บทที่ 3
การออกแบบสร้างหม้อแปลงสอบ

การออกแบบหม้อแปลงจากจะเริ่มต้นด้วยการหาค่าขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก จากนั้นจะออกแบบขดลวด และขนาดฉนวน เมื่อได้ขนาดของขดลวดแล้วจะคำนวณค่าแรงดันลัดวงจร และค่าความคงทนต่อแรงทางกลที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจร ว่าเป็นไปตามค่ากำหนดหรือไม่ ถ้าไม่ได้จะไปเริ่มต้นหาค่าพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กใหม่ และคำนวณค่าต่างๆ ตามข้างต้นใหม่จนกว่าจะเป็นไปตามค่ากำหนดตามรูปที่ 2.8 ขั้นที่ 2 จะทำการออกแบบตัวถังจะต้องมีพื้นที่พอที่สามารถระบายความร้อนจากกำลังสูญเสียของหม้อแปลง และรับแรงทางกลอันเกิดจากน้ำหนักของหม้อแปลง จากนั้นจะทำการออกแบบชีลด์เกลี่ยแรงดันภายนอกปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดดีสชาร์จบางส่วนภายนอก ได้แก่การเกิดโคโรนา (Corona discharge) และการเกิดดีสชาร์จบางส่วนตามผิว (Surface discharge)

จากขนาดพิกัดต่างๆ ของหม้อแปลงทดสอบทำให้เราสามารถคำนวนหาขนาดของส่วนประกอบต่างๆ ของหม้อแปลงได้ดังนี้

3.1. แกนเหล็ก

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบตัวนี้ เลือกรูปหน้าตัดของแกนเหล็กแบบ 2 ขั้นเนื่องจากสร้างเพียงตัวเดียวการออกแบบหลายขั้นจะเป็นการยากแก่การประกอบสร้างโดยไม่จำเป็น จากสมการที่ 2.30 เราเลือกพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก และขนาดต่างของแกนเหล็กตามตารางที่ 3.1

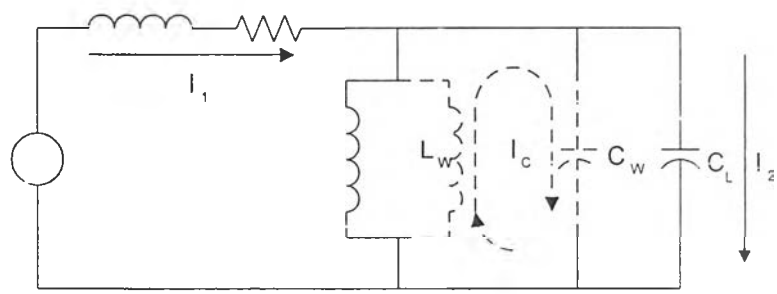
ตารางที่ 3.1 ขนาดและลักษณะของแกนเหล็ก

พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กตามรูปทรงเรขาคณิต	588 cm^2
เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กที่จะนำขดลวดมาพัน	320 mm
พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กจริง	500 cm^2
ความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็ก	3.52 m
ปริมาตรของแกนเหล็ก	0.215 mm^3
มวลของแกนเหล็ก	$7.6*10^3*215$ = 1634 kg
ชนิดวัสดุของแกนเหล็ก	M 4X
ความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น	0.27 mm
การวางแผ่นเหล็ก	2 ทับ 2

รอบของขดลวดแรงต่ำ 32 รอบ หรือ 64 รอบ จากข้อมูลตามตารางที่ 3.1 จะหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้ คือ

$$B = \frac{U_1 \times 10^4}{4.44 f N A_{FE}} = \frac{500 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 32 \times 500} = 1.41 \quad T$$

การตัดแผ่นเหล็กจะตัดแบบมุมฉากแม้จะมีความกว้างของช่องอากาศมากกว่า และความสะดวกในการไหลของฟลักซ์แม่เหล็กน้อยกว่าการตัดแผ่นเหล็กแบบ 45° เนื่องจากต้องการเพิ่มกระแสทำแม่เหล็กเพื่อชดเชยกระแสที่ต้องจ่ายให้กับขดลวดที่มีค่าความจุไฟฟ้าสูงดังวงจรสมมูลในรูปที่ 3.1 โดยกระแสจ่ายเข้าจะใกล้เคียงกับกระแสจ่ายออกที่เทียบกับฝั่งขดลวดเดียวกัน ทำให้เสียกำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายโหลดให้กับโหลดตัวเก็บประจุอันเกิดจากขดลวดของหม้อแปลงน้อยลง สามารถจ่ายกำลังให้แก่วัสดุทดสอบได้มากขึ้น



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบซึ่งขดลวดมีลักษณะของตัวเก็บประจุ

การวางแผ่นเหล็กทีละ 2 แผ่นเกยสลับทับ 2 แผ่นเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด เนื่องจากวางเรียงแผ่นเหล็กและประกอบสร้างได้ง่าย แม้จะมีความกว้างช่องอากาศเพิ่มขึ้นกว่ากว่าการวางแผ่นเหล็กแบบ 1 แผ่นเกยสลับทับ 1 แผ่น

สลักเกลียวที่ยึดติดแกนเหล็กจะต้องหุ้มวัสดุฉนวน แผ่นหล็กที่ที่นำมาหนีบเหล็กและแกนเหล็กจะต้องต่อลงดินที่จุดเดียวเพื่อกันการเกิดวงรอบทางไฟฟ้า

3.2. ขดลวดแรงต่ำ

เพื่อให้สามารถเลือกระดับแรงดันได้ 2 ค่า คือ 500 V หรือ 1000 V จึงแบ่งขดลวดแรงต่ำออกเป็น 2 ชุด โดยเลือกการต่อขนานหรือต่ออนุกรม ขดลวดแต่ละชุดจะมีระดับแรงดันที่กำหนด 500 V ที่กระแส 600 A ที่การใช้งานต่อเนื่อง หรือกระแส 800 A ที่การใช้งาน 15 นาที

ขดลวดแรงต่ำจะแบ่งเป็น 4 ขด แต่ละขดประกอบด้วยตัวนำ 4 เส้น ขนานกัน โดยแบ่งเป็น 2 ชุด แต่ละชุดมีขดลวด 2 ขดต่อขนานกัน ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของตัวนำแต่ละเส้นมีค่า 4×10 mm^2 หุ้มด้วยกระดาษฉนวนหนา 0.6 mm ทำให้ตัวนำที่หุ้มด้วยกระดาษฉนวนมีขนาด 11.2×5.2 mm^2 ฉะนั้นจะได้ค่ากำหนดต่างๆดังนี้

ตารางที่ 3.2 ขนาดและพิกัดของขดลวดแรงดันต่ำ

รายการ	การต่อขนาน	การต่ออนุกรม
อัตราส่วนแรงดันเทียบกับขดลวดแรงสูง	500/300,000 V	1,000/300,000 V
กระแสขาเข้าในการใช้งานต่อเนื่อง	600 A	300 A
กระแสขาเข้าในการใช้งาน 15 นาที	800 A	400 A
พื้นที่หน้าตัดรวมของขดลวดทองแดง	2*320 mm^2	320 mm^2
ความหนาแน่นกระแสที่การใช้งานต่อเนื่อง	0.94 A/mm^2	0.94 A/mm^2
ความหนาแน่นกระแสที่การใช้งาน 15 นาที	1.25 A/mm^2	1.25 A/mm^2
กำลังไฟฟ้าในการใช้งานต่อเนื่อง	300 kVA	300 kVA
กำลังไฟฟ้าในการใช้งาน 15 นาที	400 kVA	400 kVA

การจัดเรียงขดลวดทั้ง 4 ชุดจะเว้นช่องน้ำมันระบายความร้อนประมาณ 10 mmการเชื่อมต่อขดลวดจะพยายามใช้การเชื่อมเป็นหลักเพื่อความแข็งแรงและมีความต้านทานบริเวณรอยต่อน้อยที่สุด

ขนาดของขดลวดแรงต่ำรวมฉนวน คือ $\phi(320/464)\times 880\ mm^3$ ที่ปลายสายตัวนำจะยาว 500 mm เพื่อใช้ประโยชน์ในการเชื่อมต่อไปยังขั้วรับแรงดันเข้าของหม้อแปลง

3.3. ขดลวดแรงสูง

ความเครียดสนามไฟฟ้าของขดลวดแรงสูงจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของขดลวดแรงสูง ดังนั้นการออกแบบและประกอบสร้างจะต้องให้ได้ขนาดที่แม่นยำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ขดลวดจะต้องพันบนฉนวนที่แข็งแรงที่ทำจากกระดาษอัดพันเป็นทรงกระบอก เนื่องจากต้องรับแรงทางกลและแรงทางไฟฟ้า

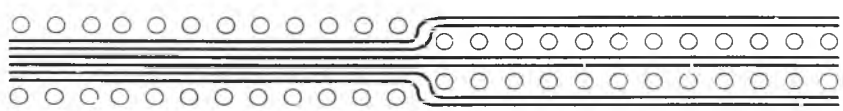
ระหว่างขดลวดแรงต่ำกับฉนวนทรงกระบอกจะมีช่องน้ำมันเพื่อใช้ในการระบายความร้อนและเผื่อระยะผิดพลาด ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทรงกระบอกจะเป็น 464+20 = 484 mm โดยที่ความหนาของฉนวนทรงกระบอกเป็น 8 mmซึ่งจะได้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของทรงกระบอกฉนวนเป็น $\phi 484\times 870\ mm^2$ โดยมีระยะห่างตามแนวยาวระหว่างฉนวนทรงกระบอกกับแกนเหล็กเป็น 5 mm เพื่อวางชีลด์บนขอบของแกนเหล็กและเพื่อชดเชยความผิดพลาด และบนฉนวนทรงกระบอกจะพันรอบด้วยอิเล็กโทรสแตติกชีลด์ ที่ทำมาจากแผ่นทองแดงหนา 0.1 mm เพื่อกันคลื่นจรที่วิ่งข้ามจากขดลวดแรงสูงมาสู่ขดลวดแรงต่ำ จากนั้นทำการพันกระดาษฉนวนหนาแผ่นละ 0.12 mm 3 รอบ ทำให้อิเล็กโทรสแตติกชีลด์มีความหนาประมาณ 1 mm เพื่อให้สามารถทนแรงดันระหว่างอิเล็กโทรสแตติกชีลด์ที่ต่อลงดิน กับขดลวดแรงสูงชั้นแรกได้ และต้องระวังการต่อลัดวงจรของอิเล็กโทรสแตติกชีลด์

จำนวนขดลวดแรงสูงจะคำนวณจากอัตราส่วนแรงดัน และจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ

โดยจำนวนขดลวดแรงสูงจะเป็น $\frac{300,000}{500} \times 32 = 19,200$ รอบ

ตัวนำทองแดงมีเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นละ 0.8 mm 2 เส้นมีพื้นที่หน้าตัด 2*0.5 = 1 mm^2 ซึ่งจะได้ความหนาแน่นกระแส 1 A/mm^2 ที่การทำงานต่อเนื่อง 300 kVA และความหนาแน่นกระแส 1.33 A/mm^2 ที่การทำงาน 15 นาที กำลังงาน 400 kVA ขดลวดแรงสูงจะทำการพันแบบทีละครึ่งชั้นซึ่งจะทำให้ความสูงของขดลวดลดลงเป็นการประหยัดแกนเหล็ก ค่าแรงดันลัดวงจรลดลง

การพันขดลวดจะทำการพันครึ่งชั้นสลับกับการพันฉนวนแทรกตามรูปที่ 3.2 เพื่อลดขนาดของรัศมีของขดลวดทำให้ค่าแรงดันลัดวงจรลดลง และใช้ฉนวนน้อยลง



รูปที่ 3.2 การฉนวนในขดลวดแรงสูง

3.4. ขดลวดต่อควบ

ขดลวดต่อควบทำหน้าที่ส่งต่อพลังงานจากตัวล่างไปสู่หม้อแปลงตัวบนถัดไป เพื่อการต่อหม้อแปลงแบบขั้นบันได แรงดันขาออก คือ ผลรวมแรงดันขาออกของหม้อแปลงแต่ละตัวจะถูกกำหนดด้วยค่าแรงดันลัดวงจรซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดขดลวดและค่าความจุไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

ขดลวดต่อควบต่ออยู่บนขดลวดแรงดันสูงและอยู่ระหว่าง Grading Ring ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 mm ขดลวดต่อควบจะมีความยาวตามแนวความยาวของทรงกระบอก 580 mm การส่งผ่านกำลังจะเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังที่จ่ายเข้าทางขดลวดแรงต่ำ คือ 300 kVA สำหรับใช้งาน 15 นาที หรือ 200 kVA สำหรับทำงานต่อเนื่อง

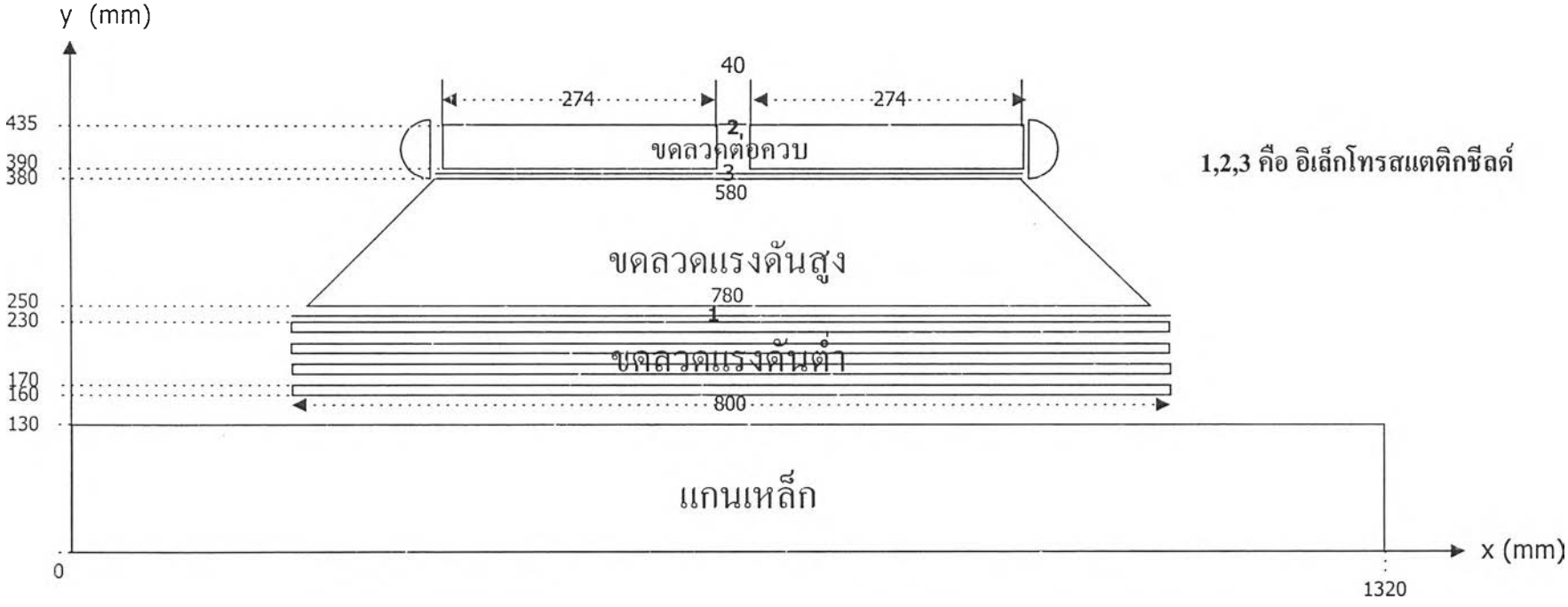
ขดลวดต่อควบจะแบ่งเป็น 2 ส่วนแต่ละส่วนมีขดลวด 2 ชุด แต่ละชุดมีจำนวนรอบขดลวด 32 รอบที่จัดแบ่งเป็น 2 ส่วนเนื่องจากจำเป็นต้องนำสายตัวนำผ่านออกทางปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า ซึ่งอยู่ตรงกลางตัวถังหม้อแปลง โดยจะเว้นระยะห่างจากขดลวดทั้ง 2 ขดอย่างน้อย 30 mm ขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดตัวนำ 1 เส้น คือ 8×4 mm^2 โดยใช้ 3 เส้นต่อขนานกัน แต่ละเส้นจะพันด้วยกระดาษฉนวนทำให้มีขนาดรวมฉนวนเป็น 9.2×5.2 mm^2 จะทำการพันขดลวดนี้ชั้นละ 8 รอบ ทั้งหมด 2 ชั้นต่อ 1 ขดลวด การนำขดลวดต่อขนานกันในแต่ละชุดจะทำให้มีพื้นที่หน้าตัดรวม $A_{CU} = 6 \times 8 \times 4 = 192$ mm^2 มีจำนวนเส้นลวดตัวนำทั้งหมด $2 \times 2 \times 3 \times 2 = 24$ เส้นที่จะนำลอดผ่านออกทางปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า และจะมีค่ากำหนดตามตารางที่3.3

ตารางที่ 3.3 ขนาดและพิกัดของขดลวดต่อควบ

รายการ	การต่อขนาน	การต่ออนุกรม
อัตราส่วนแรงดันเทียบกับขดลวดแรงสูง	500/300,000 V	1,000/300,000 V
กระแสขาเข้าในการใช้งานต่อเนื่อง	400 A	200 A
กระแสขาเข้าในการใช้งาน 15 นาที	600 A	300 A
พื้นที่หน้าตัดรวมของขดลวดทองแดง	2*192 mm^2	192 mm^2
ความหนาแน่นกระแสที่การใช้งานต่อเนื่อง	1.04 A/mm^2	1.04 A/mm^2
ความหนาแน่นกระแสที่การใช้งาน 15 นาที	1.54 A/mm^2	1.54 A/mm^2
กำลังไฟฟ้าในการใช้งานต่อเนื่อง	200 kVA	200 kVA
กำลังไฟฟ้าในการใช้งาน 15 นาที	300 kVA	300 kVA

ความสูงของขดลวดต่อควบ คือ $2 \times 4 \times 5.2 = 42$ mm ซึ่งไม่ควรสูงเกินเส้นผ่านศูนย์กลางของชีลด์เกลี่ยแรงดันของขดลวดแรงสูง คือ 45 mm ความยาวของขดลวดแต่ละส่วน คือ $(8+1) \times 3 \times 9.2 \times 1.1 = 275$ mm จะมีระยะห่างระหว่างขดลวด 580-550 = 30 mm โดยให้ความยาวของสายตัวนำหลังจากพันขดลวดเสร็จประมาณ 2 m เพื่อสอดผ่านไปทางปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

จากการออกแบบ ทำให้ได้ขนาดของ ขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงสูง และขดลวดต่อควบ ที่ประกอบกับแกนเหล็ก ดังรูปที่ 3.3



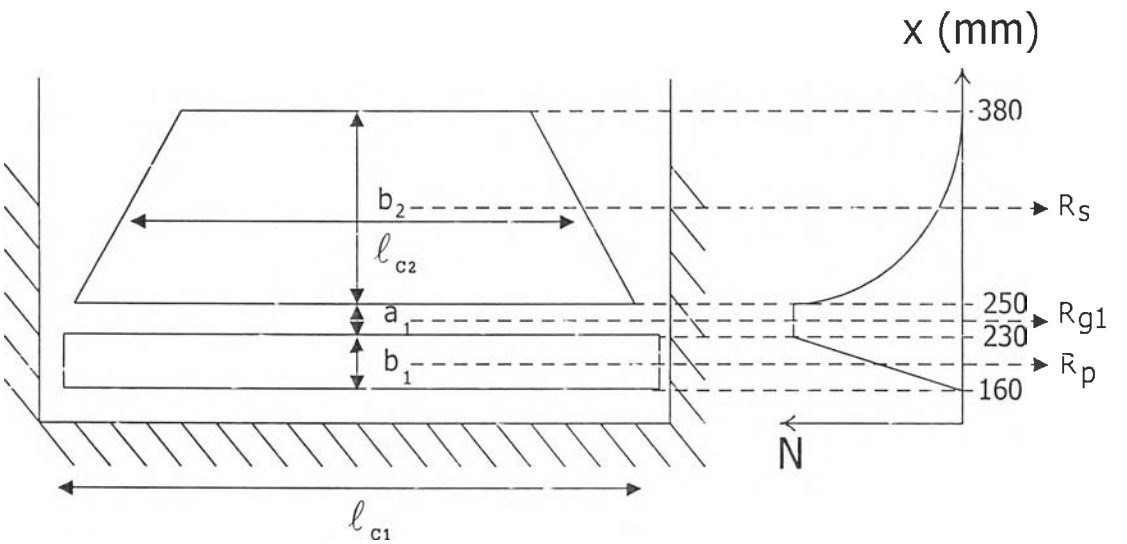
รูปที่ 3.3 ขนาดของขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลง

3.5 การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำรั่วและแรงทางกลของขดลวด

หลังจากออกแบบได้ขนาดของขดลวดแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะต้องคำนวณค่าความเหนี่ยวนำรั่วซึ่งจะต้องเป็นไปตามค่ากำหนด และแรงฆา ลที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจรจะต้องไม่ทำให้ขดลวดเกิดการฉีกขาดหรือเกิดการเลื่อนซึ่งจะเป็นผลให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปและเป็นผลให้เกิดการดีสชาร์จบางส่วนขึ้นได้

3.5.1 ค่าความเหนี่ยวนำรั่วในหม้อแปลง

การทดสอบลูกถ้วยฉนวนสภาวะเปรอะเปื้อนจำเป็นต้องอาศัยหม้อแปลงที่มีกระแสลัดวงจรสูง ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำรั่วจะมีผลต่อกระแสลัดวงจรของหม้อแปลง โดยค่าความเหนี่ยวนำรั่วของหม้อแปลงสามารถคำนวณได้ตามสมการ ประกอบกับรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะการจัดวางขดลวดแรงสูง ขดลวดแรงต่ำและขดลวดต่อควบและแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำรั่วและแรงทางกล

จากสมการ 2.41 จัดรูปใหม่จะหาค่าความเหนี่ยวนำรั่วของขดลวดแรงต่ำตามสมการ

$$L_1 = \mu_0 N_1^2 \times \frac{2\pi \times R_{p1} \times (\frac{b1}{3})}{\ell_{c1}} \qquad (3.1)$$

โดยที่ b_1 คือ ความสูงของขดลวดแรงต่ำ (m)

a_1 คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงต่ำ (m)

b_2 คือ ความสูงของขดลวดแรงสูง (m)

ℓ_{C1} คือ ค่าเฉลี่ยความยาวทรงกระบอกของขดลวดแรงต่ำ (m)

ℓ_{C2} คือ ค่าเฉลี่ยความยาวทรงกระบอกของขดลวดแรงสูง (m)

R_P คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวดแรงต่ำ (m)

R_S คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวดแรงสูง (m)

R_{g1} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกปน้ำมัน (m)

N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดแรงสูง

N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ

ขนาดจริงของขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูงเป็นดังนี้

b_1 = 0.07m

b_2 = 0.13 m

a_1 = 0.01 m

ℓ_{C1} = 0.80 m

ℓ_{C2} = $\frac{(0.78 + 0.58)}{2} = 0.68$ m

R_p = 0.195 m

R_s = 0.315 m

N_1 = 32 รอบ

N_2 = 19200 รอบ

$$L_1 = 463.25 \times \frac{2\pi \times 0.195 \times (\frac{0.7}{3})}{0.88} = 15.05 \quad H$$

ค่าความเหนี่ยวนำรั่วของขดลวดแรงสูงคำนวณจากสมการ (4) L_2 = 40.65 H

ค่าความเหนี่ยวนำรั่วของช่องน้ำมัน L_g = 15.86 H

ค่าความเหนี่ยวนำรั่วรวม L_t = 15.05+40.65+15.86 = 71.56 H

คิดเป็นค่าความเหนี่ยวนำรั่ว X_L = $2\pi f \times L_t$ = 314*71.56 = $22.47*10^3$ Ω

คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันลัดวงจรของขดลวด

$$\varepsilon_x = \frac{X_L}{(\frac{U_{2n}}{I_{2n}})} = \frac{22.47 \times 10^3}{(\frac{300 \times 10^3}{1})} = 7.49\%$$

I20438552

3.5.2 การคำนวณแรงทางกลในแนวรัศมี

เมื่อคิดเส้นแรงแม่เหล็กเฉพาะในแนวแกนของขดลวดจะสามมารถคำนวณแรงในแนวรัศมีของขดลวดได้ดังสมการ 2.49

จากสมการ 2.49 และขนาดของขดลวดสามารถคำนวณแรงในแนวรัศมีได้

$$F_v = \frac{4\pi\times10^{-7}\times\left(19200\times25\times1.33\times\left(\frac{100}{7}\right)\right)^2\times2\pi\times0.315}{2\pi\times0.88} = 3.76\times10^5 \text{ N}$$

พื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงสูงทั้งหมด คือ $19200\times1\times2 = 38400 \text{ mm}^2$

(พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดขอขดลวดแรงสูง คือ 1 mm^2)

ความเครียดทางกลของขดลวดแรงสูง คือ $\frac{3.76\times10^5}{38400} = 9.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ [7]

ค่าความเครียดของขดลวดทองแดงที่ยอมรับได้ คือ $54 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยถึง 5.5 เท่า เมื่อยังไม่ได้คิดค่าความคงทนต่อแรงทางกลของกระดาษฉนวน

3.6 การตรวจสอบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

หลังจากคำนวณจำนวนรอบและขนาดของขดลวดแล้ว ขดลวดที่ออกแบบจำเป็นต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนต่างๆ ของขดลวดต้องมีค่าไม่เกินค่าวิกฤติของการเกิดการดีสชาร์จบางส่วนภายใน เพื่อให้ทราบความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ที่ส่วนต่างๆ ขดลวดจำเป็นต้องจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Maxwell ของบริษัท Ansoft ซึ่งใช้หลักการของไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite element) ในการคำนวณ การจำลองแบบนั้นจะพิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้าเป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนบริเวณรอบๆของขดลวดแรงสูง และ บริเวณภายในและภายนอกของปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า ผลการจำลองแบบเป็นไปตามรูปที่ ก.1-ก.45

3.6.1 การวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าของบริเวณรอบขดลวดแรงดันสูง

ผลจากการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในภาคผนวก ก. โดยพิจารณารูปที่ ก.1 การออกแบบฉนวนควรมีลักษณะเป็นไปตามเส้นสมศักย์ เพื่อไม่เกิดการดีสชาร์จตามผิวของฉนวนที่ล้อมรอบขดลวดแรงสูง และค่าขนาดความเครียดสนามไฟฟ้า และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวฉนวนที่คาดว่าจะออกแบบ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของขดลวดแรงสูงประมาณ 10 kV/mm เมื่อพิจารณาค่าคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของแกปน้ำมันใน รูปที่ 2.14 ทำให้ทราบว่าช่องแกปน้ำมันที่ใกล้ขดลวดขนาดควรไม่เกิน 3 mm

3.6.2 การวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าของบริเวณภายในและภายนอกปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

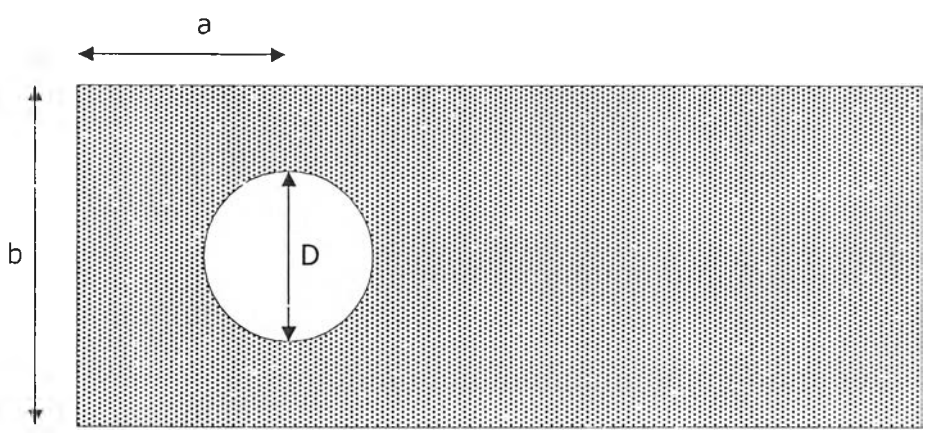
เมื่อพิจารณาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดค่าแรงดันสูงสุดเป็น 360 kV ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดภายนอกบริเวณฐานของปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า ตามเส้นที่ 1 รูปที่ ก.40 และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดภายนอกบริเวณวงแหวนเกลี่ยแรงดันตามเส้นที่ 10 รูปที่ ก.45 มีค่าต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดวิกฤตก่อนเกิดการดีสชาร์จบางส่วนในอากาศ (1.7 kV/mm) [5]

3.7. การออกแบบฉนวนขดลวดแรงสูง

ฉนวนหลักของขดลวดแรงสูงจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1) การฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูง จะใช้กระดาษฉนวนที่มีจุดอีพอกซีกระจายอยู่บนกระดาษฉนวนที่เรียกว่า กระดาษเทอร์โมพอกซ์ และเมื่อพันขดลวดในแต่ละชั้นเสร็จจะใช้กระดาษฉนวนพันบริเวณปลายที่มีความกว้างเพียงเล็กน้อยที่ติดพันรอบประมาณ 4-5 รอบบริเวณปลายสุดของชั้นขดลวดเพื่อทำหน้าที่กั้นไม่ให้ขดลวดเลื่อนออก

2) การฉนวนระหว่างขดลวดกับกราวด์ จะประกอบด้วยแผ่นทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ดม้วนเป็นทรงกระบอก (Axial washer) ขั้นด้วยแท่งฉนวน กระดาษฉนวนรูปคลื่น (Corrugated board) และแผ่นฉนวนรูปวงแหวนเพื่อพยุงโครงสร้างและลดขนาดของแกปน้ำมัน โดยทำการตัดทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ดตามรูปที่ 3.4 ซึ่งขนาดทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ดเป็นไปตามตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.5 ลักษณะการตัดของทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ด

ตารางที่ 3.4 ขนาดของทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ด

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเมื่อม้วนเป็นทรงกระบอก (mm)	ความยาว (b) (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะ (D) (mm)	ระยะจากจุดศูนย์กลางของรูกับปลายกระดาษ (a) (mm)
1	886/890	668	174	600
2	902/906	687	174	800
3	916/920	706	160	1000
4	932/936	725	180	1200
5	960/964	752	200	1400
6	988/992	780	230	1600
7	1016/1020	809	260	1800
8	1044/1048	837	290	2000
9	1072/1076	866	320	2200
10	1092/1096	880	340	2400

3.8. การออกแบบตัวนำแผ่นราบ

ตัวนำแผ่นราบจะต้องมีขนาดที่ครอบคลุมขดลวด และฉนวนของขดลวดแรงสูงและขดลวดต่อควบ เพื่อให้เส้นสมศักย์วนรอบโค้งไปตามลักษณะฉนวน และแก้ปัญหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนบนผิวของฉนวน และที่ขอบของตัวนำแผ่นราบจะมีลักษณะโค้งเพื่อลดขอบคมที่มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ดังรูปที่ ง.3 การวางตัวนำแผ่นราบทั้ง 2 แผ่น ควรวางให้เสมอกับขอบของแกนเหล็กทั้ง 2 ข้าง เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณขอบทั้ง 2 ด้านของแกนเหล็ก

ตัวนำแผ่นราบนี้จะอยู่ใกล้ขดลวดแรงสูงทำให้มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จำเป็นที่จะต้องมีฉนวนหุ้มเพื่อลดการเกิดดีสชาร์จบางส่วนบนพื้นผิวของตัวนำแผ่นราบ จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเส้นกราฟความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขนาดแกปน้ำมันขนาดต่างๆในรูปที่ 2.14 สามารถหาความหนาของฉนวนได้ประมาณ 0.3 mm ค่าความหนาของฉนวนขนาดนี้เราเลือกใช้การทาสีหลายชั้นเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการได้

3.9 การคำนวณค่ากำลังสูญเสีย

กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพ และอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด ซึ่งจะต้องนำไปใช้ในการออกแบบตัวถังเหล็กของหม้อแปลง จากสมการที่ 2.52 สามารถคำนวณความต้านทานและกำลังสูญเสียในขดลวดได้ดังนี้

3.9.1 ขดลวดแรงต่ำ

ขดลวดแรงต่ำจะประกอบด้วยขวดลวดสองชุด สำหรับไว้เลือกในการต่ออนุกรมหรือต่อขนานเพื่อใช้ในการเลือกระดับแรงดันสูงสุดเป็น 500 V หรือ 1000 V

3.9.1.1 ขดลวดแรงต่ำชุดที่ 1

R_{av} = (0.205+0.165)/2 = 0.185 mm

N = 32 รอบ

A_{CU} = $2\times4\times39.1$ = 312.8 mm^2

(ขดลวดขนาด 4*10 mm^2 จะมีพื้นที่หน้าตัดขดลวดจริง 39.1 mm^2 และ ρ ที่อุณหภูมิ 75°C = $0.02097*10^{-6}$ Ωm)

ความต้านทานขดลวด = $\frac{0.02097\times10^{-6}\times2\pi\times0.185\times32}{312.8\times10^{-6}}$ = 2.49 mΩ

กำลังสูญเสียในขดลวดขณะที่หม้อแปลงทำงานที่กำลังไฟฟ้า 300 kVA

$P_{CU1\,1} = 300^2\times(2.49\times10^{-3}) = 224.1$ W

กำลังสูญเสียในขดลวดขณะที่หม้อแปลงทำงานที่กำลังไฟฟ้า 400 kVA

$P_{CU1\,1} = 400^2\times(2.49\times10^{-3}) = 398.4$ W

3.9.1.2 ขดลวดแรงต่ำชุดที่ 2

R_{av} = (0.225+0.185)/2 = 0.205 mm

N = 32 รอบ

A_{CU} = $2\times4\times39.1$ = 312.8 mm^2

ความต้านทานขดลวด = $\frac{0.02097\times10^{-6}\times2\pi\times0.205\times32}{312.8\times10^{-6}}$ = 2.76 mΩ

กำลังสูญเสียในขดลวดขณะที่หม้อแปลงทำงานที่กำลังไฟฟ้า 300 kVA

$P_{CU1\,2} = 300^2\times(2.76\times10^{-3}) = 248.4$ W

กำลังสูญเสียในขดลวดขณะที่หม้อแปลงทำงานที่กำลังไฟฟ้า 400 kVA

$P_{CU1\,2} = 400^2\times(2.76\times10^{-3}) = 441.6$ W

3.9.2 ขดลวดแรงสูง

R_{av} = 0.315 mm

N = 19,200 รอบ

A_{CU} = $2*\pi(0.8)^2/4$ = 1 mm^2

ความต้านทานขดลวด = $\frac{0.02097\times10^{-6}\times2\pi\times0.315\times19200}{1\times10^{-6}}$ = 796.87 Ω

กำลังสูญเสียในขดลวดขณะที่หม้อแปลงทำงานที่กำลังไฟฟ้า 300 kVA

$$P_{CU1\,1} = 1^2 \times (796.87) = 796.87 \text{ W}$$

กำลังสูญเสียในขดลวดขณะที่หม้อแปลงทำงานที่กำลังไฟฟ้า 400 kVA

$$P_{CU1\,1} = 1.33^2 \times (796.87) = 1416.66 \text{ W}$$

กำลังสูญเสียในขดลวดขณะที่หม้อแปลงทำงานที่กำลังไฟฟ้า 200 kVA

$$P_{CU1\,1} = 0.67^2 \times (796.87) = 354.16 \text{ W}$$

3.9.3 ขดลวดต่อควบ

R_Y = 0.380+0.022 = 0.402 mm

N = 32 รอบ

A_{CU} = 6*31.1 = 186.6 mm^2 (ขดลวดขนาด 4*8 mm^2 จะมีพื้นที่หน้าตัดขดลวดจริง 31.1 mm^2)

ความต้านทานขดลวด $= \dfrac{0.02097 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 0.402 \times 32}{186.6 \times 10^{-6}} = 9.08 \text{ m}\Omega$

กำลังสูญเสียในขดลวดขณะที่หม้อแปลงทำงานที่กำลังไฟฟ้า 200 kVA

$$P_{CU3} = 200^2 * (9.08 * 10^{-3}) = 363.2 \text{ W}$$

กำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงขณะทำงานตัวเดียวที่กำลังไฟฟ้า 300 kVA

$$P_{CU} = P_{CU1.1} + P_{CU1.2} + P_{CU2} = 224.1+248.4+796.87 = 1{,}269.37 \text{ W}$$

กำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงขณะทำงานตัวเดียวที่กำลังไฟฟ้า 400 kVA

$$P_{CU} = P_{CU1.1} + P_{CU1.2} + P_{CU2} = 398.4+441.6+1{,}416.66 = 2{,}256.66 \text{ W}$$

กำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงขณะต่อขั้นบันไดและทำงานที่กำลังไฟฟ้า 400 kVA

$$P_{CU} = P_{CU1.1} + P_{CU1.2} + P_{CU2} + 2P_{CU3} = 398.4+441.6+354.16+(2 \times 363.2) = 1{,}566.4 \text{ W}$$

กำลังสูญเสียภายในแกนเหล็กโดยประมาณที่ได้จากผู้ผลิต คือ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกำลังไฟฟ้า

$$P_i = 1500 \text{ W}$$

กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกและกำลังสูญเสียสเตรย์มีค่าประมาณ 50% ของกำลังสูญเสียในขดลวด

$$P_a = 1000 \text{ W}$$

ผลรวมกำลังสูญเสียทั้งหมดที่มีค่ามากที่สุดในการใช้งาน

$$P = P_{CU} + P_i + P_a = 2256.66+1500+1000 = 4{,}756.66 \text{ W}$$

กำหนดหม้อแปลงจะทำงานที่อุณหภูมิแวดล้อม 40°C การนำความร้อนของฉนวน โดยคิดความหนาของฉนวนที่ล้อมรอบขดลวดแรงสูงและขดลวดต่อควบประมาณ 0.02 m ค่าสภาพนำความร้อนของกระดาษฉนวนจุ่มน้ำมันมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25-0.45 $\dfrac{W}{m\ ^oC}$ [10] ในการคำนวณเลือกใช้ค่า 0.40 $\dfrac{W}{m\ ^\circ C}$ และพื้นที่ผิวภายนอกฉนวนประมาณ 3 m^2เมื่อคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงสูงเทียบกับน้ำมันได้ คือ

$$\Delta T_1 = \frac{Q_{cond} \times l}{\sigma \times A} = \frac{1417 \times 0.02}{3 \times 0.4} \approx 23^{o}C$$

และคำนวณอุณหภูมิเพิ่มระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูงได้ คือ

$$\Delta T_1 = \frac{Q_{cond} \times l}{\sigma \times A} = \frac{840 \times 0.01}{1.57 \times 0.4} = 13^{o}C$$

การออกแบบอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดจะกำหนดไว้ประมาณ $105^{o}C$ และสามารถคำนวณอุณหภูมิเพิ่มระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันกับอุณหภูมิแวดล้อมได้ ΔT_2 = 105-40-23-13 = $29^{o}C$

จากค่าอุณหภูมิเพิ่มนี้จะสามารถคำนวณพื้นที่ผิวของตัวถังได้ตามสมการ

$$A = \frac{P_t}{(\lambda_{rad} + \lambda_{conv}) \times \Delta T_2} = \frac{4757}{11 \times 30} \approx 14 \quad m^2$$

ตัวถังที่ล้อมรอบแกนเหล็กและขดลวดพอดีจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 m สูงประมาณ 1.5 m เมื่อคิดเป็นพื้นที่ผิวด้านข้างประมาณ 7 m^2และพื้นที่ผิวด้านบนตัวถังประมาณ 1.5 m^2 ฉะนั้นต้องเพิ่มครีบระบายความร้อนเป็นแนวยาวประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของเส้นรอบวงภายนอกตัวถังจะได้พื้นที่ผิวด้านข้างรวมประมาณ 11.8 m^2 ทำให้ได้พื้นที่ผิวรวมประมาณ 13 m^2

3.10. การออกแบบปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

ปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าภายนอกจะทำจากฉนวนยางซิลิโคนมีลักษณะเป็นคลื่นคล้ายลูกถ้วยฉนวนเพื่อป้องกันความเปรอะเปื้อนและการกระแทกขณะการประกอบสร้างและการขนส่ง ภายในจะเสริมความแข็งแรงด้วยวัสดุเส้นใยแก้ว (Fiber glass) และจะต้องมีความสูงที่ทนต่อการวาบไฟตามผิวที่แรงดันทดสอบได้ โดยเส้นใยแก้วนี้ทำการสั่งซื้อจากต่างประเทศ

3.11. ท่อโลหะในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

ท่อโลหะนี้จะทำจากอะลูมิเนียมและทำการพันด้วยกระดาษฉนวนให้ได้หนา 3 mm ความยาวของการพันด้วยกระดาษ 1400 mm จากการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ความสูงที่เกินกว่านี้จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำไม่ต้องมีฉนวนพันรอบ

3.12. ท่อฉนวนภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

ท่อฉนวนภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าทำจากกระดาษอัดแรงที่เรียกว่าทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ด ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรับแรงทางกลภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในและภายนอกคือ 140/146 mm มีความยาว 1400 mm

3.13. วงแหวนรองรับท่อฉนวนและท่อโลหะภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

วงแหวนรองรับท่อฉนวนและท่อโลหะภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า ทำจากไม้และทำฐานให้เป็นลักษณะโค้งเพื่อให้รองรับพอดีความโค้งของขดลวดที่พันเสร็จแล้ว และเป็นฐานวางของท่อโลหะในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า มีลักษณะดังรูป 4.10

3.14. การฉนวนภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

การฉนวนภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าจะวิเคราะห์ด้วยการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำเป็นต้องใส่แผ่นตัวนำโค้งที่ทำการต่อลงกราวด์เพื่อทำให้การกระจายของแรงดันดีขึ้นและลดความเครียดสนามไฟฟ้า แผ่นตัวนำนี้จะทำการพันด้วยกระดาษฉนวนหนา 0.1 mm พันจนได้ความหนาประมาณ 2 mm

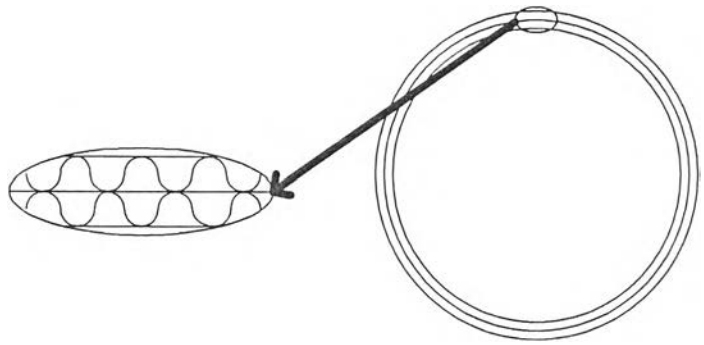
การใส่แผ่นตัวนำนี้จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นประมาณ 40 pF ซึ่งทำตัวเป็นโหลดของหม้อแปลงแต่จะมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุของโหลดจริงและโหลดของดิไวเดอร์วัดแรงดัน

ระหว่างท่อโลหะกับแผ่นตัวนำโค้งจะทำการฉนวนด้วยกระดาษอัดรูปคลื่นพันสลับกับกระดาษฉนวนเพื่อเสริมความแข็งแรงทางกลและเป็นช่องทางการไหลของน้ำมันเพื่อระบายความร้อนภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าซึ่งจะมีลักษณะดังรูป 3.6 และขนาดความกว้างและยาวดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ขนาดของฉนวนภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูฉนวนรอบขดลวด (mm)	จำนวนรอบ (mm)	ความยาวเส้นรอบวงรวม (mm)	ความยาว (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฉนวน (mm)
1	174	1	460	1500	136/148
2	174	1	500	1400	1350
3	160	2	2×560 = 1120	1300	160/180
4	180	2	2×620 = 1240	1200	180/200
5	200	3	3×810 = 2430	1100	200/230
6	230	3	3×900 = 2700	950	230/260
7	260	3	3×990 = 2970	800	260/290
8	290	3	3×1080=2060	650	290/320
9	320	2	2×1170=2340	500	320/340
10	340	*	*	400	*

หมายเหตุ * หมายถึงพันจนได้ขนาดใกล้เคียงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นตัวนำโค้ง



รูปที่ 3.6 ภาพตัดขวางของฉนวนรูปคลื่นที่พันรอบท่อตัวนำแรงดันสูง

3.15. การออกแบบหัวแรงสูงของหม้อแปลงทดสอบ

หัวแรงดันสูง หมายถึง ถังโลหะที่อยู่ส่วนบนสุดของหม้อแปลง และมีแรงดันเท่ากับแรงดันสูงสุดของขดลวดแรงดันสูง ถังโลหะนี้จะทำหน้าที่เกลี่ยแรงดันของขั้วแรงดันสูงร่วมกับวงแหวนเกลี่ยแรงดัน นอกจากนี้ปริมาตรภายในของขั้วแรงสูงทำหน้าที่รองรับการขยายตัวของน้ำมันในหม้อแปลงด้วย โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวแรงดันสูงจะมีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าคือประมาณ 600 mm ความสูงของหัวจะคำนวณจากอัตราการขายตัวของน้ำมันหม้อแปลงที่ได้จากผู้ผลิตประมาณ 0.07% - 0.08% ของปริมาตร ต่อ องศาเซลเซียส โดยคิดอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันขณะใช้งานคือ 80°C และปริมาตรของน้ำมันทั้งหมดประมาณ 2100 ลิตร จะได้ค่าการขยายตัวของน้ำมันคือ

$$\frac{0.03}{100} \times 80 \times 2100 = 134.4 \text{ ลิตร} = 0.1344 \text{ m}^3$$

ปริมาตรของหัวแรงดันสูง (V)

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \times h$$

ฉะนั้นความสูงของหัว

$$h = \frac{4V}{\pi D^2} = \frac{4 \times 0.1344}{\pi \times 0.6^2} = 0.475 \quad \text{m}$$

เลือกความสูงของหัวคือ 0.5 m

3.16. การเลือกและการติดตั้งวงแหวนเกลี่ยแรงดันภายนอกปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าภายนอกปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าไม่ควรเกิน 1.7 kV/mm [5] เพื่อไม่ให้เกิดดีสชาร์จบางส่วน หรือการวาบไฟตามผิวของปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าภายนอกปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า ทำให้เราสามารถเลือกขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนเกลี่ยแรงดันได้ คือ 120 mm และรู้ตำแหน่งการติดตั้งวงแหวนเกลี่ยแรงดัน

โดยติดตั้งวงแหวนเกลี่ยแรงดันวงที่ 1 ให้ส่วนบนของวงแหวนสูงกว่าหัวแรงสูงของหม้อแปลงทดสอบประมาณ 100 mm วงแหวนเกลี่ยแรงดันวงที่ 2 จะติดตั้งให้ส่วนล่างสุดของวงแหวนต่ำกว่าฐานของหัวแรงดันสูงของหม้อแปลงประมาณ 100 mm และติดตั้งวงแหวนเกลี่ยแรงดันที่ส่วนฐานของปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าให้สูงกว่าฝาครอบตัวถังของหม้อแปลงประมาณ 20 mm

3.17. การติดตั้งซิลิกาเจล

ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นหรือปริมาณน้ำที่ละลายอยู่ในน้ำมัน การควบคุมของน้ำมันหม้อแปลงในการใช้งานนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นการควบคุมปริมาณน้ำที่ผสมในน้ำมันหม้อแปลงจึงเป็นวิธีที่ทำได้ในทางปฏิบัติ ฉะนั้นในการใช้น้ำมันหม้อแปลงจึงพยายามลดปริมาณการละลายของน้ำในน้ำมันให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ขณะใช้งานหม้อแปลงจะมีการขยายตัวของน้ำมันหม้อแปลง เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้นเกิดการผลักดันอากาศออกสู่ภายนอก และเมื่อเลิกใช้งานอุณหภูมิของน้ำมันจะลดต่ำลง ทำให้น้ำมันหดตัวและเกิดการดูดอากาศเข้าในหม้อแปลง อากาศภายนอกซึ่งมีความชื้นสูงโดยที่น้ำมันหม้อแปลงมีปริมาณความชื้นต่ำ น้ำมันจะดูดความชื้นจากอากาศทำให้ความชื้นในน้ำมันสูงขึ้นทำให้ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของน้ำมันลดลง ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดดีสชาร์จบางส่วน และนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด การติดตั้งกล่องซิลิกาเจลจะช่วยดูดซึมความชื้นของอากาศที่เข้าสู่หม้อแปลงได้ ฉะนั้นในการใช้งานหม้อแปลงควรหมั่นดูแลรักษาไม่ให้ซิลิกาเจลเกิดการอิ่มตัว