

**การทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในฉนวนอากาศ
โดยใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ
และแกปทรงกลมขนาด 5 และ 25 เซนติเมตร**
**Comparative Experiment of Breakdown Voltage in Air Insulation
of Plane-Plane Electrode
and Sphere Gap Diameter Size of 5 and 25 Centimeters**

ธนากร น้าหอมจันทร์¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในฉนวนอากาศ โดยใช้อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร และแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ในระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร ทำการทดสอบและวัดด้วยแรงดันสูง กระแสตรงชั่ววูบ ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 และ IEC 60060-2 โดยผลการทดสอบมีดังนี้ ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนเฉลี่ย มีค่า 3.21 ถึง 16.01, 4.70 ถึง 17.56 และ 4.25 ถึง 16.86 กิโลโวลต์ ตามลำดับ ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า เบรกดาวน 3.21, 3.86 และ 3.58 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ ผลจากการทดสอบและวิเคราะห์ สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวัสดุฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: ฉนวนอากาศ, แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน, อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ, แกปทรงกลม

Abstract

This paper presents the comparative experiment of breakdown voltage in air insulation of plane-plane electrodes with a diameter of 9 centimeters, a thickness of 0.5 centimeters and sphere gap diameters of 5 and 25 centimeters, according to IEC 60052 standard at 1 to 5 millimeter gap distance. The experiments use DC high-voltage, positive-polarity testing, according to IEC 60060-1 and IEC 60060-2 standards. The tests results show: average breakdown voltages are between 3.21 to 16.01, 4.70 to 17.56 and 4.25 to 16.86 kilovolt respectively; electric field stresses are 3.21, 3.86 and 3.58 kilovolt per millimeter respectively. These test results and analyses can be utilized to design the insulator material of DC high-voltage electric equipment more adequately in the future.

Keywords: air insulation, breakdown voltage, plane-plane electrode, sphere gap

¹อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

ความนำ

ฉนวนก๊าซที่มีความสำคัญในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง คือ ฉนวนอากาศ ซึ่งเป็นฉนวนที่มีราคาถูก ข้อดีของฉนวนก๊าซ คือ เมื่อเสียสภาพความเป็นฉนวนหรือเกิดการเบรกดาว์แล้ว จะสามารถกลับคืนสภาพความเป็นฉนวนได้หลังจากการเบรกดาว์ผ่านพ้นไปแล้ว เช่นเดียวกับฉนวนเหลว ในขณะที่ฉนวนแข็งจะเสียสภาพการเป็นฉนวนอย่างถาวรเมื่อเกิดการเบรกดาว์ (ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; ตำราย สังข์สะอาด, 2549; Kuffel, Zaengl, & Kuffel, 2000; Naidu, & Kamaraju, 1996)

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าของประเทศไทยกับประเทศมาเลเซีย เพื่อทำการซื้อ - ขายพลังงานไฟฟ้า ตั้งแต่ปี 2545 (ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์, 2554)

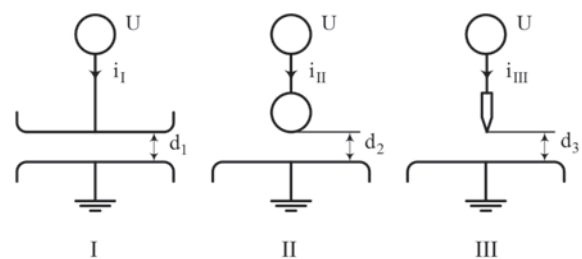
จากข้อมูลข้างต้น จึงมีแนวคิดที่จะทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์ในฉนวนอากาศซึ่งใช้อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ และอิเล็กโตรดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน IEC 60052 (IEC std. 60052, 2002) กำหนด เพื่อเปรียบเทียบผลอันเนื่องมาจากรูปลักษณะของอิเล็กโตรด โดยทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงชั่วบวก เพื่อให้ทราบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์ของฉนวนอากาศในไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงจากรูปลักษณะของอิเล็กโตรดและระยะแก๊ปที่ทำการทดสอบ ซึ่งจะนำไปใช้ออกแบบฉนวนอากาศสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนอากาศ

อากาศ เป็นฉนวนก๊าซที่เป็นทั้งฉนวนหลักและเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงใช้ในการเรียนการสอนและการวิจัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนอากาศที่สำคัญดังนี้ มีค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า เบรกดาว์ประมาณ 25 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถแทรกซึมในช่องว่าง

ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ เพื่อระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟง่ายดับอาร์คทางไฟฟ้าได้ และสามารถคืนตัวเป็นฉนวนได้อีกครั้งหลังจากเกิดการเบรกดาว์ อีกทั้งใช้ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์การทดสอบและงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงอย่างแพร่หลาย (ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; ตำราย สังข์สะอาด, 2549; Kuffel, Zaengl, & Kuffel, 2000; Naidu, & Kamaraju, 1996)

ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าโดยทั่วไป แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (I) และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอแบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (II) และแบบไม่สม่ำเสมอสูง (III) สนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโตรด (ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; ตำราย สังข์สะอาด, 2549) แสดงดังภาพ 1



ภาพ 1 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

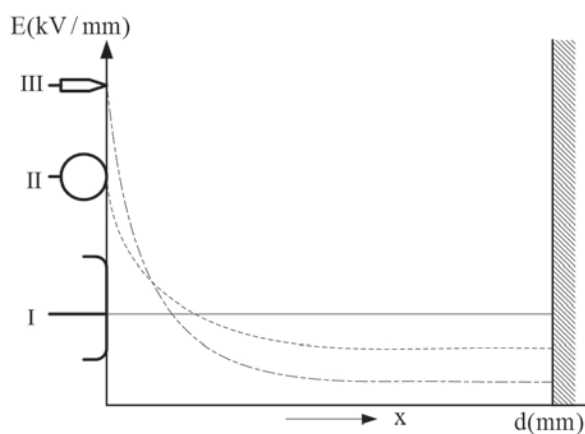
โดยที่ I : uniform field

II : slightly nonuniform field

III : highly nonuniform field

ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนส่วนใหญ่จะเป็นค่าทางสถิติหรือเป็นค่าโดยประมาณ มักจะกำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงสุด (E_{max}) ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโตรดในขณะที่เกิดเบรกดาว์เริ่มเกิดขึ้น

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่บริเวณจุดปลายของอิเล็กโตรดเมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงดังภาพ 2



ภาพ 2 การกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดรูปลักษณะต่าง ๆ

ผลของลักษณะสนามไฟฟ้าต่อการเกิด เบรกดาวน์

ในกรณีสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดเป็นแบบสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า η^* มีค่าสูง) แรงดันเริ่มต้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงแกประหว่างอิเล็กโตรด จะเป็น เบรกดาวน์โดยตรง โดยไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อน เบรกดาวน์ แต่ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (ค่าแฟคเตอร์ η^* มีค่าต่ำ) ค่าแรงดันเบรกดาวน์ (U_b) มีค่าสูงกว่าแรงดันเริ่มต้น (U_i) คือ เมื่อได้เงื่อนไขของแรงดันเริ่มต้นเปลี่ยนแปลง จะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเริ่มเกิดโคโรนา ถ้าจะให้เบรกดาวน์จะต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นอีก ค่าแรงดันเริ่มต้นอาจเขียนได้ดังสมการ (1)

$$U_i = E_i \times d \times \eta^* \quad (1)$$

โดยที่ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น หน่วย kV

E_i คือ E_{\max} จากแรงดันเริ่มต้น U_i หน่วย kV/mm

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i ก็คือ U_b และ E_i ก็คือ E_b ถ้าเป็นอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ (สิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล, 2546; สำรวย สังข์สะอาด, 2549; Kuffel, Zaengl, & Kuffel, 2000; Naidu, & Kamaraju, 1996)

ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 (IEC std. 60052, 2002) ที่ระยะแกป 1.0 ถึง 5.0 มิลลิเมตร แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1

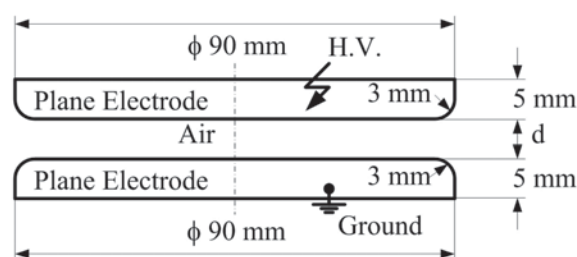
แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน IEC 60052 ที่ระยะแกป 1-5 มิลลิเมตร (หน่วย: กิโลโวลต์)

Gap spacing (mm)	Sphere diameter (cm)					
	2	5	6.25	10	12.5	15
1.0	4.7					
2.0	8.0	8.0				
3.0	11.2	11.2				
4.0	14.4	14.3	14.2			
5.0	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8

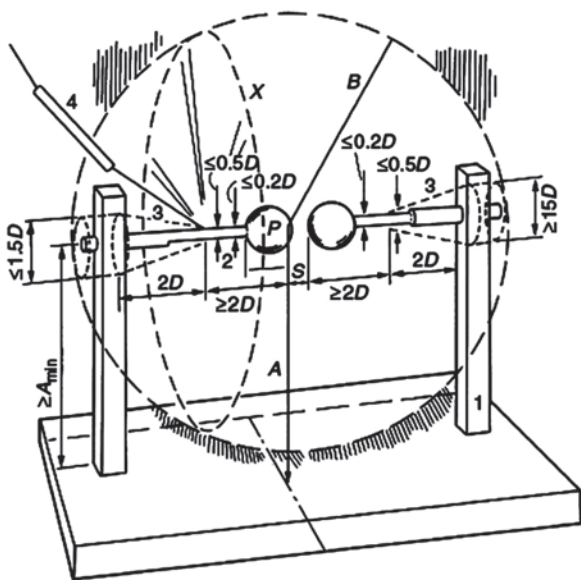
อิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบจะใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ ในฉนวนอากาศ ที่ระยะแกป 1-5 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดที่ใช้กลึงขึ้นรูปจากอลูมิเนียม ขนาดของอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังภาพ 3

แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตรอ้างอิงขนาดตามมาตรฐาน IEC 60052 (IEC std. 60052, 2002) การจัดวางแกปทรงกลมจะขึ้นอยู่กับขนาดของอิเล็กโตรด โดยอิเล็กโตรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 25 เซนติเมตร จะจัดวางในลักษณะแกปแนวนอน แสดงดังภาพ 4 อิเล็กโตรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตรขึ้นไป จะจัดวางในลักษณะแกปแนวตั้ง แสดงดังภาพ 5

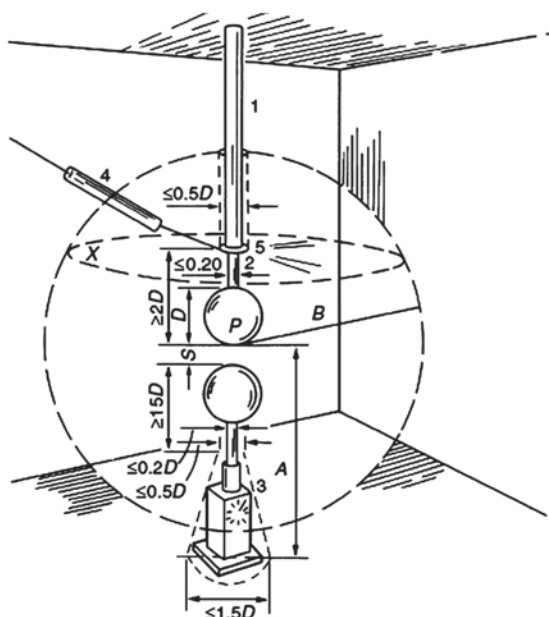


ภาพ 3 ขนาดของอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพ 4 การจัดวางแบบทรงกลมแนวนอน

Note. from “High Voltage Engineering: Fundamentals”, by Kuffel, Zaengl, & Kuffel, (2000), Newnes: Great Britain. p.81.

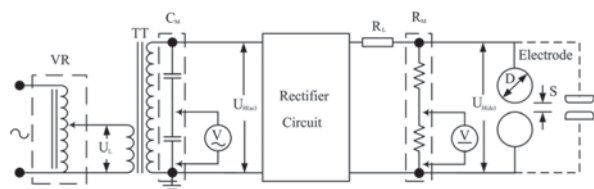


ภาพ 5 การจัดวางแบบทรงกลมแนวดิ่ง

Note. from “High Voltage Engineering : Fundamentals”, by Kuffel, Zaengl, & Kuffel, (2000), Newnes: Great Britain. p. 80.

วงจรการทดสอบและระบบวัดแรงดันสูง

ระบบวัดแรงดันสูงเบื้องต้น ประกอบด้วย 2 ระบบ คือ ระบบสร้างแรงดันสูง และระบบวัดแรงดันสูง ซึ่งทั้ง 2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-1 (IEC std. 60060-1, 1989) และ IEC 60060-2 (IEC std. 60060-2, 1994) กำหนดดังนี้ แรงดันไฟฟ้า กระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบแสดงในค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS value) มีความถี่อยู่ในช่วง 45 - 65 เฮิรตซ์ รูปคลื่นของแรงดันเป็นไซน์ซอว์ดทั้งครึ่งคาบบวกและลบ มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 1 ตลอดการทดสอบ แรงดันสูงกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ มีแฟคเตอร์ ระยะเวลาไม่เกินร้อยละ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 1 เมื่อช่วงเวลาการทดสอบต่ำกว่า 60 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 3 เมื่อช่วงเวลาการทดสอบ เกินกว่า 60 วินาที ระบบวัดแรงดันสูงมีความคลาดเคลื่อน ไม่เกินร้อยละ ± 3 และสเกลแฟคเตอร์ของอุปกรณ์วัด แรงดันสูงมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 1 โดยมี อัตราการเพิ่มแรงดัน 1 กิโลโวลต์ต่อวินาที (successive discharge tests) กระบวนการทดสอบฉนวนอากาศเป็นไป ตามมาตรฐาน IEC 60052 (IEC std. 60052, 2002) กำหนด ในการทดสอบจะทำการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้า เบรกดาวน์ด้วยแรงดันสูงกระแสตรงชั่วบวกและลบ เพื่อ หาค่าเฉลี่ย U_b จากการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง วงจรและ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ในฉนวนอากาศ โดยใช้แรงดันสูงกระแสตรงชั่วบวก แสดงดังภาพ 6



ภาพ 6 วงจรการทดสอบ

จากภาพ 6 โดยที่

VR คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ปรับค่าได้ควบคุมด้วย PLC (ธนาคาร น้ำหอมจันทร์,
อติกร เสรีพัฒน์นันท์ และ พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ, 2550)

TT คือ หม้อแปลงทดสอบแรงสูง 220V/
20kV

U_L คือ แรงดันด้านแรงต่ำกระแสสลับ

$U_{H(ac)}$ คือ แรงดันด้านแรงสูงกระแสสลับ

$U_{H(dc)}$ คือ แรงดันด้านแรงสูงกระแสตรง

R_d คือ ความต้านจำกัดกระแส

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรดทรงกลม

S คือ ระยะช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด

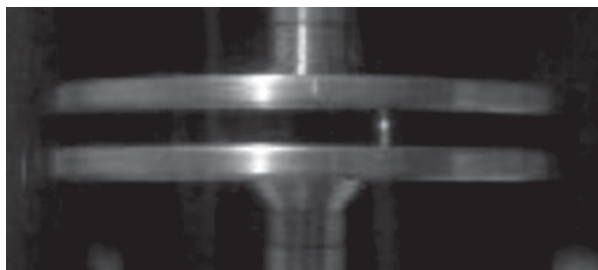
C_M คือ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ
พิกัดแรงดัน 150 kV (อติกร เสรีพัฒน์นันท์, ธนาคาร
น้ำหอมจันทร์, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ และ สุพิศ บุญรัตน์, 2551)

R_M คือ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน พิกัด
แรงดัน 100 kV

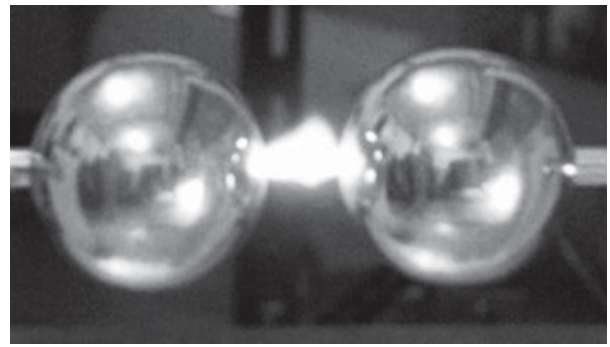
V คือ ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ (True RMS
digital multimeter)

ผลการทดสอบและวิจารณ์

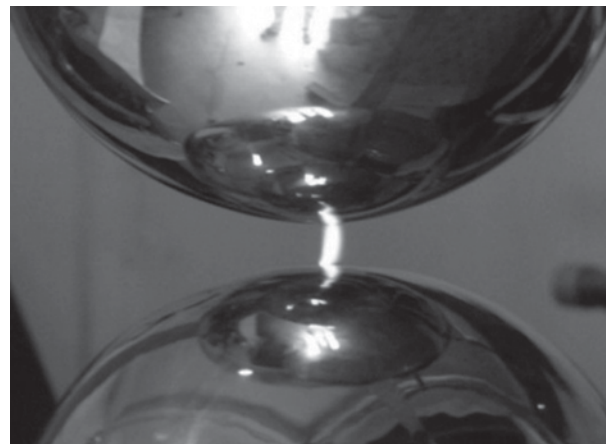
ภาพถ่ายเบรกดาวน์ระหว่างอิเล็กโตรด แบบ
ระนาบ-ระนาบ แกะทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5
และ 25 เซนติเมตร ขณะทดสอบ แสดงดัง ภาพ 7 - 9
ตามลำดับ



ภาพ 7 ภาพถ่ายการเกิดเบรกดาวน์ภายในอิเล็กโตรด
ระนาบ-ระนาบ



ภาพ 8 ภาพถ่ายการเกิดเบรกดาวน์ภายในแก๊สทรงกลม
ขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม 5 เซนติเมตร



ภาพ 9 ภาพถ่ายการเกิดเบรกดาวน์ภายในแก๊สทรงกลม
ขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม 25 เซนติเมตร

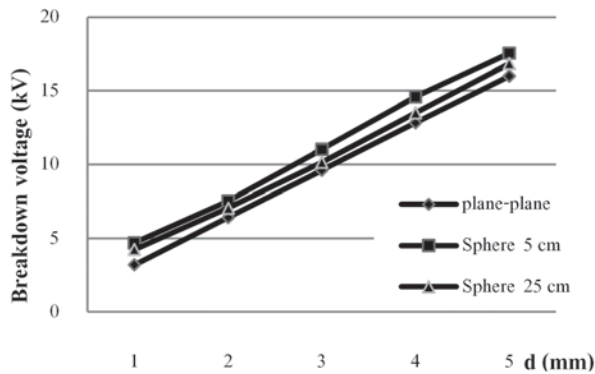
ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์เฉลี่ย $U_{b(AVG)}$ จาก
การทดสอบ 10 ครั้ง ของอิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ
แก๊สทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร
ในฉนวนอากาศ ที่ระยะแก๊ส 1 ถึง 5 มิลลิเมตร โดยใช้
แรงดันสูงกระแสตรงชั่ววูบ แสดงดังตาราง 2

ตาราง 2

ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศ

Gap spacing; d (mm)	Breakdown voltage; $U_{b(AVG)}$ (kV)		
	plane-plane	Sphere 5 cm	Sphere 25 cm
1	3.21	4.70	4.25
2	6.42	7.53	7.05
3	9.61	11.02	10.14
4	12.84	14.59	13.50
5	16.01	17.56	16.86

จากตาราง 2 สามารถแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์เฉลี่ย $U_{b(AVG)}$ ของอิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ในฉนวนอากาศ ที่ระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร ดังภาพ 10



ภาพ 10 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จากการทดสอบ โดยใช้อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร

จากค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์เฉลี่ย $U_{b(AVG)}$ ดังตาราง 2 และสมการ (1) จะสามารถวิเคราะห์หาค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (E_b) ได้ ดังตาราง 3

ตาราง 3

ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์			
	plane-plane	Sphere 5 cm	Sphere 25 cm
E_b (kV/mm)	3.21	3.86	3.58

สรุป

ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จากการทดสอบ โดยใช้อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ในฉนวนอากาศ ที่ระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร โดยใช้แรงดันสูงกระแสตรงชั่ววูบ กระบวนการทดสอบและระบบวัดแรงดันสูงอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 และ IEC 60060-2 กำหนด สภาวะแวดล้อมขณะทดสอบ ดังนี้ อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 748 มิลลิเมตรปรอท ความชื้นสัมพัทธ์ 73 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์เฉลี่ย $U_{b(AVG)}$ มีค่า 3.21 ถึง 16.01, 4.70 ถึง 17.56 และ 4.25 ถึง 16.86 กิโลโวลต์ ตามลำดับโดยมีค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ 3.21, 3.86 และ 3.58 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ

จากการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์โดยใช้อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ แกปกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ในระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร ซึ่งอิเล็กโตรดมีรูปลักษณะแตกต่างกันพบว่า ที่ระยะแกปเท่ากันแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะมีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นผลจากรูปลักษณะของอิเล็กโตรดไม่เท่ากัน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor; η^*) ของอิเล็กโตรดและค่าแรงดันไฟฟ้า เบรกดาวน์อีกด้วย โดยอิเล็กโตรดแบบระนาบจะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงกว่าอิเล็กโตรดแบบทรงกลม และอิเล็กโตรดแบบทรงกลมจะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าแปรผันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะแปรผกผันกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแต่ละรูปลักษณะ ดังแสดงในสมการที่ (1) จากความแตกต่างของรูปลักษณะอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบและผลการวิเคราะห์จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบวัสดุฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- ธนากร น้าหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ. (2550). แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรล. *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต*, 10(1), 32-37.
- ยุทธชัย ศิลปะวิจารณ์. (2554). *การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ HVDC*. ค้นเมื่อ 12 สิงหาคม 2554, จาก <http://thailandindustry.com/guru/view.php?id=12923§ion=9>. 2554.
- ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. (2546). *เอกสารประกอบการสอนวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงขั้นสูง*. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สำรวย สังข์สะอาด. (2549). *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อติกร เสรีพัฒนานนท์, ธนากร น้าหอมจันทร์, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ และ สุพิศ บุญรัตน์. (2551). การออกแบบและสร้าง โวลเตจดีไวเดอร์ แบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลต์สำหรับวัดแรงดันสูงกระแสสลับ. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย*, 2(1). 19-25.
- International Electrotechnical Commission, (1989). *High-voltage test techniques Part 1: General definitions and test requirements*. IEC std. 60060-1, Second edition, 1989-11. Switzerland, Geneva .
- International Electrotechnical Commission, (1994). *High-voltage test techniques Part 2: Measuring System*. IEC std. 60060-2, Second edition, 1994-11. Switzerland, Geneva .
- International Electrotechnical Commission, (2002). *Voltage measurement by means of standard air gaps*. IEC std. 60052, Switzerland, Geneva .
- Kuffel, E., Zaengl, W. S. & Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering :Fundamentals* (2 nd. ed.). Great Britain: Butterworth-Heinemann.
- Naidu, M. S. & Kamaraju, V. (1996). *High Voltage Engineering* (2 nd. ed.). New York: McGraw-Hill.