

เอกสารอ้างอิง



1. IEC Publ. No.71, "Insulation Co-ordination," 1967.
2. สำรวย สังข์สะอาด, "การฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยก๊าซ SF₆," การประชุมวิทยากรของ วสท., โรงแรมเอเชีย กรุงเทพมหานคร, 2526.
3. สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2527.
4. MWB MESSWANDLER-BAU AG, "Test Transformer," Catalogue No.B12/1e, Bamberg.
5. Greenwood, A., Electrical Transients in Power Systems, Wiley-Interscience, Pennsylvania, 1971.
6. Shirai, M., and Matsumoto, M., "SF₆ Gas Insulated Transformer," IEEE-Symposium November'84, Bangkok, 1984.
7. Meidensha Electric, "SF₆-Gas-Insulated Transformers," Technical Information, 1983.
8. Mitsubishi Electric, "SF₆-Gas-Insulated Transformers," Technical Information, 1983.
9. Sato, T. ; Ina, T. , and Matsumoto, M., "Cooling Effect by Gas Density of SF₆ Gas Insulated Transformer," 81 TD 667-5, IEEE PES 1981, Minnesota, 1981.
10. Moser, H.P. ; Dahinden, V. ; Friederich, H., and Lennarz, K., Future Transformer Insulation-Systems, Lecture Notes, Switzerland, 1981.
11. ICI Petrochemicals and Plastics Division, "Melinex 226 Polyester Film," Technical Data Sheet MX TD302, Welwyn Garden City, 2nd ed., 1980.
12. Banspach, H., Transformer Design, Lecture Notes, Thai German Technical Teacher College, Bangkok, 1st ed., 1975.

13. Kuhlmann, John H., Design of Electrical Apparatus, Wiley & Sons Inc., New York, 3rd ed., 1950.
14. Brand, U., "Power Frequency Testing of EHV Apparatus with Individual and Cascaded Test Transformers," Messwandler Bau GMBH, Bamberg.
15. Thunyapongchai, P., "Design and Construction of A 100 kV High Voltage Testing Transformer," Master thesis, Chulalongkorn University, 1977.
16. Blume, L.F., Transformer Engineering, John Wiley & Sons, New York, 1938.
17. Kuffel, E., and Zaengl, W.S., High Voltage Engineering, Pergamon Press, Oxford, 1984.
18. Maller, V.N., and Naidu, M.S., Advances in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF₆ and Vacuum, Pergamon Press, Oxford, 1981.
19. Mitsubishi Electric Coporation, "Instructions of SF₆ Gas Treatment," Tokyo, 1983.
20. IEC Publ. No.76, "Power Transformers," 1976.
21. May & Christe GMBH, "Cast Resin Transformers for Heavy Duty Power Converters and High Intermittent Load," Cast Coil-Power Transformers, (MAYLAMID[®]), Oberursel.
22. Schmidt, W., "Humidity Influence on the A.C. and Impulse Strength of SF₆-Gas Insulation," BBC Brown, Boveri & Co., Ltd., Department AQ-S, Zurich.
23. Ramo, S., and Whinnery, John R., Fields and Waves in Modern Radio, John Wiley & Sons, New York, 2nd ed., 1960.
24. Bean, Richard L.; Chackan Jr., Nicholas; Moore, Harold R., and Wentz, Edward C., Transformer for the electric Power Industry, Westinghouse Electric Coporation, 1959.

25. MWB MESSWANDLER-BAU AG, "AC Voltage Generators," Catalogue No.B1/7e,
Bamberg.
26. Mc Donald, D., Power Transformers for High-Voltage Transmission,
Jesse Broad & Co., Ltd., Manchester, 1957.
27. Stigant, S. Austen, and Lacey, H. Morgan, The J. & P. Transformer
Book, Johnson & Phillips Ltd., London, 8th ed., 1941.
28. Nippon Steel Corporation, "Silicon Steel," Catalogue No. EXE 320,
Tokyo, 1976.
29. IEC Publ. No.60-2, "High-Voltage Test Techniques Part 2 : Test
Procedures," 1973.
30. IEC Publ. No.270, "Partial Discharge Measurements," 1968.

ศูนย์วิทยพัชกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

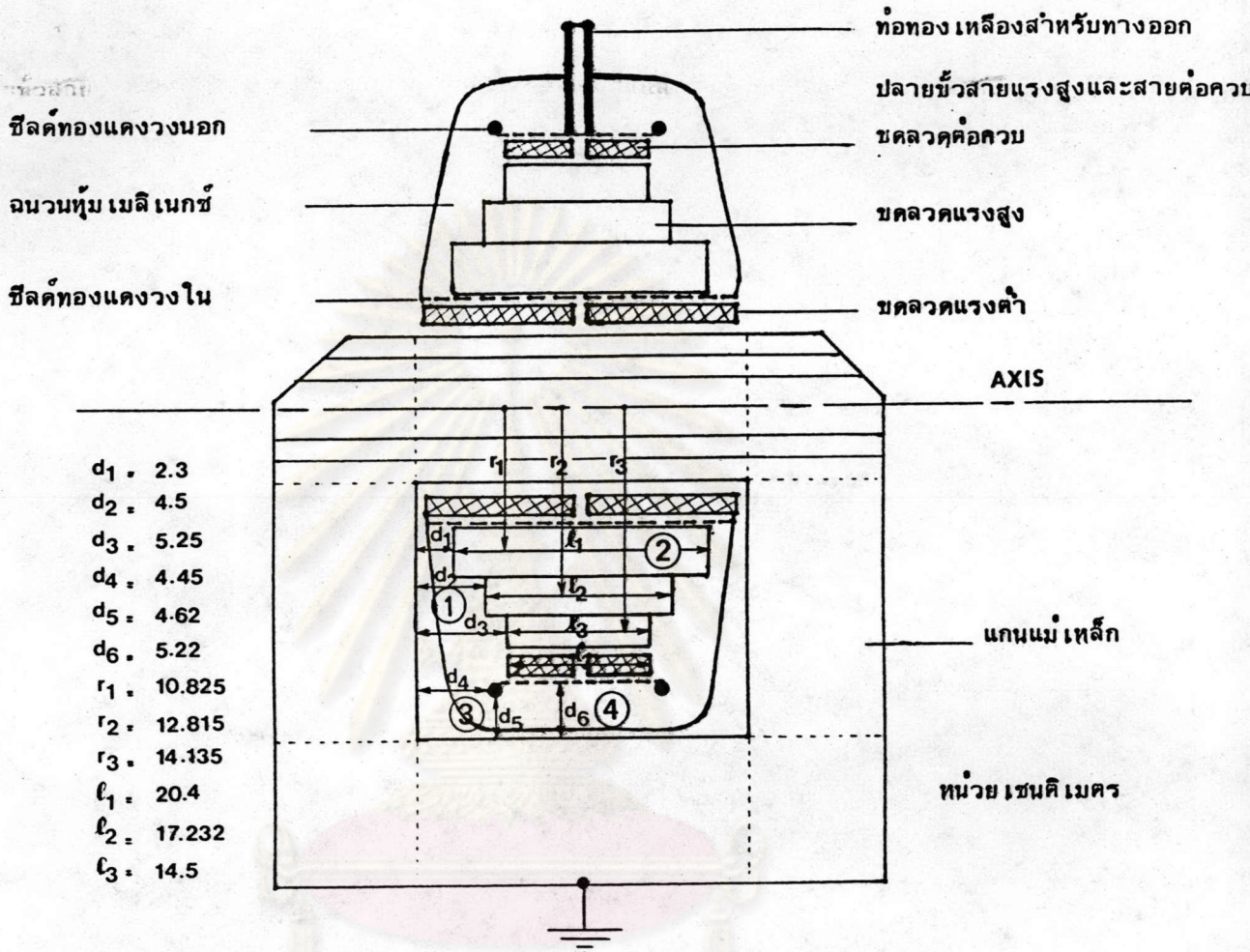
ภาคผนวก ก.

การคำนวณขนาดการฉนวนของขดลวดแรงสูง

การออกแบบขนาดการฉนวนของขดลวดที่ประกอบสร้าง ซึ่งประกอบด้วยชั้นของฟิล์ม โพลีเอสเตอร์และก๊าซ SF₆ สลับกัน จะมีปัญหาเนื่องจากฉนวนทั้งสองชนิดมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ต่างกัน ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ และความเครียดสนามไฟฟ้าในฟิล์มโพลีเอสเตอร์ ที่ตำแหน่งรอยต่อมีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนทั้งสองดังได้กล่าวแล้วในข้อ 2.6.4.1 ดังนี้

$$\frac{E_{SF_6}}{E_{PET}} = \frac{\epsilon_{rPET}}{\epsilon_{rSF_6}} = \frac{3.3}{1.0}$$

จะพบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นก๊าซ SF₆ (E_{SF_6}) จะมากกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าของชั้นฟิล์มโพลีเอสเตอร์ตรงตำแหน่งรอยต่อ และจากรูปที่ 2.17 สามารถสรุปได้ว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกเนื้อเดียวล้วนจะมีค่าอยู่ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของชั้นฉนวนชั้นอื่น โดยถ้าชั้นฉนวนของโพลีเอสเตอร์หนามากขึ้น ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ในชั้นฉนวนของโพลีเอสเตอร์จะเข้าใกล้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกเนื้อเดียวล้วน ณ ตำแหน่งเดียวกันมากขึ้น แต่ถ้าชั้นฉนวนของโพลีเอสเตอร์หนาลดลงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ในชั้นฉนวนของก๊าซ SF₆ จะเข้าใกล้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกเนื้อเดียวล้วน ณ ตำแหน่งเดียวกันมากขึ้น ดังนั้นในการออกแบบการฉนวนของขดลวดแรงสูงต้องคำนึงถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นของก๊าซ SF₆ ด้วย เพื่อป้องกันการเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่แรงดันใช้งานดังกล่าวแล้วในข้อ 2.6.4.2



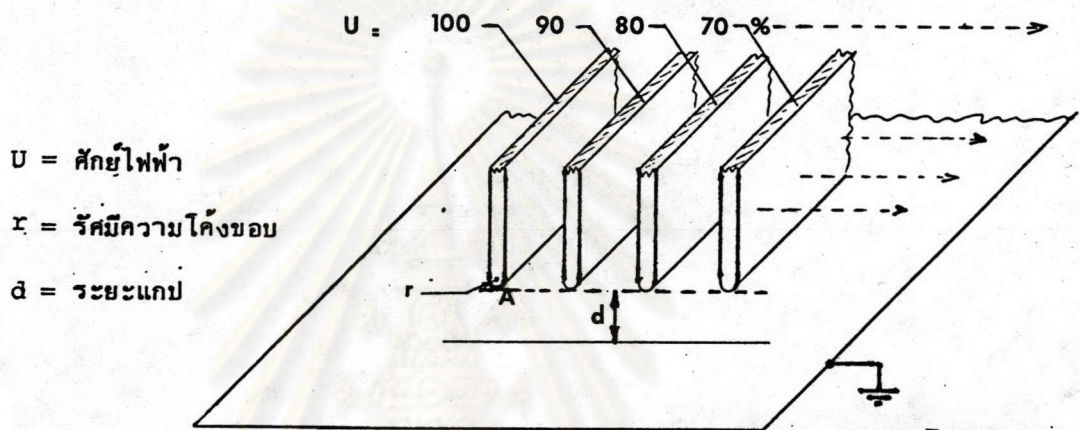
- $d_1 = 2.3$
- $d_2 = 4.5$
- $d_3 = 5.25$
- $d_4 = 4.45$
- $d_5 = 4.62$
- $d_6 = 5.22$
- $r_1 = 10.825$
- $r_2 = 12.815$
- $r_3 = 14.135$
- $l_1 = 20.4$
- $l_2 = 17.232$
- $l_3 = 14.5$

รูปผนวก ก.1 ภาพตัดขวางของขดลวดที่ประกอบใส่แกนแม่เหล็ก

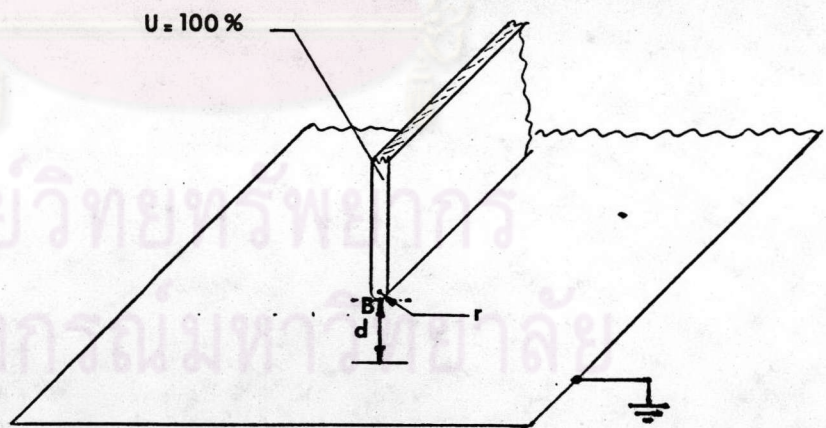
การคำนวณขนาดการฉนวนของขดลวดแรงสูง จะคำนวณในส่วนที่สวมอยู่ในแกนแม่เหล็ก ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับดิน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากกว่าส่วนอื่น ๆ บริเวณที่ต้องคำนวณขนาดการฉนวนจะมี 4 บริเวณ คือ บริเวณ ①, ②, ③ และ ④ โดยขนาดการฉนวนจะขึ้นกับแรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินซึ่งได้กำหนดไว้ 110 kV และการคำนวณขนาดการฉนวนจะต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในชั้นฉนวนก๊าซ SF₆ ไม่ให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่แรงดันกำหนด 100 kV

ก.1 การคำนวณขนาดการฉนวนบริเวณ ①

บริเวณ ① เป็นบริเวณระหว่างขอบของขดลวดแรงสูงและขดลวดค่อควบแต่ละชั้นกับแกนแม่เหล็ก จากลักษณะดังกล่าวนี้คล้ายกับอิเล็กโทรดในรูปผนวก ก.2 ก) และจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (จุด A) น้อยกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (จุด B) ของอิเล็กโทรดในรูปผนวก ก.2 ข)* ดังนั้นในการคำนวณขนาดการฉนวนจะใช้อิเล็กโทรดในรูปผนวก ก.2 ข) เพื่อเป็นแฟกเตอร์ความปลอดภัย



ก) อิเล็กโทรดที่มีลักษณะคล้ายบริเวณขอบของขดลวดกับแกนแม่เหล็ก



ข) อิเล็กโทรดที่ใช้คำนวณหาขนาดการฉนวน

รูปผนวก ก.2 อิเล็กโทรดที่ใช้คำนวณหาขนาดการฉนวนบริเวณขอบของขดลวดกับแกนแม่เหล็ก

* เป็นผลการทดลองจากการใช้เครื่องผลิตสนามไฟฟ้าบนกระดาษสารกึ่งตัวนำโดยจำลองรูปร่างอิเล็กโทรดทั้งสองด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ติดบนกระดาษสารกึ่งตัวนำ

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (จุด B) ของอิเล็กโทรดในรูปผนวกที่ ก.2 ข)
โดยคิดว่าเป็นไดอิเล็กตริกชนิดเดียวกัน ๆ จะเป็นไปตามสมการ [23]

$$E_m = \frac{2}{\pi} \times \frac{U}{(d+r)} \sqrt{-\left\{\left(\frac{d}{d+r}\right)^2 - 1\right\}}$$

E_m = ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

U = ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด

r = รัศมีความโค้งของขอบ

d = ระยะแกบระหว่างอิเล็กโทรด

จากการคำนวณลองหาค่า d_1 ถึง d_4 ซึ่งจะต้องได้ค่าความกว้างของขดลวดแรงสูงแต่ละ
ชั้นมาก่อนจากการคำนวณการฉนวนบริเวณ ② แล้วจะได้ค่าระยะ d_1 ถึง d_4 ที่กำหนดในรูป
ผนวก ก.1

ตัวอย่างการคำนวณระยะ d_1

สมมติให้ $d_1 = 2.3$ cm

จากข้อมูลในข้อ 3.3.2

ขดลวดชั้นที่ 1 ของขดลวดแรงสูงจะมีแรงดันสูงสุด (สำหรับการทดสอบแรงดันเกิน
 $110 \times \sqrt{2}$ kV_p)

$$= (\text{แรงดันต่อรอบของขดลวดแรงสูง}) \times \text{จำนวนรอบของขดลวดแรงสูงชั้นที่หนึ่ง}$$

$$= (4.714) \times (18200)$$

$$= 85.80 \text{ kV}_p$$

เมื่อ

$$U = 85.80 \text{ kV}_p$$

$$d = 2.3 \text{ cm}$$

$$r = \text{รัศมีภาคตัดขวางของเส้นลวดแรงสูง}$$

$$= 0.0196 \text{ cm}$$

ดังนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดสำหรับไดอิเล็กตริกเนื้อเดียวกันล้วน ๆ

$$E_m = \left\{ \frac{2}{\pi} \times \frac{85.80}{(2.3+0.0196)} \right\} \sqrt{-\left\{\left(\frac{2.3}{2.3+0.0196}\right)^2 - 1\right\}}$$

$$= 181.52 \text{ kVp/cm}$$

ใช้ตัวפקเตอร์ลดทอน เท่ากับ 0.5

$$\begin{aligned} \text{จะได้ค่า } E_m &= 181.52 \times 0.5 \\ &= 90.76 \end{aligned} \quad \text{kVp/cm}$$

(ตัวพกเตอร์ลดทอนเท่ากับ 0.5 เป็นค่าจากการทดลองโดยประมาณในการใช้เครื่องผลิตสนามไฟฟ้า เพื่อหาสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้งสอง ในรูปผนวก ก.2 ก) และ ข))

สำหรับเนื้อโคอิเลกตริกซ้อนกันระหว่างฟิล์มเมลิเน็กซ์กับชั้นฉนวนก๊าซ SF₆ ซึ่งมีค่าคงตัวโคอิเลกตริกต่างกันประมาณ 3.3 เท่า ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในชั้นฉนวนก๊าซ SF₆ ประมาณได้ดังนี้

ใช้ตัวพกเตอร์เพิ่มค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเท่ากับ 2

$$\begin{aligned} \text{จะได้ค่า } E_{m_{SF_6}} &= 2 \times E_m \\ &= 2 \times 90.76 \\ &= 181.52 \end{aligned} \quad \text{kVp/cm}$$

(ตัวพกเตอร์เท่ากับ 2 เป็นค่าที่ใช้เพิ่มความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนก๊าซ SF₆ จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสำหรับโคอิเลกตริกเนื้อเดียวกันล้วน ๆ จะไม่ใช่ 3.3 เนื่องจากความหนาชั้นฉนวนรวมของก๊าซ SF₆ ไม่บางมากจนเป็นฟิล์มบางเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาชั้นฉนวนรวมของฟิล์ม โพลีเอสเตอร์ที่ใช้หุ้มขดลวดแรงสูงและขดลวดค่อควมไว้)

ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ ($E_{c_{SF_6}}$)

$$= P \times E_c$$

$$P = \text{ความดันก๊าซ SF}_6 \text{ (bar)}$$

$$E_c = \text{ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ SF}_6 \text{ ในสนาม}$$

ไฟฟ้าสม่ำเสมอ และมีระยะแกปกว้างมาก ๆ มีค่าเท่ากับ

$$87.8 \text{ kVp/cm.bar}$$

$$\text{แทนค่าจะได้} \quad = 2.35 \times 87.8$$

$$= 206.33 \quad \text{kVp/cm}$$

แต่เนื่องจากผลของระยะช่องแกบที่แคบ ๆ เช่นระหว่างชั้นของฟิล์มโพลีเอสเตอร์ ทำให้ความเครียดสนามเริ่มเกิดโคโรนาของก๊าซ SF₆ ($E_{i_{SF_6}}$) สูงกว่าค่า 206.33 kVp/cm ซึ่งสูงกว่าเท่าไรนั้นขึ้นกับระยะแกบที่แคบมากเท่าไร ทำให้ใช้เป็นค่าพกเตอร์ความปลอดภัย

$$\text{ดังนั้น} \quad E_{m_{SF_6}} < E_{C_{SF_6}} < E_{i_{SF_6}}$$

$$\text{แทนค่าจะได้} \quad 181.52 \text{ kVp/cm} < 206.33 \text{ kVp/cm}$$

ในกรณี ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในเนื้อฉนวนของเบลีเน็กซ์

$$\begin{aligned} E_{m_{PET}} &= E_{m_{SF_6}} \times \frac{\epsilon_{r_{SF_6}}}{\epsilon_{r_{PET}}} \\ &= 181.52 \times \frac{1}{3.3} = 55.00 \text{ kVp/cm} \end{aligned}$$

แต่จากตารางที่ 2.2

ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฟิล์มเบลีเน็กซ์ ($E_{C_{PET}}$) หนา 0.075 mm

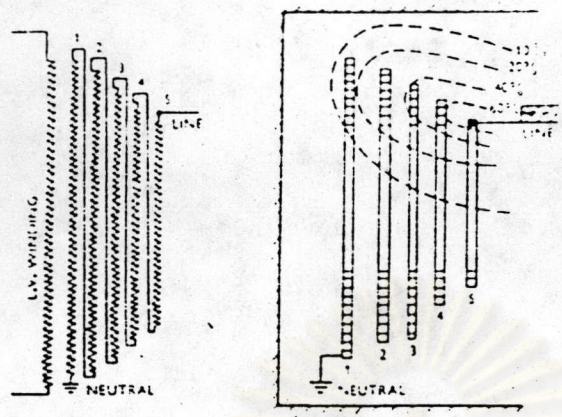
$$\text{เท่ากับ} \quad \frac{12\sqrt{2}}{0.075} = 226 \text{ kVp/mm}$$

(หาได้จากค่าแรงดันเบรกดาวน์ ทารด้วยความหนาของฟิล์ม)

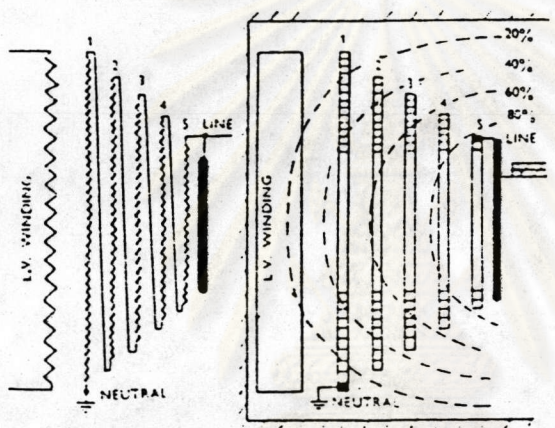
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad E_{m_{PET}} &< E_{C_{PET}} \\ 55.0 \text{ kVp/cm} &< 226 \text{ kVp/mm} \end{aligned}$$

ก.2 การคำนวณขนาดการฉนวนบริเวณ ②

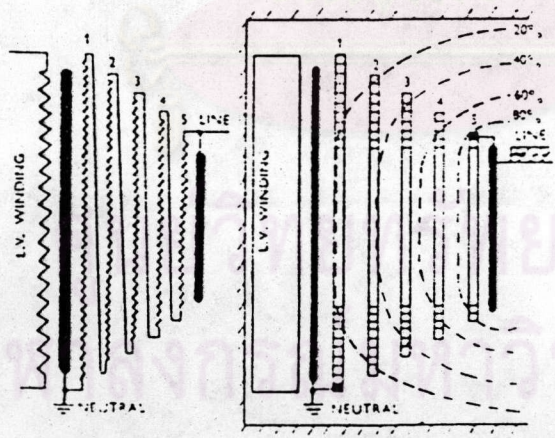
บริเวณ ② เป็นบริเวณระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูงและขดลวดต่อควบ ดังได้กล่าวแล้วในข้อ 2.5 เกี่ยวกับพฤติกรรมของหม้อแปลงทดสอบต่อแรงดันที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงมากเช่น แรงดันที่เกิดจากการวาบไฟตามผิวของวัสดุทดสอบ ดังนั้นการออกแบบเพื่อให้เกิดแรงดันแบ่งกระจายตามขดลวดค่อนข้างจะสม่ำเสมอขึ้นโดยการจัดให้ ค่ากะแปซิแตนซ์ระหว่างขดลวดแรงสูง (C'_S) มีค่าใกล้เคียงกันแต่ละชั้นของขดลวด โดยแบ่งการจัดลำดับของขดลวดแรงสูงเป็น 3 ชั้น ดังในรูปผนวก ก.1 ซึ่งอาศัยหลักการของปลอกฉนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์มาใช้ (จากข้อ 2.8) และการจะให้ได้ผลดียิ่งขึ้นในการกระจายแรงดันให้สม่ำเสมอตลอดขดลวดต้องจัดใส่ซิลิค์ทองแดงค้ำแรงสูง และค้ำล่างของแรงสูง (ระหว่างขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง เพื่อป้องกันการส่งผ่านแรงดันเล็รัจจากขดลวดแรงสูงเข้าสู่ขดลวดแรงต่ำโดยผ่านทางค่ากะแปซิแตนซ์ระหว่างขดลวดทั้งสอง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อขดลวดแรงต่ำได้) ซึ่งผลของซิลิค์ทองแดงของขดลวดแบบชั้นแสดงไว้ในรูปผนวก ก.๓



ก) ไม่มีชิลด์ทองแดง



ข) มีชิลด์ทองแดงบน



ค) มีชิลด์ทองแดงทั้งด้านบนและด้านล่าง

รูปผนวก ก.3 ผลของชิลด์ทองแดงที่มีต่อคลลวคขึ้นทรงกระบอกที่มีการจัดลำดับของขลลวค [26]

จากหลักการของป्लอกจนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์และรูปผนวก ก.1

$$\text{จะได้ } r_1 l_1 = r_2 l_2 = r_3 l_3$$

โดย r_1 เป็นรัศมีจากแกนของแกนแม่เหล็กด้านซ้ายจนถึงกึ่งกลางความหนาของขดลวดแรงสูงชั้นที่ 1

และ l_1 เป็นความกว้างของขดลวดแรงสูงชั้นที่ 1

ส่วน r_2, r_3 นิยามทำนองเดียวกับ r_1

l_2, l_3 นิยามทำนองเดียวกับ l_1

จากการออกแบบภาคตัดขวางแกนแม่เหล็กแบบสี่เหลี่ยมอัดในวงกลมในข้อ 3.3.4 และจากรูปผนวก ก.1 จะได้

$$r_1 = 10.825 \text{ cm}$$

$$r_2 = 12.815 \text{ cm}$$

$$r_3 = 14.135 \text{ cm}$$

$$\text{เนื่องจากขดลวดแรงต่ำกว้างรวม} \quad 24 \text{ cm}$$

ดังนั้น เลือกความกว้างของขดลวดแรงสูงชั้นที่ 1

$$l_1 = 20.4 \text{ cm}$$

เพื่อפקเตอร์ความปลอดภัยในการจนวน

$$\text{ส่วนซีลด์ทองแดงล่าง กว้าง} \quad 21.2 \text{ cm}$$

$$\text{ดังนั้น } r_1 l_1 = (10.825) \times (20.4) \text{ cm}$$

$$= 220.83$$

$$\text{ดังนั้น } l_2 = \frac{220.83}{r_2} = \frac{220.83}{12.815}$$

$$= 17.232 \text{ cm}$$

$$\text{ใช้ } l_2 = 16.0 \text{ cm}$$

เพื่อפקเตอร์ความปลอดภัยในการจนวน

$$l_3 = \frac{220.83}{r_3} = \frac{220.83}{14.135}$$

$$= 15.62 \text{ cm}$$

$$\text{ใช้ } l_3 = 14.5 \text{ cm}$$

เพื่อפקเตอร์ความปลอดภัยในการจนวน

จากข้อมูลในข้อ 3.3.2 ความหนาแน่นระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูง ใช้เมลิเนกซ์

หนา 0.75 mm 4 ชั้น

$$\begin{aligned} d &= 0.075 \times 4 \\ &= 0.3 \text{ mm} \\ &= 0.03 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แรงดันต่อรอบ} &= 110\sqrt{2} / 33,000 \text{ Vp} \\ &= 4.714 \text{ Vp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} &= (\text{แรงดันต่อรอบ}) \times 2 \times (\text{จำนวนรอบต่อชั้นของขดลวดแรงสูงชั้นที่หนึ่ง}) \\ &= 4.714 \times 2 \times 520 \\ &= 4.902 \text{ kVp} \end{aligned}$$

ประมาณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างชั้นของขดลวดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังนั้น
ความเครียดสนามไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกเนื้อเดียวล้วนระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned} E &= \frac{\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น}}{d} \\ &= \frac{4.902}{0.03} \text{ kVp/cm} \\ &= 163.4 \text{ kVp/cm} \end{aligned}$$

เนื่องจากบริเวณฉนวนระหว่างชั้นจะมีความหนาของฟิล์มเมลิเนกซ์เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น

$$E_{m_{PET}} \approx 163.4 \text{ kVp/cm}$$

แต่ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฟิล์มเมลิเนกซ์ $E_{C_{PET}}$ หนา 0.075 mm

เท่ากับ 226 kVp/mm

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } E_{m_{PET}} &< E_{C_{PET}} \\ 16.3 &< 226 \text{ kVp/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{m_{SF6}} &= 3.3 \times E_{m_{PET}} \\ &= 3.3 \times 163.4 \text{ kVp/cm} \\ &= 539.22 \text{ kVp/cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{C_{SF6}} &= 2.35 \times 87.8 \text{ kVp/cm} \\ &= 206.33 \text{ kVp/cm} \end{aligned}$$



แต่ค่า E_{iSF_6} จะสูงกว่า E_{CSF_6} เนื่องจากผลของระยะแกปบาง ๆ ของก๊าซ SF_6 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{iSF_6} กับ E_{CSF_6} ที่ระยะแกปฟิล์มบางสมมติของก๊าซ SF_6 ประมาณ 0.001 mm ดังนี้ [3]

$$E_{iSF_6} \approx 33.5 \times E_{CSF_6}$$

$$E_{iSF_6} \approx 6906.33 \text{ kVp/cm}$$

$$E_{mSF_6} < E_{iSF_6}$$

$$539.22 < 6906.33 \text{ kVp/cm}$$

ก. 3 การคำนวณขนาดการจนวนบริเวณ (3)

บริเวณ (3) เป็นบริเวณระหว่างขอบของซิลค์ทองแดงบนด้านแรงสูงซึ่งต้องเพิ่มรัศมีความโค้งของขอบเพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าลง โดยใช้เส้นลวดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่เพียงพอมาบัดกรีด้วยตะกั่วให้ติดที่ขอบทั้งสองข้างของซิลค์ทองแดงทรงกระบอกซึ่งใช้แผ่นทองแดงหนา 0.5 mm กว้าง 15.5 cm โดยเลือกให้คลุมขดลวดแรงสูงชั้นที่สามและขดลวดต่อควมพอดี และการหาขนาดของเส้นลวดทองแดงที่มาเชื่อมติดจะคำนวณจากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของก๊าซ SF_6 ไม่ให้เกินค่า E_{iSF_6} โดยอาศัยหลักการของการคำนวณขนาดการจนวนและรูปร่างของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการคำนวณดังกล่าวการคำนวณขนาดการจนวนบริเวณ (1) ซึ่งจะได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดงที่มาเชื่อมติดขอบเท่ากับ 6 mm โดยระยะ d_4 ในรูปผนวก ก.1 เท่ากับ 4.45 cm ส่วน d_5 จะมีระยะ 4.62 cm ซึ่งมากกว่า d_4 จึงไม่เป็นปัญหา

ก. 4 การคำนวณขนาดการจนวนบริเวณ (4)

บริเวณ (4) เป็นบริเวณระหว่างแผ่นซิลค์ทองแดงบนกับขอบของแกนแม่เหล็กและเหล็กแคลมป์ซึ่งมีลักษณะอิเล็กโทรดที่ให้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอโดยประมาณ ดังนั้นจะใช้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอในการคำนวณ

จากรูปผนวก ก.1 เลือกใช้

$$d_6 = 5.22 \text{ cm}$$

แรงดันสูงสุดระหว่างซีลด์ทองแดงบนกับแกนแม่เหล็กและเหล็กแคลมป์

$$= 110 \times \sqrt{2} \quad \text{kVp}$$

จะได้ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกเนื้อเดียวล้วน ๆ

$$E = \frac{110 \times \sqrt{2}}{5.22}$$

$$= 29.801 \quad \text{kVp/cm}$$

เนื่องจากบริเวณนี้มีชั้นฉนวนรวมของก๊าซ SF₆ มากพอควร ดังนั้นใช้แฟกเตอร์เพิ่มค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเท่ากับ 2 จะได้

$$E_{mSF_6} = 2 \times E$$

$$= 2 \times 29.801 = 59.602 \quad \text{kVp/cm}$$

และ

$$E_{mPET} = E_{mSF_6} \times \frac{\epsilon_{rSF_6}}{\epsilon_{rPET}}$$

$$= 59.602 \times \frac{1.0}{3.3}$$

$$= 18.061 \quad \text{kVp/cm}$$

ดังนั้น

$$E_{mSF_6} < E_{cSF_6} < E_{iSF_6}$$

$$59.602 \text{ kVp/cm} < 206.33 \text{ kVp/cm}$$

และ

$$E_{mPET} < E_{cPET}$$

$$18.061 \text{ kVp/cm} < 226 \text{ kVp/mm}$$

ภาคผนวก ข.

การหาค่าความหนาแน่นกระแสสำหรับการออกแบบขดลวด

ความหนาแน่นกระแสของขดลวดเป็นสิ่งสำคัญที่จะกำหนดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวด มีให้อุณหภูมิของขดลวดสูง เกินกว่าอุณหภูมิใช้งานสูงสุดของวัสดุฉนวนที่ใช้ในขดลวด การสูญเสียกำลังไฟฟ้าของขดลวดคือหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวระบายความร้อนของขดลวดเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด จากอุณหภูมิของก๊าซ SF₆ ส่วนอุณหภูมิเพิ่มของก๊าซ SF₆ จากอุณหภูมิห้องจะขึ้นกับการสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดคือพื้นที่ผิวระบายความร้อนของตัวถัง การเลือกใช้ค่าความหนาแน่นกระแสของขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำโดยวิธีลอง ให้ได้เงื่อนไขอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดของขดลวดจากอุณหภูมิห้องไม่เกิน 75°C และอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดของก๊าซคอนบนของตัวถังไม่เกิน 55°C ซึ่งได้ออกแบบไว้แล้ว ดังในข้อ 3.4 อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดจากอุณหภูมิของก๊าซ SF₆ กำหนดด้วยการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของขดลวด / พื้นที่ผิวระบายความร้อนของขดลวด

$$= 400 \quad \text{W/m}^2$$

ตามข้อ 2.6.3 ความดันก๊าซ SF₆ ที่ใช้สำหรับหม้อแปลงนี้เท่ากับ 2.35 kg/cm² abs

ข.1 ขดลวดแรงต่ำ

จากรูปที่ 3.2 และข้อมูลจากข้อ 3.3.1 เลือกความหนาแน่นกระแสของขดลวดแรงต่ำ

$$J_1 = 200 \quad \text{A/cm}^2$$

พื้นที่ผิวระบายความร้อนของขดลวดแรงต่ำ

$$= 2 \times (\ell_1 \times \text{ความกว้างของขดลวดแรงต่ำ})$$

โดย ℓ_1 = ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงต่ำ

$$= 0.4775 \quad \text{m}$$

$$\text{ความกว้างรวมของขดลวดแรงต่ำ} = 0.24 \quad \text{m}$$

ดังนั้นพื้นที่ผิวระบายความร้อนของขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} &\approx 2 \times (0.4775 \times 0.24) && \text{m}^2 \\ &= 0.2292 && \text{m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น การสูญเสียกำลังไฟฟ้าของขดลวดแรงต่ำ / พื้นที่ผิวระบายความร้อนของขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} &\approx \frac{70.55}{0.2292} \\ &= 307.81 && \text{W/m}^2 \end{aligned}$$

ซึ่งใช้ได้เนื่องจากกำหนดไว้ให้ต่ำกว่า 400 W/m^2

ข.2 ขดลวดแรงสูง

จากรูปที่ 3.2 และข้อมูลจากข้อ 3.3.2 เลือกความหนาแน่นกระแสของขดลวดแรงสูง

$$J_2 \approx 100 \quad \text{A/cm}^2$$

เนื่องจากขดลวดแรงสูงมีความหนาแน่นมากและมีฉนวนเคลือบอย่างมิดชิด ดังนั้น ความร้อนจะถ่ายเทได้ยากมาก จึงต้องระวังในการคำนวณค่าประมาณของอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดของขดลวดแรงสูง ซึ่งเป็นจุดที่ร้อนที่สุด

ค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดของขดลวดแรงสูงจากอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซ SF_6 ประมาณ 35°C [9]

ซึ่ง

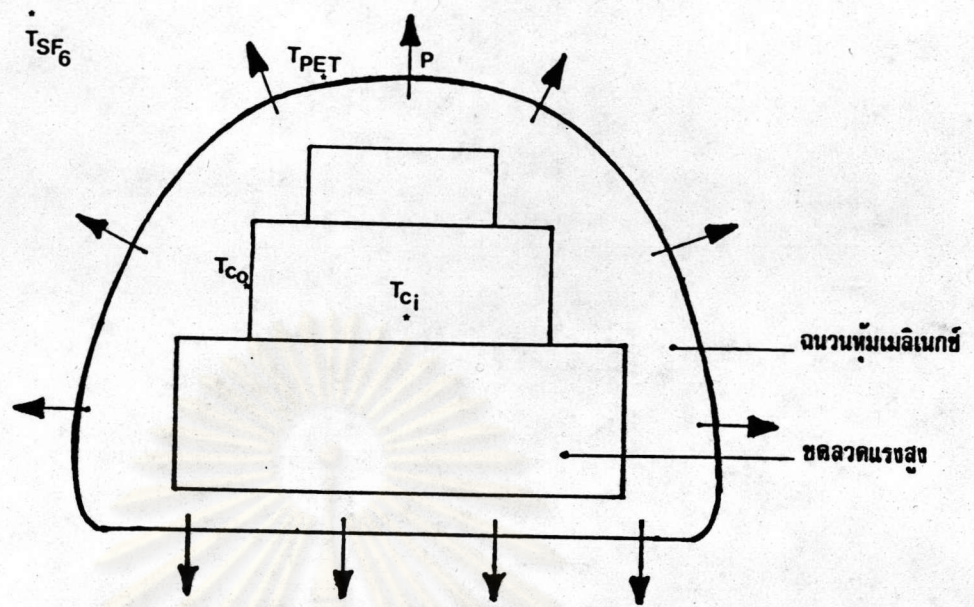
$$\begin{aligned} &= (T_{c_i} - T_{c_o}) + (T_{c_o} - T_{PET}) + (T_{PET} - T_{SF_6}) \\ &= T_{c_i} - T_{SF_6} \end{aligned}$$

เมื่อ T_{c_i} = อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดแรงสูงด้านใน

T_{c_o} = อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดแรงสูงด้านนอก

T_{PET} = อุณหภูมิเฉลี่ยของฉนวนพัน

T_{SF_6} = อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซ SF_6



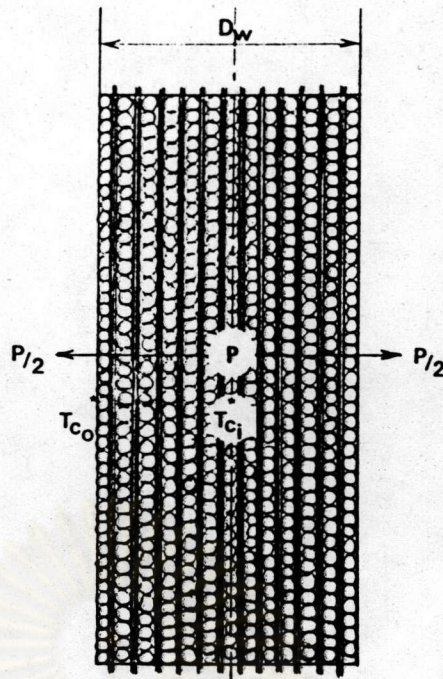
รูปผนวก ข.1 การหาอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดของขดลวดแรงสูงจากอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซ SF₆

ข.2.1 การคำนวณอุณหภูมิแตกต่างระหว่าง T_{c_i} กับ T_{c_o}

อุณหภูมิแตกต่างระหว่าง T_{c_i} กับ T_{c_o} คำนวณจากความสัมพันธ์ [21] (ดูรูปผนวก ข.2 ประกอบ)

$$T_{c_i} - T_{c_o} = \frac{D_w^2 \times J^2}{8 \times k_{res} \times \sigma}$$

- เมื่อ P = กำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวด (W)
- D = ความหนาของขดลวด (mm)
- σ = สภาพความนำไฟฟ้าของทองแดงที่ 75°C [12] = 46 m/Ω.mm²
- J = ความหนาแน่นกระแส (A/mm²)
- $k_{res} = \frac{D_w}{d_{PET}} \times k_{PET}$
- k_{PET} = สภาพนำความร้อนของ เมลิเนกซ์ [11] = 0.15 W/m. °C
- d_{PET} = ความหนารวมของฉนวนระหว่างชั้นทั้งหมด (mm)



รูปผนวก ข.2 การคำนวณอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของขดลวดค้ำใน T_{c_i} กับอุณหภูมิของขดลวดค้ำนอก T_{c_o}

เมื่อนำมา เปรียบ เทียบกับรูปที่ 3.2 สำหรับขดลวดแรงสูงแล้ว แทนค่า

$$D_w = 4.44 \times 10 = 44.4 \text{ mm}$$

(หากสมมติให้ขดลวดแรงสูงกว้าง เท่ากับชั้นที่หนึ่งโดยตลอด จะได้ความหนาของขดลวดแรงสูง เท่ากับ 4.44 cm ซึ่งจะมีจำนวนชั้นประมาณ 63 ชั้นๆ ละ 520 รอบ)

$$J_2 = 1,039 \text{ A/mm}$$

$$d_{PET} = \text{จำนวนชั้น} \times \text{ความหนาของ เมลิ เน็กซ์แต่ละชั้น}$$

ซึ่งเป็นฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูง

$$= 63 \times 0.3 = 18.9 \text{ mm}$$

ดังนั้น $k_{res} = \frac{44.4}{18.9} \times 0.15 = 0.3524 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

จะได้ $T_{c_i} - T_{c_o} = \frac{(44.4)^2 \times (1,039)^2}{8 \times 0.3524 \times 46}$

$$= 16.41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ข.2.2 การคำนวณอุณหภูมิแตกต่างระหว่าง T_{C_0} กับ T_{PET}

อุณหภูมิแตกต่างระหว่าง T_{C_0} กับ T_{PET} คำนวณจากความสัมพันธ์ [24]

$$T_{C_0} - T_{PET} = \frac{P \times d}{A \times k}$$

โดย P = กำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวด (W)

d = ความหนาเฉลี่ยของฉนวนหุ้ม เมลิเนกซ์ (m)

k = สภาพนำความร้อนของ เมลิเนกซ์ = 0.15 W/m. $^{\circ}$ C

A = พื้นที่ผิวภายนอกทั้งหมดของฉนวนหุ้ม (m 2)

เมื่อนำมา เปรียบ เทียบกับรูปที่ 3.2 และจากข้อมูลในข้อ 3.3.1 แทนค่า

$$P = 59,76 \quad W$$

$$d = \text{จำนวนชั้นของฉนวนทั้งหมด} \times \text{ความหนาของชั้นฉนวน}$$

$$= (35 + 22 + 16) \times 0.3$$

$$= 21,9 \quad \text{mm}$$

$$= 0,0219 \quad \text{m}$$

โดยการประมาณพื้นที่ผิวของขดลวดแรงสูง เป็นรูปท่อทรงกระบอก ดังในรูปผนวก ข.3

โดยขนาดของตัวเลข เป็นค่าโดยประมาณ

จากรูปผนวก ข.3 ประมาณค่าพื้นที่ผิวของฉนวนหุ้มขดลวดแรงสูง

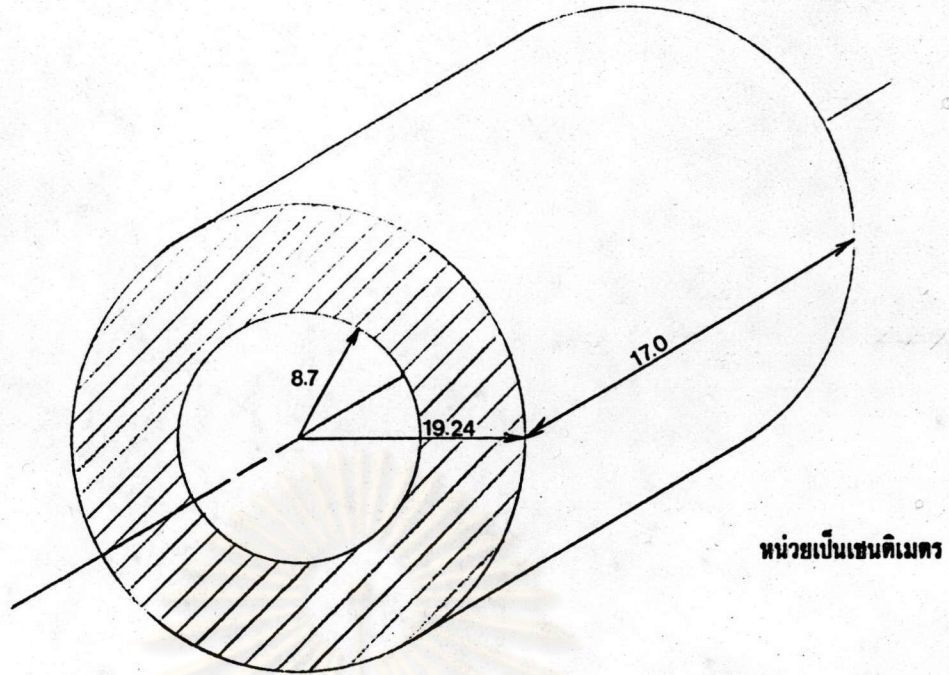
$$A_{PET} = 2\pi(19,24^2 - 8,7^2) + 2\pi(19,24)(17)$$

$$+ 2\pi(8,7)(17)$$

$$= 1850,32 + 2055,10 + 929,28$$

$$= 4834,703 \quad \text{cm}^2$$

$$= 0,4834 \quad \text{m}^2$$



รูปผนวก ข.3 การคำนวณหาพื้นที่ผิวโดยประมาณของฉนวนหุ้มขดลวดแรงสูง

จะได้

$$T_{C_o} - T_{PET} = \frac{59.76 \times 0.0219}{0.4834 \times 0.15}$$

$$= 18.05 \quad ^\circ C$$

ข.2,3 การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของผิวฉนวนเมลิเนกซ์จากอุณหภูมิของก๊าซ SF₆

อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของ T_{PET} จาก T_{SF₆} ทาจากความสัมพันธ์ [9]

$$T_{PET} - T_{SF_6} = \frac{P}{h_{SF_6} \times A_{PET}}$$

โดย P = กำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวด

A_{PET} = พื้นที่ผิวภายนอกทั้งหมดของฉนวนหุ้ม = 0.4834 m²

h_{SF₆} = สัมประสิทธิ์การระบายความร้อนของก๊าซ SF₆ โดยประมาณ [6]
= 40 (W/m²·°C)

แทนค่า

P = 59.76 W

A_{PET} = 0.4834 m²

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad T_{\text{PET}} - T_{\text{SF}_6} &= \frac{59.76}{40 \times 0.4834} \\ &= 3.09 \quad ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ดังนั้น อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดของขดลวดแรงสูง T_{C_i} จากอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซ SF_6

$$\begin{aligned} T_{\text{SF}_6} &= (T_{C_i} - T_{C_o}) + (T_{C_o} - T_{\text{PET}}) \\ &\quad + (T_{\text{PET}} - T_{\text{SF}_6}) \\ &= 16.41 + 18.05 + 3.09 \\ &= 37.55 \quad ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดไว้ คือ 35°C จะเห็นว่ามากกว่าเล็กน้อย ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยจึงเลือกใช้ลวดอาน้ำยา PEW ซึ่งเป็นฉนวนในชั้น B (อุณหภูมิเพิ่ม 80°C) แทนลวดที่ใช้ฉนวนในชั้น E (อุณหภูมิเพิ่ม 75°C) ตามที่ได้ออกแบบเอาไว้

ส่วนการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงสูงจากอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซ SF_6 กรณีคือชั้นบันไดก็คิดทำนองเดียวกัน แต่จะใช้กำลังไฟฟ้าสูญเสีย P เท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของขดลวดแรงสูงกับขดลวดค้ำควม ซึ่งจากการคำนวณในข้อ 3.3.3 มีค่าเท่ากับ 86.64 W

ศูนย์วิทยพัชยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายมนตรี ไทยมานะ เกิดที่อำเภอ สวรรคโลก จังหวัด สุโขทัย เมื่อวันที่ 9 พฤศจิกายน 2505 จบการศึกษาระดับอุดมศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปีการศึกษา 2526 ปัจจุบัน เป็นเจ้าหน้าที่หน่วยทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยพัชร์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย