หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบหม้อแปลงทดสอบ

3.1 เลือกค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบสร้าง จะใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กำลังไฟฟ้าไม่มากนัก เช่น ลูกถ้วยฉนวน สวิตช์ตัดตอน ปลอกฉนวนนำสาย ซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้าโดยประมาณ ดังแสดงในตารางที่ 1.2 หม้อแปลงทดสอบแบบต่อขั้นบันได ขนาดแรงดัน 200 kV 10 kVA มีกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะทดสอบอุปกรณ์เหล่านี้ได้ ดังนั้น จึงได้กำหนด ขนาดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบแต่ละตัวเท่ากับ 5 kVA 100 kV มีขดลวด 3 ชุด คือ ขดลวดแรงดันต่ำ ขดลวดแรงดันสูงและขดลวดต่อควบ

จากประสบการณ์ของบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงทดสอบจากต่างประเทศ [5] ได้กำหนดค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบแต่ละตัว มีค่า 4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อต่อขั้นบันได 2 ขั้น จะมีเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าลัดวงจรรวมประมาณ 4 เท่า ดังนั้น จึงกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าลัดวงจรเพื่อการออกแบบของแต่ละตัวเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำหนดต่าง ๆ ของหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบสรุปไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ

ข้อกำหนดแต่ละตัว		เมื่อต่อขั้นบันได 2 ขั้น
กำลังไฟฟ้า S_n, kVA	5	10
แรงดันป้อนเข้า (แรงดันต่ำ) U_1, V	220	220
แรงดันจ่ายออก (แรงดันสูง) U_2, kV	100/50	200/100
กระแสป้อนเข้า I_1, A	22.73/11.36	45.46/22.73
กระแสจ่ายออก I_2, A	0.05	0.05
แรงดันต่อควบ U_3, V	250	250
กระแสต่อควบ I_3, A		20
จำนวนเฟส	1	1
ความถี่ f, Hz	50	50
เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าลัดวงจร	4	16

3.2 <u>การออกแบบแกนเหล็กและขดลวดโดยการคำนวณ</u>

เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันทดสอบต้องใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากที่สุด ดังนั้นค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก B_c จะต้องอยู่ในย่านเชิงเส้น จากรูปที่ 2-15 [15] ค่า B_c เข้าใกล้ย่านอิ่มตัวประมาณ 1.6 Wb/m^2 จึงเลือกค่า B_c ในการออกแบบเท่ากับ 1.4 Wb/m^2 ซึ่งพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการ [16]

$$A_{Fe} = C\sqrt{S_n/f}$$

เมื่อ C คือ ค่าฟอร์มแฟกเตอร์ของหม้อแปลง ซึ่งจากโรงงานจะใช้ค่าประมาณ

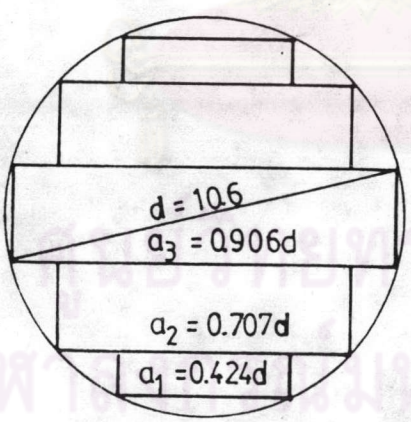
7×10^{-4} m^2 . J$^{-1/2}$ สำหรับหม้อแปลงแบบแกนเหล็กจุ่มในน้ำมัน

ใช้ค่า C $= 7.15 \times 10^{-4}$ m^2 . J$^{-1/2}$ (J = Joules)

$$A_{Fe} = 7.15 \times 10^{-4} \times \sqrt{5 \times 10^{-3} / 50}$$

$$= 7.15 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2$$

ออกแบบแกนเหล็กเป็นแบบคอร์ (core type) มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นแบบขั้น 3 ขั้น บรรจุอยู่ในวงกลม ดังรูปที่ 3.1



$a_1 = 4.49$

$a_2 = 7.49$

$a_3 = 9.60$

หน่วยเป็นเซ็นติเมตร

รูปที่ 3.1 พื้นที่ภาคตัดแกนเหล็กแบบขั้น 3 ขั้น

แกนเหล็กแบบ 3 ขั้นนี้จะให้ค่าแฟกเตอร์พื้นที่แกนเหล็กในวงกลม ดังนี้

$F_{cu} = 85.1\ \%$

ค่าแฟกเตอร์เนื้อแผ่นเหล็ก ชนิด Z7H จากบริษัทผู้ผลิต มีค่าเท่ากับ

$K_{Fe} = 0.97$

เส้นผ่านศูนย์กลางของภาคตัดของแกนเหล็ก หาได้จากสมการ [16]

$$d = \sqrt{(A_{Fe} \times 4)/(\pi \times F_{cu} \times K_{Fe})}$$

$$= \sqrt{(7.15 \times 10^{-3} \times 4)/(\pi \times 0.851 \times 0.97)}$$

$$= 0.10501 \quad m$$

ใช้ $d = 0.106$ m

$= 10.6$ cm

เส้นสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก $\Phi = B_c \times A_{Fe}$

$= 1.4 \times 7.15 \times 10^{-3}$

$= 0.01$ Wb

จำนวนขดลวด คำนวณได้จากสูตร N [17] $= U/4.44\, f\Phi$

จำนวนรอบขดลวดแรงดันต่ำ $N_1 = 220/(4.44 \times 50 \times 0.01)$

$= 99.1$

ใช้ $N_1 = 100$ รอบ

จำนวนรอบขดลวดแรงดันสูง $N_2 = 100 \times 10^3/(4.44 \times 50 \times 0.01)$

$= 45045.045$

ใช้ $N_2 = 45045$ รอบ

3.2.1 <u>การคำนวณค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก</u>

จากกราฟการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กชนิด Z7H (ซึ่งแต่ละแผ่นหนา 0.3±0.03 mm) ในรูปที่ 2-16 [15] จะได้ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่อกิโลกรัม ที่ $B_c = 1.4$ Wb/m^2

$P'_{Fe} = 0.72$ w/kg

ในทางปฏิบัติ เนื่องจากผลของการตัดการเรียงการแคลมป์แกนเหล็กซิลิคอน จึงเผื่อการสูญเสียกำลังไฟฟ้าอีก 20% (ซึ่งเป็นค่าจากโรงงาน) ดังนั้น ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจะเป็น

$P'_{Fe} = 0.72 \times 1.2$

$= 0.864$ w/kg

I10301185

3.2.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด

หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กจนถึง 50 kVA ระบายความร้อนโดยน้ำมันหม้อแปลงตามธรรมชาติ จะกำหนดความหนาแน่นของกระแสในขดลวด อยู่ในช่วง 110-230 A/cm² [6] การออกแบบได้กำหนดความหนาแน่นของกระแสในขดลวดไว้ดังนี้

ขดลวดแรงดันต่ำ กำหนดความหนาแน่นของกระแส J_1 = 265 A/cm² ซึ่งจะสอดคล้องกับขนาดขดลวดที่มีขายในเชิงการค้า และเป็นขนาดของลวดที่เหมาะสม ขดลวดที่โตกว่านี้ ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นกระแสต่ำกว่า จะทำให้จำนวนชั้นการพันของการขดลวดเพิ่มมากขึ้น และทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าลัดวงจรสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ ค่าความหนาแน่นกระแสที่เลือกกำหนดไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและของน้ำมันหม้อแปลงเกินกว่าค่ากำหนดในมาตรฐาน ซึ่งดูรายละเอียดการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มได้ในภาคผนวก ข

ขดลวดแรงดันสูง เป็นขดลวดที่ห่อหุ้มฉนวนด้วยกระดาษฉนวนจากชั้นขดลวดแรงดันสูง อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดจะมีค่าสูง จึงกำหนดความหนาแน่นกระแสให้มีค่าต่ำ ๆ ค่าความหนาแน่นกระแสของขดลวดแรงดันสูง J_2 = 100 A/cm² เป็นค่าที่เหมาะสม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากภาคผนวก ข. แต่ขดลวดที่หาซื้อได้มีขนาดเล็กที่สุดคือ SWG No. 30 ซึ่งมีค่าความหนาแน่นกระแสของขดลวด J_2 = 64 A/cm²

ดังนั้น ความหนาแน่นของกระแสในขดลวดแรงดันต่ำ J_1 = 265 A/cm²

ความหนาแน่นของกระแสในขดลวดแรงดันสูง J_2 = 64 A/cm²

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด $P' = 2.37\ J^2k \times 10^{-4}$ w/kg ที่ 75 °C [2]

เมื่อ k คือ แฟกเตอร์สำหรับเพิ่มการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวด เนื่องจากการสูญเสียสเตรย์ในเคลัมป์เหล็ก และในขดลวดเอง

ใช้ค่า k = 1.1 [17]

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงดันต่ำต่อกิโลกรัม

$$P'_1 = 2.37 \times (265)^2 \times 1.1 \times 10^{-4}$$

$$= 18.31 \text{ w/kg}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงดันสูงต่อกิโลกรัม

$$P'_2 = 2.37 \times (64)^2 \times 1.1 \times 10^{-4}$$

$$= 1.07 \text{ w/kg}$$

3.2.3 การคำนวณขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางของขดลวด

$$A_1 = I_1/J_1$$

$$= 22.73/265$$

$$= 0.086 \quad cm^2$$

$$= 8.6 \quad mm^2$$

$$A_2 = I_2/J_2$$

$$= 0.05/64$$

$$= 7.81 \times 10^{-4} \quad cm^2$$

$$= 0.0781 \quad mm^2$$

เนื่องจากออกแบบให้ขดลวดแรงดันต่ำมี 2 ชุด สำหรับต่ออนุกรมหรือขนานกัน เพื่อเปลี่ยนแรงดันทดสอบสูงสุด ดังนั้นเส้นลวดแรงดันต่ำของแต่ละชุดขดลวด จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับ

$8.6/2 = 4.3 \quad mm^2$

3.3 การออกแบบขดลวดและแกนเหล็ก

หม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบประกอบด้วย ขดลวดแรงดันต่ำ 2 ชุด ขดลวดแรงดันสูงและขดลวดต่อควบ รูปลักษณะขดลวดทั้งสามเป็นแบบชั้นทรงกระบอก และแกนเหล็กเป็นแบบคอร์

3.3.1 ขดลวดแรงดันต่ำ

ขดลวดแรงดันต่ำ ใช้ลวดกลมอาบฉนวนชนิด PVF เคลือบหนาชั้น 1 มีขนาดดังต่อไปนี้

ลวด SWG # 13 เส้นผ่านศูนย์กลางเปลือย = 2.337 mm

พื้นที่ภาคตัดขวาง = 4.289 mm^2

เส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อเคลือบฉนวนหนาชั้น 1 = 2.437 mm

จำนวนขดลวดมี 2 ชุด ๆ ละ 100 รอบ แต่ละชุดพัน 3 ชั้น

ชั้นแรกพัน 35 รอบ

ชั้นที่สอง 33 รอบ

ชั้นที่สาม 32 รอบ

ความกว้างสูงสุดของขั้นขดลวดแรงดันต่ำ = (35+1) x 2.437

= 87.732 mm

= 8.8 cm

(35+1) หมายถึง จำนวน 35 รอบบวกกันเผื่อไว้ 1 รอบ สำหรับเริ่มต้นการพัน ขดลวดแรงดันต่ำ 2 ชุด นี้วางห่างกัน 0.8 cm. โดยใช้กระดาษอัดแรงกั้น ดังรูปที่ 3.2

แรงดันต่อรอบ = 220/100 = 2.2 V

แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น = 2.2x2x35 V

= 154 V

ใช้กระดาษคร๊าฟท์หนา 0.08 mm 2 แผ่น เป็นฉนวนระหว่างชั้น จากหัวข้อ 2.7 สามารถทนแรงดันได้ 3.8 kV.

ความหนาของขดลวดแรงดันต่ำแต่ละชุด (ความหนาของเส้นลวดรวมกับความหนาของฉนวน)

t_1 = 3 x (2.437) + (2x0.08) x 3

= 7.791 mm

ใช้ t_1 = 8 mm

ความหนาแน่นของกระแส $J_1 = I_1/2/A_1$

J_1 = 22.73/2/0.04289 = 264.98

$\simeq$ 265 A/cm^2

<u>คำนวณหาความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงดันต่ำ</u>

แกนเหล็กมีรัศมี = 106/2 = 53 mm

ระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดแรงดันต่ำมีฉนวนกั้นหนา 1.6 มม. และร่องน้ำมัน 1.6 มม.

เพราะฉะนั้น รัศมีวงในของขดลวดแรงดันต่ำ = 53+1.6+1.6

= 56.2 mm

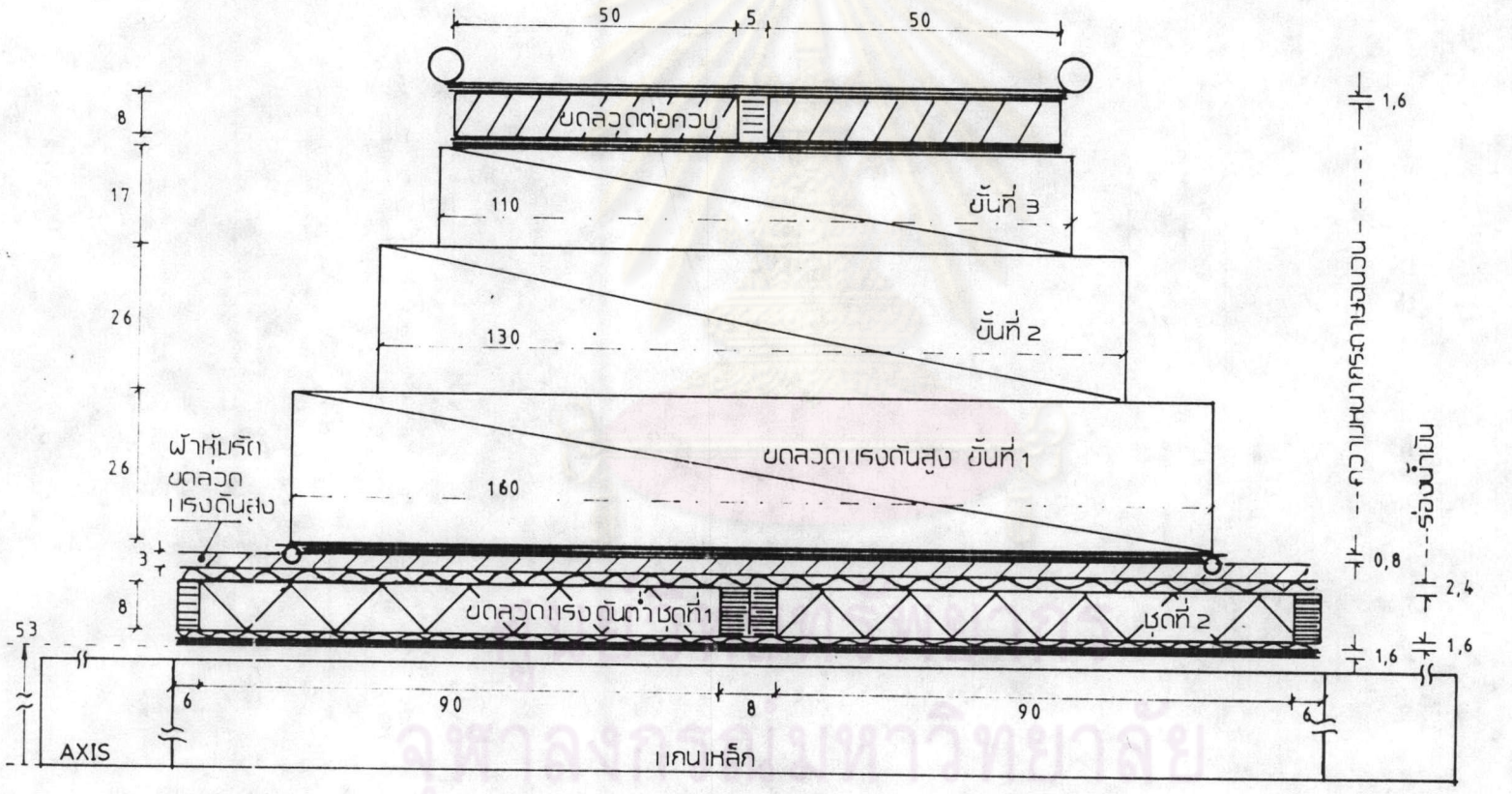
รัศมีวงนอก = 56.2+8

= 64.2 mm

รัศมีเฉลี่ย (r_1) = (56.2+64.2)/2

= 60.2 mm

รูปที่ 3.2 มิติยดลวดและการฉนวนของการออกแบบ
ในหัวข้อ 3.3 หน่วย มม.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความยาวรอบเฉลี่ย (l_1) = $2\pi r_1$

= 2π x 60.2

= 378.24 mm

= 37.82 cm

น้ำหนักทองแดงของขดลวด W = NAl x (Specific gravity)

N = จำนวนรอบ

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของขดลวด

l = ความยาวรอบเฉลี่ย

Specific gravity ของทองแดง = 8.89×10^{-3} kg/cm^3

น้ำหนักทองแดงของขดลวดแรงดันต่ำ

$W_1 = N_1A_1l_1 \times 8.89 \times 10^{-3}$

$= 100 \times (2 \times 4.289 \times 10^{-2}) \times 37.82 \times 8.89 \times 10^{-3}$

= 2.88 kg

3.3.2 <u>ขดลวดแรงดันสูง</u>

เส้นลวดของขดลวดแรงดันสูง ใช้ลวด PVF SWG # 30 เคลือบฉนวนหนาพิเศษมีขนาดดังต่อไปนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางลวดเปลือย = 0.315 mm

พื้นที่ภาคตัดขวาง = 0.07791 mm^2

เส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อเคลือบฉนวนหนาพิเศษ = 0.38 mm

ขดลวดพันแบบขดลวดชั้นทรงกระบอก โดยมีการเกรดดิ้งขดลวด ถ้าทำการเกรดขดลวดลงทุกชั้น จะมีปัญหาความยุ่งยากในการพันและเสียเวลามาก จึงจัดแบ่งขดลวดเป็นชั้น ๆ รวม 3 ชั้นด้วยกัน โดยใช้ค่ารัศมีเฉลี่ยในแต่ละชั้น คูณกับความกว้างของชั้นในชั้นนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

คือ $r_{21}b_{21} \tilde{=} r_{22}b_{22} \tilde{=} r_{23}b_{23}$

โดยที่ r_{21}, r_{22} และ r_{23} เป็นรัศมีเฉลี่ยของขดลวดแรงดันสูงชั้นที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ และ b_{21}, b_{22} และ b_{23} เป็นความกว้างของขดลวดแรงดันสูงชั้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ขั้นที่ 1 มี 48 ชั้น ๆ ละ 420 รอบ รวม N_{21} = 20,160 รอบ

ขั้นที่ 2 มี 47 ชั้น ๆ ละ 341 รอบ รวม N_{22} = 16,027 รอบ

ขั้นที่ 3 มี 31 ชั้น ๆ ละ 288 รอบ รวม N_{23} = 8,928 รอบ

ดังนั้นจำนวนรอบทั้งหมด N_2 = 45,115 รอบ

แรงดันต่อรอบ = 100,000/45,115 = 2.22 V

แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น = 2.22x2x420

= 1861.9 V

คิดเผื่อเนื่องจากแรงดันเกินอีก 20%

แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น = 1861.9x1.2

= 2234.3 V

ใช้กระดาษคร๊าฟท์ หนา 0.08 จำนวน 2 แผ่น เป็นฉนวนกั้นระหว่างชั้นขดลวด ซึ่งสามารถทนแรงดันได้สูงสุด 3,800 V มีแฟาเตอร์ความปลอดภัย เท่ากับ 1.7 (3800/2234)

<u>ชั้นที่หนึ่ง</u>

ความกว้างของขดลวด b_{21}

= (จำนวนชั้นขดลวดในแต่ละชั้น+เผื่อ 1 รอบ) x (ขนาดลวดเคลือบฉนวน)

= (420+1) x 0.38 = 159.98 mm

= 15.998 cm

ใช้ b_{21} = 16 cm

ความหนาของขดลวด t_{21}

= จำนวนชั้นขดลวด x (ขนาดลวดเคลือบฉนวน + ฉนวนกั้นระหว่างชั้น)

= 48 x (0.38+(0.08x2)) = 25.92 mm

= 2.592 cm

ใช้ t_{21} = 2.6 cm

<u>ชั้นที่สอง</u>

ความกว้างของขดลวด b_{22} = (341+1) x 0.38 = 129.96 mm

= 12.996 cm

ใช้ b_{22} = 13 cm

ความหนาของขดลวด t_{22} = 47 x (0.38+0.16) = 25.38 mm

= 2.538

ใช้ t_{22} = 2.6 cm

ขั้นที่สาม

ความกว้างของขดลวด b_{23} = (288+1) x0.38 = 109.82 mm

= 10.982 cm

ใช้ b_{23} = 11 cm

ความหนาของขดลวด t_{23} = 31 x (0.38+0.16) = 16.74 mm

= 1.674 cm

ใช้ t_{23} = 1.7 cm

คำนวณหาความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงดันสูง

ระหว่างขดลวดแรงดันสูงกับขดลวดแรงดันต่ำ มีร่องน้ำมันขนาด 2.4 มม. ฉนวนกระดาษอัดแรงทรงกระบอกหนา 0.8 มม. ฉนวนกระดาษคร๊าฟท์หุ้มขดลวดแรงดันสูงหนา 2 มม. แผ่นชีลด์ทองแดง 0.5 มม. และเผื่อไว้อีก 1 มม.

เพราะฉะนั้น ระหว่างขดลวดแรงดันสูงกับแรงดันต่ำห่างกัน = 2.4+0.8+2+0.5+1

= 6.7 mm

ใช้ ระยะห่าง = 7 mm

ขั้นที่หนึ่ง รัศมีวงใน = 64.2+7

= 71.2 mm

รัศมีวงนอก = 71.2+26

= 97.2 mm

รัศมีเฉลี่ย (r_{21}) = (71.2+97.2)/2 = 84.2 mm

ความยาวรอบเฉลี่ย (l_{21}) = $2\pi(r_{21})$ = 2π x 84.2

= 529.0 mm

= 52.90 cm

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นที่สอง รัศมีวงนอก = 97.2+26

= 123.2 mm

รัศมีเฉลี่ย (r_{23}) = (123.2+97.2)/2 = 110.2 mm

ความยาวรอบเฉลี่ย (l_{23}) = 2π x110.2 = 692.4 mm

= 69.24 cm

ขั้นที่สาม รัศมีวงนอก = 123.2+17

= 140.2 mm

รัศมีเฉลี่ย (r_{23}) = (140.2+123.2)/2 = 131.7 mm

ความยาวรอบเฉลี่ย (l_{23}) = 2πx131.7 = 827.5 mm

= 82.75 cm

คำนวณน้ำหนักทองแดงของขดลวดแรงดันสูง

น้ำหนักทองแดงคำนวณได้จากสูตร $W = NA_1x8.89x10^{-3}$

เพราะฉะนั้น จะได้ W_{21} = 7.39 kg

W_{22} = 7.69 kg

W_{23} = 5.12 kg

น้ำหนักทองแดงรวมในขดลวดแรงดันสูง W_2 = 20.20 kg

3.3.3 ขดลวดต่อควบ

เส้นลวดของขดลวดต่อควบจะใช้เส้นลวดขนาดเดียวกับขดลวดแรงดันต่ำ ชนิด PVF SWG # 13 เคลือบฉนวน ชั้นที่ 1 มีขนาดดังนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางเปลือย = 2.337 mm

พื้นที่ภาคตัดขวาง = 4.289 mm^2

เส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อเคลือบฉนวน = 2.437 mm

จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวดต่อควบ N_3 = 114 รอบ ซึ่งเผื่อแรงดันตก 15% แบ่งเป็น 2 ขดลวด ๆ ละ 57 รอบ พันขดลวดต่อควบแบบชั้นทรงกระบอก แต่ละขดมี 3 ชั้น ๆ ละ 19 รอบ ความกว้างของขดลวดแต่ละขด = (19+1)x2.437 = 48.74 mm

ใช้ 4.9 cm

ขดลวดทั้งสองกั้นด้วยฉนวนกระดาษอัดแรงกว้าง 0.8 cm และมีร่องสำหรับทางออกขดลวดแรงดันสูงรวมทั้งสายออกของขดลวดต่อควบทั้งสอง เอง

แรงดันต่อรอบ = 240/114 = 2.10 V

แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น = 2.10x2x19 = 79.80 V

ใช้กระดาษคราฟ 0.08 mm จำนวน 2 แผ่น เป็นฉนวนระหว่างชั้น

ความหนาของขดลวดแต่ละขด t_3 = (2.437+0.08x2) x 3

= 7.79 mm

ใช้ t_3 = 8 mm

ระหว่างขดลวดต่อควบกับขดลวดแรงดันสูง ใช้กระดาษอัดแรง 0.8x2 mm เป็นฉนวนกั้น

รัศมีวงในของขดลวดต่อควบ = 140.2 + 1.6

= 141.8 mm

รัศมีวงนอกของขดลวดต่อควบ = 141.8+8

= 149.8 mm

รัศมีเฉลี่ย (r_3) = (149.8+141.8)/2 mm

= 145.8 mm

ความยาวรอบเฉลี่ย (l_3) = $2\pi r_3$

= 2π x 145.8

= 916 mm

= 91.60 cm

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>คำนวณน้ำหนักทองแดงของขดลวดต่อควบ</u>

W_3 = $N_3A_3l_3$ x 8.89 x 10^{-3}

= 114x4.289x10^{-2}x91.60x8.89x10^{-3}

= 3.98 kg

3.3.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด

3.3.4.1 หม้อแปลงทดสอบใช้งานตัวเดียว

เมื่อหม้อแปลงทดสอบใช้งานตัวเดียวกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดจะเกิดขึ้นในขดลวดแรงดันต่ำและขดลวดแรงดันสูงเท่านั้น มีกระแสไหลตามพิกัดดังนี้

$$I_1 = 22.73 \quad A$$

$$I_2 = 0.05 \quad A$$

ความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่ภาคตัดของขดลวดมีดังนี้

$$J_1 = I_1/A_1 = 265 \quad A/cm^2$$

$$J_2 = I_2/A_2 = 64 \quad A/cm^2$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดที่ 75 °C

$$P = 2.37\ J^2W \times 1.1 \times 10^{-4} \quad W$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียใน

ขดลวดแรงดันต่ำ $P_1 = 52.73$ W

ขดลวดแรงดันสูง $P_2 = 21.51$ W

ความต้านทานของขดลวดที่ 75 °C

$$R = P/I^2$$

ความต้านทานที่ 75 °C ของขดลวด

แรงดันต่ำ $R_1 = 0.1021$ Ω

แรงดันสูง $R_2 = 8604$ Ω

ความต้านทานรวมที่ 75 °C คิดทางด้านแรงดันสูง

$$R_t = (P_1+P_2)/I_2^2$$

$$= 29696 \ \Omega$$

เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมความต้านทาน

$$= (I_2R_t/U_2) \times 100\%$$

$$= 1.48\%$$

3.3.4.2 หม้อแปลงทดสอบใช้งานแบบต่อขั้นบันได

พิจารณาหม้อแปลงทดสอบใช้งานแบบต่อขั้นบันได 2 กรณีด้วยกัน คือ กรณีที่ 1 หม้อแปลงทดสอบตัวล่างมีกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า 5 kVA กรณีที่ 2 หม้อแปลงทดสอบตัวล่างมีกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า 10 kVA

<u>กรณีที่ 1</u> หม้อแปลงทดสอบตัวล่างป้อนเข้าตามพิกัด 220 V. 5 kVA จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในแต่ละขดลวดของหม้อแปลงแต่ละตัวดังนี้

หม้อแปลงตัวล่าง			หม้อแปลงตัวบน		
I_1 (A)	I_2 (A)	I_3 (A)	I_1 (A)	I_2 (A)	I_3 (A)
22.73	0.025	10.00	10.00	0.025	-

ความหนาแน่นของกระแสในแต่ละขดลวดของหม้อแปลงแต่ละตัวมีดังนี้

หม้อแปลงตัวล่าง			หม้อแปลงตัวบน		
J_1 (A/cm^2)	J_2 (A/cm^2)	J_3 (A/cm^2)	J_1 (A/cm^2)	J_2 (A/cm^2)	J_3 (A/cm^2)
265	32	233	117	32	-

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ 75 °C ในแต่ละขดลวดของหม้อแปลงแต่ละตัวดังนี้

หม้อแปลงตัวล่าง			หม้อแปลงตัวบน		
P_1 (w)	P_2 (w)	P_3 (w)	P_1 (w)	P_2 (w)	P_3 (w)
52.73	8.38	56.32	10.28	5.38	-

กำลังไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อต่อขั้นบันไดที่ 75 °C คือกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมทั้งหมด = 130.09 w

<u>กรณีที่ 2</u> หม้อแปลงทดสอบตัวล่างป้อนเข้า 2 เท่าของพิกัด 220 V 10 kVA จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในแต่ละขดลวดของหม้อแปลงแต่ละตัวดังนี้

หม้อแปลงตัวล่าง			หม้อแปลงตัวบน		
I_1 (A)	I_2 (A)	I_3 (A)	I_1 (A)	I_2 (A)	I_3 (A)
45.46	0.05	20	20	0.05	-

ความหนาแน่นของกระแสในแต่ละขดลวดของหม้อแปลงแต่ละตัวมีดังนี้

หม้อแปลงตัวล่าง			หม้อแปลงตัวบน		
J_1 (A/cm²)	J_2 (A/cm²)	J_3 (A/cm²)	J_1 (A/cm²)	J_2 (A/cm²)	J_3 (A/cm²)
530	64	466	234	64	-

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ 75 °C ในแต่ละขดลวดของหม้อแปลงแต่ละตัวมีดังนี้

หม้อแปลงตัวล่าง			หม้อแปลงตัวบน		
P_1 (w)	P_2 (w)	P_3 (w)	P_1 (w)	P_2 (w)	P_3 (w)
210.83	21.51	225.32	41.11	21.51	-

กำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อต่อขั้นบันไดที่ 75 °C คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมทั้งหมด = 520.28 w

3.3.5 <u>เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ขณะลัดวงจร</u>

3.3.5.1 หม้อแปลงทดสอบใช้งานตัวเดียว

เมื่อหม้อแปลงทดสอบใช้งานตัวเดียว แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์จะตกคร่อมเฉพาะขดลวดแรงดันสูงกับขดลวดแรงดันต่ำเท่านั้น

<u>การคำนวณหาแรงดันตกคร่อมรีแอกแตนซ์ ϵ_x ของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำ</u>

ค่ารีแอกแตนซ์ด้านแรงดันสูงหาได้จากสมการ [16]

$$X_2 = w \mu_0 b l_1 \int_0^{t_m} (H/I_2)^2 \, dx$$

โดย $w = 2\pi f$

μ_0 = เปอร์มีบิลิตี้ของอากาศ

b = ความกว้างของขดลวดแรงดันสูงชั้นที่หนึ่ง

l_1 = ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดใด ๆ

t_m = ความหนารวมตั้งแต่เริ่มขดลวดแรงดันต่ำจนหมดขอลวดแรงดันสูง

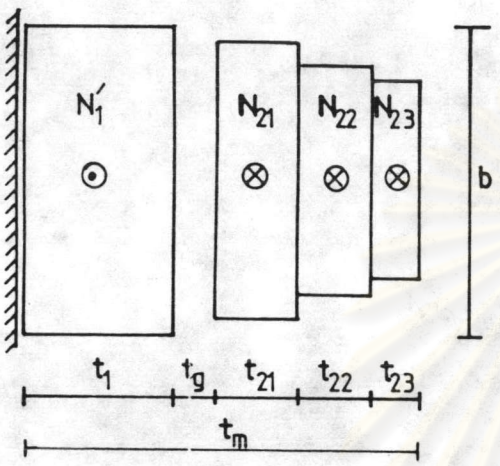
H^* = ความเข้มสนามแม่เหล็ก

x = ระยะใด ๆ ในทิศทางความหนาของขดลวด

---

* ความเข้มสนามแม่เหล็ก H เป็นฟังชั่น ของ NI/b ที่ระยะ x ใด ๆ

ค่ารีแอกแตนซ์คิดเทียบทางด้านแรงดันสูง สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 3.3 โดยที่จำนวนรอบของขดลวดทางด้านแรงดันต่ำจะคิดจำนวนเทียบเท่าจำนวนรอบทางด้านขดลวดแรงดันสูง



t_1 = ความหนาของขดลวดแรงดันต่ำ

t_{21} = ความหนาของขดลวดแรงดันสูงขั้นที่ 1

t_{22} = ความหนาของขดลวดแรงดันสูงขั้นที่ 2

t_{23} = ความหนาของขดลวดแรงดันสูงขั้นที่ 3

t_g = ความหนาของช่องแก็ป

b = ความกว้างของขดลวดแรงดันสูงขั้นที่ 1

N_1' = จำนวนรอบขดลวดแรงดันต่ำเทียบไปด้านแรงดันสูง

รูปที่ 3.3 รูปการคำนวณค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดแรงดันสูง โดยคิดเทียบทางด้านแรงดันสูง

ดังนั้น $X_2 = w\,\mu_o b\,[\{(N_1')^2 t_1 l_1/3b^2\} + (N_2^2 t_g l_g/b^2) + (t_{21} l_{21}/3N_{21}b^2) \times \{N_2^3 - (N_{22}+N_{23})^3\} + (t_{22} l_{22}/3N_{22}b^2) \times \{(N_{22}+N_{23})^3 + N_{23}^3\} + (t_{23} l_{23}/3b^2) \times N_{23}^2]$

t_g = ความหนาของช่องแก็ป = 7×10^{-3} m.

l_g = ความยาวรอบเฉลี่ยของช่องแก็ป = $2\pi(71.2+64.2)\times10^{-3}/2$

= 0.425 m.

แทนค่า

t_g = 0.007 m l_g = 0.425 m

t_1 = 0.008 m l_1 = 0.378 m N_2 = 45,115 รอบ

t_{21} = 0.026 m l_{21} = 0.529 m N_{21} = 20,160 รอบ

t_{22} = 0.025 m l_{22} = 0.692 m N_{22} = 16,027 รอบ

t_{23} = 0.017 m l_{23} = 0.828 m N_{23} = 8,928 รอบ

b = 0.016 m, $\mu_o = 4\pi\times10^{-7}$ H/m , w = 100 π rad/sec

$X_2 = 100\pi \times 4\pi \times 10^{-7} \times 0.16 \times [(45115)^2 \times 0.008 \times 0.378/(3 \times (0.16)^2)$

$+ (45115)^2 \times 0.007 \times 0.425/(0.16)^2$

$+ 0.026 \times 0.529/(3 \times 20160 \times (0.16)^2) \times \{(45115)^3 - (16027+8928)^3\}$

$+ 0.026 \times 0.692/(3 \times 16027 \times (0.16)^2) \times \{(16027+8928)^3 - (8928)^3\}$

$+ 0.017 \times 0.828 (8928)^2/(3 \times (0.16)^2)]$

$X_2 = 78,732 \ \Omega$

$\epsilon_x = (X_2/U_2) \times I_2 \times 100$

$= (78732 \times 0.05/100 \times 10^3) \times 100$

$= 3.94\%$

เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ หรือแรงดันลัดวงจร

$$\epsilon_{sc} = \sqrt{\epsilon_r^2 + \epsilon_x^2}$$

$$= \sqrt{(1.48)^2 + (3.94)^2}$$

$$= 4.21\%$$

กระแสไฟฟ้าลัดวงจรสำหรับขดลวดแรงดันสูง

$$I_{sc2} = I_2 \times 100/\epsilon_{sc}$$

$$= 0.05 \times 100/4.21$$

$$= 1.19 \ A$$

3.3.5.2 หม้อแปลงทดสอบต่อขั้นบันได

การใช้งานกรณีนี้ ขดลวดต่อควบจะเกี่ยวข้องกับการหา ϵ_{sc} ด้วยการคำนวณเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าลัดวงจร จึงคำนวณ 3 กรณีด้วยกัน คือ

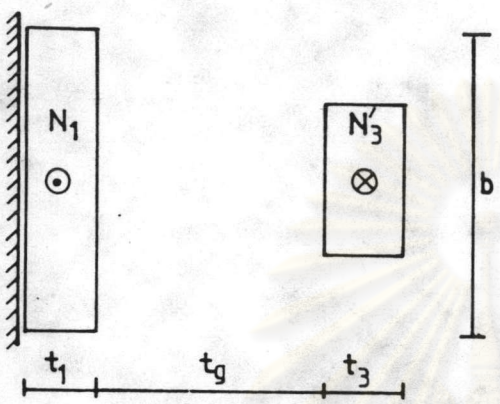
กรณีที่ 1 ป้อนแรงดันด้านแรงดันต่ำ ลัดวงจรด้านแรงดันสูง เปิดวงจรด้านต่อควบ

กรณีที่ 2 ป้อนแรงดันด้านแรงดันต่ำ เปิดวงจรด้านแรงดันสูง ลัดวงจรด้านต่อควบ

กรณีที่ 3 เปิดวงจรด้านแรงดันต่ำ ลัดวงจรด้านแรงดันสูง ป้อนแรงดันด้านต่อควบ

<u>กรณีที่ 1</u> เหมือนข้อ 3.3.5.1 จะได้ $\epsilon_{sc12} = 4.21\%$

<u>กรณีที่ 2</u> จะถือตำแหน่งระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดต่อควบเป็นช่องว่างอากาศ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปการคำนวณค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดต่อควบ

$$X_{13} = w\mu_o b [(N_1^2 t_1 l_1/3b^2) + (N_1^2 t_g l_g/b^2) + \{(N_3')^2 t_3 l_3/3b^2\}]$$

$t_1 = 0.008$ m $l_1 = 0.378$ m $N_1 = 100$ รอบ

$t_3 = 0.008$ m $l_3 = 0.916$ m $N_3' = 100$ รอบ (เทียบด้านแรงดันต่ำ)

$t_g = 0.0776$ m $l_g = 0.647$ m $b = 0.176$ m (ความกว้างของขดลวดแรงดันต่ำ)

จะได้ $X_{13} = 1.2035\ \Omega$

$$\epsilon_{x13} = (X_{13} I_1/U_1) \times 100$$
$$= 12.43\%$$

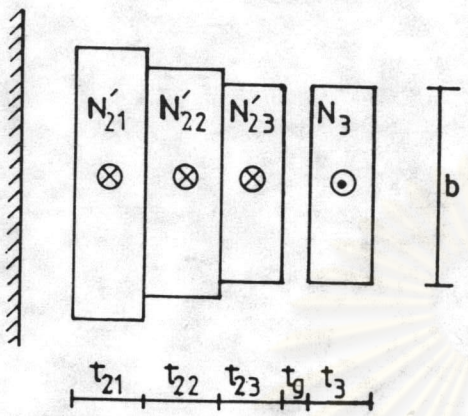
$$R_{13} = (52.73+255.20)/(22.73)^2$$
$$= 0.60\ \Omega$$

$$\epsilon_{r13} = (R_{13} I_1/U_1) \times 100$$
$$= 6.20\%$$

$$\epsilon_{sc13} = \sqrt{(\epsilon_{r13})^2 + (\epsilon_{x13})^2}$$
$$= 13.89\%$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>กรณีที่ 3</u> แรงดันไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างขดลวดต่อควบกับขดลวดแรงดันสูง คำนวณจากรูปที่ 3.5 คิดเทียบทางด้านขดลวดต่อควบ



รูปที่ 3.5 รูปการคำนวณค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างขดลวดต่อควบกับขดลวดแรงดันสูง

เทียบค่าไปทางด้านขดลวดต่อควบ

$N_{21} = 20,160$ รอบ เทียบได้ $N'_{21} = 51$ รอบ

$N_{22} = 16,027$ รอบ เทียบได้ $N'_{22} = 40$ รอบ

$N_{23} = 8,928$ รอบ เทียบได้ $N'_{23} = 23$ รอบ

$N_2 = N_{21}+N_{22}+N_{23} = 45115$ รอบ $N'_2 = N'_{21}+N'_{22}+N'_{23} = 114$ รอบ

$t_{21} = 0.026$ m $l_{21} = 0.529$ m

$t_{22} = 0.026$ m $l_{22} = 0.692$ m

$t_{23} = 0.017$ m $l_{23} = 0.828$ m

$t_g = 0.0032$ m $l_g = 0.891$ m

$t_3 = 0.008$ m $l_3 = 0.916$ m

$b = 0.11$ m (ความกว้างของขดลวดต่อควบ)

$$X_{32} = w\,\mu_o b\,[(t_{21}l_{21}/3N'_{21}b^2) \times \{N'^3_2-(N'_{22}+N'_{23})^3\} + (t_{22}l_{22}/3N'_{22}b^2) \times \{(N'_{22}+N'_{23})^3 - N'^3_{23}\} + t_{23}l_{23}N'^2_{23}/3b^2 + t_g l_g N'^2_2/b^2 + t_3 l_3 N'^2_2/3b^2\,]$$

$X_{32} = 0.7823\ \Omega$

$U_2/U_3 = N_2/N_3$

$U_3 = U_2N_3/N_2$

$U_3 = (100,000 \times 114)/45115$

$U_3 = 250 \quad V$

$I_3U_3 = 5 \quad kVA$

$I_3 = 20 \quad A$

$\epsilon_{32} = (X_{23} \times I_3/U_3) \times 100$

$= 6.26\%$

$R_{32} = (P_2+P_3)/I_3^2$

$= (21.51+225.32)/(20)^2$

$= 0.62 \ \Omega$

$\epsilon_{32} = (R_{23} \times I_3/U_3) \times 100$

$= 4.96\%$

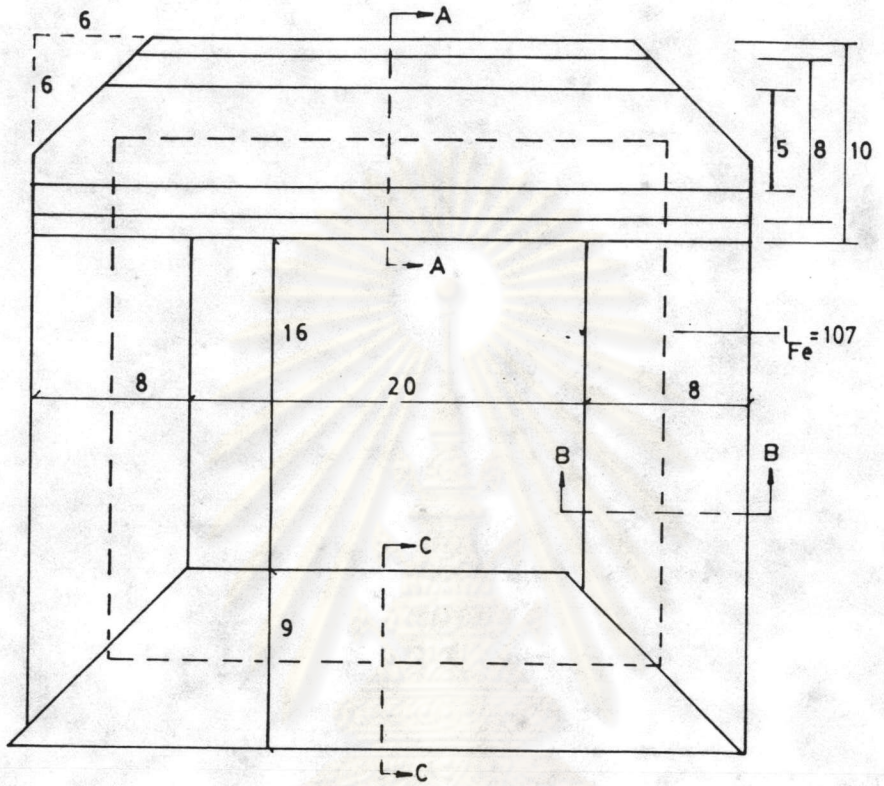
$\epsilon_{sc32} = \sqrt{(\epsilon_{r23})^2+(\epsilon_{x23})^2}$

$= 7.99\%$

3.3.6 <u>แกนเหล็ก</u>

ในการออกแบบแกนเหล็กต้องคำนึงถึงขนาดความกว้างของแผ่นเหล็กซิลิคอนที่มีขายในเชิงการค้า ซึ่งมีความกว้างเป็นเลขเต็มหน่วย และมีความหนา 0.3 mm นำแต่ละแผ่นมาวางซ้อนกันจนได้ รูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ

เมื่อออกแบบขดลวดเรียบร้อยแล้ว รวมทั้งการคำนวณระยะการฉนวนของขดลวดกับแกนเหล็ก ดูการคำนวณในภาคผนวก ค. และจากเงื่อนไขของหม้อแปลงทดสอบรูปร่างของแกนเหล็กจะเป็นดังรูปที่ 3.6 โดยพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กที่ใส่ขดลวดจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมอัดในวงกลม 3 ชั้น พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กบริเวณอื่นจะเป็นแบบสี่เหลี่ยม และมีพื้นที่ภาคตัดขวางใกล้เคียงกับพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กที่ใส่ขดลวด



รูปที่ 3.6 รูปร่างและขนาดของแกนเหล็ก หน่วยเซนติเมตร

จากรูปที่ 3.6 ใช้แฟคเตอร์เนื้อแผ่นเหล็ก K_{Fe} = 0.97

พื้นที่ภาคตัดขวาง A - A

A_{Fe} = (10x3.4+8x3.5+5x2.4) x 0.97

= 71.78 cm^2

พื้นที่ภาคตัดขวาง B - B

A_{Fe} = 8x9.3x0.97

= 72.17 cm^2

พื้นที่ภาคตัดขวาง C - C

A_{Fe} = 9x9.3x0.97

= 81.19 cm^2

จะเห็นได้ว่าภาคตัดขวาง A - A และ B - B ใกล้เคียงกับที่คำนวณไว้ในหัวข้อ 3.2 คือ 71.5 cm^2 ส่วนพื้นที่ของแกนเหล็กที่เป็นฐานนั้นใหญ่กว่าพื้นที่ A - A และ B - B เนื่องจากออกแบบให้แผ่นเหล็กมีความกว้าง 9 เซนติเมตร เมื่อเข้ามุม 45 ° แล้วจะทำให้พื้นผิวของแกนเหล็กในส่วนนี้เสมอกันหมด

ความยาวรอบเฉลี่ยของแกนเหล็ก

l_{Fe} = 2x(20+8)+2x(16+5+4.5)

= 107 cm

= 1.07 m

จากกราฟเรงกระตุ้นเส้นแรงแม่เหล็กของเหล็กซิลิคอน Z7H ในรูปที่ 2-15 เมื่อใช้ความหนาแน่นฟลั๊ก B_c = 1.4 Wb/m^2 จะมีค่าแอมแปร์-เทิร์นต่อเมตรดังนี้

NI/l = 15 A-T/m

ดังนั้นแอมแปร์เทิร์นสำหรับครบรอบวงจรแกนเหล็ก

NI = 15x1.07 = 16.05 A-T

แอมแปร์-เทิร์น สำหรับสี่รอยต่อซึ่งเป็นช่องอากาศ มีค่า = $(B_g/\mu_o).l_g$

B_g = B_c = 1.4 wb/m^2

l_g = ความยาวช่องอากาศรวม ซึ่งขึ้นอยู่กับเทคนิคการเรียงแผ่นเหล็ก

ในที่นี้กำหนดค่า l_g = 0.2 mm

l_g = $0.2x10^{-3}$ m

μ_o = $4\pi x10^{-7}$ H/m

แอมแปร์-เทิร์น ตรงสี่รอยต่อ = $(1.4x0.2x10^{-3})/4\pi x10^{-7}$

= 222.82 A-T

แอมแปร์-เทิร์นทั้งหมด $NI = 16.05+222.82$

$= 238.87$ A-T

กระแสยังผลที่ใช้สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก โดยคิดเทียบค่าแรงดันต่ำ

$$I_m = (NI)/(\sqrt{2}N_1)$$

$$= 238.87/(\sqrt{2}x100)$$

$$= 1.69 \quad A$$

น้ำหนักแกนเหล็กคิดจากความหนาแน่น $7.65x10^3$ Kg/m^3

$$W_{Fe} = (A_{Fe}/0.97)xl_{Fe}x7.65x10^3$$

W_{Fe} = [(พื้นที่ภาคตัดขวาง A-A x ความยาวแกนเหล็กในภาคตัด A-A)

+ (พื้นที่ภาคตัดขวาง B-B x ความยาวแกนเหล็กในภาคตัด B-B) x 2

+ (พื้นที่ภาคตัดขวาง C-C x ความยาวแกนเหล็กในภาคตัด C-C)]

$x7.65x10^3/0.97$

$W_{Fe} = [(71.78x10^{-4}x0.28)+(72.17x10^{-4}x0.255)x2$

$+(81.19x10^{-4}x0.28)]x7.65x10^3/0.97$

$= 62.81$ Kg

จากกราฟ รูปที่ 2-17 กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อน้ำหนักแกนเหล็กที่ 1.4 Wb/m^2 มีค่าเท่ากับ 0.72 w/Kg

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก $P_{Fe} = 0.72x62.81$

$= 45.22$ W

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กเพิ่มเนื่องจากรอยต่อ การแคลัมป์ อีก 20%

เพราะฉะนั้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กรวม

$$P_{Fe} = 45.22x1.2$$

$= 54.26$ W

กระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก $I_R = P_{Fe}/U_1$

$= 54.26/220$

$= 0.25$ A

ดังนั้นกระแสป้อนเข้าขณะไม่มีโหลด $I_o = \sqrt{I_m^2 + I_R^2}$

$= \sqrt{(1.69)^2+(0.25)^2}$

$= 1.71$ A

คิดเป็น 7.52% ของกระแสที่กำหนด I_1

3.4 <u>การออกแบบตัวถัง</u>

ตัวถังที่ออกแบบเป็นตัวถังฉนวน วัสดุที่ใช้เป็นท่อ พี.วี.ซี. เส้นผ่านศูนย์กลาง 39 เซนติเมตรมีความหนา 1.5 เซนติเมตร ระยะฉนวนระหว่างขั้วแรงดันสูงกับขั้วนิวตรัล ไม่ต่ำกว่า 2 kV/cm [18] เนื่องจากต้องการออกแบบความสูงให้มีระยะใกล้เคียงกับหม้อแปลงทดสอบขนาด 100 kV 5 kVA จากต่างประเทศ เพื่อสามารถที่จะใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ร่วมกันได้ ระยะที่ใกล้เคียง คือ 65 เซนติเมตร อิเล็กโทรด ซึ่งเป็นฝาปิดครอบด้านบนและด้านล่าง จะเหลื่อมเข้าไปข้างละ 2.5 เซนติเมตร เพราะฉะนั้นจะเหลือระยะฉนวน 59 เซนติเมตร คิดแรงดัน 120 kV ซึ่งเผื่อแรงดันเกิน 20% จะได้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวเฉลี่ย

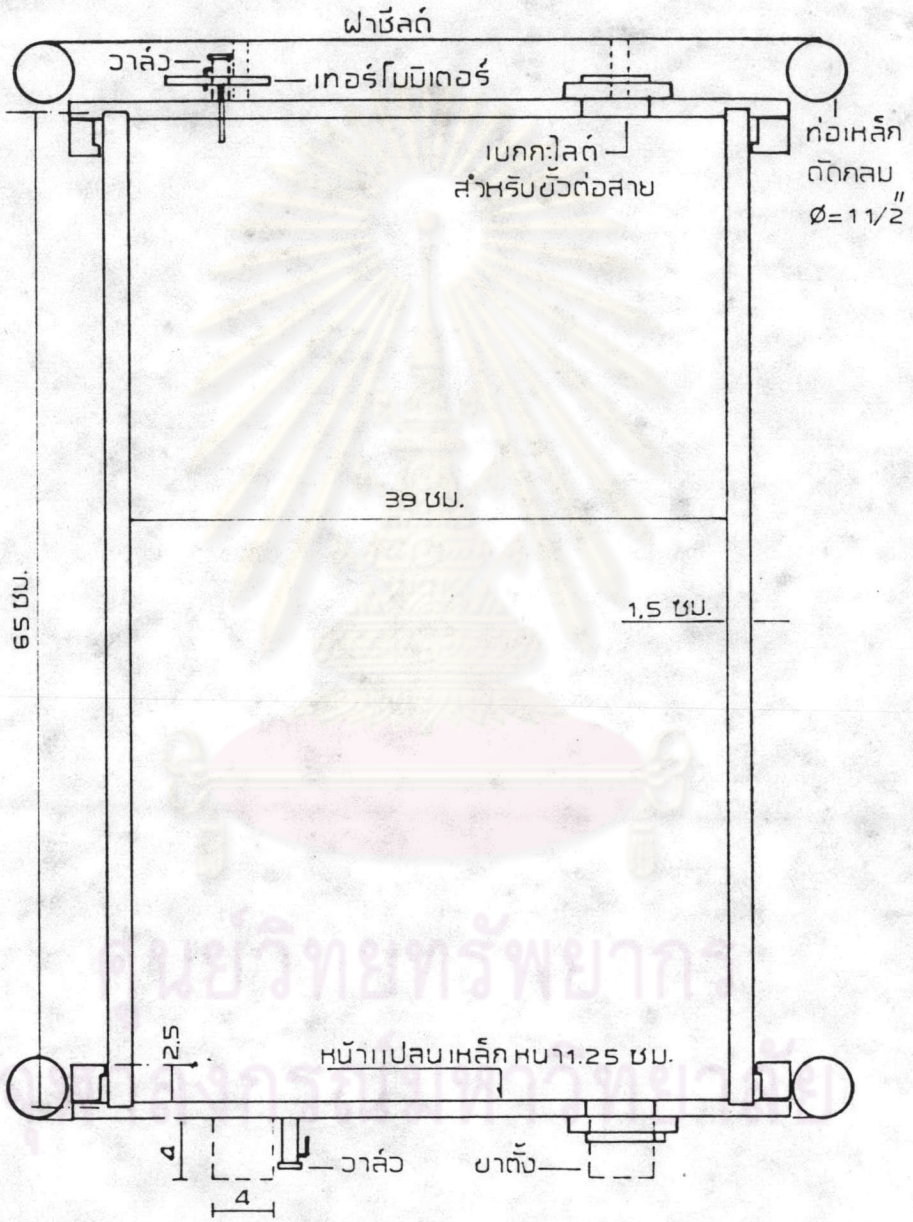
$$120/59 = 2.03 \quad kV/cm$$

จากหัวข้อ 2.8 ผลของการทดลองพบว่าถังฉนวน พี.วี.ซี. ตามที่ออกแบบในรูปที่ 3.7 จะมีความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิว

$$E_b = 3.56 \quad kV/cm$$

ดังนั้น ระยะความสูงที่กำหนด จะมีแฟกเตอร์ความปลอดภัย = $3.56/2.03 = 1.75$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 เป็นลักษณะรูปร่างห้องแปลงทดสอบที่ออกแบบ