้โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับแกป (รูปที่ 5.3) และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับขนาดรัศมีทรงกลม เมื่อแกปเท่ากับ 3 และ 5mm คงที่ เนื่องจากความสัมพันธ์ทั้งสองมีลักษณะเป็นโค้งเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังนั้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับผลคูณของขนาดรัศมีทรงกลมกับแกป จึงเป็นเส้นตรง ความสัมพันธ์นี้มีลักษณะคล้ายกับกฎแห่งความคล้ายคลึงกัน(similarity law) ในการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซกล่าวคือ แรงดันเบรกดาวน์เป็นฟังก์ชันของผลคูณของขนาดรัศมีทรงกลมกับความดันก๊าซ จึงอาจกล่าวได้ว่า การเกิดเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงก็มีลักษณะเป็นไปตามกฎแห่งความคล้ายคลึงกันด้วยเช่นกัน โดยเขียนสมการอย่างง่ายได้ คือ

$$U_b = f(r \cdot g)$$

โดยที่

U_b=แรงดันเบรกดาวน์

r=ขนาดรัศมีทรงกลม

g=แกป

เมื่อแกปคงที่ การทำให้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วยการลดขนาดทรงกลม ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์มีค่าลดลง ดังรูปที่ 5.5 สามารถอธิบายโดยพิจารณาการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด กล่าวคือ ที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวทรงกลมมีค่าสูงและการกระจายสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูง ทำให้การเกิดเบรกดาวน์ตามกลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวเชิงการค้า(หัวข้อ 2.4.2) เกิดขึ้นได้ง่าย

ส่วนการที่ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ที่แกป 5 mm มีค่าสูงกว่าที่แกป 3 mm เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำและมีค่าใกล้เคียงกันนั้น อาจอธิบายได้โดยวิเคราะห์กลไกการเกิดเบรกดาวน์ ที่โดยทั่วไปการเกิดดิสชาร์จหรือเบรกดาวน์เริ่มต้นจากมีฟองก๊าซเกิดขึ้น จากปรากฏการณ์ EHD หรือการเกิดดิสชาร์จเนื่องจากสิ่งเจือปน(หัวข้อ 2.4.2.2) จากการคำนวณการกระจายสนามไฟฟ้าที่แกป 3 หรือ 5 mm พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายทรงกลมมีค่าต่ำ และที่แกป 5 mm มีลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอกว่าที่แกป 3 mm(∇E มีค่าต่ำกว่า) อาจเป็นไปได้ว่า การยืดขนาดของฟองก๊าซจากแรงที่กระทำต่อฟองก๊าซที่มีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเครียดสนามไฟฟ้า(E)และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า(∇E) ที่แกป 5mm มีการขยายตัวช้ากว่าเนื่องจากแรงมีค่าต่ำ(∇E มีค่าต่ำ) ทำให้การเกิดดิสชาร์จในฟองก๊าซเกิดขึ้นยากกว่าที่แกป 3 mm อีกนัยหนึ่งคือความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ที่แกป 5mm มีค่าสูงกว่าที่แกป 3 mm นั่นเอง

ทางด้านผลกระทบของอุณหภูมิ ความคงทนต่อการเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิต่างๆกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติหลายตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ได้แก่

-คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนืด ความตึงผิว และ ความหนาแน่น เป็นต้น

-คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ความสามารถในการละลายของน้ำและอากาศในน้ำมันที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ [6,24]

-คุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น การนำกระแส เป็นต้น

การเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาวน์ตามอุณหภูมิอาจเกิดจากผลกระทบของคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งในคุณสมบัติที่กล่าวมานี้

การที่อุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้น มีผลทำให้ ความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะสูงขึ้น และเกิดการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งควรจะทำให้แรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันมีค่าต่ำลง แต่จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5.6 ที่แรงดันเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำมัน ทำให้ไม่สามารถใช้คุณสมบัตินี้อธิบายลักษณะที่เกิดขึ้นได้

กลไกการเกิดดิสชาร์จหรือเบรกดาวน์ของแรงดันกระแสสลับ โดยทั่วไป จะปรากฏเมื่อมีฟองก๊าซเกิดขึ้นในน้ำมันจากปรากฏการณ์ EHD หรือความร้อนจากความหนาแน่นกระแสสูงในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง[9,10] ถ้าเรายอมรับคุณสมบัติที่ว่าความสามารถในการละลายของก๊าซเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ[24] ปรากฏการณ์ที่แรงดันเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิก็สามารถอธิบายได้

จากรูปที่ 5.6 (ก) เราสังเกตว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาวน์มีค่าสูงขึ้นเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แนวโน้มนี้ สามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎีปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง(stress volume หรือ critical volume)

เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ ดังเช่นกรณีที่ r=15mm และ g=5mm แม้ว่าความสามารถในการละลายของก๊าซจะมีค่าสูงที่อุณหภูมิสูงก็ตาม แต่เนื่องจากการกระจายสนามไฟฟ้ามีลักษณะเกือบสม่ำเสมอ ปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีบริเวณกว้าง บริเวณนี้จึงยังคงมีฟองก๊าซอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้แรงดันเบรกดาวน์ไม่เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามาก ดังเช่นกรณี r=2.5mm และ g=5mm ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงบริเวณผิวทรงกลม ปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีบริเวณแคบ เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้น ความสามารถในการละลายของก๊าซเพิ่มขึ้น เป็นไปได้ว่าฟองก๊าซที่อยู่ในบริเวณปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีจำนวนน้อยกว่าที่อุณหภูมิห้อง โอกาสเกิดเบรกดาวน์ต่ำลง ทำให้แรงดันเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้น

แนวโน้มลักษณะนี้ได้รับการยืนยันอีกครั้งตามผลการทดลองที่ทรงกลมขนาดรัศมี r=2.5mm ที่แกปค่าต่างๆ ดังรายละเอียดในรูปที่ 5.6 (ข) $\%U_d$ มีลักษณะคงที่ไม่ขึ้นกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า การที่ทรงกลมขนาดเล็ก ปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเพิ่มขึ้นน้อยเมื่อแกปกว้างขึ้น เพราะความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงอยู่ในบริเวณปลายทรงกลม(sphere tip)

นอกจากนี้ ที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าใกล้เคียงกัน โดยปกติปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากขึ้นตามแกปที่กว้างขึ้น ดังนั้น $\%U_d$ ที่แกป 5mm จึงมีค่าต่ำกว่า $\%U_d$ ที่แกป 3mm

5.5.2 แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์

เมื่อกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ ได้แก่ แรงดันเบรกดาวน์และส.ป.ส.ความเบี่ยงเบน การเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์กับผลการทดลองในอดีตทำได้ยากเนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง เช่น รูปร่างอิเล็กโตรด ลักษณะการป้อนแรงดัน และแกป เป็นต้น มีความแตกต่างกัน ส่วนส.ป.ส.ความเบี่ยงเบนนั้น สามารถใช้เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่การกระจายสนามไฟฟ้าต่างกันและเป็นตัวชี้สภาพของอิเล็กโตรดระหว่างการทดลองได้ จากรูปที่ 5.13 ค่าส.ป.ส.ความเบี่ยงเบนของการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 0.03-0.13 เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Endicott และ Weber [25] ที่ศึกษาผลกระทบของพื้นที่ผิวอิเล็กโตรดต่อแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์โดยน้ำมันที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณความชื้น ≤20ppm และปริมาณก๊าซ ≤8.8% อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบได้ค่าส.ป.ส.ความเบี่ยงเบนอยู่ในช่วง 0.06-0.12 และไม่มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของอิเล็กโตรด การที่ค่าส.ป.ส.ความเบี่ยงเบนมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าไม่มีผลต่อลักษณะการเกิดเบรกดาวน์และไม่มีผลกระทบจากความเสียหายของอิเล็กโตรดระหว่างการทดลอง

ลักษณะการเพิ่มของแรงดันเบรกดาวน์ตามแกปดังรูปที่ 5.13 สามารถอธิบายได้ว่ามีผลกระทบจากแกปและขนาดทรงกลมเช่นเดียวกับกรณีแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ และเป็นที่น่าสังเกตว่าการกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง ดังกรณีที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm แรงดันเบรกดาวน์กรณีแรงดันขั้วลบมีค่าสูงกว่าแรงดันขั้วบวก แต่ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย แรงดันขั้วบวกกลับมีค่าสูงกว่า แนวโน้มลักษณะนี้จะเห็นชัดเจนจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ที่แกปคงที่ ดังรูปที่ 5.14 ที่ทำการแปรค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนขนาดทรงกลม ที่ทรงกลมขนาดเล็กหรือการกระจายสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูง แรงดันเบรกดาวน์ขั้วลบจะสูงกว่าแรงดันเบรกดาวน์ขั้วบวก เมื่อขนาดทรงกลมโตขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง(FF~1.5) แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วลบจะต่ำกว่าแรงดันขั้วบวก สามารถอธิบายด้วยผลกระทบของขั้วแรงดันกล่าวคือเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายทรงกลมถึงค่าเริ่มต้นเกิดดิสชาร์จบางส่วน ขณะที่แรงดันขั้วบวก ประจุจะวิ่งจากน้ำมันมาที่ขั้วอิเล็กโตรดทรงกลม ทำให้ประจุบวกซึ่งมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำจับกลุ่มอยู่หน้าผิวทรงกลม

ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นกรณีแรงดันขั้วลบอิเล็กโตรดทรงกลมจะฉีดอิเล็กตรอนให้กับน้ำมัน ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณผิวทรงกลมลดลงทำให้การเกิดเบรกดาวน์ของขั้วลบเกิดยากกว่าขั้วบวก

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับผลคูณระหว่างขนาดรัศมีทรงกลมกับแกป มีลักษณะเป็นเส้นตรงในสเกลล็อก-ล็อกเช่นเดียวกับกรณีแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก ขั้วลบและกระแสสลับ มีค่าใกล้เคียงกัน อธิบายได้เช่นเดียวกับคำอธิบายของกรณีแรงดันกระแสสลับ

รูปที่ 5.15 ที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าต่ำ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ที่แกป 3 mm มีแนวโน้มคงที่ แตกต่างจากกรณีแรงดันกระแสสลับที่มีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน(รูปที่ 5.5) สามารถอธิบายได้ 2 ลักษณะคือ ในช่วงนี้กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์มีความแตกต่างกับกลไกการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันกระแสสลับ หรืออาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของค่าแรงดันเบรกดาวน์เนื่องจากจำนวนครั้งที่ทำการทดลองน้อย อย่างไรก็ตามก็ยังให้แนวโน้มที่เห็นว่าการที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลงจากการเปลี่ยนขนาดอิเล็กโตรดไม่ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์แตกต่างกัน มีความเป็นไปได้ว่ากลไกการเกิดเบรกดาวน์เริ่มมีผลกระทบของพื้นที่ผิว[25] เข้ามามีความสำคัญมากกว่าการกระจายสนามไฟฟ้า

นอกจากนี้ สังเกตว่าที่ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ที่แกป 3 mm มีค่าสูงกว่าที่แกป 5 mm ทั้งแรงดันขั้วบวกและขั้วลบ ก็สามารถอธิบายได้จากผลกระทบของแกปเช่นกัน และสังเกตว่าเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ มีแนวโน้มว่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่แกป 3 mm กับที่แกป 5 mm มีค่าเท่ากัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกรณีแรงดันกระแสสลับ(รูปที่ 5.5) เพียงแต่ในกรณีแรงดันกระแสสลับเห็นชัดเจนว่าความเครียดสนามไฟฟ้าทีเกิดเบรกดาวน์ที่แกป 5mm มีค่าสูงกว่าที่แกป 3 mm แสดงว่าที่สภาวะนี้มีผลกระทบจากปัจจัยอื่นที่มีอิทธิพลมากกว่าผลกระทบของแกป เป็นไปได้ว่ามีผลกระทบของพื้นที่ผิวอิเล็กโตรดเกิดขึ้นเมื่อทดลองที่แกป 3 mm เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ขณะที่ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แกป 5 mm มีการเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง

ด้านผลกระทบของอุณหภูมิ ลักษณะของแรงดันเบรกดาวน์ เมื่อทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์แบ่งได้เป็น สองลักษณะ (รูปที่ 5.14) ลักษณะแรกแรงดันเบรกดาวน์มีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิทั้งสองชนิดขั้วแรงดันสอดคล้องกับผลการทดลองในอดีต[5] แบบที่สองพบเมื่อทำการป้อนแรงดันชนิด ขั้วลบที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่ามาก โดยแรงดันเบรกดาวน์มีค่าคงที่ไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับผลการทดลองในอดีต[26,27] อธิบายได้ดังนี้

รูปที่ 5.15 (ก) การที่แรงดันเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยในช่วงที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า FF_m $\%U_{dq}$ มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเช่นเดียวกับกรณีแรงดันกระแสสลับ เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่า FF_m แรงดันเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน แต่ $\%U_{dq}$ มีแนวโน้มลดลง แตกต่างจากกรณีแรงดันกระแสสลับ นอกจากนี้ที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูง(FF>2.5) ดังรูปที่ 5.15 (ข)ที่ได้จากการทดลองปรับแกปในช่วง 5-15 mm โดยใช้ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm พบว่า $|\%U_{dq}|\leq 5\%$ หรือแรงดันเบรกดาวน์มีแนวโน้มคงที่เท่ากับแรงดันเบรกดาวน์ที่อุณหภูมิห้อง แสดงว่าผลกระทบของปัจจัยตัวอื่นอาจมีบทบาทต่อการเกิดเบรกดาวน์มากขึ้นตามแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า สมมติฐานว่ามีสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัย ปัจจัยแรก เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูง อาจมีผลกระทบของเวลาล่าช้าเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เนื่องจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้น้ำมันเกิดเบรกดาวน์ จำเป็นต้องใช้แรงดันสูงมาก เวลาล่าช้าอาจมีผลกระทบในทางตรงข้ามกับผลกระทบของอุณหภูมิต่อแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ ทำให้ไม่เห็นความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับแรงดันเบรกดาวน์ ดังรูปที่ 5.15 (ข) ที่แรงดันเบรกดาวน์มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยหรือมีแนวโน้มคงที่ แม้ว่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม ยกเว้นแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ และอีกแนวทางหนึ่ง ถ้าเรายอมรับว่าการเกิดเบรกดาวน์อิมพัลส์ มีกลไกเริ่มต้นจากการเกิดโพรงอากาศ ที่เกิดจากกระแสรั่วที่มีความหนาแน่นสูงในบริเวณพื้นผิวเล็กที่ขรุขระขนาดเล็ก(micro surface roughness) ซึ่งมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงทำให้น้ำมันมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยใช้ ช่วงเวลาอยู่ในอันดับของไมโครวินาที เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำมัน ทำให้บริเวณนั้นเกิดเป็นโพรงอากาศขึ้น[28] ถ้าฟองก๊าซอยู่ในบริเวณปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงและ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฟองก๊าซมีค่าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของอากาศ ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและอาจเกิดเบรกดาวน์ต่อมา ในช่วงที่การกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย($FF<FF_m$) เนื่องจากอิเล็กโตรดทรงกลมมีขนาดใหญ่ ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวที่ขรุขระมีค่าต่ำ ทำให้เกิดฟองก๊าซยาก แม้ว่าอุณหภูมิของน้ำมันจะสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าจึงมีผลกระทบต่อกลไกการเกิดเบรกดาวน์น้อย แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า $\%U_{dq}$ มีความเป็นไปได้ที่จะมีอิทธิพลมาจากปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง แต่เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น($FF>FF_m$) อิเล็กโตรดทรงกลมมีขนาดเล็ก บริเวณพื้นผิวขรุขระจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมาก เนื่องจากดูเหมือนว่ามีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดทรงกลม ทำให้โอกาสเกิดฟองก๊าซได้ง่ายกว่าและสามารถก่อให้เกิดเบรกดาวน์ได้ แม้ว่าปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะลดลง จึงมีผลทำให้เกิดแนวโน้มการลดลงของ $\%U_{dq}$ เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูง

เกินช่วงนี้ไป(FF>2.5) อิเล็กโตรดทรงกลมมีขนาดเล็กมาก บริเวณพื้นผิวที่ขรุขระมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมาก ทำให้ฟองก๊าซเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้นอีก ทำให้แรงดันเบรกดาวน์มีแนวโน้มคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

จากคำอธิบายทั้งสองลักษณะดังกล่าว จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อหาคำอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง

5.5.3 อัตราส่วนแรงดันอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ

จากผลการทดลองดังในรูปที่ 5.16 อัตราส่วนแรงดันอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ(rms)ช่วงเวลา 1 วินาทีที่ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์เท่ากับ 20% ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1.4-2.1 ถ้าเราสมมติให้อัตราส่วนแรงดันเบรกดาวน์ ช่วงเวลา 1 วินาที กับ แรงดันเบรกดาวน์ ช่วงเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1.3 [29] จะได้อัตราส่วนอิมพัลส์(อัตราส่วนของความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับที่ช่วงเวลาการทดสอบเท่ากับ 1 นาที)เท่ากับ 1.8-2.3 (ที่ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ 20%)

Bellaschi และ Teaque[29] ได้ทำการทดลองเบรกดาวน์ในน้ำมันโดยใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ ที่แกป 6.35 mm พบว่า อัตราส่วนอิมพัลส์มีค่า 2.5

ตามมาตรฐาน IEC 71-1976[30] ที่ระดับแรงดันสูงสุดของอุปกรณ์ในช่วง 3.6-36 kV อัตราส่วนแรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ต่อแรงดันคงทนอยู่ได้กระแสสลับมีค่าอยู่ในช่วง 1.2-2.0 ส่วนที่ระดับแรงดันสูงสุดของอุปกรณในช่วง 52-245 kV มีค่าอยู่ในช่วง 1.1-1.3

อัตราส่วนแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอดีตและแรงดันทดสอบที่มาตรฐานกำหนด มีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน

ความแตกต่างของอัตราส่วนแรงดันอิมพัลส์ มาจากความแตกต่างของรูปร่างอิเล็กโตรดและคุณสมบัติของฉนวน เช่น ปริมาณความชื้นและก๊าซ เป็นต้น ที่มีผลกระทบอย่างรุนแรงต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ จนอาจทำให้การทดลองได้ค่าแรงดันอิมพัลส์สูงกว่าแรงดันกระแสสลับถึง 7 เท่า [28]

5.5.4 การเปรียบเทียบกับข้อมูลการออกแบบ

ลักษณะแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับช่วงเวลา 1 วินาที ที่ทรงกลมรัศมี 5 mm ที่คำนวณได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการทดลองของ Kappler อาจอธิบายดังนี้

เหตุที่แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับช่วงเวลาทดสอบสั้นมีค่าสูงกว่าช่วงเวลา 1 นาที อาจเป็นเพราะการที่อนุภาคเจือปนต้องการเวลาในการเคลื่อนที่มาเชื่อมต่อกัน ตามกลไกการเกิด

เบรกดาวน์เนื่องจากอนุภาคเจือปน ถ้าน้ำมันที่ใช้มีความบริสุทธิ์สูง ช่วงเวลาที่ป้อนแรงดันอาจจะไม่มีผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์[29]

เมื่อคำนวณอัตราส่วนแรงดันกระแสสลับช่วงเวลา 1 วินาทีเทียบกับแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ช่วงเวลา 1 นาที ของ Kappler พบว่ามีค่าประมาณ 2.3 เปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองของ Bellaschi และ Teaque[29] ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอมีค่าเท่ากับ 1.5 และ ผลการทดลองของ Hayden และ Eddy [26]ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยมีค่าเท่ากับ 1.3 จะพบว่ามีค่าแตกต่างกันประมาณ 50 % อาจเกิดจาก ค่าแรงดันกระแสสลับ ช่วงเวลา 1 นาที จากการทดลองของ Kappler เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่มีโอกาสเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่ำจึงอาจทำให้ค่าแรงดันกระแสสลับที่ได้มีค่าต่ำกว่าของท่านอื่น

การที่กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทรงกลมรัศมี 5 mm ที่คำนวณจากการทดลองป้อนแรงดันกระแสสลับมีความชันแตกต่างกับที่ได้จากการทดลองป้อนแรงดันอิมพัลส์เพียงเล็กน้อยและมีลักษณะขนานกับกราฟของ Kappler เราอาจสรุปได้ว่าลักษณะสมบัติเชิงสถิติของแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์จากการวิจัยนี้และจากการทดลองของ Kappler ใกล้เคียงกัน และอาจเป็นไปได้ที่จะนำกราฟการออกแบบของ Kappler นี้มาใช้เป็นกราฟสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ที่มีการใช้น้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านกระบวนการควบคุมอนุภาคเจือปน ความชื้นและก๊าซ(หัวข้อ 3.2)เป็นฉนวนเหลว

นอกจากนี้การที่กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm มีความแตกต่างกับที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5 mm โดยมีค่าความชันมากกว่าหรืออีกนัยหนึ่งคือความเครียดสนามไฟฟ้าที่ความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์ 2% มีค่าลดลงตามแกปที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจเป็นเพราะที่แกปกว้าง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวทรงกลมมีค่าสูง ทำให้มีโอกาสเกิดดิสชาร์จบางส่วนและนำมาสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ง่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 ส่วนนำ

การทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เริ่มจากความต้องการที่จะทราบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สามารถใช้เป็นข้อมูล พื้นฐานในการออกแบบและผลกระทบจากพารามิเตอร์ในทางปฏิบัติ 2 พารามิเตอร์ คือ การกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ ที่มีต่อลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมัน หม้อแปลง เมื่อทำการศึกษาผลการทดลองในอดีตได้พบปัญหา 3 ประเด็น ประเด็นแรกคือ การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ กรณีแรงดันกระแสสลับส่วนใหญ่ทดลองโดยใช้อิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่พบผลการศึกษาที่การกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและไม่สม่ำเสมอสูง ประเด็นที่สองคือการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดัน อิมพัลส์ได้ข้อสรุปแตกต่างกัน และประเด็นสุดท้ายคือข้อมูลผลการทดลองที่นำเสนอผลการวิจัยโดยส่วนใหญ่มักจะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย ทำให้ยากต่อการนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลทางด้าน การออกแบบ จึงทำการศึกษาจากประเด็นปัญหาเหล่านี้ โดยต้องการหาคำตอบว่า การกระจายสนามไฟฟ้า(ขนาดอิเล็กโตรดและแกป)และอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงมีอิทธิพลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงอย่างไร คาดว่าเมื่อการศึกษาเสร็จสิ้น จะทำให้เราได้รับประโยชน์ 2 ประการ ประการแรกทำให้ทราบถึงผลกระทบของการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมันที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง และประการที่สองสามารถนำค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามาใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นลักษณะเชิงทดลอง ทำการหาลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านเครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและความชื้น เพื่อให้น้ำมันมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง โดยคาดว่าอนุภาคเจือปนจะมีขนาดเล็กกว่า 1μm และปริมาณความชื้นประมาณ 30 ppm ชุดทดลองใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ มีตัวแปรที่ศึกษาคือ ขนาดอิเล็กโตรด แกปและอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง แรงดันทดสอบทั้งแรงดันกระแสสลับ อิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ

น้ำมันตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำมันหม้อแปลงชนิดน้ำมันแร่ ในการทดลองที่สภาวะต่างๆ จะทำการเปลี่ยนน้ำมันใหม่ที่ผ่านการควบคุมลงในชุดทดลอง ก่อนเริ่มต้นการทดลองในแต่ละวัน และระหว่างที่ทำการทดลองทำการดูดอากาศในชุดทดลองให้ต่ำกว่า 0.2bar เป็นระยะ พร้อมทั้งทำการสุ่มตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันด้วยการวัดคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 156:1963 ทั้งก่อนและหลังการทดลองน้ำมันตัวอย่างชุดนั้น

การทำการทดลองกรณีแรงดันกระแสสลับใช้วิธีป้อนแรงดันเพิ่มแบบต่อเนื่อง แบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติของแรงดันเบรกดาวน์ของ น้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิ 30°C ทำการหาฟังก์ชันการกระจายทางทฤษฎีที่เหมาะสมเพื่อใช้คำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ต่ำ เลือกจำนวนครั้งที่ทำการทดลองจากขอบเขตความคลาดเคลื่อนการกระจายได้ค่าเท่ากับ 24 ครั้ง ทำการทดลองเบรกดาวน์โดยแปรขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมและแกป ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จะผ่านการทดสอบความเป็นอิสระต่อกันโดยใช้การสร้างกราฟเปรียบเทียบ การหาฟังก์ชันการกระจายข้อมูล และทำการแทนการกระจายข้อมูลด้วยการกระจายทางทฤษฎี(การกระจายแบบปกติ และการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์) พารามิเตอร์ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์และส.ป.ส.ความเบี่ยงเบนที่คำนวณได้จะนำมาใช้ศึกษาผลกระทบของขนาดอิเล็กโตรด และแกป ช่วงที่สอง เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ทำการทดลองที่แต่ละสภาวะโดยใช้จำนวนครั้งที่ทำการทดลองเท่ากับ 8 ครั้ง การเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ใช้การคำนวณพารามิเตอร์ ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์

การทดลองแรงดันอิมพัลส์ใช้วิธีการหาแรงดันเบรกดาวน์ที่ควอนไทล์อันดับต่ำ ป้อนแรงดันที่แต่ละระดับ 5 ครั้ง ค่าแรงดันคงทนอยู่ได้(ค่าแรงดันระดับขั้นสูงสุดที่ยังไม่เกิดเบรกดาวน์จากการป้อนแรงดันที่ระดับแรงดันนั้นเป็นจำนวน 5 ครั้ง)อยู่ในตำแหน่งควอนไทล์อันดับที่ 20% (จากการคำนวณทางทฤษฎี) คำนวณค่าแรงดันคงทนอยู่ได้เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองเบรกดาวน์จำนวน 5 ครั้ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม แกป อุณหภูมิ และขั้วแรงดัน

6.2 สรุปผลการทำวิทยานิพนธ์

หลังจากที่ทำการทดลองตามสภาวะต่างๆแล้ว ได้ทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับแกป แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า อุณหภูมิ และ ขั้วแรงดัน ได้ผลดังต่อไปนี้

6.2.1 แรงดันกระแสสลับ

พารามิเตอร์ ส.ป.ส.ความเบี่ยงเบนของการทดลองหาลักษณะสมบัติเชิงสถิติ ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 0.11 ฟังก์ชันการกระจายข้อมูลแทนด้วยการกระจายแบบปกติได้อย่างเหมาะสมกว่าการกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์ แม้ว่าผลต่างของค่าความน่าจะเป็นของฟังก์ชันการกระจายข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์กับความน่าจะเป็นของการกระจายทางทฤษฎีทั้งสองจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ของการกระจาย Weibull แบบ 3 พารามิเตอร์ บางสภาวะมีค่าที่ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงเช่น ที่ r=10mm g=3mm ได้ค่าแรงดันที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์เป็นศูนย์(U_{d0})เท่ากับ 3 kV และที่ r=5 g=9mm ที่คำนวณ U_{d0} ได้ค่าเท่ากับ –521.3 kV เป็นต้น

แรงดันเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดทรงกลมและแกป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับแกป มีลักษณะเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ลดลงตามแกปที่กว้างขึ้น ถ้ามองในด้านการกระจายสนามไฟฟ้ากล่าวได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงเมื่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงขึ้น

นอกจากนี้แรงดันเบรกดาวน์ยังมีลักษณะสอดคล้องกับกฎแห่งความคล้ายคลึงกัน (similarity law) กล่าวคือแรงดันเบรกดาวน์มีค่าแปรตามผลคูณระหว่างขนาดรัศมีทรงกลมกับแกป และมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเชิงเส้นในสเกลล็อก-ล็อก

เมื่อแกปคงที่ การเพิ่มขนาดอิเล็กโตรดมีผลทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้น ที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าใกล้เคียงกันและมากกว่า 1.5 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ที่แกปแคบมีค่าสูงกว่าที่แกปกว้าง เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีต่ำกว่า 1.5 จะเกิดแนวโน้มตรงข้าม

เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 80°C ส่งผลทำให้แรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันมีแนวโน้มสูงตามไปด้วย เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างแรงดันเบรกดาวน์ที่อุณหภูมิ 80°C เทียบกับที่อุณหภูมิ 30°C แปรตามความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการปรับระยะแกปและขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม เมื่อแกปคงที่ ทำการเปลี่ยนค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าเดียวกัน เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่แกปแคบมีค่ามากกว่าที่แกปกว้าง และเมื่อทดลองในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง ด้วยการทดลองโดยใช้ทรงกลมขนาดเล็ก ทำการเปลี่ยนระยะแกป พบว่า เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีแนวโน้มคงที่และมีค่าประมาณ 40%

6.2.2 แรงดันอิมพัลส์

แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์มีค่าแปรตามแกป และขนาดอิเล็กโตรดทรงกลมเช่นเดียวกับแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์มีค่าลดลงตามแฟกตอร์สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น ที่แกปค่าเดียวกัน ยกเว้นที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ (g=3mm) ความเครียดสนามไฟฟ้ามีแนวโน้มเริ่มคงที่ และที่ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แกปกว้างมีแนวโน้มที่จะมีค่าเท่ากับหรือสูงกว่าที่แกปแคบ ลักษณะคล้ายกับกรณีของแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ แต่เกิดที่ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าต่ำกว่า

นอกจากนี้แรงดันคงทนอยู่ได้ยังมีลักษณะเป็นไปตามกฎแห่งความคล้ายคลึงกันเช่นเดียวกับกรณีแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ แนวโน้มความสัมพันธ์ของแรงดันขั้วบวกใกล้เคียงกับแรงดันขั้วลบ อีกทั้งค่าความชันของกราฟทั้งแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ ก็มีค่าใกล้เคียงกับความชันของกราฟกรณีแรงดันกระแสสลับ

เมื่อปรับขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม เมื่อแกปคงที่ พบว่า การกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย(ทรงกลมขนาดใหญ่)จะมีค่าแรงดันคงทนอยู่ได้ขั้วบวกต่ำกว่าแรงดันคงทนอยู่ได้ขั้วลบ แต่ที่การกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง แรงดันคงทนอยู่ได้ขั้วลบจะมีค่าสูงกว่าขั้วบวก

เมื่อทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ เราพบลักษณะของแรงดันเบรกดาวน์ 2 ลักษณะ ลักษณะแรกมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ พบที่การกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง แรงดันเบรกดาวน์มีแนวโน้มคงที่ไม่เปลี่ยนตามอุณหภูมิ ทั้งแรงดันขั้วบวกและขั้วลบ

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของแรงดันเบรกดาวน์($\%U_d$)ที่อุณหภูมิ 80 °C เทียบกับที่อุณหภูมิ 30°C มีความแตกต่างจากแรงดันกระแสสลับ กล่าวคือ เมื่อแกปคงที่ $\%U_d$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นแต่น้อยกว่า FF_m เช่นเดียวกับแรงดันกระแสสลับ เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงกว่า FF_m $\%U_d$ มีแนวโน้มลดลง จนเมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 2.5 $\%U_d$ จะมีค่าอยู่ในช่วง ±5%คงที่

6.2.3 ฐานข้อมูลเพื่อการออกแบบ

อัตราส่วนแรงดันอิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ ช่วงเวลา 1 วินาที ที่ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ 20% มีค่าอยู่ในช่วง 1.4-2.1 ซึ่งเมื่อคำนวณโดยการสมมติให้ แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ช่วงเวลา 1 วินาที ต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ช่วงเวลา 1 นาที มีค่าประมาณ 1.3 จะได้อัตราส่วนอิมพัลส์เท่ากับ 1.8-1.3

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้ากับแกป ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5 mm ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ที่ความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวน์เท่ากับ 2% จากการป้อนแรงดันกระแสสลับ ช่วงเวลาการป้อนแรงดัน 1 s มีลักษณะขนานกับความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่ำของKappler ที่ทำการทดลองด้วยการป้อนแรงดันกระแสสลับ ช่วงเวลา 1 นาที และมีค่าสูงกว่าประมาณ 2.3 เท่า แต่ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ความเครียดสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5 mm ที่แกปแคบ(<2.5mm) และมีค่าต่ำกว่าเมื่อแกปกว้าง

จากผลการทดลองในอดีตที่ได้พบว่าอัตราส่วนแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ช่วงเวลา 1 วินาที ต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ช่วงเวลา 1 นาที เท่ากับ 1.3 ถ้าเราสมมติว่าอัตราส่วนค่านี้ใช้ได้กับทุกสภาวะการกระจายสนามไฟฟ้าที่ทำการทดลองและที่ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์เท่ากับ 2% ที่ทรงกลมรัศมี 5 mm เราจะได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์จากการป้อนแรงดันกระแสสลับ ช่วงเวลา 1 นาที ที่ได้จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์จากการป้อน แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ช่วงเวลา 1 วินาที หารด้วยอัตราส่วนดังกล่าว มีค่าเป็น 1.8 เท่าของความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่ำของKappler

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 การนำผลการทำวิทยานิพนธ์ไปใช้งาน

จากผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และการกระจายสนามไฟฟ้าโดยใช้วิธีปรับแกปและขนาดอิเล็กโตรด เราสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพิจารณาออกแบบการฉนวนน้ำมันได้ดังนี้

1) การออกแบบการฉนวนน้ำมันกรณีแรงดันกระแสสลับสามารถใช้ข้อมูลของน้ำมันที่สภาวะอุณหภูมิห้องได้ ไม่ต้องคำนึงถึงสภาวะที่น้ำมันมีอุณหภูมิสูง เนื่องจากแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันมีค่าสูงขึ้นเมื่อน้ำมันอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 30-80°C ทั้งการกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและไม่สม่ำเสมอสูง

2) การออกแบบการฉนวนเพื่อการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับ ช่วงเวลา 1 นาที สามารถใช้ผลการทดลองของ Kappler ในการออกแบบการฉนวนน้ำมันที่น้ำมันมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้ทั้งที่แกปแคบและแกปกว้าง แต่มีเงื่อนไขว่าสามารถใช้ได้กับการกระจายสนามไฟฟ้าที่มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5 mm และข้อสรุปนี้อยู่บนสมมติฐานว่าอัตราส่วนแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ช่วงเวลา 1 วินาที ต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับช่วงเวลา 1 นาที เท่ากับ 1.3

3) การออกแบบการฉนวนน้ำมันสำหรับการเบรกดาวน์แรงดันอิมพัลส์ เราสามารถทำการออกแบบการฉนวนแรงดันกระแสสลับก่อน แล้วจึงพิจารณาแรงดันอิมพัลส์โดยใช้อัตราส่วนอิมพัลส์ เท่ากับ 1.8

6.3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวกับการเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง การทำการออกแบบกระบวนการทดลอง การสร้างอุปกรณ์เพื่อใช้ทำการทดลอง และระหว่างการทำการทดลองตามที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบไว้ ได้พบประเด็นต่างๆ ที่ผู้วิจัยไม่ได้ยกมาพิจารณาระหว่างการออกแบบกระบวนการทดลอง ทำให้เกิดความไม่สะดวกในการทดลอง ซึ่งผู้ที่จะทำการศึกษาวิจัยทางด้านลักษณะสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงต่อไป จะต้องปรับปรุงแก้ไข ในที่นี้ได้เสนอแนะไว้ 7 ข้อ ดังนี้

1)เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้นที่สร้างขึ้นสำหรับใช้ควบคุมคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง แม้ว่าจะทำให้น้ำมันหม้อแปลงมีความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับตามมาตรฐาน IEC 156:1963 ประมาณ 55 kV แต่การติดตั้งและใช้งานใช้เวลามาก และวิธีการนำน้ำมันมาบรรจุลงในบีกเกอร์ชุดทดลองมีความยุ่งยากพอสมควร

2) ชุดทดลอง แม้ว่าจะเป็นระบบปิด ซึ่งจะสามารถป้องกันความชื้นและฝุ่นละอองจากภายนอก แต่ภายในชุดทดลองก็มีอากาศอยู่ ทำให้น้ำมันมีการเจือปนของก๊าซและความชื้น แม้ว่าความชื้นจะใช้เวลานานในการละลายในน้ำมันจนถึงสภาวะอิ่มตัว แต่ก๊าซมีความสามารถในการละลายอย่างรวดเร็ว จึงต้องทำการลดความดันก๊าซในชุดทดลองอย่างสม่ำเสมอเหลือ 0.2 bar ระหว่างการทดลอง ทุก 10 นาที ทำให้เวลาที่ใช้ทำการทดลองนานขึ้นและเพิ่มความซับซ้อนให้กับกระบวนการทดลอง

3) การทดลองแรงดันอิมพัลส์ โดยปกติจะใช้เวลานานมากเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองแรงดันกระแสสลับ และจำนวนครั้งการทดลองทำได้น้อยครั้งเนื่องจากความเสียหายของผิวอิเล็กโตรดจะกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน์ ต้องทำการเปลี่ยนอิเล็กโตรด การออกแบบชุดทดลองจึงควรคำนึงถึงปัจจัยนี้ด้วย

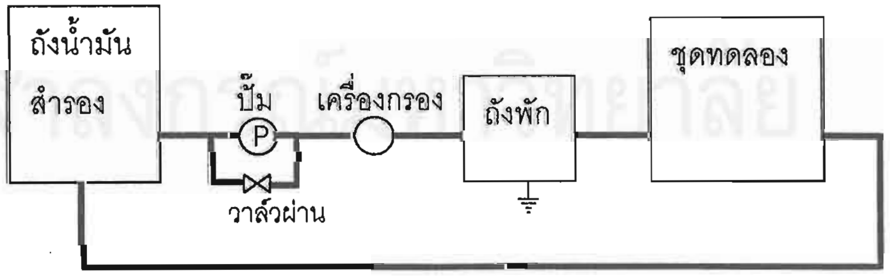
4) วิธีการป้อนแรงดันเมื่อทำการทดลองฉนวนเหลว จะต้องคำนึงถึงความสามารถในการคืนตัวของประจุไฟฟ้าที่ยังเหลือค้างอยู่หลังเกิดเบรกดาวน์ การทดลองเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลง จึงควรใช้วิธีแรงดันเพิ่มทั้งการทดลองเบรกดาวน์ด้วยแรงดันกระแสสลับและอิมพัลส์

5) ในการทดลองเบรกดาวน์จากแรงดันกระแสสลับ ต้องคำนึงถึงการเสียสภาพน้ำมันหลังเกิดเบรกดาวน์ ควรใส่ความต้านทานหน่วงเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจร และใช้จำนวนครั้งการทดลองน้อยครั้ง

6) การทดลองอิมพัลส์ ข้อที่ควรคำนึงคือการเสียสภาพของอิเล็กโตรดเมื่อเกิดเบรกดาวน์ซึ่งสามารถลดผลกระทบได้ด้วยการต่อความต้านทานอนุกรมกับชุดทดลองและใช้โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานในการวัดแรงดัน และเนื่องจากกลไกการเกิดเบรกดาวน์มีผลของเวลาในการเกิดเบรกดาวน์เกี่ยวข้องด้วย การศึกษาเกี่ยวกับแรงดันเบรกดาวน์ ระหว่างการทดลองควรทำการวัดเวลาที่เกิดเบรกดาวน์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย

7) การตรวจสอบคุณภาพของน้ำมัน เนื่องจากในที่นี้ใช้การวัดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 156:1963 เพียงอย่างเดียว เป็นเครื่องมือตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำมันก่อนและหลังการทดลองที่แต่ละสภาวะ การประมาณความชื้นใช้การเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้กับผลการทดลองในอดีต แม้ว่าจะได้ค่าใกล้เคียงกันที่ปริมาณความชื้น 30 ppm อย่างไรก็ตามควรจะทำการวัดปริมาณความชื้นเพื่อให้เกิดความถูกต้องสมบูรณ์ และควรทำการวัด ปริมาณก๊าซด้วย เนื่องจากมีผลกระทบต่อแรงดันเบกรดาวน์เช่นกัน

จากประเด็นหลายประการที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถปรับปรุงให้กระบวนการทดลองมีความสะดวกและรวดเร็วขึ้น ด้วยการใช้การทดลองในระบบปิดที่มีกระบวนการดังรูปที่ 6.1 ที่ประกอบด้วยชุดทดลอง ถังน้ำมันสำรองขนาดใหญ่(200 L) ถังพักน้ำมัน(relaxation tank) ปั๊มและเครื่องกรอง หลักการที่สำคัญคือการมีระบบการไหลวนน้ำมัน โดยทำการปั๊มผ่านเครื่องกรองผ่านถังพักเพื่อลดประจุที่เกิดจากstreaming electrification เมื่อน้ำมันผ่านเครื่องกรอง น้ำมันที่นำมาใช้ในกระบวนการนี้จะได้รับการตรวจสอบและควบคุมคุณสมบัติโดยอาศัยเครื่องควบคุมคุณภาพน้ำมันที่ใช้ในโรงงานผลิตหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีความสามารถในการจัดการกับน้ำมันปริมาณมากได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 6.1 กระบวนการทดลองที่นำเสนอ

ข้อดีที่ได้รับจากกระบวกการนี้คือ การลดขั้นตอนในการควบคุมคุณภาพน้ำมัน การที่ต้องลดความดันของชุดทดลองขณะทำการทดลองลง ซึ่งจะช่วยให้ทำการทดลองได้รวดเร็วขึ้น ผลกระทบของการเสียสภาพน้ำมันน้อย และความชื้นกับก๊าซจากภายนอกเข้ามาละลายในน้ำมันได้ยากขึ้น แต่มีข้อเสียทางด้านต้องใช้พื้นที่สำหรับการทดลองมากและงบลงทุนสูง การเคลื่อนย้ายลำบาก

6.3.3 **การวิจัยต่อไป**

จากการศึกษาค้นคว้า และทำการทดลองเรื่องลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ยังมีความไม่ครบสมบูรณ์ เรื่องที่น่าสนใจและควรมีการศึกษาต่อไป ซึ่งผู้เขียนได้เสนอไว้มีดังต่อไปนี้

1)การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเวลาในการเกิดเบรกดาวน์เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ เพื่ออธิบายปรากฏการณ์การเพิ่มและลดลงของแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์จากผลกระทบของอุณหภูมิ

2)การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

3)ผลกระทบของปริมาณอนุภาคคาร์บอน ที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่การกระจายสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

4)การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง เช่น อิเล็กโตรดแบบ ร็อด-ระนาบ

5)การทดลองหาค่าแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนทั้งแรงดันกระแสสลับและอิมพัลส์ ในการกระจายสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 Danikas, M.G. Breakdown of transformer oil: IEEE EI magazine vol. 6, no. 5(1990): 27-34.

4 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.

5 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.

6 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.

7 Badent, R. , Kist, K. , and Schwab, A.J. Current measurement of predischarges in insulating oil under impulse conditions. Proceedings of the Electrical and Dielectric Phenomena Conference(1997): 218-221.

8 Badent, R. , Kist, K.A. , Schwaband, J. , and Wurster, M. Light emission measurement of predischarges in insulating oil. Annual Report on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(1998): 452-455.

9 Chadband, W.G. The electrical breakdown of insulating oil. Power engineering journal(1992): 61-67.

10 Chadband, W.G. Electrical breakdown of liquid insulation. IEE Collequium on an Engineering Review(1996): 5/1-5/3.

11 Insulating oils for transformer and switchgear. Shell.(n.p. , n.d.)

12. 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.

13. สุรพล ดำรงกิตติกุล. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. พิมพ์ครั้งที่1. เชียงใหม่:มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2535.

14 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.

15 Kuffel, E. , and Zaengl, W.S. Electrical breakdown in gases ,solids and liquids: High voltage engineering fundamentals. Oxford:Pergamon Press, 1984.

16 Alston, L.L. Breakdown of commercial liquid and liquid-solid dielectrics:High-voltage technology. London:Oxford university press,1968.

17 Naidu, M.S. , and Kamaraju, S. Conduction and breakdown in liquid dielectrics: High-voltage engineering. New Delhi:Tata Mcgraw-Hill publishing company limited, 1995.

18 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.

19 Hauschild, W. , and Mosch, W. Statistical techniques for high voltage engineering. Peter Peregrinus Ltd, 1992.

20. Maxwell 2D field simulator. Ansoft corporation, 1995.

21 Krins, M. , Borsi, H. , and et.al. Influence of carbon particle on the breakdown voltage of transformer oil. ICDL. 12th(1996): 296-299.

22 Kirch, H.J. , and Robinson, I. High voltage insulation for transformer. ,1997.

23 Ikeda, M. , and Menju, S. Breakdown probability distribution and equi-probailisitc V-t characteristic of transformer oil. IEEE trans. on PAS vol. PAS-98,No.4 (1978):1430-1438.

24 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.

25 Endicott, H.S. , and Weber, K.H. Electrode area effect for the impulse breakdown of transformer oil. IEEE tran. on PAS (1975): 393-394.

26 Chan, J.C. , and Cometa, E.T. Impulse breakdown characteristics of insulating oils and their behaviour in oil-paper. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenimena(1989): 447-452.

27 Lee, M.J. and Nelson, J.K. Dielectric integrity associated with circulating insulating fluids. IEEE trans. on EI, vol.23, no.4(1988): 712.

28 Khalifa, M. Insulating luquids:High voltage engineering –theory and practice. New York and Basel:Marcel Dekker,Inc., 1990.

29 Blume, L.F., Boyajian, A. and et.al. Insulations:Transformer engineering. New York: J.Willy&Sons,Inc.,1951.

30 IEC 71 Insulation coordination, 1976

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการศึกษาผลกระทบของอนุภาคคาร์บอน

ตารางที่ ก.1 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของน้ำมันใหม่(A)และน้ำมันที่ผ่านการทดลองประมาณ 150 ครั้ง(B) ที่ ทรงกลมรัศมีขนาด 5mm และอุณหภูมิ 30^{o}C

ครั้งที่	A		B	
	g=3mm	g=7mm	G=3mm	g=7mm
1	66.4	103.4	65.4	89.1
2	59.9	85.1	67.7	112.4
3	60.7	107.4	67.2	92.1
4	59.9	86.9	68.9	127.6
5	54.4	88.4	64.9	105.6
6	60.2	104.4	60.2	133.8
7	66.2	81.2	68.7	118.6
8	62.2	110.9	47.4	96.4
9	57.7	94.4	67.9	124.4
10	65.2	98.1	59.9	114.4
11	64.9	104.4	64.4	103.6
12	52.2	103.4	60.7	119.6
13	68.2	106.9	53.9	81.2
14	61.9	111.1	62.9	107.6
15	56.9	113.9	52.9	100.1
16	42.4	103.1	68.7	87.9
17	56.2	79.9	64.4	120.9
18	55.2	115.1	59.9	101.1
19	55.2	117.9	58.7	112.6
20	64.2	119.4	69.7	58.9
21	62.4	119.4	69.4	119.4
22	65.7	103.9	61.9	64.2
23	46.7	94.4	63.4	88.6
24	60.9	142.3	68.7	90.4
$\overline{U}_d$ (kV)	59.4	104.0	63.25	102.94
s(kV)	6.3	14.3	5.79	19.04
ν	0.11	0.14	0.09	0.19

ตารางที่ ก.2 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r= 5mm g=3mm

ครั้งที่	T(°C)					
	30	40	50	60	70	80
1	66.4	64.9	75.9	76.9	84.6	67.2
2	59.9	67.4	79.7	65.7	80.9	73.7
3	60.7	74.9	53.7	75.2	75.9	61.4
4	59.9	68.2	71.9	78.4	66.7	64.2
5	54.4	62.7	76.9	77.4	83.9	78.4
6	60.2	68.4	87.6	77.9	71.7	75.2
7	66.2	52.4	79.4	84.4	59.9	61.9
8	62.2	54.2	75.7	78.9	74.7	63.7
9	57.7	77.9	60.2	79.9	81.7	65.2
10	65.2	64.9	73.9	80.7	77.4	78.4
11	64.9	66.7	82.4	77.7	81.7	69.9
12	52.2	75.2	78.7	77.4	77.9	70.7
13	68.2	70.7	55.9	81.7	72.4	79.9
14	61.9	72.9	69.4	74.9	82.4	79.7
15	56.9	63.2	77.7	77.4	88.1	72.7
16	42.4	68.7	67.7	69.7	74.7	62.7
17	56.2	66.2	77.2	76.7	70.9	71.7
18	55.2	67.9	74.9	73.4	77.7	71.7
19	55.2	71.7	67.7	56.7	79.4	68.7
20	64.2	68.2	80.7	67.7	66.9	73.7
21	62.4	66.9	59.7	78.9	85.1	77.4
22	65.7	62.2	65.7	80.2	69.9	65.9
23	46.7	53.7	81.2	72.4	80.7	78.9
24	60.9	59.9	78.7	81.2	80.9	63.7
$\bar{U}_d$ (kV)	59.41	66.24	73.01	75.88	76.92	70.68
s(kV)	6.28	6.54	8.80	6.01	6.82	6.18
ν	0.11	0.10	0.12	0.08	0.09	0.09

ตารางที่ ก.3 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r= 5mm g=7mm

ครั้งที่	T(°C)					
	30	40	50	60	70	80
1	103.4	117.1	121.4	121.9	100.1	98.6
2	85.1	109.1	103.4	125.6	122.1	117.6
3	107.4	121.9	113.9	126.1	127.3	120.9
4	86.9	126.3	121.4	140.1	75.9	103.9
5	88.4	109.4	70.7	135.8	114.6	117.1
6	104.4	130.3	96.9	121.4	110.4	118.9
7	81.2	106.9	117.4	115.9	124.4	102.6
8	110.9	146.8	117.4	126.1	128.1	97.1
9	94.4	94.6	126.6	130.3	122.6	99.9
10	98.1	126.6	131.8	127.6	117.4	116.4
11	104.4	150.3	88.6	124.6	127.1	114.6
12	103.4	145.1	131.1	112.9	109.6	117.1
13	106.9	147.3	120.6	131.8	98.6	107.1
14	111.1	97.4	105.1	124.9	123.6	114.9
15	113.9	142.8	100.4	127.1	122.6	113.9
16	103.1	130.3	134.3	122.4	95.6	101.1
17	79.9	139.1	141.3	132.3	102.1	118.1
18	115.1	143.1	139.3	91.6	109.6	109.1
19	117.9	126.6	141.8	120.1	117.1	117.6
20	119.4	107.9	145.6	134.1	84.9	112.9
21	119.4	130.3	85.9	122.4	116.1	101.9
22	103.9	101.4	120.1	133.1	114.6	121.6
23	94.4	100.4	121.9	140.1	126.1	107.1
24	142.3	142.3	128.8	138.1	124.4	110.4
$\bar{U}_d$ (kV)	104.0	124.7	117.7	126.1	113.1	110.9
s(kV)	14.3	17.8	19.2	10.2	14.0	7.7
ν	0.14	0.14	0.16	0.08	0.12	0.07

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติ

ข.1 ค่าแรงดันเบรกดาวน์สำหรับลักษณะสมบัติเชิงสถิติ

ตารางที่ ข.1 แรงดันเบรกดาวน์ ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ที่สภาวะอุณหภูมิ 30 °C

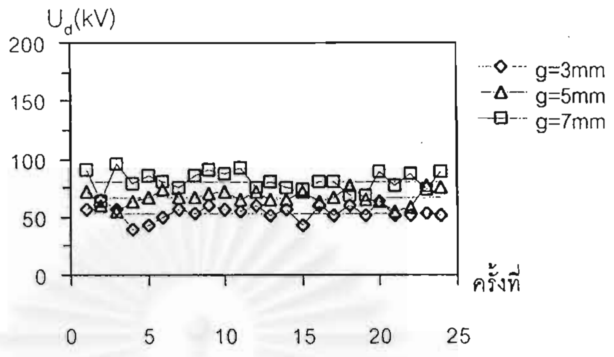
ครั้งที่	แกป(mm)				
	3	5	7	10	15
1	55.7	71.9	90.6	84.1	104.9
2	64.4	60.7	63.9	120.1	102.1
3	57.2	54.7	94.9	63.7	103.6
4	40.0	63.4	78.4	77.9	87.6
5	43.4	66.9	86.1	78.2	102.4
6	49.4	73.4	79.7	84.1	103.4
7	56.9	67.4	74.4	92.4	105.9
8	53.2	66.9	86.1	95.6	98.9
9	59.9	69.7	91.1	93.1	92.9
10	56.7	71.4	86.9	75.7	104.9
11	54.2	65.2	92.1	78.2	75.9
12	60.4	71.7	74.4	94.9	112.4
13	50.4	65.2	80.2	102.9	120.9
14	56.2	65.2	75.2	93.4	99.9
15	42.7	71.2	73.4	68.9	96.9
16	59.7	62.4	79.7	78.9	102.6
17	50.9	65.9	81.2	85.9	122.1
18	59.7	77.4	68.2	103.9	93.4
19	51.7	65.4	68.4	89.9	119.9
20	62.7	63.4	89.4	84.4	117.9
21	51.7	54.9	76.7	86.9	95.6
22	50.7	58.2	87.9	105.4	96.9
23	52.2	76.7	72.9	69.4	128.8
24	50.4	75.2	88.9	91.4	97.6
$\overline{U}_d$ (kV)	53.8	66.8	80.9	87.5	103.6
s(kV)	6.2	6.2	8.5	13.0	12.0
ν	0.11	0.09	0.11	0.15	0.12

ตารางที่ ข.2 แรงดันเบรกดาวน์ ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 5 10 และ 15 mm ที่สภาวะอุณหภูมิ 30 °C

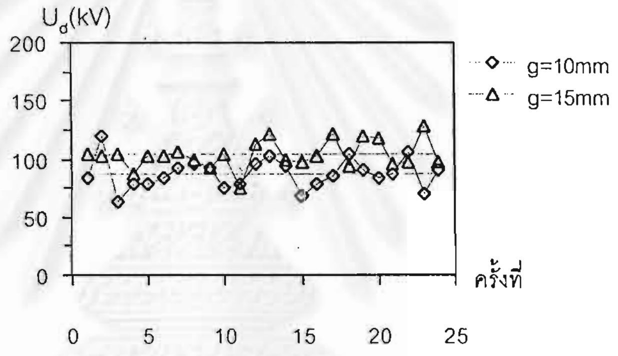
ครั้งที่	แกป(mm)							
	r=5 mm				r=10 mm		r=15 mm	
	3	5	7	9	3	5	3	5
1	66.4	81.2	103.4	143.6	71.2	109.6	87.9	119.4
2	59.9	70.9	85.1	156.6	58.2	103.6	95.1	133.8
3	60.7	78.7	107.4	97.1	69.2	113.4	76.7	130.3
4	59.9	88.1	86.9	141.1	65.2	114.6	83.9	118.9
5	54.4	70.4	88.4	89.1	69.9	84.1	80.4	112.6
6	60.2	83.9	104.4	129.3	67.9	122.6	75.7	118.1
7	66.2	84.4	81.2	130.1	60.7	119.6	62.4	117.6
8	62.2	80.7	110.9	131.8	66.9	109.4	80.9	112.4
9	57.7	97.9	94.4	113.9	57.4	102.6	78.2	112.1
10	65.2	75.9	98.1	83.4	66.2	103.9	88.9	130.6
11	64.9	68.2	104.4	140.6	68.7	116.9	79.2	132.8
12	52.2	77.9	103.4	134.8	59.7	122.9	72.4	114.1
13	68.2	90.9	106.9	123.1	66.7	88.4	70.7	134.8
14	61.9	94.6	111.1	142.8	67.9	111.4	82.9	120.4
15	56.9	79.9	113.9	133.8	65.4	131.1	73.7	123.9
16	42.4	81.2	103.1	139.1	61.9	103.1	88.9	114.4
17	56.2	91.6	79.9	128.3	70.9	103.9	80.2	114.6
18	55.2	90.4	115.1	147.3	74.2	93.1	77.2	114.4
19	55.2	86.1	117.9	152.8	73.9	120.1	88.9	130.6
20	64.2	97.9	119.4	119.6	69.9	103.1	77.7	124.1
21	62.4	87.9	119.4	140.8	70.2	92.6	82.7	109.9
22	65.7	92.4	103.9	114.6	65.9	91.9	71.9	113.6
23	46.7	97.4	94.4	129.3	72.2	115.1	68.2	122.6
24	60.9	83.4	142.3	123.6	73.2	101.1	78.2	119.1
$\bar{U}_d$(kV)	59.4	84.7	104.0	128.6	67.2	107.4	79.3	120.6
s(kV)	6.3	8.6	14.3	18.6	4.8	12.0	7.5	7.8
ν	0.11	0.10	0.14	0.14	0.07	0.11	0.09	0.06

ข.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันโดยใช้การวาดกราฟเปรียบเทียบ

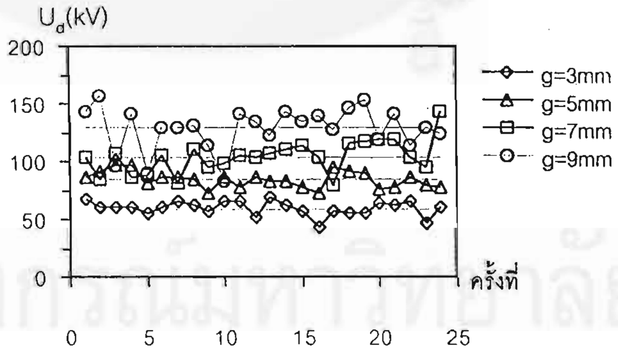
การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์สำหรับการศึกษาลักษณะสมบัติเชิงสถิติ โดยใช้การวาดกราฟเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ ข.1 และ ข.2



รูปที่ ข.1 r=2.5mm และ g=3-7mm

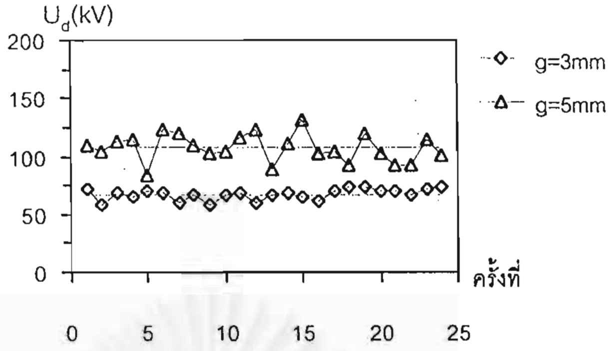


รูปที่ ข.2 r=2.5mm และg= 10-15mm

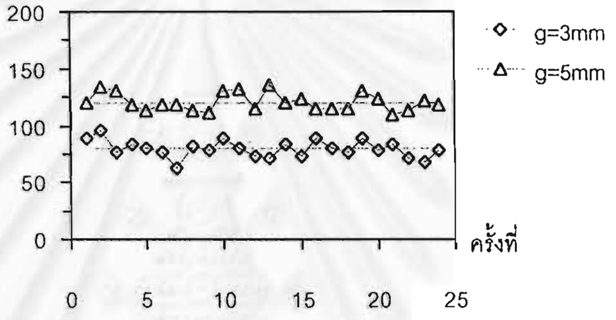


รูปที่ ข.3 r=5mm และ g=3-9mm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.4 r=10mm **และ** g=3-5mm



รูปที่ ข.5 r=15mm **และ** g=3-5mm

ข.3 พารามิเตอร์ของการกระจายทฤษฎี

ตารางที่ ข.3 พารามิเตอร์ของการกระจายแบบปกติ

r(mm)	g(mm)	$\bar{U}_d(kV)$	v	d_{max}
2.5	3	53.8	0.11	0.08
	5	66.8	0.09	0.08
	7	80.9	0.11	0.09
	10	85.2	0.17	0.07
	15	103.6	0.12	0.15
5	3	59.4	0.11	0.09
	5	84.7	0.10	0.07
	7	104.0	0.14	0.12
	9	128.6	0.14	0.13
10	3	67.2	0.07	0.09
	5	106.4	0.13	0.11
15	3	79.3	0.09	0.07
	5	120.6	0.06	0.14

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.4 พารามิเตอร์ของการกระจายWeibull แบบ 3 พารามิเตอร์

r(mm)	g(mm)	U_{d0}(kV)	η (kV)	δ	d_{max}
5	3	15.8	40.5	7.25	0.07
	5	40.0	29.3	5	0.08
	7	47.1	37.0	4.5	0.08
	10	54.4	37.4	2.75	0.12
	15	70.7	36.9	3	0.14
10	3*	-286.7	348.9	70	0.13
	5	50.5	37.4	4.5	0.07
	7	73.6	34.3	2.25	0.15
	9*	-521.3	658.2	44.25	0.07
20	3	30.2	39.0	9.25	0.06
	5	64.7	47.1	4.0	0.15
30	3	55.5	26.4	3.8	0.08
	5	105.7	16.8	2.0	0.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
ข้อมูลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ

ตาราง ค.1 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=2.5mm และ g=3mm

T ($°C$)	U_d (kV)								$\overline{U}_d(kV)$	ν
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	48.4	52.4	55.7	57.2	44.4	58.9	53.4	54.2	53.1	0.09
45	62.7	65.7	52.2	61.2	56.7	68.2	49.9	48.4	58.1	0.13
60	79.4	69.4	64.9	60.2	77.7	55.9	67.7	73.2	68.5	0.12
80	77.7	66.9	80.2	61.7	60.9	83.4	76.2	62.4	71.2	0.13

ตาราง ค.2 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=2.5mm และ g=5mm

T ($°C$)	U_d (kV)								$\overline{U}_d(kV)$	ν
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	53.4	78.4	62.7	65.2	65.7	58.2	63.7	78.2	65.7	0.13
45	74.2	73.7	91.4	65.4	77.9	67.9	97.6	78.4	78.3	0.14
60	81.2	84.4	86.9	80.7	98.1	82.4	94.6	95.4	88.0	0.08
80	104.1	96.1	93.1	104.1	101.9	106.9	91.6	93.9	99.0	0.06

ตาราง ค.3 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=2.5mm และ g=10mm

T ($°C$)	U_d (kV)								$\overline{U}_d(kV)$	ν
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	93.1	75.7	78.2	94.9	102.9	93.4	68.9	78.9	85.7	0.14
45	103.9	124.6	79.9	76.2	127.3	105.9	110.1	82.7	101.3	0.20
60	101.1	86.9	93.9	101.9	96.1	122.9	106.4	125.3	104.3	0.13
80	111.1	119.9	114.6	107.4	108.1	129.8	129.3	115.4	117.0	0.08

ตาราง ค.4 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=2.5mm และ g=15mm

T ($°C$)	U_d (kV)								$\overline{U}_d(kV)$	ν
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	104.9	102.1	103.6	87.6	102.4	103.4	105.9	98.9	101.1	0.06
45	123.6	127.3	136.1	140.3	142.1	128.3	141.3	137.1	134.5	0.05
60	127.3	145.3	150.6	150.6	121.9	133.1	136.3	145.8	138.9	0.8
80	128.1	136.1	161.6	137.6	135.3	166.5	150.1	122.6	142.2	0.11

ตาราง ค.5 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=5mm และ g=3mm

T (°C)	U_d (kV)								$\overline{U}_d(kV)$	ν
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	66.4	59.9	60.7	59.9	54.4	60.2	66.2	62.2	61.2	0.06
40	77.9	64.9	66.7	75.2	70.7	72.9	63.2	68.7	70.0	0.07
60	76.9	65.7	75.2	78.4	77.4	77.9	84.4	78.9	76.8	0.07
80	83.4	84.4	80.4	74.7	71.7	74.4	77.7	80.2	78.3	0.06

ตาราง ค.6 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=5mm และ g=5mm

T (°C)	U_d (kV)								$\overline{U}_d(kV)$	ν
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	84.4	80.7	97.9	75.9	68.2	77.9	90.9	94.6	83.8	0.12
40	83.6	79.4	85.9	77.2	84.6	90.6	79.2	97.4	84.7	0.08
60	84.4	97.1	91.4	98.4	112.4	114.9	109.9	100.6	101.1	0.11
80	102.6	104.4	100.6	100.4	103.6	116.4	103.1	99.4	103.8	0.05

ตาราง ค.7 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=10mm และ g=3mm

T (°C)	U_d (kV)								$\overline{U}_d(kV)$	ν
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	71.2	58.2	69.2	65.2	69.9	67.9	60.7	66.9	66.1	0.07
40	68.4	58.7	73.9	67.9	71.4	75.4	60.9	67.4	68.0	0.09
60	83.9	74.9	81.9	66.9	65.2	79.4	75.9	67.2	74.4	0.10
80	80.7	75.9	86.4	74.4	77.2	80.9	63.9	71.4	76.3	0.09

ตาราง ค.8 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=10mm และ g=5mm

T (°C)	U_d (kV)								$\overline{U}_d(kV)$	ν
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	103.9	93.1	120.1	103.1	92.6	91.9	115.1	101.1	102.6	0.10
45	118.4	104.4	121.6	107.4	112.1	122.6	104.9	112.6	113.0	0.06
60	113.1	122.9	97.4	125.1	103.9	130.6	101.4	118.6	114.1	0.11
80	115.4	116.9	137.3	99.9	123.6	111.1	109.6	123.6	117.2	0.10

ตาราง ค.9 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=15mm และ g=3mm

T ($°C$)	U_d (kV)								$\bar{U}_d(kV)$	ν
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	74.2	59.9	85.9	84.6	80.7	87.1	71.4	77.2	77.6	0.12
45	75.7	68.4	84.1	89.1	86.4	86.6	77.4	88.4	82.0	0.09
60	89.6	83.4	76.9	91.1	80.7	86.4	73.4	76.2	82.2	0.08
80	99.6	74.4	80.2	86.9	91.9	90.1	84.6	81.7	86.2	0.09

ตาราง ค.10 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=15mm และ g=5mm

T ($°C$)	U_d (kV)								$\bar{U}_d(kV)$	ν
	1	2	3	4	5	6	7	8		
30	127.1	111.9	128.1	131.6	114.6	126.8	121.4	118.6	122.5	0.06
45	119.1	108.6	127.1	132.6	123.1	122.9	129.1	0.0	123.2	0.06
60	124.6	125.1	113.9	138.3	98.9	137.6	135.1	109.6	122.9	0.12
80	117.4	130.6	114.1	122.6	124.9	131.6	118.4	135.1	124.3	0.06

ตารางที่ ค.11 $\bar{U}_d$ และ ν ที่อุณหภูมิต่างๆ

r (mm)	g (mm)	$\bar{U}_d$ (kV) ที่อุณหภูมิ(°c)					ν ที่อุณหภูมิ(°c)				
		30	40	45	60	80	30	40	45	60	80
2.5	3	53.1	-	58.1	68.5	71.2	0.09	-	0.13	0.12	0.13
	5	65.7	-	78.3	88.0	99.0	0.13	-	0.14	0.08	0.06
	10	85.7	-	101.3	104.3	117.0	0.14	-	0.20	0.13	0.08
	15	101.1		134.5	138.9	142.2	0.06	-	0.05	0.08	0.11
5	3	61.2	70.0	-	76.8	78.3	0.06	0.07	-	0.07	0.06
	5	83.8	84.7	-	101.1	103.8	0.12	0.08	-	0.11	0.05
10	3	66.1	-	68.0	74.4	76.3	0.07	-	0.09	0.10	0.09
	5	102.6	-	118.8	114.1	117.2	0.10	-	0.08	0.11	0.10
15	3	77.6		82.0	82.2	86.2	0.12	-	0.09	0.08	0.09
	5	122.5	-	123.2	122.9	124.3	0.06	-	0.06	0.12	0.06

ตารางที่ ค.12 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดัน($\%U_d$)ของการทดลองแรงดันกระแสสลับ

r(mm)	g(mm)	$\%U_d$
2.5	3	34.0
	5	51.0
	10	36.4
	15	41.0
5	3	27.9
	5	23.9
10	3	15.4
	5	14.2
15	3	11.0
	5	1.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง
ข้อมูลแรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ ง.1 แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์(U_d)ขั้วลบจากการป้อนแรงดันเพิ่ม ที่ r=2.5mm g=5mm

ครั้งที่	U_d(kV)							
1-8	196.0	185.6	189.0	179.0	165.0	188.0	200.0	154.1
9-16	170.2	210.7	210.7	165.0	189.0	179.0	162.0	145.9
17-24	142.9	145.9	165.0	176.0	171.4	171.4	182.0	189.2

ตารางที่ ง.2 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ขั้วบวก(U^+_{dq})และขั้วลบ(U^-_{dq}) ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=2.5mm และ g=3mm

ครั้งที่	30°C		55°C		80°C	
	U^-_{dq}(kV)	U^+_{dq}(kV)	U^-_{dq}(kV)	U^+_{dq}(kV)	U^-_{dq}(kV)	U^+_{dq}(kV)
1	139.3	152.3	171.3	149.1	168.8	165.2
2	153.5	126.5	170.0	153.4	187.0	165.3
3	166.5	152.3	170.7	157.8	167.6	146.6
4	139.3	152.3	160.6	162.1	183.5	164.8
5	177.0	126.5	177.6	157.8	157.3	155.6
6	-	-	-	-	-	-
$\bar{U}_{dq}$(kV)	155.1	141.98	170.0	156.0	172.84	159.5
s(kV)	16.67	14.13	6.09	4.95	12.24	8.30
ν	0.11	0.10	0.04	0.03	0.07	0.05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.3 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ขั้วบวก(U_{dq}^{+})และขั้วลบ(U_{dq}^{-}) ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=2.5mm และ g=5mm

ครั้งที่	30°C		55°C		80°C	
	U_{dq}^{-} (kV)	U_{dq}^{+} (kV)	U_{dq}^{-} (kV)	U_{dq}^{+} (kV)	U_{dq}^{-} (kV)	U_{dq}^{+} (kV)
1	221.1	182.8	185.2	187	198.0	198
2	185.2	182.8	165.0	167.1	173.3	173.8
3	191.0	171.2	185.2	205	173.4	173.8
4	138.0	171.2	185.2	167.2	184.9	205
5	211.0	190	165.9	205	195.0	182.2
6	-	-	-	-	-	-
$\overline{U}_{dq}$ (kV)	189.3	179.6	177.3	186.3	184.9	186.56
s(kV)	32.15	8.21	10.82	18.93	11.62	14.28
ν	0.17	0.05	0.06	0.10	0.06	0.08

ตารางที่ ง.4 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ขั้วบวก(U_{dq}^{+})และขั้วลบ(U_{dq}^{-}) ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=2.5mm และ g=10mm

ครั้งที่	30°C		55°C		80°C	
	U_{dq}^{-} (kV)	U_{dq}^{+} (kV)	U_{dq}^{-} (kV)	U_{dq}^{+} (kV)	U_{dq}^{-} (kV)	U_{dq}^{+} (kV)
1	226.0	168.4	217.0	205.0	198.0	206.0
2	185.3	222.0	185.4	195.0	188.0	195.0
3	205.0	187.0	195.0	218.0	234.0	218.0
4	207.0	187.0	195.0	207.0	219.0	206.0
5	217.0	205.0	234.0	171.9	184.0	206.0
6	-	-	-	-	204.0	-
$\overline{U}_{dq}$ (kV)	208.1	193.9	205.3	199.4	204.5	206.2
s(kV)	16.6	20.4	19.8	17.4	19.1	8.1
ν	0.08	0.11	0.10	0.09	0.09	0.04

ตารางที่ ง.5 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ขั้วบวก(U^{+}_{dq})และขั้วลบ(U^{-}_{dq}) ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=2.5mm และ g=15mm

ครั้งที่	30°C		55°C		80°C	
	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)
1	242.0	209.0	196.0	251.0	244.0	229.0
2	207.0	244.0	253.0	216.0	216.0	217.0
3	242.0	204.0	242.0	193.0	218.0	229.0
4	206.0	229.0	230.0	240.0	218.0	228.0
5	252.0	239.0	217.0	228.0	230.0	240.0
6	252.0	-	-	-	-	229.0
$\overline{U}_{dq}$ (kV)	233.5	225.0	227.6	225.6	225.2	228.7
s(kV)	21.4	17.8	22.2	22.4	11.9	7.3
ν	0.09	0.08	0.10	0.10	0.05	0.03

ตารางที่ ง.6 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ขั้วบวก(U^{+}_{dq})และขั้วลบ(U^{-}_{dq}) ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=5mm และ g=3mm

ครั้งที่	30°C		55°C		80°C	
	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)
1	191.0	176.8	172.5	198.0	200.0	184.4
2	170.0	176.8	194.0	208.0	197.0	219.0
3	153.5	163.4	195.0	207.0	186.0	207.0
4	154.6	163.4	172.0	206.0	209.0	184.0
5	179.7	176.8	183.7	195.0	197.0	216.0
6	-	-	-	-	-	-
$\overline{U}_{dq}$ (kV)	169.8	171.4	183.4	202.8	197.8	202.1
s(kV)	16.2	7.3	11.1	5.9	8.2	16.9
ν	0.10	0.04	0.06	0.03	0.04	0.08

ตารางที่ ง.7 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ขั้วบวก(U_{dq}^{+})และขั้วลบ(U_{dq}^{-}) ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=5mm และ g=5mm

ครั้งที่	30°C		55°C		80°C	
	U_{dq}^{-}(kV)	U_{dq}^{+}(kV)	U_{dq}^{-}(kV)	U_{dq}^{+}(kV)	U_{dq}^{-}(kV)	U_{dq}^{+}(kV)
1	225.0	190.0	240.0	249.0	254.0	266.0
2	249.0	200.0	204.0	202.0	217.0	252.0
3	213.0	177.5	250.0	238.0	255.0	216.0
4	213.0	189.0	249.0	213.0	243.0	229.0
5	189.0	213.0	250.0	231.0	231.0	286.0
6	201.0	-	214.0	249.0	-	-
$\bar{U}_{dq}$(kV)	215.0	193.9	234.5	230.3	240.0	249.8
s(kV)	20.7	13.3	19.8	19.0	16.1	28.1
ν	0.10	0.07	0.08	0.08	0.07	0.11

ตารางที่ ง.8 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ขั้วบวก(U_{dq}^{+})และขั้วลบ(U_{dq}^{-}) ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=10mm และ g=3mm

ครั้งที่	30°C		55°C		80°C	
	U_{dq}^{-}(kV)	U_{dq}^{+}(kV)	U_{dq}^{-}(kV)	U_{dq}^{+}(kV)	U_{dq}^{-}(kV)	U_{dq}^{+}(kV)
1	191.0	187.0	184.3	196.0	184.5	220.0
2	178.8	187.0	218.0	184.7	218.0	232.0
3	164.7	187.0	231.0	230.0	230.0	231.0
4	164.7	210.0	218.0	195.0	173.7	242.0
5	190.0	187.0	172.3	194.0	231.0	-
6	164.7	-	-	-	-	-
$\bar{U}_{dq}$(kV)	175.7	191.6	204.7	199.9	207.4	231.3
s(kV)	12.7	10.3	25.1	17.4	26.6	9.0
ν	0.07	0.05	0.12	0.09	0.13	0.04

ตารางที่ ง.9 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ขั้วบวก(U^{+}_{dq})และขั้วลบ(U^{-}_{dq}) ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=10mm และ g=5mm

ครั้งที่	30°C		55°C		80°C	
	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)
1	238.0	237.0	283.0	285.0	296.0	282.0
2	250.0	259.0	284.0	285.0	294.0	314.0
3	250.0	259.0	266.0	275.0	273.0	305.0
4	262.0	284.0	273.0	303.0	273.0	282.0
5	189.0	203.0	275.0	294.0	283.0	292.0
6	201.0	237.0	-	-	-	-
$\overline{U}_{dq}$ (kV)	231.7	246.5	276.2	288.4	283.8	295.0
s(kV)	29.6	27.5	7.5	10.6	11.0	14.2
ν	0.13	0.11	0.03	0.04	0.04	0.05

ตารางที่ ง.10 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ขั้วบวก(U^{+}_{dq})และขั้วลบ(U^{-}_{dq}) ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=15mm และ g=3mm

ครั้งที่	30°C		55°C		80°C	
	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)	U^{-}_{dq} (kV)	U^{+}_{dq} (kV)
1	172.9	194.0	184.6	217.0	204.0	230.0
2	183.9	184.2	207.0	205.0	192.0	203.0
3	183.1	186.0	184.8	206.0	193.0	228.0
4	196.0	196.0	207.0	172.0	204.0	215.0
5	172.8	185.2	-	172.0	-	204.0
6	-	-	-	194.0	-	-
$\overline{U}_{dq}$ (kV)	181.7	189.1	195.9	194.4	198.3	216.0
s(kV)	9.6	5.5	12.9	18.8	6.7	12.8
ν	0.05	0.03	0.07	0.10	0.03	0.06

ตารางที่ ง.11 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ขั้วบวก(U_{dq}^{+})และขั้วลบ(U_{dq}^{-}) ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ r=15mm และ g=5mm

ครั้งที่	30°C		55°C		80°C	
	U_{dq}^{-} (kV)	U_{dq}^{+} (kV)	U_{dq}^{-} (kV)	U_{dq}^{+} (kV)	U_{dq}^{-} (kV)	U_{dq}^{+} (kV)
1	290.0	319	-	-	-	-
2	267.0	284	-	-	-	-
3	322.0	332	-	-	-	-
4	310.0	328	-	-	-	-
5	310.0	285	-	-	-	-
6			-	-	-	-
$\bar{U}_{dq}$ (kV)	299.8	309.6	-	-	-	-
s(kV)	21.64	23.39	-	-	-	-
ν	0.07	0.08	-	-	-	-

ตารางที่ ง.12 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์ขั้วลบ(U_{dq}^{-}) ณ อุณหภูมิ 30°C ที่ r=5mm และ g=7 และ 9 mm

ครั้งที่	g=7mm	g=9mm
1	234.0	270.0
2	249.0	262.0
3	247.0	286.0
4	247.0	308.0
5	263.0	292.0
6	-	-
$\bar{U}_{dq}$ (kV)	248.0	283.6
s(kV)	10.3	18.2
ν	0.04	0.06

ตารางที่ ง.13 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์และส.ป.ส.ความเบี่ยงเบน ที่อุณหภูมิ 30°C

r(mm)	g(mm)	ขั้วลบ		ขั้วบวก	
		$\bar{U}_{dq}$ (kV)	ν	$\bar{U}_{dq}$ (kV)	ν
2.5	3	155.1	0.11	141.98	0.10
	5	189.3	0.17	179.6	0.05
	10	208.1	0.08	193.9	0.11
	15	233.5	0.09	225	0.08
5	3	169.8	0.10	171.4	0.04
	5	215.0	0.10	193.9	0.07
	7	248.0	0.04	-	-
	9	283.6	0.06	-	-
10	3	175.7	0.07	191.6	0.05
	5	231.7	0.13	246.5	0.11
15	3	181.7	0.05	189.1	0.03
	5	299.8	0.07	309.6	0.08

ตารางที่ ง.14 แรงดันคงทนอยู่ได้อิมพัลส์และส.ป.ส.ความเบี่ยงเบน ที่อุณหภูมิ 55 และ 80°C

r (mm)	g (mm)	55°C				80°C			
		Imp-		Imp+		Imp-		Imp+	
		$\bar{U}_d$ (kV)	ν	$\bar{U}_d$ (kV)	ν	$\bar{U}_d$ (kV)	ν	$\bar{U}_d$ (kV)	ν
2.5	3	170.0	0.04	156.0	0.03	172.8	0.07	159.5	0.05
	5	177.3	0.06	186.3	0.10	184.9	0.06	186.6	0.08
	10	205.3	0.10	199.4	0.09	204.5	0.09	206.2	0.04
	15	227.6	0.10	225.6	0.10	225.2	0.05	228.7	0.03
10	3	183.4	0.06	202.8	0.03	197.8	0.04	202.1	0.08
	5	234.5	0.08	230.3	0.08	240.0	0.07	249.8	0.11
20	3	204.7	0.12	199.9	0.09	207.4	0.13	231.3	0.04
	5	276.2	0.03	288.4	0.04	283.8	0.04	295	0.05
30	3	195.9	0.07	194.4	0.10	198.3	0.03	216.0	0.06
	5	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ง.15 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดัน($\%U_d$)

r(mm)	g(mm)	$\%U_d$	
		ขั้วลบ	ขั้วบวก
2.5	3	11.4	12.4
	5	-2.3	3.9
	10	-1.7	2.3
	15	-3.6	1.6
5	3	16.5	17.9
	5	11.6	28.8
10	3	18.1	20.7
	5	22.5	19.7
15	3	3.6	16.0
	5	-	-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ
ข้อมูลการศึกษาอัตราส่วนอิมพัลส์

ตารางที่ จ.1 แรงดันกระแสสลับที่อันดับควอนไทล์ 20% และ 30%

r(mm)	g(mm)	$\frac{\Delta u}{S.D.}$	$\mu_{\Delta x}$	$\sigma_{\Delta x}$	U_{d20} (kV)	U_{d30} (kV)
2.5	3	0.32	-0.9	0.64	54.4	57.4
	5	0.32	-0.9	0.64	67.4	70.4
	10	0.15	-1.2	0.55	93.4	103.4
	15	0.17	-1.2	0.55	111.4	118.3
5	3	0.32	-0.9	0.64	60.0	63.1
	5	0.23	-1.1	0.6	87.7	92.2
10	3	0.42	-0.7	0.7	66.3	68.5
	5	0.17	-1.2	0.55	114.1	122.1
15	3	0.27	-0.9	0.61	80.3	84.2
	5	0.26	-0.9	0.61	121.7	125.7

ตารางที่ จ.2 อัตราส่วนแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ต่อแรงดันกระแสสลับ($\frac{\overline{U}_{dq,imp}}{\hat{U}_{d20,ac}}$)

r(mm)	g(mm)	$\hat{U}_{d20,ac}$ (kV)	$\overline{U}^{-}_{dq,imp}$ (kV)	$\overline{U}^{+}_{dq,imp}$ (kV)	$\frac{\overline{U}^{-}_{dq,imp}}{\hat{U}_{d20,ac}}$	$\frac{\overline{U}^{+}_{dq,imp}}{\hat{U}_{d20,ac}}$
2.5	3	76.9	155.1	142.0	2.0	1.8
	5	95.3	189.3	179.6	2.0	1.9
	10	135.7	208.1	193.9	1.5	1.4
	15	157.5	233.5	225.0	1.5	1.4
5	3	84.8	169.8	171.4	2.0	2.0
	5	124.0	215	193.9	1.7	1.6
10	3	93.7	175.7	191.6	1.9	2.0
	5	162.9	231.7	246.5	1.4	1.5
15	3	113.5	181.7	189.1	1.6	1.7
	5	172.1	299.8	309.6	1.7	1.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายมนตรี ระชารักษ์ เกิดวันที่ 12 พฤศจิกายน พ.ศ. 2519 ที่อำเภอท่าเรือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2540 จนถึงปัจจุบัน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย