

บทที่ 2

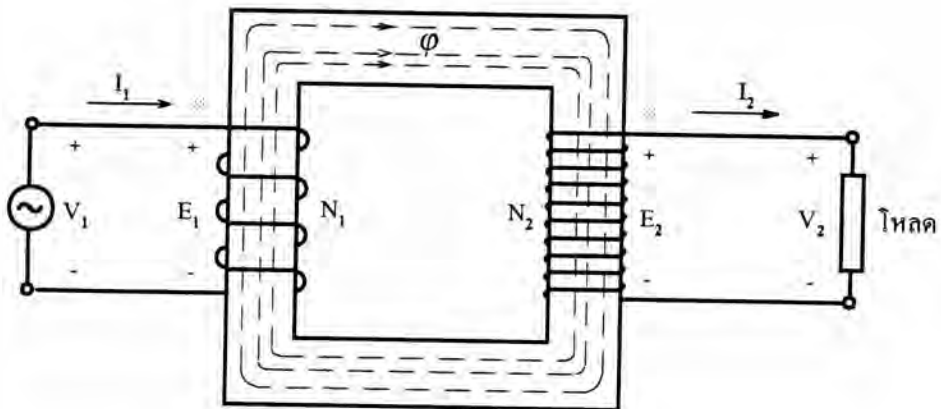
ทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่งผ่านกำลังไฟฟ้า จากแรงดันระดับหนึ่งไปสู่แรงดันอีกระดับหนึ่ง โดยอาศัยวงจรแม่เหล็กที่ประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กซิลิกอนเป็นแกนเพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านได้ดี และขดลวดพันรอบแกนเหล็กเพื่อใช้สร้างฟลักซ์และแปลงระดับแรงดัน นอกจากนี้ยังต้องมีการฉนวนซึ่งอาจเป็นฉนวนแข็ง ฉนวนเหลวหรือฉนวนก๊าซ โดยฉนวนที่เป็นก๊าซนอกจากทำหน้าที่เป็นฉนวนแทรกซึมแล้วยังทำหน้าที่ในการระบายความร้อนของหม้อแปลงที่เกิดจากพลังงานสูญเสียเช่นเดียวกับฉนวนเหลวอีกด้วย

2.1 หลักการทำงานและวงจรสมมูล

2.1.1 หลักการสร้างแรงดัน

ในที่นี้จะพิจารณาหม้อแปลงเฟสเดียวเพื่อให้เกิดความเข้าใจได้สะดวก โดยหม้อแปลงแบบหลายเฟสก็มีหลักการทำงานเช่นเดียวกัน หม้อแปลงทั่วไปจะต้องประกอบด้วยขดลวดอย่างน้อย 2 ชุด และพันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดปฐมภูมิมี N_1 รอบ และต่อโหลดอีกด้านของขดลวดทุติยภูมิมี N_2 รอบ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของหม้อแปลง 1 เฟส

ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นของแรงดันและฟลักซ์แม่เหล็กในรูปที่ 2.1 ประมาณได้ด้วยฟังก์ชันไซน์ในเทอมของเวลาดังนี้ [3]

$$\varphi(t) = \phi_{\max} \sin \omega t = A_c B_{\max} \sin \omega t \quad (2.1)$$

เมื่อ ϕ_{\max} : ขนาดของฟลักซ์ในแกน

B_{\max} : ขนาดของความหนาแน่นฟลักซ์

ω : ความถี่เชิงมุม = $2\pi f$

f : ความถี่, Hz

จากกฎของ Faraday เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กตัดตัวนำหรือขดลวด จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำหรือขดลวดนั้นคือ $e = -N \frac{d\varphi}{dt}$

ถ้าครบวงจรจะเกิดกระแสไหลในขดลวด และกระแสในขดลวดจะสร้างฟลักซ์ที่มีทิศตรงข้ามคือ $\varphi'(t) = \varphi(t) = \phi_{\max} \sin(\omega t - 180^\circ)$ ดังนั้นจะได้แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวด N รอบ คือ

$$e(t) = \omega N \phi_{\max} \cos(\omega t - 180^\circ) = E_{\max} \cos(\omega t - 180^\circ) \quad (2.2)$$

เมื่อ $E_{\max} = \omega N \phi_{\max} = 2\pi f N A_c B_{\max}$

ในระบบแรงดันกระแสสลับค่าที่พิจารณาจะเป็นแรงดันและกระแส rms มากกว่าค่าขณะใดขณะหนึ่งหรือค่าสูงสุด และค่า rms ของรูปคลื่นไซน์ใดๆ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{2}}$ เท่าของค่ายอด ดังนั้นค่า rms ของแรงดันเหนี่ยวนำเท่ากับ

$$E_{\text{rms}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N A_c B_{\max} = \sqrt{2} \pi f N A_c B_{\max} \quad (2.3)$$

จากสมการ (2.3) จะได้ค่าแรงดันเหนี่ยวนำ $E_1 = \sqrt{2} \pi f N_1 A_c B_{\max}$ และ $E_2 = \sqrt{2} \pi f N_2 A_c B_{\max}$ ดังนั้นอัตราส่วนแรงดันเหนี่ยวนำในเทอมของจำนวนรอบเท่ากับ

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.4)$$

ฉะนั้นหม้อแปลงจึงสามารถแปลงแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลง โดยการพันขดลวดให้มีจำนวนรอบให้สัมพันธ์ตามสมการ (2.4)

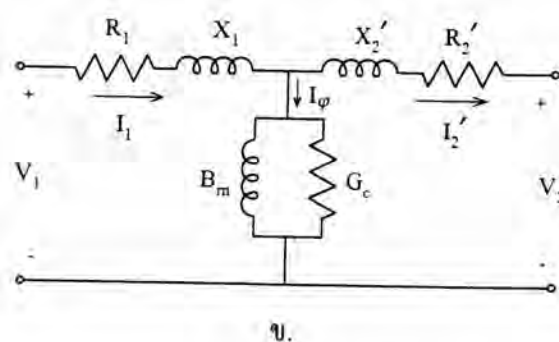
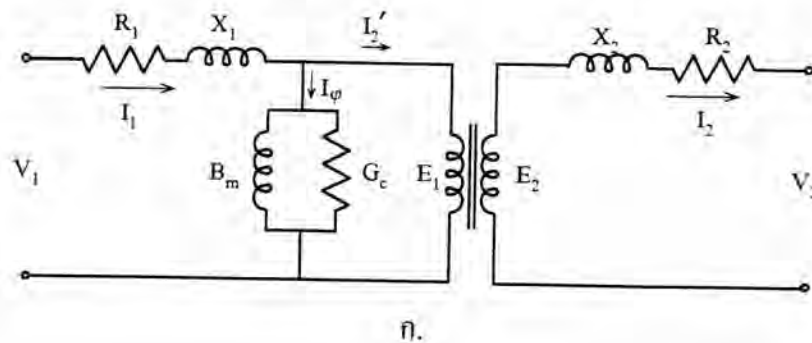
2.1.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงและเฟสเซอร์ไดอะแกรม

จากรูปที่ 2.1 เมื่อต่อโหลดและป้อนแรงดัน V_1 จะเกิดกระแส I_1 เพื่อสร้างฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

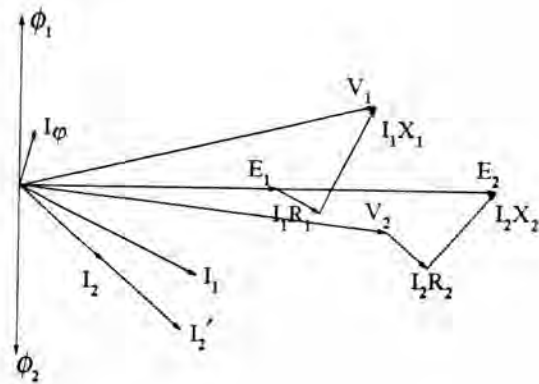
1) เกิดฟลักซ์คัลลิ่ง (linkage flux, ϕ_m) ระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับทุติยภูมิ และเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ E_1 ตามกฎของ Faraday ซึ่งจะทำมุม 90° lagging กับฟลักซ์คัลลิ่ง ฟลักซ์คัลลิ่งและพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในแกนเหล็กสร้างจากกระแสค่าหนึ่งเรียกว่า กระแสกระตุ้น (exciting current, I_ϕ) ซึ่งแทนด้วย magnetizing susceptance, B_m และ conductance, G_c ขนานกัน

2) เกิดฟลักซ์รั่ว (leakage flux) ขึ้นภายในขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งแทนฟลักซ์รั่วในด้านปฐมภูมิด้วยค่า leakage reactance, X_1 และยังมีแรงดันตกคร่อมเนื่องจากค่าความต้านทานในขดลวดปฐมภูมิจึงแทนด้วย R_1 เมื่อต่อโหนดจะมีกระแส I_2 ซึ่งจะสร้างฟลักซ์ที่มีทิศตรงกันข้ามกับฟลักซ์ที่สร้างจากกระแส I_1 (เนื่องจากสมมุติให้กระแสมีทิศเป็นบวกตามลูกศรดังในรูปที่ 2.1) และได้แรงดันเหนี่ยวนำเท่ากับ E_2 ทำมุม 90° leading กับฟลักซ์ที่กระแส I_2 สร้างขึ้น แต่จะมีเฟสเดียวกับแรงดันเหนี่ยวนำ E_1 และมีส่วนของฟลักซ์รั่วและค่าความต้านทานในขดลวดทุติยภูมิเช่นเดียวกับในปฐมภูมิ จึงแทนด้วย leakage reactance, X_2 และ R_2 ตามลำดับ

จากค่าดังกล่าวจะได้วงจรสมมูลและเฟสเซอร์ไคอะแกรมดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ ในรูปที่ 2.2 ค่า $R_2' = R_2 a^2$ และ $X_2' = X_2 a^2$ เมื่อ a คือ อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง



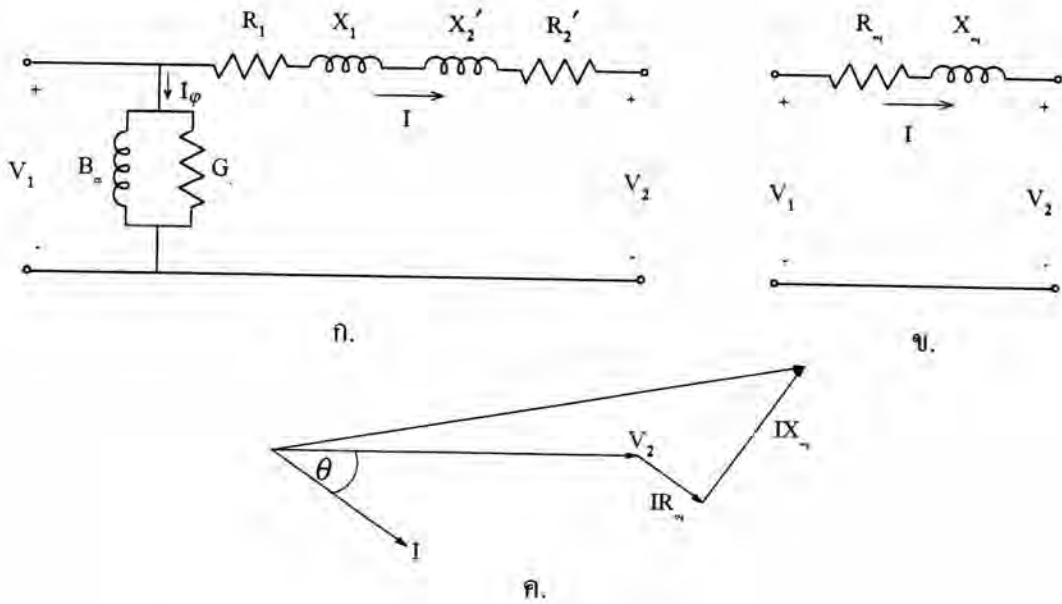
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลง



ϕ_1 : ฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากกระแส I_1 และ ϕ_2 : ฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากกระแส I_2

รูปที่ 2.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลง

ในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่ากระแสกระตุ้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแสโหลด (I_1, I_2) และแรงดันตกคร่อมใน R_1 และ X_1 มีค่าน้อยจึงอาจเขียนได้ดังรูปที่ 2.4ก เมื่อละเลยค่า G_c และ B_m ในรูปที่ 2.4ก วงจรสมมูลจึงได้ดังรูปที่ 2.2ข และ $R_{eq} = R_1 + R_2'$ และ $X_{eq} = X_1 + X_2'$ นำค่าที่ได้ไปเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรสมมูลใหม่ได้ดังรูปที่ 2.4ค [3]



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลและเฟสเซอร์ไดอะแกรมเมื่อไม่คิดผลของกระแสกระตุ้น

2.1.2.1 ค่าความต้านทานและกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดสามารถคำนวณได้ดังนี้ [4]

$$p'_i = 2.37J^2 \left(\frac{2345 + T}{3095} \right) \quad (2.5)$$

$$P_i = W_i p'_i \quad (2.6)$$

เมื่อ P_i : กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวด (watt)

J : ค่าความหนาแน่นกระแส (A/mm²)

W_i : น้ำหนักของทองแดง (kg)

T : อุณหภูมิของขดลวด (°C)

p'_i : กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดต่อหน่วยน้ำหนัก (watt/kg)

การคิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจะแปลงค่าที่ได้ เทียบกับอุณหภูมิอ้างอิง 75°C คือ

$$p'_i = 2.37J^2 \quad (2.7)$$

นอกจากนี้ยังมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและกำลังสูญเสียสเตรย์ ซึ่งคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย P_i (ประมาณ 15-25% ของ P_i)

ผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากความต้านทานของขดลวด กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและกำลังสูญเสียสเตรย์ เป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงสามารถวัดได้โดยการทดสอบลัดวงจรที่ค่ากระแสพิคกิ้ง ดังนั้นค่าความต้านทานของขดลวดต่อเฟสเมื่อเทียบกับ 75°C สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R = \frac{P_i}{3I_{ph}^2} \quad \Omega_{phase} \quad (2.8)$$

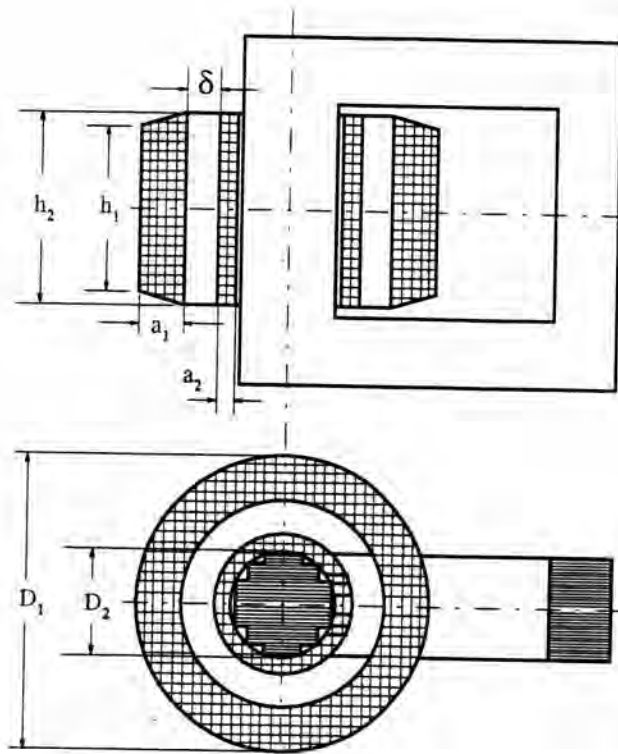
เมื่อ P_i : กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวด

I_{ph} : ค่าพิคกิ้งกระแสของหม้อแปลงด้านที่ต้องการเทียบหา

ค่า R ที่ได้ เมื่อขดลวดด้านที่คำนวณต่อแบบ Y สามารถแทนค่าลงในวงจรสมมูลรูปที่ 2.4x ได้ แต่ถ้าขดลวดต่อแบบ Δ ค่า R จะต้องหารด้วย 3 ก่อนจึงนำไปแทนในวงจรสมมูล

2.1.2.2 ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง

ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงหรือรีแอกแตนซ์รั่ว ขึ้นกับลักษณะรูปร่างของขดลวดที่พัน เช่น ระยะระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ ความหนา ความสูง จำนวนรอบของขดลวด เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด เป็นต้น



รูปที่ 2.5 แสดงมิติต่างๆ ของลวดที่ใช้ในการคำนวณค่ารีแอกแตนซ์

จากรูปที่ 2.5 ค่ารีแอกแตนซ์สามารถประมาณได้ดังนี้ โดยระยะและความยาวต่างๆ มีหน่วยเป็นเมตร [5]

$$X_1 = \frac{\mu_0 \omega \pi D_m}{h_m} \left(\frac{\delta}{2} + \frac{a_1}{3} \right) N_1^2 \quad \Omega \text{ phase} \quad (2.9a)$$

$$X_2 = \frac{\mu_0 \omega \pi D_m}{h_m} \left(\frac{\delta}{2} + \frac{a_2}{3} \right) N_2^2 \quad \Omega \text{ phase} \quad (2.9b)$$

$$h_m = \frac{1}{2} (h_1 + h_2) \quad (2.9c)$$

$$D_m = \frac{1}{2} (D_1 + D_2) \quad (2.9d)$$

เมื่อ $h_1, h_2, D_1, D_2, a_1, a_2$ และ δ คือมิติแสดงดังรูปที่ 2.5

จากสมการ (2.9a) และ (2.9b) เมื่อคิดเทียบไปทางด้านปฐมภูมิจะได้

$$X = \frac{\mu_0 \omega \pi D_m}{h_m} \left(\delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) N_1^2 \quad \Omega \text{ phase} \quad (2.10)$$

ค่า X ที่ได้ เมื่อขดลวดค้ำที่คำนวณต่อแบบ Y สามารถแทนค่าลงในวงจรสมมูลรูปที่ 2.4ข ได้ แต่ถ้าขดลวดต่อแบบ Δ ค่า X จะต้องหารด้วย 3 ก่อนจึงนำไปแทนในวงจรสมมูล

2.1.2.3 ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (short circuit impedance)

ในการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ลัดวงจร จะต้องทราบค่าเบสอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเบสอิมพีแดนซ์ที่จะคำนวณหา นั้น พิจารณาจากค่า R และ X ว่าคิดเทียบกับค้ำปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad \Omega \quad (2.11)$$

เมื่อ V_b : ค่าพิกัดแรงค้ำของหม้อแปลงค้ำที่ต้องการเทียบหา

S_b : ค่าพิกัดกำลังของหม้อแปลงค้ำที่ต้องการเทียบหา

ดังนั้นค่า per-unit impedance ของ R , X และ Z สามารถคำนวณจาก

$$R_{eq} = \frac{R}{Z_b} = \frac{P}{S_b} \quad (2.12a)$$

$$X_{eq} = \frac{X}{Z_b} \quad (2.12b)$$

$$Z_{eq} = \sqrt{(R_{eq})^2 + (X_{eq})^2} \quad (2.12c)$$

2.1.3 ค่าแรงค้ำแรงเหลือ (voltage regulation)

ค่าแรงค้ำแรงเหลือโดยประมาณหาได้จากสมการ [6]

$$VR = \frac{|V_{R,NL}| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} = \frac{|V_1| - |V_2|}{|V_2|} \quad (2.13)$$

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.4ค กระแสโหลด I ทำมุม lagging กับแรงค้ำ V_2 เป็นมุม θ ค่าแรงค้ำของ V_1 คำนวณได้จาก

$$V_1 = V_2 + I(\cos\theta - j\sin\theta)(R_{eq} + jX_{eq}) \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.13) และ (2.14) เมื่อคิดเป็นค่า per-unit โดยค่า V_2 และ I มีค่าเท่ากับค่าแรงค้ำและกระแสพิกัด ดังนั้นค่าแรงค้ำแรงเหลือ (VR)

$$VR = \sqrt{(1 + R_{eq} \cos\theta + X_{eq} \sin\theta)^2 + (X_{eq} \cos\theta - R_{eq} \sin\theta)^2} - 1 \quad (2.15)$$

2.1.4 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงหมายถึง อัตราส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างด้านขาออกกับด้านขาเข้า กำลังไฟฟ้าด้านขาเข้า คือ $P_{in} = P_{out} + P_{loss}$ และ P_{loss} ประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของแกนเหล็ก ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลง (η) แสดงได้ดังสมการ

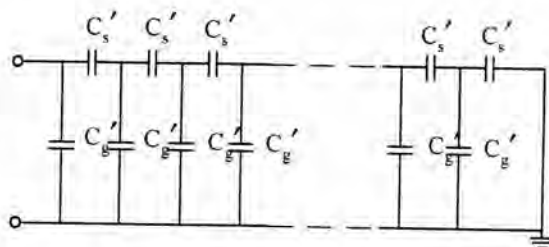
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \tag{2.16}$$

เมื่อ $P_{out} = S \cos \theta$

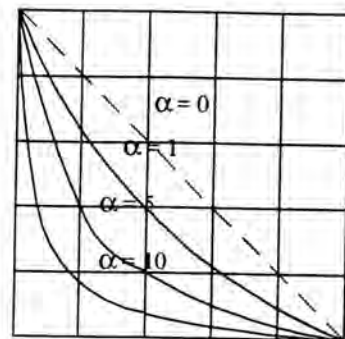
2.1.5 แรงดันกระจายบนขดลวดเนื่องจากแรงดันเกิน

แรงดันกระจายของขดลวดหม้อแปลง หมายถึงแรงดันที่ตกคร่อมภายในขดลวดเมื่อมีแรงดันระหว่างต้นกับปลายของขดลวด ในทางปฏิบัติต้องการให้แรงดันกระจายสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.6 ข ถ้า $\alpha = 0$ แต่ขดลวดหม้อแปลงเมื่อได้รับแรงดันเกินจะเกิดการกระจายของแรงดันไม่สม่ำเสมอเมื่อค่า α ไม่เท่ากับศูนย์ ฉะนั้นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจำเป็นต้องมีการพิจารณาแรงดันเกิน เนื่องจากทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในตอนต้นของขดลวดมีค่าสูงจนฉนวนภายในหม้อแปลงเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นหม้อแปลงต้องออกแบบให้สามารถรับแรงดันเกินได้ตามมาตรฐานกำหนด ในระบบไฟฟ้ากำลังมีโอกาสเกิดแรงดันเกินกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญได้ 2 ประเภท แรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันเกินสวิตชิง [7] จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบแรงดันเกิน

โดยทั่วไปแรงดันเกินที่เกิดกับหม้อแปลงจะมีความถี่สูงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ [8] เนื่องจากส่วนใหญ่จะเป็นแรงดันพัลส์ ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของค่าความเหนี่ยวนำจึงมีค่าสูง แบบจำลองของหม้อแปลงจะได้ดังรูปที่ 2.6 ก เหลือแต่ค่าความจุไฟฟ้า เป็นผลให้เกิดแรงดันกระจายบนขดลวดดังรูปที่ 2.6 ข ตามสมการ (2.18) [8]



ก.



ข.

รูปที่ 2.6 แบบจำลองของหม้อแปลงขณะเกิดแรงดันเกิน

$$E = V \frac{\sinh(\alpha x / l)}{\sinh \alpha} \quad (2.18)$$

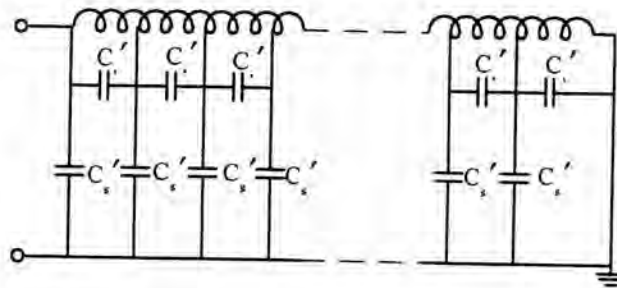
$$\text{เมื่อ } \alpha = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$$

E : แรงดันที่กระจายบนขดลวดเมื่อเทียบกับกราวด์

Γ : ขนาดของแรงดันอิมพัลส์

x : ระยะของขดลวดเมื่อวัดจากปลายด้านที่ต่อลงกราวด์

ดังนั้นในสภาวะที่เกิดแรงดันเกินอิมพัลส์ จึงต้องพิจารณาคำนวณที่ปลายของขดลวดเป็นกรณีพิเศษ เพื่อให้สามารถทนต่อแรงดันเกินที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 2.7 แบบจำลองของหม้อแปลงขณะทำงานในสภาวะปกติ

หม้อแปลงขณะทำงานในสภาวะปกติ และพิจารณาปลายข้างหนึ่งของขดลวดต่อลงกราวด์ ดังแบบจำลองในรูปที่ 2.7 โดยมีค่าความจุไฟฟ้าระหว่างรอบของขดลวด (C_g) เนื่องจากแรงดันระหว่างรอบ และความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับกราวด์ (C_g) เนื่องจากแรงดันระหว่างขดลวดกับกราวด์ แต่เนื่องจากผลของ C_s และ C_g ในสภาวะทำงานปกติที่ความถี่ต่ำหรือเรียกความถี่พลังงาน ค่าอิมพีแดนซ์ของความจุไฟฟ้า C_s และ C_g มีค่ามากจึงเหลือแต่ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด แรงดันที่กระจายบนขดลวดเทียบกับกราวด์จึงสม่ำเสมอตามเส้นประดังรูปที่ 2.6x เมื่อ $\alpha = 0$

2.2 การฉนวน

ค่าความคงทนของฉนวน (dielectric strength) ในหม้อแปลง เป็นคุณลักษณะอย่างหนึ่งในการออกแบบที่ต้องคำนึง [9] ฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงแบบก๊าซเป็นฉนวนผสม ระหว่างฉนวนแข็งและฉนวนก๊าซ ฉนวนแข็งนี้นอกจากทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้วยังต้องทำหน้าที่รับแรงทางกลเมื่อหม้อแปลงเกิดลัดวงจร และฉนวนเหลวยังต้องทำหน้าที่ในการระบายความร้อนอีกด้วย ดังนั้น

นอกจากต้องออกแบบฉนวนให้สามารถทนต่อแรงดันเกินที่อาจเกิดกับหม้อแปลงแล้ว ยังต้องคำนึงถึงหน้าที่อื่นของฉนวนโดยเฉพาะเรื่องการระบายความร้อนอีกด้วย

2.2.1 ฉนวนแข็ง

ฉนวนแข็งที่ใช้ในหม้อแปลงก๊าซประกอบด้วย โพลีเอสเตอร์ฟิล์มและเบกไลท์

2.2.1.1 โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม

โพลีเอสเตอร์ฟิล์มนำมาใช้ในแทนกระดาษฉนวนซึ่งใช้ในหม้อแปลงน้ำมัน เนื่องจากมีค่าความคงทนของฉนวนสูงกว่ากระดาษฉนวน และค่าแฟกเตอร์สูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำกว่า นอกจากนี้ในขณะเกิดลัดวงจรภายในหม้อแปลง โพลีเอสเตอร์ฟิล์มยังมีความคงทนต่อแรงดึงสูงกว่ากระดาษฉนวน ซึ่งหมายความว่าฉนวนจะไม่เสียหาย และขณะใช้งานปกติโพลีเอสเตอร์ฟิล์มยังนำความร้อนได้ดีกว่ากระดาษฉนวนดังตารางที่ 2-1 [1] และ [5] คุณสมบัติต่างๆ ของโพลีเอสเตอร์ฟิล์มแสดงในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการระหว่างโพลีเอสเตอร์ฟิล์มและกระดาษฉนวน

คุณสมบัติ		โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม	กระดาษฉนวน
ความคงทนต่อแรงดึง	(kg/mm ²)	22	10
เปอร์เซ็นต์การขีดตัว	(%)	110	3
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก		3.0	2.0
ค่าการนำความร้อน	(kcal/mhr°C)	0.14	0.11
แฟกเตอร์สูญเสียไดอิเล็กตริกที่ 1 MHz	(tgδ)	1x10 ⁻³	(3...4)x10 ⁻³

โพลีเอสเตอร์ฟิล์มใช้เป็นฉนวนคั่นระหว่างขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง เพื่อลดระยะระหว่างขดลวดทั้งสองให้มีขนาดแคบลง เนื่องมาจากความคงทนของก๊าซมีไม่มากพอ ซึ่งจะได้อกล่าวในหัวข้อต่อไป และเป็นฉนวนเสริมในจุดที่ต้องเสี่ยงกับการเกิดแรงดันเกิน เช่น ระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูง เป็นต้น

2.2.1.2 เบกไลท์

เบกไลท์ใช้เป็นวัสดุรองรับโครงสร้างระหว่างแกนเหล็กและขดลวด และยังใช้เป็นตัวคั่นให้เกิดร่องระบายความร้อนภายในของขดลวด นอกจากนั้นยังใช้เป็นฉนวนคั่นระหว่างรอบของขดลวดแรงต่ำ ระหว่างขดลวดแรงต่ำกับแรงสูง และยังเป็นฉนวนระหว่างตอนของขดลวดแรงสูง

อีกด้วย คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเบกไลท์คือสามารถทนแรงดันเบรกได้นั้นกระแสสลับได้ประมาณ 15 kV/mm [1] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเบกไลท์ที่ใช้

2.2.2 ฉนวนก๊าซ SF₆

การใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวนและระบายความร้อนในหม้อแปลง เพราะก๊าซ SF₆ มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางไฟฟ้า

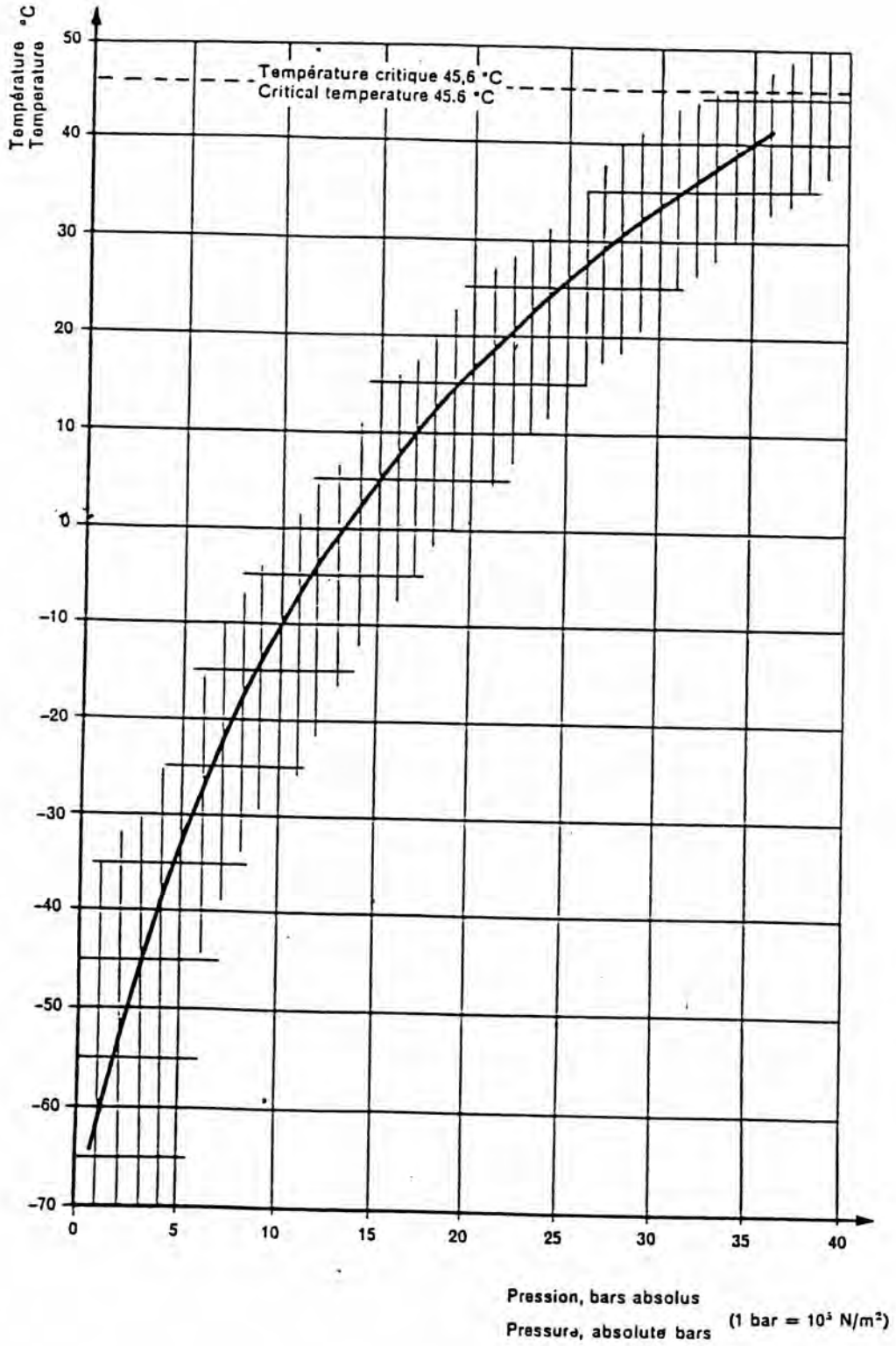
2.2.2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

ก๊าซ SF₆ มีชื่อเต็มว่าก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ซึ่งเป็นสารประกอบของซัลเฟอร์ (S) และฟลูออรีน (F) ที่อุณหภูมิห้องและความดันปกติมีสถานะเป็นก๊าซ และมีความหนาแน่นประมาณ 6.16 g/l ที่ 20°C และความดันบรรยากาศ หรือประมาณ 5 เท่าของความหนาแน่นอากาศ จากเส้นกราฟความดันก๊าซอัดตัวในรูปที่ 2.8 [10] อุณหภูมิวิกฤติเท่ากับ 45.6°C

ก๊าซ SF₆ บริสุทธิ์มีคุณสมบัติเหมือนก๊าซไนโตรเจน คือ เป็นก๊าซเฉื่อย ไม่ติดไฟ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและไม่เป็นพิษ ภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ ก๊าซ SF₆ ไม่แตกตัวเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 500°C การเตรียมก๊าซจึงมีเสถียรภาพสูง ตารางที่ 2-2 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของก๊าซ SF₆ เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลง น้ำมันซิลิโคน และอากาศ [11]

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ ก๊าซ SF₆, อากาศ, น้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันซิลิโคน

	ก๊าซ SF ₆	อากาศ	น้ำมันหม้อแปลง	น้ำมันซิลิโคน
น้ำหนักโมเลกุล	146.06	28.95	-	-
ความหนาแน่น g/l	6.14	1.17	866	960
ความหนืด m ² /s (ที่ 20°C)	2.49x10 ⁶	1.56x10 ⁵	36.5x10 ⁶	46x10 ⁶
(ที่ 60°C)	3.0x10 ⁶	1.96x10 ⁵	8.7x10 ⁶	22x10 ⁶
จุดติดไฟ °C	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ	135-145	305
ค่าการนำความร้อน kcal/mhr°C	0.012	0.018	0.107	0.130
ความร้อนจำเพาะ kcal/kg°C	0.143	0.240	0.452	0.350
แพรทเคล นัมเบอร์ (ที่ 60°C)	0.72	0.71	126	246
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	1.0	1.0	2.2	2.7

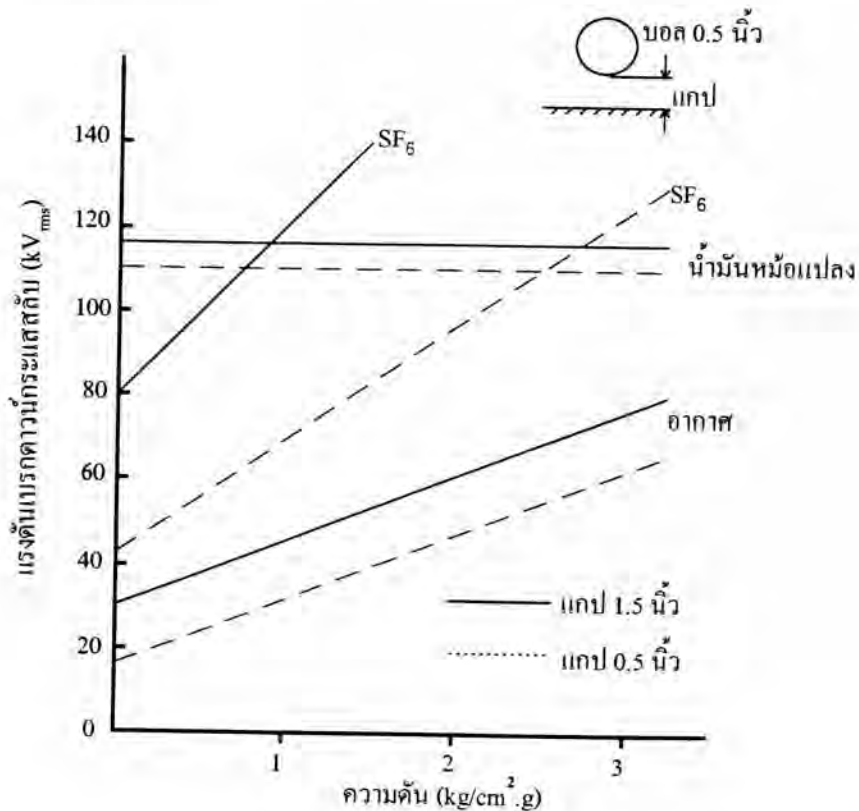


รูปที่ 2.8 เส้นกราฟความดันก๊าซอิมิตัว

2.2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ก๊าซ SF_6 เป็นก๊าซอเล็กโตรเนกาทีฟ คือ ดึงคู่อิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งมีคุณสมบัติในการดับอาร์กและมีความคงทนทางไฟฟ้าสูง เงื่อนไขการทดสอบหรือใช้งานมีผลกระทบต่อค่าความคงทนทางไฟฟ้าอย่างมาก แต่ที่ความดันประมาณบรรยากาศภายใต้เงื่อนไขของการทดสอบหรือใช้งานในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ ความคงทนทางไฟฟ้าอาจประมาณได้ 2.5 เท่าของก๊าซไนโตรเจนหรืออากาศ

รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาว์น AC ของฉนวนต่างๆ ค่าความคงทนทางไฟฟ้าของก๊าซ SF_6 ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ มีค่าประมาณ 2.5 เท่าของอากาศที่ความดันบรรยากาศ และเท่ากับน้ำมันหม้อแปลงเมื่อก๊าซ SF_6 มีความดันประมาณ 3 kg/cm^2 ค่าความคงทนทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความดันของก๊าซยกกำลัง 0.8 [11] อย่างไรก็ตามในกรณีของหม้อแปลงซึ่งมีโครงสร้างซับซ้อน จึงเป็นไปได้ที่จะพิจารณาอเล็กโตรดเป็นสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอทั่วทุกแห่ง ค่าความคงทนทางไฟฟ้าของก๊าซ SF_6 เมื่อป้อนให้กับอเล็กโตรดแบบต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ข.



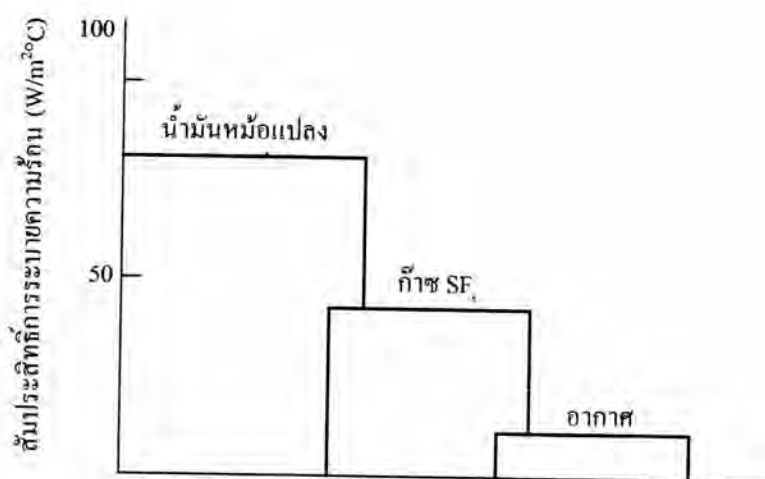
รูปที่ 2.9 แรงดันเบรกดาว์น AC ของ ก๊าซ SF_6 อากาศและน้ำมันหม้อแปลง

2.2.2.3 คุณสมบัติการระบายความร้อน

เนื่องจากความหนาแน่นของก๊าซ SF₆ มีค่าประมาณ 5 เท่า ของอากาศ การระบายความร้อนจึงดีกว่าก๊าซชนิดอื่น เช่น ไนโตรเจนหรืออากาศ แต่ด้อยกว่าคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง ตารางที่ 2-3 เปรียบเทียบคุณสมบัติที่สำคัญในการระบายความร้อนของ ก๊าซ SF₆ อากาศ และน้ำมันหม้อแปลง [1]

ตารางที่ 2-3 เปรียบเทียบคุณสมบัติการระบายความร้อน

คุณสมบัติ	ก๊าซ SF ₆	อากาศ	น้ำมันหม้อแปลง
ค่าการนำความร้อน (kcal/mh°C)	0.012	0.018	0.107
ความร้อนจำเพาะ (kcal/kg°C)	0.143	0.240	0.452
ความหนาแน่น (g/liter)	6.14	1.17	866



รูปที่ 2.10 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การระบายความร้อน

จากรูปที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์การระบายความร้อนของก๊าซ SF₆ ต่ำกว่าน้ำมันหม้อแปลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบให้ขนาดของส่วนประกอบและพื้นที่ผิวการระบายความร้อนมากกว่าแบบหม้อแปลงน้ำมัน

2.3 การระบายความร้อนในหม้อแปลง SF₆

วิธีการระบายความร้อนของแกนเหล็กและขดลวด ของหม้อแปลงฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ อาจแบ่งเป็น 2 วิธีใหญ่ คือ การหมุนเวียนก๊าซแบบธรรมชาติและแบบเป่าก๊าซ การระบายความร้อนแบบธรรมชาติของก๊าซ SF₆ อาศัยการลอยตัวของก๊าซที่ร้อนซึ่งเกิดจากความหนาแน่นที่ต่างกันระหว่างก๊าซอุณหภูมิสูงกว่าในขดลวดและก๊าซอุณหภูมิต่ำกว่าในครีระบายความร้อน วิธีนี้มักใช้ในหม้อแปลงส่งจ่ายขนาดเล็ก การระบายความร้อนในกรณีของหม้อแปลงขนาดใหญ่ที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียมากจะใช้แบบเป่าก๊าซ ในวิธีนี้ให้ผลดีกว่าการพาแบบธรรมชาติแต่จะต้องมีการประกอบตัวเป่าก๊าซและมอเตอร์ด้วย

สัมประสิทธิ์ความร้อนจากผิวของขดลวด ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความเร็วในการไหลของก๊าซโดยความหนาแน่นหาได้จากก๊าซที่เติมลงไป การปิดผนึกของหม้อแปลงจะต้องออกแบบให้ทนกับความดันก๊าซที่ใช้ ถ้าความดันมากขึ้นแผ่นเหล็กที่ใช้จะต้องหนาขึ้นและต้องมีการค้ำค้ำเพื่อเพิ่มความแข็งแรงด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบความสามารถในการระบายความร้อนซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามความดันของก๊าซ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการทำงานของหม้อแปลงถ้าหากความดันลดลงเนื่องจากการรั่ว ในกรณีนี้จะทำให้เกิดปัญหาที่ตามมา 2 อย่างคือ ความเป็นฉนวนและการระบายความร้อนลดลงด้วย

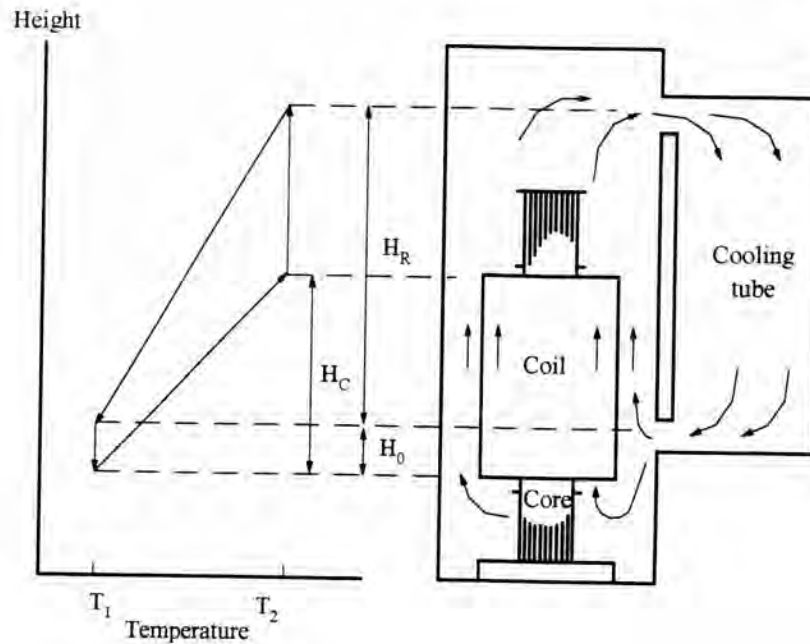
ในการเลือกวิธีการระบายความร้อนจะพิจารณาจากขนาดของหม้อแปลง ถ้าขนาดต่ำกว่า 3000 kVA จะใช้วิธีการระบายความร้อนแบบธรรมชาติและตั้งแต่ขนาด 3000 kVA ขึ้นไปจะใช้การระบายความร้อนแบบเป่าก๊าซหมุนเวียน ในที่นี้จะขอกกล่าวแต่วิธีการระบายความร้อนแบบธรรมชาติเนื่องจากขนาดหม้อแปลงต่ำกว่า 3000 kVA

2.3.1 การระบายความร้อนแบบธรรมชาติ

ในหม้อแปลงฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ และพาความร้อนที่เกิดจากแกนเหล็กและขดลวดขึ้นไปตามความสูงและถ่ายเทความร้อนสู่อากาศ โดยก๊าซจะไหลลงผ่านครีระบายความร้อนในเวลาเดียวกัน การกระจายอุณหภูมิของก๊าซ SF₆ สามารถแสดงดังรูปที่ 2.11 โดยสมมุติว่ากำลังสูญเสียไร้โหลดเกิดขึ้นในขดลวด [12]

ก๊าซด้านล่างอุณหภูมิ T₁ เพิ่มขึ้นตามความสูง เนื่องจากการพาความร้อนที่ผิวของขดลวดจนกระทั่งมีอุณหภูมิ T₂ ก๊าซจะมีอุณหภูมิตั้งที่ T₂ จนถึงทางเข้าครีระบายความร้อน ในครีระบายความร้อนก๊าซไหลลงผ่านครีและอุณหภูมิลดลงเป็น T₁ อีกครั้ง ก๊าซจะหมุนเวียนผ่านแกนเหล็กและขดลวดเช่นนี้ซ้ำอย่างต่อเนื่องไปเรื่อย ความหนาแน่นก๊าซจะแปรตามอุณหภูมิตามกฎของ Boyle-Charles น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ของก๊าซในถังจึงเบากว่าในครีระบายความร้อน ซึ่ง

สอดคล้องกับการกระจายอุณหภูมิของก๊าซในรูปที่ 2.11 และกฎของ Boyle-Charles คือการลอยตัวของก๊าซร้อน การหมุนเวียนก๊าซ SF_6 แบบธรรมชาติเขียนความสัมพันธ์เชิงทฤษฎีได้ดังนี้ [12]



รูปที่ 2.11 การหมุนเวียนของก๊าซแบบธรรมชาติ และการกระจายของอุณหภูมิ

$$\left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} H_R + \gamma_1 H_0 \right) - \left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} H_C + \gamma_2 (H_R + H_0 - H_C) \right) = \left(\frac{\gamma_m}{2g} \sum \frac{f_i}{A_i^2} \right) \omega^2 \quad (2.19)$$

เมื่อ γ_1 : ความหนาแน่นของก๊าซด้านล่างที่อุณหภูมิ T_1 (kg/m^3)

γ_2 : ความหนาแน่นของก๊าซด้านบนที่อุณหภูมิ T_2 (kg/m^3)

γ_m : ความหนาแน่นของก๊าซด้านล่างที่อุณหภูมิ T_m , เมื่อ $T_m = (T_1 + T_2)/2$

H_C : ความสูงของขดลวด (m)

H_R : ความสูงของครีบบระบายความร้อน (m)

H_0 : ความสูงของความแตกต่างระหว่างขอบล่างของครีบบและ
ขอบล่างของขดลวด (m)

f_i : สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลในแต่ละท่อ

A_i : พื้นที่หน้าตัดในแต่ละท่อ (m^2)

ω : ปริมาณการไหลของก๊าซ (m^3/hr)

g : ค่าความโน้มถ่วง (9.81 m/s^2)

ด้านซ้ายของสมการ (2.19) คือ การลอยตัวทางความร้อนจากความแตกต่างของความหนาแน่น และด้านขวาคือความต้านทานการไหลของการหมุนเวียนก๊าซธรรมชาติ โดยความดันจะลดลงจากสาเหตุความต้านทานเสียดทานภายในตลอดท่อ ในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดของท่อต่อระหว่างตัวถังกับเครื่องระบายความร้อนออกแบบให้เล็ก ความต้านทานเสียดทานอาจน้อยจนละเลยได้เมื่อเทียบกับความต้านทานทั้งหมด

การระบายความร้อนจากพื้นผิวของขดลวดจากการพาความร้อนของก๊าซ สามารถแสดงเชิงทฤษฎีโดยสมการของพลังงาน [12]

$$Q = \gamma_m C_p (T_2 - T_1) \omega \quad (2.20)$$

เมื่อ Q : กำลังสูญเสียในขดลวด (kcal/hr) จากสมการ (2.6) โดยคูณ 36/42

C_p : ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซ SF_6 (kcal/kg $^{\circ}\text{C}$)

ความหนาแน่นของก๊าซแปรผกผันกับอุณหภูมิสมบูรณ์ (K) และเขียนได้ดังนี้

$$\gamma_1 = \frac{\gamma_m}{\beta (273 + T_1)} \quad \text{และ} \quad \gamma_2 = \frac{\gamma_m}{\beta (273 + T_2)} \quad (2.21a)$$

เมื่อ β : สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($1/^{\circ}\text{C}$)

$$\beta = \frac{1}{(273 + T_m)} \quad (2.21b)$$

จากสมการ (2.19) ถึง (2.21) จะได้ความสัมพันธ์ของปริมาณการไหลของก๊าซ และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างก๊าซด้านบนและด้านล่าง คือ

$$\omega = \left(k \times \frac{Q}{\gamma_m C_p} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.22)$$

$$T_2 - T_1 = \left(\frac{1}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{Q}{\gamma_m C_p} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.23)$$

$$\text{เมื่อ} \quad k = \frac{g\beta(H_R - H_C + 2H_D)}{\sum \frac{f_i}{A_i^2}} \quad \text{m}^6/\text{hr}^2/^{\circ}\text{C} \quad (2.24)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ k ไม่ขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซ สามารถหาได้จากมิติที่ออกแบบหม้อแปลง

ความดันก๊าซจะแปรตามอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซ ซึ่งน้ำหนักและความหนาแน่นจะคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ แต่ความหนาแน่นจะแปรตามความดันก๊าซที่บรรจุ ดังนั้นสมการ (2.22) และ (2.23) สามารถแสดงความสัมพันธ์กับความดันของก๊าซได้ คือ

$$\omega = \left(k \times \frac{Q}{\gamma_o C_p p} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.25)$$

$$T_2 - T_1 = \left(\frac{1}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{Q}{\gamma_o C_p p} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.26)$$

เมื่อ γ_o : ความหนาแน่นของก๊าซ SF₆ ที่ความดัน 1 kg/cm²
 p : ความดันก๊าซที่บรรจุ (ความดันสมบูรณ์)

2.3.2 การคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวด

อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวด สามารถหาได้จากผลรวมของความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างขดลวดกับก๊าซ ก๊าซกับครีบบระบายความร้อนและครีบบระบายความร้อนกับบรรยากาศ ดังนี้ [12]

$$\Delta T_C = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 \quad (2.27)$$

เมื่อ ΔT_C : อุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิมอบข้าง (°C)

ΔT_1 : อุณหภูมิของขดลวดที่ต่างจากอุณหภูมิของก๊าซ

ΔT_2 : อุณหภูมิของก๊าซที่ต่างจากอุณหภูมิของครีบบระบายความร้อน

ΔT_3 : อุณหภูมิของครีบบระบายความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิมอบข้าง

โดยไม่คิดอุณหภูมิจากผลของฉนวนของขดลวดและแผ่นเหล็กที่ใช้ทำครีบ เพราะว่ามีน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเนื่องจากที่กล่าวมาข้างต้น

ความแตกต่างระหว่างผิวที่ส่งผ่านความร้อนกับอุณหภูมิของก๊าซ (ΔT_1 หรือ ΔT_2) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta T = \frac{d}{\lambda Nu} \times q \quad (2.28)$$

เมื่อ ΔT : อุณหภูมิที่ตกต่าง (ΔT_1 หรือ ΔT_2)

λ : ค่าความนำความร้อนของก๊าซ SF₆ = 0.0117 kcal/mhr°C

Nu : Nusselt number

d : เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล) (m)

q : ความร้อนส่งผ่านต่อหน่วยพื้นที่ผิวระบายความร้อน (kcal/m² hr)

นอชชอล นัมเบอร์ ของการหมุนเวียนก๊าซภายใต้การไหลแบบลามินาร์ (laminar flow) จากการทดลองของ Sieder & Tate คือ

$$Nu = 1.86 \left(Re \times Pr \times \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.29)$$

เมื่อ Re : Reynolds number $Re = v \frac{d}{\mu}$

v : ความเร็วก๊าซในท่อระบายความร้อน (m/s)

μ : Kinematic viscosity ของก๊าซ SF₆ (m²/s)

Pr : Prandtl number = 0.669

l : ความยาวของท่อระบายความร้อน (m)

ความเร็วก๊าซ v หาได้โดยการหารปริมาณการไหลของก๊าซ ω ด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อระบายความร้อน ความเร็วก๊าซในแบบการหมุนเวียนธรรมชาติมีค่าต่ำจนสามารถพิจารณาเป็นการไหลแบบลามินาร์ได้

อุณหภูมิ ΔT_3 จากการทดลองหาได้ดังสมการ

$$\Delta T_3 = 0.51 \times q^{0.8} \quad (2.30)$$

เมื่อ q : ความร้อนที่ส่งผ่านต่อหน่วยพื้นที่ผิวของครีระบายความร้อน
(kcal/m² hr)

ดังนั้นอุณหภูมิเพิ่ม ΔT_c สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.27) (2.28) (2.29) และ (2.30)

ในการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มสามารถหาได้อีกวิธีหนึ่ง แต่ต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน ซึ่งสามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปของวงจรไฟฟ้า โดยความต้านทานได้จากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน พลังงานความร้อนแทนกระแส และศักย์ไฟฟ้าที่ได้คืออุณหภูมิของจุดต่อระหว่างฉนวนแต่ละชนิด จากวิธีที่กล่าวมาถ้าทราบอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมก็จะสามารถคำนวณหาอุณหภูมิของขดลวดได้ [13] เช่นกัน

2.4 วัสดุที่ใช้ในส่วนประกอบต่างๆ ของหม้อแปลง

2.4.1 แกนเหล็ก

แกนเหล็กของหม้อแปลงฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ มีรูปร่างและลักษณะเหมือนกับแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงฉนวนน้ำมันทั่วไป คือ จะประกอบด้วยแผ่นซิลิกอนบางๆ นำมาเรียงกัน โดยทั่วไปเหล็กซิลิกอนที่ใช้จะทำให้มีคุณสมบัตินำฟลักซ์แม่เหล็กได้ดีที่สุดในทางเดียว และพื้นที่หน้าตัดของแกนจะออกแบบให้เป็นรูปเหลี่ยมอัดอยู่ในวงกลม [14] ค่ากำลังสูญเสียไรโวลด์ขึ้นกับค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด และคุณภาพของเหล็กที่นำมาทำแกนดังรูปที่ ค-1 ในภาคผนวก ค.

การออกแบบแกนเหล็กในรูปเหลี่ยมอัดในวงกลม เพื่อให้ได้พื้นที่มากที่สุดภายในเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) จำเป็นต้องทราบพื้นที่ที่ต้องการซึ่งคำนวณได้จากค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ใช้โดยคำนวณได้จากสมการ (2.3) ค่าแฟกเตอร์พื้นที่แกนเหล็ก (core space factor, K_{cs}) โดยหาได้จากการคำนวณซึ่งจะกล่าวใน ภาคผนวก ง. และค่าแฟกเตอร์เนื้อเหล็ก (laminating factor, K_{ls}) ดังสมการ

$$D = \sqrt{\frac{4A_c}{\pi K_{ls} K_{cs}}} \quad (2.31)$$

2.4.2 ขดลวด

ขดลวดของหม้อแปลงประกอบด้วยขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง วัสดุที่ใช้ทำขดลวดแรงต่ำอาจเป็นอะลูมิเนียมหรือทองแดงนั้น ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบว่าต้องการให้ราคาต้นทุนของหม้อแปลงมีค่าน้อยเพียงไร แต่ต้องคำนึงถึงค่ากำลังสูญเสียภายในขดลวดและวัสดุอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น ถ้าเลือกอะลูมิเนียมในการทำขดลวดแรงต่ำ จะต้องออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัดของอะลูมิเนียมมากกว่าทองแดง เพื่อให้สามารถนำกระแสได้ในขนาดเท่ากัน แต่จะพบว่าต้องใช้อะลูมิเนียมและแกนเหล็กเพิ่มซึ่งอาจทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นตาม ทำให้ขนาดและน้ำหนักมากกว่าแบบทองแดง ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยเช่นตัวอย่างข้างต้นในการตัดสินใจเลือกวัสดุ

ขดลวดแรงสูงในหม้อแปลงมักใช้เป็นลวดกลมอบน้ำยา เช่น อีนาเมล (Enamel) น้ำยาโพลีไวนิลฟอร์มัล (Polyvinyl Formal, PVF) เป็นน้ำยาที่สามารถทนความร้อนได้ต่อเนื่องกันที่อุณหภูมิ 105°C ซึ่งเมื่อเทียบตามมาตรฐาน [15] กำหนดให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดจนวนคลาส A เท่ากับ 65°C โดยคิดอุณหภูมิแวดล้อม 40°C ลวดอบน้ำยา PVF สามารถทนความร้อนได้เทียบจนวนคลาส A จึงสามารถนำมาใช้พันเป็นขดลวดแรงสูงได้

การพันขดลวดจะพันในลักษณะทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมดังรูปที่ 2.5 หากความหนาในการพันขดลวดมากจะต้องคำนึงถึงการระบายความร้อนด้วย การต่อขดลวดมีวิธีการต่อหลายแบบ แต่สำหรับหม้อแปลงในระบบจำหน่ายมักต่อแบบ Y- Δ โดยแรงสูงต่อแบบ Δ เพื่อป้องกันกระแส Zero-sequence ในขณะที่เกิดลัดวงจรลงกราวด์

2.4.3 ตัวถัง

เนื่องจากคุณสมบัติการระบายความร้อนของก๊าซ SF_6 ต่ำกว่าน้ำมันหม้อแปลง จึงต้องมีการเพิ่มจำนวนพื้นที่ผิวของการระบายความร้อน โดยการติดครีระบายความร้อนให้สอดคล้องกับจำนวนครีที่คำนวณได้จากหัวข้อการระบายความร้อน

2.4.4 ประเก็น (Gaskets)

หม้อแปลงฉนวนด้วยก๊าซ SF₆ ส่วนมากเป็นแบบปิดผนึก (sealing) ไม่เหมือนหม้อแปลงน้ำมันแบบปิดผนึก จุดประสงค์ของหม้อแปลง SF₆ เพื่อปิดผนึกการรั่วของก๊าซโดยใช้ประเก็น โดยทั่วไปยอมให้ก๊าซรั่วจากหม้อแปลงประมาณ 1-2 % โดยปริมาตรต่อปี [11] ขณะที่อายุการใช้งานของประเก็นประมาณ 10 ปี คุณสมบัติที่ต้องการของประเก็นที่จะนำมาใช้งาน คือ น้ำซึมผ่านได้น้อย ก๊าซซึมผ่านได้น้อย การเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนน้อย ไม่มีผลกระทบจาก SF₆ และอายุการใช้งานนาน

2.4.5 ส่วนประกอบอื่นๆ ที่สำคัญ

ตัวเปลี่ยนจุดแยกระบบและตัวเปลี่ยนจุดแยกแรงดัน การออกแบบนั้นต้องคำนึงถึงระยะของจุดแรงดันที่เข้าตัวเปลี่ยนจุดแยก โดยจะต้องสามารถรับแรงดันอิมพัลส์ในขณะทดสอบได้

บุชซึ่ง สามารถใช้บุชซึ่งที่ใช้กับแบบน้ำมันหม้อแปลงทั่วไป เพียงแต่ต้องมีการติดตั้งเพิ่มเพื่อให้ทนกับความดันก๊าซได้

เกจวัดความดันเพื่อแสดงความดันภายในถัง และถ้าหากต้องการเพิ่มความปลอดภัยอาจจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเพื่อตัดหม้อแปลงออกจากระบบจำหน่าย

2.5 ข้อกำหนดของหม้อแปลง

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องทราบข้อกำหนดต่างๆ ก่อน เพื่อให้หม้อแปลงที่ออกแบบนั้นอยู่ในขอบเขตของข้อกำหนดตามมาตรฐาน ค่าที่กำหนดของหม้อแปลงที่จะต้องระบุคือ ความถี่ พิกัดกำลัง จำนวนเฟส แรงดันด้านแรงสูงและแรงต่ำ การต่อกลุ่มเวกเตอร์ของขดลวดคลาสของฉนวนที่ใช้ เช่น คลาส A อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดเท่ากับ 65°C ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง และที่สำคัญระบบระบายความร้อน ซึ่งค่าต่างๆ ที่กล่าวมาต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่เลือกไว้ [15]