

การทดสอบเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในฉนวนอากาศ โดยใช้แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร

Comparative Experiment of Breakdown Voltage in Air Insulation of Sphere Gap Diameter Size of 5 and 25 Centimeters

ธนากร น้าหอมจันทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Thanakorn Namhormchan

Faculty of Engineering, Eastern Asia University, Thanyaburi, Pathumthani 12110

Tel : 0-2577-1028-31 Ext: 452 E-mail: thanakorn@eau.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในฉนวนอากาศ โดยใช้แกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ผลจากการทดสอบ พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของอิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 5 เซนติเมตร ในระยะแกป 0.2 ถึง 2.4 เซนติเมตร และค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของอิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 25 เซนติเมตร ในระยะแกป 1.0 ถึง 2.4 เซนติเมตร มีค่าใกล้เคียงกับค่าตามมาตรฐานแนะนำ โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ -5.84 ถึง 7.68 และ -8.18 ถึง -4.48 ตามลำดับ และเมื่อทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในฉนวนอากาศของอิเล็กโตรดทรงกลมทั้งสองขนาด พบว่า ผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ ± 7.5 ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการแก้ไขขนาดของอิเล็กโตรดสำหรับระบบวัดและทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงดันสูงต่อไปในอนาคต

คำหลัก ฉนวนอากาศ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน แกปทรงกลม

Abstract

This paper presents the comparative experiment of sphere gap breakdown voltage in air insulation. Sphere gaps have diameter sizes of 5 and 25 centimeter according to IEC 60052 standard. The experiment result shows breakdown voltage of 5

centimeter spherical electrode at 0.2 to 2.4 centimeter gap distance and 25 centimeter spherical electrode at 1.0 to 2.4 centimeters gap distance, which is approximately equal to recommended standard value in -5.84 to 7.68 and -8.18 to -4.48 percentage error respectively. The breakdown voltage comparative experiments of two sphere gaps are similar in ± 7.5 percentage error. The experiment results can analyze to an electrodes size correction factor for measuring and testing in high voltage engineering in the future.

Keywords: Air insulation, electric field stress, breakdown voltage, sphere gap

1. บทนำ

ฉนวนก๊าซที่มีความสำคัญในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง คือ ฉนวนอากาศ ซึ่งเป็นฉนวนที่มีราคาถูก ข้อดีของฉนวนก๊าซ คือ เมื่อเสียสภาพความเป็นฉนวนหรือเกิดการเบรกดาวนแล้ว จะสามารถกลับคืนสภาพความเป็นฉนวนได้หลังจากการเบรกดาวนผ่านพ้นไปแล้ว เช่นเดียวกับฉนวนเหลว ในขณะที่ฉนวนแข็งจะเสียสภาพการเป็นฉนวนอย่างถาวรเมื่อเกิดการเบรกดาวน [1-4]

การทดสอบค่าความเป็นฉนวนหรือค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนอากาศ จำเป็นต้องมีการวัดแรงดันสูงขณะทำการทดสอบ โดยใช้เครื่องมือและวิธีการวัดที่เหมาะสมตามมาตรฐานกำหนด โดยทั่วไปอาจใช้แกปทรงกลม (sphere gap) ตาม

มาตรฐาน IEC 60052 [5] กำหนด ซึ่งสามารถใช้วัด แรงดันสูงกระแสสลับความถี่กำลัง แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซึ่งชั่วลบ แรงดันสูงกระแสตรงทั้ง ชั่วบวกและลบ และแรงดันร้อยละ 50 ของการทดสอบ อิมพัลส์ โดยมาตรฐานดังกล่าวได้กำหนดขนาดของ อิเล็กโทรด ระยะแกป ระยะปลอดภัยตัวนำ ลักษณะการจัด วางอิเล็กโทรด ซึ่งขนาดของอิเล็กโทรดและระยะแกป ตามที่มาตรฐานแนะนำจะเป็นไปตามระดับแรงดันที่ ต้องการจะวัด โดยแรงดันสูงที่มีพิกัดแรงดันที่ต่ำจะใช้ อิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะแกปที่ น้อยกว่าระดับแรงดันสูงที่มีพิกัดแรงดันที่สูงกว่า

จากข้อมูลข้างต้น จึงมีแนวคิดที่จะทำการทดสอบ เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในฉนวนอากาศ ซึ่งใช้อิเล็กโทรดทรงกลมขนาดตามที่มาตรฐานแนะนำ และขนาดใหญ่กว่าที่มาตรฐานแนะนำ เพื่อเปรียบเทียบ ผลอันเนื่องมาจากขนาดของอิเล็กโทรด ทำการทดสอบ ด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงชั่วบวก โดยใช้อิเล็กโทรด ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน IEC 60052 กำหนด อ้างอิงแรงดันไฟฟ้า เบรกดาวนของอิเล็กโทรดขนาด 5 เซนติเมตร เพื่อให้ ทราบผลของขนาดอิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่ มาตรฐานแนะนำ สำหรับการวิเคราะห์หาค่าตัว ประกอบการแก้ไขขนาดของอิเล็กโทรดสำหรับระบบวัด และทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงดันสูงต่อไปในอนาคต

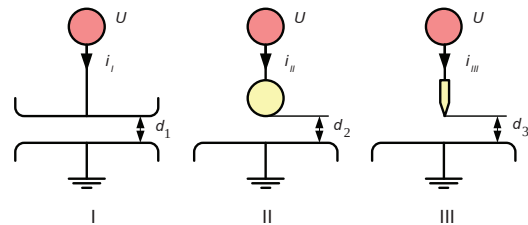
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนอากาศ

อากาศ เป็นฉนวนก๊าซที่เป็นทั้งฉนวนหลักและเป็น ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนในด้านวิศวกรรม ไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงใช้ในด้านการศึกษาการสอนและการ วิจัย คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนอากาศที่สำคัญมีดังนี้ มีค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน ประมาณ 25 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถแทรกซึม ในช่องว่างต่างๆ ของอุปกรณ์ เพื่อระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟง่าย ดับอาร์คทางไฟฟ้าได้ และสามารถคืนตัว เป็นฉนวนได้อีกครั้งหลังจากเกิดการเบรกดาวน อีกทั้งใช้ ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์การทดสอบและงานวิจัย ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงอย่างแพร่หลาย [1-4]

2.2 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า

ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าโดยทั่วไป แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้าไม่ สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบไม่ สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง สนามไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโทรด [1-2] ดังรูปที่ 1



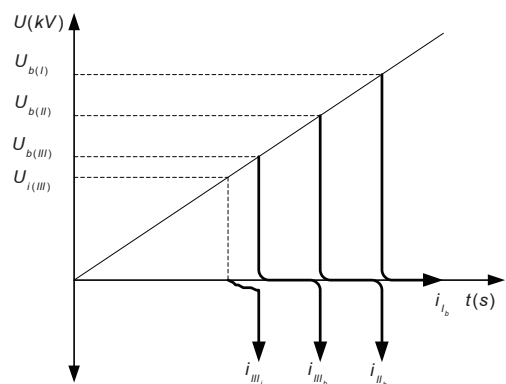
รูปที่ 1 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

โดยที่ I : uniform field

II : slightly nonuniform field

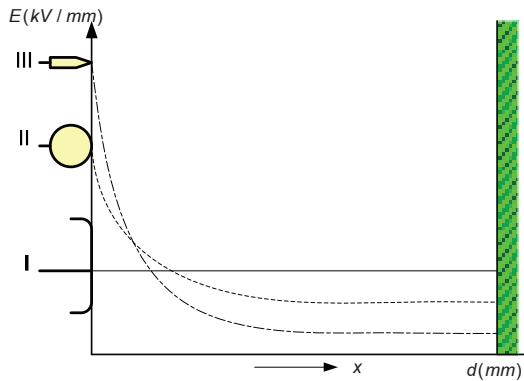
III : highly nonuniform field

ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนส่วน ใหญ่จะเป็นค่าทางสถิติหรือเป็นค่าโดยประมาณ มักจะ กำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงสุด (E_{max}) ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรดในขณะ ที่เบรกดาวนเริ่มเกิดขึ้น แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน (U) ในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า [1-2] ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนในไดอิเล็กตริกตามลักษณะ สนามไฟฟ้า

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ความเครียด สนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ในบริเวณจุดปลายของอิเล็กโทรด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรด ค่าความเครียด สนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

2.3 ผลของลักษณะสนามไฟฟ้าต่อการเกิดเบรกดาวน

ในกรณีสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดเป็นแบบสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แฟลเตอร์สนามไฟฟ้า η^* มีค่าสูง) แรงดันเริ่มต้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงแกประหว่างอิเล็กโตรด จะเป็นเบรกดาวนโดยตรง โดยไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน แต่ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (ค่าแฟลเตอร์ η^* มีค่าต่ำ) ค่าแรงดันเบรกดาวน (U_b) มีค่าสูงกว่าแรงดันเริ่มต้น (U_i) คือ เมื่อได้เงื่อนไขของแรงดันเริ่มต้นเปลี่ยนแปลง จะไม่เกิดเบรกดาวนแต่จะเริ่มเกิดโคโรนา ถ้าจะให้เบรกดาวนจะต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นอีก ค่าแรงดันเริ่มต้นอาจเขียนได้ดังสมการที่ (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 $U_b > U_i$ [1-4]

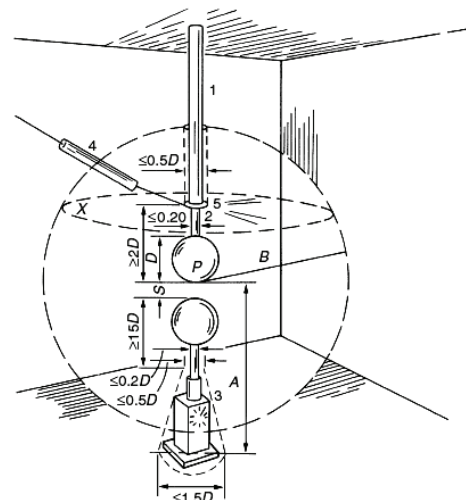
3. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

แกปทรงกลมที่ใช้ในการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60052 [5] กำหนด ซึ่ง IEC 60052 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาวนตามมาตรฐานด้วยค่าความคลาดเคลื่อน (Uncertainty) ร้อยละ 3 ที่ระดับความเชื่อมั่น (Confidence level) ร้อยละ 95 วงจรการทดสอบ

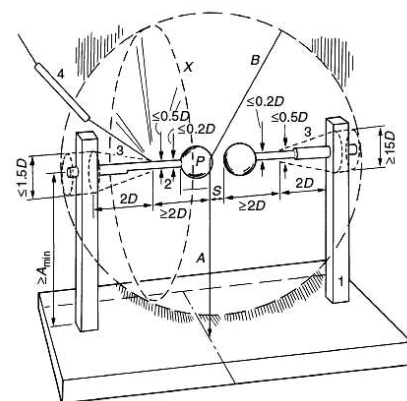
และระบบวัดแรงดันสูงอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [6] และ IEC 60060-2 [7] กำหนด โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. แกปทรงกลม

แกปทรงกลมขึ้นรูปจากสแตนเลสผิวเรียบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันทั้ง 2 ลูก ประกอบเข้ากับก้านยึดแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร การจัดวางแกปทรงกลมจะขึ้นอยู่กับขนาดของอิเล็กโตรด โดยอิเล็กโตรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร ขึ้นไป จะจัดวางในลักษณะแกปแนวตั้ง และอิเล็กโตรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 25 เซนติเมตร จะจัดวางในลักษณะแกปแนวนอน จะจัดวางแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 แสดงดังรูปที่ 4



(a) แกปแนวตั้ง



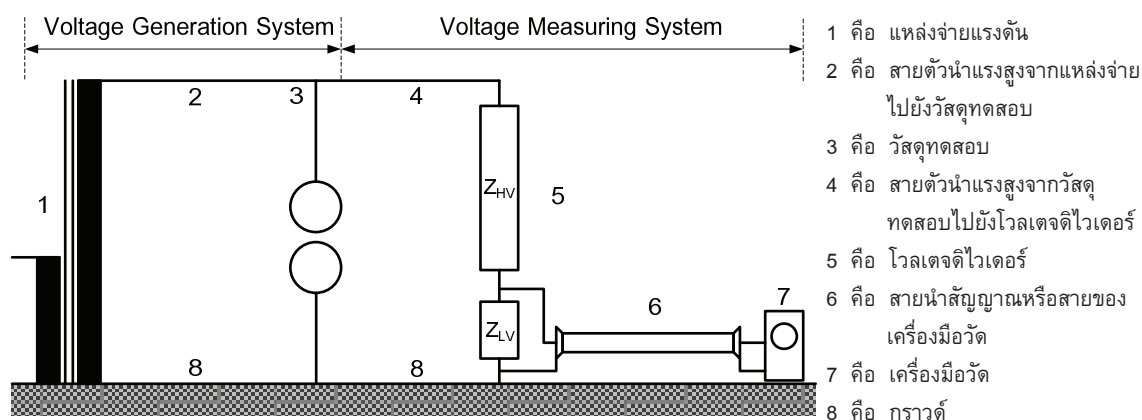
(b) แกปแนวนอน

รูปที่ 4 การจัดวางแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052

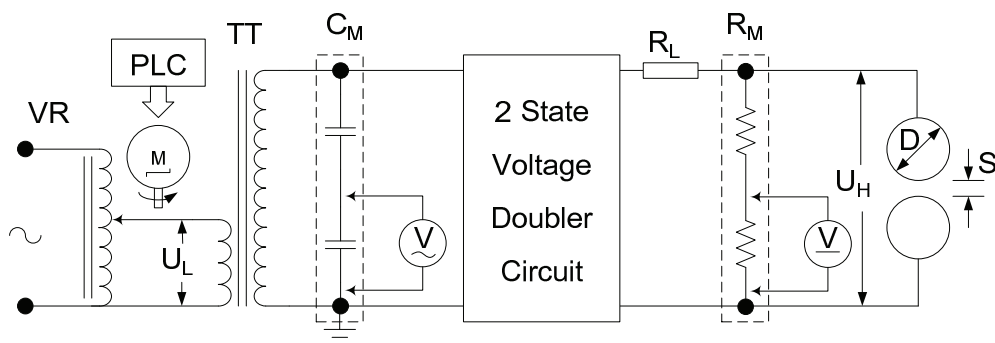
2. วงจรการทดสอบและระบบวัดแรงดันสูง

ระบบวัดแรงดันสูงเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 5 [3] โดยในระบบวัดแรงดันสูงจะประกอบด้วย 2 ระบบ คือ ระบบสร้างแรงดันสูง และระบบวัดแรงดันสูง ซึ่งทั้ง 2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-1 และ IEC 60060-2 กำหนดดังนี้ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบแสดงในค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS value) มีความถี่อยู่ในช่วง 45 - 65 Hz รูปคลื่นของแรงดันเป็นไซน์ซวยด์ทั้งครึ่งคาบบวกและลบ มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 1 ตลอดการทดสอบ แรงดันสูงกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ มีแฟกเตอร์ระลอกไม่

เกินร้อยละ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 1 เมื่อช่วงเวลากการทดสอบต่ำกว่า 60 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 3 เมื่อช่วงเวลากการทดสอบเกินกว่า 60 วินาที ระบบวัดแรงดันสูงมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 3 และสเกลแฟกเตอร์ของอุปกรณ์วัดแรงดันสูงมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 1 โดยมีอัตราการเพิ่มแรงดัน 1 กิโลโวลต์ต่อวินาที (successive discharge tests) วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกควานในฉนวนอากาศ โดยใช้แรงดันสูงกระแสตรงชั่วบวก แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 ระบบวัดแรงดันสูงเบื้องต้น



รูปที่ 6 วงจรการทดสอบ

เมื่อ VR คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ควบคุมด้วย PLC [8]

TT คือ หม้อแปลงทดสอบแรงสูง 220V/20kV

U_L คือ แรงดันด้านแรงต่ำกระแสสลับ

$U_{H(ac)}$ คือ แรงดันด้านแรงสูงกระแสสลับ

$U_{H(dc)}$ คือ แรงดันด้านแรงสูงกระแสตรง

- R_d คือ ความต้านทานจำกัดกระแส
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรดทรงกลม
 S คือ ระยะช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด
 C_M คือ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ พิกัดแรงดัน 20 kV [9]
 R_M คือ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน พิกัดแรงดัน 100 kV
 V คือ ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ (True RMS Multimeter)

ในการทดสอบจะอ้างอิงค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรด ขนาด 5 เซนติเมตร และพิจารณาแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรด ขนาด 25 เซนติเมตร เพื่อเปรียบเทียบผลของขนาดอิเล็กโตรดที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่มาตรฐานแนะนำต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 ของอิเล็กโตรดทรงกลม ขนาด 5 และ 25 เซนติเมตร ที่ระยะแกป 0.2 ถึง 2.4 เซนติเมตร ตามที่มาตรฐานแนะนำสำหรับการทดสอบโดยใช้อิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 5 เซนติเมตร แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 [4]

Sphere gap spacing (cm.)	Breakdown Voltage (kV) of Sphere diameter (cm.)	
	5	25
0.20	8.0	-
0.25	9.6	-
0.30	11.2	-
0.40	14.3	-
0.50	17.4	-
0.60	20.4	-
0.70	23.4	-
0.80	26.3	-
0.90	29.2	-
1.0	32.0	31.7
1.2	37.6	37.4
1.4	42.9	42.9
1.5	45.5	45.5
1.6	48.1	48.1
1.8	53.0	53.5
2.0	57.5	59.0
2.2	61.5	64.5
2.4	65.5	70.0

3. ผลการวิจัย

ภาพถ่ายเบรกดาวน์ระหว่างแกปทรงกลมของอิเล็กโตรดทรงกลมขณะทดสอบ แสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ในจำนวนอากาศ จากการทดสอบ จำนวน 5 ครั้ง ต่อระยะแกป โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลม ขนาด 5 และ 25 เซนติเมตร ที่ระยะแกป 0.2 ถึง 2.4 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ภาพถ่ายการเกิดเบรกดาวน์ภายในแกปทรงกลมขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม 5 เซนติเมตร



รูปที่ 8 ภาพถ่ายการเกิดเบรกดาวน์ภายในแกปทรงกลมขนาดอิเล็กโตรดทรงกลม 25 เซนติเมตร

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศ โดยใช้
อิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 5 เซนติเมตร จากการทดสอบ 5 ครั้ง

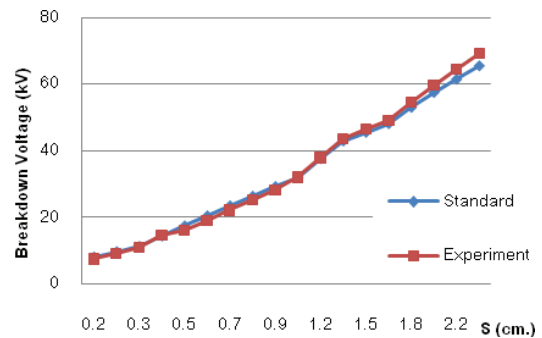
Sphere gap Spacing (cm.)	Breakdown Voltage (kV)		Error (%)
	Standard	Experiment	
0.20	8	7.53	5.82
0.25	9.6	9.21	4.04
0.30	11.2	11.02	1.63
0.40	14.3	14.59	-2.03
0.50	17.4	16.06	7.68
0.60	20.4	19.14	6.16
0.70	23.4	22.18	5.22
0.80	26.3	25.17	4.29
0.90	29.2	28.12	3.70
1.0	32	32.08	-0.25
1.2	37.6	37.95	-0.92
1.4	42.9	43.63	-1.71
1.5	45.5	46.41	-1.99
1.6	48.1	49.14	-2.15
1.8	53	54.46	-2.75
2.0	57.5	59.59	-3.64
2.2	61.5	64.55	-4.96
2.4	65.5	69.32	-5.84

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศ โดยใช้
อิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 25 เซนติเมตร จากการทดสอบ 5 ครั้ง

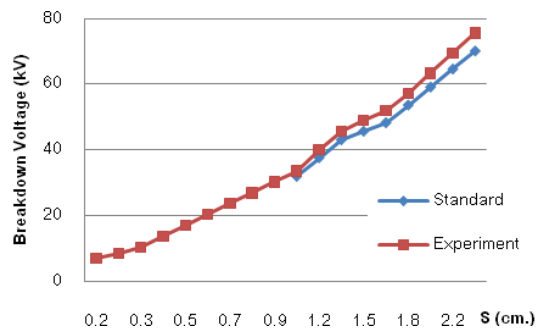
Sphere gap Spacing (cm.)	Breakdown Voltage (kV)		Error (%)
	Standard	Experiment	
0.20	-	7.05	-
0.25	-	8.81	-
0.30	-	10.14	-
0.40	-	13.50	-
0.50	-	16.86	-
0.60	-	20.20	-
0.70	-	23.53	-
0.80	-	26.86	-
0.90	-	30.18	-
1.0	31.7	33.49	-5.63
1.2	37.4	40.07	-7.15
1.4	42.9	45.66	-6.42
1.5	45.5	48.85	-7.36
1.6	48.1	52.04	-8.18
1.8	53.5	55.90	-4.48
2.0	59	61.94	-4.98
2.2	64.5	67.95	-5.35
2.4	70	73.92	-5.60

จากตารางที่ 2 และ 3 สามารถแสดงการ
เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน

และจากการทดสอบ โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 5
และ 25 เซนติเมตร ดังรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

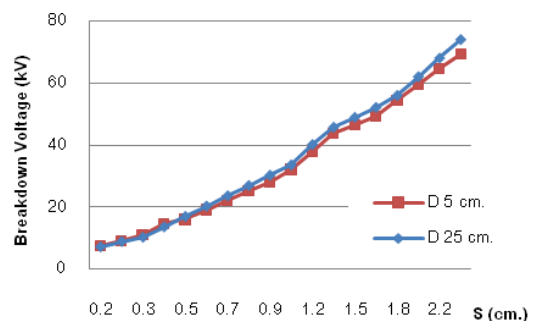


รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน
และการทดสอบ โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 5 เซนติเมตร



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน
และการทดสอบ โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 25 เซนติเมตร

ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ใน
ฉนวนอากาศ ของอิเล็กโตรดทรงกลม ขนาด 5 และ 25
เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 11 และตารางที่ 4



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จากการ
ทดสอบ โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 5 และ 25 เซนติเมตร

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศ โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 5 และ 25 เซนติเมตร

Sphere gap spacing (cm.)	Breakdown Voltage (kV)		Error (%)
	D 5 cm.	D 25 cm.	
0.20	7.53	7.05	6.41
0.25	9.21	8.81	4.39
0.30	11.02	10.14	7.96
0.40	14.59	13.50	7.46
0.50	16.06	16.86	-4.93
0.60	19.14	20.20	-5.52
0.70	22.18	23.53	-6.11
0.80	25.17	26.86	-6.71
0.90	28.12	30.18	-7.32
1.0	32.08	33.49	-4.38
1.2	37.95	40.07	-5.61
1.4	43.63	45.66	-4.64
1.5	46.41	48.85	-5.27
1.6	49.14	52.04	-5.90
1.8	54.46	55.90	-2.65
2.0	59.59	61.94	-3.94
2.2	64.55	67.95	-5.26
2.4	69.32	73.92	-6.63

จากตารางที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนคำนวณจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างอิเล็กโตรด เส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 5 และ 25 เซนติเมตร โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร เป็นแรงดันอ้างอิง

4. การอภิปรายผล

ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในอิเล็กโตรดทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร เซนติเมตร ในระยะแก๊ป 0.2 ถึง 2.4 เซนติเมตร ตามมาตรฐานแนะนำสำหรับการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 5 เซนติเมตร ดังตารางที่ 1 กระบวนการทดสอบและระบบวัดแรงดันสูงอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 และ IEC 60060-2 กำหนด ดังรูปที่ 5 และ 6 โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ตามมาตรฐานและนำผลการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ได้นำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 5 เซนติเมตร ในระยะแก๊ป 0.2 ถึง 2.4 เซนติเมตร ที่ได้จากทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าตามมาตรฐานแนะนำ

โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ -5.84 ถึง 7.68 ดังตารางที่ 2 ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลมขนาด 25 เซนติเมตร ในระยะแก๊ป 1.0 ถึง 2.4 เซนติเมตร ที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าตามมาตรฐานแนะนำ โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ -8.18 ถึง -4.48 ดังตารางที่ 3 และเมื่อนำผลการทดสอบของอิเล็กโตรดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร นำเปรียบเทียบกัน พบว่า ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ ± 7.5 ดังตารางที่ 4

ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลมที่มีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร ในระยะแก๊ป 0.2 ถึง 0.9 เซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงแก๊ปที่แคบกว่ามาตรฐานแนะนำ มีค่าใกล้เคียงกับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ ± 7 สำหรับระยะแก๊ป 1.0 ถึง 2.4 เซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงแก๊ปที่มาตรฐานแนะนำสำหรับการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลมทั้ง 2 ขนาด ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร มีค่าแรงดันสูงกว่าการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ตลอดช่วงแก๊ป ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ -6 ถึง -2 ซึ่งผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ข้างต้น พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลมที่มีขนาดใหญ่กว่ามาตรฐานแนะนำในระยะแก๊ปที่แคบกว่ามาตรฐานแนะนำ มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลมที่มีขนาดและระยะแก๊ปตามมาตรฐานแนะนำ

5. สรุป

จากการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลมตามมาตรฐาน ในระยะแก๊ป 0.2 ถึง 2.4 เซนติเมตร โดยใช้อิเล็กโตรดขนาดแตกต่างกันพบว่า ที่ระยะแก๊ปเท่ากันแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะมีค่าไม่

เท่ากันถึงแม้จะควบคุมสภาวะแวดล้อมให้มีค่าเท่ากันดังนี้ อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 748 มิลลิเมตรปรอท ความชื้น 73 เปอร์เซ็นต์ ก็ตาม ทั้งนี้เป็นผลจากขนาดของอิเล็กโตรดทั้งสองไม่เท่ากันหรืออาจกล่าวได้ว่าอิเล็กโตรดทั้งสองมีรูปลักษณะไม่เหมือนกัน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor; η) ของอิเล็กโตรดทั้งสองและค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนี้อีกด้วย ดังแสดงในสมการที่ (1) จากความแตกต่างของรูปลักษณะอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบและผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนี้ได้ จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นอันเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการแก้ไขขนาดของอิเล็กโตรดสำหรับระบบวัดและทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงดันสูงต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่สำหรับการดำเนินการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล. 2546. เอกสารประกอบการสอนวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงขั้นสูง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร.
- [2] สรรวย สังข์สะอาด. 2549. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (พิมพ์ครั้งที่ 3). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- [3] Kuffel, E. Zaengl, W. S. and Kuffel, J. 2000. High Voltage Engineering :Fundamentals, (2nd ed.), Newnes, Great Britain.
- [4] Naidu, M. S. and Kamaraju, V. 1996. High Voltage Engineering (2nd ed.). McGraw-Hill.
- [5] IEC Publication 60052. 2002. Voltage measurement by means of standard air gaps, Geneva.
- [6] IEC Publication 60060-1. 1989. High-voltage Test Techniques, Part 1: General definitions and test requirements, Geneva.
- [7] IEC Publication 60060-2. 1994. High-voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems, Geneva.
- [8] ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์ และ พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ. 2550. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรล. วารสาร RSU JET วิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต. ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 กันยายน 2550 : 32 – 37.
- [9] ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ และ สุพิศ บุญรัตน์. 2552. คาปาซิทีฟโวลเตจดีไวเดอร์ พิกัดแรงดัน 20 กิโลโวลต์ 50 เฮิร์ตซ โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม 3 ชั้น ร่วมกับฉนวนน้ำมันหม้อแปลง. การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 47 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: 293-300.