หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐาน

การเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากผิวเปรอะเปื้อนผิวจะเกิดขึ้นเมื่อสิ่งเปรอะเปื้อนเหล่านั้นเปียกน้ำและความต้านทานที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนลดลง ดังนั้นการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อนจึงขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อน

2.1 ประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อน

สิ่งเปรอะเปื้อนที่ผิวลูกถ้วยฉนวนสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ สารละลายน้ำได้และนำไฟฟ้า กับสารที่ไม่ละลายน้ำและไม่นำไฟฟ้า

ประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนแบ่งตามสภาพแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนเหล่านั้นใช้งานอยู่ได้ดังนี้ [17,18,19]

1) สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเล(Marine contamination)
2) สิ่งเปรอะเปื้อนจากอุตสาหกรรม(Indrustrial contamination)
3) สิ่งเปรอะเปื้อนจากฝุ่น(Dust contamination)

2.2.1 สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเล

สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเลได้แก่เกลือ(NaCl) ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานริมชายฝั่งทะเลและบางทีอาจเข้ามาถึง 100 กิโลเมตรจากชายฝั่งทะเล ความเปรอะเปื้อนชนิดนี้แบ่งเป็น 2 แบบคือ

1) ความเปรอะเปื้อนแบบธรรมดา เป็นการเปรอะเปื้อนตามปกติในการใช้งาน ต้องใช้เวลานานในการสะสม ผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนจะเกิดขึ้นเมื่อสิ่งเปรอะเปื้อนเปียกชื้นในขณะที่มีหมอกลงจัดเท่านั้น แต่ถ้าเกิดฝนตกหนักก็เป็นการล้างทำความสะอาดผิวลูกถ้วยฉนวนสภาพการฉนวนก็จะคืนสู่สภาวะปกติได้

2) ความเปรอะเปื้อนแบบก่อตัวอย่างรวดเร็ว เกิดขึ้นเนื่องจากมีพายุขนาดใหญ่พัดหอบเอาไอเกลือเข้ามาเช่น ไต้ฝุ่น เฮอร์ริเคน ไซโคลน ซึ่งมีความเร็วลมประมาณ 18 - 35 กม./ชม.[19] โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่อยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ความเปรอะเปื้อนแบบนี้จะรุนแรงที่สุด

2.1.2 สิ่งเปรอะเปื้อนจากอุตสาหกรรม

ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในบริเวณเขตอุตสาหกรรมจะเปรอะเปื้อนควันและเขม่าที่ปล่อยออกมาจากปล่องท่อไอเสีย แต่ในปัจจุบันระดับของควันและเขม่าจากท่อไอเสียถูกควบคุมด้วยกฎหมายควบคุมมลพิษและสภาพแวดล้อม ดังนั้นลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในบริเวณนี้จึงไม่ค่อยมีปัญหามากนัก

ส่วนประกอบทางเคมีของสิ่งเปรอะเปื้อนเปลี่ยนไปตามชนิดของโรงงานอุตสาหกรรม มีรายงานว่าขนาดของอนุภาคสิ่งเปรอะเปื้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 - 2.0 μm [18,19] เขม่าจากท่อไอเสียนั้นค่อนข้างเหนียวซึ่งสารดังกล่าวเมื่อจับที่ผิวถูกถ้วยฉนวนทำให้การชำระล้างโดยฝนเป็นไปได้ยากและทำให้มีการสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามบริเวณใดที่มีถูกถ้วยเปื้อนเขม่าเป็นจำนวนมากควรทำความสะอาดผิวถูกถ้วยฉนวนเป็นระยะ กรณีที่ถูกถ้วยฉนวนเปรอะเปื้อนสารที่เหนียวอย่างเช่นซีเมนต์ ควรเปลี่ยนถูกถ้วยใหม่หลังจากใช้งานไปแล้ว 10 - 20 ปี[19]

2.1.3 สิ่งเปรอะเปื้อนจากฝุ่น

ในบริเวณที่ห่างไกลชายทะเลหรือโรงงานอุตสาหกรรมเช่น ตามชนบท ถูกถ้วยฉนวนอาจจะเปรอะเปื้อนด้วยทรายหรือดินที่ลมพัดหอบขึ้นมา ซึ่งจะพบว่าส่วนประกอบของความเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะเป็นแคลเซียมซัลเฟส ($CaSO_4$)และเกลือ(NaCl) สัดส่วนของสารดังกล่าวจะเปลี่ยนไปตามสภาพภูมิประเทศ บางครั้งในบริเวณที่มีปัญหาเรื่องความเปรอะเปื้อนแบบนี้มากๆ อาจมีแคลเซียมซัลเฟสเป็นส่วนประกอบของความเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ 30 - 70 % เมื่อเทียบกับโซเดียมคลอไรด์[19]

2.1 กลไกของการเปรอะเปื้อน

2.2.1 กระบวนการของการเปรอะเปื้อน

กระบวนการหลักที่นำสารต่างๆมายังผิวถูกถ้วยฉนวนคือ แรงโน้มถ่วงของโลก แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ของประจุไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีค่าเพอร์มิติวิตี้สูงในย่านที่สนามไฟฟ้าแผ่ขยายออกไป การกลายเป็นไอของสารละลาย และการจับเนื่องจากมีการต้านการเคลื่อนที่ของอากาศ

เมื่ออากาศที่ประกอบด้วยอนุภาคที่สามารถเกาะติดพัดผ่านถูกถ้วยฉนวน ประสิทธิผลในการเกาะจับผิวถูกถ้วยฉนวนขึ้นอยู่กับรูปร่างของถูกถ้วยฉนวน ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค และความเร็วในการพัดพา รูปร่างของถูกถ้วยฉนวนทำให้ลมที่พัดมาแยกออกเป็นสองส่วน จะมีส่วนหยุดนิ่งของอากาศ ลมที่พัดพาจะเปลี่ยนทิศทางออกจากจุดหยุดนิ่งของอากาศ แต่อนุภาคก็จับเกาะเนื่องจากมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศรอบนอก การเคลื่อนที่ของอนุภาคสัมพันธ์กับอากาศภายนอกที่ถูกต้านด้วยแรงหนืดของอนุภาค อย่างไรก็ตามก็เล็กน้อยสำหรับอนุภาคที่มีขนาดและความหนาแน่นต่ำ[20]

2.2.2 กระบวนการชะล้าง

การทำความสะอาดตัวเองโดยใช้ลมที่พัดผ่านหรือบางครั้งก็อาศัยอนุภาคที่ลอยมากับลมนั้นสามารถเกิดขึ้นได้บนผิวถูกถ้วยฉนวน การชะล้างอนุภาคที่จับเกาะทั้งหลายด้วยน้ำนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของถูกถ้วยฉนวนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับวิธีการเปียกน้ำด้วย

เม็ดฝนที่ตกลงมากระทบที่ผิวถูกถ้วยฉนวนภายใต้ลมที่พัดแรง สามารถล้างความเปรอะเปื้อนทุกประเภทออกจากผิวได้เนื่องจากความเร็วที่ตกกระทบ ทำนองเดียวกันกับการพ่นน้ำอัดความดันสูงและการใช้หัวฉีดแบบเจ็ต ก็ใช้หลักการเดียวกันคืออาศัยพลังงานจลน์ ถึงแม้ว่าวิธีเหล่านี้จะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวถูกถ้วยฉนวนแต่ก็ไม่มาก ซึ่งทั้งสองอย่างมีข้อเสียคือน้ำที่ตกกระทบผิวไม่หลุดหายไปทั้งหมดหลังจากตกกระทบ ถ้าน้ำเหล่านั้นต่อเนื่องกันก็มีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากเกิดลัดวงจรบนครีบของถูกถ้วยฉนวน

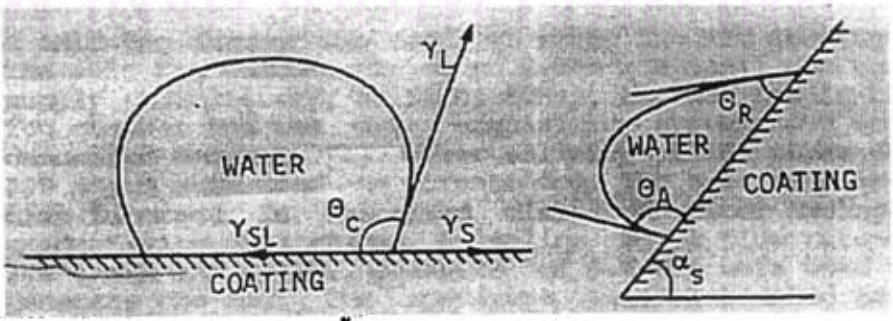
ฝนที่ตกลงมาเบาๆก็จะละลายองค์ประกอบส่วนที่ละลายน้ำได้ออกจากส่วนที่ไม่ละลายน้ำ และอาจทำให้เกิดการลัดวงจรบนครีบของถูกถ้วยฉนวน ถ้าบริเวณที่เปรอะเปื้อนนั้นกว้างและระยะห่างของครีบสั้น

การเปียกเพียงเล็กน้อยเนื่องจากน้ำค้างหรือหมอกก็อาจทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายสิ่งเปรอะเปื้อนตามแนวที่มีเกรเดียนต์สูง ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องมีฝนตก

แต่อย่างไรก็ตามการทำความสะอาดถูกถ้วยฉนวนจริงจะดีกว่าการให้ถูกถ้วยฉนวนมีขบวนการชะล้างด้วยตัวมันเอง แต่วิธีการต่างๆในการทำความสะอาดต้องเลือกให้เหมาะสม [20]

2.3 ไฮโดรโฟบิกและไฮโดรฟิลิก

เมื่อหยดน้ำตกลงบนพื้นผิวของของแข็ง มุมที่เกิดขึ้นระหว่างระนาบของพื้นผิวกับหยดน้ำจับเรียกว่ามุมสัมผัส(θ_c) รูปร่างของหยดน้ำที่ที่ตกลงไปนั้นขึ้นอยู่กับสารที่เป็นพื้นผิวนั้นรวมทั้งสถานะทางกายภาพและทางกลของพื้นผิวด้วย พื้นผิวของของแข็งนั้นอาจมีพลังงานผิว(Surface energy) สูงหรือต่ำก็ได้ ถ้าพลังงานผิวสูงก็จะเปียกทันที และหยดน้ำก็จะกระจายกลายเป็นฟิล์มต่อเนื่องคลุมที่ผิว ในกรณีนี้มุมสัมผัสจะเป็นศูนย์ พื้นผิวจะเปียกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเราเรียกว่า พื้นผิวไฮโดรฟิลิก (Hydrophlilic surface) ในทางตรงกันข้าม ถ้าพลังงานผิวต่ำก็จะไม่ชอบน้ำ น้ำที่ตกลงมาจะแยกกันอยู่เป็นหยดเล็กๆ กรณีนี้มุมสัมผัสจะใหญ่(>90°) เราเรียกพื้นผิวแบบนี้ว่า พื้นผิวไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic surface)หรือพื้นผิวไม่ชอบน้ำ(Water repellent) และหยดน้ำก็จะร่วงออกจากผิวที่มีพลังงานต่ำ[6,7,21]



รูปที่ 2.1 แสดงมุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวของของแข็งในแนวราบและแนวเอียง
γ_s=แรงตึงผิวของแข็ง γ_L= แรงตึงผิวของเหลว γ_{SL}= แรงตึงผิวระหว่างของแข็งของเหลว

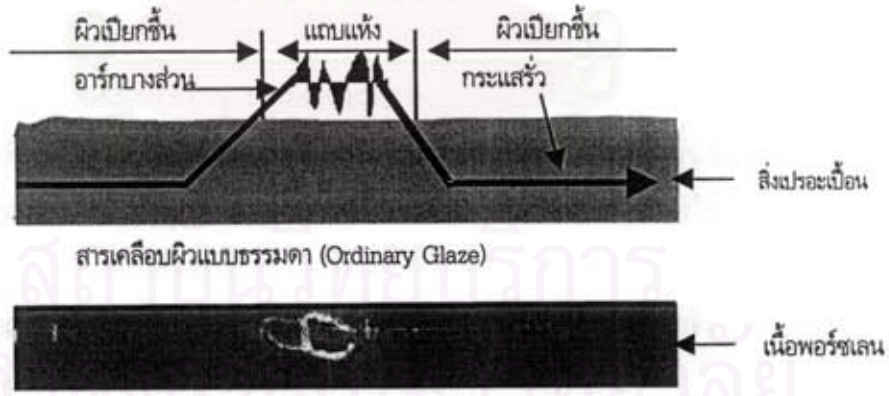
2.4 ผลกระทบของสิ่งเปรอะเปื้อนต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน

เมื่อมีสิ่งเปรอะเปื้อนเกาะที่ผิวลูกถ้วยฉนวนและมีไอน้ำ อาจทำให้เกิดวาบไฟตามผิวได้ ซึ่งการเกิดวาบไฟตามผิวมีลำดับขั้นตอนต่างๆที่เกิดขึ้นคือ

2.4.1 กลไกการเกิดแถบแห้ง

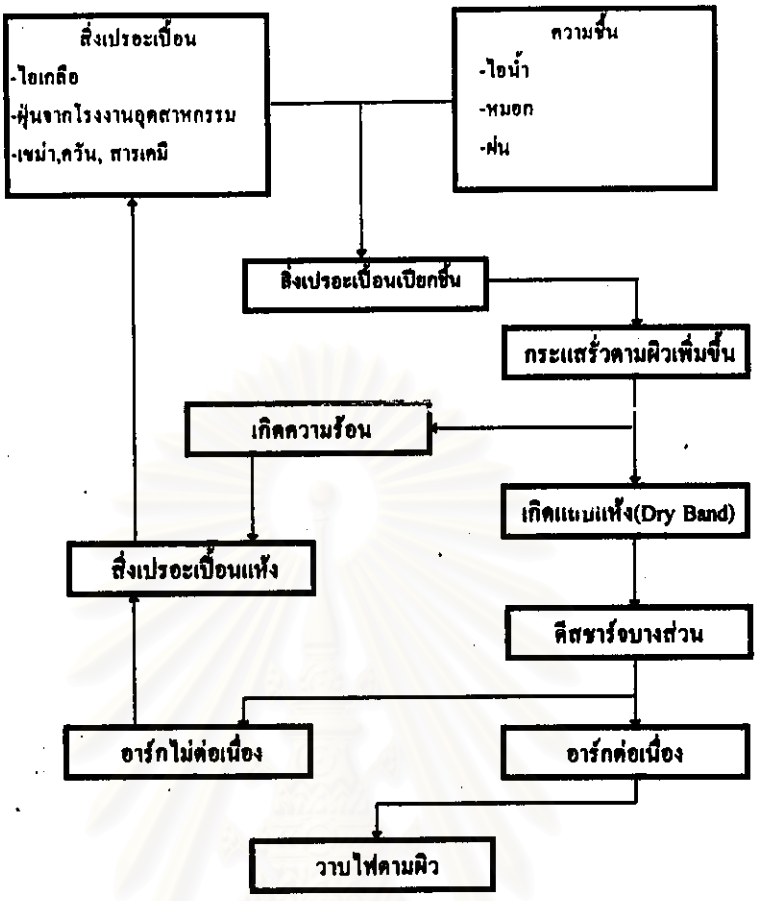
ปัญหาเรื่องความเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนจะรุนแรงถ้าความเปรอะเปื้อนมีเกลือเป็นส่วนประกอบด้วย การเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อนจะเกิดเมื่อสิ่งเปรอะเปื้อนเหล่านี้เปียกชื้นเท่านั้น

การเกิดวาบไฟตามผิวเริ่มต้นจากการก่อตัวของฟิล์มนำไฟฟ้า ขณะเดียวกันก็มีกระแสรั่วไหลตลอดผิวลูกถ้วยฉนวนและมีค่าเพิ่มมากขึ้น กระแสที่เพิ่มขึ้นนี้เองทำให้สิ่งเปรอะเปื้อนเปียกน้ำที่จับอยู่บนผิวลูกถ้วยร้อนขึ้น น้ำก็จะระเหยกลายเป็นไอในบริเวณที่มีความหนาแน่นกระแสสูง จุดที่แห้งเนื่องจากน้ำระเหยออกไปเรียกว่า แถบแห้ง และความต้านทานของจุดแห้งเหล่านี้ก็เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นกระแสก็จะไหลรอบๆจุดแห้งนี้ซึ่งทำให้ความหนาแน่นกระแสสูงรอบๆ แถบแห้ง การระเหยของน้ำก็เพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดของแถบแห้งขยายตัวออกไปในทิศทางตั้งฉากกับกระแสรั่วที่ไหล เนื่องจากกระแสที่ไหลและความต้านทานที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมแถบแห้ง และเนื่องจากว่าแถบแห้งนั้นมีขนาดแคบๆ แรงดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นจนกระทั่งทำให้อากาศที่อยู่เหนือแถบแห้งเกิดเบรกดาวน์ ซึ่งเรียกว่าเกิดดิสชาร์จบางส่วน(partial discharge) หรือ โคโรนา ดังรูปที่2.2



รูปที่2.2 แสดงการเกิดอาร์กบางส่วนบนผิวลูกถ้วยฉนวนที่ใช้กันอยู่ทั่วไปเนื่องจากความเปรอะเปื้อน

ถ้ามีแถบแห้งจำนวนมากที่ผิวลูกถ้วยฉนวนอยู่ใกล้ๆกัน และมีเงื่อนไขแบบเดียวกัน กรณีเลวร้ายที่สุดคือ ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นบนแถบแห้งแต่ละอันเชื่อมเข้าด้วยกัน ผลสุดท้ายก็จะนำไปสู่การเกิดวาบไฟตามผิวบนลูกถ้วยฉนวนอย่างสมบูรณ์[1] ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นถ้าค่ายอดของกระแสรั่วที่ผิวลูกถ้วยสูงถึง 300 mA[22] ลำดับการเกิดแสดงในรูปที่ 2.3

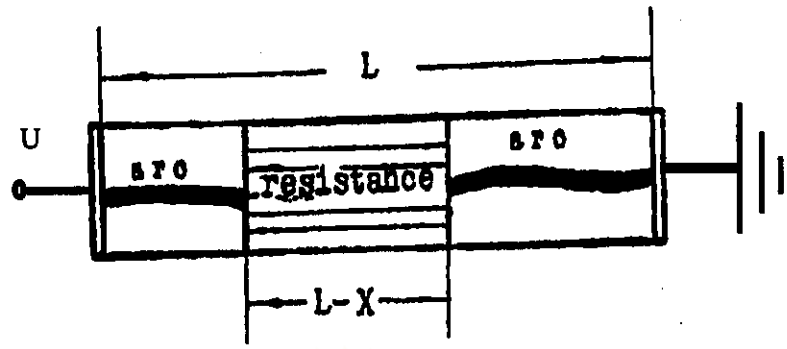


รูปที่ 2.3 แสดงปรากฏการณ์การเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อน

2.4.2 แบบจำลองการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อน

ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อนคือชั้นของความเปรอะเปื้อนที่ผิวถูกถ้วยฉนวนนำไฟฟ้า ถ้าถูกถ้วยฉนวนรองรับแรงดันคงที่ แต่สภาพนำไฟฟ้าของชั้นความเปรอะเปื้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเปียกชื้นและการจับของสิ่งเปรอะเปื้อนเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าวิกฤติ การเกิดวาบไฟตามผิวก็สามารถเกิดขึ้นได้ง่าย ซึ่งเราเรียกค่านี้ว่า สภาพนำไฟฟ้าตามผิววิกฤติ(Critical Surface Conductivity)และเรียกค่ากระแสที่ไหลบนผิวว่า กระแสรั่ววิกฤติ[14]

กระบวนการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อนสำหรับแรงดันใช้งาน AC ซับซ้อน เนื่องจากการแปรค่าของแรงดันและกระแส การเกิดวาบไฟตามผิวของถูกถ้วยฉนวนเปรอะเปื้อนสามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลของอาร์กบางส่วน(รูปที่2.2)อนุกรมกับความต้านทานของสิ่งเปรอะเปื้อนส่วนที่เหลือ ซึ่งสามารถเขียนเป็นโมเดลง่ายๆได้ดังรูปที่2.4



รูปที่ 2.4 โมเดลของการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อน[14]

L เป็นระยะรั่วของลูกถ้วยฉนวน X เป็นความยาวของอาร์ก พื้นที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนแทนด้วยพื้นที่ของโมเดล การแพร่กระจายของ AC อาร์กบนผิวเปรอะเปื้อนนั้นซับซ้อนมาก ความยาวและความเข้มของอาร์กเปลี่ยนแปลงไป 100 เท่าภายในหนึ่งวินาที อาร์กจะเกิดขึ้นมากเมื่อแรงดันถึงค่ายอด จากนั้นอาร์กก็จะลดลงและเปลี่ยนไปตามขนาดแรงดัน ซึ่งในกรณีนี้อาร์กจะดับเมื่อกระแสผ่านศูนย์ แต่ถ้าอาร์กดับไม่ทันเมื่อกระแสผ่านศูนย์ก็จะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวขึ้น[14]

2.5 มาตรการในการแก้ไขผลกระทบจากความเปรอะเปื้อน

เพื่อป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวดังที่กล่าวมาแล้วนั้นต้องทำให้กระแสรั่วมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งในปัจจุบันมีวิธีการที่การไฟฟ้าทั่วโลกนิยมใช้ในการจำกัดกระแสรั่วและควบคุมความเปรอะเปื้อนคือ [7,19,21,]

2.5.1 การทำความสะอาดผิวลูกถ้วยฉนวนตามระยะเวลาที่กำหนดไว้

วิธีนี้เป็นการบำรุงรักษาในการใช้งานตามปกติวิธีนี้ง่ายแต่ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ ต้องใช้แรงงานและค่าใช้จ่ายมาก และไม่สามารถที่จะทำได้บ่อยๆในบริเวณที่มีปัญหาเรื่องสิ่งเปรอะเปื้อนสูง วิธีการทำความสะอาดผิวลูกถ้วยฉนวนสามารถแบ่งคร่าวๆได้ 3 วิธีคือ

1) ทำความสะอาดโดยใช้พนักงานล้างทำความสะอาดผิว

2) ทำความสะอาดโดยการใช้เครื่องมือฉีดล้างโดยไม่ต้องดับไฟ

3) ทำความสะอาดโดยการใช้เครื่องมือแบบติดตั้งในบริเวณที่ต้องการทำความสะอาด

การล้างทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนโดยใช้พนักงานต้องมีการดับไฟเพื่อให้สามารถทำงานได้ ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะ ถ้ามีโหลดที่ต้องการความเชื่อมั่นของระบบสูง เช่นระบบฉุกเฉิน ด้วยเหตุนี้เองวิธีในข้อ2) จึงนำมาใช้สำหรับ ล้างลูกถ้วยฉนวนในขณะที่จ่ายไฟอยู่ ในกรณีนี้ลูกถ้วยฉนวนจะถูกล้าง ด้วยอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในท่อฉนวน ซึ่งควบคุมโดยพนักงานผู้ชำนาญ อย่างไรก็ตามวิธีนี้เป็นงานที่อันตรายและใช้เวลานานถ้ามีลูกถ้วยฉนวนจำนวนมาก

วิธีการที่ได้รับความนิยมส่วนใหญ่จะเป็นการทำความสะอาดโดยใช้อุปกรณ์แบบฉีดล้างโดยไม่ดับไฟ ซึ่งหมายความว่าน้ำจะถูกฉีดเป็นฝอยจากหัวฉีดเหนือลูกถ้วยฉนวน และความเปรอะเปื้อนก็จะถูกชะล้างออกจากลูกถ้วยฉนวน ตอนเริ่มต้นของการทำความสะอาดความต้านทานบนผิวลูกถ้วยฉนวนจะลดลงเนื่องจากการเปียกน้ำ ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจได้ว่าการทำความสะอาดสำเร็จตามวัตถุประสงค์ไม่เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิว อุปกรณ์ที่ใช้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องได้รับการรับรองอย่างดี

2.5.2 กำจัดสิ่งสกปรกโดยผิวของลูกถ้วยฉนวน

โดยออกแบบให้ผิวของลูกถ้วยให้มีแรงต้านอากาศน้อยเพื่อให้ผิวลูกทำความสะอาดด้วยแรงลมและฝน ซึ่งสามารถลดการวาบไฟเนื่องจากความเปรอะเปื้อนได้ แต่ในทางปฏิบัติวิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับบางบริเวณเช่น ทะเลทราย

2.5.3 เพิ่มระยะรั่ว

การเพิ่มจำนวนของลูกถ้วยฉนวนหรือใช้ลูกถ้วยฉนวนที่มีครีบเพิ่มขึ้น วิธีนี้เป็นการเพิ่มความยาวของระยะกระแสรั่ว แต่อย่างไรก็ตามก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ขนาดของเสาส่งไฟฟ้า และระยะปลอดภัย (clearances) วิธีนี้ยังคงต้องการการทำความสะอาดตามเวลาที่กำหนดแต่ไม่บ่อยเหมือนวิธีแรก

2.5.4 การทำให้ผิวของลูกถ้วยฉนวนแห้งตลอดเวลา

การทำให้ผิวลูกถ้วยแห้งตลอดเวลาทำได้โดยใช้สารกึ่งตัวนำเคลือบผิว เพื่อป้องกันการเกิดแถบแห้ง เนื่องจากมีกระแสรั่วเล็กน้อยไหลในชั้นสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้ผิวลูกถ้วยฉนวนร้อนและแห้ง

2.5.5 ป้องกันการเกิดฟิล์มของน้ำบนผิวลูกถ้วยฉนวน

วิธีนี้จะใช้สารประเภทไม่เปียกน้ำหรือไม่ชอบน้ำ(water repellent) เคลือบบนผิวฉนวนหรือใช้เป็นฉนวนรองรับแรงดันโดยตรง

ส่วนประกอบของสารที่ใช้เคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานในภูมิภาคต่างๆของโลกส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีซิลิโคนเป็นตัวเริ่มต้น ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ใช้กันมากในยุโรป [26,27]

การเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารนี้ก็เพื่อป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อน การป้องกันด้วยวิธีนี้มีราคาแพงต้องการคาบเวลาในการดูแลรักษาเพื่อล้างออกและเคลือบใหม่ ความถี่ของการเคลือบใหม่มีช่วงตั้งแต่สามเดือนจนถึงห้าปีขึ้นอยู่กับระดับของความเปรอะเปื้อนและสภาวะอากาศ เมื่อสารที่ใช้เคลือบผิวหมดอายุการใช้งานส่วนประกอบของมันก็จะเริ่มเสื่อมคุณภาพ ความสามารถในการต้านการเปียกน้ำจะลดลง อาจเกิดอาร์กบนพื้นผิวและบางครั้งเป็นต้นเหตุทำให้เกิดการแตกร้าว บนผิวลูกถ้วยฉนวน

ส่วนประกอบของสารที่เคลือบผิวมีคุณสมบัติเด่นชัด สองประการ คือ เพื่อจับอนุภาคของสิ่งเปรอะเปื้อนและเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟิล์มของน้ำบนผิว

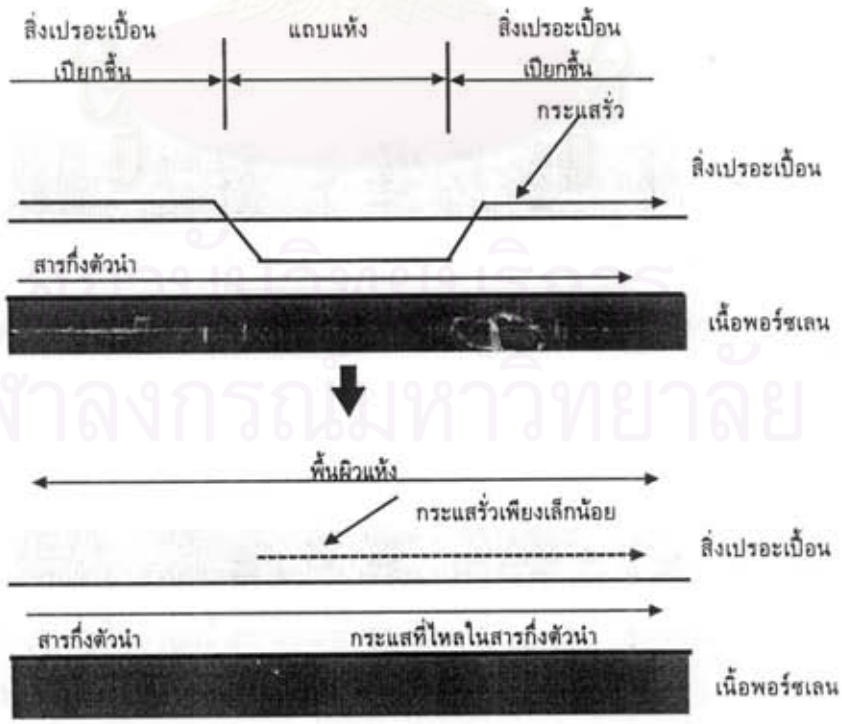
ผิวของลูกถ้วยฉนวนที่จะทาสารเคลือบผิวจะต้องสะอาดและแห้ง สารเคลือบผิวต้องมีการเคลือบหรือทาบนผิวลูกถ้วยฉนวนอย่างทั่วถึงทั้งด้านบนและด้านล่างด้วยความหนา 1.5 ถึง 5 mm ความหนาของสารที่ใช้เคลือบผิวขึ้นอยู่กับความเปรอะเปื้อนและสภาพที่ตั้งทางภูมิศาสตร์[7,19]

การเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนต้องกระทำตอนที่ไม่มีการจ่ายไฟด้วยวิธีการทาด้วยแปรง หรือใช้การฉีดพ่นเป็นฝอย

2.6 ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ(Semiconducting Glazed Insulator)

ลูกถ้วยฉนวนแบบเดิมที่ใช้กันอยู่ เมื่อผิวที่เปรอะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนเปียกน้ำจะมีกระแสรั่วไหลบนชั้นสิ่งเปรอะเปื้อนที่เปียกชื้นและแถบแห้งจะเริ่มก่อตัวขึ้น เมื่อความหนาแน่นของกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมแถบแห้งสูงพอก็จะเกิดอาร์กบางส่วนและนำไปสู่การเกิดวาบไฟตามผิวในที่สุด

ในทางตรงกันข้ามอาร์กบางส่วนจะไม่เกิดขึ้นบนลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำเนื่องจากว่าแรงดันที่ตกคร่อมแถบแห้งจะถูกควบคุมให้มีค่าน้อยๆด้วยความต้านทานของสารที่เคลือบผิว กระแสรั่วที่ไหลในชั้นสิ่งเปรอะเปื้อนและสารกึ่งตัวนำที่เคลือบ ทำให้ผิวของลูกถ้วยฉนวนแห้งและสุดท้ายก็เข้าสู่สภาวะเสถียรซึ่งจะมีค่ากระแสรั่วเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ยังคงไหลในสารกึ่งตัวนำที่เคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [2,3]



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะสมบัติของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำในสภาวะเปรอะเปื้อน

ลูกถ้วยแบบนี้มีข้อดีเมื่อเทียบกับลูกถ้วยแบบธรรมดาคือ

1) ผิวของลูกถ้วยจะแห้งโดยความร้อนเนื่องจากมีกระแสไหลในสารกึ่งตัวนำที่เคลือบผิว

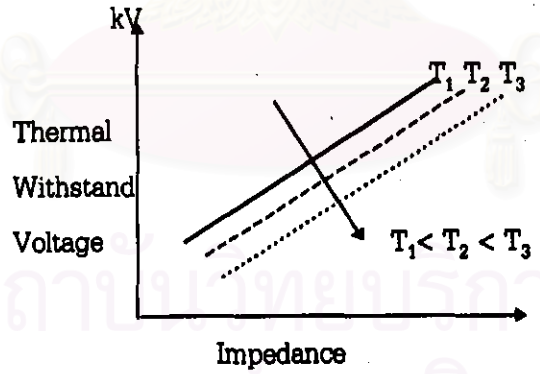
2) การกระจายของแรงดันสม่ำเสมอตลอดผิวลูกถ้วยเนื่องจากผลของความต้านทานบนสารกึ่งตัวนำที่เคลือบผิว

2.6.1 โครงสร้างของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ

ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำก็เหมือนลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานกันทั่วไปอย่างเช่น ลูกถ้วยแขวน ลูกถ้วยคอต้นยาว ลูกถ้วยแท่ง ลูกถ้วยก้านตรง เป็นต้น ยกเว้นสารที่ใช้เคลือบผิวจะเป็นสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่ใช้เคลือบผิวประกอบด้วย Tin Oxide (SnO_2) และ Antimony Oxide (Sb_2O_5) และเติม Niobium Oxide (Nb_2O_7) ลงไปเล็กน้อยเพื่อป้องกันการผุกร่อนของสารที่เคลือบผิว[1-3]

2.6.2 สมดุลอุณหภูมิบนผิวลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ

แรงดันคงทนทางความร้อน หมายถึง แรงดันที่ไม่เป็นต้นเหตุทำให้เกิด เสียสภาพทางความร้อนภายใต้สภาพการทำงานของผิวลูกถ้วยฉนวนที่กำหนดให้ จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าที่ค่าอิมพิแดนซ์สูงๆ จะมีค่า ความคงทนต่อแรงดันสูงเนื่องจากว่าเมื่ออิมพิแดนซ์สูงจะมีกระแสไหลเพียงเล็กน้อย ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นของสารกึ่งตัวนำจึงเล็กน้อย ซึ่งจะทำให้เสถียรภาพทางความร้อนดี แม้กระนั้นก็ตาม ถ้า อุณหภูมิสภาวะแวดล้อมสูงค่าอิมพิแดนซ์จะต่ำ



รูปที่ 2.6 แสดง ลักษณะสมบัติความคงทนของแรงดันทางความร้อนของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ

จากที่กล่าวมาแล้วสามารถพิจารณาในเชิงสมการได้ดังนี้ เมื่อ P เป็นพลังงานที่ใช้บนผิวลูกถ้วยฉนวนแล้วทำให้อุณหภูมิที่ผิวลูกถ้วยฉนวนเพิ่มขึ้นเป็น T สูงจาก อุณหภูมิสภาวะปกติ T_0 สมดุลอุณหภูมิของผิวลูกถ้วยฉนวนเขียนแทนด้วยสมการดังนี้

$$C\frac{dT}{dt} + D_c(T - T_o) + D_r(T^4 - T_o^4) = P = \frac{E^2}{R} \quad (2.1)$$

โดยที่ C = ความจุความร้อนของผิวลูกถ้วยฉนวน J/K

D_c= ค่าคงที่พลังงานสูญเสียด้วยการนำและพาความร้อน W/ K^4

D_r= ค่าคงที่การแผ่ความร้อนของลูกถ้วยฉนวน W/K

t = เวลาหลังจากจ่ายแรงดัน sec

E= แรงดันที่ป้อน V , R = ความต้านทานของฉนวน Ω

เมื่อนำลูกถ้วยมาใช้งานในสภาวะปกติ $T - T_o << T_o$ ดังนั้นจึงสามารถสมมติว่า

$$D_r(T^4 - T_0^4) = 4D_rT_0^3(T - T_0) \quad (2.2)$$

ดังนั้นจากสมการจะได้

$$C\frac{dT}{dt} + D(T - T_o) = P = \frac{E^2}{R} \quad (2.3)$$

โดยที่ $D = D_c + 4D_rT_0^3$

ถ้าแก้สมการที่สภาวะเริ่มต้น t=0 , $T=T_0$ จะได้

$$T = T_0 + \frac{P}{D}\left\{1 - \exp\left(-\frac{D}{C}t\right)\right\} \quad (2.4)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่าหลังจากที่ป้อนแรงดันค่าคงที่เข้าไปแล้ว อุณหภูมิของลูกถ้วยฉนวนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปจนเกิดสมดุลย์อุณหภูมิ $T= T_0 + P/D$ แต่อย่างไรก็ตามถ้า อุณหภูมิสภาวะแวดล้อมสูงที่ค่าพลังงาน P เดียวกัน สมดุลย์อุณหภูมิของลูกถ้วยฉนวนก็จะสูงตามไปด้วยซึ่งหมายความว่าเสถียรภาพทางอุณหภูมิก็จะไม่ดีตามไปด้วย ดังนั้นการใช้งานลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำต้องมีการเลือกความต้านทานให้พอเหมาะเพื่อให้มีเสถียรภาพทางอุณภูมิที่ดี [24]

2.6.2 แรงดันกระจายที่ผิวลูกถ้วย

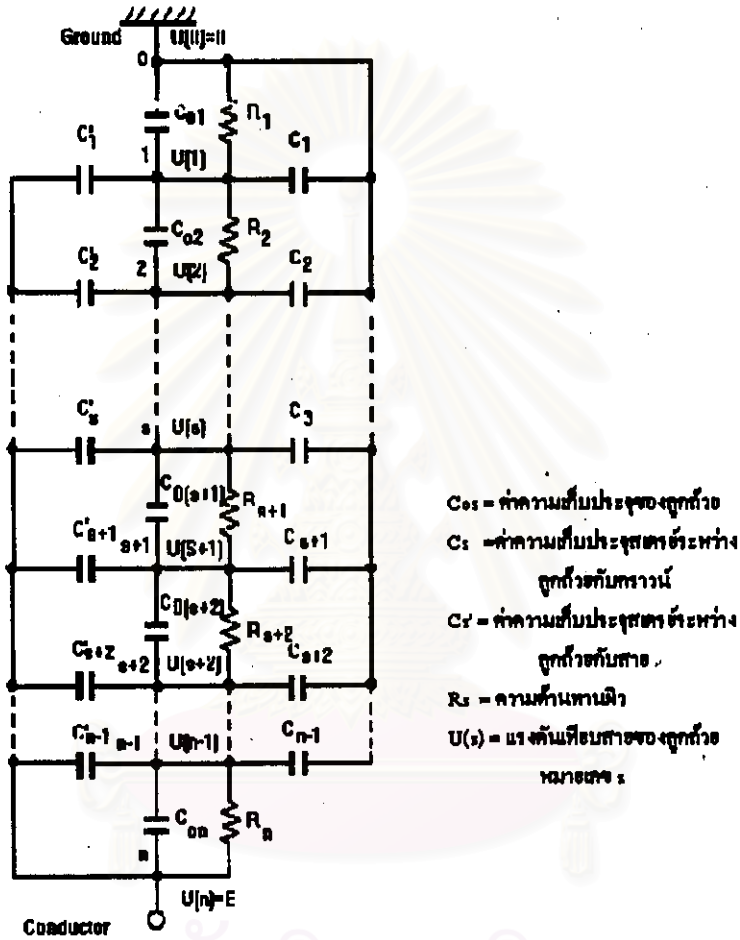
เป็นที่ทราบกันดีว่าแรงดันกระจายบนลูกถ้วยฉนวนแบบเคลือบธรรมดาไม่สม่ำเสมออย่างเช่นพวงลูกถ้วยแขนวนลูกถ้วยที่อยู่ติดสายไฟจะรองรับแรงดันมาก ส่วนลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำแรงดันกระจายจะสม่ำเสมอเนื่องจากผลของความต้านทานที่ผิวเนื่องจากสารกึ่งตัวนำ ดังวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่2.6 ถ้าให้ค่า ความเก็บประจุของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำแทนด้วย$C_{01},C_{02},...C_{0n}$ โดยที่ n คือจำนวนลูกถ้วยบนพวงลูกถ้วยนับจากด้านกราวน์ไปยังสายไฟ ค่าเก็บประจุลงกราวน์ของและลงสายเขียนแทนด้วย $C_1,C_2,...C_{n-1}$ และ $C'_1,C'_2,...C'_{n-1}$ จากด้านกราวน์มายังสาย ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนแทนด้วย $R_1,R_2,...R_N$

จากวงจรสมมูล ศักย์ที่จุด s , (s+1) , (s+2) แทนด้วย U(s) ,U(s+1),U(s+2) ดังนั้นจะได้สมการ[24]

$$\frac{U(s+2)}{Z_{(s+2)}}-\left\{\frac{1}{Z_{(s+2)}}+\frac{1}{Z_{(s+1)}}+j\omega(C_{(s+1)}+C'_{(s+1)})\right\}U(s+1)+\frac{U(s)}{Z_{(s+1)}}+j\omega\{\ C_{(s+1)}U(0)+C'_{(s+1)}U(n)\ \}=0 \qquad (2.5)$$

โดยที่ $Z_s=\dfrac{R_s}{1+j\omega C_{0s}R_s}$,U(0)=0 , U(n) = E

E =แรงดันที่ถูกถ้วยฉนวนรองรับ



รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลของพวงถูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ

จากการหาผลเฉลยของสมการจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์สมมูลย์กับจำนวนถูกถ้วยฉนวน ค่อนข้างสม่ำเสมอต่างจากถูกถ้วยฉนวนแบบเคลือบธรรมดาที่ถูกถวยฉนวนถูกที่อยู่ติดกับสายไฟต้องรองรับแรงดันมาก