

ผลของตำแหน่งวัตถุตัวนำลอยทรงกลม ต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า
บนช่องว่างอากาศระหว่างแท่งปลายแหลม-ระนาบ

The effect of floating sphere position on the lightning impulse voltage of
rod - plane gap

จิรวุฒิ ลิ้มวีระประจักษ์^{1*}, ศุภกิตต์ โชติโก² และบุญเหนือ พึ่งศิริ³

JIRAWUT LIMVEERAPRAJAK^{1*}, SUPAKIT CHOTIGO² AND BOONNUA PUNGSIRI³

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹ Master of Engineering, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร., ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² Assistant Professor Dr., Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

³ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

* Corresponding author, e-mail: jirawut.lim@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการเกิดเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน ที่มีวัตถุตัวนำลอยทรงกลมเมื่ออยู่นอกแนวแกนของแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบกราวด์ ภายใต้การฉนวนด้วยอากาศ โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์แต่ละขนาดของวัตถุตัวนำลอยทรงกลม ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2, 4 และ 6 cm วางลอยอยู่ระหว่างแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบกราวด์มีระยะแกปอากาศ $L_f = 20$ cm ที่ตำแหน่ง d_1 ตามแนวแกนของแกป เป็นเส้นตรงแนวตั้งตามที่กำหนดระยะจุด 3, 7 และ 12 cm ให้ทำการเคลื่อนวัตถุตัวนำลอยออกจากแนวแกนของแกป ตามระยะ r เป็นเส้นตรงแนวนอน ตามที่กำหนดระยะจุด 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 cm โดยจุดตำแหน่งสุดท้าย คือ ตามแต่ละขนาดของวัตถุตัวนำทรงกลมที่ระยะ $r > 2.5F$ [IEC 61472] จนครบทั้งหมด ซึ่งผลการทดลองที่ได้ คือ ตำแหน่งที่เกิดแรงดันเบรกดาวนต่ำที่สุดนั้นจะอยู่ในใกล้ระนาบกราวด์ และทำการเปรียบเทียบผลของค่าอัตราส่วนระหว่างความยาววัตถุตัวนำลอยทุกขนาดตามแนวแกนของแกปกับระยะแกป (β) จะพบว่าผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวนมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน สุดท้ายอิทธิพลวัตถุตัวนำเมื่อลอยอยู่นอกแนวแกนของแกป จะส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวนตลอดช่วงระยะ r ที่น้อยกว่า 2.5 เท่าของวัตถุตัวนำทุกขนาด \emptyset

ทั้งนี้ในการทดลองได้เลือกใช้วิธีการทดสอบจ่ายแรงดันหลายระดับด้วยวิธีเส้นกราฟ (Multiple level voltage method test) เพื่อทดสอบหาค่าแรงดัน $U_{50\%}$

คำสำคัญ: แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว วัตถุตัวนำลอย

Abstract

This article investigates the breakdown voltage between floating sphere object and rod tip under air condition. The diameters of conductor floating sphere are 2, 4 and 6 cm. The air gap between rod tip and plane L_f is 20 cm. The vertical distance of floating sphere object is customizing by the moving of float objects away from rod tip at 3, 7 and 12 cm. The horizontal distance of floating sphere object is customized by the moving of floating metallic objects away from rod – plane at 0, 1, 3, 5, 7 and 9 cm. The final point r is at $r > 2.5F$ [IEC 61472]. The result shows the minimum of break down voltage position is near rod – plane. The correlation of object length and gap spacing (β) is affected to break down voltage differently. Finally, the object floating in outer conductor axial gap will give break down voltage at distance of r less than 2.5 of conductor with and sphere size. In this experiment, we use multiple level voltage method for voltage $U_{50\%}$ testing.

Keywords: Positive Impulse breakdown voltage, Floating metallic object

บทนำ

ฉนวนในระบบไฟฟ้ามีความสำคัญและจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษา หากเกิดสถานะที่มีแรงดันไฟฟ้าเกินกว่าอัตราปกติ มีผลทำให้ฉนวนที่ออกแบบไว้ไม่สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้นำไปสู่ความเสียหายต่ออุปกรณ์และความมั่นคงของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เช่น กรณีการเกิดแรงดันเกินฟ้าผ่า ซึ่งในมาตรฐานการออกแบบฉนวนทั่วไปได้ถูกกำหนดไว้ด้วยแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการฉนวนที่ทำการออกแบบไว้นั้นอาจมีวัสดุ อุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆที่อาจเข้ามาวางในตำแหน่งที่ฉนวนออกแบบไว้ ซึ่งไม่สามารถทนต่อแรงดันเกินที่เกิดขึ้นได้ ด้วยเหตุดังกล่าวนี้จึงทำการศึกษการเกิดเบรกดาวน์ของแกปอากาศในขณะที่มีวัตถุตัวนำลอยภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจถึงเหตุปัจจัยต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นขนาด ตำแหน่งการวางของวัตถุตัวนำลอยตามตำแหน่งนอกแนวแกน (r) ตามตำแหน่งตามแนวแกน (d_1) และช่วงระยะแกป (L_f) ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน์ของแกปอากาศในสถานะที่เกิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่านี้ IEC 61472 กล่าวถึงผลของวัตถุตัวนำลอยภายใต้แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ โดยพิจารณาค่า (β) ของวัตถุตัวนำลอยคือ

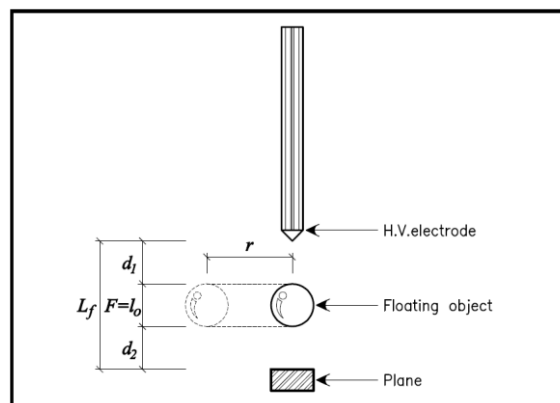
$$\beta = \frac{F}{(D + F)} \quad (1)$$

โดยที่ F = ความยาวของวัตถุตัวนำลอยตามแนวแกน (l_0)

D = ระยะแกปอากาศสุทธิเมื่อมีวัตถุตัวนำลอย ($d_1 + d_2$)

β = อัตราส่วนระหว่างความยาวของวัตถุตัวนำลอยตามแนวแกนของแกปกับระยะแกป

กล่าวคือค่า β เป็นค่าบ่งชี้การส่งผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวนของวัตถุตัวนำลอย โดยที่ค่า β ที่มีค่าน้อยกว่า 0.1 แสดงว่าวัตถุตัวนำลอยไม่มีผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน แต่ทว่าค่า β เริ่มมีค่าเพิ่มมากกว่า 0.1 แสดงว่าวัตถุตัวนำลอยก็เริ่มที่จะส่งผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน และจะยังคงส่งผลกระทบเพิ่มขึ้นต่อไป トラบเท่าที่ค่า β มีค่าเพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อค่า β เพิ่มขึ้นไปถึงค่าๆหนึ่งทำให้วัตถุตัวนำลอยไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าค่า β ยังคงเพิ่มต่อไปก็ตาม



ภาพประกอบที่ 1 การจัดวางตำแหน่งทดลองของวัตถุตัวนำลอย

โดยที่

L_f = ระยะแกปทั้งหมดเมื่อยังไม่มีวัตถุตัวนำลอย ($D+F$)

d_1 = ตำแหน่งของอิทธิพลวัตถุตัวนำลอยตามเส้นตรงแนวตั้งตามระยะแนวแกนของแกปทดสอบ

r = ตำแหน่งของอิทธิพลวัตถุตัวนำลอยตามเส้นตรงแนวนอนตั้งฉากกับแนวแกนของแกปทดสอบ

อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย วัตถุตัวนำลอยทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (\varnothing) 2, 4 และ 6 cm แท่งอิเล็กโตรดความยาว 20 cm มีมุมปลาย 45° และแท่งอิเล็กโตรดระนาบสี่เหลี่ยมขนาด $4 \times 4 \times 2$ cm³ ดังในภาพประกอบที่ 2 โดยวัตถุตัวนำลอยและแท่งอิเล็กโตรดทั้งหมดทำจากโลหะทองแดง



(ก)



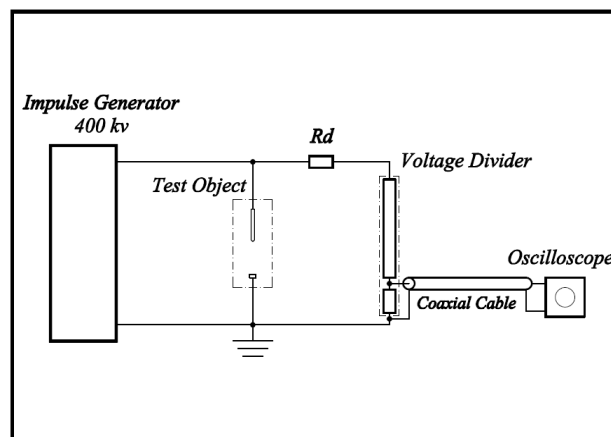
(ข)

ภาพประกอบที่ 2 (ก) แท่งและระนาบอิเล็กโตรด

(ข) วัตถุตัวนำลอยทรงกลม

วงจรที่ใช้ในการทดลอง

วงจรการทดสอบประกอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์, ความต้านทานหน่วง, โวลเตจดีไวเดอร์, โวลเตจดีไวเดอร์ในอัตราส่วน 1 : 5000 และออสซิลโลสโคป Tektronix TDS340 100 MHz



ภาพประกอบที่ 3 วงจรการทดสอบ

ตัวประกอบปรับแก้สภาวะบรรยากาศ

ตัวประกอบปรับแก้ไขบรรยากาศอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 เพื่อปรับแก้แรงดันเบรกดาวน์ ณ สภาวะห้องทดสอบไปสู่ค่าสภาวะบรรยากาศมาตรฐาน ตามสมการที่ (2)-(5)

$$U_0 = \frac{U}{K_t} \quad (2)$$

$$K_t = k_1 k_2 \quad (3)$$

$$k_1 = \frac{P(273+t_0)}{P_0(273+t)} \quad (4)$$

$$k_2 = 1 + 0.01\left(\frac{h}{k_1} - 11\right) \quad (5)$$

โดยที่ U คือ แรงดันเบรกดาวน์ ณ สภาวะบรรยากาศห้องทดลอง

U_0 คือ แรงดันเบรกดาวน์ ณ สภาวะบรรยากาศมาตรฐาน

K_t คือ ตัวประกอบแก้ไขค่าบรรยากาศ

k_1 คือ ตัวประกอบปรับแก้ไขความหนาแน่นของอากาศ

k_2 คือ ตัวประกอบปรับแก้ไขความชื้น

h คือ ความชื้นสัมบูรณ์ ณ สภาวะบรรยากาศห้องทดลอง

P คือ ค่าความดัน ณ สภาวะบรรยากาศห้องทดลอง

P_0 คือ ค่าความดัน ณ สภาวะบรรยากาศมาตรฐาน

t คือ ค่าอุณหภูมิ ณ สภาวะบรรยากาศห้องทดลอง

t_0 คือ ค่าอุณหภูมิ ณ สภาวะบรรยากาศมาตรฐาน

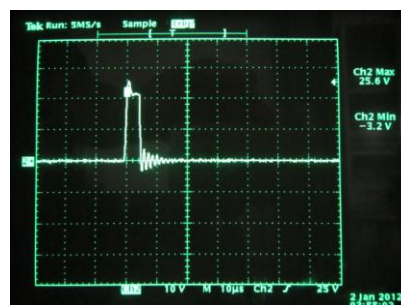
ผลการทดลอง

1. รูปคลื่นแรงดันและวิธีการทดสอบ

ในบทความนี้ใช้วิธีการ Multiple level voltage method test เพื่อหาค่า $U_{50\%}$ ซึ่งแกปที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบแท่งปลายแหลม-ระนาบกราวด์ ที่มีระยะแกป $d_1+l_0+d_2 = 20$ cm และทำการเปรียบเทียบกรณีวัตถุตัวนำลอย อยู่ที่ตำแหน่ง $d_1 = 3, 7$ และ 12 cm โดยที่ขนาดของวัตถุตัวนำลอยที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = $2, 4$ และ 6 cm



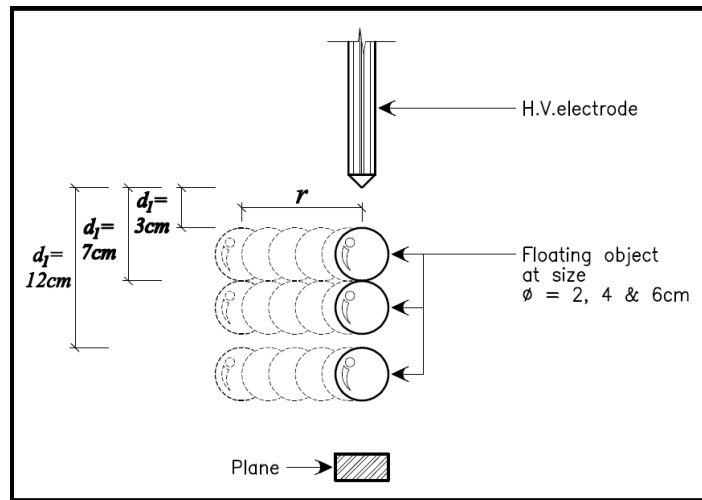
(ก)



(ข)

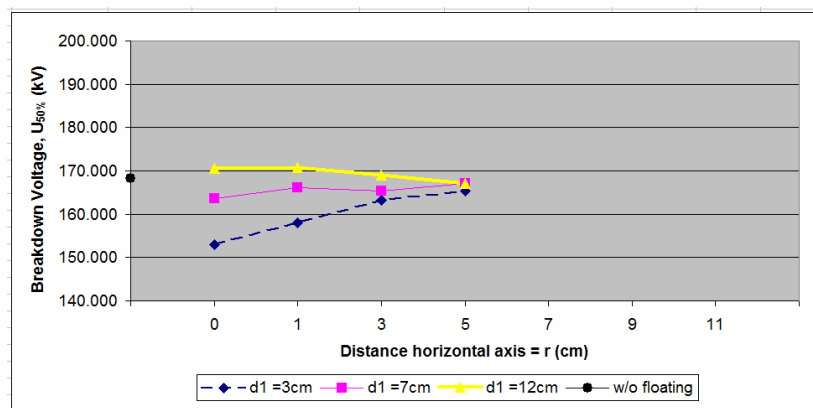
ภาพประกอบที่ 4 (ก) สัญญาณแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวแบบคลื่นเต็ม

(ข) สัญญาณแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวแบบคลื่นตัด (เบรกดาวน์)

2. ผลของตำแหน่งในแนวแกน d_1 ที่ส่งผลต่อแรงดันเบรกดาวน์


ภาพประกอบที่ 5 การวางตำแหน่งวัตถุตัวนำลอยทรงกลมของแต่ละขนาด \varnothing ที่ระยะ d_1 เท่ากับ 3, 7 และ 12 cm ตามลำดับ โดยแกปอากาศมีระยะ 20 cm

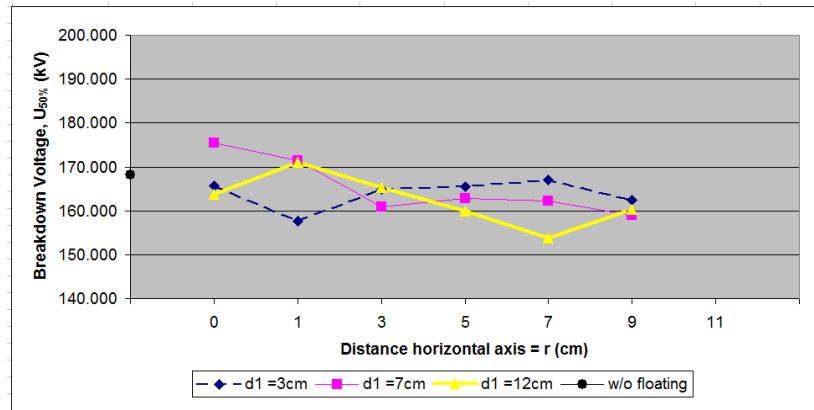
อิทธิพลวัตถุตัวนำลอยทรงกลมเมื่ออยู่นอกแนวแกนของแกปที่ส่งผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 6 เป็นวัตถุตัวนำขนาด $\varnothing = 2$ cm, $d_1 = 12$ cm, $r = 0$ cm มีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงที่สุด ต่อไปจึงมีค่าลดลงตามช่วงระยะ r ที่เพิ่มขึ้น ส่วนที่ $d_1 = 3$ cm และ 7 cm, $r = 0$ cm มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำที่สุด จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงระยะ r ที่เพิ่มขึ้น



ภาพประกอบที่ 6 แรงดันเบรกดาวน์ของแกปอากาศที่ระยะ 20 cm ที่มีระยะ $d_1 = 3, 7$ และ 12 cm ตามลำดับ โดยมีวัตถุตัวนำลอยทรงกลมขนาด 2 cm

ในภาพประกอบที่ 7 เป็นอิทธิพลวัตถุตัวนำขนาด $\varnothing = 4$ cm, ที่ $d_1 = 12$ cm, $r = 0$ cm มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำที่สุด และมีค่าขึ้นลงตามช่วงระยะ r ที่เพิ่มขึ้น ส่วนที่ $d_1 = 7$ cm, $r = 0$ cm มีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงที่สุด จากนั้นจึงมีค่าลงขึ้นตามช่วงระยะ r ที่เพิ่มขึ้น และที่ $d_1 = 3$ cm, $r = 0$ cm

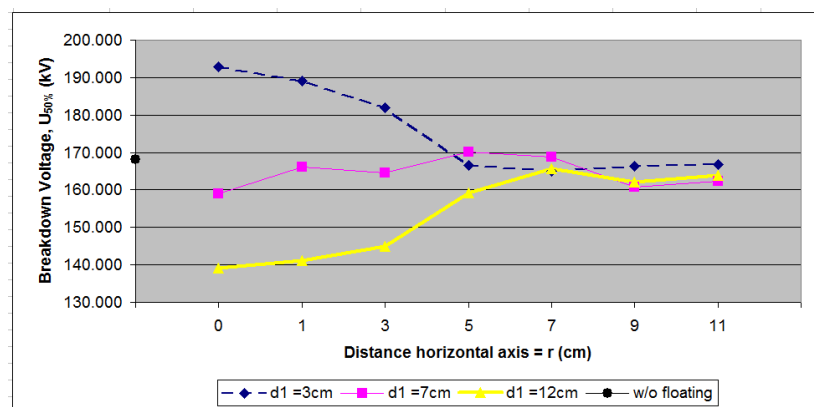
จะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ใกล้เคียงที่ $d_1 = 12$ cm, $r = 0$ cm จากนั้นจึงมีค่าขึ้นลงตามช่วงระยะ r ที่เพิ่มขึ้น และค่าแรงดันเบรกดาวน์ของทุกจุด d_1 ที่จุดปลายสุดท้ายจะมีค่าใกล้เคียงเท่ากัน



ภาพประกอบที่ 7 แรงดันเบรกดาวน์ของแกปอากาศที่ระยะ 20 cm ที่ระยะ $d_1 = 3, 7$ และ 12 cm ตามลำดับ โดยมีวัตถุตัวนำลอยทรงกลมขนาด 4 cm

ในภาพประกอบที่ 8 เป็นอิทธิพลวัตถุตัวนำขนาด $\varnothing = 6$ cm, ที่ $d_1 = 7$ และ 12 cm, $r = 0$ cm มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำที่สุด ต่อไปจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามช่วงระยะ r ที่เพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ เมื่อ $r > 7$ cm ที่ $d_1 = 3$ cm, $r = 0$ cm มีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงที่สุด จากนั้นจึงมีค่าลดลงตามช่วงระยะ r ที่เพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ เมื่อ $r > 7$ cm




จะสังเกตได้ว่าวัตถุตัวนำขนาด $\varnothing = 6$ cm และ 2 cm ที่ $d_1 = 12$ cm และ 3 cm มีผลให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ตรงกันข้ามกัน กล่าวคือที่ตำแหน่งอยู่ใกล้แท่งปลายแหลม วัตถุตัวนำขนาดเล็กให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าวัตถุตัวนำที่มีขนาดใหญ่ ส่วนตำแหน่งที่อยู่ใกล้ระนาบกราวด์ วัตถุตัวนำขนาดเล็กให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงกว่าวัตถุตัวนำที่มีขนาดใหญ่



ภาพประกอบที่ 8 แรงดันเบรกดาวน์ของแกปอากาศที่ระยะ 20 cm ที่ระยะ $d_1 = 3, 7$ และ 12 cm ตามลำดับ โดยมีวัตถุตัวนำลอยทรงกลมขนาด 6 cm

จากตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ลดลงต่ำที่สุด ในขณะที่ตำแหน่ง d_1 มีระยะเพิ่มขึ้นของแต่ละขนาดวัตถุตัวนำจะพบว่า อิทธิพลวัตถุตัวนำลอยขนาด $\varnothing = 6$ cm ที่ตำแหน่งวัตถุตัวนำลอย $d_1 = 12$ cm, $r = 0$ cm จะมีเปอร์เซ็นต์ลดลงของค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำที่สุด -17.2% ด้วยเหตุที่ว่ากรรมมีวัตถุตัวนำขนาด $\varnothing = 6$ cm วางลอยอยู่ใกล้ระนาบกราวด์จะทำให้ช่องว่างของแกปอากาศมีระยะสั้นลงมากกว่าขนาดอื่น จึงเปรียบเสมือนทำให้ระยะห่างปลายแหลม-ระนาบกราวด์ มีระยะลดลงจากเดิมน้อยกว่า 20 cm จึงส่งผลให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ลดลงตามไปด้วย

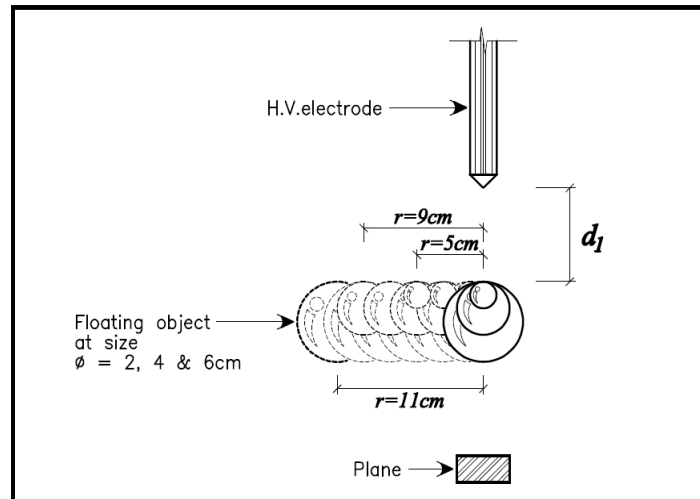
ตารางที่ 1 ค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงสุด-ต่ำสุด และค่า (β) เมื่อมีวัตถุตัวนำลอยของแต่ละขนาด \varnothing ที่ระยะ $d_1 = 3, 7$ และ 12 cm ตามลำดับ

Gap (L) (cm)	Sphere as a floating object	l_1 (cm)	β	2.5F (cm)	U_{50} (kV)	d_1 (cm)	Maximum voltage			Minimum voltage			%($d_1/L_1 - 1$)
							r (cm)	U_{MAX} (kV)	% U_{MAX}	r (cm)	U_{MIN} (kV)	% U_{MIN}	
20		2	0.1	5	168.1	3	5	165.4	98.3%	0	152.9	91%	16.6%
						7	5	167.1	99.4%	0	163.6	97.3%	38.8%
						12	1	170.7	101.5%	5	167.1	99.4%	66.6%
		4	0.2	10		3	7	167.0	99.3%	1	157.5	93.7%	18.7%
						7	0	175.4	104.3%	9	159.0	94.6%	43.7%
						12	1	170.9	101.6%	7	153.8	91.5%	75%
		6	0.3	15		3	0	192.8	114.6%	7	164.9	98.1%	21.4%
						7	5	170.0	101.1%	0	158.9	94.5%	50%
						12	7	165.7	98.5%	0	139.1	82.8%	85.7%

4.3 ผลของขนาด (\varnothing) วัตถุตัวนำลอย ที่ส่งผลต่อแรงดันเบรกดาวน์

จากผลการทดลองของอิทธิพลวัตถุตัวนำลอยเมื่ออยู่นอกแนวแกนของแกปที่จะส่งผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน์ในภาพประกอบที่ 9 โดยการพิจารณาตามแต่ละขนาด $\varnothing = 2, 4$ และ 6 cm ของวัตถุตัวนำวางลอยที่ตำแหน่งแนวแกน d_1 ตามแต่ละจุดที่กำหนด พบว่าที่จุด $d_1 = 3$ cm เป็นตำแหน่งอยู่ใกล้แกปปลายแหลม โดยวัตถุตัวนำขนาด $\varnothing = 2$ cm, $r = 0$ cm จะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำสุด 152.9kV, % $U_{min} = -9\%$ และเมื่อออกนอกแนวแกนที่ระยะ $r = 5$ cm กลับมีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงสุด 165.4kV, % $U_{max} = -1.7\%$ และวัตถุตัวนำขนาด $\varnothing = 6$ cm, $r = 0$ cm มีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงสุด 192.8kV, % $U_{max} = +14.6\%$ และเมื่อออกนอกแนวแกนที่ระยะ $r = 7$ cm กลับมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำสุด 164.9kV, % $U_{min} = -1.9\%$ ซึ่งผลค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงสุดและต่ำสุด กลับตรงกันข้ามกับตำแหน่ง $d_1 = 12$ cm ที่อยู่ใกล้ระนาบกราวด์ โดยวัตถุตัวนำขนาด $\varnothing = 2$ cm, $r = 1$ cm จะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงสุด 170.7kV, % $U_{max} = +1.5\%$ และเมื่อออกนอกแนวแกนที่ระยะ $r = 5$ cm กลับมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำสุด 167.1kV, % $U_{min} = -0.6\%$ และวัตถุตัวนำขนาด $\varnothing = 6$ cm, $r = 0$ cm จะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำสุด 139.1kV, % $U_{min} = -17.2\%$ และเมื่อออกนอกแนวแกนที่ระยะ $r = 7$ cm กลับมีค่า

แรงดันเบรกดาวนสูงสุด 165.7kV, $\%U_{\max} = -1.5\%$ ส่วนวัตถุตัวนำขนาด 4 cm จะมีลักษณะใกล้เคียงกับวัตถุตัวนำขนาด 2 cm ทั้งตำแหน่ง $d_1 = 3$ cm และ 12 cm ซึ่งให้เห็นว่าวัตถุตัวนำขนาด 2, 4 และ 6 cm ทั้งหมดเมื่ออยู่ที่ตำแหน่ง d_1 ตามแนวแกนของแกปที่กำหนดทุกจุด อิทธิพลวัตถุตัวนำจะส่งผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวนแต่เมื่อวัตถุตัวนำออกนอกแนวแกนของแกป อิทธิพลวัตถุตัวนำจะค่อยๆลดลงตามระยะ r ที่ค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งส่งผลใกล้เคียงค่าแรงดันเบรกดาวนที่ 168.1kV หรือมีค่าใกล้เคียงกับขณะที่ไม่มีวัตถุตัวนำเลย



ภาพประกอบที่ 9 การวางวัตถุตัวนำลอยทรงกลมขนาด 2, 4 และ 6 cm ตามลำดับของแต่ละระยะตำแหน่ง d_1 โดยแกปอากาศมีระยะ 20 cm

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันเบรกดาวนสูงสุด-ต่ำสุด และค่า (β) ของแต่ละระยะ d_1 ขณะที่ไม่มีวัตถุตัวนำลอยทรงกลมขนาด ϕ 2, 4 และ 6 cm ตามลำดับ

Gap (L_i) (cm)	d_1 (cm)	l_o (cm)	β	U_{NF} (kV)	2.5F (cm)	Maximum voltage			Minimum voltage			$\%(d_1/L_i - 1)$
						r (cm)	U_{MAX} (kV)	$\%U_{MAX}$	r (cm)	U_{MIN} (kV)	$\%U_{MIN}$	
20	3	2	0.1	168.1	5	5	165.4	98.3%	0	152.9	91%	16.6%
		4	0.2		10	7	167.0	99.3%	1	157.5	93.7%	18.7%
		6	0.3		15	0	192.8	114.6%	7	164.9	98.1%	21.4%
	7	2	0.1		5	5	167.1	99.4%	0	163.6	97.3%	38.8%
		4	0.2		10	0	175.4	104.3%	9	159.0	94.6%	43.7%
		6	0.3		15	5	170.0	101.1%	0	158.9	94.5%	50%
	12	2	0.1		5	1	170.7	101.5%	5	167.1	99.4%	66.6%
		4	0.2		10	1	170.9	101.6%	7	153.8	91.5%	75%
		6	0.3		15	7	165.7	98.5%	0	139.1	82.8%	85.7%

สรุปผลการทดลอง

1. อิทธิพลวัตถุตัวนำลอยทรงกลม ที่ทำให้เกิดค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำที่สุดนั้น จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่อยู่ใกล้ระนาบกราวด์มากกว่าตำแหน่งที่อยู่ใกล้แท่งปลายแหลม ถึงแม้ว่าจะมีระยะแกปอากาศที่เท่ากัน
2. เนื่องด้วยวัตถุตัวนำมีรูปร่างเป็นทรงกลม จึงทำให้แต่ละขนาด \varnothing มีความกว้างที่ไม่เท่ากันแต่มีระยะแกปเท่ากัน อีกทั้งมีค่า $\beta > 0.1$ จึงทำให้วัตถุตัวนำส่งผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์มีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน
3. วัตถุตัวนำลอยทรงกลมเมื่ออยู่นอกแนวแกนของแกป จะยังคงมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ แต่จะส่งผลลดลงตามช่วงระยะ r ที่เพิ่มขึ้น และจะลดลงไปจนอิทธิพลวัตถุตัวนำไม่ส่งผลก็ต่อเมื่อพื้นระยะ r ที่มากกว่า 2.5 เท่าของขนาดวัตถุตัวนำ หรือ ระยะ $r > 2.5F$ [IEC 61472]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทุกๆท่านที่คอยให้คำปรึกษา, ช่วยเหลืออำนวยความสะดวก เครื่องมืออุปกรณ์ และกำลังใจตลอดมาจนงานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- A. Settaouti, L. Settaouti., (2006) “*Effect of floating objects on critical impulse breakdown of air*”, Journal of Applied Sciences 6(2), pp. 280-286.
- A. Villalobos, P.A. Calva., (2000), “*Live line working distances in reduced air densities*”, Proc. IEEE, Mexico.
- Farouk A.M. Rizk., (1995) “*Effect of floating conducting objects on critical switching impulse breakdown of air insulation*” IEEE Trans, Vol. 10, No. 3, July 1995.
- IEC 60060-1 (2010), “*High voltage test techniques*”, International Standard.
- IEC 61472, “*Live working – Minimum approach distances for a.c. systems in the voltage range 72.5 kV to 800 kV-A method of calculation*”, International Standard.
- Jose Garcia, Fernando Herrera, Jelmuth Ortiz, (1999) “*Study of the breakdown voltage of the air in altitudes, applying lightning impulses (1.2/50us) under conditions of controlled humidity and temperature*”, IEE Conference No. 467.