บทที่ 2

การฉนวนสายไฟฟ้าแรงสูงด้วยลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน

ในระบบสายส่งพลังงานไฟฟ้าแรงสูงที่ขึงสายในอากาศ โดยทั่วไปจะใช้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนเป็นอุปกรณ์ฉนวน การเลือกชนิดของลูกถ้วยจะขึ้นกับระบบแรงดัน ระบบจำหน่ายแรงดันไม่เกิน 52 kV มักจะใช้ลูกถ้วยก้านตรงเป็นฉนวนรองรับ แต่ถ้าเป็นระบบส่ายส่งแรงสูง คือ แรงดันเกิน 52 kV มักใช้ลูกถ้วยแขวนมาต่อเข้าเป็นพวงฉนวนรองรับ เพราะสามารถเพิ่มจำนวนลูกถ้วยฉนวนได้ตามระดับแรงดันระบบ

ลูกถ้วยฉนวนในระบบสายส่งพลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าอุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพในการส่งพลังงาน ดังนั้นลูกถ้วยฉนวนจึงต้องมีคุณสมบัติต่าง ๆ ได้ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

2.1 ชนิดของลูกถ้วยฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

ลูกถ้วยฉนวนที่มีใช้กันอยู่ในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีอยู่หลายประเภท ได้แก่

ก) ลูกถ้วยแขวน(Suspension Insulator) ลูกถ้วยแบบนี้มีหัวครอบอยู่ด้านบนของฉนวน และมีขั้วต่ออยู่ด้านล่าง ซึ่งสามารถต่อกันเป็นพวงได้ จึงเหมาะสำหรับระบบสายส่งแรงสูง เพราะสามารถเพิ่มจำนวนลูกถ้วยฉนวนเมื่อใช้กับระบบแรงดันสูงขึ้น แต่มีลูกถ้วยแบบนี้มีค่าความเก็บประจุสูง ทำให้มีผลกระทบต่อแรงดันกระจายบนพวงลูกถ้วย โดยลูกถ้วยแต่ละลูกจะได้รับแรงดันตกคร่อมไม่เท่ากัน ลูกถ้วยที่อยู่ใกล้กับสายไฟจะรับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่า[4]

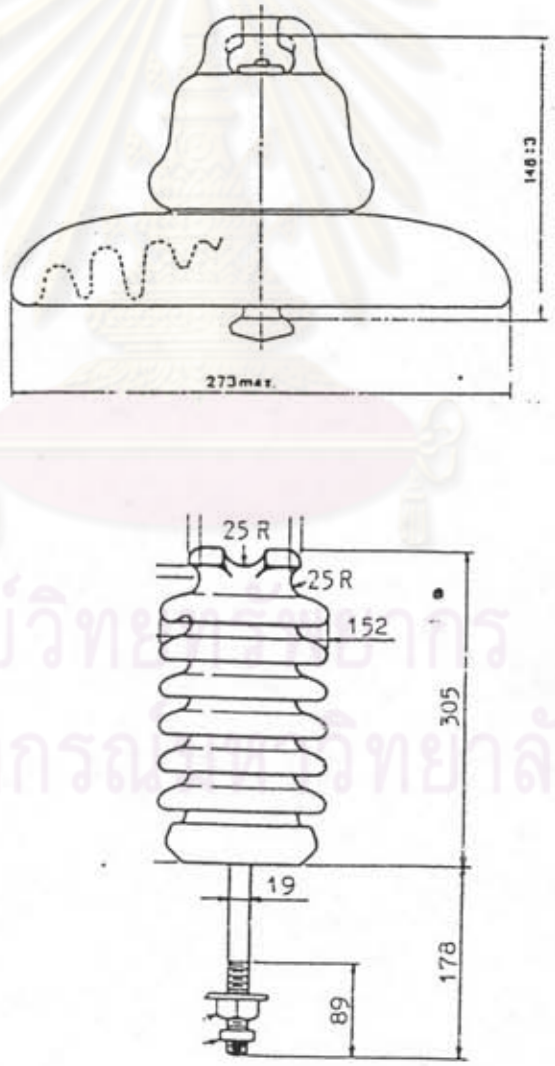
ข) ลูกถ้วยท่อนยาว(Long Rod Insulator) เหมาะกับระบบสายส่งแรงสูง เพราะตลอดความยาวของฉนวนไม่มีส่วนโลหะ จะมีหัวครอบโลหะอยู่ที่ส่วนปลายของท่อนลูก-

ถ้วยเพื่อใช้สำหรับต่อลูกถ้วยแบบเดียวกันเท่านั้น ลูกถ้วยแบบนี้มีค่าความเก็บประจุต่ำ จึงไม่มีปัญหาเกี่ยวกับผลต่อแรงดันกระจายตามแนวความยาวของท่อนลูกถ้วย

ค) ลูกถ้วยแท่ง(Line Post Insulator) เป็นลูกถ้วยที่ใช้กับระบบจำหน่าย ประกอบด้วยชิ้นพอร์ซเลนที่ด้านล่างยึดติดอิเล็กโทรดโลหะต่อลงดิน ด้านบนมีร่องสำหรับพาดตัวนำ ลูกถ้วยจะมีระยะระหว่างอิเล็กโทรดมากพอ จึงไม่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำ

ง) ลูกถ้วยหลัก(Post Insulator) เป็นชิ้นพอร์ซเลนที่มีอิเล็กโทรดโลหะยึดติดตั้งด้านบนและด้านล่าง ใช้เป็นตัวยึดรับน้ำหนักและเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

จ) ลูกถ้วยก้านตรง(Pin Insulator) เป็นลูกถ้วยสำหรับระบบจำหน่ายที่จะศึกษาในการวิจัยครั้งนี้



รูปที่ 2.1 รูปลักษณะของลูกถ้วยฉนวนแบบต่าง ๆ

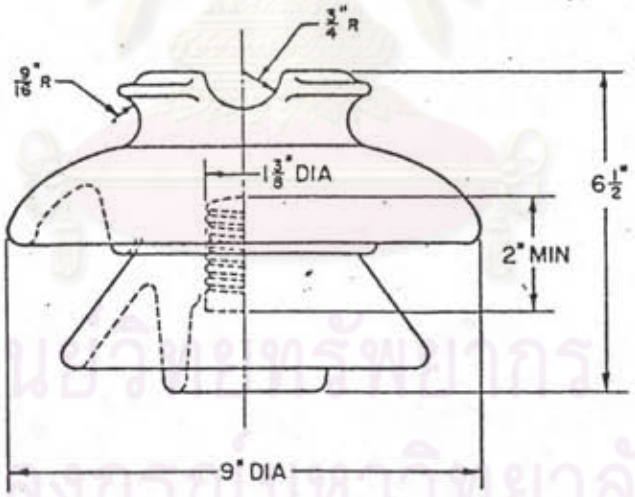
a) ลูกถ้วยแขวน b) ลูกถ้วยแท่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 ลักษณะทางภายภาพของลูกถ้วยฉนวน

ลูกถ้วยก้านตรงเป็นลูกถ้วยที่ใช้ในระบบจำหน่ายที่มีแรงดันระบบสูงสุดไม่เกิน 52 kV ใช้งานโดยการยึดติดกับก้านโลหะเพื่อยึดลูกถ้วยบนไม้คอนและต่อลงดิน ด้านบนของลูกถ้วยฉนวนจะมีร่องสำหรับพาดสายไฟ ลูกถ้วยแบบนี้จะใช้ลูกเดียวโดด ๆ และยึดแบบแข็งตัวไม่สามารถแกว่งไปมาได้ ซึ่งต่างกับลูกถ้วยแขวนที่ยึดแบบอ่อนตัว

ลูกถ้วยก้านตรงจะมีปีกหลายชั้น เพื่อเพิ่มระยะรั่ว(Leakage Distance) ทำให้พื้นผิวยังคงสภาวะแห้งอยู่ได้ในสภาวะฝนตก ผิวของลูกถ้วยฉนวนจะเคลือบเพื่อทำให้ผิวมัน ให้สิ่งสกปรกและฝุ่นละอองเกาะผิวได้ยาก และเมื่อฝนตกก็จะถูกชะล้างได้ง่าย ทำให้สามารถทนต่อแรงดันได้สูงขึ้น สารที่ใช้เคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนจะต้องมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเท่ากับเนื้อพอร์ซเลน ในรูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของลูกถ้วยก้านตรง



รูปที่ 2.2 ลักษณะของลูกถ้วยก้านตรง

เนื่องจากลูกถ้วยก้านตรงมีตัวนำแรงสูงที่พาดอยู่บนร่องพาดสายอยู่ใกล้กับก้านตัวนำที่ต่อลงดิน มีฉนวนพอร์ซเลนคั่นอยู่ ซึ่งมีความหนาไม่เกิน 6 เซนติเมตร ในการใช้งานลูกถ้วยฉนวนก้านตรง จะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงบนผิวฉนวนในบริเวณสายรัดรอบคอ ซึ่งทำให้เกิดโคโรนาและคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุขึ้น ดังนั้นในการใช้งานลูกถ้วยก้านตรงในย่านชุมชน จะต้องมีการเคลือบสารกึ่งตัวนำบริเวณด้านบนของปีกบนของลูกถ้วยฉนวนเพื่อลด

ความเครียดสนามไฟฟ้า ป้องกันมิให้เกิดโคโรนา กล่าวคือป้องกันมิให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ(Radio-influence Voltage, RIV)

พิกัดทางกายภาพที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวนได้แก่

ก) ระยะรั่ว หมายถึงผลรวมของระยะที่สั้นที่สุดที่วัดไปตามผิวฉนวนระหว่างส่วนที่นำไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในการทดสอบแรงดันวาบไฟตามผิวแห้ง ผิวที่อาบด้วยน้ำยาเคลือบกึ่งตัวนำให้รวมเป็นส่วนหนึ่งของระยะรั่วด้วย

ข) ระยะอาร์กแห้ง(Dry-arcing distance) หมายถึงระยะที่สั้นที่สุดผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบลูกถ้วยฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดในการทดสอบการวาบไฟตามผิวแห้ง

2.3 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน

ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวนได้แก่[11]

ก) แรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ หมายถึงค่ารากกำลังสองเฉลี่ย(root mean Square) ของแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำซึ่งในสภาวะมาตรฐานจะทำให้เกิดการดีสชาร์จบนผิวฉนวนแข็ง ทำให้เสียสภาพการฉนวนชั่วครู่

ข) แรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต หมายถึงแรงดันอิมพัลส์ที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบเป็นจำนวนครั้งครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งทั้งหมดที่ป้อนแรงดันให้กับตัวอย่างทดสอบในสภาวะมาตรฐาน

ค) แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ วัดเมื่อตัวอย่างทดสอบได้รับแรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำที่ระดับแรงดันที่กำหนด โดยมีค่าเป็นไมโครโวลต์

ง) แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่าน หมายถึงค่ารูตมีนแสควร์(root mean Square)ของแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำซึ่งในสภาวะที่กำหนดจะเกิดการปล่อยประจุทำลายทะลุผ่านลูกถ้วย

2.4 ตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนในการศึกษา

ลูกถ้วยตัวอย่างที่จะใช้ในการศึกษาและทดลองเป็นลูกถ้วยก้านตรง : พอร์ซเลน แบบ ข (แบบ 56-2)[11] ซึ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.279-2521 ลูกถ้วยฉนวนชนิดนี้ใช้กับแรงดันระบบ 22 kV และมี

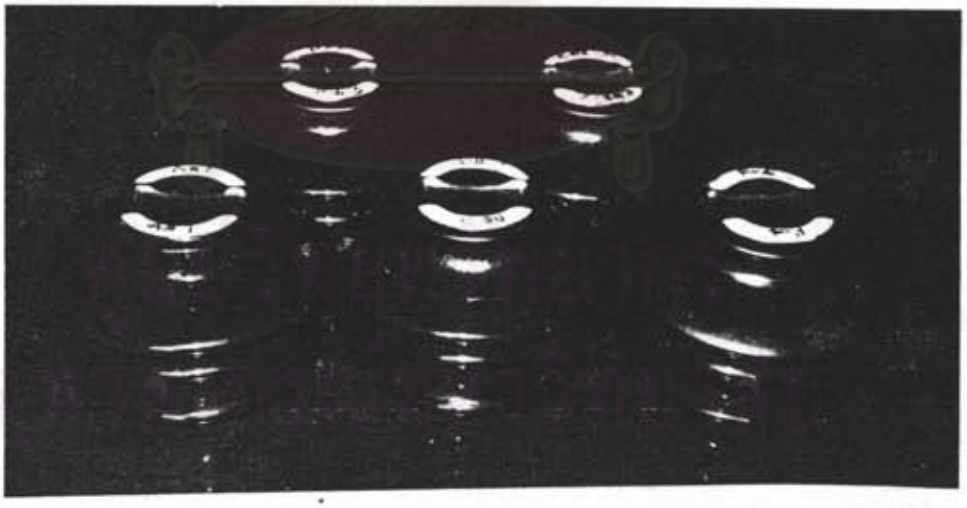
ก. พิกัดทางภายภาพ

พิกัดทางมิติต่ำสุด

- ระยะรั่ว 432 ม.ม.
- ระยะอาร์กแห้ง 210 ม.ม.
- ความสูงของก้านโลหะ 178 ม.ม.

ข. พิกัดทางไฟฟ้า

- พิกัดแรงดันวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำ เท่ากับ 110 kVrms
- พิกัดแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก เท่ากับ 175 kV
- พิกัดแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ เท่ากับ 225 kV
- พิกัดแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุที่ 1000 kHz, 22 kVrms
  เท่ากับ 100 μV เมื่อมีสารเคลือบกึ่งตัวนำ
  เท่ากับ 12000 μV เมื่อเคลือบมัน
- พิกัดแรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ 142 kV



รูปที่ 2.3 ลูกถ้วยตัวอย่างในการทดลอง

ในรูปที่ 2.3 แสดงภาพของลูกถ้วยตัวอย่างที่นำมาทดลอง ลูกถ้วยจะมีการเคลือบสารกึ่งตัวนำบนปีกด้านบนของลูกถ้วย ซึ่งมีความกว้างของสารเคลือบกึ่งตัวนำบนปีกด้านบนของลูกถ้วยเท่ากับ 0, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของความกว้างด้านบนของปีกบนลูกถ้วย โดย

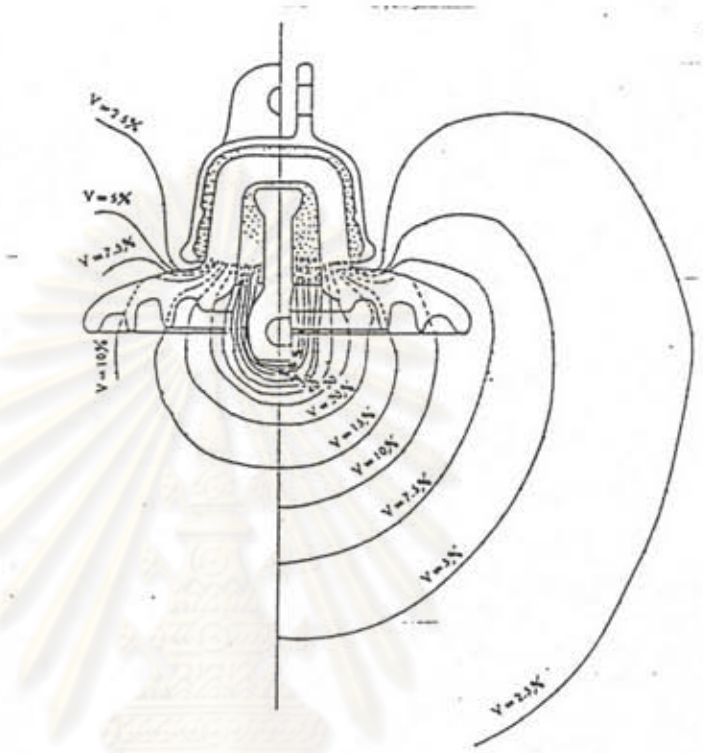
ความกว้าง 0% หมายถึงลูกถ้วยไม่มีการเคลือบสารกึ่งนำ และ 100% หมายถึงมีการเคลือบสารกึ่งตัวนำเต็มพื้นบนของปีกบนสุด เพื่อที่จะทำการคำนวณและทดลองหาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนที่มีความกว้างของสารกึ่งตัวนำต่าง ๆ กัน

การคำนวณหาแรงดันกระจายและความเครียดสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวนที่มีสารเคลือบกึ่งตัวนำไม่สามารถใช้ฟังก์ชันเชิงวิเคราะห์ (Analytic function) ง่าย ๆ ได้ วิธีที่หนึ่งที่จะคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าได้คือวิธีเชิงเลข(Numerical method) ยกตัวอย่างเช่น วิธีไฟ-ไนต์อีลีเมนต์(Finite Element Method) ซึ่งสามารถหาแบบ 2 มิติได้เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนมีลักษณะสมมาตรรอบแกนหมุน

2.5 ลักษณะสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวน

ในรูปที่ 2.4 และ 2.5 แสดงลักษณะเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยฉนวนแบบต่าง ๆ [1] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยนั้นเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง โดยมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากที่ผิวของลูกถ้วยบริเวณใกล้กับตัวไฟฟ้าแรงสูง และในกรณีของลูกถ้วยแขวนจะเห็นว่าผิวของลูกถ้วยโค้งไปตามเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบนผิวของลูกถ้วยแขวนมีค่าน้อยที่สุด ทำให้ลูกถ้วยมีแรงดันวาบไฟตามผิวสูงขึ้น

รูปที่ 2.4 แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยก้านตรง



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย