บทที่ 3
หม้อแปลงไฟฟ้า

3.1 ความนำ

หม้อแปลงไฟฟ้า (electric transformer) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า หม้อแปลง มีความสำคัญต่อระบบส่งและจ่ายไฟฟ้ามาก โดยเริ่มต้นจากโรงไฟฟ้า เนื่องเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถผลิตแรงดันที่มีขนาดสูงพอเพื่อให้สามรถส่งได้โดยตรงจากเครื่องกำเนิด เนื่องจากฉนวนมีขีดจำกัดในการทนแรงดันไฟฟ้า จึงต้องอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage transformer) ช่วยปรับระดับแรงดันให้สูงขึ้น จากโรงไฟฟ้า (power plant) ป้อนไปยังระบบส่งกำลังไฟฟ้า (transmission system) ระดับตั้งแต่ 69 ถึง 500 กิโลโวลต์ การส่ง-จ่ายด้วยแรงดันสูงสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ เนื่องจากสามารถใช้สายส่งและอุปกรณ์ประกอบที่มีขนาดเล็กลง หม้อแปลงไฟฟ้าถูกนำมาใช้อีกครั้งเพื่อปรับระดับแรงดันให้ต่ำลงที่ปลายทางในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (distribution system) เพื่อให้สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าตามบ้านเรือนหรือเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้กับแรงดันต่ำ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กจะอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านและสำนักงาน ในระบบวัดคุม ส่วนในงานการวัดทางไฟฟ้า หม้อแปลงจะเป็นส่วนประกอบของการวัด โดยทำให้เครื่องวัดแรงดันหรือกระแสที่มีย่านต่ำ ๆ สามารถวัดขนาดของแรงดันหรือกระแส สูง ๆ ได้

3.2 ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า

จัดแบ่งได้หลายประเภท หลากหลายขึ้นกับแง่มุมการพิจารณา ดังนี้

3.2.1 จำแนกตามจำนวนรอบของขดลวด

กรณีนี้จำแนกได้ 5 ประเภท ดังนี้

1. หม้อแปลงที่ใช้ปรับระดับแรงดันให้สูงขึ้น (step-up transformer)

2. หม้อแปลงที่ใช้ปรับระดับของแรงดันให้ต่ำลง (step-down transformer)

3. หม้อแปลงที่มีจุดต่อแยก (tap) สามารถใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าได้หลายระดับ

4. หม้อแปลงที่ใช้สำหรับแยกวงจรไฟฟ้าออกจากกัน (isolating) ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าทางเข้ากับทางออกเท่ากัน เนื่องจากขดลวดทุติยภูมิและปฐมภูมิมีจำนวนรอบเท่ากัน

5. หม้อแปลงที่ขดลวดทุติยภูมิและปฐมภูมิเป็นขดเดียวกัน เรียกว่าหม้อแปลงออโต้(autotransformer) โดยทุติยภูมิจะต่อจากจุดแบ่งแรงดันออกไปใช้งาน หรือชนิดที่สามารถปรับเลื่อนค่าแรงดันทุติยภูมิได้เรียกว่า วาริแอ็ก (variable transformer or variac)

3.2.2 จำแนกตามระบบไฟฟ้า

กรณีนี้จำแนกได้ 2 ประเภท คือ

1. หม้อแปลงเฟสเดียว (single-phase transformer)
2. หม้อแปลง 3 เฟส (three-phase transformer)

3.2.3 จำแนกตามพิกัดกำลังไฟฟ้า

กรณีนี้จำแนกได้ 4 ประเภท ดังแสดงไว้ในเว็บไซต์วิกิพีเดีย (2552) ดังนี้

1. ขนาดเล็กจนถึง 1 VA ใช้ในงานเชื่อมต่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์
2. ขนาด 1 - 1,000 VA อยู่ในเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านขนาดเล็ก
3. ขนาด 1 kVA - 1 MVA ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าในโรงงาน สำนักงาน ที่พักอาศัย
4. ขนาดใหญ่ตั้งแต่ 1 MVA เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ในสถานีไฟฟ้าย่อย ระบบผลิตและจ่ายไฟฟ้า

3.3 หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย

เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่จ่ายไฟให้กับสถานประกอบการและบ้านอยู่อาศัยทั่วไป ดังภาพที่ 3.1 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ที่จ่ายให้กับสถานศึกษาแห่งหนึ่งในเขตการไฟฟ้านครหลวง ขนาด 800 เควีเอ (kVA) จากภาพ จะมีหม้อแปลงอีกชนิดหนึ่ง ต่ออยู่ด้านทางเข้าของหม้อแปลงหลัก เรียกว่าหม้อแปลงเครื่องวัดไฟฟ้า ซึ่งมีไว้สำหรับต่อร่วมกับเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าที่เรียกว่า

กิโลวัตต์อาวเออร์มิเตอร์ (kW-hour meter) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าลง ให้เครื่องวัดสามารถวัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้

ภาพที่ 3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายและหม้อแปลงเครื่องวัด

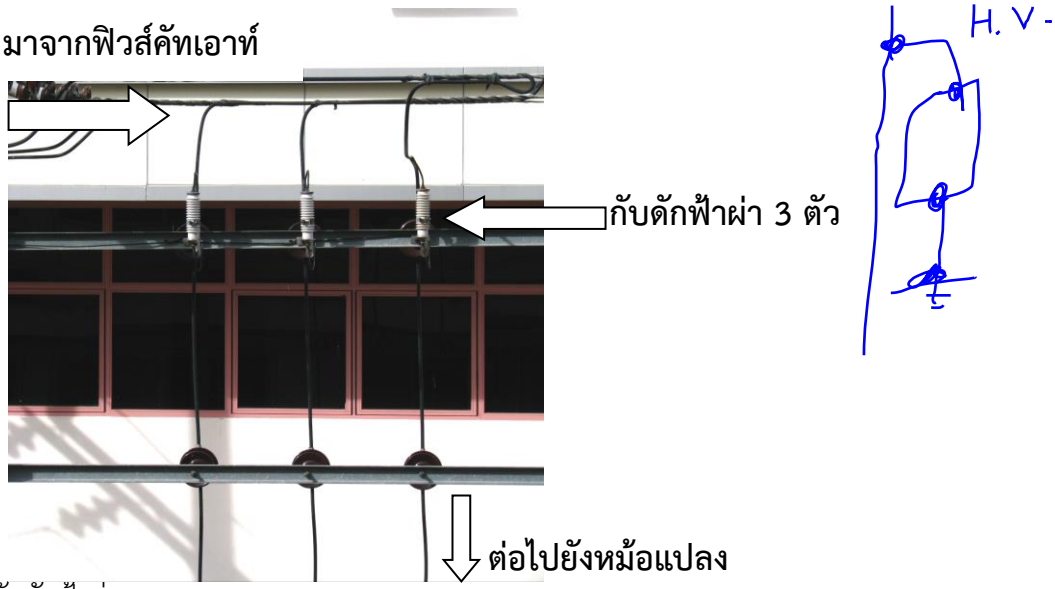
3.3.1 อุปกรณ์ประกอบหม้อแปลงไฟฟ้า

นอกจากหม้อแปลงเครื่องวัดแล้วยังมีอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ติดตั้งบริเวณทางเข้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อประโยชน์การตัดต่อวงจรและการป้องกันตัวหม้อแปลง ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะอุปกรณ์ที่มักพบกับหม้อแปลงในระบบจำหน่ายโดยทั่วไป ดังนี้

3.3.1.1 ฟิวส์คัทเอาท์ (Cutout fuse) เป็นอุปกรณ์สำหรับตัดตอนสำหรับซ่อมบำรุงระบบและป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าจากกรณีโหลดเกิน (overload) การลัดวงจร (short circuit) จากภาพที่ 3.1 ฟิวส์คัทเอาท์จะเป็นอุปกรณ์ตัวแรกที่ต่อมาจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า

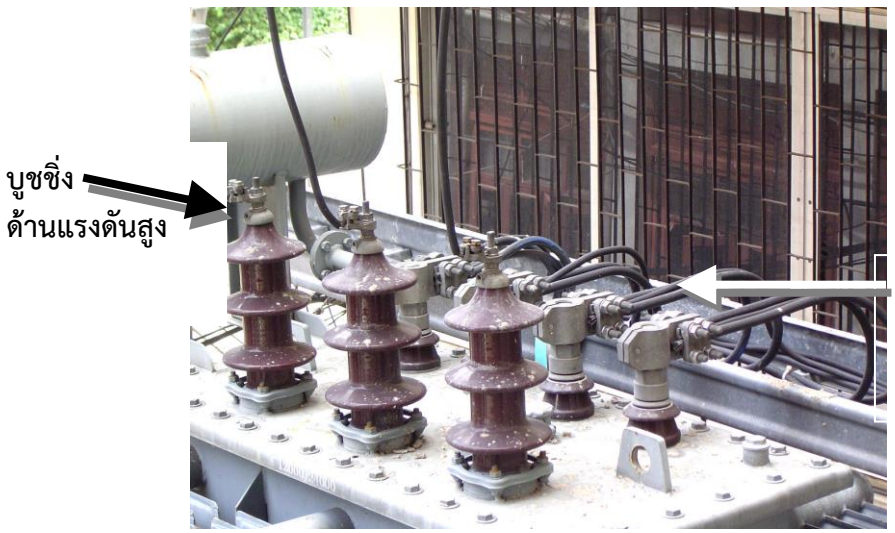
3.3.1.2 กับดักฟ้าผ่า (Lightning arrester) เป็นอุปกรณ์คายประจุ (discharge) ลงดินเมื่อมีแรงดันสูงผิดปกติ (surge voltage) ในระบบจำหน่าย ซึ่งอาจเกิดจากฟ้าผ่า

หรือเกิดจากการตัดต่อการทำงานของโหลดในระบบก็ตาม เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับหม้อแปลงไฟฟ้า กับดักฟ้าผ่า 3 ชุดจะต่ออยู่ระหว่างทางออกของฟิวส์คัทเอาท์และก่อนเข้าหม้อแปลง ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 กับดักฟ้าผ่า

3.3.1.3 บูชชิ่ง (Bushing) เป็นขั้วต่อ (terminals) เพื่อป้อนไฟเข้าและต่อไฟไปใช้งาน มีลักษณะเป็นฉนวนกระเบื้องหุ้มขั้วต่อไฟฟ้าเพื่อป้องกันไม่ให้ไฟรั่วลงตัวถัง ด้านขาเข้าที่ต่อกับแรงดันสูงจะมีขนาดโตและสูงกว่าด้านขาออกที่ต่อไฟแรงดันต่ำไปใช้งาน



ภาพที่ 3.3 บูชชิ่งด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.3.1.4 ถังสำรองน้ำมัน (Conservator) เป็นถังสำหรับสำรองน้ำมันของหม้อแปลงเพื่อให้มีปริมาณพอเพียงสำหรับทำหน้าที่เป็นฉนวนและระบายความร้อน และเป็นอุปกรณ์รองรับการขยายตัวของน้ำมัน ติดตั้งอยู่ส่วนบนของตัวถังหม้อแปลง ดังภาพที่ 3.4

3.3.1.5 ตัวกรองความชื้น (Dehydrator or breather) เป็นอุปกรณ์สำหรับกรองเอาความชื้นออกจากอากาศที่ผ่านเข้าออกระบบ กระบอกกรองจะเป็นวัสดุโปร่งใสเพื่อให้มองเห็นสารกรองได้ ส่วนสารกรองความชื้นจะใช้เม็ดซิลิก้าเจล (silica gel) ในสภาพใหม่จะเป็นสีน้ำเงิน หากดูดความชื้นไว้มากจะกลายเป็นสีชมพูถึงน้ำตาลแดง ตัวกรองความชื้นจะติดอยู่กับถังสำรองน้ำมัน ดังภาพที่ 3.4

ภาพที่ 3.4 ถังสำรองน้ำมันและตัวกรองความชื้น

3.3.1.6 สายดิน (Ground wire) เป็นสายที่ต่อจากตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้าและกับดักฟ้าผ่า เพื่อคายประจุไฟฟ้าจากสาเหตุต่าง ๆ ลงสู่พื้นดิน ดังภาพที่ 3.5

ภาพที่ 3.5 สายดินที่ตัวถังหม้อแปลง

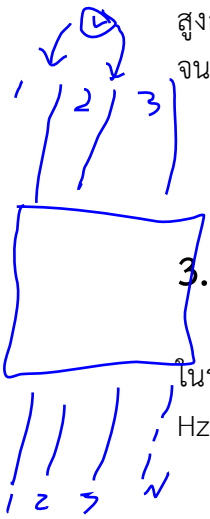
นอกจากอุปกรณ์ดังกล่าวแล้วหม้อแปลงไฟฟ้าอาจมีมีอุปกรณ์ป้องกันอื่น ๆ เช่นรีเลย์บุชโฮลซ์ (buchholz relay) เป็นรีเลย์ปองกันหม้อแปลงขนาดใหญ่กรณีเกิดการลัดวงจร ทำงานเมื่อมีการไหลของน้ำมันเร็วผิดปกติ ตัวถังหม้อแปลง (tank) และแผ่นระบายความร้อน (fin) ที่นำความร้อนออกจาหม้อแปลงโดยอาศัยลมธรรมชาติหรือใช้พัดลมระบายอากาศ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งในอาคารหรือในเครื่องห่อหุ้ม (enclosure) เป็นต้น

3.3.2 ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงในระบบจำหน่ายมีขนาดตั้งแต่ 300 kVA จนถึง 2,000 kVA ขนาดที่สูงกว่านั้นจะจัดเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (power transformer) ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 2,500 kVA จนถึง 12,500 kVA ส่วนขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้า จำแนกเป็น

กฟน. (MEA) ขาเข้า พิกัด 12 kV หรือ 24 kV และ ขาออก พิกัด 416/240 V

กฟภ. (PEA) ขาเข้า พิกัด 11 kV 22 kV หรือ 33 kV ขาออก พิกัด 400/230 V



3.4 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว

หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว (single-phase transformer) หมายถึงหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้าเฟสเดียว การไฟฟ้าจะใช้หม้อแปลงประเภทนี้ในระบบจำหน่าย 1ϕ 2W 220 V 50 Hz

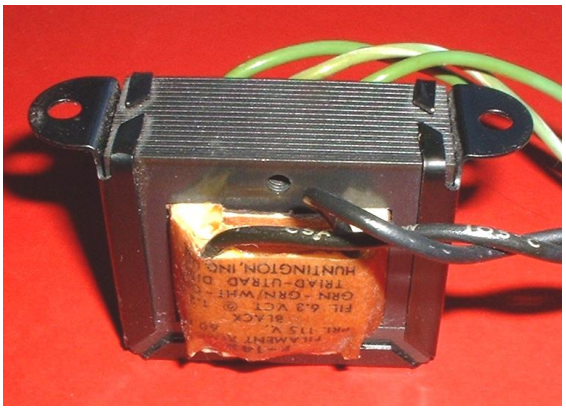
และ 1ϕ 3W 440/220 V 50 Hz และหม้อแปลงขนาดเล็กที่แฝงอยู่ในเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นตัวปรับระดับแรงดันให้ต่ำลงเพื่อป้อนให้กับภาคจ่ายไฟของอุปกรณ์นั้น ๆ

หม้อแปลงเฟสเดียวยังใช้มากในห้องทดลอง สำหรับทดสอบวงจรไฟฟ้าและป้อนพลังงานให้กับเครื่องกลไฟฟ้า

3.4.1 โครงสร้าง

พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการทำงานปรับแรงดันไฟฟ้า ประกอบด้วยโครงสร้าง (construction) หลัก 2 ส่วนคือ แกนเหล็กและขดลวด

3.4.1.1 แกนเหล็ก (Iron Core) ทำจากเหล็กแผ่นบาง ๆ อาบฉนวน (laminated steel) เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy current loss) อัดซ้อนเข้าด้วยกันเป็นรูปทรง เมื่อดูที่สันแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้า จะเห็นเหล็กแต่ละแผ่นเรียงกันอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 3.6

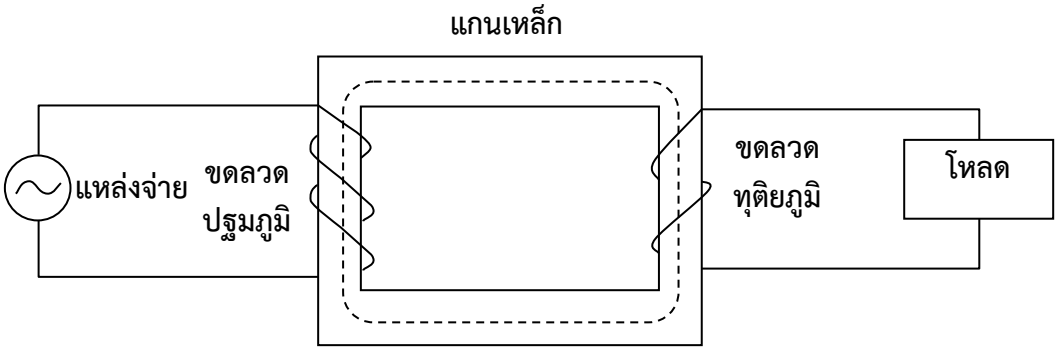


ภาพที่ 3.6 แกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเหล็กแผ่นอาบฉนวน

3.4.1.1 ขดลวด (Winding) ด้านขาเข้าขดลวดทำหน้าที่ต่อกับแรงดันไฟฟ้าก่อนปรับแรงดัน ส่วนขาออกขดลวดทำหน้าที่ป้อนไฟฟ้าให้กับโหลด ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วย 2 ขด ดังนี้

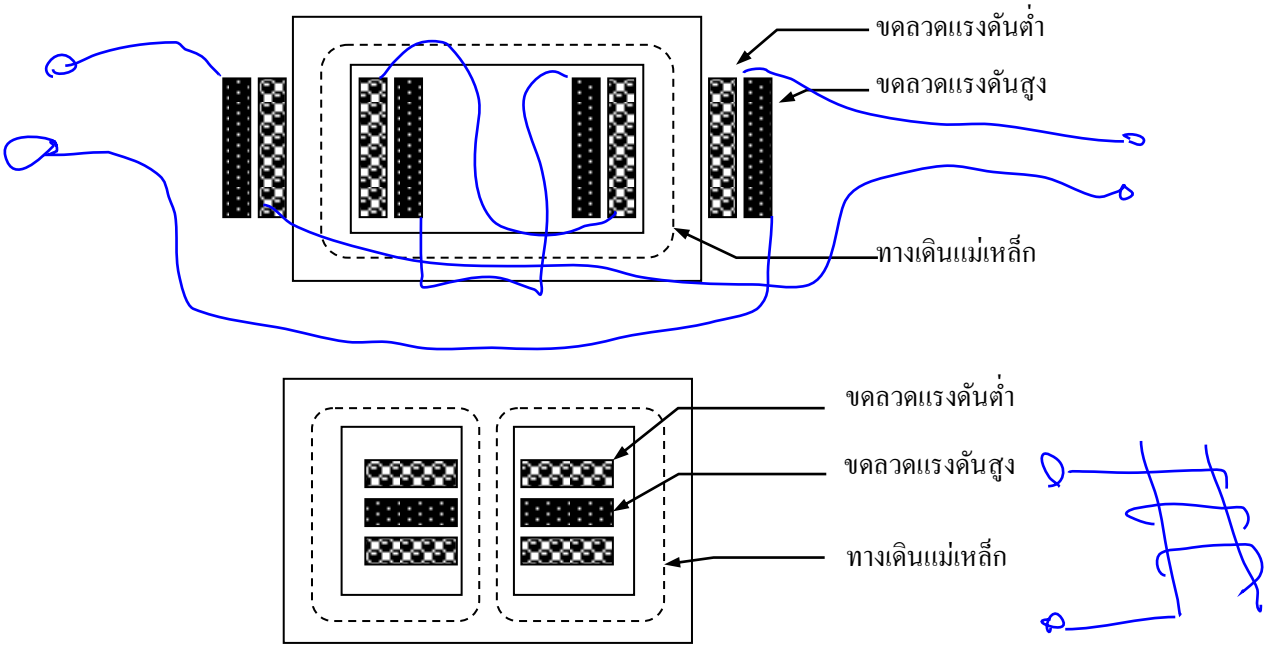
3.4.1.1.1 ขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) เป็นขดลวดด้านขาเข้าซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายหรือระบบไฟที่ต้องการปรับระดับแรงดัน ดังภาพที่ 3.7

3.4.1.1.2 ขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) เป็นขดลวดด้านขาออก ขดลวดชุดนี้จะเป็นส่วนที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 หน้าที่ของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.4.1.2 ลักษณะการติดตั้งขดลวด หมายถึงลักษณะการติดตั้งขดลวดลงบนแกนเหล็ก ขดลวดจะถูกพันสำเร็จพร้อมฉนวนจากเครื่องพันขดลวด และนำมาสวมลงบนแกนภายหลัง การพันขดปฐมภูมิและทุติยภูมิอาจทำได้หลายวิธีการ ดังตัวอย่างในภาพที่ 3.8 นั้น ขดปฐมภูมิและทุติยภูมิจะติดตั้งไว้ด้วยกัน ทั้งสองขาของแกนเหล็กแบบคอร์ (core type) และพันรวมกันอยู่ที่ขากลางของแกนเหล็กแบบเชลล์ (shell type)

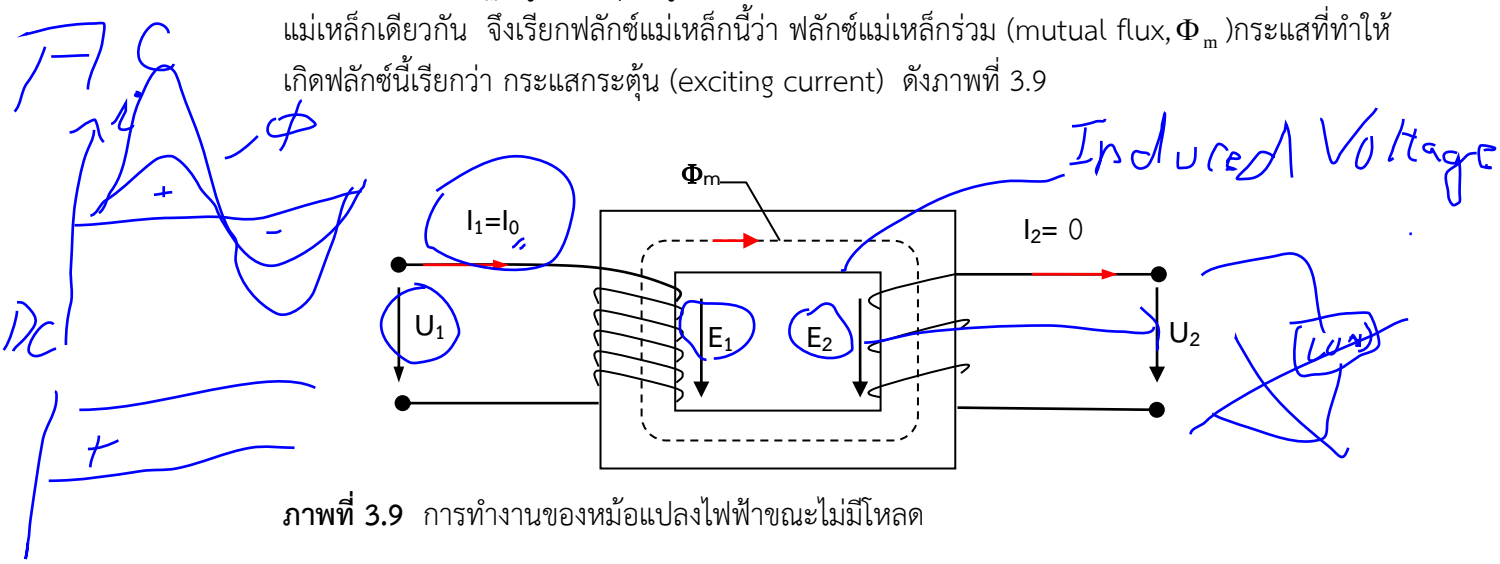


ภาพที่ 3.8 ลักษณะการติดตั้งขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิหม้อแปลงไฟฟ้า

3.4.2 ทฤษฎีของการทำงาน

เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่าย ในเบื้องต้นทฤษฎีการทำงาน (theory of operation) จะกำหนดการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบอุดมคติ (ideal transformer) คือเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่มีการสูญเสียใด ๆ เช่นไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล (leakage flux) ขดลวดไม่มีค่าความต้านทาน (resistance of winding) และไม่มีการสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses) หม้อแปลงจะมีประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับที่กล่าวไว้โดย สัมพันธ์ หาญชเล (2542, หน้า 2-9 และ 2-25)

3.4.2.1 การทำงานของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด เป็นสภาวะที่หม้อแปลงเปิดวงจรและไม่มีกระแสไหลทางด้านทุติยภูมิ (no-load condition) และพิจารณาว่าเกิดแรงดันที่ด้านทุติยภูมิเท่าใด ตัวแปรใดบ้างที่มีผล ด้านปฐมภูมิจะมีกระแสไหลเท่าใด กระแสที่ไหลในขณะนี้เรียกว่า กระแสขณะไม่มีโหลด (no-load current, I_o) กระแสขณะนี้จะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กคล้องไปตามแกนเหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นไซน์ของของกระแสเหนี่ยวนำกับขดปฐมภูมิและทุติยภูมิเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_1 และ E_2 ตามลำดับ จาก ฟลักซ์แม่เหล็กเดียวกัน จึงเรียกฟลักซ์แม่เหล็กนี้ว่า ฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (mutual flux, Φ_m)กระแสที่ทำให้เกิดฟลักซ์นี้เรียกว่า กระแสกระตุ้น (exciting current) ดังภาพที่ 3.9



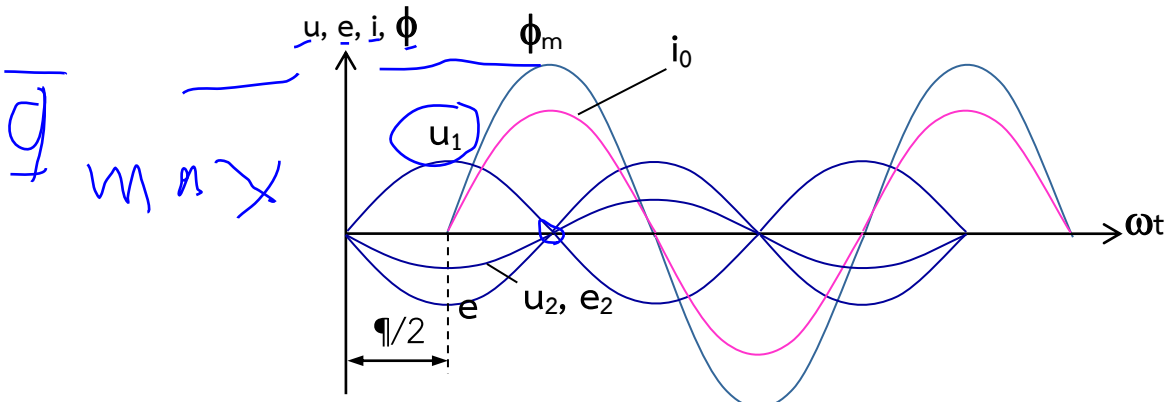
ภาพที่ 3.9 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

จากหลักการดังกล่าว เขียนความสัมพันธ์อย่างง่ายของตัวแปรที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$U_1 \rightarrow I_0 \rightarrow \Phi_m \rightarrow E_1, E_2 \qquad E_1 = U_1 \qquad E_2 = U_2$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นคือ E_1 และ E_2 จะมีทิศทางที่สามารถอธิบายได้โดยกฎของเลนซ์ (Lenz's Law) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก หรือ

ฟลักซ์แม่เหล็กร่วม กำหนดทิศทาง E_1 และ E_2 โดยใช้ “dot” แทนศักย์สูง และความสัมพันธ์เชิงเฟสของแต่ละตัวแปรจะเป็นไปตามรูปคลื่นในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดัน กระแส และฟลักซ์แม่เหล็กขณะหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีโหลด

3.4.2.1.1 สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นสมการที่ใช้คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีหลักการพิจารณาดังนี้

จากภาพที่ 3.9 รูปคลื่น e_1 จะมีขนาดเท่ากับ U_1 และมีเฟสตรงกันข้าม (180°) เสมอ ส่วน e_2 จะมีเฟสเดียวกัน (in phase) กับ e_1 ถ้าพิจารณาขนาดของ e_1 และ e_2 สามารถอธิบายโดยใช้กฎของฟาราเดย์และ เลนซ์ ดังนี้

จาก $e = -N\frac{d\phi}{dt}$

$\therefore e_1(t) = -N_1\frac{d\phi_m}{dt}$

จากรูปคลื่น $\phi_m = \Phi_{max}\sin(\omega t - 90^\circ) = \cos(\omega t - 180^\circ)$

$= -\Phi_{max}\cos\omega t$

$\therefore e_1(t) = -N_1\frac{d}{dt}(-\Phi_{max}\cos\omega t)$

$e_1(t) = N_1\Phi_{max}\cdot\omega\sin\omega t \qquad (3.1)$

จากสมการ 3.1 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเป็นรูปคลื่นไซน์และมีความถี่เท่ากันกับ u_1 (สังเกตจาก sin ωt) มีค่ายอดคลื่น (peak) เท่ากับ $N_1 \cdot \Phi_{max} \cdot \omega$ และมีค่า R.M.S. ดังนี้

$$\text{จาก R.M.S} = \frac{\text{PeakValue}}{\sqrt{2}}$$

$$\because \quad E_1 = \frac{N_1 \Phi_{max} \cdot \omega}{\sqrt{2}}$$

$$= \frac{N_1 \Phi_{max} 2\pi f}{\sqrt{2}}$$

$$\because \quad = 4.44\ N_1\ f\ \Phi_{max} \quad (V) \qquad (3.2)$$

ทำนองเดียวกัน

$$E_2 = 4.44\ N_2\ f\ \Phi_{max} \quad (V) \qquad (3.3)$$

เมื่อ

E_1 , E_2 คือ ค่า R.M.S ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (V)

N_1 , N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (t)

f คือ ความถี่ของแรงดัน (Hz)

Φ_{max} คือ ค่ายอดคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (Wb)

สมการแรงเคลื่อนที่ได้ สอดคล้องกับที่กล่าวไว้โดย สัมพันธ์ หาญชเล (2542, หน้า 2-9 – 2-10) และ ศุภชัย สุรินทร์วงศ์ (2543, หน้า 5) และ Nasar (1998, p.25)

3.4.2.1.2 อัตราส่วนของหม้อแปลง เป็นตัวเลขที่แสดงถึงอัตราส่วน (ratio) ของจำนวนรอบของขดลวดทั้งสองด้านของหม้อแปลง และจะเป็นตัวกำหนดอัตราส่วนของแรงดันรวมทั้งกระแสของทั้งสองด้านอีกด้วย ทั้งหมดเรียกรวม ๆ ว่า อัตราส่วนหม้อแปลง (transformer ratio) มีหลักในการพิจารณา ดังนี้

จาก $E_1 = 4.44\ N_1\ f\ \Phi_{max}$

$E_2 = 4.44\ N_2\ f\ \Phi_{max}$

กำหนดเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนของแรงดันทั้งสองด้าน

อัตราส่วนแรงดัน $a = \frac{E_1}{E_2}$

จะได้ $a = \frac{E_1}{E_2} \quad \frac{4.44\ N1\ f\ \Phi_{max}}{4.44\ N1\ f\ \Phi_{max}}$

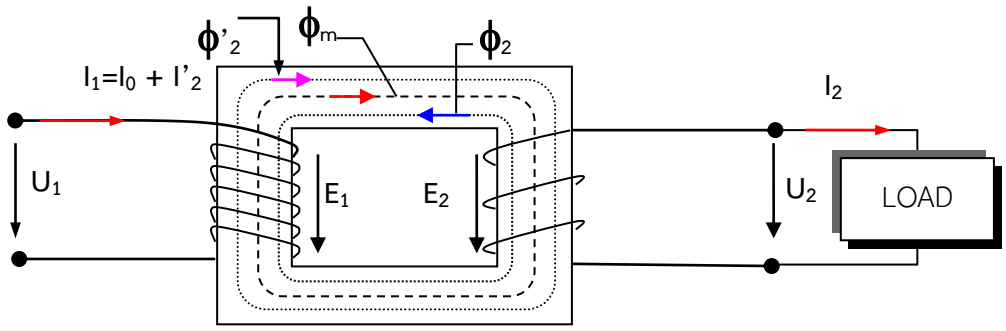
$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (3.4)$$

Turn Ratio

Voltage Ratio

3.4.2.2 การทำงานของหม้อแปลงขณะมีโหลด

เป็นสภาวะที่หม้อแปลงจ่ายกระแสให้โหลด เมื่อกระแสโหลดด้านทุติยภูมิ I_2 สร้างฟลักซ์ ϕ_2 ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับฟลักซ์เดิม ϕ_m ทำให้ฟลักซ์ในแกนลดลง กระแสด้านปฐมภูมิ I'_2 จะเกิดขึ้นเพื่อสร้างฟลักซ์ ϕ'_2 เพื่อทำให้ผลรวมของฟลักซ์ในแกนเท่าเดิม ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ฟลักซ์แม่เหล็กในแกนขณะมีโหลด

3.4.2.2.1 อัตราส่วนของกระแส หมายถึงอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าวมาแล้ว แต่พิจารณาด้วยค่าของกระแสด้านทุติยภูมิกับด้านปฐมภูมิเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลด หลักการคิดจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กในแกนที่มีค่าเท่ากัน

ซึ่งเกิดจากกระแสทุติยภูมิกับกระแสปฐมภูมิ ดังนี้

$$\varphi_2 = \varphi'_2 \qquad \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I'_2} = a$$

$$\frac{N_2 I_2}{\Re} = \frac{N_1 I'_2}{\Re} \qquad \text{ถ้าไม่คิดค่า} I_O$$

$$N_2 I_2 = N_1 I'_2 \qquad \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \longleftarrow \text{Current Ratio}$$

เมื่อรวมอัตราส่วนทั้งหมด และถ้าไม่คิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมภายในหม้อแปลง จะได้อัตราส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าดังสมการ

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \qquad (3.5)$$

สมการ 3.5 ตรงกับที่กล่าวไว้โดย สัมพันธ์ หาญชเล (2542, หน้า 2-8) และ ศุภชัย สุรินทร์วงศ์ (2543, หน้า 3)

ตัวอย่างที่ 3.1 single phase transformer จำนวนรอบขดลวดด้าน primary และ secondary เท่ากับ 100 และ 1,000 รอบตามลำดับ ต่อกับแหล่งจ่าย 220 V 50 Hz ใช้แกนแบบคอร์ มีพื้นที่หน้าตัด 50 cm^2 ให้คำนวณหาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้าน secondary (1.98 Wb/m^2, 2,200 V)

วิธีทำ

$B_{max} = \Phi_{max}/A$

$E_1 = 4.44\ N_1\ f\ \Phi_{max}$

$\Phi_{max} = E_1/4.44\ N_1\ f$

$= 220\ V/4.44 \times 100 \times 50\ Hz$

$= 9.91 \times 10^{-3}\ Wb$

$B_{max} = 9.91 \times 10^{-3} / 50 \times 10^{-4\ 2}$

$= 1.98\ Wb/m^2$

จาก

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}$$

$$E_2 = \frac{220\ V \times 1{,}000\ t}{100\ t}$$

$= 2{,}200\ V$

ตัวอย่างที่ 3.2 หม้อแปลงเฟสเดียว ขนาด 10 kVA มี Turn Ratio เท่ากับ 1,000 : 10 หม้อแปลงต่ออยู่กับแหล่งจ่าย 10 kV 50 Hz ให้คำนวณหา

ก. กระแสพิกัดของทั้งสองด้าน

ข. แรงดันไฟฟ้าด้านออกของหม้อแปลง

วิธีทำ

จากโจทย์ $S = 10 \times 10^3$ VA

$a = 100$ $U_1 = 10 \times 10^3$ V

$S_1 = U_1 I_1$ $S_2 = U_2 I_2$

และ

$S_1 = S_2 = S$

$U_1 I_1 = 10 \times 10^3$ VA

$I_1 = 10 \times 10^3$ VA$/U_1$

$= 10 \times 10^3$ VA$/10 \times 10^3$ V

$= 1$ A

จาก

$a = I_2/I_1$

$I_2 = a I_1$

$= 100 \times 1$ A

$= 100$ A

และ

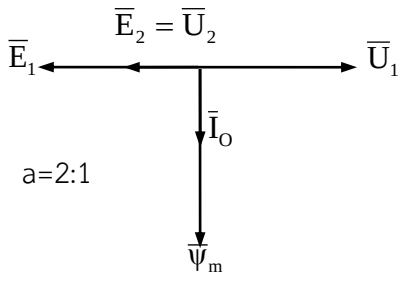
$a = U_1/U_2$

$U_2 = U_1/a$

$= 10 \times 10^3$ V$/100$

$= 100$ V

3.4.2.2.2 ไดอะแกรมเฟสเซอร์ คือการเขียนไดอะแกรมของค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อแสดงความสัมพันธ์ เปรียบเทียบทั้งขนาดและทิศทาง โดยการพิจารณารูปคลื่นในภาพที่ 3.9 นำค่าประสิทธิผล (effective value) และมุมเฟส (phase angle) มาเขียนไดอะแกรมดังภาพที่ 3.12 ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าขาเข้า $\overline{U}_1$ เป็นตัวอ้างอิง ดังนี้



สมการเฟสเซอร์

$\overline{U}_1 =$ .....

$\overline{E}_1 =$ .....

$\overline{E}_2 =$ .....

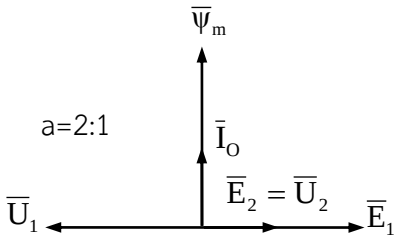
$\overline{U}_2 =$ .....

$\overline{I}_O =$ .....

$\overline{\Psi}_m =$ .....

ภาพที่ 3.12 ไดอะแกรมเฟสเซอร์เมื่อใช้แรงดันขาเข้าเป็นตัวอ้างอิง

หมุนไดอะแกรมไป 180° จะได้ไดอะแกรมที่มี $\overline{U}_2$ เป็นตัวอ้างอิง ดังนี้



สมการเฟสเซอร์

$\overline{U}_1$ = ...

$\overline{E}_1$ = ...

$\overline{E}_2$ = ...

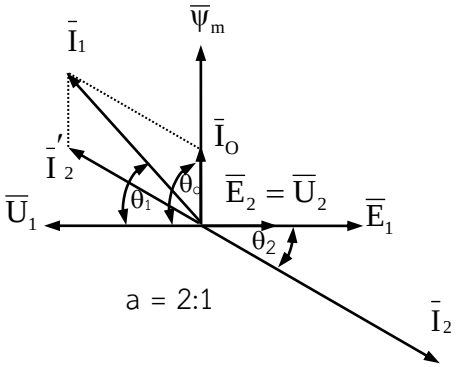
$\overline{U}_2$ = ...

$\bar{I}_O$ = ...

$\overline{\Psi}_m$ = ...

ภาพที่ 3.13 ไดอะแกรมเฟสเซอร์เมื่อใช้แรงดันขาออกเป็นตัวอ้างอิง

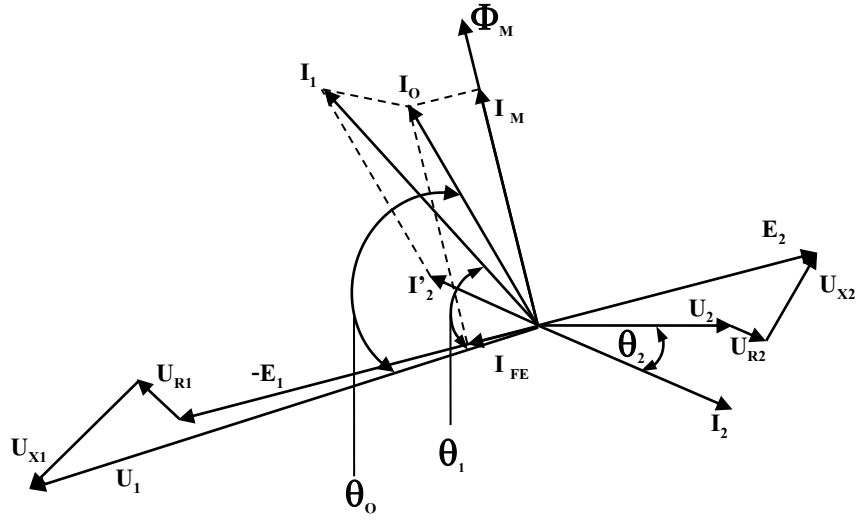
เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลด จะมีกระแสโหลดไหลด้านทุติยภูมิ I_2 ทำให้มีกระแสด้านปฐมภูมิ I'_2 ไหลเพิ่มขึ้นจาก I_1 จากภาพที่ 3.11 นำค่ากระแสด้านด้านทุติยภูมิและปฐมภูมิ มาเขียนไดอะแกรมเพิ่มเติมจากภาพที่ 3.13 จะได้ดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 ไดอะแกรมเฟสเซอร์เมื่อมีกระแสด้านขาออก

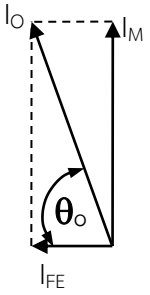
3.4.2.2.3 ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าตามความเป็นจริง

ในกรณีนี้เริ่มพิจารณาจาก ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของกระแสขณะไม่มีโหลด จะประกอบด้วยกระแส 2 ส่วนคือ กระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (magnetizing current, I_M) และ กระแสกระที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกน (core-loss current, I_{FE}) เฟสของกระแสขณะไม่มีโหลดจึงแยกเฟสออกจากฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อรวมกับ I'_2 จึงได้ I_1 กระแส I_1 ไหลทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ด้านปฐมภูมิ แรงดันดังกล่าวเมื่อรวมกันกับ E_1 จะได้แรงดันที่ป้อนให้กับหม้อแปลงคือ U_1 ดังภาพ ที่ 3.15 ซึ่งตรงกับที่นำเสนอไว้โดย สัมพันธ์ หาญชเล (2542, หน้า 2-38)



ภาพที่ 3.15 ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าตามความเป็นจริง

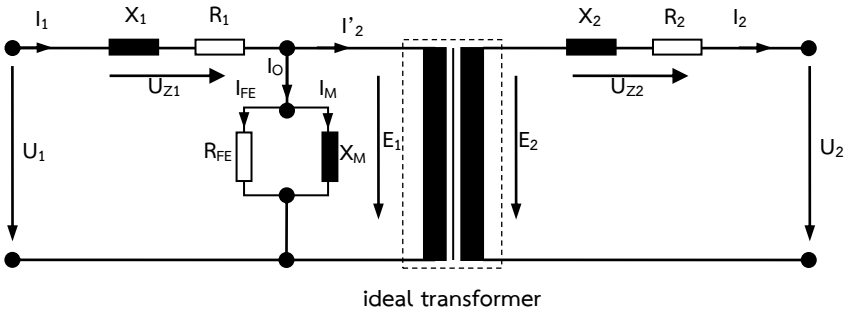
จากภาพที่ 3.15 หากพิจารณาเฉพาะกระแสขณะไม่มีโหลดจะได้องค์ประกอบ 3 ส่วน คือ I_O, I_M และ I_{FE} สามารถเขียนเป็นสมการดังนี้



$$I_M = I_O \sin \theta_o \qquad (3.6)$$

$$I_{FE} = I_O \cos \theta_o \qquad (3.7)$$

ในภาพที่ 3.15 เป็นไดอะแกรมเฟสเซอร์ของหม้อแปลงตามความเป็นจริง ซึ่งมีค่าความต้านทานของขดลวดของทั้งสองด้าน (R_1, R_2) รีแอคแตนซ์รั่วไหลของทั้งสองด้าน (X_1, X_2) ความต้านทานและรีแอคแตนซ์ขณะไม่มีโหลด (R_{FE}, X_M) ดังวงจรสมมูลในภาพที่ 3.16 ซึ่งตรงกับที่แสดงไว้โดย Nasar (1998, p.27)



ภาพที่ 3.16 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าตามความเป็นจริง

จากวงจรสมมูล เขียนสมการของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับส่วนต่าง ๆ ทั้งด้านปฐมภูมิ (ทางเข้า) และด้านทุติยภูมิ (ทางออก) ได้ดังนี้

กำลังสูญเสียในขดลวด (copper loss), P_{CU} $= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$ (3.8)

กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss), P_{FE} $= U_1 I_O \cos\theta_O$ (3.9)

$= U_1 I_{FE}$

$= I_{FE}^2 R_{FE}$

กำลังไฟฟ้าเขา (input power), P_{in} $= U_1 I_1 \cos \theta_1$ (3.10)

กำลังไฟฟ้าขาออก (output power), P_{OUT} $= U_2 I_2 \cos \theta_2$ (3.11)

$= P_{in} - (P_{CU} + P_{FE})$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า, η $= \dfrac{P_{in} - (P_{CU} + P_{FE})}{P_{in}}$ (3.12)

กำลังสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลด แต่โดยทั่วไปหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากไม่มีกำลังสูญเสียเนื่องจากส่วนที่เคลื่อนที่ เหมือนเครื่องกำเนิดและมอเตอร์ไฟฟ้า

3.5 สรุป

หม้อแปลงไฟฟ้ามีทั้งชนิดเฟสเดียวและ 3 เฟส มีขนาดตั้งแต่ 1 VA จนถึงเป็น MVA หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจะมีอุปกรณ์ประกอบหลายส่วนเพื่อการวัดพลังงานความปลอดภัยและการทำงานจ่ายพลังงานที่สมบูรณ์มากขึ้น เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องวัด ฟิวส์ คัทเอาท์ กับดักฟ้าผ่า บูชชิ่ง ถังสำรองน้ำมัน ตัวกรองความชื้น และ สายดิน เป็นต้น โครงสร้างพื้นฐานมี 2 ส่วน คือ แกนเหล็กที่ทำจากเหล็กแผ่นบาง ๆ อาบฉนวนและขดลวดปฐมภูมิที่รับไฟและขดลวดทุติยภูมิที่เป็นขดจ่ายไฟ แรงดันที่เกิดขึ้นอาศัยการเหนี่ยวนำ ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กกับขดลวดทั้งสองด้าน โดยที่แรงดันกับจำนวนรอบของขดลวดเป็นปฏิภาคโดยตรงต่อกันโดยสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับจำนวนรอบเรียกว่าอัตราส่วนหม้อแปลงซึ่งประกอบด้วยอัตราส่วนแรงดันและอัตราส่วนของขดลวด เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดก็จะได้อัตราส่วนระหว่างกระแสด้านทุติยภูมิต่อด้านปฐมภูมิเป็นอัตราส่วนหม้อแปลงได้เช่นกัน และหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกแทนคุณสมบัติทั้งหมดด้วยวงจรทางไฟฟ้าที่เรียกว่าวงจรสมมูล และแสดงความสัมพันธ์ด้วยขนาดและมุมด้วยไดอะแกรมเวกเตอร์

3.6 คำถามทบทวนและกิจกรรม

1. หม้อแปลงไฟฟ้าที่พบเห็นทั่วไปตามชุมชนและเขตการค้าบริเวณริมถนน เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่จัดอยู่ในประเภทใด

2. ถังกลม ๆ ที่อยู่เหนือตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้าคืออะไร มีประโยชน์อย่างไร

3. หม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องวัด จัดเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทหนึ่งที่จ่ายโหลดขนาดเล็กใช่หรือไม่ ให้อธิบาย

4. บูชชิ่งคืออะไร สำคัญต่อหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายอย่างไร

5. ให้บอกหน้าที่ของสายดินที่ต่อที่ตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้า

6. โครงสร้างหลักของหม้อแปลงไฟฟ้ามีอะไรบ้าง มีหน้าที่อะไร

7. กระแสขณะไม่มีโหลดเมื่อพิจารณาตามความเป็นจริง มีองค์ประกอบอะไรบ้าง มีหน้าที่หรือก่อให้เกิดผลอะไรบ้าง

8. หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแปลงไฟฟ้าได้ทั้งไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง คำกล่าวนี้ถูกต้องหรือไม่ อย่างไร

9. กระแสด้านทุติยภูมิเนื่องด้วยโหลด จะไม่มีผลต่อกระแสด้านปฐมภูมิเนื่องจากขดลวดทั้งสองด้านไม่ต่อถึงกันทางไฟฟ้า คำกล่าวนี้ถูกต้องหรือไม่ อย่างไร

10. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1 kVA 220/110 V 50 Hz ขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัดจะมีกระแสทั้งสองด้านเท่าใด และหากป้อนแรงดันขาเข้าเพียง 100 V จะมีแรงดันทางออกเท่าใด

11. ทำใบงานการทดลองที่ 1 ข้อ 1.1