บทที่ 3

ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง

3.1 กำลังสูญเสียในหม้อแปลง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะกรณีที่ที่ใช้งานหม้อแปลงในสภาวะโหลดปกติ คือใช้งานที่กระแสและแรงดันเป็นรูปไซน์(Sinusoidal) เท่านั้น ส่วนในสภาวะที่กระแสและแรงดันผิดเพี้ยนไปเนื่องจากผลของฮาร์มอนิกจะได้กล่าวถึงในบทที่ 4

จาก [6] กำลังสูญเสียในหม้อแปลงสามารถแบ่งได้เป็น

1. กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No - Load Loss หรือ Excitation Loss)
2. กำลังสูญเสียขณะมีโหลด (Load Loss หรือ Impedance Loss)
3. กำลังสูญเสียรวมซึ่งเท่ากับ No - Load Loss รวมกับ Load Loss

กำลังสูญเสียขณะมีโหลดยังสามารถแยกได้เป็น กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (I^2R Loss) กับกำลังสูญเสียปลีกย่อย (Stray Loss) ซึ่ง กำลังสูญเสียปลีกย่อยยังแบ่งได้เป็น กำลังสูญเสียปลีกย่อยภายในขดลวด กับกำลังสูญเสียปลีกย่อยที่เกิดขึ้นภายในส่วนประกอบอื่นๆ (P_{OSL}) เช่น แกนเหล็ก , แคล้มป์ , ตัวถัง เป็นต้น กำลังสูญเสียปลีกย่อยที่เกิดขึ้นในขดลวดแบ่งเป็น กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสวนในขดลวดและกระแสวนระหว่างขดลวดซึ่งรวมเรียกว่า P_{EC} เพราะฉะนั้นกำลังสูญเสียขณะมีโหลดจึงเป็นดังสมการ

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL} \qquad (3.1)$$

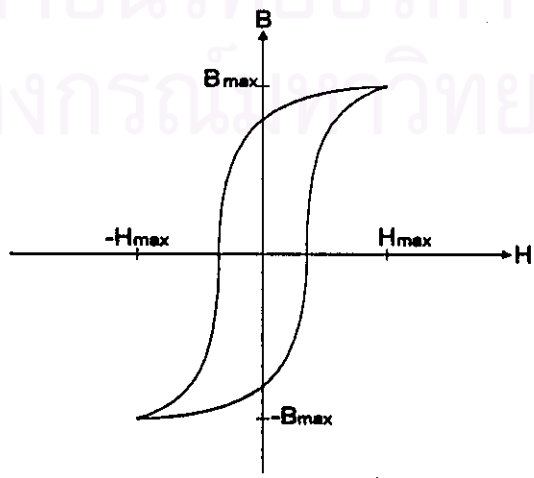
3.1.1 กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด

กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดของหม้อแปลง เกิดจากการไหลเวียนของฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนเหล็ก ซึ่งกำลังสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของแกนเหล็ก , ความถี่ , ความหนาแน่นฟลักซ์ , ชนิดและน้ำหนักของแกนแม่เหล็ก รวมทั้งเทคนิคในการผลิตของบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลง ปัจจุบันแกนเหล็กที่ใช้กันอยู่จะมีลักษณะการจัดเรียงตัวของสนามแม่เหล็กแตกต่างกัน ซึ่งในการออกแบบจุดประสงค์ต้องการให้การไหลของฟลักซ์แม่เหล็กเป็นไปในทิศทางเดียวกันตามความยาวของแกนเหล็ก แต่ในบางจุด เช่น จุดที่มีการต่อกันของแกนเหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็ก

เกิดการเบี่ยงเบนไป ซึ่งจุดที่มีลักษณะเช่นนี้จะทำให้มีกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้น ในการคำนวณกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด ให้ได้ความถูกต้องสูงต้องพิจารณาทิศทางการไหลของฟลักซ์แยกกัน ในขณะที่แกนเหล็กที่ผลิตจากโรงงานส่วนใหญ่ จะคิดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กเป็นค่ากำลังสูญเสียต่อน้ำหนักแกนเหล็ก เช่น วัตต์ต่อกิโลกรัม (watt / kg.) โดยไม่คำนึงถึงทิศทางการไหลของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยทั่วไปแล้วกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

3.1.1.1 กำลังสูญเสียฮิสเตอริซีส

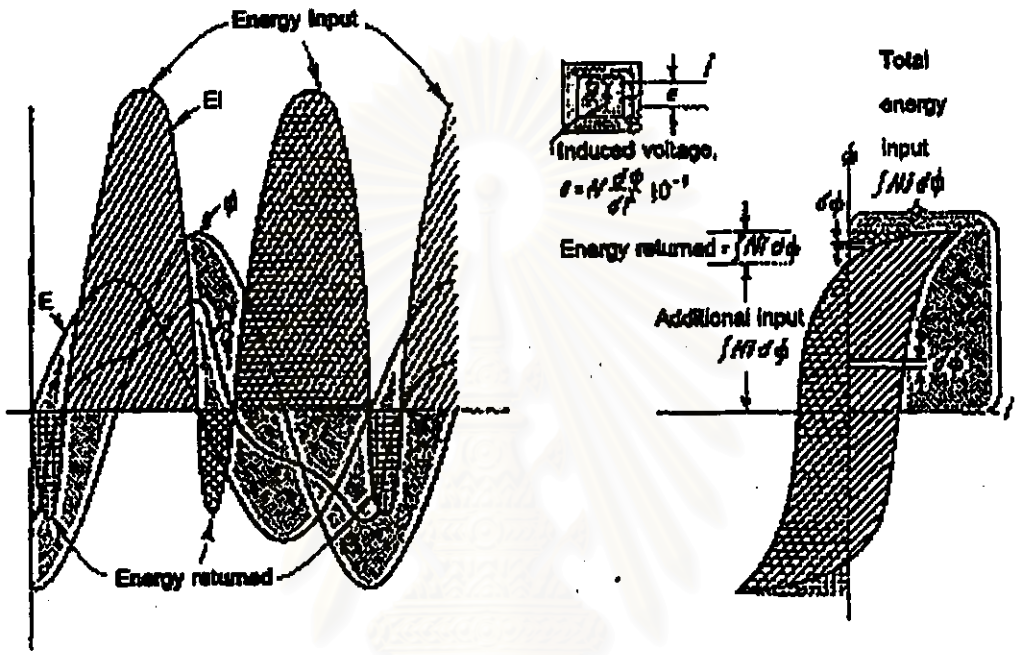
กำลังสูญเสียฮิสเตอริซีสเกิดจากการที่ในสภาวะปกติ ก่อนที่จะจ่ายแรงดันขณะใช้งาน ซึ่งเป็นรูปไซน์ให้แก่ขั้วของหม้อแปลง การเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กในแกนเหล็กจะอยู่ในสภาวะอิสระ เมื่อจ่ายแรงดันเข้าไปทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น จะมีโมเมนต์แม่เหล็กในแกนเหล็กส่วนหนึ่งเกิดการเรียงตัวตามทิศทางสนามแม่เหล็ก และเมื่อเพิ่มแรงดันเข้าไปอีกจะทำให้โมเมนต์แม่เหล็กในแกนเหล็กนี้ เรียงตัวกันตามแนวสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็กสูงขึ้น จนถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งไม่ว่าจะเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กขึ้นอีกฟลักซ์แม่เหล็กก็จะไม่เพิ่มขึ้นมากซึ่งเกิดจากการอิ่มตัว และเมื่อเราลดความเข้มสนามแม่เหล็กลงโมเมนต์แม่เหล็กในแกนเหล็กจะไปอยู่ในสภาวะที่เปลี่ยนแปลงจากสภาพเดิมเพียงเล็กน้อย และเมื่อลดแรงดันจนกระทั่งเหลือค่าศูนย์ จะทำให้โมเมนต์แม่เหล็กในแกนเหล็กไม่เรียงตัวกัน แบบอิสระเหมือนตอนที่ไม่มีแรงดันเริ่มต้นให้แก่ขั้วหม้อแปลง ซึ่งถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น B กับ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่จ่ายเข้าไป H จะได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีลักษณะเป็นวงรอบที่ปิดซึ่งจะเกิดกำลังสูญเสียขึ้น เรียกกำลังสูญเสียนี้ว่ากำลังสูญเสียฮิสเตอริซีส



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H ที่ทำให้เกิดวงรอบฮิสเตอริซีส

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำลังสูญเสียฮิสเตอริซีสที่เกิดขึ้น มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ภายในวงรอบปิดของฮิสเตอริซีส ในการหากำลังสูญเสียฮิสเตอริซีสนี้ ถ้าเราทราบลักษณะกราฟ ระหว่าง B กับ H ก็สามารถที่จะหากำลังสูญเสียชนิดนี้ได้ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในวงรอบฮิสเตอริซีส

ซึ่งพบว่าไม่มีสูตรทางคณิตศาสตร์ที่จะคำนวณได้โดยตรง แต่จากการศึกษาและทดลองเราจะได้ว่า กำลังสูญเสียฮิสเตอริซีสสามารถเขียนได้ดังสมการ

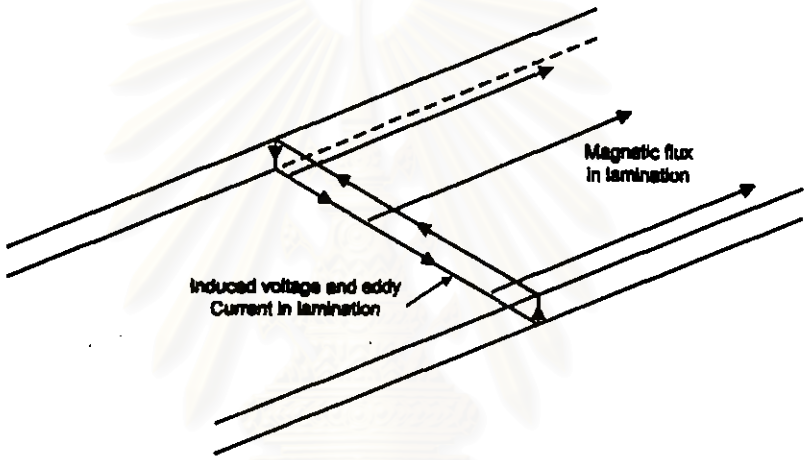
$$P_{hys} = k_1 f \left(B_{max}\right)^{\sigma} \qquad (3.2)$$

โดยที่

P_{hys}	คือกำลังสูญเสียจากวงรอบฮิสเตอริซีส (W/kg)
k_1	คือค่าคงที่ของวัสดุแต่ละชนิด
B_{max}	คือค่าสูงสุดของความหนาแน่นฟลักซ์ (Wb/m^2)
f	คือความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz.)
σ	คือค่าคงที่ของ Steimetz มีค่าระหว่าง 1.6 - 2.5

3.1.1.2 กำลังสูญเสียจากกระแสวนในแกนเหล็ก

กำลังสูญเสียจากกระแสวนในแกนเหล็กเกิดขึ้นเมื่อ ฟลักซ์ที่ผ่านแกนเหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น และจะทำให้เกิดมีกระแสวนครบวงจรเป็นวงรอบอยู่ภายในแผ่นเหล็กบางที่ประกอบกันเป็นแกนเหล็ก ซึ่งกระแสนี้เรียกว่ากระแสวน(Eddy Current) และกำลังสูญเสียที่เกิดจากกระแสนี้เรียกว่า กำลังสูญเสียจากกระแสวน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเกิดกระแสวนในแผ่นเหล็กบาง

เราสามารถที่จะคำนวนหากำลังสูญเสียจากกระแสวนได้ดังสมการ

$$P_{eddy} = k_2 f^2 \left(B_{eff}\right)^2 t^2 \qquad (3.3)$$

โดยที่

P_{eddy}	คือกำลังสูญเสียจากกระแสวน (W/kg)
k_2	คือค่าคงที่ของวัสดุแต่ละชนิด
B_{eff}	คือค่าประสิทธิผลของแรงดัน (Wb/m^2)
f	คือความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz.)
t	คือความหนาของแผ่นเหล็ก (m.)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

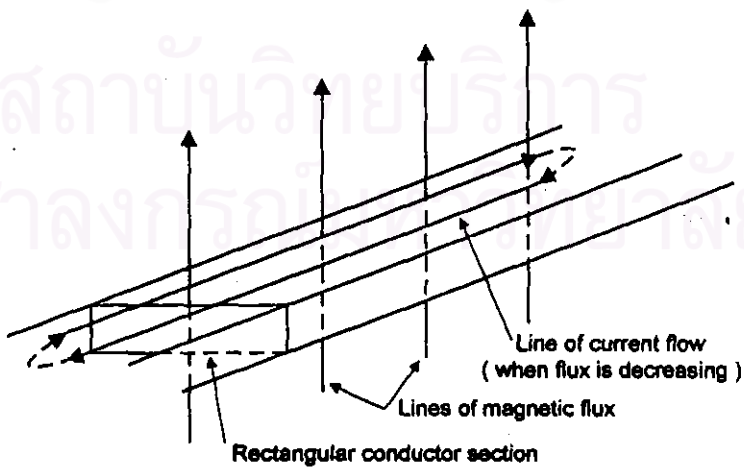
3.1.2 กำลังสูญเสียขณะมีโหลด

โดยทั่วไปแล้วกำลังสูญเสียขณะมีโหลดสามารถที่จะแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

3.1.2.1 กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในขดลวด ซึ่งกำลังสูญเสีย I^2R นี้ขึ้นกับค่าความต้านทานของขดลวด ซึ่งความต้านทานของขดลวดจะแปรผันกับอุณหภูมิ ดังนั้นกำลังสูญเสียชนิดนี้จึงขึ้นกับค่าของอุณหภูมิด้วย

3.1.2.2 กำลังสูญเสียปลีกย่อยภายในขดลวด กำลังสูญเสียปลีกย่อยที่เกิดในหม้อแปลงนั้นขึ้นกับปริมาณของฟลักซ์รั่ว โดยกำลังสูญเสียปลีกย่อยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ขดลวด โดยแบ่งเป็นกำลังสูญเสียจากกระแสวนที่เกิดขึ้นภายในขดลวด และกำลังสูญเสียจากกระแสวนที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวด

กำลังสูญเสียจากกระแสวนในขดลวดจะขึ้นกับการจัดรูปแบบของขดลวด โดยในหม้อแปลงขนาดใหญ่ ในแต่ละรอบของขดลวดประกอบด้วยจำนวนตัวนำมากมาย ซึ่งการจัดรูปแบบของขดลวดแต่ละแบบ ทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำต่างๆ มีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งแรงดันที่ไม่เท่ากันนี้จะทำให้เกิดการไหลย้อนของกระแส ซึ่งค่ากำลังสูญเสียที่เกิดจากการไหลย้อนของกระแสนี้ ถ้าจำนวนตัวนำในแต่ละรอบมีไม่มาก ค่ากำลังสูญเสียนี้ก็ไม่มีผลโดยรวมมากนักแต่ก็จะทำให้ขดลวดร้อนขึ้น ค่ากำลังสูญเสียจากกระแสวนและกระแสย้อนนี้จะเกิดขึ้นกับทุกๆ ขดลวดที่มีแนวของฟลักซ์รั่วผ่าน ไม่ว่าขดลวดนั้นจะจ่ายโหลดอยู่หรือไม่ก็ตาม



รูปที่ 3.4 การเกิดกระแสวนในขดลวด

3.1.2.3 กำลังสูญเสียปลีกย่อยที่ส่วนประกอบอื่นๆ หม้อแปลงทุกขนาดจะมีฟลักซ์รั่วเกิดขึ้นเสมอ ฟลักซ์รั่วนี้จะเกิดขึ้นเมื่อขดลวดมีการนำกระแส โดยจะมีค่าค่อนข้างคงที่ระหว่างช่องว่างของขดลวดแรงดันสูงและขดลวดแรงดันต่ำ โดยฟลักซ์ที่ขนานกับแกนของขดลวดจะเรียกเป็นฟลักซ์ขนาน และฟลักซ์ที่ตั้งฉากกับขดลวดจะเรียกฟลักซ์ตั้งฉาก

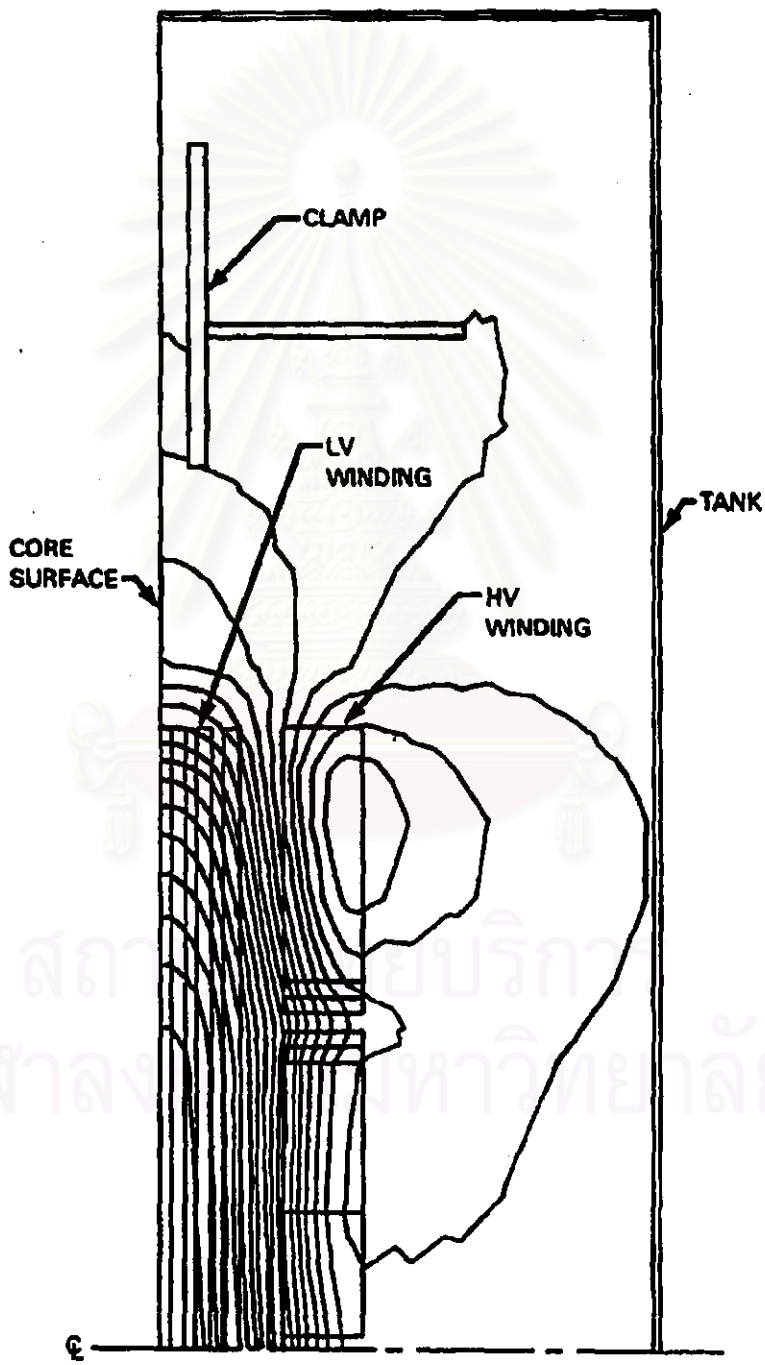
ที่บริเวณปลายขดลวดตัวนำจะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบๆ ถ้าสนามแม่เหล็กมีค่ามากและอยู่ใกล้กับส่วนที่เป็นโลหะ จะทำให้เกิดกระแสวนและกำลังสูญเสีย ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณเฉพาะจุดๆ นั้น อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดฟองอากาศในน้ำมัน หรือทำให้อนวนเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งผลจากกระแสที่หัวตัวนำนี้ขึ้นอยู่กับขนาดกระแส , ระยะห่างจากปลายขดลวดตัวนำกับส่วนที่เป็นโลหะ และค่าความต้านทานของวัสดุ

ฟลักซ์รั่วที่เกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียจากกระแสวน ซึ่งกำลังสูญเสียจากกระแสวนที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆ จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่จุดนั้นๆ เช่น ผนังตัวถังหม้อแปลงใกล้กับขดลวด , แคลมป์ที่ยึดขดลวด เป็นต้น กำลังสูญเสียปลีกย่อยในหม้อแปลงขึ้นอยู่กับลักษณะของฟลักซ์รั่ว และการกระจายของสนามแม่เหล็ก โดยที่ฟลักซ์รั่วที่ไหลวนกลับไปในแกนเหล็ก จะไม่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียมากนัก โดยฟลักซ์ที่ขวางกับแกนเหล็กจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียและอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปกำลังสูญเสียปลีกย่อยจะเกิดขึ้นเป็นกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

I. กำลังสูญเสียปลีกย่อยในตัวถังของหม้อแปลง เนื่องจากฟลักซ์รั่วจากขดลวด
II. กำลังสูญเสียปลีกย่อยในตัวถังเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ปลายขดลวดตัวนำ
III. กำลังสูญเสียปลีกย่อยในส่วนประกอบที่ใช้จับยึด ส่วนประกอบต่างๆ ในหม้อแปลงเนื่องจากฟลักซ์รั่วในขดลวด
IV. กำลังสูญเสียปลีกย่อยในส่วนประกอบที่ใช้จับยึด ส่วนประกอบต่างๆ ในหม้อแปลงเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ปลายขดลวดตัวนำ

กำลังที่สูญเสียเนื่องจากฟลักซ์รั่วนี้ จะขึ้นกับค่าเพอร์มิบิลิตี้(permeability) และค่าความต้านทาน(resistivity) ของวัสดุ โดยวัสดุที่มีค่าความต้านทานต่ำ จะทำให้มีค่ากระแสวนสูง และกำลังสูญเสียก็จะเพิ่มขึ้นด้วย กำลังสูญเสียจากผลของฟลักซ์รั่วนี้ ยังขึ้นกับระยะห่างของส่วนประกอบและจุดที่เกิดฟลักซ์รั่ว โดยถ้าระยะห่างเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของฟลักซ์จะลดลง ทำให้กำลังสูญเสียลดลงด้วยในรูปที่ 3.5 จะแสดงลักษณะฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านส่วนประกอบต่างๆ ภายในหม้อแปลง

โดยทั่วไปฟลักซ์รั่วที่เพิ่มขึ้น จะมีขนาดเป็นค่ารากที่สองของพิกัดกระแสของหม้อแปลง ดังนั้นหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นปริมาณฟลักซ์รั่วก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้ค่ารีแอคแตนซ์(Reactance)ของหม้อแปลงมีขนาดสูงขึ้นด้วย รวมทั้งทำให้กำลังสูญเสียปลีกย่อยเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 3.5 เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านส่วนประกอบต่างๆ ภายในหม้อแปลง

3.2 การส่งผ่านความร้อนภายในหม้อแปลง

ในหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของขดลวดกับน้ำมันจะทำให้เกิด การส่งผ่านความร้อนจากขดลวดไปยังน้ำมัน ต่อไปยังตัวถังและออกสู่บรรยากาศภายนอกในที่สุด ซึ่งถ้าขดลวดที่ใช้เป็นขนาดใหญ่และมีฉนวนหนา ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างขดลวดกับน้ำมันจะสูง ในขณะที่ขดลวดเส้นเล็กและฉนวนบาง ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า จะทำให้การส่งผ่านความร้อนเกิดขึ้นได้ดีกว่า มีผลทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างขดลวดกับน้ำมันมีค่าน้อย ดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างขดลวดกับน้ำมัน จึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างของขดลวด และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในขดลวด การส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงสามารถเกิดขึ้นได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ

1. การนำความร้อน(Conduction)
2. การแผ่รังสี(Radiation)
3. การพาความร้อน(Convection)

การส่งผ่านความร้อนโดยการนำความร้อนในหม้อแปลง จะมีความสำคัญน้อยที่สุด และการพาความร้อนจะเป็นการส่งผ่านความร้อนที่มีความสำคัญมากที่สุด ในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวกับความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ถึงแม้เราจะทราบถึงลักษณะทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง และสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยสมการการส่งผ่านความร้อน แต่โดยส่วนใหญ่แล้วสมการต่างๆ ที่มีการใช้กันอยู่ในปัจจุบัน จะเป็นสมการหรือสูตรที่ได้จากการทดลอง โดยมีพื้นฐานมาจากสมการเบื้องต้นของการส่งผ่านความร้อน

3.2.1 การส่งผ่านความร้อนโดยการนำ

การส่งผ่านความร้อนโดยการนำ ระหว่างจุดสองจุด จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดสองจุดนั้น และจะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าความต้านทานความร้อน ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$H = \frac{A\theta}{LR} \qquad (3.4)$$

โดยที่

H คือกำลังที่ส่งผ่านไปยังวัสดุ (W.)

A คือพื้นที่ผิวของวัสดุ (m^2)

L คือระยะทางระหว่างจุดสองจุด (m.)

θ คือผลต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดสองจุด (K)

R คือค่าความต้านทานทางความร้อนของวัสดุ (m K /W)

การส่งผ่านความร้อนโดยวิธีนี้จะมีผลน้อยมาก ในแง่ของการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง เนื่องจากจะเกิดการส่งผ่านความร้อนเมื่อตัวนำมีการสัมผัสกันโดยตรงหรือเป็นวัสดุชนิดเดียวกันเท่านั้น

3.2.2 การส่งผ่านความร้อนโดยการแผ่รังสี

การส่งผ่านความร้อนโดยการแผ่รังสี จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศรอบๆ ส่วนใหญ่ในการวิเคราะห์จะคิดในรูปของความยาวคลื่น โดยในขณะที่วัสดุมีอุณหภูมิค่าหนึ่ง จะแผ่รังสีความร้อนออกมาที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่ง และเมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นความยาวคลื่นที่แผ่ออกมาจะมีค่าลดลง และได้มีการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์พบว่า ปริมาณรังสีที่แผ่ออกมาจากพื้นที่ผิวภายนอกจะขึ้นกับรูปร่างของวัสดุ และในขณะเดียวกันก็ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่เคลือบผิวภายนอกด้วย ซึ่งจะให้ค่า emissivity factor แตกต่างกัน วัสดุที่มีสีดำอย่างสมบูรณ์แบบจะให้ค่า emissivity factor เป็น 1 แต่โดยทั่วไปสีที่ใช้ทาผิวภายนอกของตัวถังหม้อแปลงจะมีค่า emissivity factor ประมาณ 0.9 - 0.95

การส่งผ่านกำลังโดยการแผ่รังสีของหม้อแปลง สามารถคำนวณได้โดยสมการของ Stefan - Bolzmann ดังนี้

$$W_R = KE\left(T_2^{\,4} - T_1^{\,4}\right) \qquad (3.5)$$

โดยที่

W_R คือกำลังที่ส่งผ่าน (W/m^2)

K คือค่าคงที่เท่ากับ 5.67×10^{-8} ($W/m\,K^4$)

E คือค่า emissivity factor

T_2 คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ผิวภายนอกของหม้อแปลง (K)

T_1 คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของบรรยากาศภายนอกรอบๆ หม้อแปลง (K)

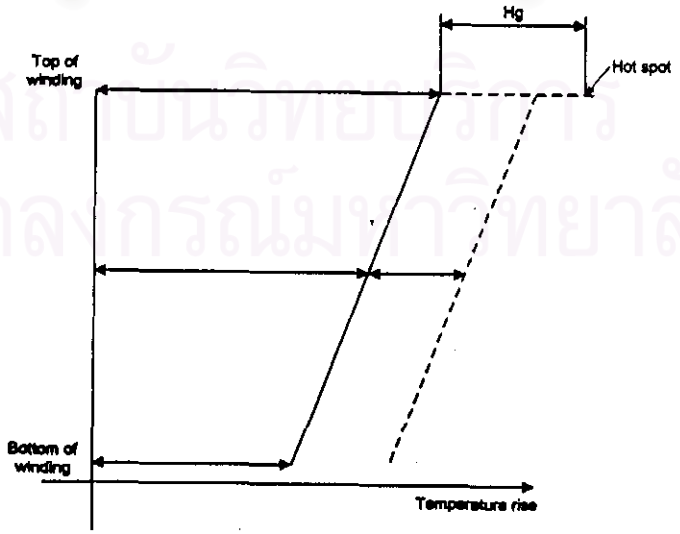
ในการคิดที่ละเอียดพบว่า ค่า E จะขึ้นกับอุณหภูมิ แต่พบว่าในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 -100 °C ค่า E เปลี่ยนแปลงน้อยมาก และค่าความหนาแน่นของอากาศจะไม่มีผลต่อการส่งผ่านความร้อนด้วยวิธีนี้

การส่งผ่านความร้อนด้วยวิธีนี้จะมีผล เมื่อการระบายความร้อนในหม้อแปลงเป็นไปโดยธรรมชาติ โดยเป็นการส่งผ่านความร้อนระหว่างตัวถังหม้อแปลงออกสู่บรรยากาศภายนอก

3.2.3 การส่งผ่านความร้อนโดยการพา

โดยส่วนใหญ่การส่งผ่านความร้อนด้วยการพา จะเป็นการส่งผ่านความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการพาความร้อนในหม้อแปลงน้ำมัน จะมีน้ำมันหม้อแปลงเป็นตัวกลางพาความร้อน และในหม้อแปลงแบบแห้งจะมีอากาศเป็นตัวกลางพาความร้อน

การพาความร้อนในหม้อแปลงน้ำมัน เกิดขึ้นได้โดยอาศัยหลักการความหนาแน่นของน้ำมันมีค่าไม่เท่ากัน โดยน้ำมันที่ร้อนกว่าซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำมันที่เย็นจะลอยตัวขึ้นไปข้างบน ในขณะที่น้ำมันที่เย็นกว่าซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจะไหลไปสู่ก้นถัง จึงเกิดการไหลเวียนของน้ำมันภายในถัง ทำให้ลักษณะอุณหภูมิของน้ำมันมีการลดลงจากตอนบนของถังสู่ตอนล่างดังรูปที่ 3.6 โดย Hg คือระดับอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกินจากอุณหภูมิของน้ำมันตอนบน



รูปที่ 3.6 อุณหภูมิของน้ำมันเมื่อเทียบกับความสูงของขดลวด

โดยสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการพา คือ

$$\frac{hL}{K} = F\left(\frac{\rho^2 g\beta C_p L^3 \theta}{\mu K}\right) \qquad (3.6)$$

โดยที่

h ค่าสัมประสิทธิ์ของพื้นที่ผิวที่ใช้ในการส่งผ่านความร้อน ($W/m^2 K$)

L ค่าความเป็นเชิงเส้นของวัสดุ (m.)

K ค่าความนำความร้อนของน้ำมัน ($W/m^3 K$)

F ค่าตัวประกอบความเสียดทานของอากาศ

ρ ความหนาแน่นของน้ำมัน (kg/m^3)

g ค่าความเร่งของโลก (m/s^2)

β ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อนของน้ำมัน (1/ K)

C_β ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมัน (J/kg K)

θ ค่าอุณหภูมิของผิววัสดุที่เกินจากอุณหภูมิของใจกลางน้ำมัน (K)

μ ค่า viscosity ของน้ำมัน (kg/ms)

ซึ่งสมการนี้อยู่ในรูปที่ไม่สามารถใช้ได้โดยสะดวก อย่างไรก็ตามจากการทดลองสามารถปรับสมการให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นได้เป็น

$$P_C = K\theta_C^{\,n} \qquad (3.7)$$

โดยที่

P_C ค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น (W/m^2)

K ค่าคงที่

θ_C ค่าผลต่างของอุณหภูมิ (K)

n ค่าตัวเลขยกกำลัง มีค่าระหว่าง 1 - 1.25 ขึ้นอยู่กับรูปร่าง , ตำแหน่งและพื้นที่ผิวของจุดที่คิด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การควบคุมความร้อนภายในหม้อแปลง

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวหม้อแปลง เกิดจากกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในตัวหม้อแปลงเอง ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณขดลวดและแกนเหล็กเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ ถ้ามีค่าสูงเกินกว่าพิกัดของฉนวนหม้อแปลงจะทำให้หม้อแปลงเกิดการเสียหายหรืออย่างน้อยที่สุดอายุการใช้งานของหม้อแปลงจะสั้นลง

ด้วยเหตุผลทางเศรษฐกิจ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการใช้งานหม้อแปลงที่มีพิกัดกำลังสูงมากๆ การระบายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลง เป็นเรื่องสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เพราะพิกัดของหม้อแปลงนั้น นอกจากจะพิจารณาได้จากค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงแล้ว ยังสามารถพิจารณาได้จากค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นขณะไม่มีโหลดอีกด้วย หมายความว่าในกรณีที่หม้อแปลงสองลูกที่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายกัน แต่ความสามารถในการระบายความร้อนของหม้อแปลง ออกสู่บรรยากาศภายนอกแตกต่างกัน พิกัดของหม้อแปลง ทั้งสองก็จะแตกต่างกันด้วย โดยหม้อแปลงตัวที่สามารถระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกได้ดีกว่าจะมีพิกัดโหลดที่สูงกว่า

หลักการระบายความร้อนของหม้อแปลงตามมาตรฐานของ IEEE สามารถแยกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

(a) AA หมายถึง หม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง ที่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศโดยธรรมชาติ(Dry - type - self - cooled)

(b) AA/FA หมายถึง หม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง ที่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศ ทั้งแบบโดยธรรมชาติ และใช้พัดลมช่วยระบายอากาศในขณะมีโหลด(Dry - type - self - cooled with forced - air - cooling)

(c) OA หมายถึง หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน ที่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศโดยธรรมชาติ (Oil - Immersed - self - cooled)

(d) OA/FA หมายถึง หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน ที่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศ ทั้งแบบโดยธรรมชาติ และใช้พัดลมช่วยระบายอากาศในขณะมีโหลด(Oil - Immersed - self - cooled with forced - air - cooling)

(e) OA/FA/FA หมายถึง หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน ที่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศ ทั้งแบบโดยธรรมชาติ และใช้พัดลมช่วยระบายอากาศ 2 ระดับในขณะมีโหลด(Oil - Immersed - self - cooled with two stage of forced - air - cooling)

(f) FOA หมายถึง หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน ที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ปั๊มช่วยในการไหลเวียนของน้ำมัน และใช้พัดลมช่วยระบายอากาศในขณะมีโหลด(Oil - Immersed , forced - oil , forced - air - cooling) โดยปกติค่าพิกัดของหม้อแปลงแบบนี้ จะเป็นค่าพิกัดในขณะที่ปั๊มและพัดลมทำงาน

(g) OA/FA/FOA หมายถึง หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน ที่มีการระบายความร้อนทั้งโดยธรรมชาติ , ใช้ปั๊มช่วยในการไหลเวียนของน้ำมัน และใช้พัดลมช่วยระบายอากาศในขณะมีโหลด (Oil - Immersed - self - cooled with forced - oil , forced - air - cooling)

(h) OA/FOA/FOA หมายถึง หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน ที่มีการระบายความร้อนทั้งโดยธรรมชาติ , ใช้ปั๊มช่วยในการไหลเวียนของน้ำมัน และใช้พัดลมช่วยระบายอากาศ 2 ระดับในขณะมีโหลด(Oil - Immersed - self - cooled with two stage of forced - oil , forced - air - cooling) ซึ่งหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบนี้ มักจะใช้กับโหลดประเภทที่มีพิกัดเปลี่ยนแปลง ในแต่ละวันเป็นช่วงกว้าง โดยในการทำงานที่ระดับแรก จะเพิ่มพิกัดของหม้อแปลงขึ้นไปอีก 33 1/3 % เหนือระดับ OA และการทำงานในระดับที่สอง จะเพิ่มพิกัดของหม้อแปลงขึ้นไปอีก 66 2/3 % เหนือระดับ OA

(i) FOW หมายถึง หม้อแปลงที่มีการระบายความร้อน โดยใช้ปั๊มช่วยในการไหลเวียนของน้ำมันและใช้ปั๊มช่วยในการไหลเวียนของน้ำ ขณะระบายความร้อนจากน้ำมันอีกทอดหนึ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย