การออกแบบสร้างชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศ สำหรับความดันอากาศ –30 ถึง 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร

Design and Construction of Air Insulation Breakdown Voltage Test Set in Air Pressure -30 to 30 pound per square inch at 1 to 5 millimeters Gap Distance

ธนากร น้ำหอมจันทร์[1]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการจัดการความรู้ในเรื่องแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า โดยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเป็นค่าที่แสดงถึงรูปลักษณะของอิเล็กโตรดหรือรูปลักษณะของสนามไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ (1) อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แสดงถึง อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ โดยมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าประมาณ 1, (2) อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย แสดงถึง อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม หรือ ทรงกลม-ระนาบ คือ โดยมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.9 และ (3) อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง แสดงถึง อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ โดยมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าน้อยกว่า 0.3 การประยุกต์ใช้ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในการออกแบบอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูง เช่น ขั้วต่อสำหรับทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง โวลเตจดิไว-เดอร์ การออกแบบขนาดของขดลวด L_P และ L_s ของหม้อแปลงเทสล่า การออกแบบตัวนำล่อฟ้า และจุดต่อทางไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นต้น

คำสำคัญ: อิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง, แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ, สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

Abstract

This paper presents the knowledge management of field utilization factors. The field utilization factors are value that represents the characteristics of the high voltage electrodes or the electric field characteristic are divided into three types: (1) uniform field electrodes shown the plane - plane electrode that have field utilization factors $\eta^* \cong 1$, (2) slightly nonuniform field electrodes shown sphere - sphere or sphere - plane electrode that have field utilization factors in range $0.3 \leqslant \eta^* \cong 0.9$ and (3) highly nonuniform field electrodes shown the rod - plane electrode that have field utilization factors $\eta^* < 0.3$, the field utilization factors applied to the design of high voltage equipments, such as cable

[1]อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย

E-mail: thanakorn@eau.ac.th

terminator for high voltage testing, high voltage divider, L_P and L_S coils of Tesla Transformer, lightning conductor and high voltage electrical connectors etc.

Keywords: high voltage electrode, field utilization factor, uniform field, slightly nonuniform field, highly nonuniform field

---

ความนำ

ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า (dielectric strength) หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนได้โดยไม่เกิดความเสียหาย หรือเกิดการเบรกดาวน์ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าต่อความหนาของฉนวนระหว่างอิเล็กโตรด ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ความคงทนของการฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (E_b) ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ ดังสมการที่ 1

$$E_b = f\ (\text{ลักษณะสนามไฟฟ้า, ฉนวน, เวลา}) \quad (1)$$

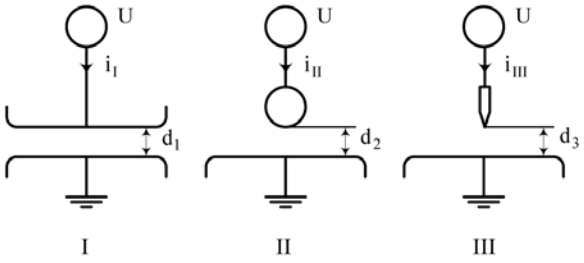
จากสมการที่ 1 โดยที่

- ลักษณะสนามไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโตรด

- ฉนวน หรือลักษณะสมบัติของฉนวน หมายถึง คุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางกล ทางเคมี ของวัสดุฉนวน

- เวลา หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันคงอยู่ที่ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าแก่ฉนวน (ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; สำรวย สังข์สะอาด, 2549)

ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าโดยทั่วไป แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโตรด (ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; สำรวย สังข์สะอาด, 2549) ดังภาพ 1



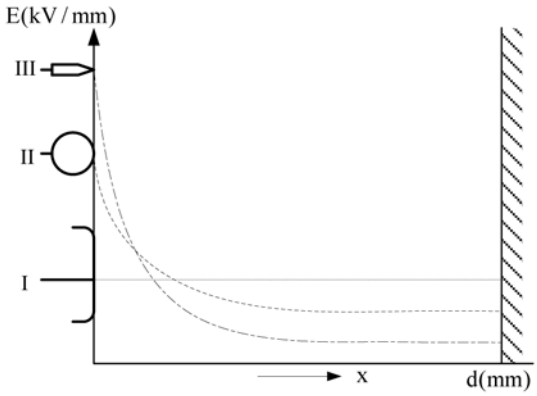
ภาพ 1 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

I : สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

II : สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

III : สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนส่วนใหญ่จะเป็นค่าทางสถิติหรือเป็นค่าโดยประมาณ มักกำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงสุด E_{max} ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโตรดในขณะที่เบรกดาวน์เริ่มเกิดขึ้น ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในบริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงดังภาพ 2



ภาพ 2 การกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดรูปลักษณะต่าง ๆ

จากสมการที่ 1 ภาพที่ 1 และ 2 กล่าวได้ว่าการเกิดการเบรกดาวน์เป็นผลมาจากลักษณะของสนามไฟฟ้า ดังสมการที่ 2

$$U_b = E_{max} \times d \times \eta^* \quad (2)$$

โดยที่

E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/mm)

U_b คือ แรงดันไฟฟ้า (kV)

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด (mm)

η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ($\eta^* \leqslant 1$)

แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) ส่วนใหญ่ใช้ค่าโดยประมาณ (ธนากร น้ำหอมจันทร์และคณะ, 2553, หน้า 10; ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554 หน้า 46; ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; สำรวย สังข์สะอาด, 2549; สำรวย สังข์สะอาด, 2550; Kuffel, E., Zaengl, W. S. & Kuffel, J., 2000; Naidu, M. S. and Kamaraju, V., 1996) หากประมาณค่าต่ำกว่าความเป็นจริงแล้วอาจส่งผลต่อฉนวนที่ได้ออกแบบ และในทางตรงกันข้ามถ้าประมาณค่าสูงกว่าความเป็นจริงแล้วส่งผลต่อขนาดและราคาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ออกแบบ (ธนากร น้ำหอมจันทร์และคณะ, 2553, หน้า 10; ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554 หน้า 46)

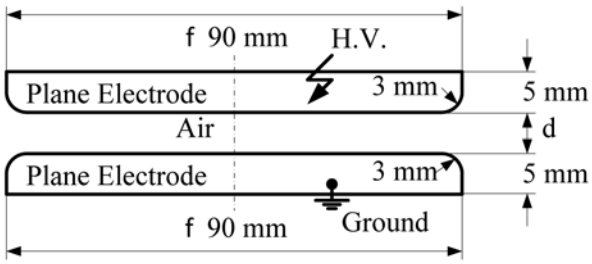
จากที่ได้นำเสนอถึงความสำคัญของค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและการออกแบบวัสดุฉนวนข้างต้น ซึ่งผู้เขียนได้มีโอกาสเข้ารับฟังการบรรยายทางวิชาการเรื่อง “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและอีเอ็มซี” และมีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องในการทำงานวิจัยในด้านดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง เช่น งานวิจัยเรื่องแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชนิดปลายแหลม-ระนาบในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง (2553) การศึกษาเปรียบเทียบแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กโตรดชนิดปลายแหลม-ระนาบในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศ (2554) แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดสำหรับทดสอบหาแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์สำหรับฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 (2554) และ การทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศโดยใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ และแกปทรงกลมขนาด 5 และ 25 เซนติเมตร (2554) เป็นต้น ซึ่งเป็นการวิจัยที่มุ่งเน้นไปในการศึกษาเรื่องความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า ผลของรูปลักษณะของอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง และแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า จึงมีแนวคิดที่จะจัดการความรู้ที่ได้จากการฟังบรรยายพิเศษและการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้ เพื่อนำเสนอผลการวิจัยและการทดสอบในเชิงตัวเลขที่แน่นอน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาและผู้สนใจด้านการออกแบบวัสดุฉนวนสามารถนำค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าจากผลการวิจัยต่าง ๆ ที่ได้รวบรวมไว้ในบทความวิชาการนี้ นำไปใช้ได้โดยไม่ต้องทำการประมาณค่าต่อไปในอนาคต

ลำดับการนำเสนอในบทความวิชาการฉบับนี้มีดังนี้

1. แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ
2. แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
3. แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง
4. ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในการออกแบบอุปกรณ์ทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
5. บทสรุป

แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ

เกิดจากอิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ ดังภาพ 1(I) ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (η^*) จากอิเล็กโตรดชนิดนี้มีค่าสูงที่สุด โดยมากในการออกแบบประมาณค่าที่ $\eta^* \cong 1$ (ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554, หน้า 107; ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; สำรวย สังข์สะอาด, 2549; สำรวย สังข์สะอาด, 2550)



ภาพ 3 ขนาดของอิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ ขนาดดังภาพ 3 ในฉนวนอากาศ ที่ทำการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขั้วบวก ที่ระยะแกป 1-5 มิลลิเมตร (ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554, หน้า 107) แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1

ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ ที่ระยะแกป 1-5 มิลลิเมตร

d (mm)	$U_{b(AVG)}$ (kV)	E_{max} (kV/mm)	η^*
1	3.21	3.21	1.000
2	6.42	3.21	1.000
3	9.61	3.21	0.998
4	12.84	3.21	1.000
5	16.01	3.21	0.998

จากตาราง 1 พบว่าค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบสม่ำเสมอหรืออิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบมีค่าประมาณ 1 ทั้งนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบมีค่าคงที่ตลอดระยะแกป ดังภาพ 2(I)

แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

เกิดจากอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม หรือทรงกลม-ระนาบ ดังภาพที่ 1(II) ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชนิดนี้จะอยู่ในช่วง $0.3 \leq \eta^* \cong 0.9$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโตรดและระยะแกป (ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554 หน้า 107; ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554, หน้า 547; ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; สำรวย สังข์สะอาด, 2549; สำรวย สังข์สะอาด, 2550)

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ในฉนวนอากาศ ที่ทำการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรงขั้วบวก ระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร (ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554, หน้า 107) แสดงดังตาราง 2 และ 3

ตาราง 2

ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ที่ระยะแกป 1-5 มิลลิเมตร

d (mm)	$U_{b(AVG)}$ (kV)	E_{max} (kV/mm)	η^*
1	4.70	3.86	1.218
2	7.53	3.86	0.975
3	11.02	3.86	0.952
4	14.59	3.86	0.945
5	17.56	3.86	0.910

ตาราง 3

ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร ที่ระยะแกป 1-5 มิลลิเมตร

d (mm)	$U_{b(AVG)}$ (kV)	E_{max} (kV/mm)	η^*
1	4.25	3.58	1.187
2	7.05	3.58	0.985
3	10.14	3.58	0.944
4	13.50	3.58	0.943
5	16.86	3.58	0.942

ผลการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดสำหรับทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 แบบทรงกลม และแบบทรงกลมบางส่วน ที่ทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ ระยะแกป 0.5 ถึง 2.5 มิลลิเมตร แสดงดังตาราง 4

จากตาราง 2 ถึง 4 พบว่าค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรืออิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม มีค่าประมาณ 1 เช่นเดียวกับสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากระยะแกปจากการทดสอบแคบเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโตรด อีกทั้งที่ผิวของอิเล็กโตรดที่มีพื้นที่เล็กที่สุดมีค่าสนามไฟฟ้าสูง ดังภาพ 2(II) สำหรับผลการทดสอบใน

ระยะแกปที่กว้างขึ้นพบว่าค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลมจะต่ำลง (ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554, หน้า 34-41) โดยอยู่ในช่วง $0.3 \leq \eta^* \cong 0.9$

ตาราง 4

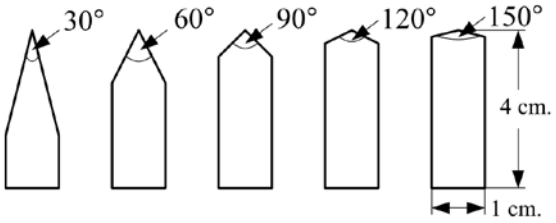
ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดสำหรับทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 (ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554, หน้า 547)

d (mm)	η^*	
	Spherical	Partial Spherical
0.5	0.983	0.996
1.0	0.968	0.991
1.5	0.959	0.987
2.0	0.941	0.983
2.5	0.934	0.980

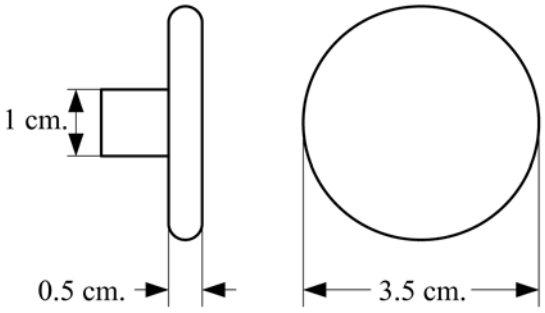
แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

เกิดจากอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ ดังภาพที่ 1(III) ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชนิดนี้อยู่ในช่วง $\eta^* < 0.3$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมุมของอิเล็กโตรดและระยะแกป (ธนากร น้ำหอมจันทร์และคณะ, 2553, หน้า 13; ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554 หน้า 50; ฤทธิเดช เกาะหวาย และคณะ 2552, หน้า 101; ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; สำรวย สังข์สะอาด, 2549; สำรวย สังข์สะอาด, 2550)

ตัวอย่างค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ ขนาดดังภาพ 4 ในฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ที่ทำการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ ระยะแกป 1 ถึง 3 มิลลิเมตร (ธนากร น้ำหอมจันทร์และคณะ, 2553, หน้า 13; ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554 หน้า 50; ฤทธิเดช เกาะหวาย และคณะ 2552, หน้า 101) แสดงดังตาราง 5



I ขนาดของอิเล็กโตรดปลายแหลม



II ขนาดของอิเล็กโตรดระนาบ

ภาพ 4 ขนาดของอิเล็กโตรดปลายแหลม-ระนาบ

จากตาราง 5 พบว่า แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรืออิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ มีค่าต่ำเมื่อมุมของอิเล็กโตรดปลายแหลมมีค่าต่ำและจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมุมของอิเล็กโตรดมีค่ามากขึ้น ซึ่งแสดงถึงความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมของอิเล็กโตรดเข้าใกล้ระนาบ และค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าจะสูงขึ้นเมื่อระยะแกปเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ดังภาพ 2(III) ทั้งนี้ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันทั้งในฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมันหม้อแปลง กล่าวคือเมื่อระยะแกปเพิ่มมากขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์สูงขึ้นและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะสูงขึ้นเช่นกัน ในทุกชนิดของวัสดุฉนวน ดังสมการ (2)

ตาราง 5

ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ ในฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ที่ระยะแกป 1 ถึง 3 มิลลิเมตร (ธนากร น้ำหอมจันทร์และคณะ, 2553, หน้า 13; ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2554 หน้า 50; ฤทธิเดช เกาะหวาย และคณะ 2552, หน้า 101)

Electrode	1 mm		2 mm		3 mm	
Angle	Air	Oil	Air	Oil	Air	Oil
30°	0.57	0.64	0.67	0.67	0.65	0.65
60°	0.72	0.71	0.69	0.69	0.68	0.69
90°	0.72	0.72	0.73	0.59	0.68	0.68
120°	0.77	0.77	0.77	0.77	0.76	0.74
150°	0.87	0.85	0.84	0.84	0.84	0.84

หมายเหตุ Air หมายถึง ฉนวนอากาศ
Oil หมายถึง ฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในการออกแบบอุปกรณ์ทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยมากมีรูปทรงกระบอกและทรงกลม ซึ่งจะแสดงสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ในการออกแบบพิจารณาจากระดับแรงดันใช้งาน ชนิดของวัสดุฉนวน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์และระยะห่างกับส่วนที่เป็นกราวด์ ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสัมพันธ์กับค่า แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า นอกจากอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบ ดังภาพ 1(II) แล้ว ยังมีรูปทรงของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่พบเห็นได้โดยทั่วไป คือ ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ซึ่งเป็นรูปทรงที่แสดงถึงสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ในการออกแบบจะพิจารณาระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดนอกและใน โดยที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดแคบจะส่งผลให้อุปกรณ์มีขนาดเล็ก แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ต่ำ และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดกว้างจะส่งผลให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์สูง และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ ในการออกแบบให้มีมิติที่เหมาะสมจะออกแบบโดยพิจารณาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ 3 และ 4

$$\eta^* = \frac{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{(r_2 - r_1)} \qquad (3)$$

$$e = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)_{opt} \qquad (4)$$

โดยที่

r_2 คือ รัศมีของอิเล็กโตรดอันนอก
r_1 คือ รัศมีของอิเล็กโตรดอันใน
e คือ ค่า exponential

ตัวอย่างการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้วิธีดังกล่าว แสดงดังนี้

- ขั้วต่อสำหรับทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20(24) kV, 240 sq.mm. (ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, 2551, หน้า 73-79)
- การศึกษาการใช้ Stress cone เพื่อใช้ทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล (ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, 2551, หน้า 319-334)
- คาปาซิทีฟโวลเตจดิไวเดอร์ พิกัดแรงดัน 20 กิโลโวลท์ 50 เฮิรตซ์ โดยใช้อิเล็คโตรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม 3 ชั้น ร่วมกับฉนวนน้ำมันหม้อแปลง (ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, 2552, หน้า 293-300)
- ผลของการอัดประจุไฟฟ้าให้กับฝุ่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักฝุ่น (พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ และคณะ, 2551, หน้า 591-595)
- การวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงในขดลวด LP และ Ls ของหม้อแปลงเทสล่า เพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพของการออกแบบสร้าง (สมเกียรติ ทองแก้ว

และคณะ, 2550, หน้า 301-304)

ตัวอย่างการประยุกต์แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง โดยมากใช้ในการออกแบบตัวนำล่อฟ้า โดยตัวนำล่อฟ้าที่มีรูปลักษณะปลายแหลมหรือค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าต่ำจะสามารถสร้างสตรีมเมอร์ได้ดีกว่าหรือมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวนำล่อฟ้าที่มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูง (ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, 2553, หน้า 29-39; ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, 2554, หน้า 76-84) รวมถึงการวิเคราะห์หาผลของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากรูปลักษณะของจุดต่อทางไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Thipcharoen, N., et al., 2008) เป็นต้น

บทสรุป

ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนได้ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าต่อความหนาของฉนวนระหว่างอิเล็กโตรด ความคงทนของการฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ คือ ลักษณะสมบัติของฉนวน ช่วงเวลาที่แรงดันคงอยู่ที่ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าแก่ฉนวน และแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเป็นค่าที่แสดงถึงรูปลักษณะของอิเล็กโตรดหรือรูปลักษณะของสนามไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แสดงถึง อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ คือ อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากันตลอดช่วงระยะแกป โดยมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า $\eta^* \cong 1$ อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย แสดงถึง อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม หรือ ทรงกลม-ระนาบ คือ อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่บริเวณพื้นที่ที่เล็กที่สุดของอิเล็กโตรดและจะมีค่าต่ำลงเมื่อระยะห่างออกไป โดยมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าอยู่ในช่วง $0.3 \leq \eta^* \cong 0.9$ และอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง แสดงถึง อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ คือ อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่บริเวณพื้นที่ที่เล็กที่สุดของอิเล็กโตรดและจะมีค่าต่ำลงเมื่อระยะห่างออกไป เช่นเดียวกับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย แต่ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวอิเล็กโตรดจะสูงกว่าและจะต่ำกว่าเมื่อระยะห่างออกไป ดังภาพ 2(III) โดยมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า $\eta^* < 0.3$

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในการออกแบบอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูงสำหรับสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย โดยมากจะเป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม เช่น ขั้วต่อสำหรับทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง โวลเตจดิ-ไวเดอร์ การออกแบบขนาดของขดลวด LP และ Ls ของหม้อแปลงเทสล่า เป็นต้น สำหรับสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง โดยมากใช้ในการออกแบบตัวนำล่อฟ้า และจุดต่อทางไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ และ สุพิศ บุญรัตน์. (2551). ขั้วต่อสำหรับทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.. *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2551*, หน้า 73-79.

ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์ และ พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ. (2551). การศึกษาการใช้ Stress cone เพื่อใช้ทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ., 31*(2), หน้า 319-334.

ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ และ สุพิศ บุญรัตน์. (2552). คาปาซิทีฟโวลเตจดิไวเดอร์ พิกัดแรงดัน 20 กิโลโวลท์ 50 เฮิรตซ์ โดยใช้อิเล็คโตรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม 3 ชั้น ร่วมกับฉนวนน้ำมันหม้อแปลง. *การประชุมทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47*, หน้า 293-300.

ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์ และ พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ. (2553). แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชนิดปลายแหลม-ระนาบในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม, 11*(2), หน้า 9-16.

ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์ และ พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ. (2553). การศึกษาผลของรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าต่อคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้า. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมงคลธัญบุรี, 8(1)*, หน้า 29-39.

ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์ และ พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ. (2554). การศึกษาผลของค่าความต้านทานดินต่อประสิทธิภาพตัวนำล่อฟ้า. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย EAU Heritage Journal, 5(1), หน้า 76-84.

ธนากร น้ำหอมจันทร์. (2554). การทดสอบเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศโดยใช้แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ., 4(1)*, หน้า 34-41.

ธนากร น้ำหอมจันทร์. (2554). การศึกษาเปรียบเทียบแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กโตรดชนิดปลายแหลม-ระนาบในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม, 12(2)*, หน้า 45 - 52.

ธนากร น้ำหอมจันทร์. (2554). การทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศโดยใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ และแกปทรงกลมขนาด 5 และ 25 เซนติเมตร. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย EAU Heritage Journal, 5(2)*, หน้า 103-109.

ธนากร น้ำหอมจันทร์. (2554). แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดสำหรับทดสอบหาแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์สำหรับฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 21(3)*, หน้า 541-548.

พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ, ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์ และ สุพิศ บุญรัตน์. (2551). ผลของการอัดประจุไฟฟ้าให้กับฝุ่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักฝุ่น. *การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2551*, หน้า 591-595.

ฤทธิเดช เกาะหวาย, เสาวลักษ์ จันท้าว, ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์ และ พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ. (2552). แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชนิดปลายแหลม-ระนาบในฉนวนอากาศ. *การประชุมวิชาการและแสดงผลงานทางวิชาการ พระจอมเกล้าลาดกระบัง ประจำปี 2552*, หน้า 96-102.

ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, (2546). *เอกสารประกอบการสอนวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงขั้นสูง*. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สำรวย สังข์สะอาด. (2549). *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำรวย สังข์สะอาด. (2550). เอกสารประกอบการบรรยายทางวิชาการเรื่อง "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและอีเอ็มซี".

สมเกียรติ ทองแก้ว, ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, บุญยัง ปลั่งกลาง และ ธนากร น้ำหอมจันทร์. (2550). การวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงในขดลวด L_P และ L_s ของหม้อแปลงเทสล่า เพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพของการออกแบบสร้าง. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30*, หน้า 301-304.

Kuffel, E., Zaengl, W. S. & Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering :Fundamentals*. (2nd. ed.). Great Britain: Newnes.

Naidu, M. S. & Kamaraju, V. (1996). *High Voltage Engineering* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.

Nuchit Thipcharoen, Kreingsak Srisuk, Atigon Sareephattananon and Thanakorn Namhormchan. (2008). The Case Studies of Cause Investigation and Repair of 60 MVA MEA on-site Power Transformers. *17th Conference of the Electric Power Supply Industry, Macao SAR, China*. 10 .27-31, Oct 28 (2.2) tract 12.