# บทที่ 3
# โวลท์เตจเรกกูเลชั่นและประสิทธิภาพ

## 3.1 บทนำ *(Introdution)*

เพื่อให้การศึกษาเรื่องของโวลท์เตจเรกกูเลชั่น ประสิทธิภาพและการทดสอบหม้อแปลงเป็นไปได้โดยสะดวกและรวดเร็ว จึงต้องทำการศึกษาถึงรายละเอียดในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงดังต่อไปนี้

## 3.2 ค่าความต้านทานสมมูลย์ *(Equvialent Resistance)*

ขดลวดโดยทั่วไปย่อมมีค่าความต้านทานของขดลวดแต่ละขดอยู่ด้วย ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดความโตหรือพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ใช้พันขดลวดและจำนวนรอบของขดลวดนั้นๆ (ยิ่งพันจำนวนรอบมาก ความยาวก็จะมาก)

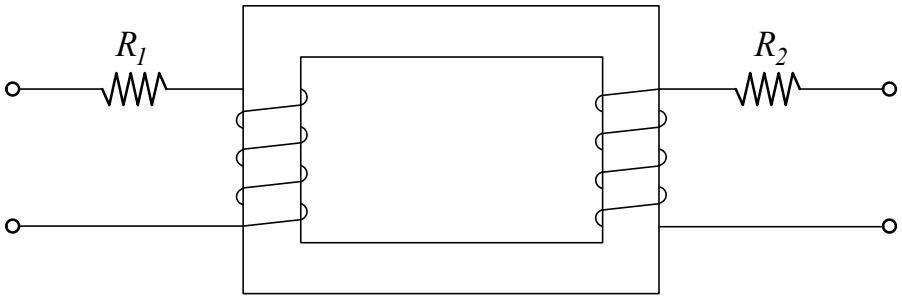
ดังนั้นขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงก็เช่นเดียวกันกับขดลวดโดยทั่วไป คือ จะมีค่าความต้านทานอยู่ภายในขดลวดด้วย

ให้

$R_1$ = ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิ

$R_2$ = ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิ

เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายจึงนำค่าความต้านทานดังกล่าวไปไว้ภายนอกโดยต่ออนุกรมกับขดลวดดังรูป

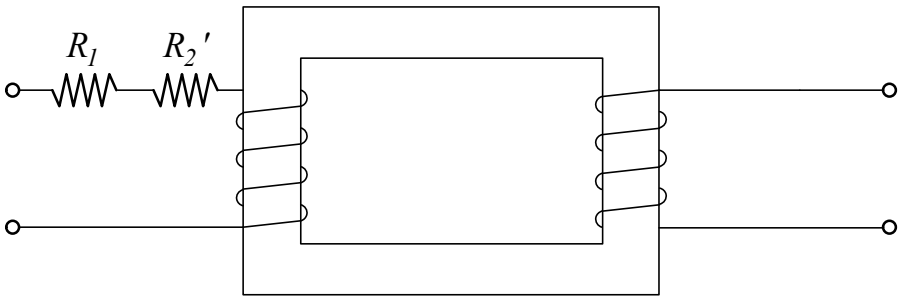



รูป 3.1 แสดงค่าความต้านทาน $R_1$ และ $R_2$ ของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง

เพื่อความสะดวกและง่ายแก่การคำนวณ เราจึงนำเอาค่าความต้านทานของขดลวดทั้งสองชุดไปรวมไว้ทางด้านเดียวกัน แต่ไม่ได้หมายความว่าจะนำค่าความต้านทานทั้งสองค่ามารวมกันได้โดยตรง แต่จะใช้วิธีการ ย้าย หรือ ถ่ายโอน *(Transfer)* ค่าความต้านทานจากขดลวดด้านหนึ่งไปยังขดลวดอีกด้านหนึ่ง วิธีนี้จะช่วยให้การคำนวณหาค่าต่างๆ ของหม้อแปลงง่ายขึ้น

การย้ายค่าความต้านทาน $R_2$ ของขดลวดทุติยภูมิไปไว้ทางด้านปฐมภูมิ เราเรียก ค่าความต้านทานที่ย้ายไปนี้ว่า **ความต้านทานสมมูลย์ของขดลวดทุติยภูมิ** แทนด้วย $\boldsymbol{R_2'}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$R_2' = R_2.a^2$$




รูป 3.2 วงจรของหม้อแปลง เมื่อย้ายค่าความต้านทานจากด้านทุติยภูมิไปไว้ทางด้านปฐมภูมิ

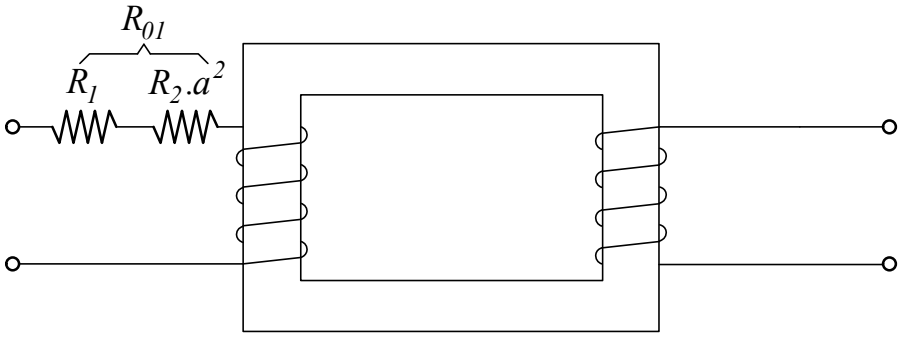
ดังนั้นเราสามารถรวมค่าความต้านทานทางด้านปฐมภูมิเข้าด้วยกันได้ เรียกว่า **ค่าความต้านทานสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาด้านปฐมภูมิ** $\boldsymbol{(R_{01})}$

$$R_{01} = R_1 + R_2'$$

$$\boxed{R_{01} = R_1 + R_2.a^2}$$

$R_2'$ = ค่าความต้านทานสมมูลย์ของขดลวดทุติยภูมิ

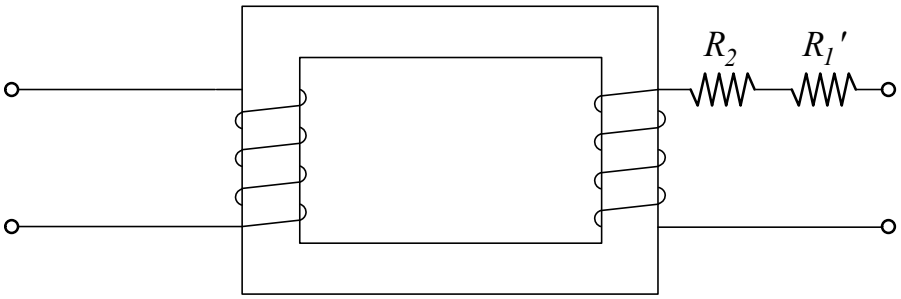
$R_{01}$ = ค่าความต้านทานสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาด้านปฐมภูมิ




รูป 3.3 วงจรของหม้อแปลง เมื่อย้ายค่าความต้านทานจากด้านทุติยภูมิไปไว้ทางด้านปฐมภูมิ

ในทำนองเดียวกัน การย้ายค่าความต้านทาน $R_1$ ของขดลวดปฐมภูมิไปไว้ทางด้านทุติยภูมิ เราเรียกค่าความต้านทานที่ย้ายไปนี้ว่า **ค่าความต้านทานสมมูลย์ของขดลวดปฐมภูมิ , $\boldsymbol{R_1'}$**

$$R_1' = \frac{R_1}{a^2}$$




รูป 3.4 วงจรของหม้อแปลง เมื่อย้ายค่าความต้านทานจากด้านปฐมภูมิไปไว้ทางด้านทุติยภูมิ

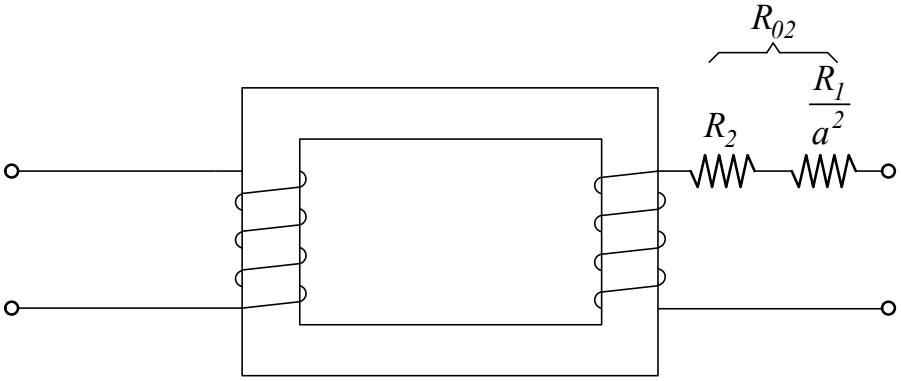
ดังนั้น ค่าความต้านทานสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาด้านทุติยภูมิ จะมีค่าเป็น $R_{02}$ คือ ผลรวมของ $R_2$ กับ $R_1$'

$$R_{02} = R_2 + R_1'$$

$$\boxed{R_{02} = R_2 + \frac{R_1}{a^2}}$$

$R_1$' = ค่าความต้านทานสมมูลย์ของขดลวดปฐมภูมิ

$R_{02}$ = ค่าความต้านทานสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาด้านทุติยภูมิ

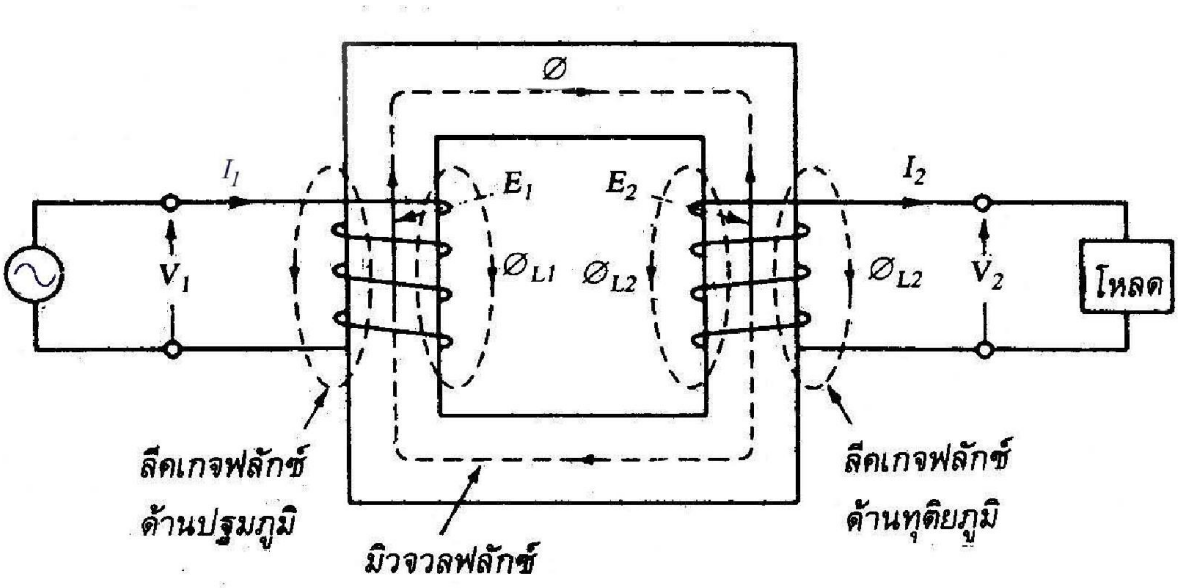



รูป 3.5 วงจรของหม้อแปลง เมื่อย้ายค่าความต้านทานจากด้านปฐมภูมิไปไว้ทางด้านทุติยภูมิ

## 3.3 ลีคเกจฟลักซ์และลีคเกจ รีแอคแตนซ์ *(Leakage flux and leakage reactance)*

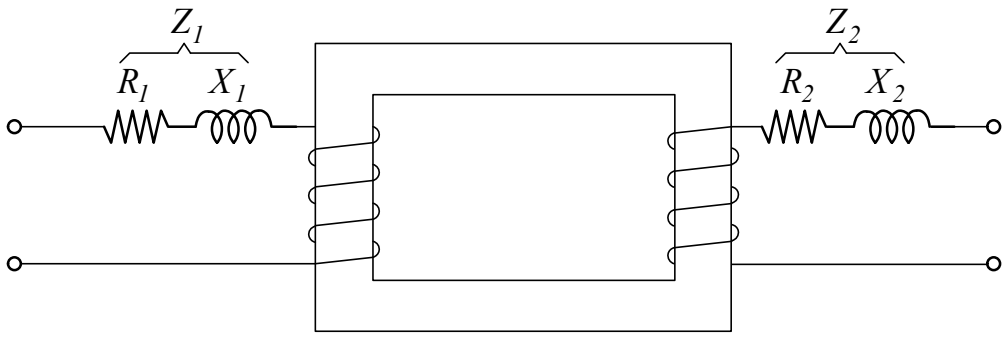
จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ว่าเส้นแรงแม่เหล็กหรือฟลักซ์ทั้งหมดที่เกิดจากกระสร้างฟลักซ์หรือกระแสแมกเนไตซ์นั้น จะตัดหรือคล้องกับขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิได้หมด ไม่มีส่วนใดที่สูญหายไปเลย แต่โดยข้อเท็จจริงแล้ว ฟลักซ์ที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิไม่ได้เคลื่อนที่ไปตัดขดลวดทุติยภูมิทั้งหมด แต่จะมีฟลักซ์บางส่วนจะตัดหรือคล้องเฉพาะขดลวดปฐมภูมิ คือ ฟลักซ์ $\varnothing_{L1}$ และฟลักซ์บางส่วนจะตัดหรือคล้องเฉพาะขดลวดทุติยภูมิ คือ ฟลักซ์ $\varnothing_{L2}$ ดังรูป ทั้งฟลักซ์ $\varnothing_{L1}$ และฟลักซ์ $\varnothing_{L2}$ เรียกว่าลีคเกจฟลักซ์ของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

ด้วยสาเหตุดังกล่าว แอมแปร์-เทินส์ของขดลวดทุติยภูมิซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสโหลดไหลผ่านจึงไม่สามารถต่อต้านหรือหักล้างกับแอมแปร์-เทินส์ของขดลวดปฐมภูมิให้หมดได้แต่จะมีเหลืออยู่บ้างบางส่วน ดังรูป มิวจวลฟลักซ์ $\varnothing$ จะตัดหรือคล้องทั้งขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ และทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นจริงๆ ส่วนลีคเกจฟลักซ์ $\varnothing_{L1}$ และ $\varnothing_{L2}$ จะมีทางเดินเป็นอากาศเสียส่วนใหญ่ และจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแอมแปร์-เทินส์ของขดลวดแต่ละขด




รูป 3.6 แสดงลีคเกจฟลักซ์ $\varnothing_{L1}$ และ $\varnothing_{L2}$ ซึ่งเกิดขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง

ลีคเกจฟลักซ์แต่ละตัว ต่างก็เหนี่ยวนำให้เกิดค่าลีคเกจฟลักซ์รีแอคแตนซ์ขึ้นในขดลวดแต่ละขด และค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์เหล่านี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรีเกจรีแอคแตนซ์ *(Leakage reactance drop)* $I_1.X_1$ ในขดลวดปฐมภูมิ และ $I_2.X_2$ ในขดลวดทุติยภูมิ เมื่อนำค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์ของขดลวดทั้งสองชุด คือ $X_1$และ $X_2$ มาเขียนไว้ในวงจรโดยต่ออนุกรมกับค่าความต้านทาน $R_1$ และ $R_2$ ของขดลวดทั้งสองชุดของหม้อแปลง จะได้วงจรดังรูปด้านล่าง




รูป 3.7 แสดงค่าความต้านทาน $R_1$ และ $R_2$ ค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์ $X_1$ และ $X_2$ ของขดลวดทั้งสองชุดในหม้อแปลง

จากรูป เราสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดปฐมภูมิได้ดังนี้

$$Z_1 = \sqrt{R_1^{\,2} + X_1^{\,2}}$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดทุติยภูมิ คือ

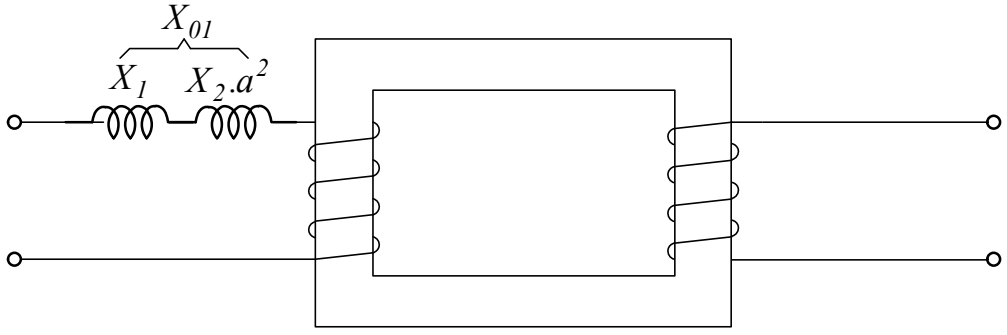
$$Z_2 = \sqrt{R_2^{\,2} + X_2^{\,2}}$$

ในทำนองเดียวกับการย้ายค่าความต้านทาน ค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์ ก็สามารถย้ายจากขดลวดขดหนึ่งไปยังอีกขดหนึ่งได้ด้วยวิธีเดียวกัน

ค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์สมมูลย์ของขดทุติยภูมิ , $X_2' =$ $X_2.a^2$

ดังนั้นจะได้ค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาด้านปฐมภูมิ , $X_{01}$ คือ

$$X_{01} = X_1 + X_2.a^2$$




เมื่อ

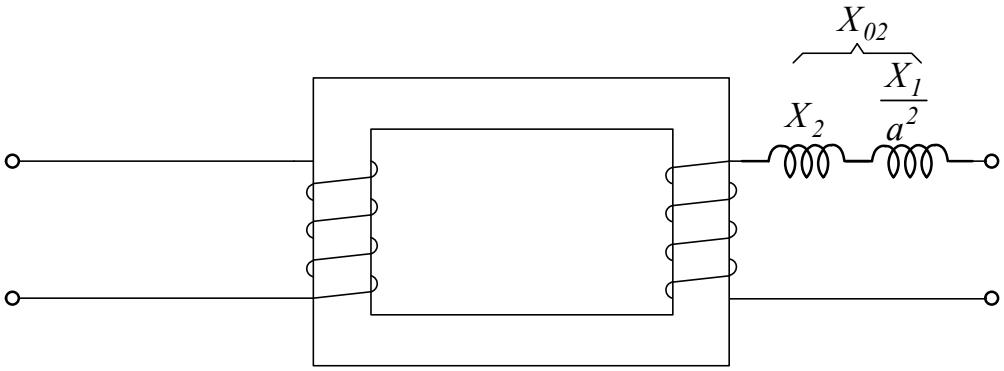
$X_2.a^2$ = เป็นค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์สมมูลย์ของขดลวดทุติยภูมิ

$X_{01}$ = เป็นค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาด้านปฐมภูมิ

ค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์สมมูลย์ของขดปฐมภูมิ , $X_1$' = $\dfrac{X_1}{a^2}$

ค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาด้านทุติยภูมิ , $X_{02}$ คือ

$$X_{02} = X_2 + \frac{X_1}{a^2}$$



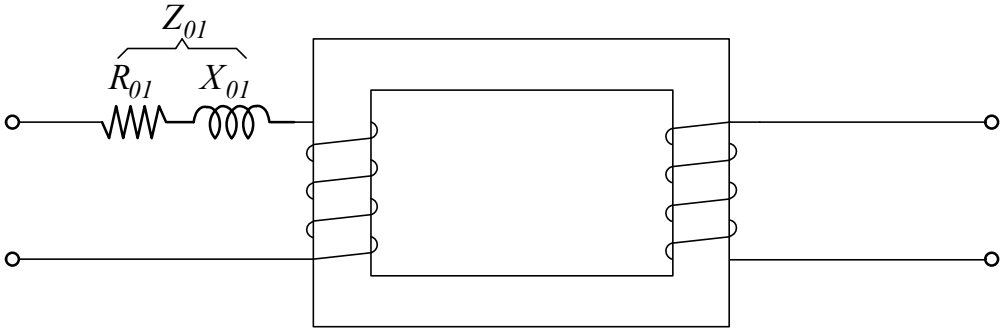

**ข้อสังเกต**

ก. เมื่อย้ายค่า $R_1$ หรือ $X_1$ จากด้านปฐมภูมิไปไว้ยังด้านทุติยภูมิ ต้องหารด้วย $a^2$

ข. เมื่อย้ายค่า $R_1$ หรือ $X_1$ จากด้านทุติยภูมิ ไปไว้ยังด้านปฐมภูมิ ต้องคูณด้วย $a^2$

นอกจากนั้นค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงที่ขดลวดปฐมภูมิ จะมีค่าเป็น $Z_{01}$ ดังรูป เมื่อ

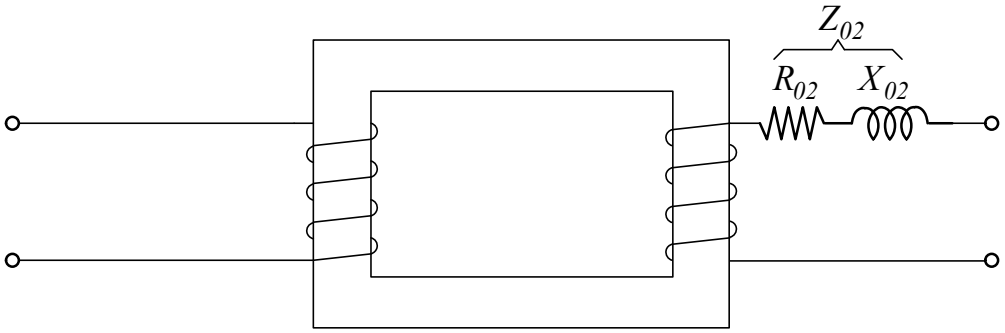
$$\boxed{Z_{01} = \sqrt{{R_{01}}^2 + {X_{01}}^2}}$$




รูป 3.8 ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาจากด้านปฐมภูมิ

ในทำนองเดียวกันค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงที่ขดลวดทุติยภูมิ จะมีค่าเป็น $Z_{02}$ ดังรูป เมื่อ

$$Z_{02} = \sqrt{R_{02}{}^2 + X_{02}{}^2}$$




รูป 3.9 ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาจากด้านทุติยภูมิ

**ตัวอย่างที่ *3.1*** หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด *50 KVA 4400 / 220V.* มีค่า $R_1 = 3.45\ \Omega$ $R_2 = 0.009\ \Omega$ และค่าของรีแอคแตนซ์ คือ $X_1 = 5.2\ \Omega$ และ $X_2 = 0.015\ \Omega$ **จงคำนวณหา**

ก. ความต้านทานสมมูลย์ที่ย้ายไปทางด้านขดลวดปฐมภูมิ

ข. ความต้านทานสมมูลย์ที่ย้ายไปทางด้านทุติยภูมิ

ค. รีแอคแตนซ์สมมูลย์ที่ย้ายไปทั้งทางด้านขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิ

ง. อิมพีแดนซ์สมมูลย์ที่ย้ายไปทั้งทางด้านขดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

จ. กำลังสูญเสียในขดลวดทั้งหมด โดยการใช้ค่าความต้านทานของลวดแต่ละขด และหาค่าโดยการใช้ความต้านทานสมมูลย์ที่ย้ายไปแต่ละด้านของขดลวด

วิธีทำ

กระแสที่ขดปฐมภูมิเมื่อมีโหลดเต็มที่

$$I_1 = \frac{50000}{4400}$$
$$= 11.36 \quad A.$$

กระแสที่ขดทุติยภูมิเมื่อมีโหลดเต็มที่

$$I_2 = \frac{50000}{220}$$
$$= 224.24 \quad A.$$

แต่ $$a = \frac{4400}{220}$$
$$= 20$$

**ก) ความต้านทานสมมูลย์ที่ย้ายไปทางด้านปฐมภูมิ**

$$R_{01} = R_1 + R_2.a^2 \quad \Omega$$
$$= 3.45 + 0.009 \times 20^2$$
$$= 3.45 + 3.6 \quad \Omega$$
$$R_{01} = 7.05 \quad \Omega$$

**ข) ความต้านทานสมมูลย์ที่ย้ายไปทางด้านขดทุติยภูมิ**

$$R_{02} = R_2 + \frac{R_1}{a^2} \quad \Omega$$
$$= 0.009 + \left(\frac{3.45}{20^2}\right)$$
$$= 0.009 + 0.0086 \quad \Omega$$
$$R_{02} = 0.0176 \quad \Omega$$

**ค) รีแอคแตนซ์สมมูลย์ที่ย้ายไปทั้งทางด้านขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิ**

$$X_{01} = X_1 + X_2.a^2 \quad \Omega$$
$$= 5.2 + 0.015 \times 20^2$$
$$X_{01} = 11.2 \quad \Omega$$

$$X_{02} = X_2 + \frac{X_1}{a^2} \quad \Omega$$
$$= 0.015 + \left(\frac{5.2^2}{20}\right)$$
$$X_{02} = 0.028 \quad \Omega$$

**ง) อิมพิแดนซ์สมมูลย์ที่ย้ายไปทั้งทางด้านขดปฐมภูมิ และขดทุติยภุมิ**

$$Z_{01} = \sqrt{(R_{01})^2 + (X_{01})^2}$$
$$= \sqrt{(7.05)^2 + (11.2)^2}$$
$$Z_{01} = 13.23 \quad \Omega$$

$$Z_{02} = \sqrt{(R_{02})^2 + (X_{02})^2}$$

$$= \sqrt{(0.0176)^2 + (0.028)^2}$$

$$Z_{02} = 0.0331 \quad \Omega$$

**จ) หาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดโดยการใช้ค่าความต้านทานของขดลวดแต่ละขด**

กำลังสูญเสียในขดลวด $= (I_1)^2 R_1 + (I_2)^2 R_2$

$= (11.36)^2 (3.45) + (227.27)^2 (0.009)$

$= 910 \quad W.$

หาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดโดยการใช้ค่าความต้านทานสมมูลย์ที่ย้ายไปทางด้านขดลวดทุติยภูมิจากกำลังสูญเสียในขดลวดทั้งหมดของหม้อแปลง

$= (I_2)^2 R_{02} \quad W.$

$= (227.27)^2 (0.0176)$

$= 910 \quad W.$

หาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดโดยการใช้ค่าความต้านทานสมมูลย์ที่ย้ายไปทางด้านขดทุติยภูมิ จากกำลังสูญเสียในขดลวดทั้งหมดของหม้อแปลง

$= (I_1)^2 R_{01} \quad W.$

$= (11.36)^2 (7.05)$

$= 910 \quad W.$

## 3.4 การทดสอบหม้อแปลง *(Transformer test)*

จุดมุ่งหมายของการทดสอบหม้อแปลง คือ

- ต้องการทราบว่าหม้อแปลงมีการสูญเสียในแกนเหล็กเท่าไหร่
- ต้องการทราบว่าหม้อแปลงมีการสูญเสียในขดลวดทองแดงเท่าไหร่

แล้วนำการสูญเสียทั้งสองค่าไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลง

การทดสอบหม้อแปลงมี 2 วิธีคือ

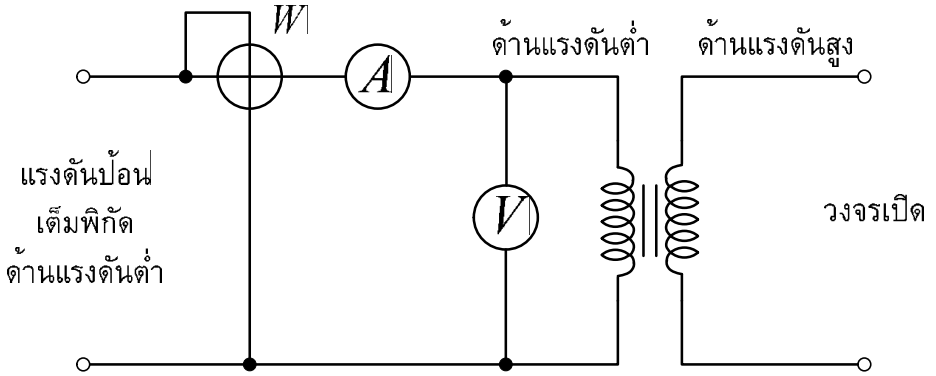
- การทดสอบในสภาวะวงจรเปิด
- การทดสอบในสภาวะลัดวงจร

ซึ่งการทดสอบทั้งสองวิธีดังกล่าวสามารถกระทำได้อย่างประหยัดและสะดวก

### 3.4.1 การทดสอบในสภาวะวงจรเปิด *(Open circuit test) (No-load test)*

การทดสอบในสภาวะวงจรเปิด มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาค่า การสูญเสียในสภาวะไร้โหลด หรือ การสูญเสียในแกนเหล็ก *(Core loss) or (Iron loss)*

การทดสอบดังกล่าวทำได้โดยการเปิดวงจรทางด้านแรงสูงดังรูปที่ 3.10 แล้วต่อวัตต์มิเตอร์ *(W)* โวลท์มิเตอร์ *(V)* และแอมป์มิเตอร์ *(A)* ไว้ทางด้านแรงต่ำ แล้วป้อนแรงดันตามพิกัดที่ความถี่ปกติให้กับขดลวดด้านแรงต่ำ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดจะได้ค่าต่างๆ ดังนี้




รูปที่ 3.10

วัตต์มิเตอร์ = ค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (ค่าสูญเสียเมื่อไร้โหลด) , $P_0$ *(W)*
(มีค่าคงที่ทุกสภาวะโหลด)

โวลท์มิเตอร์ = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน , $V_1$ *(V)*

แอมป์มิเตอร์ = กระแสเมื่อไร้โหลด , $I_0$ *(A)*

ดังนั้นเราสามารถหาค่าต่างๆ จากการทดสอบหม้อแปลงในสภาวะวงจรเปิดได้จากสมการ

$$P_0 = V_1 . I_0 . \cos\theta_0$$

$$\therefore \quad \cos\theta_0 = \frac{P_0}{V_1 . I_0}$$

และสามารถหาค่ากระแส $I_\mu$ และ $I_w$ ได้จากสมการ

$$I_\mu = I_0 \sin\theta_0$$

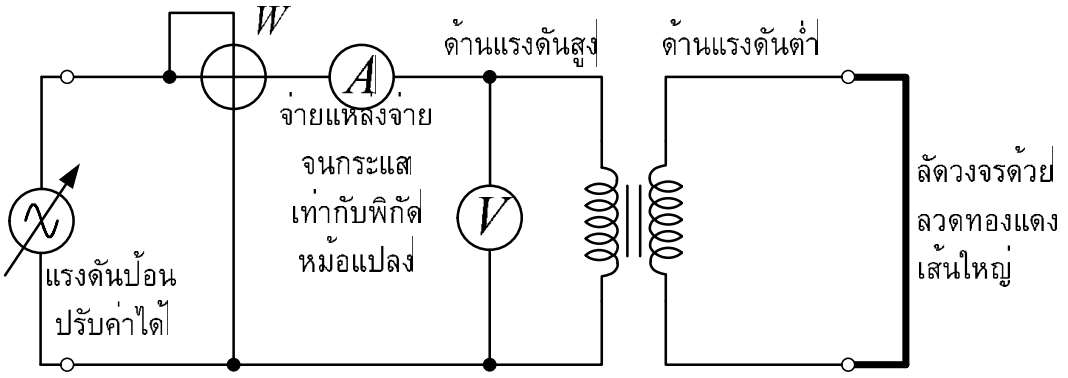
$$I_w = I_0 \cos\theta_0$$

### 3.4.2 การทดสอบในสภาวะลัดวงจร *(Short circuit test)*

ก. การทดสอบในสภาวะลัดวงจร มีจุดมุ่งหมายดังนี้โหลดเต็มพิกัด (หรือที่สภาวะโหลดขนาดเท่าไหร่ก็ได้) ค่าของการสูญเสียนี้จะนำไปใช้คำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ข. เพื่อหาค่าความต้านทานสมมูลย์ *($R_{01}$ หรือ $R_{02}$)* ค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์สมมูลย์ *($X_{01}$ หรือ $X_{02}$)* และค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์ *($Z_{01}$ หรือ $Z_{02}$)* ของหม้อแปลง

ค. เมื่อทราบค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์ *($Z_{01}$ หรือ $Z_{02}$)* ก็สามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงได้ และสามารถนำไปคำนวณหาค่าโวลท์เตจเรกกูเลชั่นของหม้อแปลงได้




รูปที่ 3.11

การทดสอบดังกล่าว ทำได้โดยการลัดวงจรทางด้านขดลวดแรงดันต่ำด้วยลวดทองแดงเส้นใหญ่ (หรืออาจจะใช้แอมป์มิเตอร์เป็นตัวลัดวงจรก็ได้) ดังรูปที่ 3.11 ส่วนขดลวดแรงสูงจะต่อกับวัตต์มิเตอร์ โวลท์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์ในวงจร แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดแรงดันสูง โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจากศูนย์โวลท์จนกระทั่งค่ากระแสที่อ่านได้จากแอมป์มิเตอร์เท่ากับกระแสเต็มพิกัดของด้านแรงดันสูง โดยปกติแรงดันที่จ่ายให้ขดลวดด้านแรงสูงจะมีค่าประมาณ 5-10% ของแรงดันเต็มพิกัดที่ความถี่ปกติ

เนื่องจากการทดสอบดังกล่าวใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันเต็มพิกัด จึงทำให้มิวจวลฟลักซ์ $\varnothing$ ที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กมีค่าต่ำกว่าค่าปกติของมันด้วยดังนั้นค่าของการสูญเสียในแกนเหล็กจึงมีค่าน้อยมาก จึงอาจจะละทิ้งได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์จึงเป็นค่าการสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลงเมื่อโหลดเต็มพิกัด

สมมุติว่าขดลวดด้านแรงต่ำเป็นขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งต้องต่อให้ลัดวงจร ดังนั้นขดลวดด้านแรงสูงจึงเป็นขดลวดปฐมภูมิ ในกรณีเช่นนี้ค่าต่างๆ ที่คำนวณได้ เช่น ค่าความต้านทานสมมูลย์ ค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์ และค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์จึงเป็นค่าที่ได้มาจากการพิจารณาจากด้านขดลวดปฐมภูมิ

จากวงจร ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดคือ

วัตต์มิเตอร์ = ค่าการสูญเสียในขดลวดทองแดง (ค่าสูญเสียเมื่อโหลดเต็มพิกัด) , $P_{SC}$ *(W)*

โวลท์มิเตอร์ = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน , $V_{SC}$ *(V)*

แอมป์มิเตอร์ = กระแสเมื่อไร้โหลด , $I_{SC}$ *(A)*

จาก

$$P_{SC} = {I_{SC}}^2 \times R_{01} \qquad (W)$$

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{{I_{SC}}^2} \qquad (\Omega)$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \qquad (\Omega)$$

$$X_{01} = \sqrt{\left({Z_{01}}^2 - {R_{01}}^2\right)} \qquad (\Omega)$$

**<u>ตัวอย่าง 3.2</u>** หม้อแปลงเดียวขนาดพิกัดแรงดัน *220/440V. , 50Hz* จากการทดสอบได้ข้อมูลดังนี้

สภาวะวงจรเปิด เมื่อเปิดวงจรด้านขดลวดแรงดันสูง วัดและอ่านค่า ด้านขดลวดแรงดันต่ำได้ดังนี้

$P_0 = 70W.$ $V_1 = 220V.$ $I_0 = 0.8A.$

สภาวะลัดวงจร เมื่อลัดวงจรด้านขดลวดแรงดันต่ำ วัดและอ่านค่าด้านแรงสูงได้ดังนี้

$P_{SC} = 80W.$ $V_{SC} = 15V.$ $I_{SC} = 10A.$

จงหาค่าต่อไปนี้ของหม้อแปลง

ก. กระแสสร้างฟลักซ์

ข. กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก

ค. ค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อพิจารณาด้านขดลวดแรงดันสูง

ง. ค่าความต้านทานสมมูลย์ เมื่อพิจารณาด้านขดลวดแรงดันสูง

จ. ค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์ เมื่อพิจารณาด้านขดลวดแรงดันสูง

วิธีทำ จากการทดสอบในสภาวะวงจรเปิด วัดและอ่านค่าด้านแรงดันต่ำ

จากสมการ

$$P_0 = V_1.I_0.\cos\theta_0$$

$$\cos\theta_0 = \frac{P_0}{V_1.I_0}$$

$$= \frac{70}{220\times 0.8}$$

$$= 0.397$$

$$\theta_0 = \cos^{-1} 0.397$$

$$= 66.5^\circ$$

$$\sin\theta_0 = \sin 66.5^\circ$$

$$= 0.917$$

ก. กระแสสร้างฟลักซ์ , $I_\mu$

$$I_\mu = I_0 \sin\theta_0$$

$$= 0.8\times 0.917$$

$$= 0.734A.$$ ตอบ

ข. กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก

$$I_w = I_0 \cos\theta_0$$

$$= 0.8\times 0.397$$

$$= 0.317A.$$ ตอบ

ค. ค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อพิจารณาด้านขดลวดแรงดันสูง

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}}$$

$$= \frac{15}{10}$$

$$= 1.5\Omega$$ ตอบ

ง. ค่าความต้านทานสมมูลย์ เมื่อพิจารณาด้านขดลวดแรงดันสูง

$$R_{02} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^{\ 2}}$$

$$= \frac{80}{10^2}$$

$$= 0.8\Omega$$ ตอบ

จ. ค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์ เมื่อพิจารณาด้านขดลวดแรงดันสูง

$$X_{01} = \sqrt{\left(Z_{01}{}^2 - R_{01}{}^2\right)}$$

$$= \sqrt{\left(1.5^2 - 0.8^2\right)}$$

$$= 1.27\Omega$$

## 3.5 โวลท์เตจเรกกูเลชั่น *(Voltage Regulation)*

ถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะมีค่าคงที่ก็ตาม แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของโหลดซึ่งต่ออยู่ที่ด้านขดลวดทุติยภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดที่นำมาต่อและเพาเวอร์แฟคเตอร์ของโหลด โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าโหลดมีเพาเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลัง แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของโหลดจะตกมากขึ้น การตกของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีสาเหตุเนื่องมาจากค่าความต้านทานและค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์ของขดลวดทั้งสองชุด

ตัวเลขที่จะบ่งบอกอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วด้านขดลวดทุติยภูมิเรียกว่า *"โวลท์เตจเรกกูเลชั่น" (Voltage Regulation)*

ให้

$E_2$ = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิ
= แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วด้านทุติยภูมิเมื่อไร้โหลด

$V_2$ = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วด้านขดลวดทุติยภูมิเมื่อโหลดเต็มพิกัด

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วด้านขดลวดทุติยภูมิจากขณะไร้โหลดถึงมีโหลดเต็มพิกัด คือ $E_2 - V_2$ ถ้าหารด้วย $E_2$ เรียกว่า *"เรกกูเลชั่นดาวน์" (Regulation down)* แต่ถ้าหารด้วย $V_2$ เรียกว่า *"เรกกูเลชั่นอัพ" (Regulation up)*

โดยทั่วไปการหาค่าโวลท์เตจเรกกูเลชั่นของหม้อแปลงมักจะใช้ เรกกูเลชั่นดาวน์ ซึ่งเขียนเป็นสูตรคำนวณได้ดังนี้

$$\%\text{โวลท์เตจเรกกูเลชั่น} = \frac{E_2 - V_2}{E_2} \times 100$$ เรกกูเลชั่นดาวน์

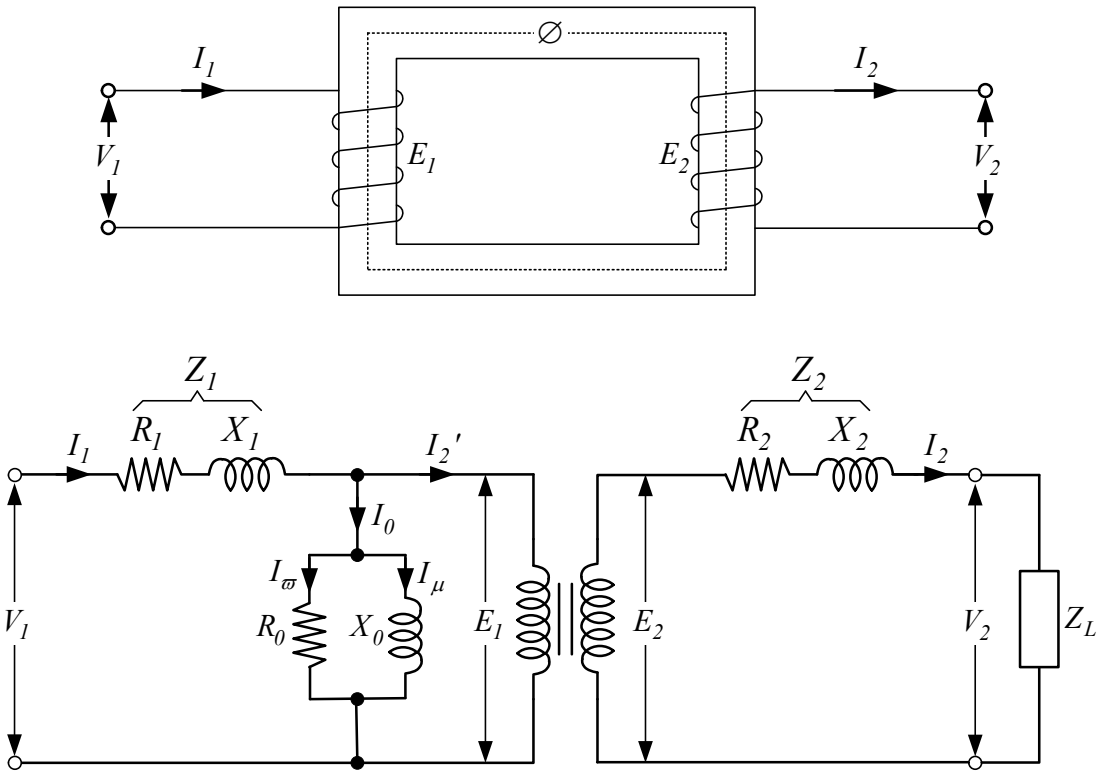
$$\%\text{โวลท์เตจเรกกูเลชั่น} = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \times 100$$ เรกกูเลชั่นอัพ

### 3.6 วงจรสมมูลย์ *(Equivalent circuit)*

จากรูปที่ 3.12 ด้านบนจะเป็นวงจรของหม้อแปลงที่แท้จริง จะสังเกตเห็นว่าขดลวดทั้งสองชุดจะถ่ายทอดพลังงานถึงกันโดยอาศัยวงจรแม่เหล็กเป็นตัวเชื่อมโยงจะไม่มีการเชื่อมโยงถึงกันทางไฟฟ้า (เว้นแต่หม้อแปลงออโต้) การคำนวณจึงต้องคำนวณคราวละหนึ่งวงจร คือคำนวณวงจรขดลวดปฐมภูมิครั้งหนึ่ง และคำนวณวงจรขดลวดทุติยภูมิอีกครั้งหนึ่ง

เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และเข้าใจง่าย จึงต้องหาวิธีแปลงวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เป็นวงจรไฟฟ้า โดยให้ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิเชื่อมโยงถึงกันด้วยวงจรไฟฟ้า โดยการย้ายค่าของแรงดัน กระแส และ ความต้านทานจากขดลวดขดหนึ่งไปไว้ยังขดลวดอีกขดหนึ่ง เพื่อให้เป็นวงจรเดียวกันทำให้การคำนวณเพียงครั้งเดียวก็ได้ค่าต่างๆ ของขดลวดทั้งสองชุด วงจรดังกล่าวเรียกว่า ‘‘วงจรสมมูลย์’’ ซึ่งเป็นวงจรที่ทีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกับวงจรที่แท้จริงของหม้อแปลงทุกประการ นั่นหมายความว่า ขณะที่หม้อแปลงจ่านกระแสด้านขดลวดทุติยภูมิ ณ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วตามพิกัดที่เพาเวอร์แฟคเตอร์ค่าหนึ่ง มันจะกินกระแสทางด้านปฐมภูมิ เมื่อมีแรงดันป้อนและมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เช่นเดียวกับหม้อแปลงที่แท้จริงทุกประการ ทั้งนี้รวมถึงมีกำลังสูญเสียเท่ากันด้วย

วิวัฒนาการของวงจรสมมูลย์เริ่มจากวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงในอุดมคติดังรูป โดยกำหนดให้ค่าความต้านทาน และค่าลีคเกจรีแอคแตนซ์อยู่ภายนอกขดลวด




รูปที่ 3.12

วงจรของหม้อแปลงขณะไร้โหลด เขียนแทนด้วยวงจรซึ่งมีค่าความต้านทาน $R_0$ และ $X_0$ *(pure inductance)* ต่อขนานกัน ต่อคร่อมวงจรขดลวดปฐมภูมิ ดังนั้นกระแสขณะไร้โหลด $I_0$ จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก $(I_w)$ และกระแสที่ใช้สร้างฟลักซ์หรือกระแสแมกเนไตซ์ $(I_\mu)$ โดยให้ $I_\mu$ ไหลผ่าน $X_0$ และ $I_w$ ไหลผ่าน $R_0$ ดังนั้น

$$X_0 = \frac{E_1}{I_\mu}$$

และ
$$R_0 = \frac{E_1}{I_w}$$

และ
$$E_1 = V_1 - I_1 Z_1$$

นอกจากนั้นค่าของ $E_1$ และ $E_2$ ยังมีความสัมพันธ์กันด้วยค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงคือ

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

วงจรไฟฟ้าสองวงจรที่จะนำมาต่อเข้าด้วยกัน โดยให้แต่ละวงจรมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคงเดิมนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วที่จะนำมาต่อเข้าด้วยกัน จะต้องมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณ เราจะย้ายค่าของแรงดัน กระแส และอิมพีแดนซ์จากด้านทุติยภูมิไปไว้ทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งการย้ายค่าต่างๆ นี้จะไม่ทำให้คุณสมบัติของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด

ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิเมื่อย้ายไปด้านปฐมภูมิ

$$E_2' = E_2.a = E_1$$

ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วหรือเอาท์พุทโวลท์เตจ *(output voltage)* เมื่อย้ายไปด้านปฐมภูมิ

$$V_2' = V_2.a$$

ค่าของกระแสด้านทุติยภูมิย้ายไปด้านปฐมภูมิ

$$I_2' = \frac{I_2}{a}$$

ค่าความต้านทานด้านทุติยภูมิเมื่อย้ายไปด้านปฐมภูมิ

$$R_2' = R_2.a^2$$

ค่ารีเกจรีแอคแตนซ์ด้านทุติยภูมิเมื่อย้ายไปด้านปฐมภูมิ

$$X_2' = X_2.a^2$$

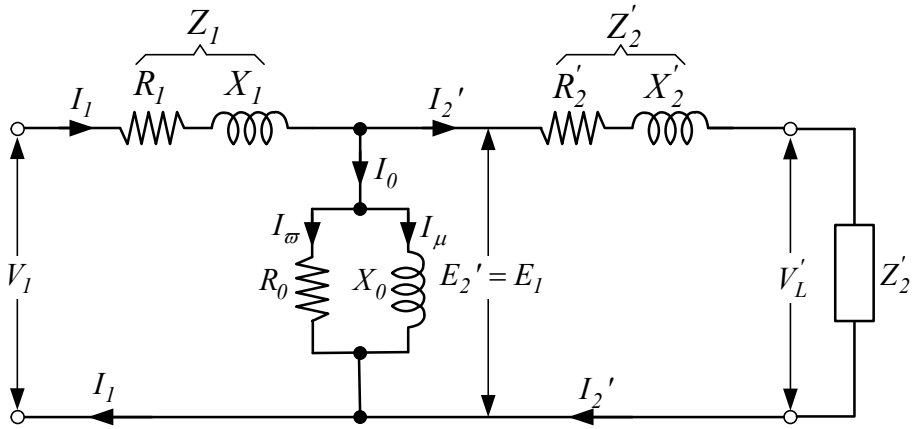
ค่าอิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิเมื่อย้ายไปด้านปฐมภูมิ

$$Z_2' = Z_2.a^2$$

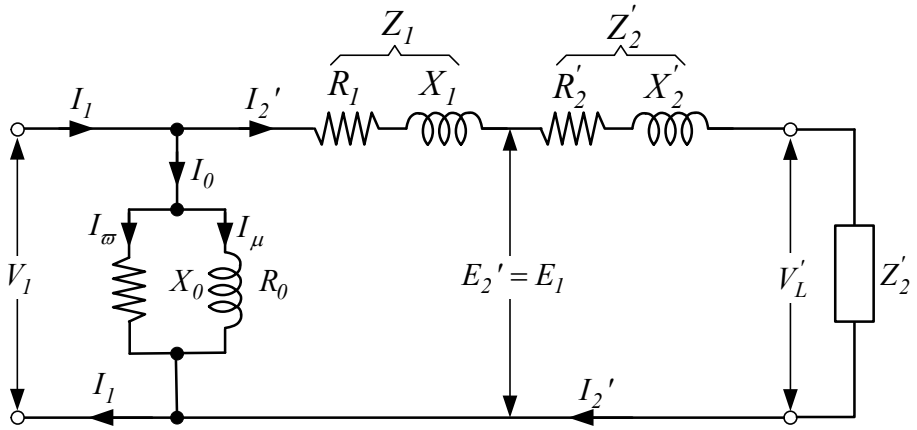
ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดด้านทุติยภูมิเมื่อย้ายไปด้านปฐมภูมิ

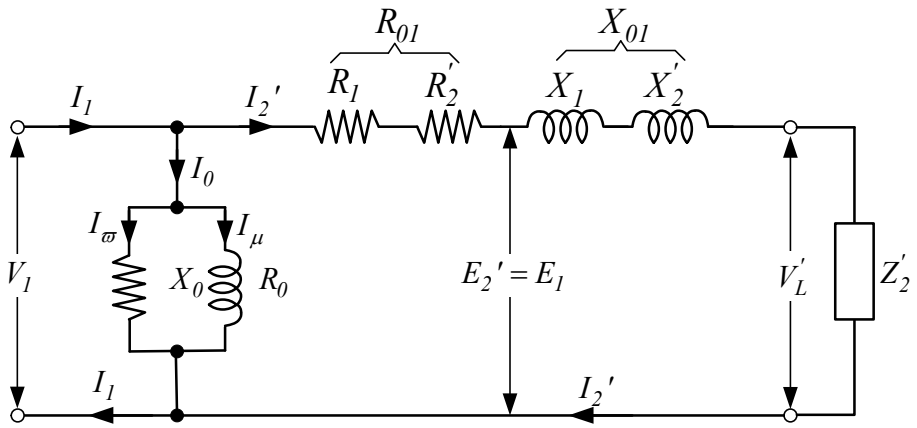
$$Z_L{}' = Z_L.a^2$$

วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงเมื่อย้ายค่าต่างๆ ทางด้านทุติยภูมิไปไว้ด้านปฐมภูมิได้แสดงไว้ในรูป เมื่อรวมอิมพีแดนซ์ด้านปฐมภูมิเข้าไปในวงจรด้วย จะได้วงจรสมมูลย์ที่แท้จริง *(exact equivalent circuit)* ของหม้อแปลง ดังรูป ซึ่งเป็นวงจรที่มีความยุ่งยากในการคำนวณ




ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณ และผลลัพธ์ที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก เราจะย้ายวงจรขนานหรือวงจรกระแสขณะไร้โหลด $(I_0)$ ไปตกคร่อมไว้ที่ต้นทาง เรียกวงจรใหม่นี้ว่า "วงจรสมมูลย์แบบใกล้เคียง" *(approximate equivalent circuit)* ดังแสดงในรูป






จะสังเกตเห็นว่าวงจรสมมูลย์แบบใกล้เคียงในรูป ง่ายกว่าวงจรสมมูลย์แบบเดิมมาก และสามารถหาค่าต่างๆได้ดังนี้

$$V_1 = I_2'\left(R_{01} + jX_{01}\right) + V_2'$$

หรือ

$$V_1 = \frac{I_2}{a}\left(R_{01} + jX_{01}\right) + \left(V_2.a\right)$$

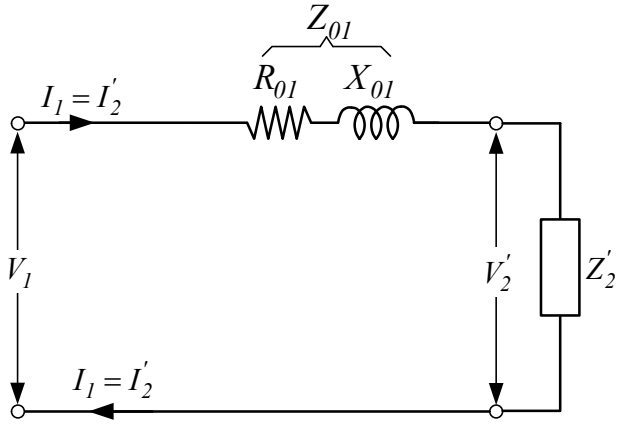
$$R_0 = \frac{V_1}{I_w}$$

และ

$$X_0 = \frac{V_1}{I_\mu}$$

ค่าของ $R_0$ และ $X_0$ สามารถหาได้จากการทดสอบในสภาวะวงจรเปิด *(open circuit test)*

เพื่อให้การคำนวณง่ายมากยิ่งขึ้น โดยที่ผลลัพธ์ไม่ผิดความจริงมากนัก ถ้าไม่คำนึงถึงกระแสขณะไร้โหลด หรือตัดวงจรขนานที่ต้นทางออกจากวงจร จะได้วงจรสมมูลย์อย่างง่าย *(simple equivalent circuit)* ดังรูป



จากวงจรในรูป จะได้

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{01} + Z_L'}$$

และ $$V_1 = I_1\left(R_{01} + jX_{01}\right) + V_2'$$

## 3.7 การสูญเสียในหม้อแปลง *(Losses in a transformer)*

หม้อแปลงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าซึ่งไม่มีส่วนประกอบใดๆ เคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านจากลม *(Friction and windage losses)* ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงมีการสูญเสียเพียงสองส่วนคือ

### 3.7.1 การสูญเสียในแกนเหล็ก *(Iron loss or core loss)*

การสูญเสียในแกนเหล็กประกอบด้วยการสูญเสีย 2 ส่วนคือ

- การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส *(Hysteresis loss)*
- การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน *(Eddy current loss)*

ทั้งนี้เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหรือฟลักซ์ในแกนเหล็กหม้อแปลงที่เรียกว่า มิวจวลฟลักซ์ มีค่าคงที่ตลอดเวลาทุกสภาวะโหลด (อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงบ้างแต่น้อยมากประมาณ 1-3% เท่านั้น) ดังนั้นจึงถือว่าการสูญเสียดังกล่าวมีค่าคงที่ทุกสภาวะโหลด

ก. การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีสซิส *(Hysterresis loss)* เกิดขึ้นเนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตลอดเวลาด้วยอัตราเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นโมเลกุลของเหล็กจึงมีการกลับทิศทางจากขั้วเหนือเป็นขั้วใต้และจากขั้วใต้เป็นขั้วเหนืออยู่ตลอดเวลา การกลับทิศทางจากขั้วเหนือไปเป็นขั้วใต้จะต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อเอาชนะความฝืดของโมเลกุล พลังงานที่ใช้ไปคือพลังงานสูญเสียในรูปของพลังงานความร้อน เรียกการสูญเสียนี้ว่า ฮิสเตอรีซิส

ข. การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน *(Eddy current loss)* การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กส่งผลทำให้เกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็กเนื่องจากแกนเหล็กมีความต้านทานอยู่ด้วย ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสีย $I^2R$ ขึ้นในแกนเหล็กและจะแสดงผลออกมาในรูปของความร้อน จะลดการสูญเสียนี้ลงได้โดยเลือกใช้เหล็กแผ่นบางๆ *(Very thin laminations)*

การสูญเสียในแกนเหล็กนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยใช้เหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนหรือเหล็กประเภท เกรนโอเรียนเตด เราสามารถหาการสูญเสียในแกนเหล็กได้จาก **การทดสอบในสภาวะวงจรเปิด** กำลังอินพุทเมื่อไร้โหลดของหม้อแปลง ซึ่งวัดและอ่านได้จากวัตต์มิเตอร์ คือ การสูญเสียในแกนเหล็ก

### 3.7.2 การสูญเสียในขดลวดทองแดง *(Copper loss)*

การสูญเสียนี้เกิดจากค่าความต้านทานของขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ขณะหม้อแปลงไร้โหลดจะมีกระแสจำนวนเล็กน้อยไหลเฉพาะด้านปฐมภูมิเท่านั้น การสูญเสียที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีโหลดมาต่อกับขดทุติยภูมิและมีกระแสไหลเพิ่มขึ้นในขดลวดปฐมภูมิ ดังนั้นการสูญเสียจึงเกิดขึ้นทั้งในขดลวดทุติยภูมิและปฐมภูมิ และมีค่ามากกว่าขณะไร้โหลดหลายเท่า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลงจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของโหลดและสูญเสียไปในรูปของความร้อน เราสามารถหาการสูญเสียดังกล่าวได้โดยการทดสอบในสภาวะลัดวงจร ดังได้กล่าวมาแล้ว การสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลงหาได้จาก

$$\boxed{I_1^2 R_{01} + I_2^2 R_{02} = I_1^2 R_{01} = I_2^2 R_{02}}$$

ค่าของการสูญเสียในขดลวดทองแดงจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการจ่ายกำลังทางด้านเอาท์พุตของหม้อแปลง $= KVA^2$ ของหม้อแปลง กล่าวคือ หากหม้อแปลงจ่ายโหลดเพียง $\frac{1}{2}$ ของโหลดเต็มพิกัด ค่าการสูญเสียในขดลวดทองแดงจะมีค่าเท่ากับ $\left(\frac{1}{2}\right)^2 = \left(\frac{1}{4}\right)$ ของค่าการสูญเสียในขดลวดทองแดงที่เต็มพิกัด และหากหม้อแปลงจ่ายโหลดเพียง $\frac{1}{3}$ ของโหลดเต็มพิกัด ค่าการสูญเสียในขดลวดทองแดงจะมีค่าเท่ากับ $\left(\frac{1}{3}\right)^2 = \left(\frac{1}{9}\right)$ ของค่าการสูญเสียในขดลวดทองแดงที่เต็มพิกัด

## 3.8 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง *(Efficiency of a transformer)*

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงคืออัตราส่วนระหว่าง กำลังเอาท์พุต *(Power output)* ต่อ กำลังอินพุต *(Power input)* ซึ่งจะต้องมีหน่วยเดียวกัน อาจเป็นวัตต์ หรือ กิโลวัตต์ ก็ได้ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$\boxed{\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}}$$

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า หม้อแปลงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงมาก มีการสูญเสียน้อยมาก ดังนั้นการวัดค่าของกำลังอินพุตและกำลังเอาท์พุตจึงได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากวิธีที่ดีกว่าก็คือ การหาค่าการสูญเสียทั้งหมดในหม้อแปลง แล้วนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพจากมาการดังต่อไปนี้ คือ

$$\boxed{\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + Total\ losses}}$$

หรือ $$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + Cu\,loss + Iron\,loss}$$

**<u>ตัวอย่าง</u>** หม้อแปลงขนาด *5kVA , 2300V/230V , 50Hz* ตัวหนึ่งเมื่อทำการทดสอบหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็กได้ *40W* และค่าการสูญเสียในขดลวดทองแดงเมื่อโหลดเต็มพิกัดได้ *112W* จงคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เป็น 0.8 ล้าหลัง เมื่อเอาท์พุตของหม้อแปลงเป็น *50%* , *75%* และ *100%* ของพิกัด

**วิธีทำ**

โจทย์กำหนด

การสูญเสียในขดลวดทองแดงเมื่อโหลดเต็มพิกัด *(5kVA)* $= 112W$

การสูญเสียในแกนเหล็ก (คงที่ตลอด) $= 40W$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + Cu\,loss + Iron\,loss}$$

ก. เมื่อหม้อแปลงจ่ายกำลังเอาท์พุต 50% ของพิกัด หรือ

$$= \frac{50}{100} \times 5kVA$$
$$= 2.5\ kVA$$

*Cu. Loss* เมื่อโหลดเป็น *50% , 2.5kVA*

$$= 112 \times \left(\frac{1}{2}\right)^2$$
$$= 112 \times \left(\frac{1}{4}\right)$$
$$= 28\ W$$

*Pout* ของหม้อแปลง 50% ของพิกัด หรือ *2.5kVA* ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์ = 0.8

จาก $P = VA.\cos\theta$ ทำหน่วยให้ *VA* เป็น *W* โดยการคูณด้วย $\cos\theta$

$$= 2.5kVA \times 0.8$$
$$= 2\ kW.$$
$$= 2{,}000\ W.$$

จากสมการ $\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + Cu\,loss + Iron\,loss}$

$$= \frac{2000}{2000 + 28 + 40} \times 100$$
$$= 96.7\%$$

ข. เมื่อหม้อแปลงจ่ายกำลังเอาท์พุต 75% ของพิกัด หรือ

$$= \frac{75}{100} \times 5kVA$$
$$= 3.75\ kVA$$

*Cu. Loss* เมื่อโหลดเป็น $75\%$ , $3.75kVA$

$$= 112 \times \left(\frac{3.75}{5}\right)^2 \text{ หรือ } 112 \times \left(\frac{75}{100}\right)^2$$
$$= 112 \times 0.5625$$
$$= 63\ W$$

*Pout* ของหม้อแปลง 75% ของพิกัด หรือ $3.75kVA$ ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์ = 0.8

จาก $P = VA.\cos\theta$ ทำหน่วยให้ $VA$ เป็น $W$ โดยการคูณด้วย $\cos\theta$

$$= 3.75kVA \times 0.8$$
$$= 3\ kW.$$
$$= 3{,}000\ W.$$

จากสมการ $\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + Cu\,loss + Iron\,loss}$

$$= \frac{3000}{3000 + 63 + 40} \times 100$$
$$= 96.7\%$$

ค. เมื่อหม้อแปลงจ่ายกำลังเอาท์พุต $100\%$ ของพิกัด หรือ

$$= \frac{100}{100} \times 5kVA$$
$$= 5\ kVA$$

*Cu. Loss* เมื่อโหลดเป็น $100\%$ , $5kVA$

$$= 112 \times \left(\frac{5}{5}\right)^2 \text{ หรือ } 112 \times \left(\frac{100}{100}\right)^2$$
$$= 112\ W$$

*Pout* ของหม้อแปลง 75% ของพิกัด หรือ $3.75kVA$ ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์ = 0.8

จาก $P = VA.\cos\theta$ ทำหน่วยให้ $VA$ เป็น $W$ โดยการคูณด้วย $\cos\theta$

$$= 5kVA \times 0.8$$
$$= 4\ kW.$$
$$= 4{,}000\ W.$$

จากสมการ $\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + Cu\,loss + Iron\,loss}$

$= \frac{4000}{4000 + 112 + 40} \times 100$

$= 96.3\%$

**<u>ตัวอย่าง</u>** หม้อแปลงหนึ่งเฟสขนาด $25kVA\ ,\ 2{,}200/220V.$ ตัวหนึ่งขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีความต้านทาน $1.0\ \Omega$ และ $0.01\Omega$ ตามลำกัด จงหา

ก. ค่าความต้านทานสมมูลย์ของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาด้านทุติยภูมิ

ข. ประสิทธิภาพของหม้อแปลงเมื่อโหลดเต็มพิกัดที่ค่า $p.f. = 0.8$ ถ้าการสูญเสียในแกนหม้อแปลงเป็น $80\%$ ของการสูญเสียในขดลวดทองแดงเมื่อโหลดเต็มพิกัด

**วิธีทำ** จากโจทย์อัตราส่วนหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ

$a = \frac{V_1}{V_2}$

$= \frac{2200}{220}$

$= 10$

ก. ค่าความต้านทานสมมูลย์ของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาด้านทุติยภูมิ , $R_{02}$

$R_{02} = R_2 + \frac{R_1}{a^2}$

$= 0.01 + \frac{1.0}{10^2}$

$= 0.01 + 0.01$

$= 0.02\ \Omega$

ข. ประสิทธิภาพของหม้อแปลงเมื่อโหลดเต็มพิกัดที่ค่า $p.f. = 0.8$ ถ้าการสูญเสียในแกนหม้อแปลงเป็น $80\%$ ของการสูญเสียในขดลวดทองแดงเมื่อโหลดเต็มพิกัด

จากสมการ $\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + Cu\,loss + Iron\,loss}$

$Iron\ loss$ $= 80\%$ ของการสูญเสียในขดลวดทองแดงเมื่อโหลดเต็มพิกัด

$Iron\ loss = 0.8 \times Cu.\ loss$

หา $Cu.\ Loss$ ที่โหลดเต็มพิกัด

$F.L\ Cu.\ Loss = I_2^{\,2} R_{02}$

กระแสโหลดเต็มพิกัดด้านขดลวดทุติยภูมิ , $I_2$

$$I_2 = \frac{kVA \times 10^3}{V_2}$$
$$= \frac{25 \times 10^3}{220}$$
$$= 113.6\ A.$$

*Cu. Loss* ที่โหลดเต็มพิกัด

$$F.L\ Cu.\ Loss = I_2^2 R_{02}$$
$$= (113.6)^2 \times 0.02$$
$$= 258\ W.$$

การสูญเสียในแกนเหล็ก , *Iron loss*

$$Iron\ loss = 0.8 \times Cu.\ loss$$
$$= 0.8 \times 258$$
$$= 206.4\ W.$$

กำลังเอาท์พุตเมื่อโหลดเต็มพิกัด หรือ

$$F.L.\ Output = kVA \times p.f.$$
$$= 25kVA \times 0.8$$
$$= 20\ kW.$$
$$= 20{,}000\ W.$$

จากสมการ $$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + Cu\ loss + Iron\ loss}$$
$$= \frac{20{,}000}{20{,}000 + 258 + 206.4} \times 100$$
$$= \frac{20{,}000}{20{,}464.4} \times 100$$
$$= 97.73\%$$

**<u>ตัวอย่าง</u>** หม้อแปลงหนึ่งเฟสขนาด *500kVA , 6,600/400V.* ตัวหนึ่งขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีความต้านทาน *0.42 Ω* และ *0.0011Ω* ตามลำดับ ถ้าหม้อแปลงมีการสูญเสียในแกนเหล็ก *2.9kW.* จงคำนวณหาประสิทธิภาพ เมื่อโหลดมีเพาเวอร์แฟคเตอร์เป็น *0.8*

ก. เมื่อโหลดเต็มพิกัด *(Full load)*

ข. เมื่อโหลดเป็นครึ่งหนึ่งของโหลด *(Half load)*

**วิธีทำ**

จากสมการ $\eta = \dfrac{P_{out}}{P_{out} + Cu\,loss + Iron\,loss}$

หาค่าการสูญเสียในขดลวด *(Cu. Losses)* จาก

$$Cu.\ Losses = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

หาค่ากระแส $I_1$ , $I_2$

$$I_1 = \frac{kVA \times 10^3}{V_1} = \frac{500 \times 10^3}{6600} = 75.8\ A.$$

$$I_2 = \frac{kVA \times 10^3}{V_2} = \frac{500 \times 10^3}{400} = 1{,}250\ A.$$

หาค่าการสูญเสียในขดลวด *(Cu. Losses)* จาก

$$F.L.\ Cu.\ Losses = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = \left(75.8^2 \times 0.42\right) + \left(1250^2 \times 0.0011\right) = 4{,}132\ W.$$

โจทย์กำหนด $Iron\ loss = 2.9\ kW. = 2{,}900\ W.$

ก. ประสิทธิภาพเมื่อโหลดเต็มพิกัด *(Full load)*

กำลังเอาท์พุตของหม้อแปลงเมื่อโหลดเต็มพิกัด

$$= \quad 500kVA \times 0.8$$
$$= \quad 400kW.$$
$$= \quad 400,000W.$$

จากสมการ $\eta = \dfrac{P_{out}}{P_{out} + Cu\,loss + Iron\,loss}$

$$= \frac{400,000}{400,000 + 4,132 + 2,900} \times 100$$
$$= 98.27\%$$

ข. ประสิทธิภาพเมื่อโหลดเป็นครึ่งหนึ่งของพิกัด *(Half load)*

หาค่าการสูญเสียในขดลวด *(Cu. Losses)*

$$= \quad 4,132 \times \left(\frac{50}{100}\right)^2$$
$$= \quad 1,033\ W.$$

การสูญเสียในแกนเหล็กคงที่ทุกสภาวะโหลด

$$= \quad 2,900W.$$

กำลังเอาท์พุตของหม้อแปลงเมื่อโหลดเป็นครึ่งหนึ่งพิกัด, $250kVA$

$$= \quad 250kVA \times 0.8$$
$$= \quad 200kW.$$
$$= \quad 200,000W.$$

จากสมการ $\eta = \dfrac{P_{out}}{P_{out} + Cu\,loss + Iron\,loss}$

$$= \frac{200,000}{200,000 + 1,033 + 2,900} \times 100$$
$$= 98.07\%$$

## 3.9 ประสิทธิภาพตลอกวัน *(All-day efficiency)*

โดยปกติหม้อแปลงที่ใช้จ่ายไฟให้กับระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และระบบไฟฟ้ากำลังทั่วๆไป เช่น หม้อแปลงของระบบจำหน่าย *(Distribution transformer)* ขดลวดปฐมภูมิของมันจะได้รับพลังงานไฟฟ้าตลอดวัน หรือตลอด 24 ชั่วโมง แต่ขดลวดทุติยภูมิอาจจะจ่ายโหลดเพียงเล็กน้อยหรือไม่ได้จ่ายโหลดเลยในเวลากลางวัน แต่จะจ่ายโหลดมากในช่วงเวลากลางคืน

ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงมีการสูญเสียในแกนเหล็กเกิดขึ้นตลอดทั้งวัน แต่การสูญเสียในขดลวดทองแดงจะเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเท่านั้น และการสูญเสียในขดลวดทองแดงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องคำนวณหาประสิทธิภาพตลอดวันของหม้อแปลงโดยคำนวณจากพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในแต่ละช่วงเวลาตลอด 24 ชั่วโมง

ประสิทธิภาพตลอดวัน ใช้สัญลักษณ์ $\eta_{all-day}$

$$\eta_{all-day} = \frac{Output[kWh]}{Input[kWh]}$$

**<u>ตัวอย่าง</u>** หม้อแปลงขนาด *5kVA* ตัวหนึ่งเมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดมีการสูญเสียในแกนเหล็ก *35 W.* และการสูญเสียในขดลวดทองแดง *40 W.* จงคำนวณหาประสิทธิภาพตลอดวัน เมื่อโหลดของหม้อแปลงใน *24* ชั่วโมง เป็นดังนี้

- ทำงานโดยไร้โหลดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- ทำงานจ่ายโหลด *50%* ของพิกัดที่ค่า *p.f.=0.5* ล้าหลัง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- ทำงานจ่ายโหลดเต็มพิกัดที่ค่า *p.f.=0.8* ล้าหลัง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

**วิธีทำ** โจทย์กำหนด *Cu. Loss* เมื่อโหลดเต็มพิกัด = *40W.*

เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

$$Cu.\ Loss = 40\times6 = 240\ Wh.$$

*Cu. Loss* เมื่อโหลดเป็น *50%* ของพิกัด

$$= 40\times\left(\frac{50}{100}\right)^2 = 10\ W.$$

เมื่อจ่ายโหลดเป็น *50%* ของพิกัด เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

$$Cu.\ Loss = 10\times12 = 120\ Wh.$$

โจทย์กำหนด *Iron. Loss* (คงที่ทุกสภาวะโหลด) = *35W.*

การสูญเสียในแกนเหล็กในเวลา 24 ชั่วโมง $= 35 \times 24$

$= 840\ Wh.$

$\therefore$ การสูญเสียทั้งหมด *(Total losses)* ในเวลา 24 ชั่วโมง

$= 240+120+840$

$= 1,200\ Wh.$

$= 1.2\ kWh.$

กำลังเอาท์พุตของหม้อแปลงในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

$= (5kVA \times 0.8 \times 6 \text{ ชั่วโมง}) + (2.5kVA \times 0.5 \times 12 \text{ ชั่วโมง})$

$= (4kVA \times 6 \text{ ชั่วโมง}) + (1.25kVA \times 12 \text{ ชั่วโมง})$

$= 24\ kWh + 15\ kWh$

$= 39\ kWh.$

$$\eta_{all-day} = \frac{Output[kWh]}{Input[kWh]}$$

$$= \frac{39kWh}{39kWh+1.2kWh} \times 100$$

$$= 97\%$$