



# หน่วยที่

# 5

## วงจรสมมูลของ

## หม้อแปลงไฟฟ้า



# หัวข้อเรื่อง



## 5.1

# ความหมายวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

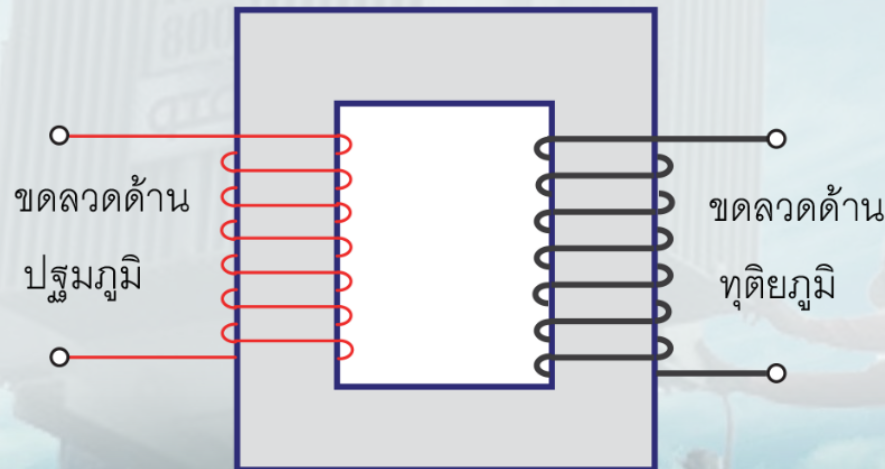
**วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า** หมายถึง การแทนค่าต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบของวงจรไฟฟ้า เช่น ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่พันรอบแกนเหล็กทั้ง 2 ด้าน สามารถแทนด้วยค่าความต้านทานและค่ารีแอ็กแตนซ์ ทั้งนี้เพื่อให้การวิเคราะห์เกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้ามีความสะดวกและรวดเร็ว



## 5.2

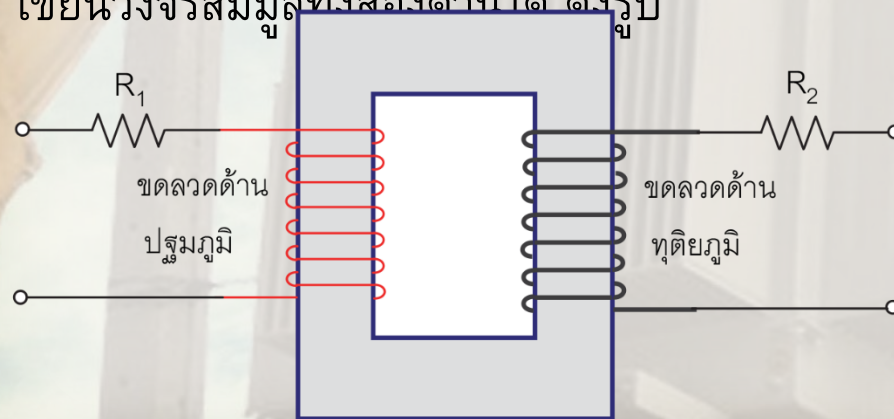
# ความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าและวิธีการย้ายค่า

**5.2.1 ค่าความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า** จากรูปขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กของขดลวดทั้งสองด้านย่อมมีค่าความต้านทาน โดยค่าความต้านทาน ( $R = \rho \frac{l}{A}$ ) จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความยาวของขดลวด ( $l$ ) หรือจำนวนรอบที่พันและพื้นที่หน้าตัดของขดลวด ( $A$ )



ดังนั้นขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ จึงมีค่าความต้านทานอยู่ใน  
ขดลวด

ถ้าให้  $R_1$  = ความต้านทานของขดลวดด้านปฐมภูมิ  
และ  $R_2$  = ความต้านทานของขดลวดด้านทุติยภูมิ  
เขียนวงจรสมมูลทั้งสองด้านได้ ดังรูป



### 5.2.2 วิธีย้ายค่าความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

1. การย้ายค่าความต้านทานของขดลวดจากทุติยภูมิมาไว้ทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งเป็นการย้ายค่า  $R_2$  มาไว้ทางด้านปฐมภูมิ โดย  $R_1$  ทางด้านปฐมภูมิให้คงที่ไว้ เรียกค่าความต้านทานที่ย้ายไปว่า **ความต้านทานที่ย้ายจากขดทุติยภูมิไปขดปฐมภูมิ** กำหนดให้เป็น  $R_2'$  ซึ่งหาค่าได้จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า นั่นคือการสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมดมีค่า

$$\begin{aligned} &= \text{การสูญเสียในขดลวดทองแดงที่ขดปฐมภูมิ} + \text{การสูญเสียในขดลวดทองแดงที่ขดทุติยภูมิ} \\ &= (I_1)^2 R_1 + (I_2)^2 R_2 \end{aligned}$$

แต่เมื่อย้ายไปทางขดปฐมภูมิจะได้เป็น

$$\text{การสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมด} = (I_1)^2 R_1 + (I_1)^2 R_2'$$

แต่

$$(I_1)^2 R_2' = (I_2)^2 R_2 = \text{การสูญเสียในขดลวดทองแดงที่ขดทุติยภูมิ}$$

$$R_2' = \frac{(I_2)^2}{(I_1)^2} \times R_2$$

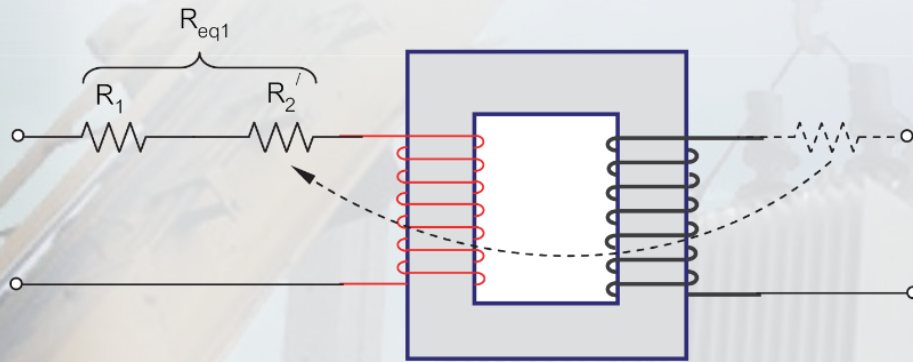
$$= a^2 R_2$$

$$R_2' = a^2 R_2$$

..... (5.1)



นั่นหมายความว่า ถ้าต้องการย้ายค่าความต้านทานจากทุติยภูมิมาไว้ทางปฐมภูมิต้องคูณด้วย  
ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้ายกกำลังสอง ซึ่งวงจรสมมูลที่ย้ายไปแสดงดังรูปที่ 5.3



จากวงจรรูปที่ 5.3 จะเห็นว่า  $R_1$  ต่ออนุกรมกับ  $R_2'$  เมื่อนำมารวมกันจะเป็นความต้านทานค่าใหม่  
เรียกว่า ค่าความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิ กำหนดให้  
เป็น  $R_{eq1}$  หาค่าได้ดังนี้

$$R_{eq1} = R_1 + R_2'$$

$$R_{eq1} = R_1 + a^2 R_2$$

2. การย้ายค่าความต้านทานของขดลวดจากปฐมภูมิมาไว้ทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งเป็นการย้ายค่า  $R_1$  มาไว้ทางด้านทุติยภูมิ โดย  $R_2$  ทางด้านทุติยภูมิคงที่ไว้ ซึ่งเรียกค่าความต้านทานที่ย้ายไปว่า **ความต้านทานที่ย้ายจากขดปฐมภูมิไปขดทุติยภูมิ** กำหนดให้เป็น  $R_2$  ซึ่งหาค่าได้จากความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้า นั่นคือ การสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมดมีค่า

$$\text{การสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมด} = (I_1)^2 R_1' + (I_2)^2 R_2$$

แต่

$$(I_2)^2 R_1' = (I_1)^2 R_1 = \text{การสูญเสียในขดลวดทองแดงที่ขดปฐมภูมิ}$$

$$(I_2)^2 R_1' = (I_1)^2 R_1$$

$$R_1' = \frac{(I_1)^2}{(I_2)^2} \times R_1$$

$$= \frac{1}{a^2} \times R_1$$

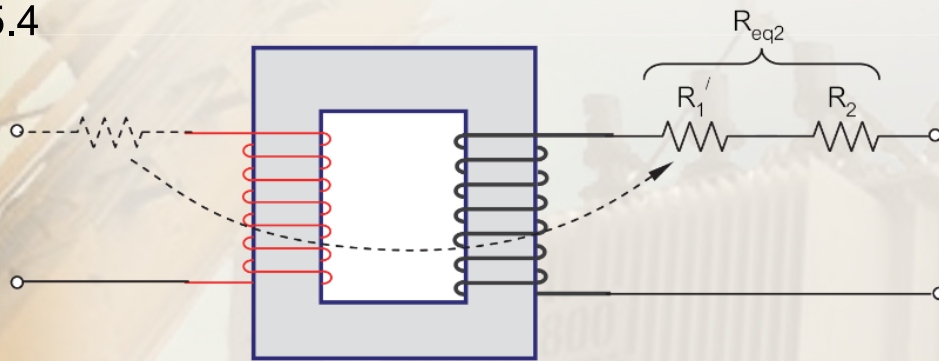
$$R_1' = \frac{R_1}{a^2}$$

..... (5.3)



หมายความว่า ถ้าต้องการย้ายค่าความต้านทานจากปฐมภูมิมาไว้ทางทุติยภูมิต้องการ  
ด้วยค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้ายกกำลังสอง ซึ่งวงจรสมมูลที่ย้ายไปแสดงดังรูปที่

5.4



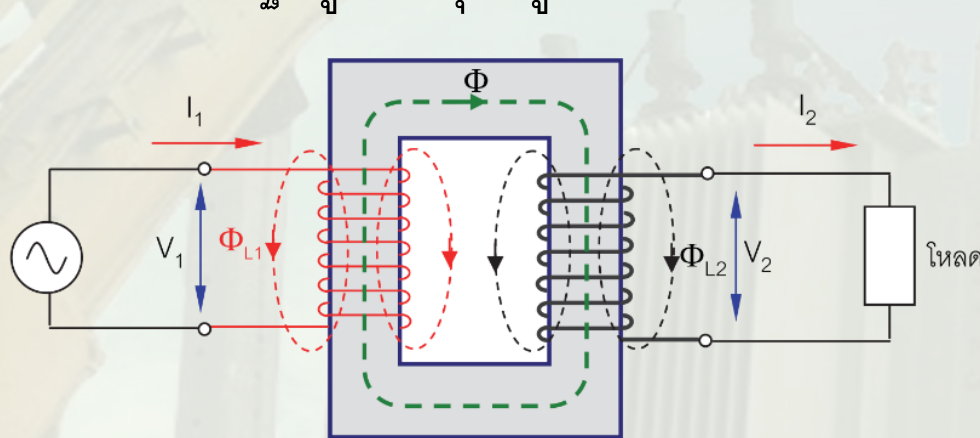
จากวงจรรูปที่ 5.4 จะเห็นว่า  $R_2$  ต่ออนุกรมกับ  $R_1'$  เมื่อนำมารวมกันจะเป็นความต้านทาน  
ค่าใหม่ เรียกว่า **ค่าความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิ**  
กำหนดให้เป็น  $R_{eq2}$  หาค่าได้ดังนี้

$$R_{eq2} = R_2 + R_1'$$

$$R_{eq2} = R_2 + \frac{R_1}{a^2}$$

## 5.3 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลและรีแอ็กแตนซ์

เส้นแรงแม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้นรอบแกนเหล็กเกิดจากกระแสไฟฟ้าในส่วนที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กและไปคล้องตัดกับขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ แล้วเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_1$  และ  $E_2$  ตามลำดับ

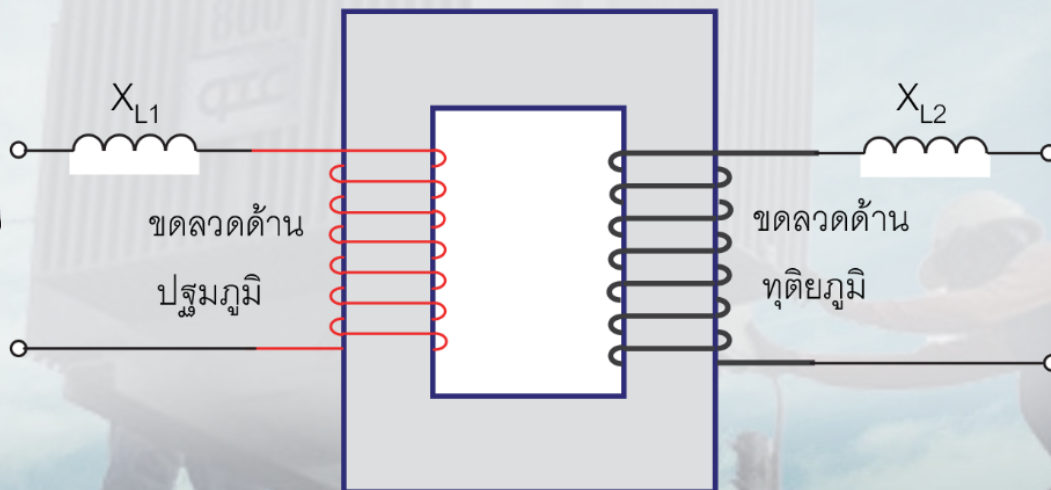


เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลดทำให้เกิดมีกระแส  $I_2$  โหลที่ขดลวดทุติยภูมิและกระแส  $I_2$  ที่ขดลวดปฐมภูมิแล้วสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาทั้งสองด้านโดยมีอากาศเป็นทางเดิน เรียกเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่า **เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล** กำหนดให้เป็น  $\Phi_{L1}$  และ  $\Phi_{L2}$  ตามลำดับ และเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามไฟฟ้ากระแสสลับไปคล้องตัดกับขดลวดแต่ละขด

## 5.4 รีแอกแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าและวิธีการย้าย

### ค่า

5.4.1 ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า จากการมีค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลของขดลวดทั้งสองขดจึงกำหนดให้เป็น  $X_{L1}$  และ  $X_{L2}$  ซึ่งเขียนวงจรสมมูลของขดลวดได้ดังรูป



### 5.4.2 วิธีการย้ายค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

1. การย้ายค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดจากทางด้านทุติยภูมิมาไว้ทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งเป็นการย้ายค่า  $X_{L2}$  มาไว้ทางด้านปฐมภูมิ โดยค่า  $X_{L1}$  ทางด้านปฐมภูมิให้คงที่ไว้ ซึ่งเรียกค่ารีแอกแตนซ์ที่ย้ายไปว่า **รีแอกแตนซ์ที่ย้ายจากขดทุติยภูมิไปขดปฐมภูมิ** กำหนดให้เป็น  $X_{L2}'$  ซึ่งหาค่าได้จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า นั่นคือกำลังไฟฟ้ารี้แอกตีฟในขดลวดทองแดงทั้งหมดมีค่า

$$= \text{กำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟที่ขดลวดปฐมภูมิ} + \text{กำลังไฟฟ้ารี้แอกตีฟที่ขดลวดทุติยภูมิ}$$

= แต่เมื่อย้ายไปทางขดปฐมภูมิจะได้เป็น

$$\text{กำลังไฟฟ้ารี้แอกตีฟในขดลวดทองแดงทั้งหมด} = (I_1)^2 X_{L1} + (I_1)^2 X_{L2}'$$

$$\text{แต่} \quad (I_1)^2 X_{L2}' = (I_2)^2 X_{L2} = \text{กำลังไฟฟ้ารี้แอกตีฟที่ขดลวดทุติยภูมิ}$$

$$X_{L2}' = \frac{(I_2)^2}{(I_1)^2} \times X_{L2}$$

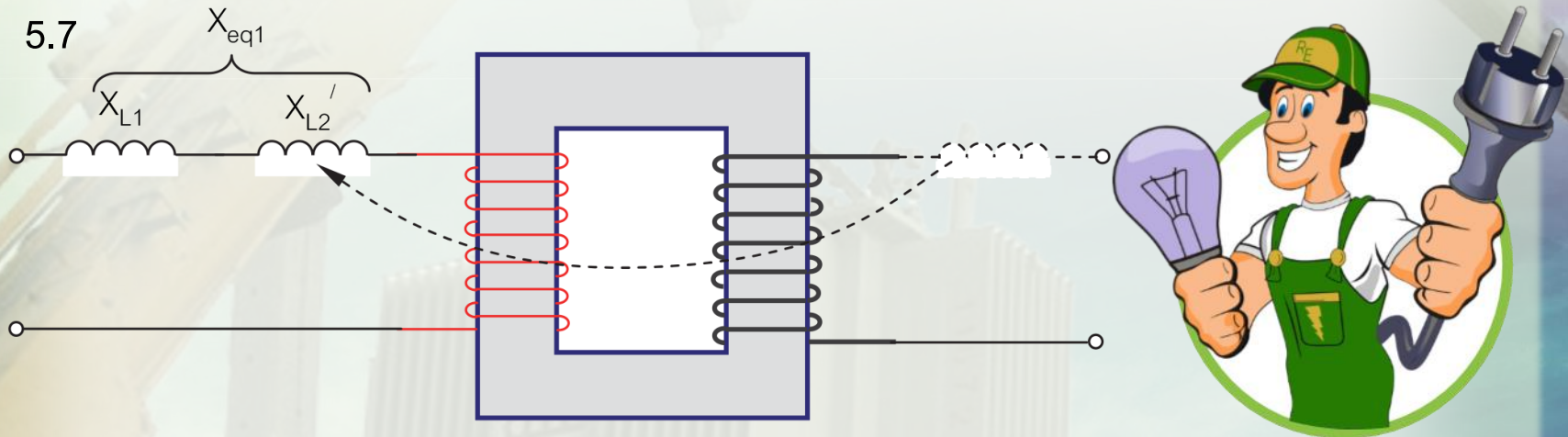
$$= a^2 X_{L2}$$

$$X_{L2}' = a^2 X_{L2}$$

.... (5.5)



นั่นหมายความว่า ถ้าต้องการย้ายค่ารีแอกแตนซ์จากทุติยภูมิมาไว้ทางปฐมภูมิต้องคูณด้วยค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้ายกกำลังสอง ซึ่งวงจรสมมูลที่ย้ายไปแสดงดังรูปที่



จากวงจรรูปที่ 5.7 จะเห็นว่า  $X_{L1}$  ต่ออนุกรมกับ  $X_{L2}'$  เมื่อนำมารวมกันจะเป็นรีแอกแตนซ์ค่าใหม่เรียกว่า **ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิ** กำหนดให้เป็น  $X_{eq1}$  หาค่าได้ดังนี้

$$X_{eq1} = X_{L1} + X_{L2}'$$

$$X_{eq1} = X_{L1} + a^2 X_{L2} \quad \dots (5.6)$$

2. การย้ายค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดจากปฐมภูมิมาไว้ทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งเป็นการย้ายค่า  $X_{L1}$  มาไว้ทางด้านทุติยภูมิ โดยค่า  $X_{L2}$  ทางด้านทุติยภูมิให้คงที่ไว้ เรียกค่ารีแอกแตนซ์ที่ ย้ายไปว่า **รีแอก-แตนซ์ที่ย้ายจากขดปฐมภูมิไปขดทุติยภูมิ** กำหนดให้เป็น  $X_{L1}'$  ซึ่งหาค่า ได้จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้านั้นคือ กำลังไฟฟ้ารี้แอกตีฟในขดลวดทองแดงทั้งหมดมี ค่า

$$= \text{กำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟที่ขดลวดปฐมภูมิ} + \text{กำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟที่ขดลวดทุติยภูมิ}$$

= แต่เมื่อย้ายไปทางขดทุติยภูมิจะได้เป็น

$$\text{กำลังไฟฟ้ารี้แอกตีฟในขดลวดทองแดงทั้งหมด} = (I_1)^2 X_{L1}' + (I_2)^2 X_{L2}$$

$$\text{แต่} \quad (I_2)^2 X_{L1}' = (I_1)^2 X_{L1} = \text{กำลังไฟฟ้ารี้แอกตีฟที่ขดลวดปฐมภูมิ}$$

$$(I_2)^2 X_{L1}' = (I_1)^2 X_{L1}$$

$$X_{L1}' = \frac{(I_1)^2}{(I_2)^2} \times X_{L1}$$

$$= \frac{1}{a^2} \times X_{L1}$$

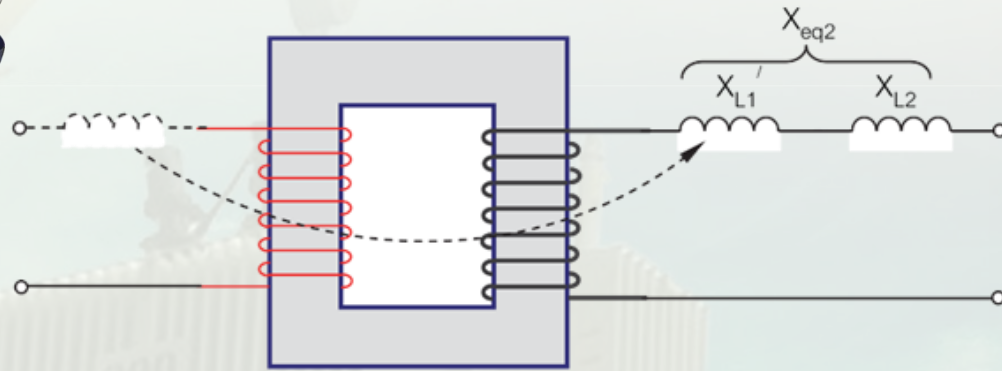
$$X_{L1}' = \frac{X_{L1}}{a^2}$$

.... (5.7)



นั่นหมายความว่า ถ้าต้องการย้ายค่ารีแอกแตนซ์จากปฐมภูมิมาไว้ทางทุติยภูมิต้องหารด้วยค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้ายกกำลังสอง ซึ่งวงจรสมมูลที่ย้ายไปแสดงดังรูปที่

5.8



จากวงจรรูปที่ 5.8 จะเห็นว่า  $X_{L2}$  ต่ออนุกรมกับ  $X_{L1}'$  เมื่อนำมารวมกันจะเป็นรีแอกแตนซ์ค่าใหม่เรียกว่า ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิ กำหนดให้เป็น  $X_{eq2}$  หาค่าได้ดังนี้

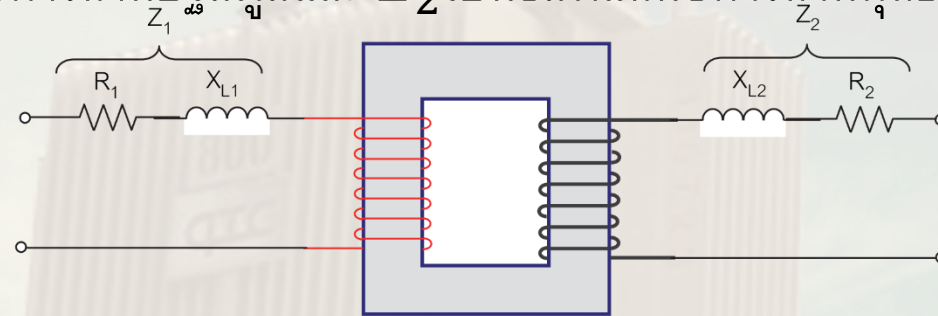
$$X_{eq2} = X_{L2} + X_{L1}'$$

$$X_{eq2} = X_{L2} + \frac{X_{L1}}{a^2}$$

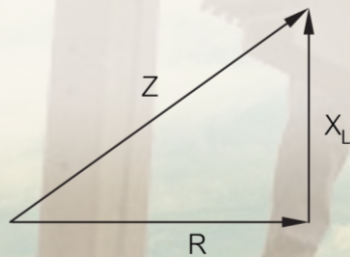
.... (5.8)

## 5.5 อิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าและวิธีการย้ายค่า

ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิจะมีค่าความต้านทานและค่ารีแอ็กแตนซ์ โดยค่าทั้งสองของแต่ละขดลวดจะเทียบเท่าว่าต่ออนุกรมกัน และผลรวมของทั้งสองค่าเรียกว่า **อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า** (Impedance of transformers) โดยให้  $Z_1$  เป็นอิมพีแดนซ์ทางด้านปฐมภูมิและ  $Z_2$  เป็นอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ ดังรูปที่ 5.9



ซึ่งความสัมพันธ์ของความต้านทาน รีแอ็กแตนซ์ อิมพีแดนซ์ จะเขียนเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก เรียกว่า**สามเหลี่ยมอิมพีแดนซ์** ดังรูปที่ 5.10



$$Z^2 = R^2 + X_L^2$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

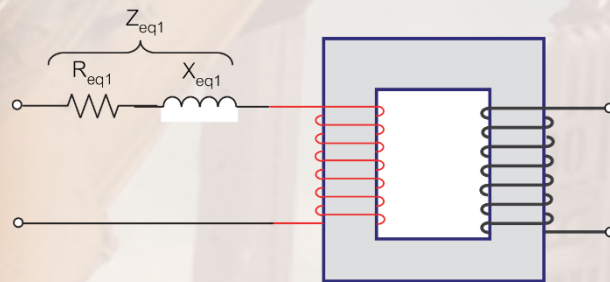
ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองด้าน คำนวณได้ดังนี้

ทางด้านปฐมภูมิ  $Z_1 = \sqrt{(R_1)^2 + (X_{L1})^2} \dots (5.9)$

ทางด้านทุติยภูมิ  $Z_2 = \sqrt{(R_2)^2 + (X_{L2})^2} \dots (5.10)$

### วิธีการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

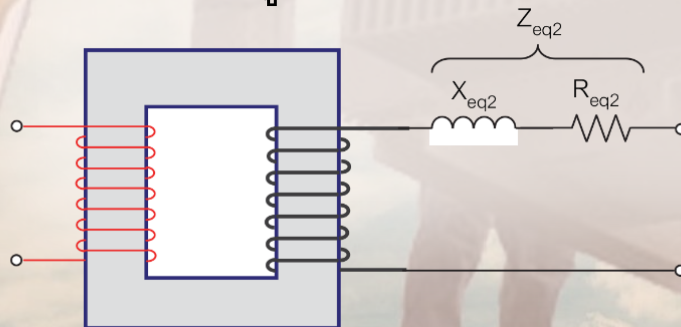
1. อิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิ ดังรูปที่ 5.11



$$Z_{eq1} = \sqrt{(R_{eq1})^2 + (X_{eq1})^2}$$



2. อิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิ ดังรูปที่ 5.12



$$Z_{eq2} = \sqrt{(R_{eq2})^2 + (X_{eq2})^2} \dots (5.12)$$

## 5.6

## การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของวงจรสมมูล

**ตัวอย่างที่ 5.1** หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 50 kVA ขนาดแรงดันไฟฟ้า 2400/240 V มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

ค่าความต้านทานที่ขดลวดแรงดัน 2400 V =  $0.75 \Omega$

ค่าความต้านทานที่ขดลวดแรงดัน 240 V =  $0.0075 \Omega$

ค่ารีแอ็กแตนซ์ที่ขดลวดแรงดัน 2400 V =  $1 \Omega$

ค่ารีแอ็กแตนซ์ที่ขดลวดแรงดัน 240 V =  $0.01 \Omega$

จงคำนวณหา

ก. ค่าความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิ

ข. ค่าความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิ

ค. ค่ารีแอ็กแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิ

ง. ค่ารีแอ็กแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิ

จ. ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ



วิธีทำ โจทย์กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$V_1 = 2400 \text{ V} \quad \text{และ} \quad V_2 = 240 \text{ V}$$

$$R_1 = 0.75 \, \Omega \quad \text{และ} \quad R_2 = 0.0075 \, \Omega$$

$$X_{L1} = 1 \, \Omega \quad \text{และ} \quad X_{L2} = 0.01 \, \Omega$$

ดังนั้น

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2400}{240} = 10$$

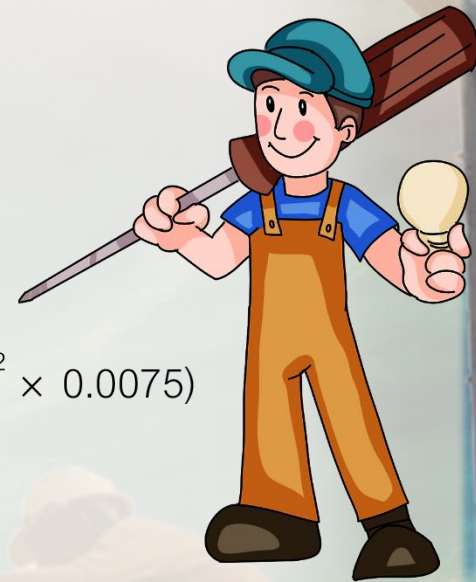
ก. ค่าความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} R_{eq1} &= R_1 + a^2 R_2 = 0.75 + (10^2 \times 0.0075) \\ &= 0.75 + 0.75 \end{aligned}$$

$$R_{eq1} = 1.5$$

ความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ  $1.5 \, \Omega$

ตอบ



ข. ค่าความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิ

$$R_{eq2} = R_2 + \frac{R_1}{a^2} = 0.0075 + \frac{0.75}{10^2}$$
$$= 0.0075 + 0.0075$$

$$R_{eq2} = 0.015$$

ความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ  $0.015 \Omega$  **ตอบ**

ค. ค่ารีแอ็กแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิ

$$X_{eq1} = X_{L1} + a^2 X_{L2} = 1 + (10^2 \times 0.01)$$
$$= 1 + 1$$

$$X_{eq1} = 2$$

รีแอ็กแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ  $2 \Omega$  **ตอบ**

ง. ค่ารีแอ็กแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิ

$$X_{eq2} = X_{L1} + \frac{X_{L1}}{a^2} = 0.01 + \frac{1}{10^2}$$
$$= 0.01 + 0.01$$

$$X_{eq2} = 0.02$$

รีแอ็กแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ  $0.02 \Omega$  **ตอบ**



จ. ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

$$\begin{aligned}Z_{eq1} &= \sqrt{(R_{eq1})^2 + (X_{eq1})^2} \\&= \sqrt{(1.5)^2 + (2)^2} \\&= \sqrt{6.25}\end{aligned}$$

$$Z_{eq1} = 2.5$$

อิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ  $2.5 \Omega$

ตอบ

$$\begin{aligned}Z_{eq2} &= \sqrt{(R_{eq2})^2 + (X_{eq2})^2} \\&= \sqrt{(0.015)^2 + (0.02)^2} \\&= \sqrt{6.25 \times 10^{-4}}\end{aligned}$$

$$Z_{eq2} = 0.025$$

อิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ  $0.025 \Omega$

ตอบ

