

การศึกษาเปรียบเทียบแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กโตรดชนิดปลายแหลม-ระนาบ ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศ

A Comparative Study of Field Utilization Factor Using Rod-Plane Gap Electrode in Transformer Oil Insulation and Air Insulation

ธนากร น้ำหอมจันทร์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

เลขที่ 200 ถนนรังสิต-นครนายก รัชบุรี ปทุมธานี 12110 โทร 0-2577-1028 ต่อ 452 E-mail: thanakorn@eau.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กโตรดชนิดปลายแหลม-ระนาบ ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศ ที่ระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดปลายแหลมที่ใช้ในการทดสอบมีมุม 30, 60, 90, 120 และ 150 องศาตามลำดับ ทำการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับตามมาตรฐาน IEC 60060-1, IEC 60060-2, IEC 60156 และ IEC 60052 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดระหว่างอิเล็กโตรดขณะเกิดเบรกดาวนจ์จำลองหาโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์ค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามีดังนี้ อิเล็กโตรดปลายแหลมที่มีมุมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา ที่ระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร แฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.57 – 0.72 โดยแสดงถึงลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง สำหรับอิเล็กโตรดที่มีมุมมากกว่า 90 องศา ที่ระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร แฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.74 – 0.78 โดยแสดงถึงลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากมุมของอิเล็กโตรดที่มีลักษณะใกล้เคียงกับระนาบมากกว่าอิเล็กโตรดข้างต้น ซึ่งผลการวิเคราะห์

ที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศ ผลจากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในการเลือกวัสดุฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ : สนามไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง, แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า, ฉนวนน้ำมันหม้อแปลง, ฉนวนอากาศ

Abstract

This paper presents a comparative study of field utilization factor analysis using rod-plane gap electrode in the transformer oil insulation and air insulation with a gap distance between 1-3 mm. The rod electrodes used in the experiments have the setting angles of 30, 60, 90, 120 and 150 degrees respectively. The experiments were conducted by using AC high voltage according to the IEC 60060-1, IEC 60060-2, IEC 60156 and IEC 60052 standards. The maximum value of electric field stress

between electrodes during the breakdown occurs was simulated by finite element method. The results of field utilization factor analysis are as follows: for electrodes angles of less than or equal to 90 degrees with a gap distance between 1-3 mm., the field utilization factors were between 0.57 – 0.72, which indicates highly non-uniform fields, for electrode angles of more than 90 degrees with a gap distance between 1-3 mm., the field utilization factors were between 0.74 – 0.78 which indicates slightly non-uniform fields as a result of the electrode angles were nearly plane. These analysis results can be utilized to choose insulator material for high voltage electric equipment that has highly non-uniform field characteristic more appropriately in the future.

Keyword : electric field, highly nonuniform field, field utilization factor, transformer insulation, air insulation

1. บทนำ

วัสดุฉนวนที่สามารถพบเห็นโดยทั่วไป ในด้านเทคนิคการฉนวน คือ ฉนวนอากาศ และฉนวนน้ำมันหม้อแปลง โดยฉนวนอากาศ มีค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาว์นประมาณ 2.5 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร ฉนวนน้ำมันหม้อแปลง มีค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาว์นประมาณ 10 ถึง 25 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร วัสดุฉนวนทั้ง 2 ชนิด ใช้งานได้ทั้งฉนวนหลัก และฉนวนแทรกซึม

สามารถแทรกซึมในช่องว่างต่างๆ ของอุปกรณ์เพื่อระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟง่าย ดับอาร์คทางไฟฟ้าได้ และสามารถในการคืนตัวเป็นฉนวนได้อีกครั้ง หลังจากเกิดการเบรกดาว์นผ่านพ้นไปแล้ว อีกทั้งใช้ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์การทดสอบและงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงอย่างแพร่หลาย [1-9]

ในการออกแบบวัสดุฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จะต้องคำนึงถึงความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า ซึ่งหมายถึงค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาว์น ความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาว์น มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโตรด

ความคงทนของการฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (E_p) จะสัมพันธ์กับลักษณะสนามไฟฟ้าหรือแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (η ; field utilization factor) ซึ่งค่า แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงส่วนใหญ่จะใช้ค่าโดยประมาณ [1-5] หากประมาณค่าต่ำกว่าความเป็นจริงแล้วอาจส่งผลต่อฉนวนที่ได้ออกแบบ และในทางตรงกันข้ามถ้าประมาณค่าสูงกว่าความเป็นจริงแล้วจะส่งผลต่อขนาดและราคาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ออกแบบ

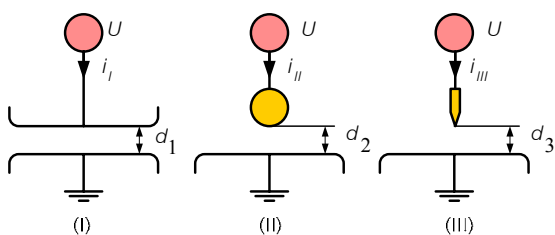
จากที่ได้นำเสนอแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชนิดปลายแหลม-ระนาบในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงใน [5] จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาเปรียบเทียบค่าแฟคเตอร์ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวน

อากาศ ที่ระยะห่างระหว่างแก๊ป 1-3 มิลลิเมตร โดยใช้ อิเล็กโตรดปลายแหลม-ระนาบ อิเล็กโตรดปลายแหลม ที่ใช้ในการทดสอบมีมุม 30, 60, 90, 120 และ 150 องศาตามลำดับ เพื่อให้ทราบค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า สำหรับสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงที่แน่นอน สำหรับฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศใน ระยะแก๊ปที่ทำการทดสอบ สำหรับการออกแบบวัสดุ ฉนวนที่มีขนาดและราคาที่เหมาะสมต่อไปในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

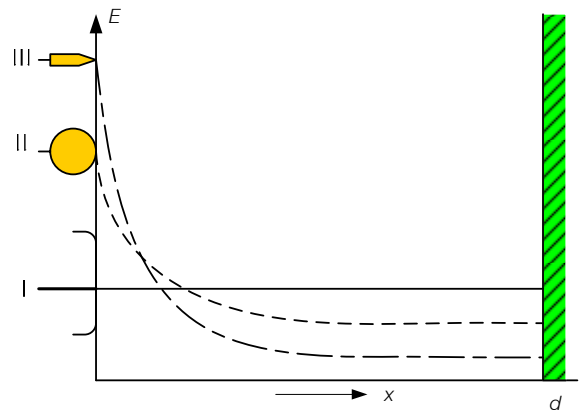
2.1 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า [1-5]

ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าโดยทั่วไป แบ่ง ออกได้ 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 1 (I) และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอ แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และ แบบไม่สม่ำเสมอสูง ดังรูปที่ 1 (II) และ (III) สนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโตรด ดัง รูปที่ 1



รูปที่ 1 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ความเครียด สนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ในบริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มี พื้นผิว น้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิว อิเล็กโตรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่าง รวดเร็ว ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เปรียบเทียบการกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรด ลักษณะต่างๆ

2.2 ผลของลักษณะสนามไฟฟ้าต่อการเกิด เบรกดาวน [1-5]

ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่ สม่ำเสมอสูง (ค่าแฟคเตอร์ η^* มีค่าต่ำ) ค่าแรงดัน เบรกดาวน U_b มีค่าสูงกว่าแรงดันเริ่มต้น U_i คือ เมื่อได้ เจื่อนไขของแรงดันเริ่มต้นเปลี่ยนแปลง จะไม่เกิด เบรกดาวนแต่จะเริ่มเกิดโคโรนา ถ้าจะให้เบรกดาวน จะต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นอีก ค่าแรงดันเริ่มต้นอาจ เขียนได้ดังสมการที่ (1)

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

โดยที่ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น

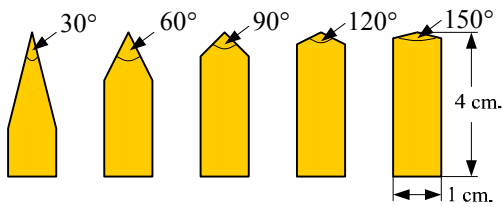
E_i คือ E_{max} จากแรงดันเริ่มต้น U_i

3. การทดสอบ

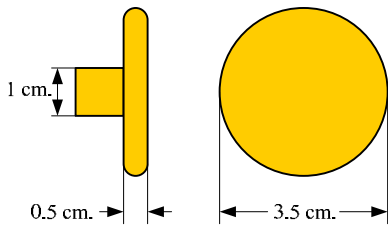
3.1 อิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบจะใช้อิเล็กโตรดชนิดปลายแหลม- ระนาบ ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ระยะแก๊ป 1-3

มิลลิเมตร อีเล็กโทรดที่ใช้จะกลิ้งขึ้นรูปจากทองเหลือง โดยมีมุม 30, 60, 90, 120 และ 150 องศา ตามลำดับ ขนาดของอีเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3 และ 4



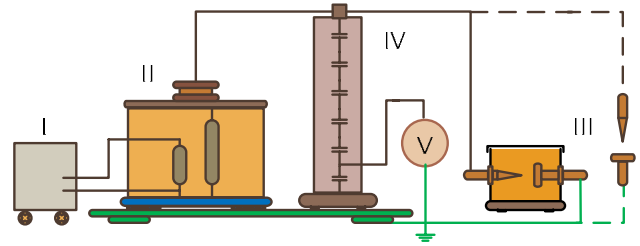
รูปที่ 3 ขนาดของอีเล็กโทรดปลายแหลมที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4 ขนาดของอีเล็กโทรดระนาบที่ใช้ในการทดสอบ

3.2 วงจรทดสอบ

ในการทดสอบจะทำการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ เพื่อหาค่าเฉลี่ย U_b จากการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง วงจรการทดสอบและการวัดจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [10], IEC 60060-2 [11] กระบวนการทดสอบฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 [12] และกระบวนการทดสอบฉนวนอากาศตามมาตรฐาน IEC 60052 [13] กำหนด อุปกรณ์การทดสอบ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์

โดยที่

I : แหล่งจ่ายปรับค่าได้ควบคุมด้วย PLC [14]

II : หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง 220V/20kV, 5kVA

III : ชุดทดสอบ

IV : โพรบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ 20 kV [8]

V : ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ Fluke 177 True RMS

Multimeter

3.3 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า

ในบทความนี้วิเคราะห์หาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ในการจำลองจะวิเคราะห์แบบ 2 มิติและไม้คำนึงถึงผลของประจุตกค้าง บนโปรแกรมหคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองหาค่า E_{max}

Electric Potential	Relative Permittivity (ϵ_r)		
	Electrode	Transformer Oil	Air
$U_{b(AVG)}$	1	2.2	1

4. ผลการทดสอบ

ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นเฉลี่ย $U_{b(AVG)}$ จากการทดสอบ 10 ครั้ง และผลการจำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ของอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ ที่มุมของอิเล็กโทรดขนาด 30, 60, 90, 120 และ 150 องศา ตามลำดับ ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศ ที่ระยะแก๊ป 1-3 มิลลิเมตร แสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

จากค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นเฉลี่ยและผลการจำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ดัง

ตารางที่ 2 และ 3 จะสามารถวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าได้จากสมการที่ (1) ฉะนั้น

$$\eta^* = \frac{U_{b(AVG)}}{d \times E_{max}} \quad (2)$$

ผลการวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า η^* ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศ ที่ระยะแก๊ป 1-3 มิลลิเมตร แสดงดังตารางที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาว์นและผลการจำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

Electrode Angle	1 mm		2 mm		3 mm	
	$U_{b(AVG)}$ (kV)	E_{max} (kV/mm)	$U_{b(AVG)}$ (kV)	E_{max} (kV/mm)	$U_{b(AVG)}$ (kV)	E_{max} (kV/mm)
30°	6.78	11.95	10.96	8.22	12.92	6.67
60°	11.82	16.43	14.37	10.35	15.74	7.71
90°	12.30	17.10	16.13	11.02	16.79	8.26
120°	13.36	17.36	15.17	9.89	16.58	7.27
150°	7.65	8.80	9.53	5.65	16.33	6.50

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาว์นและผลการจำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนอากาศ

Electrode Angle	1 mm		2 mm		3 mm	
	$U_{b(AVG)}$ (kV)	E_{max} (kV/mm)	$U_{b(AVG)}$ (kV)	E_{max} (kV/mm)	$U_{b(AVG)}$ (kV)	E_{max} (kV/mm)
30°	2.22	3.45	2.79	2.09	3.24	1.67
60°	3.00	4.25	3.47	2.50	4.85	2.75
90°	3.53	4.91	3.77	3.19	4.67	2.29
120°	4.08	5.30	5.56	3.62	6.91	3.13
150°	4.25	5.02	6.18	3.67	6.54	2.59

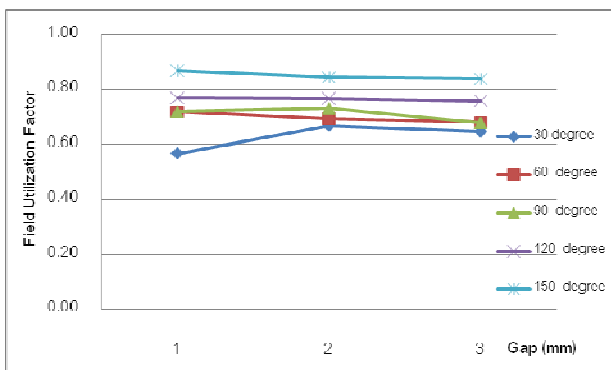
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า η^* ของอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

Electrode Angle	1 mm	2 mm	3 mm
30°	0.57	0.67	0.65
60°	0.72	0.69	0.68
90°	0.72	0.73	0.68
120°	0.77	0.77	0.76
150°	0.87	0.84	0.84

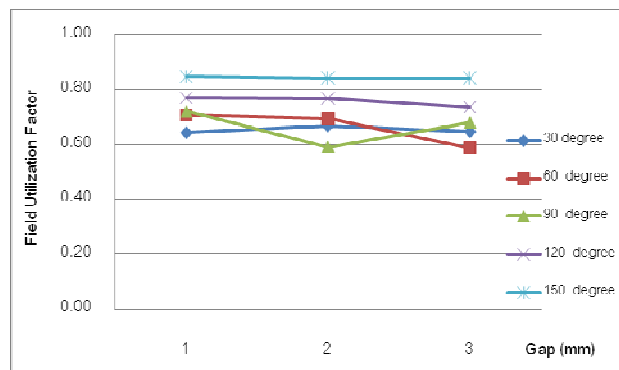
ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า η^* ของอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ ในฉนวนอากาศ

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

จากตารางที่ 4 และ 5 จะสามารถแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ของแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า η^* ของอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ เปรียบเทียบกับมุมของอิเล็กโทรดและระยะแกปได้ ดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า มุมของอิเล็กโทรดและระยะแกป ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า มุมของอิเล็กโทรดและระยะแกป ในฉนวนอากาศ

จากรูปที่ 6 และ 7 พบว่า อิเล็กโทรดปลายแหลมที่มีมุมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา ที่ระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร ค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.57 - 0.72 โดยแสดงถึงลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง สำหรับอิเล็กโทรดที่มีมุมน้อยกว่า 90 องศา ที่ระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร ค่า

แฟลคเตอร์สนามไฟฟ้าประมาณ 0.74 - 0.78 โดยแสดงถึงลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากมุมของอิเล็กโทรดที่มีลักษณะใกล้เคียงกับระนาบมากกว่าอิเล็กโทรดข้างต้น ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศ

5. การวิเคราะห์สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเปรียบเทียบแฟลคเตอร์สนามไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กโทรดชนิดปลายแหลม-ระนาบ ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศ ที่มีมุมปลายแหลมของอิเล็กโทรดขนาด 30, 60, 90, 120 และ 150 องศา ระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบหาแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ด้วยแรงดันสูงกระแสลับตามมาตรฐาน IEC 60060-1, IEC 60060-2, IEC 60156 และ IEC 60052 กำหนด จำลองการกระจายสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

ผลการวิเคราะห์ค่าแฟลคเตอร์สนามไฟฟ้ามีดังนี้ อิเล็กโทรดปลายแหลมที่มีมุมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา ที่ระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร ค่าแฟลคเตอร์สนามไฟฟ้าแสดงถึงลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง สำหรับอิเล็กโทรดที่มีมุมมากกว่า 90 องศา ในระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร ค่าแฟลคเตอร์สนามไฟฟ้าแสดงถึงลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากมุมของอิเล็กโทรดที่มีลักษณะใกล้เคียงกับระนาบกว่าอิเล็กโทรดข้างต้น ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศ

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะสามารถนำไปช่วยในการเลือกวัสดุฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีอิเล็กโทรดลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงหรืออิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ระนาบในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและฉนวนอากาศ ได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, “เอกสารประกอบการสอน วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงขั้นสูง”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2546.
- [2] สำรวย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [3] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, “High Voltage Engineering Fundamentals”, 2nd edition, Butterworth – Heinemann, 2000
- [4] M. S. Naidu, and V. Kamaraju, “High Voltage Engineering”, 2nd edition, McGraw-Hill, 1996.
- [5] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, “แฟลคเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดชนิดปลายแหลม-ระนาบในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง”, วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสยาม, ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 เล่มที่ 21 กรกฎาคม – ธันวาคม 2553, หน้า 9-16.
- [6] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, “มิติที่เหมาะสมของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน พิกัด

- 12/20(24)kV 240sq.mm.”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 23 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2549, หน้า 13-18 .
- [7] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, “การศึกษาการใช้ Stress cone เพื่อให้ทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 เมษายน - มิถุนายน 2551, หน้า 319 – 334.
- [8] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, “โพรบวัดแรงดันสูงกระแสสลับแบบประหยัดพิกัด 20 กิโลโวลต์ 50 เอ็มพีเอ”, วารสารวิชาการสมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย, ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 พฤษภาคม 2551, หน้า 172-183.
- [9] อติกร เสรีพัฒนานนท์ และคณะ, “การออกแบบและสร้างโวลเตจดีโวลเดอร์แบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลต์สำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ”, วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย, ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2551, หน้า 19-25.
- [10] IEC Publication 60060-1, “High-voltage Test Techniques, Part 1: General definitions and test requirements”, Geneva, 1989.
- [11] IEC Publication 60060-2, “High-voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems”, Geneva, 1994.
- [12] IEC Publication 60156, “Insulating liquid determination of the breakdown voltage at power frequency”, Geneva, 1995.
- [13] IEC Publication 60052, “Voltage measurement by means of standard air gaps”, Geneva, 2002.
- [14] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, “แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรล”, วารสาร RSU JET วิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต, ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 กันยายน 2550, หน้า 32 – 37.