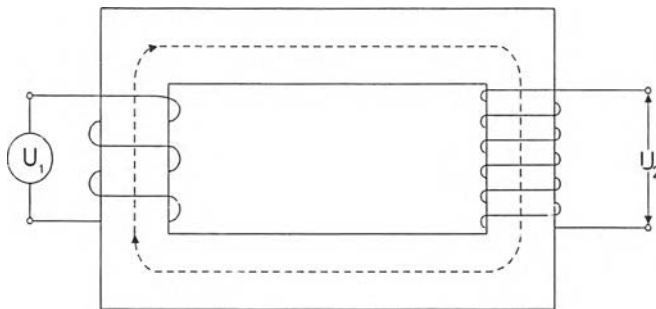


บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการของหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการถ่ายทอดพลังงานจากแรงดันระดับหนึ่งไปสู่แรงดันอีกระดับหนึ่ง โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ขดลวดป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าและขดลวดจ่ายกำลังไฟฟ้า และส่วนที่สองคือแกนเหล็กซึ่งเป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) ϕ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยอาศัยหลักการทำงานที่มีเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ (magnetic flux) และขดลวดที่เส้นแรงแม่เหล็กมาคล้องเกี่ยวแล้วจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ $u(t)$ ขึ้นที่ขดลวดตามความสัมพันธ์ [4]

$$u(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กในเทอมเวลา $\phi(t) = \phi_m \sin \omega t$ (2.2)

และได้แรงดันเหนี่ยวนำเป็นค่า rms $U_{rms} = 4.44fN\phi_m$ (2.3)

โดยที่ N คือจำนวนรอบขดลวด

f คือความถี่ที่ใช้งาน (Hz)

ϕ_m คือเส้นแรงแม่เหล็กค่ายอดที่คล้องขดลวด (Wb)

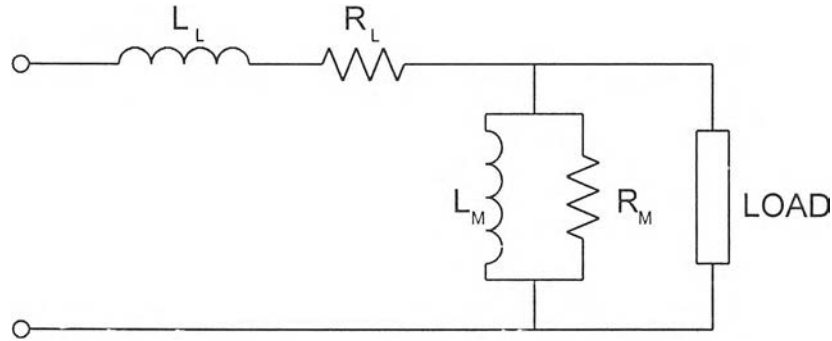
ω คือ อัตราเร็วเชิงมุมของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นไซน์ (rad/sec)

U_{rms} คือ ค่า root mean square ของแรงดันเหนี่ยวนำ (V)

จากสมการแสดงให้เห็นว่าถ้ากำหนดให้ความถี่คงที่ แรงดันเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบขดลวดและปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก นั่นคือถ้าต้องการให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงมากขึ้นจะทำโดยพันขดลวดให้มีจำนวนรอบมากขึ้น

2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลง

ในทางไฟฟ้าคุณลักษณะของหม้อแปลงอาจอธิบายได้ด้วยวงจรสมมูลของหม้อแปลงจะประกอบด้วย ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก ความต้านทานที่แทนกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ความต้านทานของขดลวดและค่าความเหนี่ยวนำรั่วรูปที่ 2.2 โดยสามารถหาได้จาก กฎของแอมแปร์ทำให้เกิดวงจรแม่เหล็ก [4]



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลง [5]

$$NI = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \phi \left(\frac{l_i}{\mu_i A_i} + \frac{l_a}{\mu_o A_a} \right) \quad (2.4)$$

$$\Psi = N\phi = \left(\frac{1}{\frac{l_i}{N^2 \mu_i A_i} + \frac{l_a}{N^2 \mu_o A_a}} \right) \times I \quad (2.5)$$

$$L_M = \left(\frac{1}{\frac{l_i}{N^2 \mu_i A_i} + \frac{l_a}{N^2 \mu_o A_a}} \right) \quad (2.6)$$

โดยที่ \vec{H} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m)

l_i คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางผ่านของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (m)

l_a คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางผ่านของเส้นแรงแม่เหล็กในแกปอากาศ (m)

A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m²)

A_a คือ พื้นที่หน้าตัดของแกปอากาศ (m²)

μ_i คือ สภาพซึมซับได้ของแกนเหล็ก $\left(\frac{\text{Wb}}{\text{A} \times \text{m}} \right)$

μ_a คอ สภาพซมซบไดของอากาศ $(\frac{Wb}{A \times m})$

L_m คอ ความเหนยวนำแม่เหลกของหม้อแปลง (H)

R_m คอ ความต้านทานแทนความสูญเสยในแกนเหลก (Ω)

L_L คอ ความเหนยวนำรัวของหม้อแปลง (H)

R_L คอ ความต้านทานของขดลวดของหม้อแปลง (Ω)

จากสมการจะเห็นไดว้ความเหนยวนำแม่เหลกจะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ทำแกนเหลกและช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้นจากการประกอบสร้าง

2.3 หม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบ คอ หม้อแปลงที่ใช้สร้างแรงดันสูงเพื่อศีกษาปรากฏการณ์เกี่ยวกับไฟฟ้าแรงสูง ใช้ทดสอบวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง มีลักษณะกระเสจ่ายต่ำ แรงดันป้อนเข้าต่ำ และมีกำลังไฟฟ้า น้อยเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ทั้งนี้เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบนั้น โดยทั่วไปจะป้อนให้ แก่ฉนวนซึ่งมีลักษณะเสมือนค่าเก็บประจุจึงใช้กระเสจ่ายน้อยกว่า 0.5 A ยกเว้น วัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบบาง ชนิดจะใช้กระเสสูง เช่น ตัวเก็บประจุ เคเบิล หรือลูกถ้วยฉนวนประอบเมื่ออาจใช้กระเสสูงถึง 1 A จึงต้อง มีกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายให้กับโหลดดังกล่าว

โดยทั่วไปหม้อแปลงทดสอบจะเป็นเฟสเดี่ยว และมักใช้ทำให้เกิดการเบรกดาวบนฉนวนของ อุปกรณ์ทดสอบ หม้อแปลงทดสอบจะกำหนดด้วย [5]

- แรงดันป้อนเข้าและแรงดันจ่ายออก
- กระเสที่ป้อนเข้าและกระเสที่จ่ายออก
- กำลังไฟฟ้ากำหนดของหม้อแปลง
- แรงดันลัดวงจร
- ความถี่
- ระดับแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา
- ลักษณะโครงสร้างและการฉนวน

2.3.1 ขนาดแรงดันกำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

การกำหนดขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบสูงสุดที่มี โอกาสจะใช้ อย่างน้อยที่สุดต้องสูงกว่าค่าแรงดันที่คงอยู่ได้ของวัสดุทดสอบที่ใช้กับระบบแรงดันที่กำหนด ในกรณีการเกิดการวบไฟตามผิว เกิดเบรกดาวหรือเจาะทะลุ แรงดันที่ใช้ทดสอบจะต้องสูงขึ้นไปเพียงพอ กับการเกิดปรากฏการณ์นั้น และเมื่อคำนึงถึงประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน แรงดันที่กำหนดของหม้อแปลง ทดสอบควรจะสูงกว่าแรงดันทดสอบประมาณ 10 ถึง 20 เปอร์เซนต์

2.3.2 ขนาดกระแสที่กำหนดและกำลังของหม้อแปลงทดสอบ

กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้กับวัสดุทดสอบประเภทใด เนื่องจากถ้าวัสดุทดสอบวัสดุจะมีค่าความจุไฟฟ้าต่างกัน ค่ากระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบอาจคำนวณได้จากสมการ

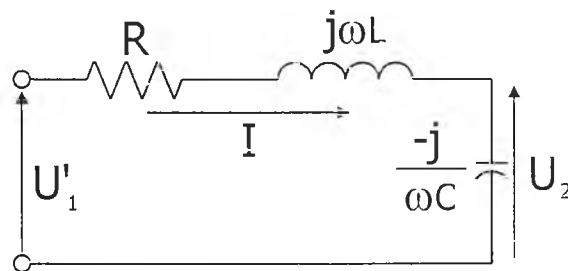
$$I = \omega CU \quad (2.7)$$

กรณีการทดสอบ ให้เกิดเบรกดาวน์ หรือเจาะทะลุ จะเกิดการลัดวงจรชั่วคราว กระแสลัดวงจรจะ ต้องสูงพอเพื่อให้สังเกตเห็นความผิดปกติของฉนวนได้ชัดเจน จากความต้องการกระแสสูงทำให้หม้อแปลง จะต้องสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้สูงพอตามด้วย กำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าจะสามารถคำนวณจากสมการ

$$S = UI = \omega CU^2 \quad (2.8)$$

2.3.3 กำลังและกระแสลัดวงจร

โดยที่วัสดุทดสอบทั่วไปจะเป็นโหลดประเภทตัวเก็บประจุ และเมื่อพิจารณาวงจรสมมูลอย่างง่ายของ หม้อแปลงดังรูปที่ 2.3 [5] จะประกอบไปด้วย ความต้านทานและความเหนี่ยวนำ และค่าอิมพีแดนซ์ของ ความเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงกว่าความต้านทานมากจึงทำให้เกิดแรงดันคร่อมวัสดุทดสอบที่มีลักษณะเป็นตัวเก็บ ประจุมีค่าสูงกว่าแรงดันที่คิดจากผลคูณแรงดันต้านเข้ากับอัตราส่วนแรงดัน



รูปที่ 2.3 วงจรอย่างง่ายของหม้อแปลง

เมื่อจะเลยผลของความต้านทาน R เนื่องจากมีค่าน้อยเทียบกับค่า ωL สามารถคำนวณแรงดันที่คร่อมตัวเก็บ ประจุ C ได้ตามสมการ 2.9

$$U_2 = U'_1 - j\omega LI = U'_1 + j\omega L \times U_2 j\omega C \quad (2.9)$$

$$U_2 = \frac{U'_1}{1 - \omega^2 LC} \quad (2.10)$$

เมื่อเกิดการเบรกดาวน์หรือการรวบไฟตามผิวของวัสดุทดสอบจะทำให้แรงดันด้านที่ป้อนเข้าหม้อแปลงตกคร่อมค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเท่านั้น

อัตราส่วน ΔU_n เทียบกับแรงดันจ่ายออก U_{2n} ที่กำหนด เรียกว่าแรงดันลัดวงจร (Short circuit voltage) นั่นคือ

$$\epsilon_{sc} = \frac{\Delta U_n}{U_{2n}} = \frac{I_{2n} \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}{U_{2n}} \quad (2.11)$$

เมื่อกำหนดกระแสฟัด I_n และแรงดันลัดวงจรให้จะสามารถคำนวณกระแสลัดวงจรได้ คือ

$$I_{sc} = \frac{I_n}{\epsilon_{sc}} \quad (2.12)$$

และกำลังไฟฟ้าลัดวงจรจะหาได้จากสมการ

$$S_{sc} = \frac{S_n}{\epsilon_{sc}} \quad (2.13)$$

โดยที่ I_n คือ กระแสฟัดของหม้อแปลง

U_n คือ แรงดันฟัดของหม้อแปลง

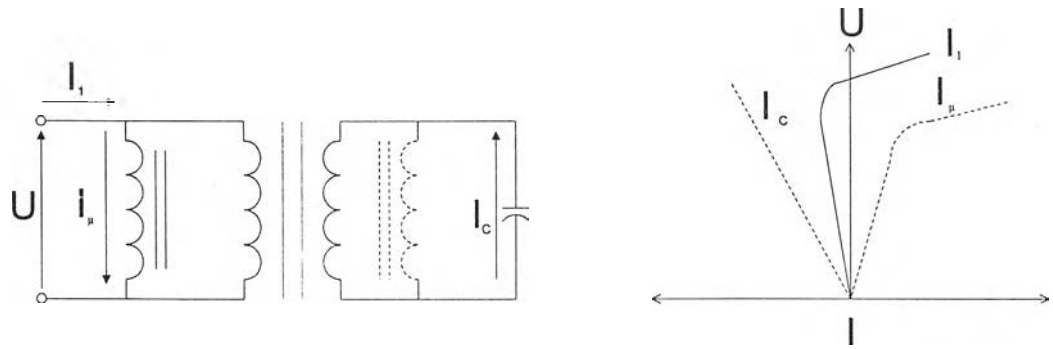
ϵ_{sc} คือ อัตราส่วนแรงดันลัดวงจรของหม้อแปลง

I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรของหม้อแปลง

S_{sc} คือ กำลังไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลง

2.3.4 กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าของหม้อแปลงทดสอบ

การเพิ่มหรือลดระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบที่ได้จากหม้อแปลงทดสอบ สามารถทำได้โดยหม้อแปลงปรับแรงดัน (Regulating transformer) ป้อนกำลังให้กับหม้อแปลงทดสอบ หม้อแปลงปรับแรงดันจะต้องมีกำลังไฟฟ้าที่สูงพอที่จะจ่ายให้แก่หม้อแปลงทดสอบ ในกรณีที่วัสดุมีค่าเก็บประจุสูง จะใช้กระแสสูงทำให้ต้องใช้หม้อแปลงปรับแรงดันที่มีกำลังไฟฟ้าสูง ฉะนั้นเพื่อลดขนาดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงปรับแรงดันโดยการลดกระแสจ่ายออกของหม้อแปลงปรับแรงดัน ทางหนึ่งอาจทำได้โดยวิธีชดเชยกระแส เช่น ใช้รีแอคเตอร์ต่อขนานเข้ากับหม้อแปลงทดสอบด้านป้อนเข้าหรือจ่ายออกดังรูปที่ 2.4 [6]

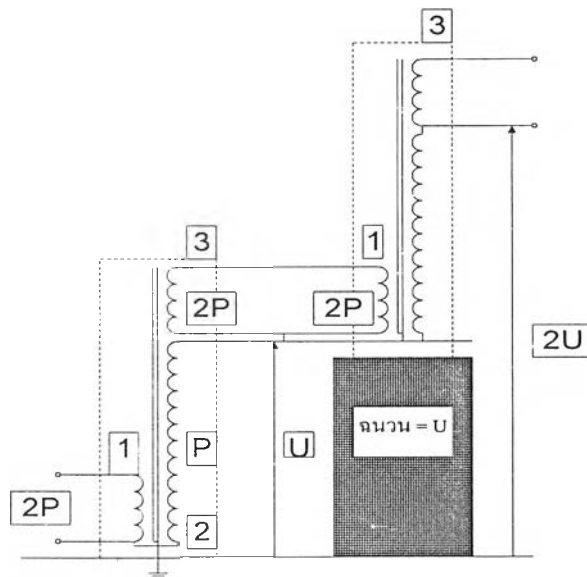


รูปที่ 2.4 วงจรการต่อรีแอกเตอร์เพื่อชดเชยโหลด

ในกรณีการทดสอบความเปราะเื้อนของลูกถ้วยฉนวน โหลดจะมีลักษณะของความต้านทานรวมอยู่ด้วย การใช้รีแอกเตอร์เพื่อชดเชยกระแสโหลดจึงไม่สามารถทำได้

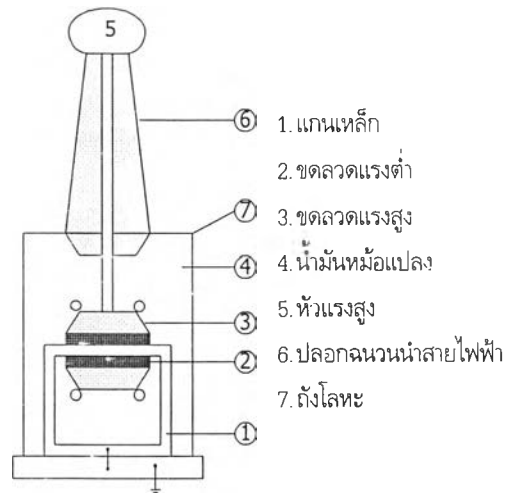
ถ้าต้องการใช้แรงดันทดสอบสูงมากขึ้น อาจสร้างแรงดันสูงได้โดยใช้หม้อแปลงทดสอบต่อแบบชั้นบันได การต่อแบบชั้นบันไดจะต้องมีขดลวดเพิ่มอีกหนึ่งชุดที่ เรียกว่า ขดลวดต่อควบ (Coupling winding) ทำหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานจากหม้อแปลงตัวล่างไปยังหม้อแปลงตัวบนดังรูปที่ 2.5 [5]

ข้อดีของการต่อหม้อแปลงแบบชั้นบันได คือ ประหยัดฉนวนหม้อแปลงจะมีขนาดเล็กเหมาะต่อการเคลื่อนย้าย แต่จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วมากขึ้นเพราะจะมีการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจากหม้อแปลงชุดล่างซึ่งจะใช้เป็นแรงดันเหนี่ยวนำของหม้อแปลงชั้นถัดไป



รูปที่ 2.5 การต่อชั้นบันไดของหม้อแปลง 1) ขดลวดแรงต่ำ 2) ขดลวดแรงสูง 3) ขดลวดต่อควบ

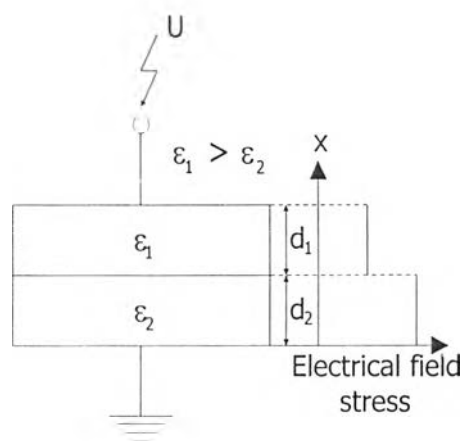
หม้อแปลงทดสอบที่มีกระแสจ่ายออกหรือกำลังไฟฟ้าสูง โดยทั่วไปจะเป็นหม้อแปลงทดสอบแบบตัวถังเหล็กเพื่อให้การระบายความร้อนดีขึ้น โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบแบบตัวถังเหล็กจะประกอบด้วย ขดลวด แกนเหล็ก และการฉนวนจะจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงบรรจุในถังเหล็กดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของหม้อแปลงจุ่มน้ำมันแบบตัวถังโลหะ

2.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการใช้วัสดุฉนวนต่างชนิดกัน

การกระจายของแรงดันที่ตกคร่อมฉนวนที่มีลักษณะเป็นชั้นโดยแต่ละชั้นของฉนวนเป็นวัสดุต่างชนิดกันและมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าต่างกัน แรงดันกระจายในแต่ละวัสดุฉนวนจะแตกต่างกันซึ่งเป็นผลให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในของวัสดุฉนวนมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง โดยที่บริเวณรอยต่อของวัสดุที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสูงกว่าจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าวัสดุที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าทางไฟฟ้าต่ำกว่า พิจารณาการป้อนแรงดันตกคร่อมฉนวนสองชนิดที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แรงดันกระจายบนฉนวนต่างชนิดกัน

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย คือ
$$E = \frac{U}{d_1 + d_2} \quad (2.14)$$

วัสดุ 1 มีค่า สภาพยอม พื้นที่หน้าตัดและความหนา คือ ϵ_1, A_1, d_1

วัสดุ 2 มีค่า สภาพยอม พื้นที่หน้าตัดและความหนา คือ ϵ_2, A_2, d_2

ค่าความเก็บประจุของวัสดุ 1
$$C_1 = \frac{\epsilon_1 A_1}{d_1} \quad (2.15)$$

ค่าความเก็บประจุของวัสดุ 2
$$C_2 = \frac{\epsilon_2 A_2}{d_2} \quad (2.16)$$

แรงดันที่ตกคร่อมวัสดุ 2 คือ
$$U_2 = \left(\frac{d_1}{\frac{\epsilon_1 A_1}{d_1} + \frac{\epsilon_2 A_2}{d_2}} \right) \times U \quad (2.17)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัสดุ 2 เมื่อคิด $A_1 = A_2$ คือ

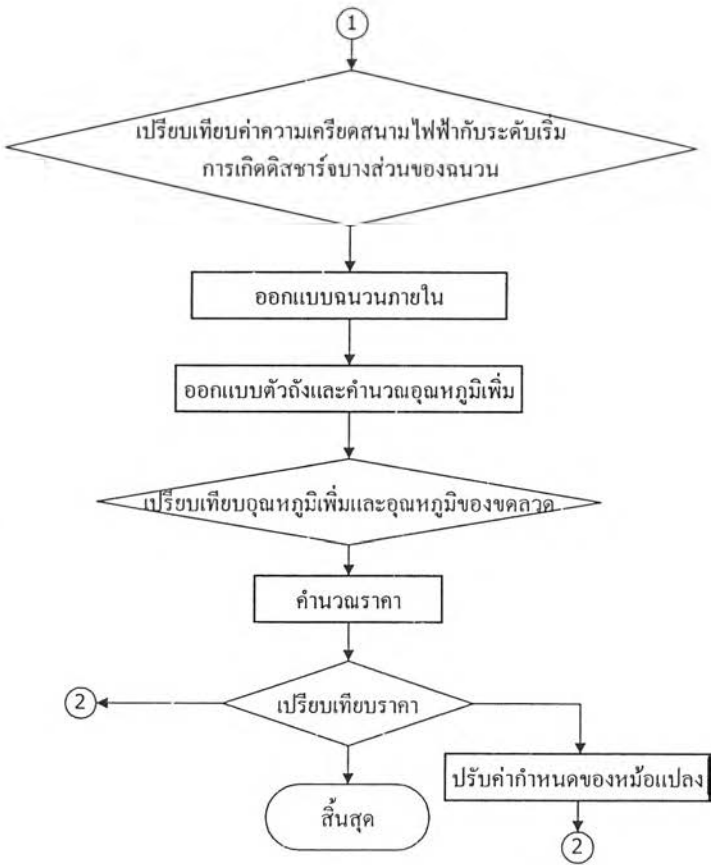
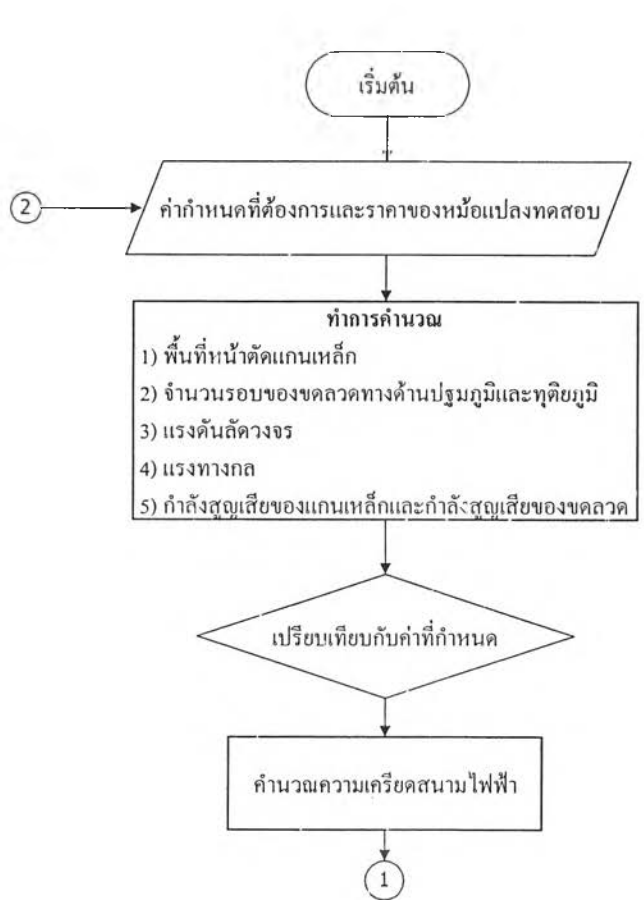
$$E_2 = \left(\frac{\epsilon_1 (d_2 + d_1)}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \right) \times \frac{U}{(d_2 + d_1)} = \left(\frac{\epsilon_1 (d_2 + d_1)}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \right) \times E \quad (2.18)$$

ถ้าพิจารณาที่ $d_1 = d_2$ และ $\epsilon_1 = 2\epsilon_2$ จะได้ค่า $E_2 = 1.33 E$

การฉนวนหม้อแปลงด้วยกระดาษฉนวนและใช้น้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม การออกแบบฉนวนกระดาษให้มีความหนาและทำให้แก่น้ำมันมีขนาดเล็ก จะทำให้แรงดันส่วนใหญ่ไปตกคร่อมแก่น้ำมัน อาจจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในแก่น้ำมันมีค่าสูงกว่าค่าความคงทนทางไฟฟ้าของน้ำมันได้ ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดดีสชาร์จบางส่วนและเกิดเบรกดาวนในที่สุด

2.5 หลักการออกแบบหม้อแปลงทดสอบ

การออกแบบหม้อแปลงจะมีตัวแปรหลายตัวที่มีความสำคัญต่อการออกแบบไม่ว่าจะเป็น ขนาดของแกนเหล็ก ขนาดของขดลวด จำนวนรอบของขดลวด ความหนาของฉนวน การถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง การออกแบบจำเป็นต้องเลือกสุมตัวแปรบางตัวขึ้นมาก่อน และใช้การคำนวณย้อนกลับไปกลับมา จนได้ค่าตัวแปรต่างๆ ตามต้องการ ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการออกแบบ

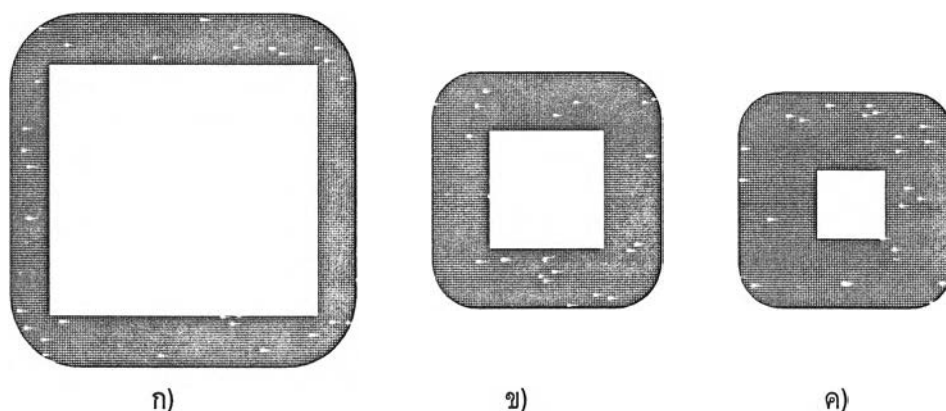
2.5.1 แกนเหล็ก

แกนเหล็กจะทำหน้าที่เป็นทางผ่านที่ดีของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อให้เกิดความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก โดยพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จำนวนรอบขดลวด และแรงดันจะสัมพันธ์กันตามสมการ 2.3 ถ้าความถี่แรงดัน และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่คล่องขดลวดคงที่จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก กับจำนวนรอบขดลวดดังสมการ

$$NA = k \quad (2.19)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่

ถ้าจำนวนรอบขดลวดมีค่ามากจะทำให้พื้นที่แกนเหล็กมีค่าน้อย และเมื่อพื้นที่แกนเหล็กมีค่ามากจะทำให้จำนวนรอบขดลวดน้อย ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 แสดงถึงพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก(ไม่แรงงา) และ พื้นที่หน้าตัดขดลวดตามแนวพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (แรงงา) เมื่อทำการลดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กและเพิ่มจำนวนขดลวดให้ได้แรงดันคร่อมขดลวดคงที่ ตามลำดับ ก), ข), ค)

จากสมการที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าพื้นที่หน้าตัดขวางของแกนเหล็กขึ้นกับจำนวนรอบขดลวดและอีกหลายตัวแปร การลองสุ่มเลือกจำนวนขดลวดและตัวแปรอื่นๆ เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและทำการคำนวณย้อนกลับไปกลับมา จะทำให้เสียเวลามากจึงจำเป็นต้องหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่มีค่าใกล้เคียงค่าที่ดีที่สุดก่อน จะทำให้การคำนวณกลับไปกลับมาเร็วขึ้นและจะทำการหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กดังนี้

$$p_c = p_c \times \delta^2 \quad (2.20)$$

$$P_c = p_c \delta_p^2 V_p + p_c \delta_s^2 (V_t - V_p) \quad (2.21)$$

$$\frac{dP_c}{dV_p} = \frac{dP_c}{dV_s} = p(\delta_p^2 - \delta_s^2) \quad (2.22)$$

เพื่อให้ได้ กำลังสูญเสียของทองแดงต่ำสุดจะนั้น $\delta_p = \delta_s$ (2.23)

โดยที่ p_c คือ กำลังสูญเสียของทองแดงต่อ 1 หน่วยปริมาตร

δ คือ ความหนาแน่น ระบาย

δ_s คือ ความหนาแน่น ระบายของขดลวดปฐมภูมิ

δ_p คือ ความหนาแน่น ระบายของขดลวดทุติยภูมิ

p_c คือ ความหนาแน่นของทองแดง

V_t คือ ปริมาตรรวมของขดลวดทั้งหมด

V_p คือ ปริมาตรของขดลวดปฐมภูมิ

V_s คือ ปริมาตรของขดลวดทุติยภูมิ

$$A_c = T_p a_p + T_s a_s = \frac{(T_p I_p + T_s I_s)}{\delta} = \frac{2AT}{\delta} \quad (\text{เมื่อไม่คิดผลของ ระบายแม่เหล็ก}) \quad (2.24)$$

$$K_w = \frac{A_c}{A_w} \quad (2.25)$$

$$AT = \frac{A_c \delta}{2} = \frac{K_w A_w \delta}{2} \quad (2.26)$$

$$S = U_p \times I_p = 4.44 f \phi_m K_w A_w \frac{\delta}{2} = 2.22 f \phi_m K_w A_w \quad (2.27)$$

$$\frac{G_i}{G_c} = \frac{A_i l_i g_i}{2 a_p T_p l_{mt} g_c} = \frac{A_i l_i g_i}{K_w A_w l_{mt} g_c} \quad (2.28)$$

$$K_w A_w = \frac{G_c}{G_i} \times \frac{l_i g_c}{l_{mt} g_c} \times A_i \quad (2.29)$$

$$A_i = \sqrt{\frac{1}{2.22 f B_m \delta} \times \frac{l_{mt}}{l_i} \times \frac{g_i}{g_c} \times \frac{G_i}{G_c} \times \sqrt{S}} \quad (2.30)$$

โดยที่ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดรวมของทองแดง

T_p คือ จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ

a_p คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดของขดลวดปฐมภูมิ

T_s คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

a_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดของขดลวดทุติยภูมิ

AT คือ ผลคูณของกระแสกับจำนวนรอบขดลวด

K_w คือ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของทองแดงกับพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนเหล็ก

- A_w คือ พื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนเหล็ก
 A_i คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (m^2)
 f คือ ความถี่ที่ใช้งานของหม้อแปลง (Hz)
 B_m คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่เลือก (T)
 l_{mt} คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวด 1 รอบ (m)
 l_i คือ ความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็ก (m)
 g_i คือ ความหนาแน่นของแกนเหล็ก (kg/m^3)
 g_c คือ ความหนาแน่นของทองแดง (kg/m^3)
 G_i คือ น้ำหนักรวมของแกนเหล็ก (kg)
 G_c คือ น้ำหนักรวมของขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำ (kg)
 x คือ อัตราส่วนกำลังงานที่ใช้งานจริงเทียบกับพิกัดกำลังงานของหม้อแปลง

โดยค่า $\frac{G_i}{G_c}$ จะขึ้นอยู่กับจุดประสงค์การออกแบบ อันได้แก่ราคาต่ำสุด ปริมาตรต่ำสุด น้ำหนัก

เบาสุด หรือประสิทธิภาพสูงสุด

กรณีประสิทธิภาพสูงสุด [7]

$$\eta = \frac{xS}{xS + P_i + x^2 P_c} \quad (2.31)$$

$$\frac{d\eta}{dx} = S(P_i - x^2 P_c) \quad (2.32)$$

ฉะนั้นจะได้ประสิทธิภาพสูงสุด

$$P_i = x^2 P_c$$

$$\frac{P_i}{P_c} = x^2 = \frac{p_i G_i}{p_c G_c} \quad (2.33)$$

$$\frac{G_i}{G_c} = \frac{x^2 p_c}{p_i} \quad (2.34)$$

ค่า $\frac{l_{mt}}{l_i}$ จะมีผลต่อค่าแรงดันลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบ โดยทั่วไปค่านี้จะอยู่ระหว่าง 0.013

ถึง 0.025 [7]

จากสมการ 2.30 พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กจะขึ้นกับกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง ความถี่ใช้งาน ความหนาแน่นกระแส ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด อัตราส่วนน้ำหนักของแกนเหล็กกับขดลวด อัตราส่วนความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็กและขดลวด ระดับแรงดันสูงสุด การออกแบบอาจทำได้หลายแบบ

ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์การออกแบบ ได้แก่ การออกแบบให้กำลังสูญเสียต่ำสุด หรือ ออกแบบให้ได้ราคาต่ำสุด ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กต่างๆกันไปจะเป็นไปตามสมการ [2]

$$A = K\sqrt{S} \quad (2.35)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

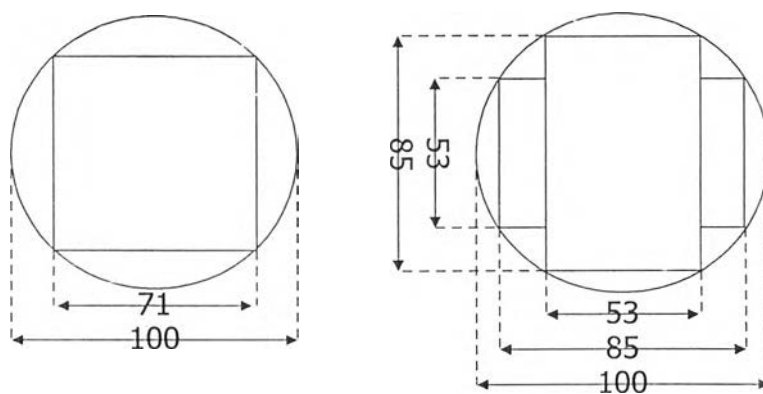
K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆและจุดประสงค์ในการออกแบบที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น

แกนเหล็กจะประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กบางเนื่องจากเหตุการณ์ลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก อันเกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก โดยทั่วไปแผ่นเหล็กจะมีความหนาอยู่ระหว่าง 0.27-0.5 mm. การเลือกใช้แผ่นเหล็กที่มีความหนาน้อยกว่าค่า 0.27 mm. จะทำให้ความสามารถในการรับแรงทางกลไม่ดี แผ่นเหล็กนี้มีส่วนผสมซิลิคอนประมาณ 3-5 % การผสมซิลิคอนเข้าไปเพื่อให้ความต้านทานของแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นเพื่อลดกระแสไหลวนและเพิ่มค่า μ ของแผ่นเหล็ก และวงรอบฮิสเตอร์ิซิสลดลง นั่นคือกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก และลดกระแสแม่เหล็ก

เนื่องจากความจำเป็นในการประกอบแผ่นเหล็กเข้าด้วยกัน แผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจำเป็นต้องชุบฉนวนซึ่งอาจทำจากเกาลินหรือวาร์นิชหรือสารฟอสเฟต เพื่อป้องกันการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างแผ่นเหล็ก ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดกระแสไหลวนเป็นวงรอบได้ กำลังสูญเสียจะเพิ่มขึ้น

การออกแบบหน้าตัดของแกนเหล็กอาจจะทำเป็นหลายชั้น คือ รูปสี่เหลี่ยมอัดภายในวงกลมเพื่อให้สามารถใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าพื้นที่หน้าตัดขวางที่เป็นสี่เหลี่ยม และเหตุผลทางกายภาพในการพันขดลวดให้มีลักษณะเป็นวงกลมได้ง่ายขึ้น ลดการเสียดสีระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก และเมื่อขณะใช้งานจะเกิดแรงระหว่างขดลวดก็จะไม่ทำให้ขดลวดเสียรูป การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กแบบหลายชั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้พื้นที่สูงสุดสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ สำหรับการออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กแบบครุซีฟอรัมหรือแบบ 2 ชั้นให้มีประสิทธิภาพการใช้พื้นที่สูงสุดจะมีลักษณะและขนาดดังรูป 2.9

[7]



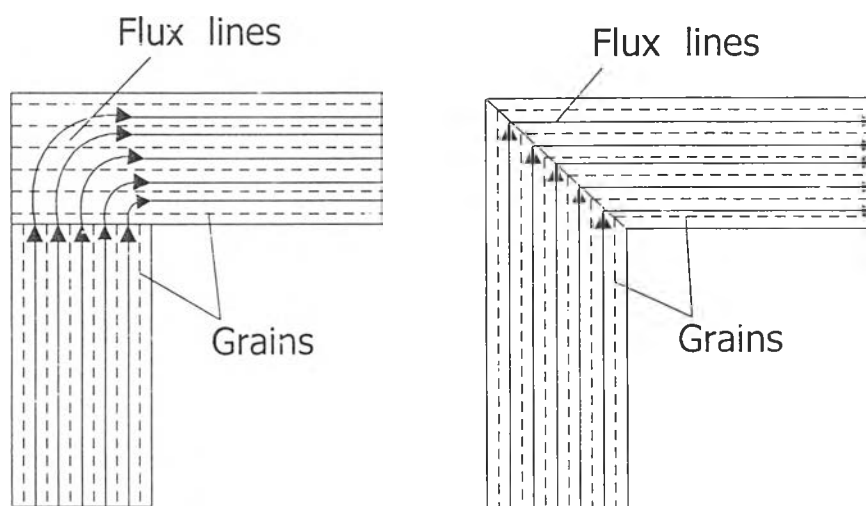
รูปที่ 2.10 ขนาดพื้นที่มากที่สุดภายในวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 หน่วย

ตารางที่ 2.1 ขนาดพื้นที่มากที่สุดที่บรรจุในวงกลมที่มีพื้นที่ 100 ตารางหน่วยเทียบกับจำนวนชั้นของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก [7]

รูปแบบของหน้าตัดแกนเหล็ก	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น
อัตราส่วนของหน้าตัดแกนเหล็กเทียบกับพื้นที่วงกลมล้อมรอบมากที่สุด	64	79	84	87

จากตารางที่ 2.1 การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กให้มีหลายชั้นมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้พื้นที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่การตัดแผ่นเหล็กและการประกอบกันเป็นแกนเหล็กนั้นมีความยุ่งยากมากขึ้นมากเป็นผลให้ค่าแรงในการประกอบสร้างแกนเหล็กมากขึ้น ฉะนั้นในการสร้างท่อแปลงจำนวนน้อยตัวจึงพยายามออกแบบจำนวนชั้นของหน้าตัดแกนเหล็กให้น้อยที่สุด นอกจากนี้ถ้าออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กในแต่ละด้านมีความแตกต่างของจำนวนชั้นมาก จะทำให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกระแสน้ำแม่เหล็กสูงขึ้นตามความแตกต่างของจำนวนชั้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงช่องทางไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก

การตัดแผ่นเหล็กแบบมุมฉากจะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กไม่สะดวก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งข้ามรอยต่อของแผ่นเหล็ก และการที่เส้นแรงแม่เหล็กข้ามแผ่นเหล็กจากแผ่นหนึ่งไปอีกแผ่นหนึ่ง เส้นแรงแม่เหล็กจะไหลในทิศทางตั้งฉากกับการเรียงตัวของเกรนเหล็ก ซึ่งทิศทางนี้แผ่นเหล็กจะมีค่าสภาพซึมซับเป็นหนึ่งในสิบถึงหนึ่งในเจ็ดเท่าของทิศทางที่เกรนของเหล็กเรียงตัวอยู่ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะกลับทิศทางไหล เป็นผลให้ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกระแสทำแม่เหล็กสูงขึ้น การแก้ปัญหานี้จะทำโดยตัดแผ่นเหล็กเป็นมุม 45° ซึ่งจะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กสะดวกขึ้น ลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและลดค่ากระแสทำแม่เหล็ก



รูปที่ 2.11 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่การตัดแผ่นเหล็กแบบมุมฉากและมุม 45 องศา [3]

การจัดวางแผ่นเหล็กที่ละลายแผ่นสลับกัน ทำให้มีช่องอากาศกว้างขึ้นและส่งผลถึงการไหลที่ไม่สะดวกของเส้นแรงแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนจะวิ่งข้างช่องอากาศและบางส่วนจะวิ่งอ้อมไปยังแผ่นเหล็กด้านข้าง เนื่องจากสภาพซึมซับได้ของแผ่นเหล็กมีค่าสูงกว่าอากาศมากทำให้แผ่นเหล็กบางแผ่นที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านมากกว่าค่าเฉลี่ย นั่นคือแกนเหล็กจะมีค่ากำลังสูญเสียเพิ่มขึ้น และมีกระแสท่าแม่เหล็กสูงขึ้น แต่การจัดวางแผ่นเหล็กที่ละลายแผ่นจะมีความยากลำบากมากเนื่องจากแผ่นเหล็กมีความหนาแน่นมาก ในการวางแผ่นเหล็กในโรงงานอุตสาหกรรมยอมให้วางแผ่นเหล็กถึง 8 แผ่นทับ 8 แผ่น

การเลือกความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดจะต้องเลือกระดับที่ต่ำกว่าระดับการอิ่มตัวของแกนเหล็ก เพื่อให้ได้รูปคลื่นที่เป็นรูปไซน์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแกนเหล็กด้วย ดังตัวอย่างในรูปที่ 4 แกนเหล็กจะอิ่มตัวที่ 1.6 เทสลา เราเลือกความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ประมาณ 1.4 เทสลาเพื่อป้องกันการอิ่มตัว

แกนเหล็กจะต้องรับแรงทางกลอันเกิดจากน้ำหนักของตัวเอง และน้ำหนักของขดลวด ฉะนั้นแผ่นเหล็กที่ทำการเรียงเสร็จแล้ว จะต้องยึดติดให้แน่นซึ่งอาจทำได้โดยใช้แผ่นเหล็กประกบที่คั่นด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า หรืออาจจำเป็นต้องเจาะแกนเหล็กเพื่อทำการใส่สอดกับสลักเกลียวถ้าแกนเหล็กนั้นจำเป็นต้องรับน้ำหนักมากๆ นอตกับสลักเกลียวจะต้องทำการหุ้มฉนวน หรืออาจใส่สอดกับสลักเกลียวที่ทำมาจากฉนวน เพื่อป้องกันการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าระหว่างแกนเหล็กกับนอตและสลักเกลียว ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลวนเป็นผลให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็กเพิ่มขึ้น

2.5.2. ขดลวด

ขดลวดเป็นส่วนประกอบสำคัญของการสร้างแรงดันของหม้อแปลง แรงดันจะขึ้นกับจำนวนของขดลวด จำนวนรอบของขดลวดและจำนวนขดลวดสามารถประมาณจากคำนวณได้ดังสมการ

$$N = \frac{U}{4.44fB_m A_i} \quad (2.36)$$

ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับชนิดของแกนเหล็กและจุดประสงค์ที่ใช้ในการออกแบบ โดยที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะต้องไม่อยู่ในย่านอิ่มตัวของแกนเหล็ก ผลการคำนวณขดลวดที่ได้จะนำมาหาจำนวนขดลวดโดยประมาณจำนวนขดลวดที่ลงตัว การปัดเลขขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับค่าจำนวนขดลวดที่ได้นั้นทำให้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนไปเป็นค่าที่ยอมรับได้หรือไม่

การเลือกชนิดวัสดุที่จะนำมาทำเป็นขดลวด จะพิจารณาจากน้ำหนักต่อปริมาตร สภาพต้านทานความแข็งแรงทางกล ความคงทนต่อความกัดกร่อน การขยายตัวและราคาของวัสดุ วัสดุที่นิยมใช้ในการพันขดลวดโดยทั่วไปจะใช้ทองแดงหรืออะลูมิเนียมซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของทองแดงกับอะลูมิเนียม [7]

คุณสมบัติ	ทองแดง	อะลูมิเนียม
1. ความหนาแน่น (kg/m^3)	8900	2700
2. จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	1083	660
3. สภาพการนำความร้อน ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)	350	200
4. สภาพต้านทาน Ωm .	0.01724×10^{-6}	0.0287×10^{-6}
5. สัมประสิทธิ์ความต้านทานต่อ 1°C ที่ 20°C	0.00396	0.0039
6. สัมประสิทธิ์การขยายตัวต่อ 1°C ที่ 20°C	1.67×10^{-6}	25.5×10^{-6}
7. ความจุความร้อนจำเพาะ $\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$	390	240
8. ความแข็งแรงทางกลจำเพาะที่อุณหภูมิ 20°C MN/m^2	220-250	120-150

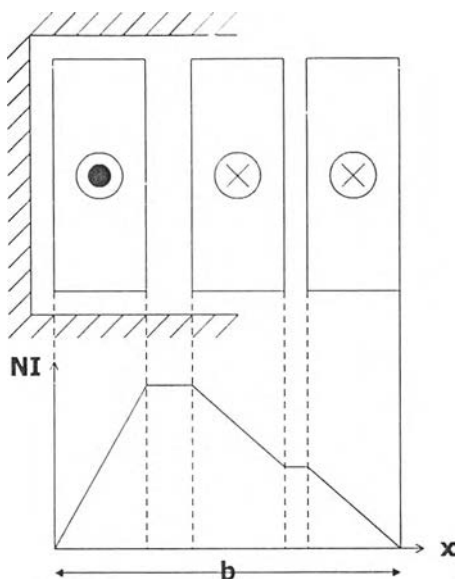
ขดลวดต่างๆ ในหม้อแปลงตัวหนึ่งควรจะทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน เพราะการใช้วัสดุต่างชนิดกัน เมื่อมีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาเคมีแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกัน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสนิมของขดลวดเมื่อใช้งานจะทำให้กำลังสูญเสียในขดลวดเพิ่มสูงขึ้น สนิมบางส่วนอาจหลุดลงไปในน้ำมันเป็นสาเหตุของการเกิดดีเอสอาร์บางส่วน ซึ่งจะนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด

การเลือกหน้าตัดของสายตัวนำระหว่างหน้าตัดวงกลมกับหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะใช้กับระดับแรงดันต่ำเนื่องจากมีขอบคม การใช้กับระดับแรงดันสูงที่ขอบคมจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง มีความลำบากในการเคลือบฉนวนโดยเฉพาะบริเวณขอบคมฉนวนสามารถหลุดออกได้ง่าย แต่จะมีประโยชน์เรื่องการใช้พื้นที่ในการพันขดลวดสามารถพันขดลวดให้ชิดติดกันได้สะดวก พื้นที่ระหว่างขดลวดน้อยกว่าหน้าตัดแบบวงกลม ความสูงของขดลวดต่ำ ทำให้การพันขดลวดแบบนี้ได้ค่าแรงดันลัดวงจรต่ำ หน้าตัดแบบนี้จึงเหมาะกับขดลวดที่มีพื้นที่หน้าตัดมากๆ และเลือกใช้ในการพันขดลวดแรงต่ำ

หน้าตัดวงกลมเหมาะกับขดลวดที่ต้องการพื้นที่หน้าตัดเล็กๆ เพราะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดจะเล็กจึงต้องลดขอบคมให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

2.5.3. ค่าความเหนียวนำรั้วในหม้อแปลง

ความเหนียวนำรั้วจะมีผลโดยตรงต่อค่าแรงดันลัดวงจร และเป็นสัดส่วนผกผันกับกระแสลัดวงจรของหม้อแปลง ในการทดสอบบางประเภท เช่น การทดสอบลูกถ้วยฉนวนที่สภาวะประเอื้อนั้นจะมีการกำหนดค่ากระแสลัดวงจรไว้ขณะเกิดการวาบไฟตามผิว ฉะนั้นหม้อแปลงทดสอบที่ใช้ในการทดสอบนี้จะต้องมีความเหนียวนำรั้วที่ต่ำพอตามมาตรฐาน



รูปที่ 2.12 แรงขับเคลื่อนทางแม่เหล็กที่เกิดบนขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำ

$$NI = \int \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (2.37)$$

$$d\phi = N(x) \cdot I \cdot \frac{\mu}{l_c} \cdot dA = N(x) \cdot I \cdot \frac{\mu}{l_c} \cdot l_{mt} \cdot dx \quad (2.38)$$

$$d\psi = N(x) \cdot d\phi = \mu N^2(x) \cdot I \frac{l_{mt}}{l_c} \cdot dx \quad (2.39)$$

$$\psi = \mu \cdot I \cdot \frac{l_{mt}}{l_c} \int_0^b N^2(x) dx \quad (2.40)$$

$$L = \frac{\psi}{I} = \mu \cdot \frac{l_{mt}}{l_c} \int_0^b N^2(x) dx \quad (2.41)$$

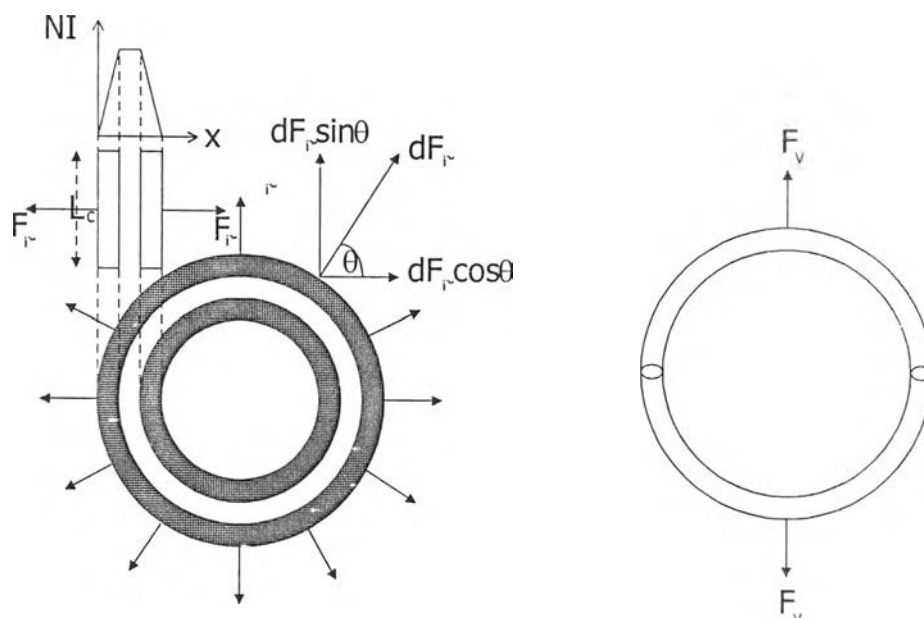
โดยที่ ψ คือ เส้นแรงค้ำรวมของขดลวด (Wb)

I คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวด (A)

l_c คือ ความยาวของทรงกระบอกของขดลวด (m)

2.5.4. การคำนวณแรงทางกลในแวนซ์มี

แรงทางกลที่เกิดขึ้นที่ขดลวดโดยเฉพาะขณะเกิดการลัดวงจร เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบขดลวดให้แข็งแรงพอไม่ให้ขดลวดเกิดการขาดหรือเลื่อนที่ ซึ่งอาจจะทำให้หม้อแปลงเกิดการเสียหายได้



รูปที่ 2.13 แรงทางกลที่เกิดบนขดลวดแรงสูง

จากกฎของแอมแปร์และกฎของ Biot-Savart เราสามารถคำนวณแรงทางกลที่เกิดขึ้นกับขดลวดที่มีกระแสไหลผ่าน สนามแม่เหล็กได้ตามสมการที่ 2.42-2.49 [7]

$$H_m = \frac{NI}{l_c} \quad (2.42)$$

$$H_{av} = \frac{NI}{2l_c} \quad (2.43)$$

$$B_{av} = \mu H_{av} \quad (2.44)$$

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2.45)$$

$$dF = NI \cdot B_{av} \cdot dl = \frac{\mu}{2} (NI)^2 \frac{dl}{l_c} \quad (2.46)$$

เมื่อคิดเฉพาะในแนวตั้งฉากจะได้

$$dF_v = dF \sin \theta = \frac{\mu}{2} (NI)^2 \cdot \left(\frac{R_{av} \sin \theta}{l_c} \right) d\theta \quad (2.47)$$

$$F_v = \int_0^\pi \frac{\mu}{2} (NI)^2 \cdot \left(\frac{R_{av} \sin \theta}{l_c} \right) d\theta \quad (2.48)$$

$$F_v = \mu \cdot (NI)^2 \cdot \left(\frac{R_{av}}{l_c} \right) = \frac{\mu}{2\pi} (NI)^2 \left(\frac{l_{mt}}{l_c} \right) \quad (2.49)$$

- โดยที่ H_m คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดบนขดลวด (A/m)
 H_{av} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กเฉลี่ยที่เกิดบนขดลวด (A/m)
 B_{av} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กเฉลี่ยเฉลี่ยที่เกิดบนขดลวด (T)
 N คือ จำนวนรอบของขดลวด
 I คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวด (A)
 \vec{F} คือ เวกเตอร์ของแรงที่เกิดบนขดลวด (N)
 ℓ_c คือ ความยาวตามแนวตั้งฉากกับรัศมีของขดลวดทั้งชุด (m)
 \vec{B} คือ เวกเตอร์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดบนขดลวด (T)
 F_v คือ แรงทางกลในแนวรัศมีของขดลวด (N)

2.5.5. การคำนวณค่ากำลังสูญเสีย

กำลังสูญเสียในหม้อแปลงจะประกอบด้วยกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวดตัวนำขณะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ซึ่งกำลังสูญเสียในแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการ [7]

$$P_i = p_i \times G_i \tag{2.50}$$

- โดยที่ P_i คือ กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดในแกนเหล็กของหม้อแปลง (W)
 p_i คือ กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กต่อ 1 หน่วยปริมาตร (W/m^3)

โดยค่า p_i จะหาได้จากเส้นกราฟกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กเทียบกับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ในการออกแบบ

กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวด สามารถคำนวณได้จากสมการ [7]

$$P_{cu} = I_n^2 \times R \tag{2.51}$$

$$R = \frac{\rho \ell}{A_{cu}} = \frac{\rho (2\pi R_{av}) N}{A_{cu}} \tag{2.52}$$

- โดยที่ P_{cu} คือ กำลังสูญเสียในขดลวด (W)
 R คือ ค่าความต้านทานของขดลวด (Ω)
 ρ คือ ค่าสภาพต้านทานของขดลวด ($\Omega \times m$)
 A_{cu} คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด (m^2)
 ℓ คือ ความยาวของขดลวด (m)

กำลังสูญเสียอื่นๆ อันได้แก่ ผลของ Skin effect และ Eddy current ที่เกิดในขดลวดและตัวถังเหล็ก กำลังสูญเสียไดโพลีทริกที่เกิดขึ้นในฉนวน ฉะนั้นผลรวมกำลังสูญเสียทั้งหมดจึงเป็นไปตามสมการ

$$P_t = P_{cu} + P_i + P_a \quad (2.53)$$

P_t คือ กำลังสูญเสียรวม (W)

P_i คือ กำลังสูญเสียของแกนเหล็ก (W)

P_a คือ กำลังสูญเสียอื่นๆ (W)

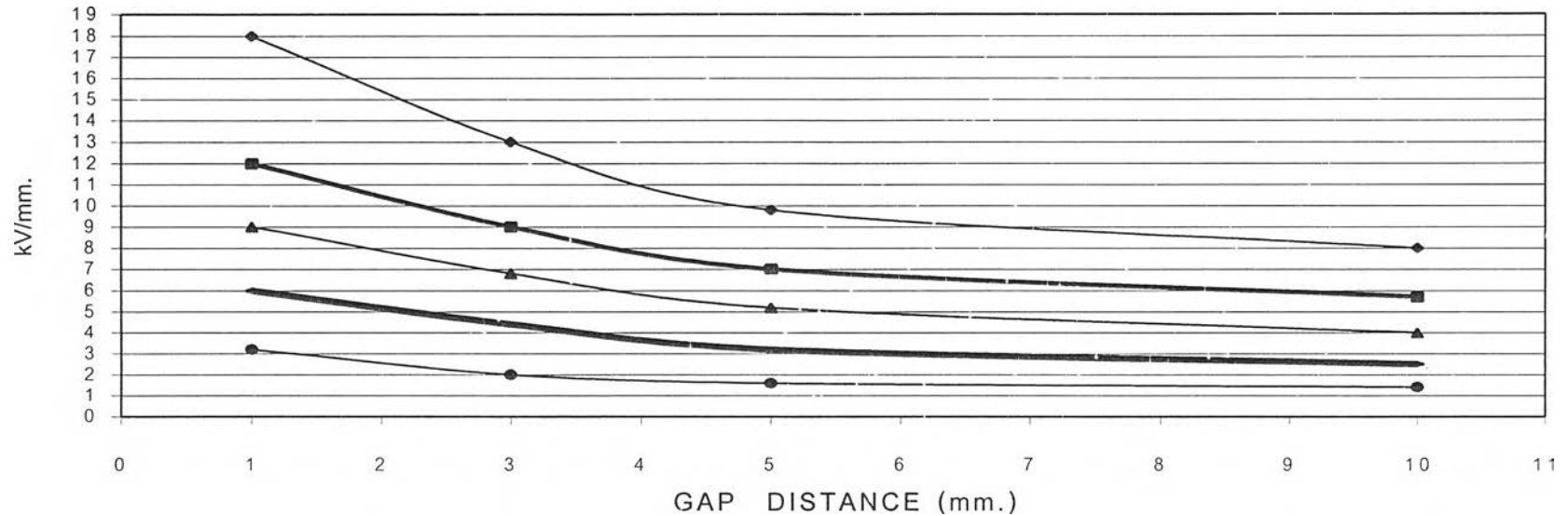
2.5.6. การออกแบบฉนวน

ฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูง คือ วัสดุที่คั่นระหว่างตัวนำไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันต่างกันเพื่อป้องกันการเกิดการวาวไฟตามผิวหรือการเกิดเบรกดาวน การออกแบบฉนวนที่ดีนั้นจะต้องไม่เกิดการดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นภายในตัวเนื้อของฉนวนด้วย ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนเสื่อมลงอย่างรวดเร็ว และจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนในที่สุด ฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงทดสอบนี้ได้แก่ กระดาษอัดแรง น้ำมันหม้อแปลงฉนวนแต่ละส่วนที่ออกแบบต้องคำนึงถึงเงื่อนไขดังนี้

1) สามารถทนต่อแรงดันที่ตกคร่อมได้โดยไม่เกิดการเบรกดาวนหรือเกิดดีสชาร์จบางส่วน การใช้ฉนวนหลายชนิดกันในการออกแบบ จะทำให้การกระจายแรงดันในแต่ละชนิดฉนวนมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับสภาพยอมทางไฟฟ้าของแต่ละชนิดวัสดุ ตัวอย่างเช่นการฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยกระดาษฉนวนอัดแรงและใช้น้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม จะเห็นได้ว่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของกระดาษอัดมีค่าสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของน้ำมัน การหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะหาได้การจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การพิจารณาชั้นของฉนวนต่างๆ เข้าไปในการจำลองแบบด้วยจะทำให้เกิดความยุ่งยากในป้อนข้อมูลและการทำงานของคอมพิวเตอร์ จึงใช้วิธีการเพื่อค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสัก 50 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดในแกนน้ำมันของฉนวนที่มีทั้งกระดาษฉนวนและน้ำมันจะมีค่าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในกรณีที่เกิดเฉพาะน้ำมันอย่างเดียวประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยพิจารณาจากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดการดีสชาร์จบางส่วนที่ทำการทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับดังรูปที่ 2.14-2.16 และการออกแบบฉนวนให้หนาเกินความจำเป็นจะทำให้เกิดปัญหาการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ เนื่องจากฉนวนไฟฟ้าที่ดีมักเป็นฉนวนความร้อนที่ดีด้วย

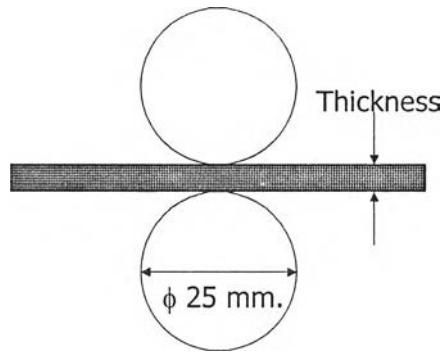
2) ฉนวนต้องสามารถถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ได้ดีพอที่จะไม่ทำให้อุณหภูมิภายในอุปกรณ์ไม่เกินค่าที่กำหนด ในการออกแบบอาจออกแบบให้มีช่องน้ำมันสำหรับการระบายความร้อนควรเกิน 6 mm เพราะถ้าช่องน้ำมันเล็กกว่านี้จะไม่เกิดการไหลผ่านของน้ำมันขณะหม้อแปลงทำงาน แต่การออกแบบช่องน้ำมันให้มีขนาดใหญ่เกินไปน้ำมันไหลผ่านได้สะดวก ย่อมทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้สะดวกอาจส่งผลต่อการเกิดดีสชาร์จบางส่วนและนำไปสู่การเบรกดาวนได้

MAXIMUM PERMISSIBLE ELECTRICAL FIELD STRESS IN OIL GAPS OF TESTING-TRANSFORMER INSULATION

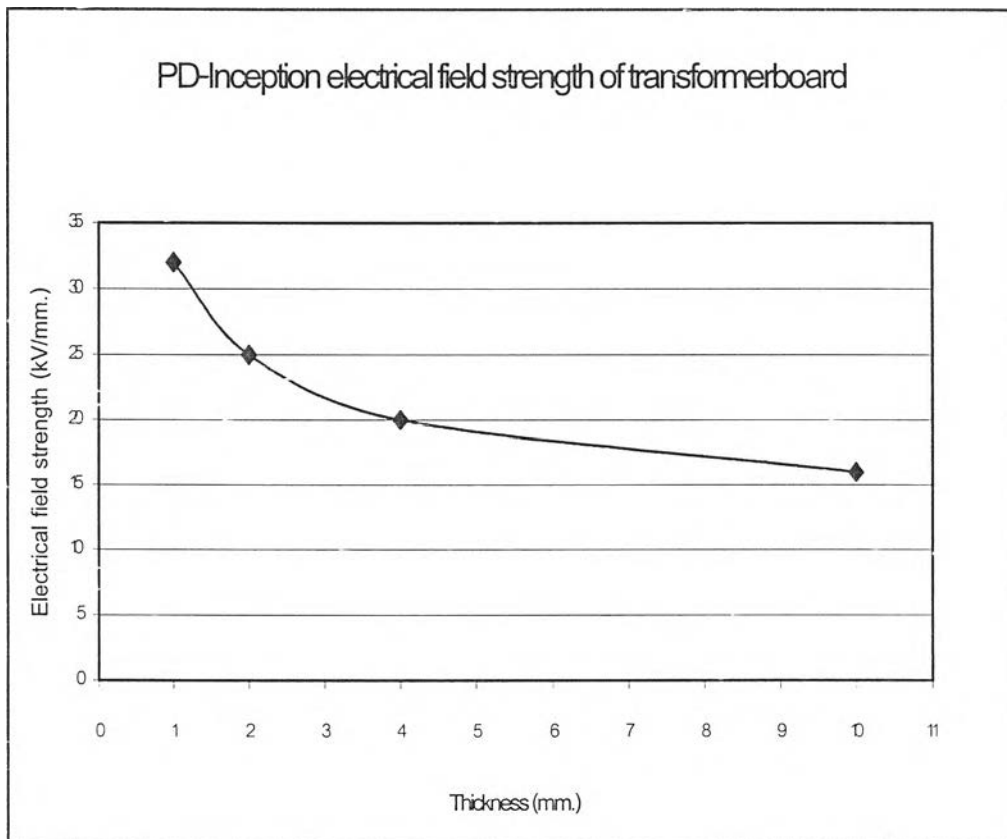


- WEIDMANN, TRANSFORMERBOARD PD-INCEPTION FIELD STRENGTH INSULATED ELECTRODES
- CEPT-CURVES FOR TESTING TRANSFORMER ELECTRODES INSULATED > 1mm.
- ▲— ELECTRODES INSULATED 0.5mm.
- ELECTRODES INSULATED 0.3 mm.
- NON INSULATED ELECTRODES

รูปที่ 2.14 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของแก๊บน้ำมันสำหรับอเล็กโทรดที่มีฉนวนหุ้มความหนาต่างๆ



รูปที่ 2.15 แสดงการวางตัวนำทรงกลมในการทดลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ดชุ่มน้ำมัน โดยเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมขนาด 25 mm [10]



รูปที่ 2.16 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ดเทียบกับความหนาของทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ด [10]

2.5.7 การถ่ายเทความร้อน (Heat Dissipation)

ในกรณีของหม้อแปลง ความร้อนจะเกิดจากกระแสที่ไหลในตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานของขดลวด เส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในสารเฟอร์โรแมกเนติก รวมทั้งเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลในตัวถังและฝาปิดของหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงขึ้นจากอุณหภูมิของสารตัวกลางรอบข้าง โดยกรณีทั่วไปจะเป็นอากาศโดยความร้อนนี้จะถูกถ่ายเทออกไปได้ 3 ทาง คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

2.5.7.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนจะมีลักษณะคล้ายการนำไฟฟ้า โดยการนำความร้อนจะเกิดระหว่าง 2 พื้นผิวที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิผ่านสารตัวกลางคั่นอยู่ และโมเลกุลของสารตัวกลางจะถ่ายเทความร้อนให้แก่โมเลกุลที่อยู่ติดกันโดยที่โมเลกุลไม่มีการเคลื่อนที่ โดยการนำความร้อนจะเป็นไปตามสมการ 2.54 [7]

$$Q_{\text{cond}} = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{\rho l}{A}\right)} = \frac{\Delta T_1}{\left(\frac{\rho l}{A}\right)} \quad (2.54)$$

โดยที่ Q_{cond} คือ กำลังความร้อนที่ถ่ายเทผ่านสารตัวกลาง (W)

ΔT_1 คือ ผลต่างของอุณหภูมิของสองพื้นผิว ($^{\circ}\text{C}$)

ρ คือ สภาพต้านทานทางความร้อน $\left(\frac{^{\circ}\text{C} \times \text{m}}{\text{W}}\right)$

l คือ ความยาวของของสารตัวกลาง (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของสารตัวกลาง (m^2)

2.5.7.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนเกิดจากอนุภาคของก๊าซหรือของเหลวที่ใกล้วัตถุร้อนและรับความร้อนจากวัตถุอื่น อนุภาคนั้นจะร้อนขึ้นและเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่อนุภาคที่เย็นกว่า จากกระบวนการการนี้จะทำให้ความหนาแน่นของของไหลมีการเปลี่ยนแปลง

การพาความร้อนจะแบ่งเป็น 2 แบบ ด้วยกันคือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติและการพาความร้อนด้วยแรงขับเคลื่อน (Artificial convection) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

การพาความร้อนแบบธรรมชาติ เป็นกระบวนการการที่มีความซับซ้อนมากขึ้นกับหลายตัวแปรด้วยกันอันได้แก่

- 1) ความหนาแน่นของกำลังงานที่ใช้
- 2) ความแตกต่างของพื้นผิวระบายความร้อนกับสารตัวกลางระบายความร้อน
- 3) ความสูง ทิศทาง สภาพพื้นผิวระบายความร้อน

4) สภาพต้านทานความร้อน ความหนืด การขยายตัวของสารตัวกลางระบายความร้อน การคำนวณการพาความร้อนจะขึ้นกับผลต่างของอุณหภูมิวัตถุที่สนใจกับอุณหภูมิของตัวกลางที่แวดล้อมอาจทำได้โดยประมาณตามสมการ [7]

$$q_{\text{conv}} = K_c (T_1 - T_2)^n \quad \text{W/m}^2 \quad (2.55)$$

โดยที่ K_c คือ ค่าคงที่ขึ้นกับขนาดและสภาพพื้นผิวของวัตถุร้อน

n คือ ค่าคงที่ขึ้นกับขนาดและสภาพพื้นผิวของวัตถุร้อนมีค่าระหว่าง 1-1.25

q_{conv} คือ ค่าการพาความร้อนของตัวกลางต่อ 1 หน่วยพื้นที่ผิวของวัตถุที่ (W/m^2)

2.5.7.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำออกจากวัตถุร้อน ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและลักษณะเฉพาะตัวของพื้นผิว อันได้แก่สี และความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งมีความซับซ้อนมากในการคำนวณ

2.5.8. การคำนวณการคำนวณพื้นที่ของตัวถัง

จากกฎการถ่ายเทความร้อนของนิวตัน (Newton's law of cooling) เมื่อเริ่มใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้า อุณหภูมิของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนในที่สุดจะมีค่าคงที่ ณ อุณหภูมินั้นความร้อนที่อุปกรณ์ผลิตขึ้นจะเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทออกจากพื้นผิวของอุปกรณ์โดยการพาความร้อนและการแผ่รังสี

เพื่อให้คำนวณได้ง่าย ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีจะคำนวณจากสมการ [7]

$$Q_{\text{rad}} = \lambda_{\text{rad}} \times A \times \Delta T_2 \quad (2.56)$$

และกำลังความร้อนที่ถ่ายเทจากการพาความร้อนคำนวณได้จากสูตร [7]

$$Q_{\text{conv}} = \lambda_{\text{conv}} \times A \times \Delta T_2 \quad (2.57)$$

ฉะนั้นกำลังความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทจะคำนวณได้จากสมการ [7]

$$Q_t = Q_{\text{rad}} + Q_{\text{conv}} = (\lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{conv}}) \times A \times \Delta T_2 \quad (2.58)$$

$$P_t = Q_t \quad (2.59)$$

จากกฎถ่ายเทความร้อนของนิวตันและใช้ค่าอุณหภูมิเพิ่มของสารระบายความร้อนเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อมจะสามารถคำนวณพื้นที่ตัวถังได้ตามสมการ [7]

$$A = \frac{P_t}{(\lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{conv}}) \times \Delta T_2} \quad (2.60)$$

- โดยที่ Q_{conv} คือ กำลังงานในการพาความร้อนของสารตัวกลางจากวัตถุ (W)
- Q_{rad} คือ กำลังงานในการแผ่รังสีของวัตถุ (W)
- Q_c คือ ผลรวมของกำลังงานในการถ่ายเทความร้อนของวัตถุ (W)
- P_c คือ กำลังสูญเสียทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงเป็นความร้อนของวัตถุ (W)
- A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ (m^2)
- ΔT_2 คือ ผลต่างของอุณหภูมิของวัตถุกับสภาพแวดล้อมหรือตัวกลางที่แวดล้อมวัตถุนั้นอยู่ ($^{\circ}\text{C}$)
- λ_{rad} คือ สัมประสิทธิ์การระบายความร้อนโดยการแผ่รังสี ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$)
- λ_{conv} คือ สัมประสิทธิ์การระบายความร้อนโดยการพา ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$)