บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทั่วไปของหม้อแปลงกระแส [3]

ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อจะวัดกระแสไฟฟ้าจำนวนมาก ๆ จะใช้แอมมิเตอร์ที่มีย่านวัดต่ำ ๆ ต่อขนานด้วยชั้นท์ (Shunt Resistor) และการวัดแรงดันไฟฟ้าสูงๆ ก็จะใช้โวลต์มิเตอร์ ที่มีย่านวัดต่ำต่ออันดับกับมัลติพายเออร์ แต่ในกรณีของไฟฟ้า แรงดัน กำลังงานและพลังงาน สามารถวัดด้วยเครื่องมือวัดคุมหรือมิเตอร์ซึ่งมีขนาดสมควร หรือใช้กันอย่างกว้างขวางเป็นเรื่องสำคัญเพราะกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันสูงๆ โดยจริง จะต้องใช้เครื่องมือวัดคุมขนาดใหญ่ และค่าใช้จ่ายสูง ทางแก้ไขก็คือต้องทำการลดกระแสแรงดันให้ต่ำลงเสียก่อนแล้วจึงค่อยทำการวัด การทำให้กระแสแรงดันลดลงนี้ต้องใช้หม้อแปลงสำหรับเครื่องวัด

ซึ่งหม้อแปลงกระแสนั้น ทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขั้ว K-L ต่อกับไลน์ (Line) ของระบบไฟฟ้าหรือภาระไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิที่เป็นกระแสไฟฟ้าทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า จะถูกกำหนดให้เหมาะสมกับเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าและเครื่องวัดเพาเวอร์เฟกเตอร์ซึ่งมักจะให้พิกัดกระแสไฟฟ้า (Current Coil) ของเครื่องวัดเหล่านี้เท่ากับ 5 แอมป์ เช่น 20/5 *A*, 10/5*A* และ 10/5*A* นอกจากนั้นหม้อแปลงกระแสยังได้กำหนดให้มีพิกัดกระแสไฟฟ้า 1*A* ทางขดลวดทุติยภูมิด้วย

สัดส่วนกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า 5/5 *A* ใช้สำหรับการที่ต้องการแยกวงจรการวัดให้ออกจากระบบของแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง ๆ เพื่อให้เกิดความปลอดภัย กับตัวเครื่องวัดและบุคลากรหม้อแปลงกระแสไฟฟ้ามีอัตราส่วนระหว่างขดลวดทุติยภูมิกับปฐมภูมิ เป็น 100:5 ดังนั้นแรงดันที่เพิ่มขึ้นในขดลวดทุติยภูมิมีค่าสูงขึ้นถึง 20 เท่า และกระแสที่ลดลงจะมีค่าเป็น 1:20 คือถ้าแอมมิเตอร์อ่านค่าได้เท่าใดแล้วต้องเอา 20 ไปคูณ จึงจะได้ค่ากระแสในสายไฟจริง ๆ

2.2 ชนิดของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า [3]

หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าที่มีขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอยู่ในตัวเดียวกัน ที่ขดลวดปฐมภูมิถูกทำไว้ให้สามารถเลือกย่านของกระแสไฟฟ้าได้ สำหรับขนาดกระแสไฟฟ้าสูง ๆ นั้นหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าจะใช้แกนเหล็กเป็นแบบวงแหวนและใช้สานตัวนำของกระแสไฟฟ้าสอดผ่านวงในของแกนเหล็กที่เป็นขดลวดปฐมภูมิ จากรูป 2.1 แสดงชนิดของหม้อแปลง

กระแสไฟฟ้าที่ด้านขดลวดปฐมภูมิสามารถเลือกพิกัดกระแสไฟฟ้า ได้ 2.5*A*, 10*A*, และ25*A* นอกจากนั้นยังสามารถใช้วงด้านในของแกนเหล็กสำหรับกระแสไฟฟ้า 100*A*, 125 *A* และ250*A* ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ผลิต เช่น จำนวนของสายตัวนำที่ต้องสอดผ่านแกนวงแหวนสำหรับกระแสไฟฟ้าถึง 500 *A* ให้พันไว้เพียง 1 รอบ หรือถ้าใช้กับกระแสไฟฟ้า 250 *A* ใช้พันไว้ 2 รอบ เป็นต้น

ภาพที่ 2.1 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า แบบแกนวงกลม

ชนิดของหม้อแปลงกระแสที่ได้เห็น โดยทั่วไปตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ที่ใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าในตัวเดียวกันซึ่งเรียกว่า ฮู๊ก-แอมป์มิเตอร์ (Hook -Ammeter) หรือคริปออน-แอมป์มิเตอร์ (Clip-On Ammeter) ดังภาพที่ 2.2 ใช้สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าในสายโดยใช้ก้านหนีบทำเป็นวงจรแม่เหล็กหนีบสายที่ต้องการวัดกระแสไฟฟ้าให้อยู่วงด้านในก้านหนีบนี้

ภาพที่ 2.2 คลิปออน-แอมป์มิเตอร์

2.3 การเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า [6]

การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้านั้น เกิดขึ้นได้ดังวิธีการต่อไปนี้

1. โดยการให้ตัวนำเคลื่อนผ่านสนามแม่เหล็กที่หยุดนิ่งอยู่กับที่
2. โดยการให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านตัวนำที่หยุดนิ่งอยู่กับที่
3. โดยการเปลี่ยนจำนวนของเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดนั้น

วิธีที่หนึ่ง นำไปใช้ในการทำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง วิธีที่สอง ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ และวิธีที่สาม ใช้กับการเหนี่ยวนำขดลวดและหม้อแปลงไฟฟ้า

2.3.1 กฎของการเหนี่ยวนำ

กฎข้อที่หนึ่ง (Lenz's law) กล่าวว่าในวงจรปิดใด ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสในวงจร ย่อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรนั้น โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสในวงจรนั้น

กฎข้อที่สอง (Faraday's law) กล่าวว่าการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของขดลวดหรือลูปอันหนึ่งนั้นเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบขดลวดนั้นๆ หรือการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างของแท่งตัวนำอันหนึ่งนั้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการที่ตัวนำตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กนั้นๆต่อหนึ่งหน่วยเวลา

2.3.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

เราทราบแล้วว่า เมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนั้น ความสัมพันธ์ในวงจรแม่เหล็กคือ

$$\text{เส้นแรงแม่เหล็ก} = \frac{\text{แรงเคลื่อนแม่เหล็ก}}{\text{ความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็ก}} \qquad (2.1)$$

$$(\text{Magnetic flux} = \phi) = \frac{\text{Magneto motive force (m.m.f)}}{\text{Reluctance } \Re}$$

$$\text{m.m.f} = \phi \Re \qquad (2.2)$$

2.3.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force , m.m.f)

m.m.f คือพลังงานรูปหนึ่ง ที่ใช้ในการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็ก ให้วิ่งรอบวงจรแม่เหล็กหนึ่งรอบ หรืออาจพิจารณาว่าเป็นความสามารถในการทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดใดขดลวดหนึ่ง

m.m.f ในวงจรแม่เหล็กนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวด กับจำนวนรอบ (Turn) ของขดลวดนั้น และมีหน่วยเป็น แอมป์-รอบ (Amp-Turn)

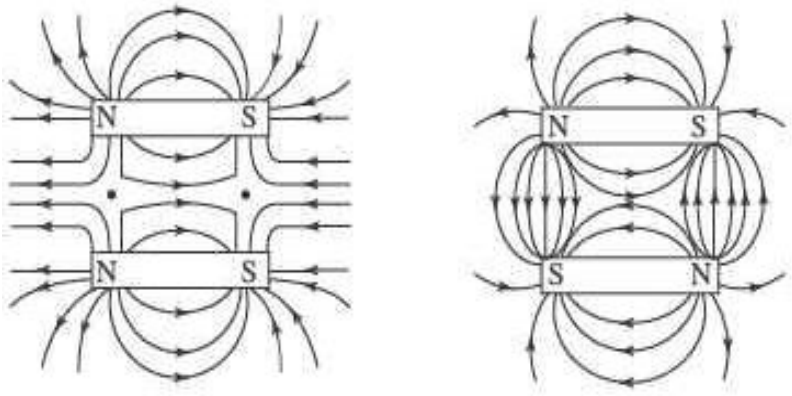
$$F = \text{m.m.f} = NI \qquad (2.3)$$

เมื่อ N = จำนวนรอบของขดลวด

I = กระแสเป็นแอมแปร์

2.3.4 เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux = ϕ)

เส้นแรงแม่เหล็ก คือ เส้นแรงที่เกิดจากแม่เหล็กส่งอำนาจความเป็นแม่เหล็กออกมารอบตัวมันเองดังรูป 2.3 โดยมีทิศทางของเส้นแรงวิ่งจากขั้วเหนือ (N) ไปขั้วใต้ (S) ภายนอกแท่งแม่เหล็ก และวิ่งจากขั้วใต้ (S) ไปขั้วเหนือ (N) ภายในแท่งแม่เหล็ก

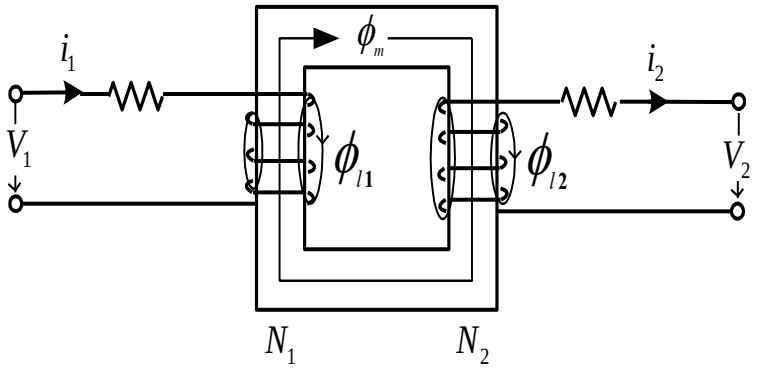


ภาพที่ 2.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแท่งแม่เหล็ก

หน่วยของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น Line หรือ Maxwell สำหรับระบบ CGS แต่ในระบบ MKS มีหน่วยเป็น Weber $=10^8$ lines

2.3.5 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic Leakage) [6]

ในการพิจารณาว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้านั้น โดยทั่ว ๆไปแล้วคิดว่าเป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่เชื่อมโยงระหว่างขดลวดชุดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ แต่ที่จริงมิได้เป็นเช่นนั้น ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กส่วนนี้จะครบวงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit) โดยอากาศ ซึ่งในทำนองเดียวกันลักษณะเช่นนี้ก็จะเกิดขึ้นทางด้านขดลวดทุติยภูมิด้วย เส้นแรงแม่เหล็กส่วนนี้เรียกว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux) ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

จากรูป ϕ_{L1} เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่กระทำระหว่างจุด a ถึงจุด b จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแอมป์แปร์เทอนของขดลวดปฐมภูมิ และ ϕ_{L2} นี้จะเกิดขึ้นพร้อม I1 ซึ่ง ϕ_{L2} นี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นมาอีกค่าหนึ่ง ให้มีค่าเท่ากับ e_{L1} ในทำนองเดียวกันแอมป์แปร์เทอนของขดลวดทุติยภูมิที่กระทำระหว่างจุด c ถึง d ก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลขึ้นอีกส่วนหนึ่งคือ ϕ_{L1} ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับ I_2 และจะสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นมีค่าเท่ากับ e_{L1}

ขณะที่ไม่มีโหลด หรือมีโหลดน้อยๆนั้นแอมแปร์เทอนของขดปฐมภูมิและขดลวดชุดทุติภูมินี้จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้น ค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจะไม่คิด แต่ถ้าโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดชุดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิมีค่ามากขึ้น เป็นผลทำให้แอมป์แปร์เทอนมีค่าเพิ่มมากขึ้นและมีผลให้เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลเพิ่มขึ้นด้วย

เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลนี้จะเกิดขึ้นรอบ ๆ ขดลวดในแต่ละชุดและสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดนั้น ซึ่งเราสามารถเขียนสมการสมมูลย์เป็นอินดักทีฟคอยล์ (Inductive Coil)

ที่ต่ออนุกรมอยู่กับขดลวดในแต่ละชุด ดังนั้น แรงดันที่ตกคร่อมในอินดักทีฟคอยล์จะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

2.3.6 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Intensity of Magnetic field = H)

คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ออกแรงกระทำกับหนึ่งหน่วยของขั้วแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Amp tern / meter หรือ Amp / meter ในหน่วย MKS ส่วนในระบบ CGS มีหน่วยเป็น (ousted) หรือ Gilbert ต่อชั่วโมง สำหรับในตัวกลางที่เป็นอากาศหรืออื่น ๆ นั้น ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Field Density) มีความสำพันธ์กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B (Flux Density = B) นั่นคือ $B = \mu H$ เมื่อ B มีหน่วยเป็น Weber / m^2 ในระบบMKS แต่ในระบบ CGS มีหน่วยเป็น Maxwell/cm^2(gauss) หรือ 1000gauss = 1 wb/ m^2 เมื่อ

μ = สภาพการซึมซาบของแม่เหล็ก (Permeability) ไม่มีหน่วย

H = Field Intensity หรือ Magnetic Potential Gradient หรือเรียกว่า m.m.f Gradient ก็ได้

2.3.7 สภาพการซึมซาบ และความต้านทางแม่เหล็ก (Permeability and Reluctance)

สภาพการซึมซาบทางแม่เหล็ก (μ) คือ ตัวกลางหนึ่งตัวทำให้เกิดสนามหรือเส้นแรงแม่เหล็กได้ มากน้อยแตกต่างกันไป

ความต้านทานแท่งแม่เหล็ก ($\Re$) คือ ความต้านทานที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งอาจจะเป็นอากาศ หรือวัสดุอะไรก็ได้ที่อยู่ในบริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กส่งอำนาจไปถึง จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งนั้นๆ ความต้านทานนี้จะต้านทานการส่งเส้นแรงแม่เหล็กออกจากเหล่งกำเนิดเส้นแรงให้ลดลงไป $\Re$ นี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาว l ที่เส้นแรงผ่านไปเพื่อให้ครบวงจรของตัวมันเองและเป็นสัดส่วนผกผันกับพื้นที่ A ที่เส้นแรงผ่าน รวมทั้งเป็นสัดส่วนผกผัน μ ด้วยในอากาศจึงได้ว่า

$$\Re = \frac{1}{\mu r} \qquad (\mu r = 1) \tag{2.4}$$

สำหรับค่า $\Re$ ในวงจรแม่เหล็กที่มีสภาพการซึมซาบใดๆนั้นได้ว่า

$$\Re = \frac{1}{\mu A} \tag{2.5}$$

สำหรับวงจรทางแม่เหล็กเท่าที่กล่าวมาแล้วพอที่จะรวบรวมสมการที่ใช้หน่วย MKS ได้ดังนี้

$$F = m.m.f = NI = \phi \Re$$

$$H = \frac{NI}{l}$$

$$\phi = BA$$

$$B = 4\mu$$

$$\Re = \frac{1}{\mu A}$$

เมื่อ

F = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (แอมป์ - รอบ)

N = จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)

I = กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลาด (แอมป์)

ϕ = เส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์)

R = ความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็ก (แอมป์-รอบ) / เวเบอร์

H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก (แอมป์ - รอบ) / เมตร

μ = สภาพความซึมซาบทางแม่เหล็กนั้น ๆ

l = ความยาวของวงจรแม่เหล็กที่เส้นแรงวิ่งผ่าน (เมตร)

A = พ.ท.หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กที่เส้นแรงวิ่งผ่าน (ตารางเมตร)

μr = 1 (ในอากาศ)

2.4 หลักการของหม้อแปลง (Transformer's principle) [9]

หม้อแปลงประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด พันอยู่รอบแกนเหล็ก คือ ขดลวดปฐมภูมิโดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมอยู่ (V_p) อีกชุดหนึ่ง คือขดลวดทุติภูมิโดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่โหลดเป็น (V_s) เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_p ที่ขดลวดปฐมภูมิทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้า V_p ทางขดลวดทุติภูมิแม้ไม่มีโหลดต่อกรณีนี้ $Vs = E_2 = V_2$

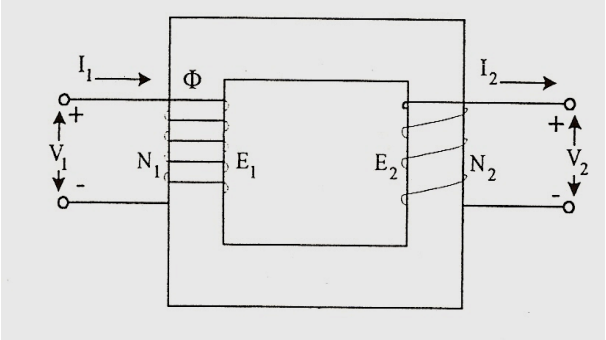
2.4.1 รูปแบบของหม้อแปลง (Transformer Modeling)

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าหลักที่สำคัญชนิดหนึ่งสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง การใช้หม้อแปลงก็เพื่อวัตถุประสงค์ในการแปลงแรงดันให้สูงขึ้นหรือลดระดับแรงดันให้ต่ำลง โดยทั่วไปหม้อ

แปลงที่ใช้จะเป็นชนิดมีขดลวด 2 ขด คือขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) โดยขดลวดทั้งสองนี้จะอยู่บนแกนเหล็ก (Magnetic Core) เดียวกันซึ่งอาจจะเป็นได้ทั้งหม้อแปลง 1 เฟสหรือหม้อแปลง 3 เฟส

2.4.2 การพิจารณาทฤษฎีพื้นฐานของหม้อแปลงในอุดมคติ

หม้อแปลงที่ขดลวด 2 ขดอยู่บนแกนแม่เหล็กเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิ N_1 รอบ และขดลวดทุติยภูมิ N_2 รอบ



ภาพที่ 2.5 หลักการเบื้องต้นของหม้อแปลง

เมื่อพิจาณาความสัมพันธ์ของขดลวดหม้อแปลงในภาพที่ 2.5 ถ้าฟลั๊กแม่เหล็กในแกนเหล็กที่คล้องขดลวดทั้งสองเป็นฟังก์ชันไซนูซอยด์ สมการแรงดันเหนี่ยวนำหม้อแปลงจะมีค่าเป็น

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 B_m A \quad (2.6)$$

และ

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m = 4.44 f N_2 B_m A \quad (2.7)$$

เมื่อ

E_1 คือ แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิ , volt

E_2 คือ แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิ , volt

N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ , รอบ

N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ , รอบ

Φ_m คือ ฟลั๊กแม่เหล็กสูงสุดในแกนเหล็ก = $B_m \times A$, W_b

B_m คือ ความหนาแน่นฟลั๊กแม่เหล็กสูงสุด , W_b / m

A คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิของแกนเหล็กหม้อแปลง, m

f คือ ความถี่ ,Hz

สำหรับหม้อแปลงในอุดมคติขณะไม่มีโหลด จะมีความสัมพันธ์ของแรงดังนี้

$$V_1 = E_1 \text{ และ } V_2 = E_2 \tag{2.8}$$

เมื่อ

V_1 คือ แรงดันที่ขั้วของขดด้านปฐมภูมิ

V_2 คือ แรงดันที่ขั้วทางด้านทุติยภูมิ

ดังนั้นจากสมการที่ 2.6 , 2.7 และ 2.8 จะได้อัตราส่วนการถ่ายโอนแรงดัน (Voltage Transformation Ratio) ดังนี้

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{2.9}$$

และในการพิจารณากระแสของหม้อแปลงอุดมคติมีความสัมพันธ์กับแรงดันดังนี้

กำลังขาเข้า (Power Input) = กำลังขาออก (Power Output)

$V_1 I_1 = V_2 I_2$

ดังนั้น

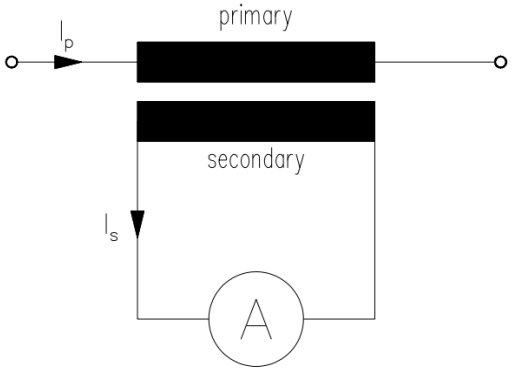
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad \text{หรือ} \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \tag{2.10}$$

จะเห็นได้ว่ากระแสจะเป็นอัตราส่วนผกผันของอัตราส่วนการถ่ายโอนแรงดัน

2.5 การใช้หม้อแปลงสำหรับเครื่องวัด (Use of Instrument Transformer) [5]

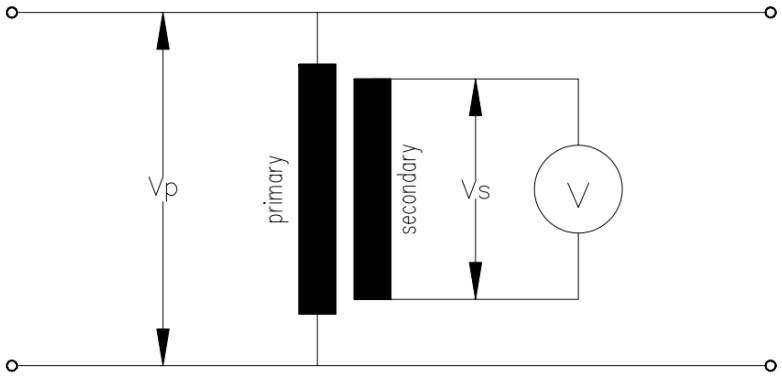
การที่จะวัดกระแสแรงดันกำลังและพลังงาน สามารถวัดด้วยเครื่องมือวัดหรือมิเตอร์ซึ่งขนาดพอสมควร หรือที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเป็นเรื่องสำคัญ เพราะการวัดกระแสหรือแรงดันที่สูง ๆ โดยตรงต้องใช้เครื่องมือวัดขนาดใหญ่และใช้ค่าใช้จ่ายสูง ทางการแก้ไขคือต้องทำการลดกระแสหรือแรงดันให้ต่ำลงเสียก่อนแล้วค่อยทำการวัด การทำให้กระแสแรงดันลดลงนี้ต้องใช้หม้อแปลงนี้เอง ในภาพที่ 2.6 แสดงการวัดกระแสด้วยหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าโดยขดลวดปฐมภูมิ (Primary)

จะต่อเข้ากับสายไฟที่มีกระแสไหลผ่านส่วนขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) จะต่อเข้ากับแอมมิเตอร์ หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าจะทำหน้าที่ลดกระแสลงให้อยู่ในย่านที่แอมมิเตอร์วัดได้



ภาพที่ 2.6 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

ในภาพที่ 2.7 แสดงการวัดแรงดันไฟฟ้า (ความต่างศักย์) ด้วยหม้อแปลงแรงดันซึ่งขดปฐมภูมิ (Primary) ต่อเข้ากับจุดที่จะวัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งขดทุติยภูมิ (Secondary) ต่อเข้ากับโวลท์เตจมิเตอร์ หม้อแปลงแรงดันจะทำหน้าที่ลดแรงดันไฟฟ้าลง ให้อยู่ในระดับของโวลท์เตจมิเตอร์ที่จะวัดได้



ภาพที่ 2.7 หม้อแปลงแรงดัน

มักจะปรากฏให้เห็นอย่างกว้างขวางที่มีการใช้กระแสด้วยชั้นท์ (Shunt) แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าด้วยมัลติพลายเออร์ (Multipliers) ซึ่งจะวัดได้เฉพาะไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับวัดค่าน้อย ๆ เท่านั้นซึ่งหมายความว่าวิธีนี้มีข้อเสีย

2.5.1 ข้อเสียการใช้ชั้นท์ (Shunt)

1. การจะวัดให้ได้ค่าแม่นยำทำได้ยากเพราะกระแสระหว่างมิเตอร์และชั้นท์ (Shunt) ขึ้นอยู่กับค่าเหนี่ยวนำและความต้องการของทั้งสองส่วนแม้ว่าการวัดด้วยชั้นท์ (Shunt) จะใช้ในความถี่ได้หลายความถี่ แต่ก็เป็นเรื่องยากที่จะทำให้การวัดค่าออกมาได้แม่นยำ

2. การวัดด้วยวิธีชั้นท์ (Shunt) นี้ มีข้อจำกัดในการวัดกระแสสูงวัดได้ไม่เกิน 100 กว่าแอมป์เท่านั้น

3. ฉนวนที่มาใช้ในการใช้เครื่องวัดและชั้นท์นั้นทำได้ยากสำหรับวัดกระแสสูง

4. การวัดกระแสจากวงจรนั้นไม่สามารถแยกจากระบบจ่ายไฟได้

2.5.2 ข้อเสียของมัลติพลายเออร์ (Multiplier)

มัลติพลายเออร์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า ไม่เป็นเรื่องยากในการวัดแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่า 1000 โวลท์ แต่มีข้อจำกัดดังต่อไปนี้

1. กำลังงานที่สูญเสียโดยมัลติพลายเออร์ จะกลายเป็นแรงดันที่เพิ่มขึ้นกำลังงานที่สูญเสียไปประมาณ 7.5 วัตต์ (Watt) คือขีดจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้

2. ต้องการกระแสรั่วไหลในแรงดันในแรงดันไฟฟ้าสูงของมัลติพลายเออร์ให้น้อยลง ดังนั้นฉนวนของมัลติพลายเออร์จึงสามารถป้องกันกระแสรั่วไหลและลดค่าประจุไฟฟ้าซึ่งเป็นสิ่งยากสำหรับแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่า 1000 โวลท์

3. การวัดแรงดันไฟฟ้าในวงจรไม่สามารถแยกจากระบบจ่ายได้

2.5.3 ข้อดีของหม้อแปลงสำหรับเครื่องวัด

หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าและหม้อแปลงแรงดันมีความแม่นยำในการวัด และเป็นที่นิยมใช้ตลอดต่อเนื่องจาก

1. เมื่อเครื่องวัดคุมต้องใช้ต่อหม้อแปลงสำหรับเครื่องวัด ค่าที่อ่านได้ไม่ขึ้นกับค่าคงที่เหล่านี้ (R, L, C) เหมือนชั้นท์ (Shunt) และมัลติพลายเออร์ (Multipliers)

2. หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าซึ่งมีขนาดมาตรฐาน 5 แอมแปร์ ที่ขดทุติยภูมิ และหม้อแปลงที่ขดลวดทุติยภูมิ 100 ถึง 120 โวลท์ มีอัตราในการวัดตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ หรือถ้าใช้อัตราส่วนเกิน 1000 / 5 สามารถวัดกระแสได้ถึง 1000 แอมป์ เช่นเดียวกับหม้อแปลงแรงดัน ถ้าใช้อัตราส่วน 66000 / 110 โวลท์ จะวัดแรงดันได้ถึง 66 กิโลโวลท์ เพราะถ้าใช้หม้อแปลงวัดจะทำให้มีขนาดเล็กกระทัดรัด แต่สามารถวัดกระแสและแรงดันได้สูง

3. ด้วยขนาดมาตรฐานของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าและหม้อแปลงแรงดันทำให้ลดค่าใช้จ่ายลงได้

4. ในการวัดวงจรก็แยกออกจากระบบไฟฟ้า กล่าวคือ มิเตอร์จะต่อเข้ากับขดลวด ทุติยภูมิของหม้อแปลงวัดเป็นการวัดแยกจากขดทุติยภูมิซึ่งแรงดันสูง โดยปกติกระแสไฟฟ้าแรงสูงจะอยู่ในค่าระหว่าง 11000 โวลท์ ถึง 2000โวลท์ ปกติสายส่งกำลังแรงสูงมีค่าสูง ถึง 400000 โวลท์ ถ้าจำเป็นที่ต้องการวัดค่ากระแสและแรงดันของสายส่ง ก็ต้องมีมิเตอร์อุปกรณ์ป้องกันรีเลย์หรืออื่น ๆ แต่เราไม่สามารถที่จะนำสายส่งมาต่อโดยตรงกับอุปกรณ์วัดเหล่านั้น เพราะจะเป็นอันตรายต่อบุคคลที่ทำการวัด

การแก้ไขโดยการนำหม้อแปลงวัดคุมมาใช้ของทุติยภูมิของหม้อแปลงวัดคุมต่อเข้ากับสวิทซ์และนำไปต่อเข้ากับอุปกรณ์วัด คือ มิเตอร์ แรงดันก็จะลดลงทำให้การวัดปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

2.6 เบอร์เดนของหม้อแปลงกระแส [8]

วงจรที่ต่ออยู่ทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเรียกว่า ‘‘เบอร์เดน’’ (Burden) เบอร์เดนมีความหมายเหมือนโหลด (Load) เหตุที่เรียกชื่อแตกต่างออกไปก็เพื่อให้สามารถแยกแยะระหว่างโหลดที่อยู่ทางด้านปฐมภูมิและเบอร์เดนที่อยู่ทางด้านทุติยภูมิไม่ให้เข้าใจปะปนกัน ค่าของเบอร์เดนกำหนดในเทอมของอิมพิเดนซ์ และค่าความต้านทานและรีแอคแตนซ์ของวงจรทั้งสิ้น ในสมัยก่อนค่าของเบอร์เดนกำหนดในเทอมของโวลท์ - แอมป์ และตัวประกอบกำลัง ซึ่งหมายถึงค่าโวลท์ - แอมป์ ที่ถูกใช้ในเบอร์เดนเมื่อมีกระแสไหลเท่ากับพิกัดกระแสทุติยภูมิ (มีค่าเท่ากับพิกัดกระแสทุติยภูมิยกกำลังสองคูณกับค่าอิมพิแดนซ์ของเบอร์เดน)

ตัวอย่างเช่น หม้อแปลงกระแสมีพิกัดกระแสทุติยภูมิ 5 แอมแปร์ มีเบอร์เดน 0.5 โอห์ม มีความหมายเหมือนกับเบอร์เดน 12.5 โวลท์-แอมแปร์ที่กระแส 5 แอมแปร์ เป็นต้น ปัจจุบันเลิกใช้เทอมโวลท์-แอมแปร์แล้ว แต่จำเป็นต้องทราบนิยามของเทอมนี้ไว้เพราะว่าเอกสารเก่า ๆ ที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงกระแสจำนวนมากยังคงใช้เป็นเอกสารอ้างอิงในปัจจุบัน

รีเลย์และมาตรวัดต่าง ๆ ที่ต้องใช้งานร่วมกับหม้อแปลงกระแสจะมีข้อมูลเกี่ยวกับเบอร์เดนซึ่งหาได้จากเอกสารของบริษัทผู้ผลิต ค่าเบอร์เดนนี้รวมกับความต้านทานของสายคือเบอร์เดนรามของหม้อแปลงกระแส เบอร์เดนรวมของหม้อแปลงกระแสมักจะมีค่าลดลงเมื่อกระแสที่ไหลในวงจรทุติยภูมิมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าวงจรแม่เหล็กของรีเลย์หรืออุปกรณ์อื่นมักมีการอิ่มตัว บางครั้งเอกสารของบริษัทผู้ผลิตอาจให้ค่าเบอร์เดนที่กระแสต่างๆ มาหลายค่า ในกรณีเช่นนี้จะเห็น

ได้ชัดเจนว่าการกำหนดเบอร์เดนในเทอมของอิมพิแดนซ์ดีกว่าการกำหนดในเทอมของโวลท์-แอมแปร์

เบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสมักจะเป็นแบบทำให้เกิดกระแสล้าหลังแรงดันเป็นมุมค่อนข้างสูง ดังนั้นโดยทั่วไปค่าอัตราส่วนผิดพลาดจะมีค่าสูงและมุมเฟสที่ผิดพลาดจะมีค่าต่ำ จึงมักจะคำนวณค่าอัตราส่วนผิดพลาดเพียงค่าเดียว แล้วตรวจดูว่าค่านี้ไม่สูงเกินไป เพื่อความสะดวกและความรวดเร็วจะนำเอาค่าเบอร์เดนที่เป็นอิมพิแดนซ์มาบวกกันทางพีชคณิตเลยแล้วใช้อิมพิแดนซ์ที่ได้นี้ไปคำนวณอัตราส่วนผิดพลาด ผลลัพธ์ที่ได้จะด้อยกว่าที่เป็นจริงซึ่งเท่ากับว่าหม้อแปลงกระแสที่เราเลือกจะมีความแม่นยำกว่าที่ต้องการเป็นการเผื่อไว้ในกรณีที่มีหม้อแปลงกระแสมากกว่าหนึ่งตัวต่อกันโดยที่กระแสหม้อแปลงกระแสแต่ละตัวอาจรวมกันหรือหักล้างกันในส่วนของวงจรที่ร่วมกันจะต้องคำนวณแรงดันในแต่ละส่วนของวงจรแล้วนำมารวมกันทางเวกเตอร์

ถ้าเราทราบว่าค่าอิมพิเดนซ์ของรีเลย์กระแสเกินที่ค่าปลั๊กเซทติ้งหรือแทปหนึ่งแล้วเราสามารถคำนวณอิมพิเดนซ์เมื่อไปใช้ในแทปอื่นได้โดยง่าย ขดลวดของรีเลย์มีค่ารีแอคแตนซ์แปรผันเป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบยกกำลังสองและค่าความต้านทานแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบโดยปกติค่าความต้านทานมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่ารีแอคแตนซ์ซึ่งอาจคำนวณอิมพิแดนซ์ของรีเลย์โดยถือว่ามีค่าเป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบยกกำลังสอง แต่จำนวนรอบของขดลวดแปรผันเป็นสัดส่วนกับกระแสพิคอัพ ดังนั้นอิมพิแดนซ์ของรีเลย์แปรผันเป็นสัดส่วนกับกระแสพิคอัพยกกำลังสอง

โดยสรุปสั้นๆแล้วเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสหมายถึงโหลดที่ต่อกับขั้วของขดลวดทุติยภูมิ โดยระบุหน่วยเป็น โวลท์ - แอมป์ (*VA*) และเพาเวอร์แฟกเตอร์ หรือค่าโอห์มที่เป็นอิมพิเดนซ์ของโหลดหรือ

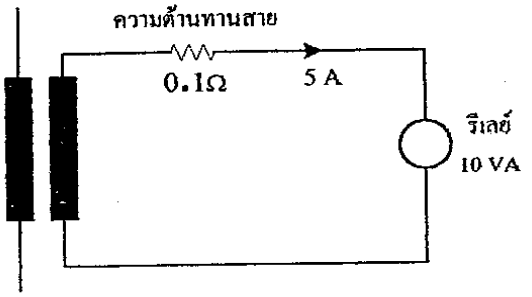
$$\text{ค่าอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงกระแส } Z_b = \frac{Vs}{Is} \qquad (2.11)$$

เมื่อ Z_b คือ อิมพิแดนซ์เบอร์เดนของหม้อแปลงกระแส

ถ้าอิมพิแดนซ์ของเบอร์เดนที่ต่อกับหม้อแปลงกระแสที่มีค่าเพิ่มขึ้นจะมีผลให้แรงดันเหนี่ยวนำ Es เพิ่มขึ้นซึ่งไปมีผลต่อความหนาแน่นของฟลั๊กแม่เหล็กและกระแสกระตุ้นดังนั้นผลของอิมพิแดนซ์ของเบอร์เดนที่มีค่าสูงจะทำให้คลาดเคลื่อนในการทำงานของหม้อแปลงกระแสมีค่าสูงขึ้นด้วย

ตัวอย่างที่ 2.1 จงคำนวณค่าโวลท์แอมป์ทางออก (VA Output) ที่ต้องการสัมผัสหม้อแปลงกระแสมีกระแสพิกัดทุติยภูมิ 5 แอมแปร์ เบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสประกอบด้วยรีเลย์

ที่ต้องการ 10 โวลท์ – แอมแปร์ที่กระแส 5 แอมแปร์และวงรอบของสายมีความต้านทานรวม 0.1 โอห์ม จงเลือกขนาดหม้อแปลงกระแสที่เหมาะสม



ภาพที่ 2.8 วงจรทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสในตัวอย่างที่ 2.1

วิธีการคำนวณหาขนาดของหม้อแปลงกระแสไม่จำเป็นต้องคำนวณอย่างละเอียดถูกต้องนัก อาจคำนวณอย่างคร่าวๆดังแสดงต่อไปนี้

โวลท์-แอมป์ที่ต้องการจ่ายให้ความต้านของสาย $= I^2R$

$= 5^2 \times 0.1 = 2.5\ VA$

รีเลย์ที่ต้องการ 10 โวลท์แอมแปร์

เพราะฉะนั้นโวลท์แอมแปร์ทางออกที่ต้องการรวม $= 10 + 2.5 = 12.5\ VA$

ค่ามาตรฐานของพิกัดทางออกได้แก่ 2.5 , 5 , 10 , 15 ,20 , 30 เป็นต้น ดังนั้นเลือกหม้อแปลงกระแสที่มีพิกัดทางออก 15 โวลท์แอมแปร์ และกระแสทุติยภูมิ 5 แอมแปร์

ตัวอย่างที่ 2. 2 กำหนดให้หม้อแปลงกระแสมีพิกัดกระแสทุตยภูมิ 5 แอมแปร์ ถ้ารีเลย์กินไฟ 2 โวลท์-แอมแปร์ ที่มีปลั๊กเซทติ้ง 2.5 แอมแปร์ จงคำนาณโวลท์แอมป์ประสิทธภาพผลของเบอร์เดนที่มีต่อหม้อแปลงกระแส

$$P_e = P_r \left(\frac{I_s}{I_r}\right)^2$$

P_r = โวลท์แอมป์เบอร์เดนของรีเลย์ที่เซทติ้ง 2.5 แอมแปร์

P_e = โวลท์แอมแปร์ประสิทธิผลของเบอร์เดน

I_s = พิกัดกระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส

I_r = กระแสเซทติ้ง = 2.5 แอมแปร์

เพราะฉะนั้น $P_e = 2\left(\frac{5}{2.5}\right)^2$

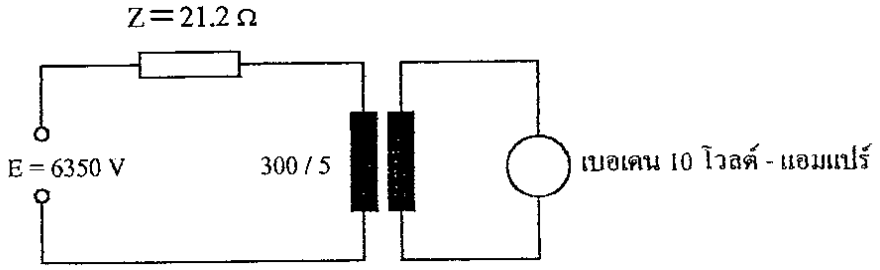
$= 8$ โวลท์-แอมแปร์

เพราะฉะนั้นหม้อแปลงกระแสเลือกใช้มีพิกัดทางออก 10 โวล์ท – แอมแปร์

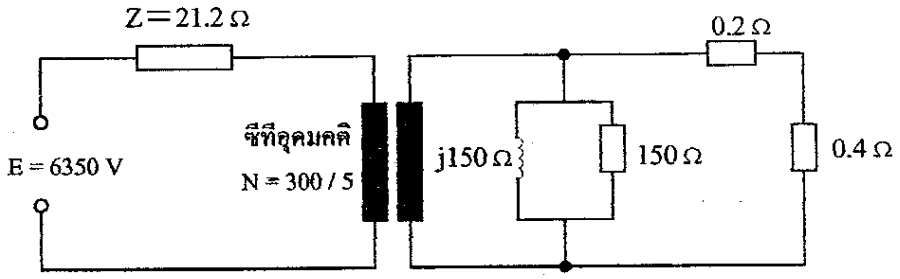
ตัวอย่างที่ 2.3 หม้อแปลงกระแสตัวหนึ่งมีอัตราส่วนกระแส 300 / 5 แอมแปร์ มีเบอร์เดน 10 โวล์ท-แอมแปร์ คล้องต่อในสายของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีอิมพิแดนซ์สมมูลย์ z = 21.2 โอห์ม แรงดันของระบบคือ 11 กิโลโวลท์ จงวาดวงจรสมมูลย์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส กำหนดให้ความต้านทานของหม้อแปลงกระแสคือ 0.2โอห์ม และวงจรกระตุ้นของหม้อแปลงกระแสมีความต้านทาน 150 Ω ต่อขนานกัน

อิมพิแดนซ์ของรีเลย์ = $\frac{(10\,\text{VA})}{5^2} = 0.4\ \Omega$

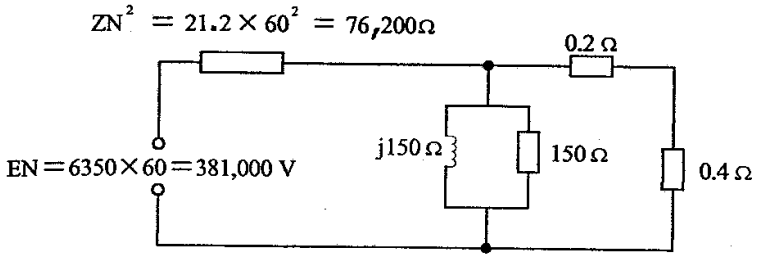
เราอาจวาดวงจรสมมูลย์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.9 วงจรจริงของหม้อแปลงกระแสที่ต่อคล้องเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง



ภาพที่ 2.10 หม้อแปลงกระแสในภาพที่ 2.9 แทนด้วยวงจรหม้อแปลงกระแสอุดมคติต่อกับอิมพิแดนซ์กระตุ้น ความต้านทานของหม้อแปลงกระแสและเบอร์เดน 0.4 โอห์ม



ภาพที่ 2.11 วงจรสมมูลย์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส

ถ้าเราพิจารณาวงจรในภาพที่ 2.11 และสังเกตค่าอิมพิแดนซ์ในส่วนต่าง ๆ แล้วเราอาจสรุปสมบัติ (Properties) ของหม้อแปลงกระแสทั่วๆไปดังนี้

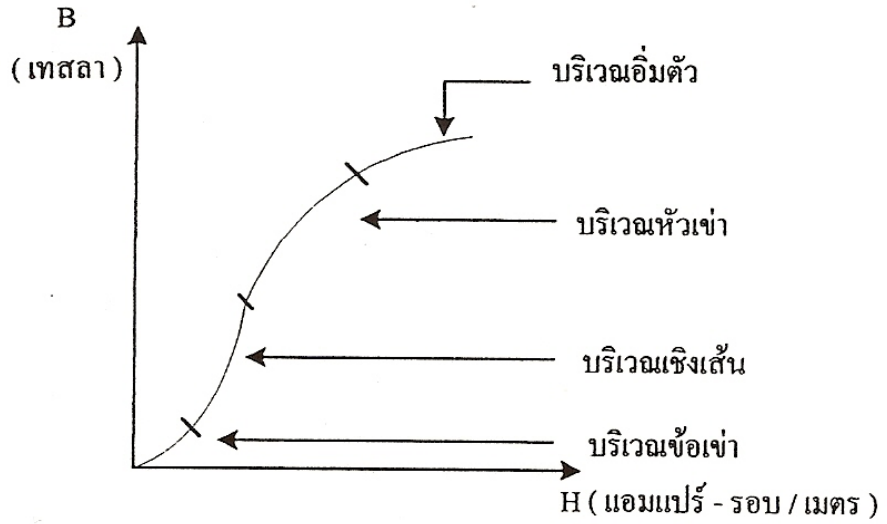
1. อิมพิแดนซ์ของเบอร์เดนเปลี่ยนแปลงไม่มากนักกระแสทุติยภูมิก็จะเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเช่นเดียวกันเช่น เบอร์เดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเท่าตัวหรือลดลงเท่าตัวกระแสทุติยภูมิก็จะยังคงมีขนาดใกล้เคียงค่าเดิม

2. ในขณะที่มีกระแสทางด้านปฐมภูมิวงจรทางด้านทุติยภูมิจะต้องไม่ถูกตัดตอน ถ้าวงจรด้านทุติยภูมิเกิดเปิดวงจรแรงดันระหว่างขั้วของหม้อแปลงกระแสอาจมีค่าสูงเนื่องจากกระแสปฐมภูมิที่ถ่ายทอดไปทางด้านทุติยภูมิจะไหลได้เฉพาะในวงจรแม่เหล็กได้เท่านั้น

3. เราอาจคำนวณอัตราส่วนผิดพลาดและมุมเฟสผิดพลาดได้ง่ายดายถ้าเราทราบค่าเบอร์เดนและลักษณะทางแม่เหล็ก (Magnetizing Characteristic) ของหม้อแปลงกระแส

2.7 เส้นโค้งสมบัติแม่เหล็ก (Magnetization Curve) [8]

เส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแสนั้นมีรูปร่างคล้ายเส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กของหม้อแปลงหรือเครื่องจักที่มีแกนทำจากเหล็ก โดยทั่วไปมีกราฟของ B กับ H เป็นไปตามภาพที่ 2.12 ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 บริเวณ คือ



ภาพที่ 2.12 เส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแส

จุดที่สำคัญก็คือจุดหัวเข่า (Knee region) เป็นจุดหนึ่งในบริเวณหัวเข่าซึ่งถ้าค่าของ B ที่จุดนั้นเพิ่มขึ้น 10 % ค่าของ H จะเพิ่มขึ้น 50 % พอดี หม้อแปลงกระแสสำหรับการป้องกันโดยทั่วไปจะออกแบบให้เมื่อมีกระแสฟอลต์สูงสุดฟลั๊กที่สร้างขึ้นจะไม่เลยจุดเข่าของลักษณะสมบัติแม่เหล็กก่อนถึงบริเวณอิ่มตัวค่าความหนาแน่นฟลั๊กภายในแกนเหล็กจะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแอมแปร์-รอบ (โดยประมาณ) ในบริเวณอิ่มตัวค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetizing Inductance)จะมีค่าต่ำและกระแสที่ถ่ายทอดจากทางด้านปฐมภูมิจะสูญเสียไปวงจรกระตุ้นมากและแรงดันทางออกของหม้อแปลงกระแสจะลดต่ำลงมาก

ตัวอย่างของค่า ๆ เส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแสได้แก่ค่าในตารางที่ 2.1 ซึ่งแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสทำจากแผ่นเหล็กชนิด CROSS (Cold Rolled - grain Oriented Steel) มีอัตราส่วนกระแส 500/ 1 ถ้าคูณ B ด้วย 272 จะให้ค่าแรงดันทุติยภูมิและคูณค่าของ H ด้วย 0.00208 จะได้ค่ากระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็ก ค่าแรงดันทุติยภูมิและกระแสหล่อเลี้ยงสนามแม่เหล็กนี้สามารถนำไปใช้คำนวณอัตราส่วนผิดพลาดที่กระแสปฐมภูมิค่าต่างๆ

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของค่าต่างๆ ในเส้นโค้งสมบัติแม่เหล็ก

H (แอมแปร์-รอบ/เมตร)	4	8	16	3	24	40	48
B (เทสล่า)	0.05	0.15	0.50	1.00	1.30	1.42	1.50
H (แอมแปร์-รอบ/เมตร)	56	64	72	80	200	400	1000
B (เทสล่า)	1.56	1.60	1.64	1.67	1.71	1.75	1.8

2.7.1 การคำนวณความแม่นยำของหม้อแปลงกระแสโดยใช้เส้นโค้งสมบัติแม่เหล็ก

จากวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงกระแสจะเห็นได้ว่ากระแสปฐมภูมิที่ถ่ายทอดไปสู่วงจรทุติยภูมิคือ I_p/N ส่วนหนึ่งของกระแส I_p/N จะถูกจ่ายให้กับวงจรกระตุ้นสนามแม่เหล็กเราทราบว่ากระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ส่วนที่เหลือคือกระแสทุติยภูมิ I_s ที่ไฟจริงจากเส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กเราทราบว่ากระแสกระตุ้น I_s เป็นฟังก์ชันของแรงดันกระต้นทุติยภูมิ(Secondary Excitation Voltage) E_s และอิมพิแดนซ์ของวงจรกระตุ้น Z_e ในขณะเดียวกันกระแสทุติยภูมิ I_s ก็เป็นฟังก์ชันของแรงดัน E_s กับอิมพิแดนซ์รวมของเบอร์เดนในวงจรทุติยภูมิ อิมพิแดนซ์วงจรทางด้านปฐมภูมิมีผลต่อขนาดกระแสปฐมภูมิเท่านั้นแต่ไม่มีผลต่อค่าอัตราส่วนผิดพลาด เมื่อกำหนดเส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแสให้เราสามารถคำนวณหาอัตราส่วนผิดพลาดได้ตามลำดับดังต่อไปนี้ โดยการสมมุติค่ากระแสทุติยภูมิ Is ทีละค่าแล้วคำนวณแรงดันทุติยภูมิ E_s จาก $I_s(Z_{cr}+Z_b)$ จากค่า E_s อ่านค่า I_e จากกราฟเส้นโค้งสมบัติแม่เหล็ก ผลรวมของ I_e กับ I_s คือ I_p/N และอัตราส่วนผิดพลาดอาจคำนวณโดยประมาณจาก $(NI_e / I_p) \times 100$ นำเอาค่า E_s , I_p และอัตราส่วนผิดพลาดหลายๆค่าที่ I_s ต่างๆ กันมาลงไว้ในตารางเรียงลำดับ เมื่อทราบค่า I_p ก็สามารถเทียบค่าจากตารางหาค่า E_s , I_s และอัตราส่วนผิดพลาดได้

การคำนวณความแม่นยำของหม้อแปลงกระแสโดยใช้เส้นโค้งสมบัติแม่เหล็กดังกล่าวข้างต้นใช้ได้เฉพาะเมื่อขนาดของกระแสหรือค่าของเบอร์เดนเป็นไปโดยที่ค่าอัตราส่วนผิดพลาดมีค่าประมาณไม่มากกว่า 10 % ถ้าอัตราส่วนผิดพลาดสูงกว่า 10 % รูปคลื่นของกระแสกระตุ้นจะเพี้ยนซึ่งมีผลให้กระแสทุติยภูมิเพี้ยนไปด้วย ทั้งนี้เพราะแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสอิ่มตัว ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีข้างต้นเชื่อถือไม่ได้เพราะการคำนวณตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่ารูปคลื่นของกระแสเป็นรูปคลื่นซายน์และการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสทำให้เกิดความไม่เป็นเชิง

เส้นขึ้นกระแสปฐมภูมิยิ่งมีขนาดสูงขึ้นเท่าใดผลลัธ์ที่ได้ก็ยิ่งไม่ต้องมากขึ้นเท่านั้น และถึงแม้ว่าคนเราจะสามารถคำนาณค่ากระแสและรูปคลื่นได้อย่างถูกต้องก็ยังคงไม่ทราบว่ารีเลย์จะตอบสนองต่อกระที่ไม่เป็นรูปซายน์อย่างไรในคลื่นได้อย่างถูกต้องก็จะยังไม่ทราบว่ารีเลย์จะตอบสนองต่อกระแสที่ไม่เป็นรูปซายน์อย่างไรในกรณีเช่นนี้วิธีที่เหมาะสมก็ทำได้โดยการทดสอบดูการตอบสนองต่อกระแสของรีเลย์จากขนาดกระแสจริงๆ

2.8 คุณลักษณะของหม้อแปลงกระแส [3]

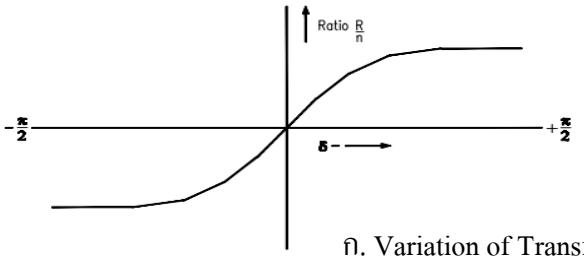
2.8.1 เพาเวอร์แฟคเตอร์ (p.f.) ของเบอร์เดน (Burden) และค่าผิดพลาดทางด้านทุติยภูมิ

อัตราส่วนผิดพลาด (Error Ratio) จากการสังเกตพบว่า เบอร์เดน (Burden) เหนี่ยวนำของกระแสทุติยภูมิ (I_S) จะล้าหลังแรงเคลื่อนที่เหนี่ยวนำของทุติยภูมิ (E_S) ดังนั้น ค่า δ จะมีค่าเป็นบวก ซึ่งภายในสภาพเช่นนี้อัตราส่วนการแปลงจะมากกว่าอัตรารอบเสมอ แต่ถ้าเบอร์เดนเหนี่ยวนำของกระแสทุติยภูมิ (I_S) นำหน้าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของทุติยภูมิ (E_S) แล้ว δ จะมีค่าเป็นลบ อัตราส่วนการแปลงจะน้อยกว่าอัตราส่วนและค่า θ มีค่าประมาณ -90°

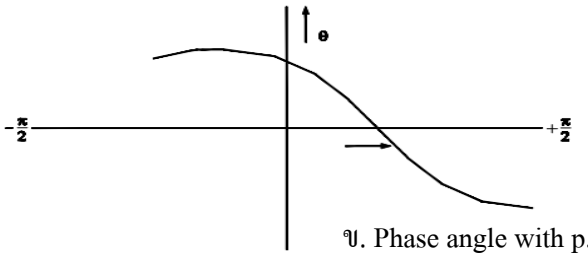
มุมเฟส (Phase Angle) จากตัวอย่างสมการ 2.17 จะพบว่า ค่าเบอร์เดนเหนี่ยวนำและมุมเฟสจะเป็นบวก และค่า δ จะมีค่าน้อย (p.f ของขดทุติยภูมิสูง) แต่จะกลายเป็นค่าลบเมื่อเบอร์เดนเหนี่ยวนำมีค่ามากขึ้น และมีค่าประมาณ 90° สำหรับค่า δ ถ้าเป็นลบ มุมเฟสจะเป็นบวกเสมอ

อีกทางหนึ่งที่จะอธิบาย ก็คือ ค่าเหนี่ยวนำของเพาเวอร์แฟคเตอร์ทุติยภูมิจะเพิ่มขึ้นมุมซึ่งต้องนำเฟสเซอร์ nI_S และ I_O มาปิดแต่ละด้าน (จากภาพที่ 2.17) และค่า I_S เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการแปลงสูงขึ้น อัตราส่วนผิดพลาดก็มีค่าเป็นลบมากขึ้น ดังนั้น ค่า I_P และ nI_S ก็จะลดลงมุมเฟสก็จะลดลง ทำให้ค่าบวกน้อยลงด้วย ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของ Lagging ทุติยภูมิ

การเปลี่ยนของอัตราการแปลง (a) และมุมเฟส (θ) รวมทั้งจะแสดงไว้ในภาพที่ 2.14 มันควรจะบันทึกว่า อัตราส่วนและมุมของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กและการสูญเสียส่วนประกอบของกระแสกระตุ้นเท่ากับมุมเฟสของวงจรทุติยภูมิ เพราะฉะนั้นจากข้อมูลเบื้องต้นและกราฟสามารถนำไปใช้เป็นค่าขนาดความต้านทานคงที่ของทุติยภูมิ



ก. Variation of Transformation Ratio

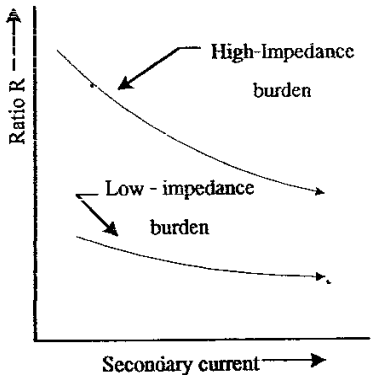


ข. Phase angle with p.f. of Secondary

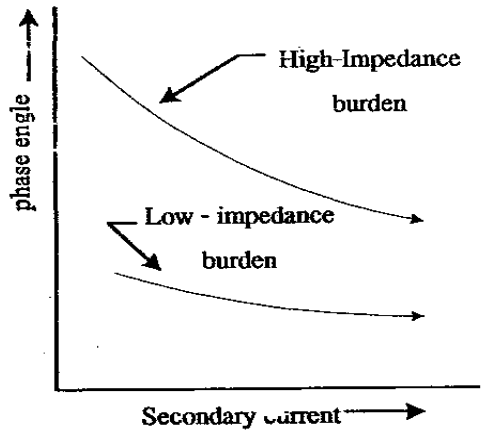
ภาพที่ 2.13 Variation and Phase angle of Transformation

2.8.2 ผลของกระแสปฐมภูมิที่เปลี่ยนแปลง (Effect of Change of Primary Current)

ถ้ากระแสปฐมภูมิที่เปลี่ยนแปลง เป็นสัดส่วนกับกระแสทุติยภูมิที่เปลี่ยนค่าของกระแสปฐมภูมิ (I_O) หรือค่าของกระแสทุติยภูมิ (I_5) จะต่ำกว่ากระแสกระตุ้น (I_m) และกระแสสูญเสียส่วนประกอบ (I_0) ก็จะเป็นสัดส่วนมากขึ้น นั่นคือ กระแสปฐมภูมิ (I_0) เพิ่มกระแสทุติยภูมิ (I_5) ก็จะเพิ่ม จะทำอัตราส่วนผิดพลาด และมุมเฟสมีค่าลดลงจะทำความเข้าใจได้ชัดเจนจากสมการ 2.14 และ 2.15 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนผิดพลาดและมุมเฟส เมื่อเทียบกับกระแสทุติยภูมิ แสดงไว้ในภาพที่ 2.14 และ 2.15)



ภาพที่ 2.14 Variation of Ratio R with Secondary Current



ภาพที่ 2.15 Variation of phase angle with secondary current

2.8.3 ผลของการเปลี่ยนเบอร์เดนทุติยภูมิ (Effect of Change in Secondary Burden)

ในการเพิ่มของความต้านทานเบอร์เดนทุติยภูมิหมายความว่า อัตราโวลท์แอมป์เพิ่มขึ้นการเพิ่มของแรงดันเหนี่ยวนำทุติยภูมิ สามารถเพิ่มได้โดยการเพิ่มฟลั๊ก และความหนาแน่นของฟลั๊ก เพราะฉะนั้นกระแสความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (I_m) และ (I_0) ก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งพอคาดได้ว่าค่าความผิดพลาดก็จะเพิ่มด้วย เพราะค่าของเบอร์เดนทุติยภูมิเพิ่มแต่โดยทั่วไปแล้วเบอร์เดนเพิ่มจะไม่เพียงแต่ทำให้อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงเพิ่มเท่านั้น แต่จะทำให้มุมเฟส ระหว่างกระแสทุติยภูมิและกระแสปฐมภูมิเลื่อนออกไปด้วย มีค่าเป็นบวกมากขึ้นแสดงไว้ในภาพที่ 2.15 และ 2.16

2.8.4 ผลของความถี่ที่เปลี่ยนแปลง (Effect of Change of Frequency)

ผลของความถี่เพิ่มขึ้น จะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาแน่นของฟลั๊ก โดยทั่วไปแล้วผลของความถี่ที่เพิ่มก็จะคล้ายกับทำให้ค่าความต้านทานของเบอร์เดนทุติยภูมิลดลง

หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ไม่ค่อยใช้ความถี่มาเป็นตัวพิจารณาในการออกแบบเหมือนหม้อแปลงประเภทอื่น เพราะฉะนั้นผลความถี่จึงไม่ค่อยสำคัญ

2.8.5 สาเหตุของการเกิดค่าผิดพลาด (Causes of Errors)

หม้อแปลงอุดมคติ ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงจะต้องเท่ากับค่าอัตราส่วนรอบ และมุมเฟสต้องเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากขีดจำกัดของทางด้านกายภาพ (ฟิสิกส์) ทำให้เกิดค่าผิดพลาดได้ดังนี้

1. เกิดกระแสกระตุ้น (Exciting) ที่ขดปฐมภูมิสร้างฟลั๊กขึ้น จึงทำให้หม้อแปลงมีกระแสเหนี่ยวนำแม่เหล็กขึ้น (I_m)

2. อินพุทหม้อแปลงจะต้องมีส่วนประกอบซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียที่แกนเหล็กและการสูญเสีย I^2R ของขดลวดหม้อแปลง เพราะฉะนั้นการสูญเสียส่วนประกอบ I_0 จึงเป็นส่วนหนึ่งของการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากฟลั๊กและการสูญเสียที่ขดลวดก็ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่าน (I_0)

3. ความหนาแน่นของฟลั๊กที่แกนเหล็กไม่ลิเนียร์แรงเหนี่ยวนำแม่เหล็ก เช่น แกน เหล็กอิ่มตัวแล้ว

4. เกิดการสูญเสียของสนามแม่เหล็กเสมอ ซึ่งการสูญเสียฟลั๊กของปฐมภูมิจะไม่เท่ากับการสูญเสียฟลั๊กทุติยภูมิ

2.8.6 การลดค่าสูญเสีย (Reduction of Errors)

สำหรับชนิดของเบอร์เดน (Burden) ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนการแปลงจริง กับอัตราส่วนรอบขึ้นอยู่กับค่าสูญเสียส่วนประกอบ (I_0) อย่างมากและมุมเฟสของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (I_m) ถ้าจะให้ชัดเจน อัตราส่วนการแปลงใกล้เคียงกับอัตราส่วนรวบ และมุมเฟสมีค่าน้อย (I_0) และ (I_m) จะต้องน้อยลงเมื่อเทียบกับกระแสปฐมภูมิ (I_p)

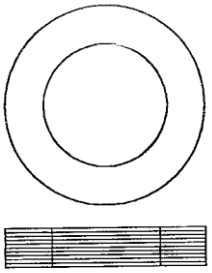
ตัวอย่างสำหรับการออกแบบ

2.8.6.1 แกนเหล็ก (Core) ในการทำให้มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดจะต้องทำให้ขนาดกระแสเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (I_m) และการสูญเสียส่วนประกอบ (I_0) จะต้องมีค่าน้อย ซึ่งหมายความว่าแกนเหล็กต้องมีค่ารีลักซ์แต๊นท์ และการสูญเสียแกนเหล็กต่ำ การลดค่ารีลักซ์แต๊นท์ การลดค่ารีลักซ์แตนท์ของทางเดินฟลั๊ก ทำได้โดยการใช้วัสดุที่มีค่าซึมผ่านได้สูง ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กต้องสั้น ภาตัดของแกนเหล็กต้องใหญ่ และมีค่าความหนาแน่นของฟลั๊กต่ำ

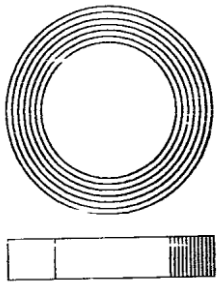
ปัจจุบันวัสดุที่นำมาทำเป็นหม้อแปลงกระแส แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. เหล็กซิลิกอนที่เป็นลักษณะกลมร้อน (Hot Rolled Silicon Steel)
2. เหล็กซิลิกอนที่เป็นลักษณะกลมเย็น (Cold Rolled Silicon Steel)
3. เหล็กผสมนิเกิล (Nickel Iron Alloys)

ในทางปฏิบัติหม้อแปลงกระแสใช้เหล็กซิลิกอนลักษณะกลมร้อน (Hot Rolled Silicon Steel) จะถูกนำมาทำหลายรูปร่าง รูปวงแหวนจะเป็นที่ใช้ทั่วไปสำหรับแบบ T-U, L หรือ E และ I ก็สามารถใช้ได้ แต่ถ้ามีคุณภาพสูงสุดต้องมีรูปร่างเป็นวงแหวน ซึ่งลักษณะเป็นทรงกระบอก ดังภาพที่ 2.16 แกน Employs ซึ่งเป็นลักษณะที่ขดเป็นวงกลมเหมือน Look Spring (ภาพที่ 2.17) วิธีแกนเหล็กจะมีทางเดินของได้ดีและค่ารีแอคแต๊นท์ (Reluctance) จะน้อยลง ข้อดีของแกนแบบขดนี้เป็นวงนี้จะทำให้ข้อต่อลดลงไปได้หมด



ภาพที่ 2.16 Ring Type Core



ภาพที่ 2.17 Spiral Type Core

แกนเหล็กนิกเกิลมีความซึมซาบได้สูงจึงถูกนำมาใช้เป็นหม้อแปลงกระแส Mimetal (มีนิเกิล 76%) มักนำมาทำเป็นแกนเพราะมีคุณสมบัติการซึมซาบที่ดีมีค่าสูญเสียน้อย และค่าความเก็บความร้อนต่ำด้วย ทั้งหมดนี้คือข้อดีของหม้อแปลงกระแส แต่ค่าซึมซาบที่สูง (90000) จะทำให้เกิดความหนาแน่นของฟลั๊กเพียง 0.35 wb/m^2 (เวเบอร์/ตารางเมตร) (4500) แต่ให้ความหนาแน่นของฟลั๊กเพียง 0.5 wb/m^2 (เวเบอร์/ตารางเมตร) เพราะเหตุนี้ Munetal ไม่เพียงแต่นำมาใช้เป็นหม้อแปลงกระแสเพื่อใช้งานเป็นโอเวอร์โหลดรีเลย์ แต่ยังมีราคาถูกอีกด้วย Perm ender (มีคาร์บอน 49%) มีข้อดีคือมีความหนาแน่นอิ่มตัวสูง ตั้งแต่ 2 ถึง 4 เวเบอร์/ตารางเมตร ในขณะที่โลหะผสม (Alloy) ที่มีความซึมซาบสูง ก็มีความหนาแน่นอิ่มตัวเพียง 0.7-0.8 เวเบอร์ต่อตารางเมตร

Hyperlink (เหล็ก 50% นิเกิล 50%) มีค่าความซึมซาบสูง ความหนาแน่นของฟลั๊กต่ำ และความหนาแน่นอิ่มตัวสูงมาก เพราะฉะนั้นวัสดุชนิดนี้จึงนำมาทำเป็นหม้อแปลงกระแส

2.8.6.2 อัตรากระแสปฐมภูมิ (Primary Current Ratings)

แม้ว่าใช้หม้อแปลงกระแสต่อเข้ากับอุปกรณ์การใช้งาน สิ่งที่อยากได้คืออัตราส่วนของกระแสกระตุ้น (Exciting) กับกระแสปฐมภูมิควรจะมีค่าน้อย นั้นหมายความว่าอัตราส่วน m.m.f ของแอ๊กไซเตชั่น (Excitation) ต่อค่า m.m.f. ยังมีค่าน้อย แต่ให้การทำงานเป็นประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งหมายความว่าก็ต้องเพิ่มค่ากระแสปฐมภูมิเพิ่มขึ้น แนวทางแก้ไขที่ดีคือ ค่าอัตรา m.m.f. ของปฐมภูมิจะใช้กับกระแสในช่วง 500 แอมป์ ถึงจะเหมาะสม เพราะฉะนั้น หม้อแปลงที่ใช้กระแส 500 แอมป์หรือมากกว่าจะใช้ขดปฐมภูมิขดเดียว ในขณะที่ถ้าใช้กับกระแสที่ต่ำกว่า 500 แอมป์ ขดปฐมภูมิจะต้องมีหลายขด ทำให้แกนเหล็กต้องลดขนาดลงด้วย

แต่ด้วยการพัฒนาวัสดุของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กและวิธีการพัฒนาความซึมซาบของแกนเหล็กทำให้เราสามารถใช้ขดปฐมภูมิเพียงขดเดียวกับกระแส 100 แอมแปร์ได้

2.8.6.3 ความต้านทานรั่วไหล (Leakage Reactance) ค่าความต้านทานรั่วไหลขึ้นกับอัตราส่วนผิดพลาด เพราะฉะนั้นจะต้องให้ขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิอยู่ใกล้กันมากที่สุด เพื่อที่จะ

ลดค่าความต้านทานรั่วไหลที่ขดทุติยภูมิแกนเหล็กก็ต้องใช้รูปร่างแบบวงแหวน การพันลวดควรพันแบบ Toroidal ก็จะทำให้ลดค่าความต้านทานรั่วไหลได้

2.8.6.4 การชดเชยจำนวนรอบ (Turns Compensation) เรามีอัตราส่วนจริงของการแปลง

$$a = n + (I_0 / I_5)$$

ด้วยเหตุนี้ ถ้าเราทำอัตราส่วนอัตราส่วนในนาม (Nominal) ให้เท่ากับอัตราส่วนรอบแล้ว อัตราส่วนจริงของการแปลงก็จะมีค่ามากกว่าอัตราส่วนในนามตอนนี้ ถ้าเราลดค่าอัตราส่วนรอบและรักษาค่าอัตราส่วนในนามไว้เท่ากับค่าช่วงต้น ค่าอัตราส่วนจริงการแปลงก็จะลดลงนี้เอง ที่ทำให้อัตราส่วนจริง การแปลงเข้าใกล้กับค่าอัตราส่วนในนามเพื่อให้เข้าใจ ลองพิจารณาจากตัวอย่างต่อไปนี้

หม้อแปลงกระแส 1000/5 แอมป์ ค่าสูญเสียส่วนประกอบมีค่า 0.6% ของกระแส Exciting

อัตราส่วน Nominal $K_p = \frac{1000}{5} = 200$

ค่าสูญเสียประกอบ $I_0 = \left(\frac{0.6}{100}\right) \times 1000 = 6\,A$

ให้จำนวนรอบของปฐมภูมิ $T_P = 1$

ถ้าให้อัตราส่วนรอบเท่ากับอัตราส่วน Nominal

$n = 200$

เพราะฉะนั้น ขดทุติยภูมิ $T_S = n$

$T_p = 200 \times 1 = 200$

อัตราส่วนจริง $a = n + \left(\frac{I_o}{I_s}\right) = 200 + \left(\frac{6}{5}\right)$

ถ้าสมมติขดทุติยภูมิไม่ใช้ 200 แต่ใช้ 199 แทนอัตราส่วนจริงของการแปลงกับการชดเชยจำนวนรอบ

$$a = n + \left(\frac{I_o}{I_s}\right)$$

$$= 199 + \left(\frac{6}{5}\right)$$

$$= 200.2$$

ด้วยเหตุนี้เราจะเห็นว่า ถ้าลดจำนวนรอบขดทุติยภูมิค่าใกล้เคียงอัตราส่วน Nominal

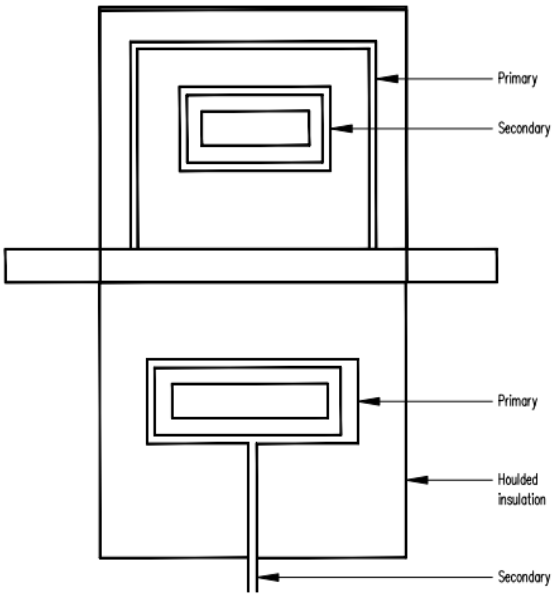
โดยปกติจำนวนรอบของขดทุติยภูมิที่ดีที่สุดคือ มีค่าเท่ากับ 1 หรือให้น้อยกว่า 2 เพื่อค่าอัตราส่วนจริงของการแปลงมีค่าเท่ากับอัตราส่วน Nominal ของหม้อแปลง มุมเฟสจะผิดพลาดน้อยลงขึ้นกับผลของการเปลี่ยนจำนวนรอบทุติยภูมิ 1 รอบ หรือ 2 รอบ

การแก้ไขโดยการลดจำนวนรอบทุติยภูมิ เพื่อให้ค่ากระแสและความต้านทานของเบอร์เดนเป็นจริงนี้ ในหม้อแปลงกระแสเราเรียกว่า การชดเชย (Compensated)

2.9 โครงสร้าง (Construction) [3]

2.9.1 แบบวาวน์ (Wound)

เป็นหม้อแปลงกระแสที่จะมีขดปฐมภูมิมากกว่าหนึ่งขด พับจนเต็มบนแกนเหล็ก

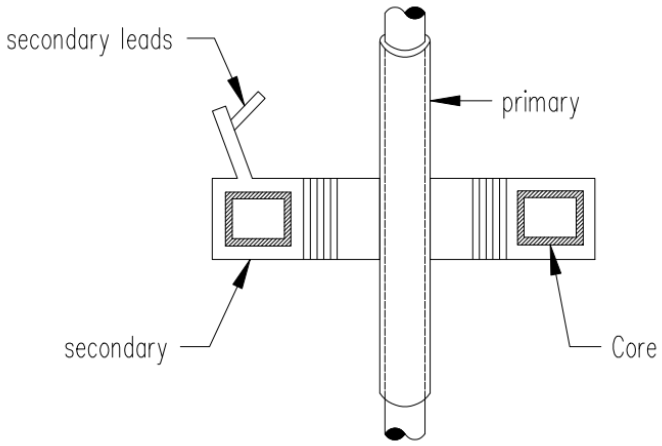


ภาพที่ 2.18 หม้อแปลงกระแส Wound Type

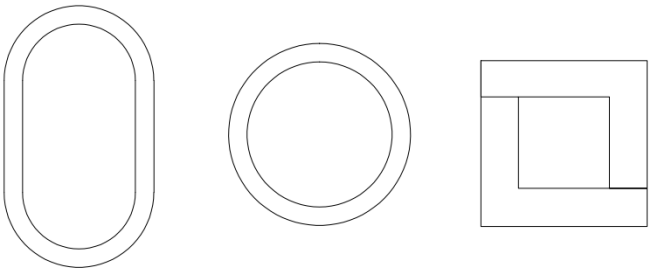
2.9.2 แบบบาร์ (Bar)

หม้อแปลงกระแสแบบบาร์นี้ ขดปฐมภูมิจะประกอบด้วยบาร์ที่มีขนาดพอเหมาะและแบบรอบเป็นส่วนหนึ่งของหม้อแปลง ภาพที่ 2.19 และ 2.20 แสดงหม้อแปลงแบบวาวน์ (Wound) และแบบบาร์ (Bar) แบบของหม้อแปลงที่ง่าย ๆ ที่ใช้ในหม้อแปลงกระแสจะทำลักษณะเป็นวงแหวนหรือแบบหน้าต่าง ๆ ภาพที่ 2.27 แสดงแบบทั่วไปที่นิยมใช้คือ แบบสนาม (Stadium) แบบวงกลม (Circular) และแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular) สำหรับแกนถ้าเป็นโลหะผสมนิเกิล หรือ Oriental

Electric Steel มักจะใช้กับหม้อแปลงแบบ Wound แต่หม้อแปลงกระแสที่ใช้ Hot Rolled Steel จะประกอบด้วยปอกวงแหวน แล้วค่อยพันขดลวดปฐมภูมิ หลังจากนั้นจะมีฉนวนหุ้มอีกชั้น โดยการใช้ Elephantine หรือ พันรอบ ๆ แม้ว่าแกนนี้จะมีฉนวนอยู่ตรงกลาง ก็ต้องระวังขดทุติยภูมิจะสัมผัสได้ เนื่องจากถูกทำลายทางด้านกล ขึ้นอยู่กับความชันของมุม



ภาพที่ 2.19 หม้อแปลงกระแสแบบ Bar Type



ก. ข. ค.

ภาพที่ 2.20 Stampings for Window Type Current Transformer

ก. Stadium ข. Circular ค. Rectangular

การพันขดลวดทุติยภูมิลงบนแกนจะทำด้วยเครื่องพันลวด (Toroibal Winding Machine) เว้นแต่การพันด้วยมือยังเป็นที่นิยมสำหรับการพันในจำนวนรอบน้อย ๆ หลังจากนั้นพันขดลวดทุติยภูมิลงบนแกนเสร็จแล้วหม้อแปลงแบบวงแหวนก็จะพันด้วยเทปภายนอกอีกครั้ง

หม้อแปลงกระแสแบบวงแหวนมีลักษณะใกล้เคียงกับแบบ Bushing Type ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วแยกไม่ออกจากหม้อแปลงวงแหวน แต่ตัวที่จะใช้แยกได้ก็คือหม้อแปลงกระแสที่มีขดปฐมภูมิป้องกันฉนวนด้วยน้ำมันที่ปลาย Bushing ของ Power Transformer หรือน้ำมัน Circuit Breaker

หม้อแปลงแกนแบบ Split แกนจะถูกแยกออกเป็นสองส่วนโดยแต่ละส่วนแยกโดยใช้กราวด์หรือช่องว่างอากาศ (Lopped Gap Faces) หม้อแปลงกระแสแบบนี้จะใช้เป็นตัวนำทางปฐมภูมิ (On Sice) สำหรับการทำเป็นตัวนำถาวรหรือชั่วคราว

ในหม้อแปลงกระแสแบบบาร์ แกนและขดลวดทุติยภูมิจะเหมือนกับแบบวงแหวนแต่ขดปฐมภูมิเพียงขดเดียวและฉนวนตลอดตัวนำบาร์ฉนวนบนตัวนำปฐมภูมิอาจเป็นหลอดกระดาษหรือเรซินห่อหุ้มโดยตรงและติดตั้งบนบาร์

หม้อแปลงกระแสแบบวาวน์ที่ใช้สำหรับโวล์ทเตจต่ำขดลวดทุติยภูมิจะพันบนแกนแบกเกอร์ไรด์ (Beaker rite) หรือบ๊อบบิ้น (Bobbin) และตัวนำปฐมภูมิถ้าไม่พันทับขดทุติยภูมิที่มีฉนวนเหมาะสมหุ้มไว้ที่พันแยกโดยใช้เทปหรือวัสดุที่เป็นฉนวนพันรวมกันบนแกนเดียวกันในการผลิตหม้อแปลงกระแสแผ่นเหล็กบาง ๆ ที่นำมารวมกัน ต้องการอะไรบ้างเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณามากกว่าหม้อแปลงธรรมดา เพื่อที่จะทำให้ค่า Reluctance ต่ำลงและถ้าจะทำให้กระแสเหนี่ยวนำแม่เหล็กน้อยที่สุด บางครั้งก็ต้องใช้วิธีตัดแกนเมื่อไหร่ก็ตามที่พันขดลวดทุติยภูมิ ควรจะพันให้ตลอดความความยาวของแกนขดลวดทุติยภูมิควรมีช่องว่างที่เหมาะสมในเวลาพัน และฉนวน

ระหว่างทุติยภูมิกับแกนควรจะมีความต้านทานโวล์เตจได้สูง ในกรณีถ้าขดลวดทุติยภูมิเกิดวงจรขาดและขดปฐมภูมิยังมีกระแสไหลผ่านอยู่และในกรณีจำนวนรอบของขดทุติยภูมิมากก็ต้องพันหลายชั้น เทคนิคการพันขดทุติยภูมิเป็นส่วน ๆ จะถูกนำมาใช้เพื่อลดค่าพีค (Peak) โวล์เตจระหว่างชั้นลงได้ ส่วนการพันขดปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสไม่ค่อยจะมีปัญหามากนักแต่มันมีความสำคัญที่ต้องพยายามให้ขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิอยู่ในตำแหน่งที่ดี เพื่อทำให้ค่า Assail Forces ของทั้งสองขดน้อยที่สุดที่เกิดจากกระแสลัดวงจรที่ขดปฐมภูมิ

กระพันลวด (Windings) การพันขดลวดควรให้ใกล้กันมากที่สุด เพื่อลดค่าความต้านทานรั่วไหลของทุติยภูมิ เพราะค่าความต้านทานรั่วไหลนี้เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดมากขึ้นด้วย ลดทองแดงขนาดพื้นที่หน้าตัดประมาณ 3 ตารางมิลลิเมตร ถูกใช้บ่อยในการพันขดทุติยภูมิขนาด 5 แอมป์ ลวดทองแดงเปลือย (Copper Strip) จะใช้ในการพันขดปฐมภูมิ สำหรับขนาดก็จะขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดปฐมภูมินั้นเมื่อค่าใช้ปฐมภูมิแบบ Bar เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหลอด จะต้องใหญ่พอที่จะเป็นฉนวนไม่ให้แรงดันที่เพิ่มขึ้นออกมาสู่ผิวนอกได้ การพันลวดก็ต้องออกแบบให้ดี แข็งแรง ทนทานต่อการถูกทำลายโดยเฉพาะเมื่อเกิดการลัดวงจรจะต้องทนแรงที่เกิด

จากการลัดวงจรอย่างมาก เพื่อไม่ให้ระบบที่มีหม้อแปลงกระแสต่ออยู่เสียหายได้ การพันขดลวดก็ต้องพันลักษณะแยกกันและมีฉนวนกั้น ซึ่งอาจเป็นเทปหรือวานิช สำหรับหม้อแปลงที่ใช้กับแรงดันต่ำ ถ้าเป็นหม้อแปลงสำหรับแรงดันสูงกว่า 7 *kv* ฉนวนก็จะต้องใช้เป็นน้ำมันแทน

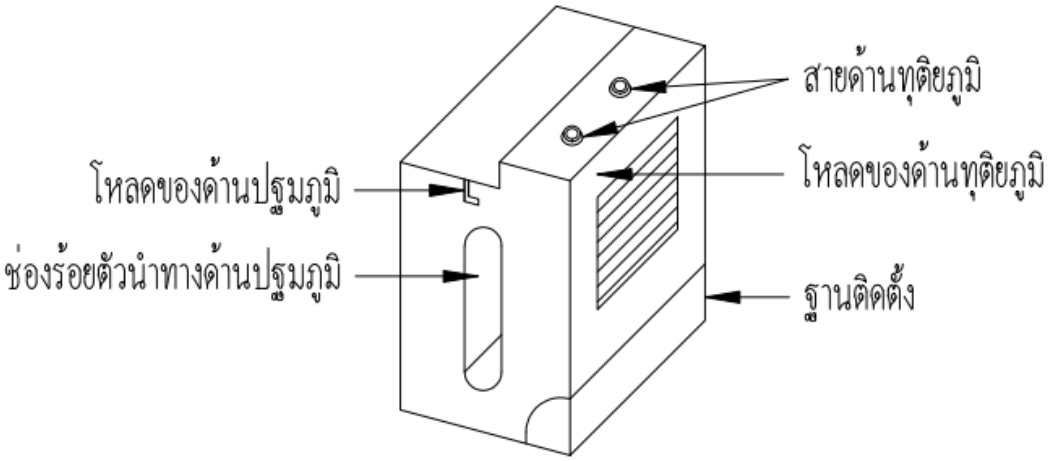
2.9.3 โครงสร้างภายนอกของหม้อแปลงกระแสแบบร้อยสายผ่าน

หม้อแปลงกระแสแบบร้อยสายผ่าน หมายถึง หม้อแปลงกระแสแบบที่มีพันขดลวดทุติยภูมิกับแกนเหล็กเท่านั้น สำหรับทางด้านปฐมภูมินั้น ใช้การร้อยสายไฟผ่านช่องเปิดทะลุที่ทำไว้ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ

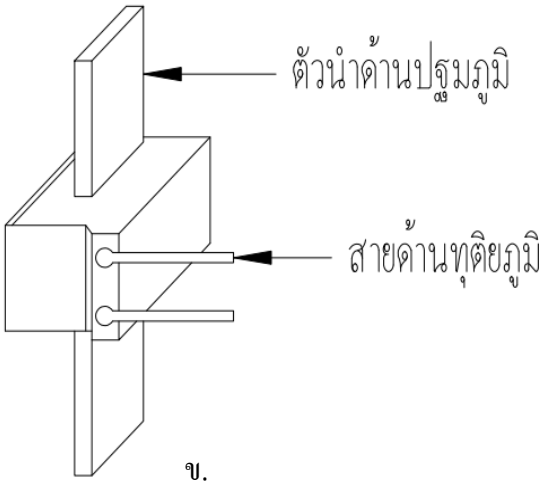
1. แบบร้อยสายผ่านที่มีช่องร้อยสายเป็นช่องกลม (Epoxy Resin Mold) หม้อแปลงกระแสแบบช่องกลม เป็นแบบที่ใช้กับสายไฟหรือสายเคเบิ้ลได้โดยการร้อยผ่านโดยตรงหม้อแปลงกระแสแบบนี้ขั้ว k และ L ทางด้านปฐมภูมิจะอยู่ข้างเดียวกับขั้ว K และ I ของด้านทุติยภูมิตามลำดับ ตามภาพที่ 2.21 หม้อแปลงกระแสแบบร้อยสายผ่านสามารถจะเปลี่ยนอัตราการแปลงกระแสโดยวิธีการร้อยสายผ่านดังภาพที่ 2.21

ภาพที่ 2.21 หม้อแปลงกระแสแบบร้อยสายผ่าน

2. หม้อแปลงกระแสแบบร้อยสายผ่านแบบช่องสี่เหลี่ยม (Epoxy Resin Mold Type) หม้อแปลงกระแสแบบนี้เป็นแบบที่ช่องที่ให้ตัวนำทางด้านปฐมภูมิผ่านมีรูปเป็นรูปสี่เหลี่ยมเหมาะสมสำหรับใช้กับตัวนำทางด้านปฐมภูมิที่เป็นรูปแถบทองแดง ดังภาพที่ 2.23 และ 2.24

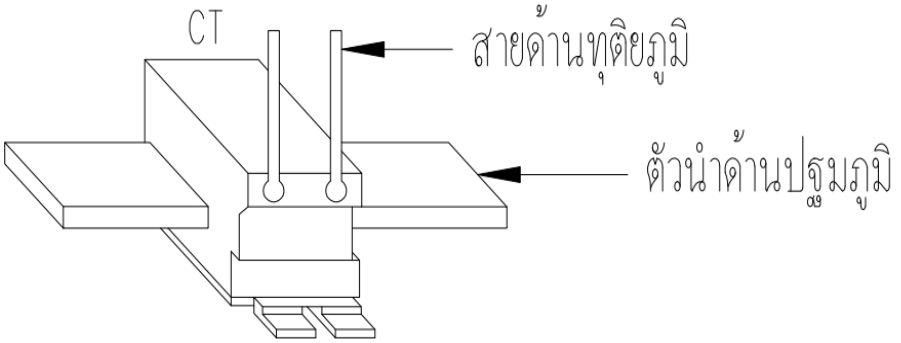


ก.



ข.

ภาพที่ 2.22 หม้อแปลงกระแสแบบร้อยสายผ่านช่อง
ก.แบบร้อยสายผ่านช่องสี่เหลี่ยมแนวตั้ง
ข.แบบร้อยสายผ่านช่องมีตัวนำ

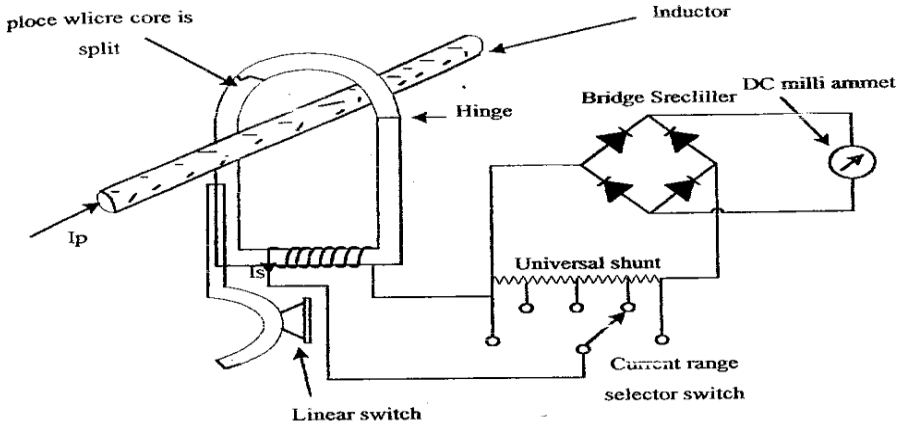


ภาพที่ 2.23 หม้อแปลงกระแสแบบร้อยสายผ่านแบบช่องสี่เหลี่ยมแบบแนวนอน

3. หม้อแปลงกระแสแบบก้านตัวนำ หม้อแปลงกระแสแบบนี้เป็นแบบที่ตัวนำด้านปฐมภูมิเป็นก้านโลหะมีการพันเพียง 1 รอบ ใช้สำหรับค่ากระแสปฐมภูมิที่มีค่า

2.10 แคลป์ม - ออน แอมป์มิเตอร์ (Clamp - on Ammeters) [3]

หม้อแปลงกระแสและลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน วงจรบริดจ์เร็กติฟลายเออร์และดีซี แอมป์มิเตอร์ รวมกันทั้งหมดจะเป็นอุปกรณ์สำหรับเป็นมิเตอร์วัดได้โดยแกนของหม้อแปลงสามารถแยกออกได้ โดยอาศัย Trigger Switch เพราะฉะนั้นแกนหม้อแปลงก็สามารถจับ (Clamp) กับลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เพื่อทำการวัดกระแสได้และการปรับแต่งในการอ่านจำเป็นต้องมีชั้นท์ความต้านทานของวงจรมิลลิ-แอมป์มิเตอร์ ขนาด 0.5 *A* ถึง 600 *A* มาต่อเพื่อให้กระแสที่วัดแบ่งการไหล เพื่อจะวัดได้ค่าถูกต้อง



ภาพที่ 2.24 Clamp - on Ammeter

Clamp - on Transformer แบบนี้ (หรือ Split Core Transformers) จะใช้ร่วมกับแอมป์มิเตอร์ ซึ่งหม้อแปลงแบบนี้จะออกแบบใช้ขดลวดปฐมภูมิปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิใช้กับโวลต์เตจ 5 kv ได้ Clamp on Transformer มีหลายแบบหลายชนิด ซึ่งสามารถใช้วัดกระแสได้ในสายส่ง รวมทั้งวัดค่า Reactive Power Factor

2.11 ผลของวงจรเปิดทางด้านทุติยภูมิ (Effect of Secondary Open Circuit) [11]

หม้อแปลงกระแสมักใช้กับวงจรปิดทางด้านทุติยภูมิ เช่น แอมป์มิเตอร์ วัตต์มิเตอร์ คอยส์กระแส รีเลย์คอยล์ แต่ก็มีข้อควรระวัง ซึ่งได้มาจากการสังเกตการใช้หม้อแปลงกระแสพอสรุปได้ดังนี้

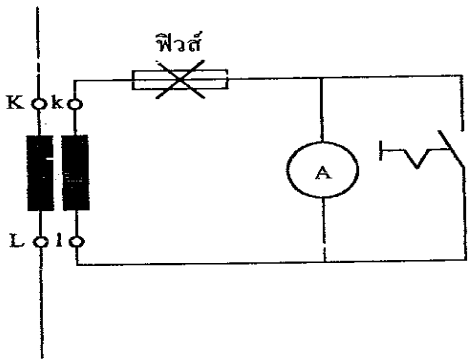
ต้องไม่ได้หม้อแปลงกระแสต่อกับด้านปฐมภูมิที่มีกระแสไฟฟ้า โดยที่ทางด้านทุติยภูมิลอย ๆ ไม่ได้ต่ออะไรเลย ซึ่งข้อควรระวังนี้สำคัญมาก เพราะจะทำให้เกิดอันตรายต่อหม้อแปลงและผู้ปฏิบัติงานใช้หม้อแปลงนั่นอยู่ สาเหตุที่เป็นอันตรายพอจะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ความแตกต่างระหว่างหม้อแปลงกำลัง (Power Transformer) และหม้อแปลงกระแสก็คือหม้อแปลงกำลังนั้นในขณะที่ขดปฐมภูมิมีกระแสไหลสูงจะทำให้เกิดกระแสไหลในขดทุติยภูมิด้วย แต่หม้อแปลงกระแสนั้นจะต่อเข้ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดปฐมภูมิไม่สามารถที่จะควบคุมได้หรือขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของด้านทุติยภูมิ (ยกเว้นแต่กรณีที่ใช้กับวงจรที่มีแรงดันต่ำ กระแสในขดปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสจะไม่มีผลอะไรกับทางด้านทุติยภูมิ)

หากการทำงานปกติของหม้อแปลงกระแสนั้นขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิจะสร้าง m.m.f. ก็จะเหลือน้อย ค่า m.m.f. ที่เหลือน้อยนี้จะทำให้เกิดฟลั๊กที่แกนเหล็ก ซึ่งความหนาแน่นของฟลั๊กก็จะต่ำไปด้วย จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขดทุติยภูมิเป็นจำนวนน้อยด้วย

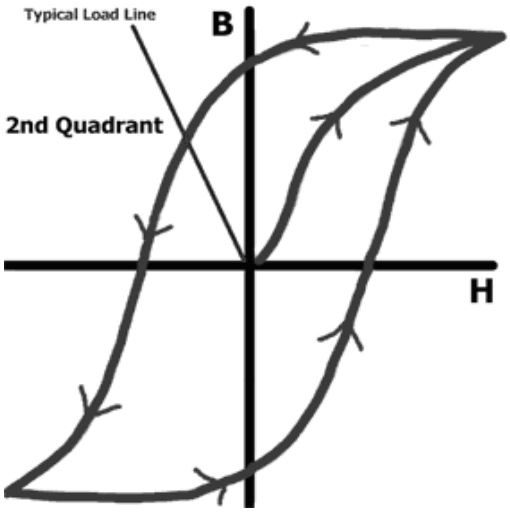
ถ้าหากเราเปิดวงจรที่ทุติยภูมิในขณะที่ขดปฐมภูมิยังมีกระแสไฟฟ้าอยู่เหมือนเดิม ขดปฐมภูมิก็ยังมีค่า m.m.f. อยู่ แต่ทางด้านทุติยภูมินั้นค่า m.m.f. เป็นศูนย์แล้ว ดังนั้น ค่า m.m.f. ทั้งหมดจริงเท่ากับ m.m.f. ของปฐมภูมิ ซึ่งมีค่าสูงมาก ค่า m.m.f. ที่สูงมากนี้จะทำให้เกิดฟลั๊กที่แกนเหล็กจนถึงจุดอิ่มตัว เพราะฉะนั้นก็จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำมหาศาลที่ขดทุติยภูมิจนฉนวนถูกทำลาย (แม้ว่าหม้อแปลงกระแสในปัจจุบันนี้จะออกแบบให้ฉนวนทนแรงเคลื่อนนี้ได้) ก็จะทำให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานกับหม้อแปลงขณะนั้นรวมทั้ง Eddy Current และ Hysteresis Lossed จะสูงมากด้วย จนทำให้เกิดความร้อนสูงที่หม้อแปลง แม้ว่าถ้าไม่เหตุการณ์ข้างต้นดังกล่าว แกนเหล็กก็จะถูกทำให้กลายเป็นแม่เหล็กถาวร และค่าอัตราส่วนและมุมเฟสก็จะผิดพลาดไป

หม้อแปลงกระแสจำนวนมากจะถูกใช้กับการต่อวงจรปิด หรือต่อเข้ากับสวิทช์ที่ขั้วของทุติยภูมิเสมอ ขดทุติยภูมิจะปลอดภัย เมื่อได้นำมาต่อเข้ากับอุปกรณ์การวัดเนื่องจากอุปกรณ์การวัดเหล่านี้เป็นเหมือนวงจรปิดตลอดเวลา เพราะมีค่าความต้านทานของ Burden เช่นแอมมิเตอร์ วัตต์มิเตอร์ ที่มีคอยล์กระแสที่มีค่าต่ำ



ภาพที่ 2.25 การต่อขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสจะต้องไม่มีอุปกรณ์ตัดตอนวงจร เช่น ฟิวส์

การตัดวงจรการวัดของขดลวดทุติยภูมิออกชั่วขณะ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างที่แกนเหล็ก เนื่องจากอิสเตอร์รีซีส และเมื่อต่อวงจรเข้าไปใหม่ ทำให้การเทียบกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้านี้ได้ค่าไม่ถูกต้อง เนื่องจากแมกเนไตซิ่งเคิร์ฟ เลื่อนตำแหน่งออกไปแล้ว และนอกจากจะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานแล้ว นอกจากนั้นขดลวดปฐมภูมิยังมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกับแรงเคลื่อนของระบบ ซึ่งทำให้หม้อแปลงกระแสทำหน้าที่เหมือนเป็นโช๊คตัวหนึ่งซึ่งต่ออยู่ในวงจร



ภาพที่ 2.26 ขอบเขตแมกเนไตซิ่งเคิร์ฟที่ถูกใช้งาน

2.11.1 การเป็นแม่เหล็กถาวรและการคลายความเป็นแม่เหล็ก (Permanent Memorization and it demagnetization)

การเป็นแม่เหล็กถาวรของแม่เหล็ก อาจขึ้นอยู่กับเหตุผลต่อไปนี้

1. เมื่อทางด้านทุติยภูมิเป็นวงจรเปิดในขณะที่ด้านปฐมภูมิยังมีพลังงานหรือกระแสไหลอยู่จะทำให้เกิดแรงเหนี่ยวนำแม่เหล็กอย่างมาก ซึ่งแรงเหนี่ยวนำแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดฟลั๊กที่แกนเหล็ก และความหนาแน่นของฟลั๊กที่เกิดจากแรงเหนี่ยวนำแม่เหล็กนี้เมื่อหมดสิ้นไปมันก็จะเกิดเป็นกำลังแม่เหล็กขึ้นอย่างมากทีเดียว

2. เกิดจากสวิทย์ชิ่ง ชั่วประเดี๋ยวทำให้เกิดการเป็นแม่เหล็กถาวรขึ้นได้

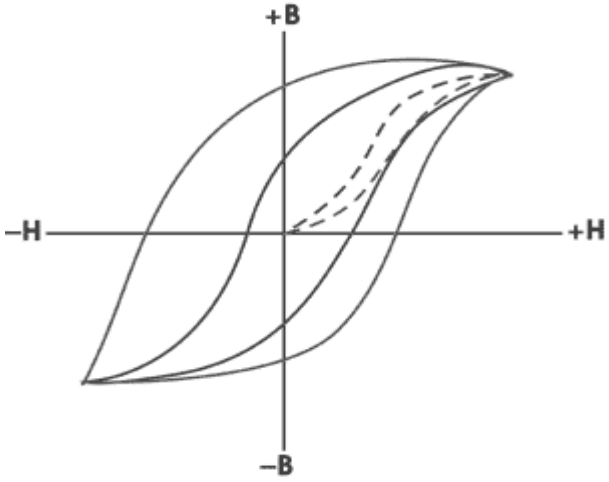
3. การเป็นแม่เหล็กถาวรของแกนแม่เหล็ก อาจมีผลจากการที่มีไฟ D.C. ไหลผ่าน เพื่อทดสอบความต้านทานหรือตรวจสอบหาขั้วก็ได้นอกจากนั้นการเป็นแม่เหล็กถาวรอาจเกิดจากการที่กระแสลัดวงจรชั่วประเดี๋ยวในสายส่ง ซึ่งกระแสวงจรชั้วประเดี๋ยวนี้ (Transient Shot Circuit Current) มีทั้งไฟ A.C. และไฟ D.C. อยู่

ในปัจจุบันนี้การเป็นแม่เหล็กถาวรของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าอาจจะทำให้ความซึมซาบของฟลั๊กลดลงในขณะที่หม้อแปลงกระแสทำงานปกติ เพราะฉะนั้นก่อนนำหม้อแปลงกระแสไปใช้งานตามปกติ ควรกำจัดการเป็นแม่เหล็กถาวรออกเสียก่อน

2.11.2 การคลายความเป็นแม่เหล็กของแกนเหล็ก (Demagnetization of Core)

วิธีที่ 1 คือ ให้มีกระแสไหลผ่านเขตปฐมภูมิมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านขดปฐมภูมิเมื่อด้านทุติยภูมิเป็นวงจรเปิด กระแสของปฐมภูมิจะเคลื่อนจากชุดกำเนิดกระแสสลับมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์จะเป็นตัวขนานที่ทำให้กระแสลดลง ความเร็วของชุดกำเนิดก็จะต่ำลงโวลท์เต็จของชุดกำเนิดก็จะต่ำลงไปเป็นศูนย์ จำนวนสนามแม่เหล็กที่แกนเหล็กก็จะทำให้ขนาดลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์

วิธีที่ 2 คือให้กระแสที่ไหลผ่านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ มีความต้านทานปรับค่าได้หลายร้อยโอห์มต่อกับด้านทุติยภูมิอยู่ ค่าจำนวนนี้จึงเปรียบเสมือนเป็นหม้อแปลงวงจรเปิด ความต้านทานด้านทุติยภูมินี้จะค่อย ๆ ปรับลดลงไปใกล้กับศูนย์มากที่สุดเท่าที่ทำได้ นั่นหมายความว่าความเป็นแม่เหล็กของแกนเหล็กหม้อแปลงกระแสก็จะค่อย ๆ ลดลงจากค่าสูงจนถึงค่าปกติ



ภาพที่ 2.27 Demagnetization of C.T. Core

2.12 ประเภทของหม้อแปลงกระแส [12]

หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) หรือ C.T. โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. หม้อแปลงกระแสสำหรับการวัด (Measuring of Current Transformer) หม้อแปลงกระแสแบบนี้ใช้วัดค่ากระแสโหลดตามปกติ โดยทั่วไปออกแบบมาเพื่อให้มีความแม่นยำในการวัดค่ากระแสโหลดอยู่ในช่วง 10-120% ของค่าพิกัดกระแสไว้สำหรับจ่ายโหลดให้กับมิเตอร์ต่าง ๆ เช่น แอมมิเตอร์ วัตต์มิเตอร์

2. หม้อแปลงกระแสสำหรับการป้องกัน (Protective Current Transformers) หม้อแปลงกระแสแบบนี้ออกแบบมาเพื่อใช้จ่ายกระแสให้กับรีเลย์ป้องกัน ออกแบบมาให้มีความแม่นยำในการวัดกระแสจนถึง 10 เท่า หรือ 20 เท่า ของพิกัดกระแส รีเลย์ป้องกันหลายชนิดต้องการค่าปริมาณกระแสลัดวงจรที่ถูกต้องไว้ใช้ เช่น รีเลย์กระแสเกินแบบผกผันกับเวลา กระแสเกินมากขึ้นจะยิ่งทำงานเร็วขึ้น รีเลย์วัดระยะทาง จำเป็นต้องใช้ค่ากระแสในการคำนวณหาค่า Impedance เป็นต้น ค่ากระแสลัดวงจรส่วนใหญ่จะมีค่ามากกว่ากระแสพิกัด 10 ถึง 20 เท่า

2.12.1 การแบ่งชั้นความแม่นยำของหม้อแปลงกระแส (Classification of Current Transformer)

จากหัวข้อ 2.11 เราทราบว่าสามารถจำแนกแบ่งออกตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. หม้อแปลงกระแสสำหรับใช้งานกับการวัด ประกอบด้วยชั้นความแม่นยำ 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 โดยมีขีดจำกัดของความคลาดเคลื่อนแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ซึ่งเป็นข้อกำหนดของมาตรฐาน BS 3938 (1973)

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดของความคลาดเคลื่อนสำหรับหม้อแปลงกระแสใช้งานกับการวัดชั้น 0.1-1.0

ชั้นความแม่นยำ	± เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกระแส (อัตราส่วน) ที่เปอร์เซ็นต์ของกระแสพิกัด			มุมเฟสในหน่วย Minutes* ที่เปอร์เซ็นต์ของกระแสพิกัด		
	10-20% (ไม่รวม 20%)	20-10% (ไม่รวม 100%)	100-120%	10-20% (ไม่รวม 20%)	20-100% (ไม่รวม 100%)	100-120%
0.1	0.25	0.20	0.10	10	8	5
0.2	0.50	0.35	0.20	20	15	10
0.5	1.00	0.75	0.50	60	45	30
1.0	2.00	1.50	1.00	120	90	60

*1 Minutes = $\frac{1}{60}$ องศา

ตารางที่ 2.3 ขีดจำกัดของความคลาดเคลื่อนสำหรับหม้อแปลงกระแสใช้งานกับการวัดชั้น 3.0 และ 5.0

ชั้นความแม่นยำ	**± เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกระแส (อัตราส่วน) ที่เปอร์เซ็นต์ของกระแสพิกัด**	
	50%	**120%**
3.0	1.0	3.0
5.0	5.0	5.0

2. การระบุระดับความถูกต้อง สำหรับหม้อแปลงกระแสระดับความถูกต้อง (Accuracy Class) โดยที่มีการยอมรับได้เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของกระแสจะเกี่ยวข้องกับระดับกระแสที่กำหนดไว้ตาม Accuracy Class

3. มาตรฐานของระดับความถูกต้อง มาตรฐานของระดับความถูกต้อง จากการจัดของหม้อแปลงกระแสจะเกี่ยวข้องกับระดับกระแสที่กำหนดไว้ตาม Accuracy Class

4. ขอบเขตค่าผิดพลาดของกระแสและแรงเคลื่อน จากระดับที่ 0.1-0.2-0.5 และ 1 ค่ากระแสผิดพลาดและแรงเคลื่อนของระดับความถี่ จะไม่มากกว่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.3 เมื่อเบอร์เดนทางด้านทุติยภูมิจากระดับตั้งแต่ 25%-100% ของระดับค่าเบอร์เดนจากระดับที่ 0.2 S และ 0.5 S ค่ากระแสผิดพลาด และแรงเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสเพื่อประโยชน์ให้เศษ (จุดสำคัญในการต่อเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่เหมาะสม ค่ากระแสจะอยู่ระหว่าง 50 มิลลิแอมป์และ 6 แอมป์ มักจะอยู่ระหว่าง 1% จนถึง 120% ของระดับกระแส 5 แอมป์) ระดับความถี่จะไม่มากไปกว่าที่ให้ไว้ใน

ตารางที่ 2.2 เมื่อเบอร์เดนทางด้านทุติยภูมิมีค่าตั้งแต่ 25% ถึง 100% ของค่าเบอร์เดน ค่าที่จะเหมาะสมสำหรับอัตราส่วน 25/5, 50/5 และ 100/5 โดยดูอย่างละเอียด เพื่อที่จะให้ได้กระแสทางด้านทุติยภูมิ 5 แอมป์

ระดับที่ 3 และ 5 กระแสผิดพลาดที่ระดับความถี่นั้น ๆ จะมีค่าไม่เกินกว่าค่าที่ให้ไว้ในตารางที่ 2.3 เมื่อค่าเบอร์เดนทางด้านทุติยภูมิเริ่มตั้งแต่ 50% ถึง 100% ของค่าเบอร์เดน

ค่าเบอร์เดนทางด้านทุติยภูมิไว้เพื่อทดสอบว่าจะมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์มากกว่า 0.8 Lagging เมื่อเบอร์เดนน้อยกว่า 5 *VA* ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์เท่ากับ 1 หากว่าไม่มีกรอบหรือโครงสร้างจะทดสอบเบอร์เดนน้อยกว่า 1 *VA*

5. ขอบเขตความสามารถของกระแสหม้อแปลงจะมีระดับความถูกต้อง (Accuracy Class) 0.1 ถึง 1 จะกำหนดให้ขอบเขตของกระแสให้สามารถยอมรับได้ตามต้องการโดย

- ความสามารถของกระแสที่ทำให้เกิดความร้อนซึ่งจะมีมากจากกระแสทางด้านปฐมภูมิจะแสดงออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่ากระแสทางด้านปฐมภูมิ

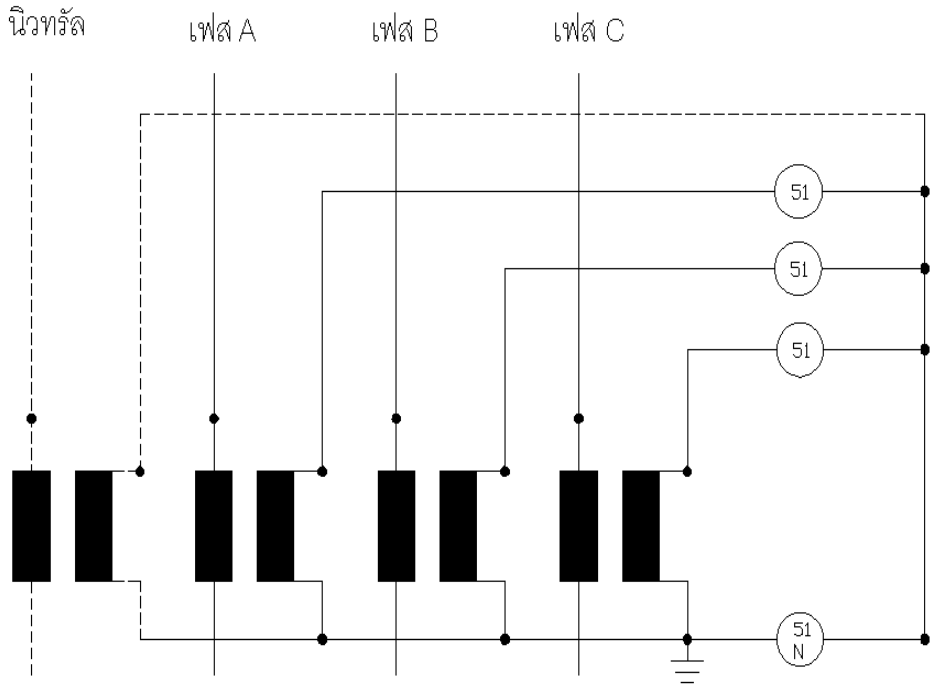
- ระดับของค่ากระแสผิดพลาดและแรงเคลื่อน กำหนดไว้ 120% ของกระแสทางด้านปฐมภูมิในตารางที่ 2.3 จนกว่าจะถึงขอบเขตของกระแสทางด้านปฐมภูมิ

ค่ามาตรฐานของขอบเขตความสามารถของกระแสทางด้านปฐมภูมิจะมี 120% 150% และ 200% ของค่ากระแสทางด้านปฐมภูมิ

2.13 การต่อหม้อแปลงกระแส (CT Connection) [10]

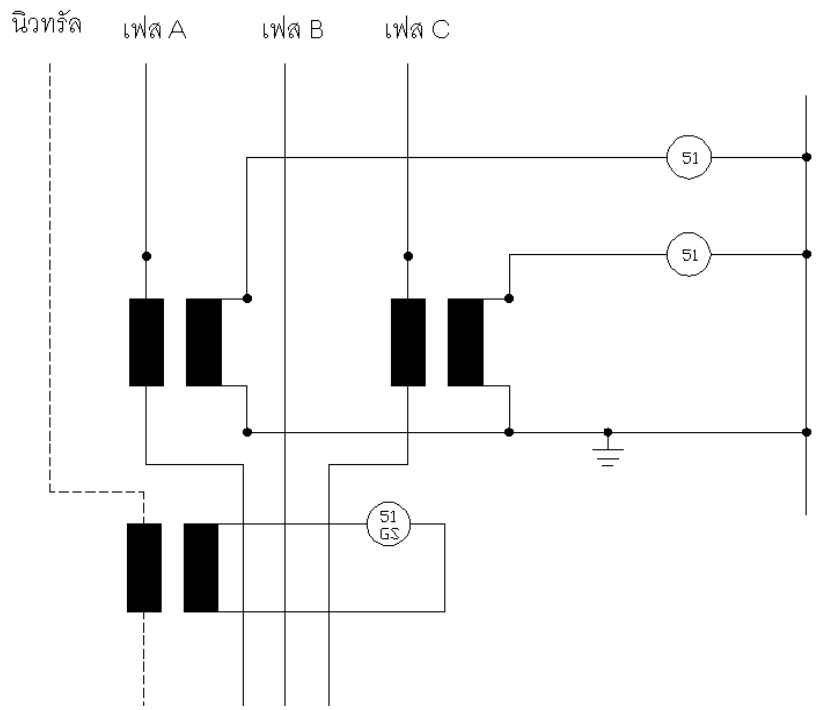
โดยทั่วไปหม้อแปลงกระแสจะต่อกับวงจร 3 เฟส ซึ่งมีรูปแบบการต่อที่แตกต่างกัน 3 อย่างดังนี้

1. การต่อแบบวาย (Wye Connection) การต่อแบบวายหม้อแปลงกระแสจะต่อเข้าที่แต่ละเฟสและทางด้านทุติยภูมิก็ต่อเข้ากับเฟสรีเลย์ (51) เพื่อตรวจวัดฟอลต์ในแต่ละเฟส สำหรับระบบที่ต่อลงจะมีรีเลย์ (51N) ต่อเข้ากับจุดต่อร่วมลงดินของหม้อแปลงกระแสเพื่อตรวจวัดกระแสโหลดที่ไหลในนิวทรอนหรือลงดินถ้ามีรีเลย์ (51) ไม่สามารถตรวจวัดกระแสฟอลต์ที่ไหลลงดินได้ เราจะต่อหม้อแปลงกระแสลูกที่สี่เข้ากับสายตัวนำนิวทรอน ดังแสดงในภาพที่ 2.34 สำหรับกระแสทุติยภูมิจะมีเฟสเดียวกัน



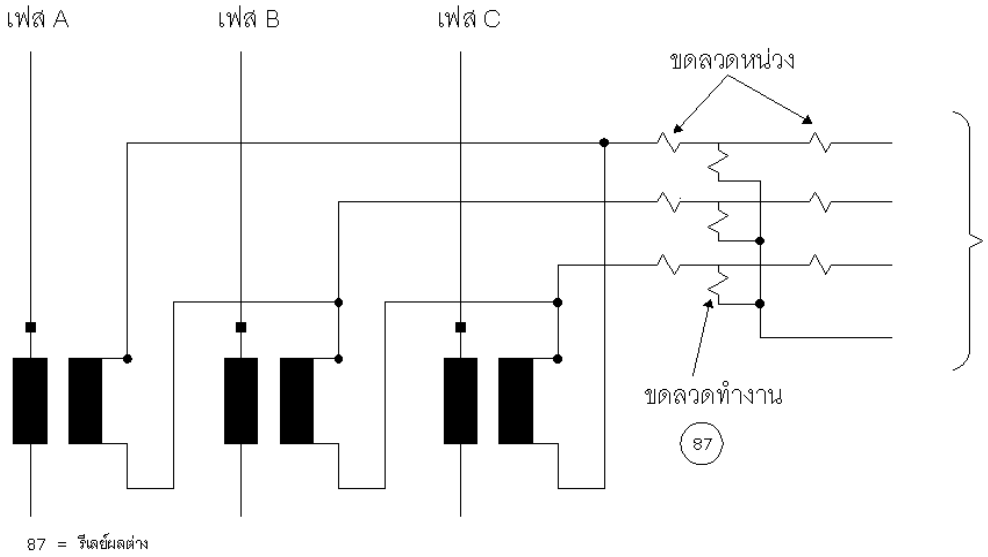
ภาพที่ 2.28 การต่อหม้อแปลงกระแสแบบวาย

2. การต่อแบบวีหรือเดลต้าเปิด (Vee or Delta Connection) โดยพื้นฐานแล้วการต่อหม้อแปลงกระแสแบบวีจะเหมือนแบบวาย เพียงแต่จะมีเฟสหนึ่งที่ไม่ต่อหม้อแปลงกระแส ดังนั้นจึงใช้หม้อแปลงเพียงสองลูก ดังแสดงในภาพที่ 2.29 การต่อหม้อแปลงแบบวีนำมาใช้สำหรับตรวจวัดฟอลต์แบบสมมาตรสามเฟส และการฟอลต์ระหว่างเฟส (Phase-to-Phase) สำหรับการตรวจวัดฟอลต์ลงดินจะต้องใช้หม้อแปลงกระแสลำดับศูนย์และรีเลย์ (51GS) โดยนำทั้งสามเฟสและนิวทรอน (ถ้าระบบมีสายนิวทรอน) ต้องนำมาผ่านหม้อแปลงลำดับศูนย์



ภาพที่ 2.29 การต่อหม้อแปลงกระแสแบบวีหรือเดลต้าเปิด

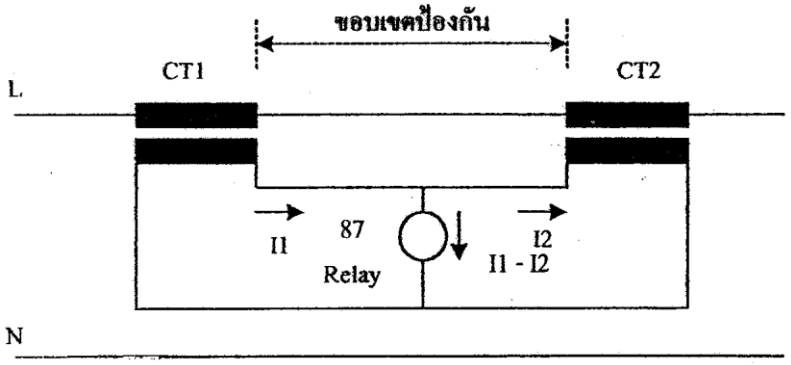
3. การต่อแบบเดลต้า (Delta Connection) การต่อแบบเดลต้าต้องใช้หม้อแปลงกระแสสามลูก โดยนำขดลวดทุติยภูมิมาต่อกันแบบเดลต้าก่อนที่จะนำมาต่อเข้ากับรีเลย์ การต่อแบบเดลต้าใช้สำหรับการป้องกันหม้อแปลงกำลังที่มีการต่อขดลวดแบบเดลต้า - วาย ด้วยรูปแบบของรีเลย์ผลต่างซึ่งการป้องกันหม้อแปลงกำลังด้วยรูปแบบนี้หม้อแปลงกระแสที่ต่อทางด้านเดลต้าของหม้อแปลงกำลังจะต่อแบบวาย และหม้อแปลงกระแสทางด้านวายจะต่อแบบเดลต้า ข้อควรจำการต่อหม้อแปลงกระแสแบบเดลต้าจะทำให้มีกระแสไหลไปยังรีเลย์เท่ากับ $\sqrt{3}$ เท่าของกระแสทุติยภูมิ ดังนั้นจึงควรพิจารณาการเลือกพิกัดกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสเมื่อจะนำมาต่อแบบเดลต้าสำหรับ ภาพที่ 2.30 แสดงการต่อหม้อแปลงกระแสแบบเดลต้าและถ้านำมาประกอบรวมกับ ภาพที่ 2.31 โดยการต่อขดลวดทำงานของรีเลย์เข้ากับจุกต่อร่วมสายกราวด์ของหม้อแปลงกระแสก็จะได้รูปแบบการป้องกันด้วยรีเลย์ผลต่างอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 2.30 การต่อหม้อแปลงกระแสแบบเดลต้า

2.13.1 การต่อหม้อแปลงกระแสกับรีเลย์วัดค่าผลต่างป้องกันสายส่ง 1 เฟส

หลักการทำงานของการป้องกันแบบวัดค่าผลต่างตามวงจรในภาพที่ 2.31 คือเมื่อไม่เกิดผิดปกติขึ้นที่ภายในเขตป้องกันหรือระบบยังทำงานในสภาวะปกติ กระแส I_1 และ I_2 จะมีปริมาณเท่ากันซึ่งจะทำให้กระแสไหลผ่านรีเลย์มีค่าเท่ากับ 0 แอมป์ แต่ถ้าเกิดเหตุการณ์ผิดปกติ (ลัดวงจร) ภายในเขตป้องกันจะทำให้มีปริมาณกระแส I_1 และ I_2 ไม่เท่ากันทำให้มีกระแสไหลผ่านรีเลย์ ดังนั้นการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์เป็นการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติ (ลัดวงจร) ภายในเขตป้องกันนั่นเอง



ภาพที่ 2.31 การต่อหม้อแปลงกระแสกับรีเลย์วัดค่าผลต่างป้องกันสายส่งแบบ 1 เฟส

2.14 หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) [10]

โดยทั่วไปหม้อแปลงกระแสมีมาตรฐานพิกัดของกระแสทุติยภูมิเท่ากับ 5 *A* และขดลวดของหม้อแปลงกระแสยังสามารถทนต่อกระแสเกินพิกัดได้ประมาณ 10 หรือ 20 เท่าของพิกัดกระแสปกติในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ โดยขดลวดไม่ได้รับความเสียหาย ซึ่งเหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงกระแสบ่อย ๆ ในระหว่างที่มีการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นการพิจารณาเลือกอัตราส่วนกระแสของหม้อแปลงกระแสได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมทำให้ลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงกระแสเอง และความผิดพลาดในการทำงานจนทำให้อุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบได้รับผลกระทบไปด้วย สำหรับมาตรฐานอัตราส่วนกระแสของหม้อแปลงกระแสได้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานอัตราส่วนกระแสของหม้อแปลงกระแส

อัตราส่วนกระแส	อัตราส่วนกระแส	อัตราส่วนกระแส
50 : 5	500 : 5	2500 : 5
100 : 5	600 : 5	3000 : 5
150 : 5	800 : 5	3500 : 5
200 : 5	900 : 5	4000 : 5
250 : 5	1000 : 5	5000 : 5
300 : 5	1200 : 5	6000 : 5
400 : 5	1500 : 5	
450 : 5	2000 : 5	

การพิจารณาเลือกใช้หม้อแปลงกระแสสิ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้หม้อแปลงกระแสมีดังนี้

1. พิกัดกระแสต่อเนื่อง ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

2. พิกัดแรงดันด้านปฐมภูมิ โดยปกติทั่วไปหม้อแปลงกระแสสามารถทำงานได้ต่อเนื่องสูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดด้านแรงสูงพิกัดแรงดันหม้อแปลงกระแสด้านแรงดันสูง

ตารางที่ 2.5 พิกัดแรงดันด้านแรงสูงของหม้อแปลงกระแส

ชั้นแรงดันของฉนวน (Insulation class)	**แรงดันระบบสูงสุด (*KV*)**	**ความคงทนแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ไฟฟ้ากำลัง (*KV*)**	**พิกัดแรงดันอิมพัลต์ (BIL) (*KV*)**
VDE : 10 N , IEC/BS : 12 *KV* ANSI : 8.7 *KV*	12	36	75
VDE : 15 N , IEC/BS : 17.5 *KV* ANSI : 15 *KV* , 18 *KV*	24	55	125
VDE : 25 N,30 N, IEC/BS :36 *KV* ANSI : 25 *KV*, 34.5 *KV*	38	75	200

3. พิกัดกระแสความร้อนกระแสสูงสุด เป็นค่าความสามารถของกระแสลัดวงจรสมมาตรในเวลา 1 นาที โดยที่ขดลวดของหม้อแปลงกระแสมีอุณหภูมิไม่เกินจนกระทั่งขดลวดเสียหาย เช่น พิกัดกระแสความร้อนสูงสุดของ CT 120 *kA* ในเวลา 1 วินาที

4. ความแม่นยำ ขีดความสามารถของรีเลย์ขึ้นอยู่กับความแม่นยำของหม้อแปลงกระแส

5. ค่าเบอร์เดน เป็นค่าพิกัดโหลดหม้อแปลงสำหรับเครื่องวัดและรีเลย์ ที่ต่อกับด้านทุติยภูมิของ CT มีหน่วยเป็น *VA* ดังตารางที่ 2.6 ถ้ากระแสทุติยภูมิ *5A* อิมพมแดนต์ของหม้อแปลงกระแส 2 โอห์ม ฉะนั้นขนาดเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแสจะมีค่า 50 *VA* ($I^2Z = 5^2 \times 2 = 50VA$)

ตารางที่ 2.6 เบอร์เดนมาตรฐานของหม้อแปลงกระแส

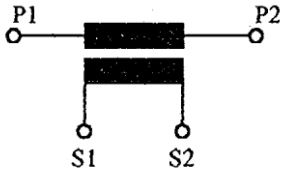
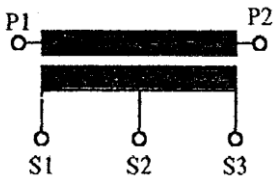
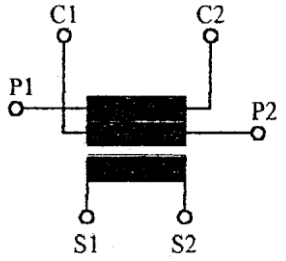
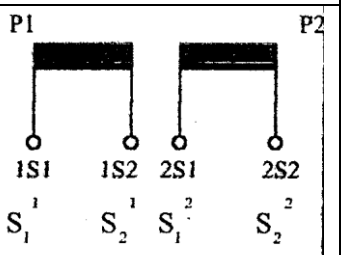
ค่าเบอร์เดน *VA*	**ความต้านทาน (Ω)**	**อินดักแตนซ์ (*mH*)**	**อิมพิแดนต์ (Ω)**	**เพาเวอร์เฟ็กเตอร์ (P.F)**
2.5	0.09	0.116	0.1	0.9*
5.0	0.18	0.232	0.2	0.9*
12.5	0.45	0.58	0.5	0.5**

ในการเลือกอัตราส่วนของกระแส (Current Ratio) จะต้องพิจารณากระแสสูงสุดเป็นหลัก โดยภายใต้ภาระโหลดสูงสุดกระแสทุติยภูมิจะต้องไม่เกินพิกัดกระแสสม่ำเสมอ (continuous Current Ratio) ของรีเลย์อัตราส่วนผิดพลาด (Ratio Error) ของหม้อแปลงกระแสขณะเกิดกระแสฟอลต์สูงสุดจะต้องไม่ร้ายแรงจนรีเลย์ไม่ทำงานตามที่ต้องการ หม้อแปลงกระแสที่มีอัตราส่วนผิดพลาดสูงสุดจะมีขนาดแกนเหล็กขนาดเล็กและราคาถูกกว่า การเลือกหม้อแปลงกระแสสำหรับใช้งานในระบบหนึ่ง ๆ ควรใช้หม้อแปลงกระแสที่มีความแม่นยำสูงพอเหมาะกับระบบนั้นทั้งนี้เพราะการใช้หม้อแปลงกระแสที่มีความแม่นยำสูงเกินความจำเป็นก็ทำให้ต้นทุนสูงเกินไป ในปัจจุบันรีเลย์ที่ใช้จำนวนมากมีเวลาการทำงานสั้นมาก ข้อควรระวังที่สำคัญก็คือหม้อแปลงกระแสจะต้องมีแกนเหล็กใหญ่พอสมควรที่จะไม่เกิดการอิ่มตัวภายใต้ภาวะทรานเซียนต์

2.15 การกำหนดขั้วของหม้อแปลง [10]

1. Terminal Marking – General Rulen การกำหนดจุดต่อจะทำเครื่องหมายที่
   - ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และ ด้านทุติยภูมิ
   - บางส่วนของขดลวด
   - การเทียบขั้วของขดลวดและบางส่วนของขดลวด
   - ระหว่างกลางจุดต่อ
2. วิธีการทดสอบขั้วที่จุดต่อจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนทั้งคู่บนผิวหนังหรืออยู่ใกล้ๆ กัน
3. การแสดงขั้วต่อการกำหนดขั้วของหม้อแปลงกระแสมีเครื่องหมายแสดงตาม ตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ขั้วต่อของหม้อแปลงกระแส

Primary terminal Secondary terminal	 Fig.1.- Single ratio transformer.	 Fig.2.- Trasformer with anintermediate tapping on secondary winding
Primary terminal Secondary terminal	 Fig.3.- Transformer with primary winding in 2section intened for connections either in series or in parallel	 fig.4.- Transformer with 2 secondary winding;each with its own magnetic core.(Two alternative markings for the secondary terminals.)

4. เครื่องหมายที่ใช้เทียบเคียงขั้ว จากการที่กำหนดขั้วต่อเป็น P1 S1 และ C1 จะเหมือนกับขั้วที่ใช้ทั่ว ๆ ไปทำให้เข้าใจง่ายขึ้น

5. อัตราการกำหนดขั้วลงบนเนมเพลทหม้อแปลงกระแส จะกำหนดขั้วตามบริษัทผู้ผลิตหรือโดยบุคคลกำหนดให้เหมือน ๆ กัน

- ตามลำดับตัวเลขหรือ ชนิดการออกแบบ , เลือกเอาทั้งสองแบบ
- ตามระดับกระทางด้านปฐมภูมิ และทางด้านทุติยภูมิ : เช่น

$Kn = I_p n / I_s nA$ (e.g $Kn = 100 / 5A$)

- ตามขนาดของแรงดัน
- ตามระดับของเอาท์พุตเหมือนย่านของความถูกต้อง พร้อมทั้งรายละเอียดการแนะนำต่าง ๆ

ข้อสังเกต ควรจะกำหนดตำแหน่งของขดลวดทางด้านทุติยภูมิเป็นชั้น ๆ (เช่น 15 , 15 *VA*, class 0.5: 25, 30 *VA* class 1)

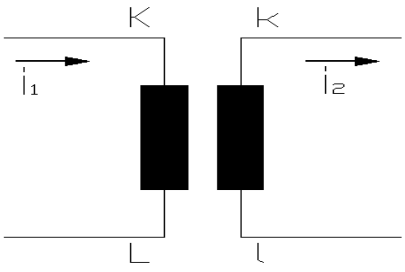
6. โดยป้อนแรงดันสูง ๆ (เช่น 1.2 *KV* or 145 *KV*)

7. ตามระดับฉนวน (เช่น 6 / - *KV* or 275 / 650 *KV*)

ข้อสังเกต ข้อ 6 และ ข้อ 7 จะทำการกำหนดทีละชั้น(เช่น 1.2 / 6 – *KV* หรือ 145 / 275 / 650 *KV*) หากบอกตำแหน่งของหม้อแปลงกระแสไม่ละเอียดให้ดูที่เพลท (Plate) บอกคุณสมบัติของหม้อแปลง

2.16 การกำหนดขั้วของหม้อแปลงกระแส [13]

เนื่องจากขดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสจะต่ออยู่กับวงจรป้องกันที่มีความสำคัญและค่อนข้างซับซ้อน จึงต้องให้ความสำคัญในการกำหนดขั้วของหม้อแปลงกระแสให้ชัดเจน การกำหนดขั้วหรือการกำหนด Dot หรือ Polarity ของหม้อแปลงกระแสเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของกระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ การกำหนดขั้วของหม้อแปลงกระแสสามารถให้เป็นจุดทึบ (Dot) ที่แสดงปลายด้านเริ่มต้นของขดทั้งสอง และจากปลายด้านนี้จะเป็นการพันไปในแกนด้วยทิศทางเดียวกัน (ตามเข็มหรือทวนเข็มเหมือนกัน) ดังนั้นถ้ากระแสไหลเข้าด้านจุดกำหนดของด้านปฐมภูมิก็จะทำให้กระแสไหลออกทางด้านจุดกำหนด ของด้านทุติยภูมิ (กระแสทั้งสองมีมุมเฟสเดียวกัน) การกำหนดอีกวิธีหนึ่งคือใช้ตัวอักษรกำกับที่แต่ละด้านของขดลวด ดังแสดงในภาพที่ 2 .32



ภาพที่ 2.32 การกำหนดขั้วของ CT

2.16.1 การตรวจสอบหม้อแปลงกระแส

การตรวจสอบหม้อแปลงกระแสนั้นมีขั้นตอนทั่วไปดังต่อไปนี้

การตรวจสอบหม้อแปลงกระแสเบื้องต้นประกอบด้วย

a. การตรวจหมายเลขหรือรหัสสินค้า (Serial Number) หรือหมายเลขรุ่น (Model Number) ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการนำไปอ่านรายละเอียดคุณสมบัติของหม้อแปลง (Specification) ที่ผู้ผลิตได้ทดสอบไว้และยังมีประโยชน์ในการช่วยให้มั่นใจว่าหม้อแปลงกระแสที่จะซื้อนั้นเป็นแบบเดียวกับของเดิมเมื่อต้องทำการซื้อหม้อแปลงกระแสมาเปลี่ยนหรือเก็บไว้สำรองด้วย
b. อัตราส่วนหม้อแปลง (Turn Ratio) ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญที่สุดในการใช้งานหม้อแปลงกระแส อัตราส่วนของหม้อแปลงจะสามารถตรวจดูได้จากแผ่นป้ายที่ตัวหม้อแปลง
c. ประเภทและค่าความแม่นยำของหม้อแปลง (Accuracy Class) ซึ่งตามมาตรฐานจะระบุด้วยตัวเลขและตัวอักษรดังแสดงในหัวข้อที่ 3 ซึ่งตัวเลขตัวแรกจะแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์ของหม้อแปลงกระแส ทั้งนี้ต้องอ้างอิงค่าเบอร์เดนที่หม้อแปลงต่ออยู่ด้วยดังที่ได้กล่าวไปแล้ว
d. ตรวจสอบความเรียบร้อยภายนอกของหม้อแปลงว่ามีการชำรุดเสียหายจากการขนส่งและมีการติดตั้งที่เหมาะสมแข็งแรงหรือไม่ โดยการติดตั้งหม้อแปลงกระแสจะต้องไม่ใช้ตัวนำด้านปฐมภูมิเป็นตัวยึดจับหม้อแปลง

2.16.2 การตรวจสอบการต่อวงจร

การตรวจสอบนี้เป็นสิ่งสำคัญมากในการตรวจสอบหม้อแปลงกระแส เนื่องจากการต่อวงจรหม้อแปลงกระแสที่ผิดพลาดอาจก่อให้เกิดปัญหาในการทำงานของอุปกรณ์โดยเฉพาะอุปกรณ์ป้องกันที่มีตรวจสอบทิศทางของกระแสในการทำงานด้วย ถ้าการต่อขั้วหม้อแปลงกลับกันก็สามารถแก้ไขโดยการกลับขั้วที่ด้านทุติยภูมิได้ การตรวจสอบระยะห่างในการติดตั้ง

การตรวจสอบนี้เป็นการตรวจสอบเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน ซึ่งระยะห่างระหว่างตัวนำปฐมภูมิและทุติยภูมิไม่ควรอยู่ชิดกันเกินไป (การคิดอย่างง่ายระยะห่างประมาณ KV ละ 1 นิ้ว) และไม่ควรมีการติดตั้งเดินคู่กันไประหว่างตัวนำด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเนื่องจากอาจเกิดกระแสเหนี่ยวนำในสายตัวนำทุติยภูมิจากกระแสด้านปฐมภูมิได้ และถ้าเดินสายตัวนำทุติยภูมิอยู่เหนือตัวนำปฐมภูมิก็จะต้องมีการยึดจับที่คงทนถาวรเพื่อความปลอดภัย

การตรวจสอบการลัดวงจรด้านทุติยภูมิ

ในกรณีที่วงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไม่สามารถติดตั้งมาจากโรงงานได้ก็มักจะมีการลัดวงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสมา ดังนั้นจึงควรตรวจสอบการต่อวงจรด้านทุติยภูมิและตรวจสอบค่าเบอร์เดนให้เรียบร้อยก่อนจึงค่อยทำการปลดการลัดวงจรดังกล่าวก่อนการใช้งาน (จากหัวข้อที่ 2 จะเป็นว่าไม่ควรเปิดวงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสในการใช้งาน)

2.16.3. การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแส

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

- **การทดสอบความต้านทานของฉนวน (Insulation Resistance Test)**

การทดสอบความต้านทานของฉนวนจะทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1000 *V* ค่าความต้านทานฉนวนไม่ควรต่ำกว่า 100 เมกกะโอห์ม การทดสอบนี้อาจส่งผลต่อรีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่ออยู่ในวงจร ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงความจำเป็นในการทดสอบด้วย นอกจากนี้ไม่ควรทำการทดสอบนี้กับ Bushing CT ของหม้อแปลงกำลังขณะที่ถังหม้อแปลงเป็นสุญญากาศเนื่องจากอาจทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวภายในถังหม้อแปลงกำลังได้

- **การทดสอบขั้วของหม้อแปลงกระแส (Polarity Test)**

การทดสอบขั้วของหม้อแปลงกระแสมีวิธีการที่นิยมใช้กันอยู่ 2 วิธี คือการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ดังต่อไปนี้

- **การทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง**

การทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและรวดเร็วแต่จะทำให้มีฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างอยู่ในตัวหม้อแปลงได้ ดังนั้นจึงควรทำการทดสอบการคุณลักษณะการกระตุ้นของหม้อแปลงกระแส (Excitation Test) ตามหัวข้อ 6.4 หลังจากที่ทดสอบแล้ว วิธีนี้จะใช้เพียงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (ซึ่งสามารถใช้แบตเตอรี่) และโวลต์มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ควรเป็นแบบเข็ม) และสายตัวนำ

1. ทำการต่อวงจรเพื่อเตรียมจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขดลวดทุติยภูมิ
2. ทำการวัดแรงดันที่เกิดขึ้นที่ตัวนำทางด้านปฐมภูมิตามขั้วที่แสดงบนหม้อแปลงกระแสใช้วิธีวัดแรงดันบนตัวนำปฐมภูมิ

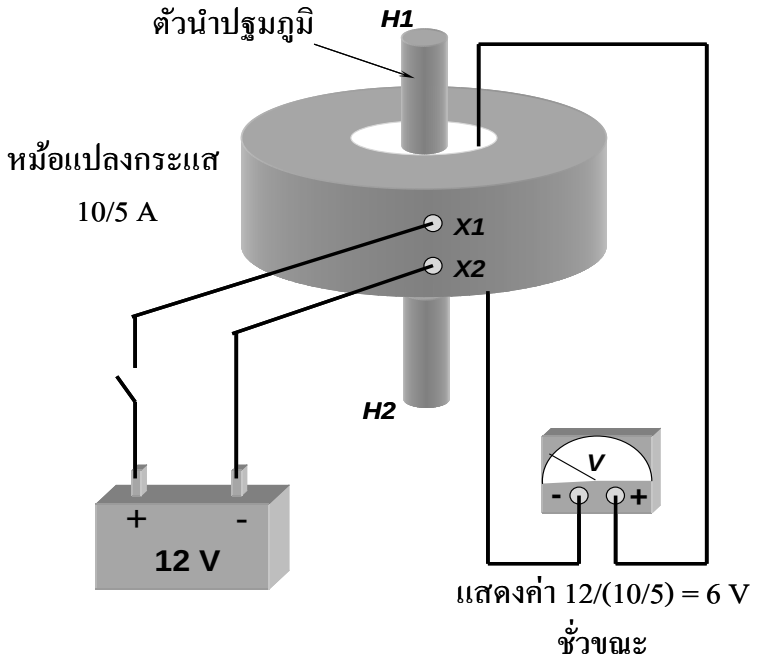
a. ถ้าเป็นหม้อแปลงกระแสที่ติดอยู่กับขั้วของต่อของหม้อแปลงหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็สามารถวัดค่าแรงดันตกคร่อมขดลวดของอุปกรณ์ที่ขั้วได้ แต่ควรตรวจสอบวงจรให้แน่นอนว่าเป็นแรงดันที่วัดแรงดันที่เทียบได้กับตกคร่อมตัวนำปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแส หรือ

b. ถ้าเป็นหม้อแปลงกระแสที่ติดอยู่กับขั้วของต่อของเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็ทำการปิดหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แล้วทำการวัดแรงดันตกคร่อมหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ขั้วของเซอร์กิตเบรกเกอร์

3. กรณีที่ไม่มีสัญลักษณ์แสดงขั้วบนตัวหม้อแปลงกระแส ให้ทำเครื่องหมายไว้ที่ขั้วหม้อแปลงกระแส

4. ทำการสับสวิตช์จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพียงชั่วขณะ

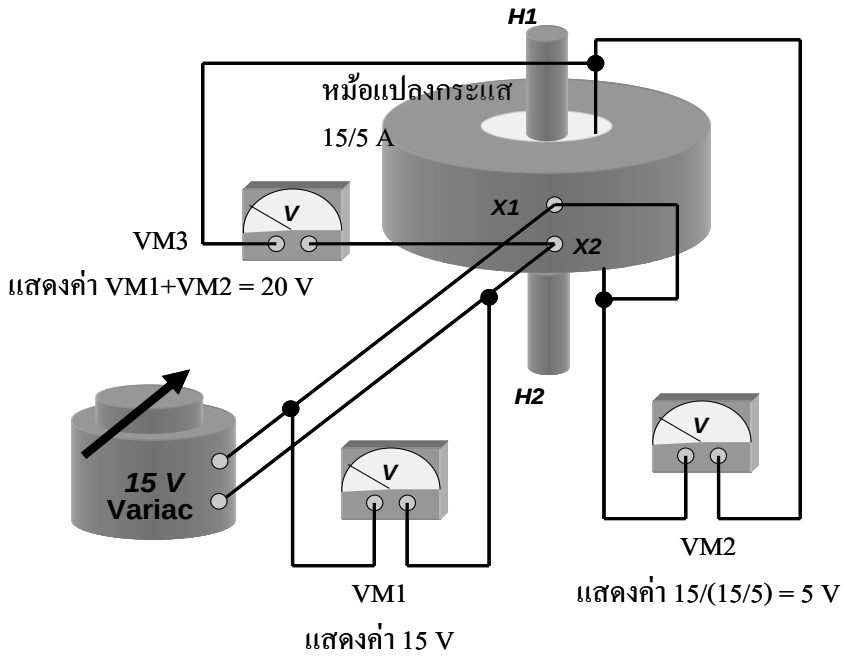
5. สังเกตเข็มของโวลต์มิเตอร์ขณะสับสวิตช์ หากเข็มเคลื่อนไปในทิศทางบวกแสดงว่าขั้วที่ กำหนดไว้ถูกต้องแล้ว แต่ถ้าเข็มเคลื่อนไปทางขั้วลบแสดงว่าการกำหนดขั้วนี้ไม่ถูกต้อง



ภาพที่ 2.33 การทดสอบขั้วของหม้อแปลงกระแสด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

- **การทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ**

วิธีการนี้จะซับซ้อนกว่าการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงและสามารถใช้ในการทดสอบขั้วหม้อแปลงได้ทุกชนิด โดยจะใช้จ่ายแรงดันผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรับค่าได้ เช่น วาริแอค (Variac) และโวล์ตมิเตอร์สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีการต่อวงจรดังภาพที่ 2.34



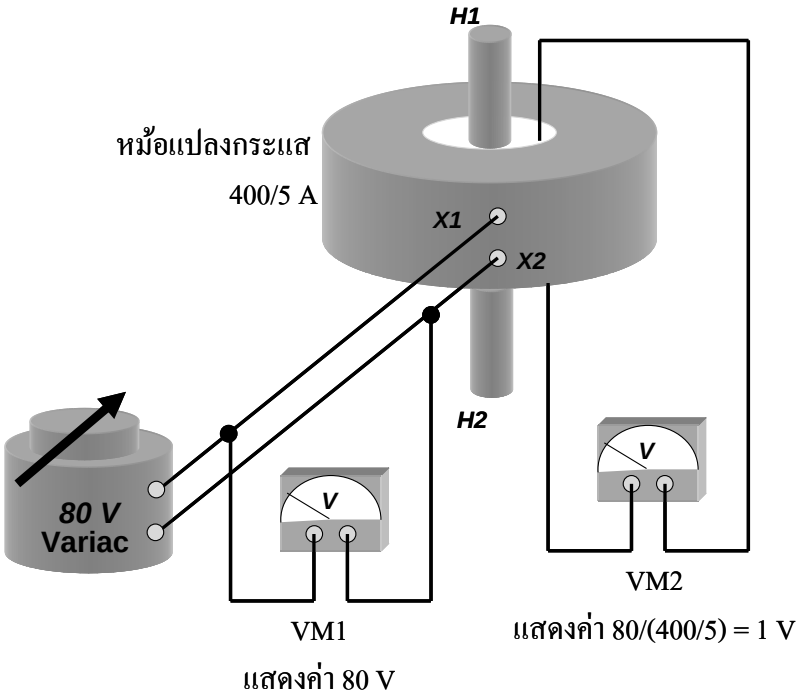
ภาพที่ 2.34 การทดสอบขั้วของหม้อแปลงกระแสด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ

1. ต่อวงจรเพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส และทำการวัดแรงดันที่จ่ายไว้ด้วย (V_{M1})
2. ต่อลัดวงจรระหว่าง X_1 กับ H_2 (หรือ X_2 กับ H_1)
3. วัดแรงดันตกคร่อมตัวนำปฐมภูมิระหว่าง H_1 กับ H_2 (V_{M2}) ซึ่งควรจะมีค่าเป็นไปตามอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส
4. วัดแรงดันตกคร่อม H_2 กับ X_2 (V_{M3}) ซึ่งควรจะมีค่าเท่ากับ $V_{M1}+V_{M2}$
5. ถ้าแรงดัน $V_{M3} = V_{M1}+V_{M2}$ แสดงว่าการกำหนดขั้วของหม้อแปลงกระแสไว้ถูกต้องแล้ว แต่ถ้า V_{M3} มีค่าน้อยกว่า V_{M1} แสดงว่าการกำหนดขั้วนี้ไม่ถูกต้อง

- **การทดสอบอัตราส่วนของหม้อแปลง (Ratio Test)**

การทดสอบอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสจะนิยมใช้การจ่ายแรงดันทดสอบและวัดค่าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันด้านทุติยภูมิและปฐมภูมิแทนที่จะจ่ายกระแสทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากการหาแหล่งจ่ายกระแสสลับขนาดใหญ่นั้นทำได้ยากกว่าการหาแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับขนาดเล็ก

ตัวอย่างเช่นต้องการทดสอบ หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 400/5 *A* หรือเทียบได้ 80/1 *A* ก็สามารถใช้แรงดันทดสอบ 80 *V* ทางด้านทุติยภูมิทดสอบดูว่าจะได้แรงดัน 1 *V* ทางด้านปฐมภูมิหรือไม่ ดังแสดงในภาพที่ 2.35

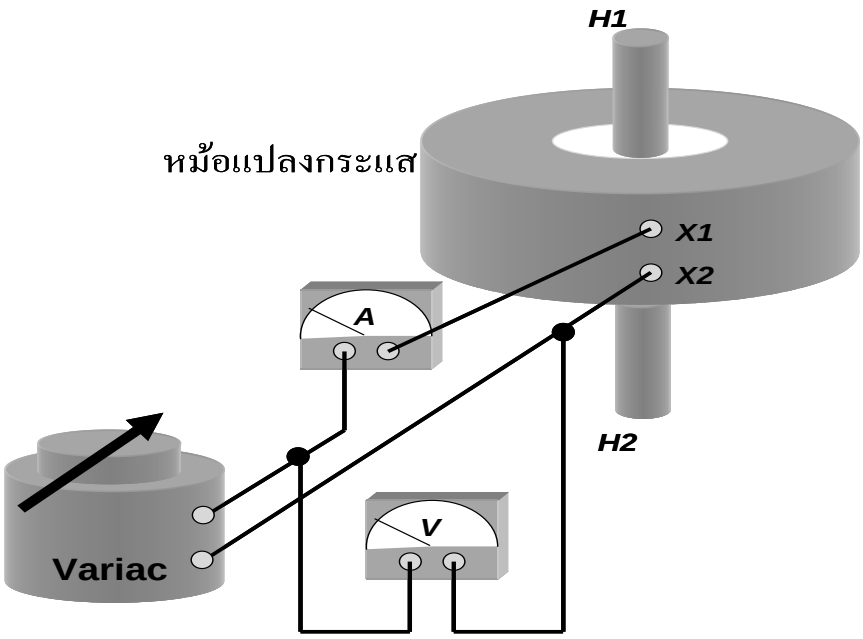


ภาพที่ 2.35 การทดสอบอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส

- **การทดสอบคุณลักษณะการกระตุ้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Excitation Test)**

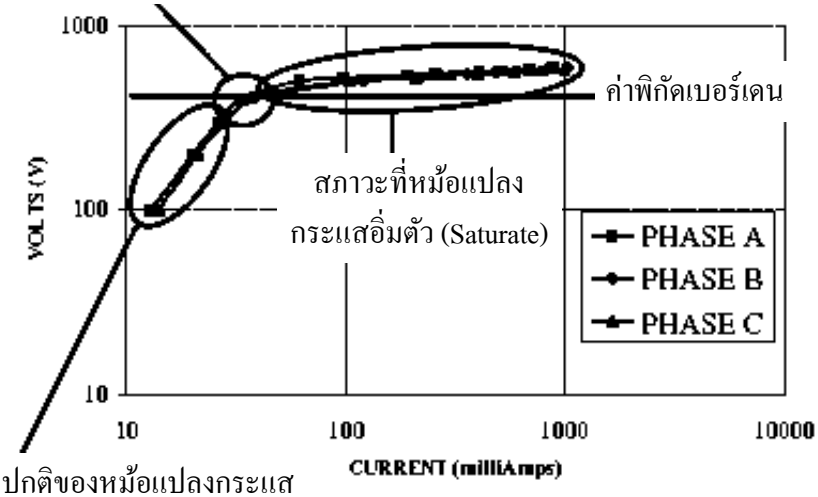
คุณลักษณะการกระตุ้นของหม้อแปลงกระแสเป็นการทดสอบตรวจหาจุดอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสเพื่อยืนยันว่าหม้อแปลงมีจุดอิ่มตัวที่สูงกว่าพิกัดของหม้อแปลง การทดสอบนี้ทำได้โดยการต่อวงจรจ่ายแรงดันกระแสสลับผ่านขดลวดทุติยภูมิและวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.36 ทำการเพิ่มค่าแรงดันขึ้นช้า ๆ และบันทึกค่ากระแสไว้ ซึ่งค่ากระแสที่ไหลจะน้อยมาก จึงควรใช้แอมมิเตอร์ที่ละเอียดมากพอในการวัด จนกระทั่งสังเกตเห็นว่ากระแสเพิ่มขึ้นน้อยลงกว่าในตอนแรกมาก นั่นคือหม้อแปลงได้เริ่มอิ่มตัวแล้ว ทำการบันทึกเกินจุดนี้ไปเล็กน้อยและค่อย ๆ ลดแรงดันลงจนเป็นศูนย์

จากนั้นทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่บันทึกไว้ (ควรเป็น Log Scale) จุดอิ่มตัวของหม้อแปลงจะต้องอยู่สูงกว่าค่าพิกัดของหม้อแปลงกระแส และในกรณีที่มีข้อมูลจากผู้ผลิตก็สามารถเปรียบเทียบผลที่ทดสอบได้กับข้อมูลดังกล่าว



ภาพที่ 2.36 การทดสอบคุณสมบัติการกระตุ้นของหม้อแปลงกระแส

จุดเริ่มอิ่มตัว (Knee Point) ซึ่งควรอยู่สูง
กว่าพิกัดเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแส



ช่วงการทำงานปกติของหม้อแปลงกระแส
มีค่าความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแส
เป็นเชิงเส้น

ภาพที่ 2.37 คุณสมบัติการกระตุ้นของหม้อแปลงกระแส

2.14.16 การทดสอบค่าเบอร์เดนของหม้อแปลงกระแส

การทดสอบนี้ไม่ใช้การทดสอบหม้อแปลงกระแสแต่เป็นการทดสอบค่าเบอร์เดนหรือภาระทางด้านทุติยภูมิที่ต่ออยู่กับหม้อแปลงกระแสว่าเกินกว่าค่าที่หม้อแปลงกระแสได้ถูกออกแบบไว้หรือไม่ และยังเป็นการยืนยันในขั้นตอนสุดท้ายว่าหม้อแปลงกระแสไม่ได้ถูกเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิไว้ การทดสอบนี้ทำโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าตามพิกัดกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (เช่น 5 *A*) เข้าที่วงจรที่ต่อด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงและทำการวัดค่าแรงดันตกคร่อมหม้อแปลง จากนั้นคำนวณค่าความต้านทานรวมของวงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงโดยใช้กฎของโอห์ม