หน่วยที่ 9

วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

หัวข้อเรื่อง (Topics)

9.1 ความหมายวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

9.2 ค่าต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริง

9.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

9.4 วงจรสมมูลค่าจริงของหม้อแปลงไฟฟ้าและการโอนย้าย

9.5 วงจรสมมูลค่าโดยประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้า

สมรรถนะย่อย (Element of Competency)

1. แสดงความรู้เกี่ยวกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ปฏิบัติการหาค่าต่าง ๆ เกี่ยวกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม (Behavioral Objectives)

1. บอกความหมายวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าได้
2. อธิบายค่าต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริงได้
3. อธิบายวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าได้
4. อธิบายวงจรสมมูลค่าจริงของหม้อแปลงไฟฟ้าและการโอนย้ายได้
5. อธิบายวงจรสมมูลค่าโดยประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าได้

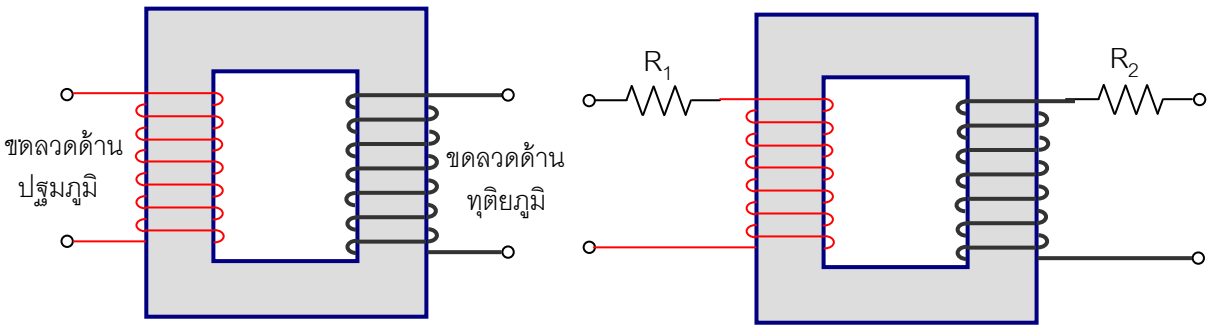
9.1 ความหมายวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า หมายถึง การแทนค่าต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบของวงจรไฟฟ้า เช่น ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่พันรอบแกนเหล็กทั้ง 2 ด้าน ก็สามารถแทนด้วยค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึม (Leakage reactance) ทั้งนี้เพื่อให้การวิเคราะห์เกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้ามีความสะดวกและรวดเร็ว

9.2 ค่าต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริง

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในงานจริงนั้นต้องคำนึงถึงการสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า ผลของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วซึม (Leakage flux) ที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิและที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งมีค่าต่าง ๆ ที่ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

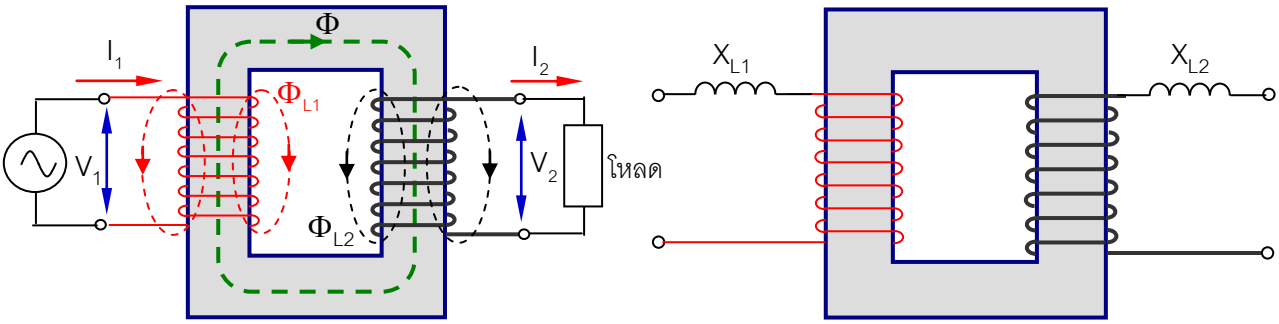
9.2.1 **ความต้านทานของขดลวด** ขดลวดทางด้านปฐมภูมิและที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิพันจากขดลวดทองแดงดังรูปที่ 9.1 (ก) ดังนั้นถือว่าขดลวดทั้งสองด้านมีค่าความต้านทาน โดยกำหนดให้ R_1 เป็นค่าความต้านทานของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และ R_2 เป็นค่าความต้านทานของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ดังรูปที่ 9.1 (ข) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดทั้งสองทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper loss)



(ก) ขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (ข) ขดลวดเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานทั้ง 2 ด้าน

รูปที่ 9.1 หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

9.2.2 **เส้นแรงแม่เหล็กรั่วซึมและค่ารีแอกแตนซ์** เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลดทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ซึ่งผลของกระแสไฟฟ้านี้ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่ได้กล่าวมาแล้วในหน่วยที่ 8 นอกจากนี้ยังทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วซึมขึ้นอีกด้วย



(ก) การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วซึม (ข) ขดลวดเมื่อพิจารณาค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึมทั้ง 2 ด้าน

รูปที่ 9.2 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

จากรูปที่ 9.2 (ก) เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลดทำให้เกิดมีกระแส I_2 ไหลที่ขดลวดทุติยภูมิและกระแส I_1 ที่ขดลวดปฐมภูมิ ผลของกระแสทั้งสองจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมารอบขดลวดทั้งสองด้านโดยมีอากาศเป็นทางเดิน เรียกเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่า **เส้นแรงแม่เหล็กรั่วซึม** กำหนดให้เป็น Φ_{L1} และ Φ_{L2} ตามลำดับและเส้นแรงแม่เหล็กรั่วซึมทั้งสองนี้ทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำรั่วซึม (Leakage inductance) ในขดลวดทั้งสองขึ้นและมีหน่วยเป็นเฮนรี (H) โดยมีค่าดังนี้

ในขดลวดปฐมภูมิ $$L_1 = \frac{N_1\Phi_{L1}}{I_1} \quad \text{..... (9.1)}$$

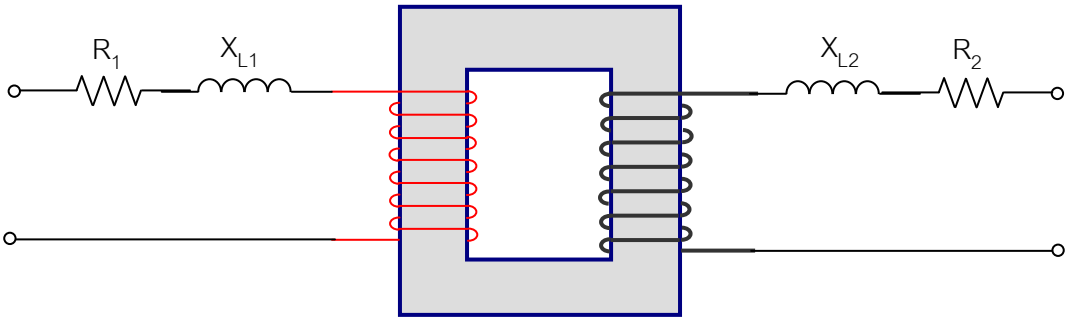
ในขดลวดทุติยภูมิ $$L_2 = \frac{N_2\Phi_{L2}}{I_2} \quad \text{..... (9.2)}$$

ผลจากการเกิด L_1 และ L_2 ที่ขดลวดทั้งสองด้านจึงทำให้เกิดค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึม กำหนดให้เป็น X_L ของขดลวดทั้งสองอันเนื่องจากความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ และมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ดังนั้นถือว่าขดลวดทั้งสองด้านมีค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึม โดยกำหนดให้ X_{L1} เป็นค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึมของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และ X_{L2} เป็นค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึมของขดลวดทางด้านทุติยภูมิดังรูปที่ 9.2 (ข) ซึ่งมีค่าดังนี้

ในขดลวดปฐมภูมิ $$X_{L1} = 2\pi fL_1 \quad \text{..... (9.3)}$$

ในขดลวดปฐมภูมิ $$X_{L2} = 2\pi fL_2 \quad \text{..... (9.4)}$$

เนื่องจากขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทางด้านทุติยภูมิมีค่าความต้านทาน และยังทำให้เกิดค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึม ดังนั้นจึงเทียบเท่าว่าขดลวดในแต่ละด้านของหม้อแปลงไฟฟ้าจะแทนด้วยค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึม ดังรูปที่ 9.3



รูปที่ 9.3 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ขดลวดทั้ง 2 ด้านมีค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึม

เมื่อ R_1 = ความต้านทานของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (Ω)

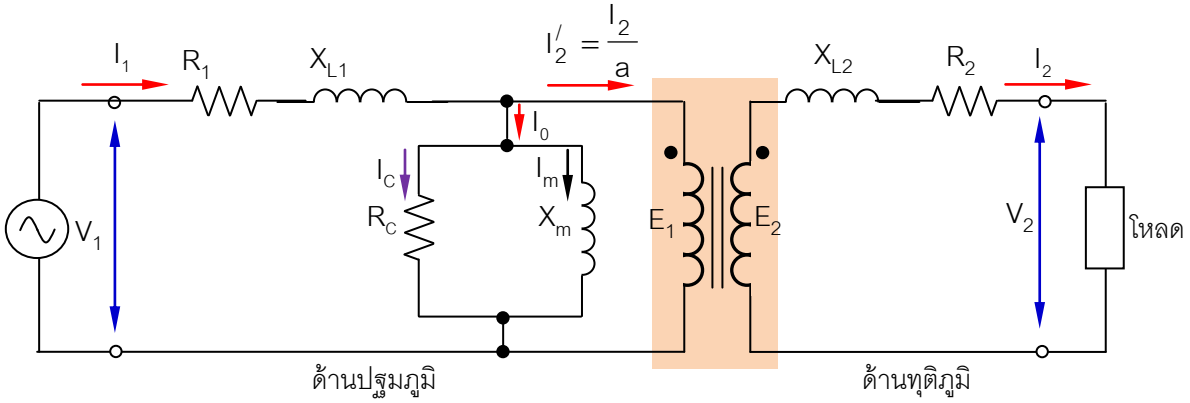
R_2 = ความต้านทานของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (Ω)

X_{L1} = รีแอกแตนซ์รั่วซึมของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (Ω)

X_{L2} = รีแอกแตนซ์รั่วซึมของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (Ω)

9.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากที่กล่าวมาแล้วเห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วยค่าความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก ค่ารีแอกแตนซ์ทำแม่เหล็ก ค่าความต้านทานของขดลวดและค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึมของขดลวดทั้งสองด้าน ดังนั้นสามารถนำค่าเหล่านี้มาเขียนเป็นวงจรสมมูลทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 9.4



รูปที่ 9.4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

จากวงจรสมมูลรูปที่ 9.4 ได้ว่าสมการของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ดังนี้

$$E_1 = aE_2$$

$$I_0 = I_c + I_m$$

$$I_1 = I_0 + I_2'$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิ

$$E_2 = V_2 + I_2 (R_2 + jX_{L2}) \quad \text{..... (9.5)}$$

และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้

$$V_1 = E_1 + I_1 (R_1 + jX_{L1}) \quad \text{..... (9.6)}$$

ตัวอย่างที่ 9.1 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 72 kVA ขนาดแรงดัน 2400/240 V มีค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

ค่าความต้านทานที่ขดลวดแรงดัน 2400 V $R_1 = 1\ \Omega$

ค่าความต้านทานที่ขดลวดแรงดัน 240 V $R_2 = 0.01\ \Omega$

ค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึมที่ขดลวดแรงดัน 2400 V $X_{L1} = 1.5\ \Omega$

ค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึมที่ขดลวดแรงดัน 240 V $X_{L2} = 0.015\ \Omega$

ค่าความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก $R_C = 4000\ \Omega$

ค่ารีแอกแตนซ์ทำแม่เหล็ก $X_m = 1280\ \Omega$

ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดทางด้านทุติยภูมิเต็มพิกัดที่แรงดัน 240 V ที่ค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง จงคำนวณหา

ก. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

ข. กระแสไฟฟ้าเมื่อไม่มีโหลด

ค. กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ

ง. แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ

วิธีทำ โจทย์กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

พิกัด = 72 kVA อัตราส่วนแรงดัน = 2400/240 V pf_2 = 0.8 ล้าหลัง V_2 = 240 V

$R_1 = 1\ \Omega$ $X_{L1} = 1.5\ \Omega$ $R_C = 4000\ \Omega$

$R_2 = 0.01\ \Omega$ $X_{L2} = 0.015\ \Omega$ $X_m = 1280\ \Omega$

หาค่าต่าง ๆ ก่อนได้ดังนี้

$$a = \text{อัตราส่วนแรงดัน} = \frac{2400}{240} = 10$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}(pf_2) = \cos^{-1}(0.8) = 36.87^\circ$$

$$I_2 = \frac{kVA}{V_2} = \frac{72 \times 10^3}{240} = 300\ A$$

กำหนดให้แรงดัน V_2 เป็นจุดอ้างอิงในการคำนวณ ดังนั้น $V_2 = 240\angle 0^\circ$

ก. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิและปฐมภูมิ

$$E_2 = V_2 + I_2(R_2 + jX_{L2})$$
$$= 240\angle 0^\circ + 300\angle -36.87^\circ \times (0.01 + j0.015)$$
$$= 240\angle 0^\circ + (300\angle -36.87^\circ \times 0.018\angle 56.31^\circ)$$
$$= 240\angle 0^\circ + 5.4\angle 19.44^\circ$$
$$= (240 + j0) + (5.092 + j1.797)$$
$$= (245.092 + j1.797)$$
$$E_2 = 245.098\angle 0.42^\circ$$
$$E_1 = aE_2 = 10 \times 245.098\angle 0.42^\circ$$
$$E_1 = 2450.98\angle 0.42^\circ$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ 245.092 V **ตอบ**

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 2450.92 V **ตอบ**

ข. กระแสไฟฟ้าเมื่อไม่มีโหลด

$$I_C = \frac{E_1}{R_C} = \frac{2450.98\angle 0.42^\circ}{4000\angle 0^\circ}$$
$$I_C = 0.612\angle 0.42^\circ \text{ A} \cong 0.612\angle 0^\circ \text{ A}$$
$$I_m = \frac{E_1}{jX_m} = \frac{2450.98\angle 0.42^\circ}{1280\angle 90^\circ}$$
$$I_m = 1.914\angle -89.52^\circ \text{ A} \cong 1.914\angle -90^\circ \text{ A}$$

ดังนั้น
$$I_0 = I_C + I_m$$
$$= 0.612\angle 0^\circ + 1.914\angle -90^\circ$$
$$I_0 = 2\angle -72.26^\circ \text{ A}$$

กระแสไฟฟ้าเมื่อไม่มีโหลดมีค่าเท่ากับ 2 A **ตอบ**

ค. กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ

$$I_2' = \frac{I_2}{a} = \frac{300\angle -36.87^\circ}{10} = 30\angle -36.87^\circ$$

ดังนั้น
$$I_1 = I_0 + I_2'$$
$$= I_0\angle -\theta_0 + I_2'\angle -\theta_2$$
$$= 2\angle -72.26^\circ + 30\angle -36.87^\circ$$
$$= 31.65\angle -38.96^\circ$$

กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 31.65 A **ตอบ**

ง. แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ

$$
\begin{aligned}
V_1 &= E_1 + I_1 (R_1 + jX_{L1}) \\
&= 2450.98\angle 0.42^\circ + 31.65\angle -38.96^\circ \times (1 + j1.5) \\
&= 2450.98\angle 0.42^\circ + (31.65\angle -38.96^\circ \times 1.8\angle 56.31^\circ) \\
&= 2450.98\angle 0.42^\circ + 57.03\angle 17.35^\circ \\
V_1 &= 2505.59\angle 0.8^\circ \text{ V}
\end{aligned}
$$

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 2505.59 V **ตอบ**

9.4 วงจรสมมูลค่าจริงของหม้อแปลงไฟฟ้าและการโอนย้าย

จากวงจรสมมูลรูปที่ 9.4 สามารถทำการโอนย้ายวงจรสมมูลค่าจริงจากทางด้านปฐมภูมิไปยังด้านทุติยภูมิ หรือทางด้านทุติยภูมิมายังด้านปฐมภูมิได้โดยอาศัยคุณสมบัติการถ่ายโอนอิมพีแดนซ์ที่ได้กล่าวมาแล้วในหน่วยที่ 8 หัวข้อที่ 8.2.3 นอกจากนี้ยังทำให้การวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ของตัวอย่างที่ 9.1 มีความสะดวกและรวดเร็วมากขึ้น ซึ่งการโอนย้ายวงจรสมมูลทำได้ดังนี้

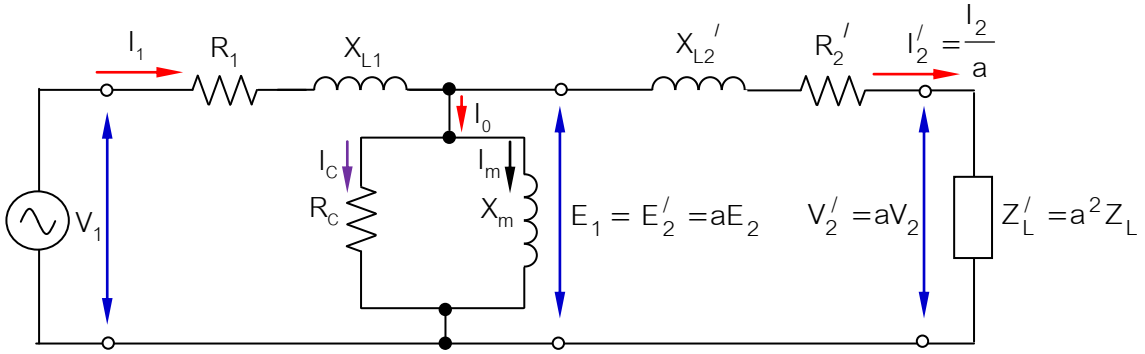
9.4.1 การโอนย้ายวงจรสมมูลจากทางด้านทุติยภูมิมาไว้ทางด้านปฐมภูมิ เป็นการค่าต่าง ๆ ซึ่งได้แก่แรงดัน V_2, E_2 กระแส I_2 ความต้านทาน R_2, X_{L2} และ Z_L มาไว้ทางด้านปฐมภูมิ โดยค่าต่าง ๆ ที่โอนย้ายไปมีค่าดังนี้

$$
E_1 = E_2' = aE_2 \qquad V_2' = aV_2
$$

$$
I_2' = \frac{I_2}{a} \qquad R_2' = a^2 R_2
$$

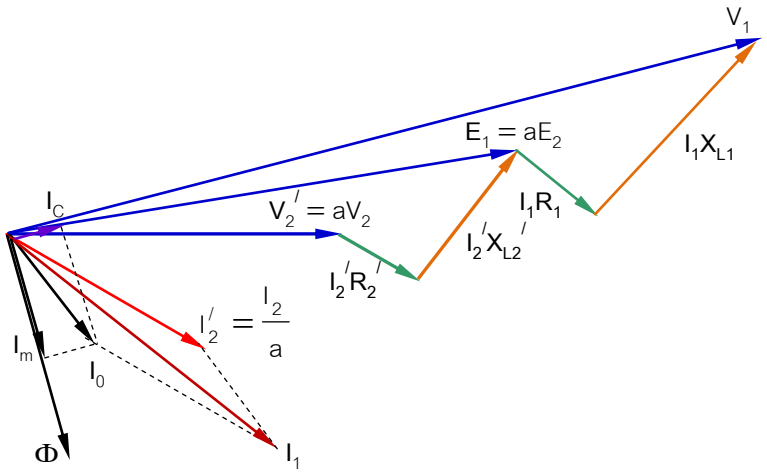
$$
X_{L2}' = a^2 X_{L2} \quad \text{และ} \quad Z_L' = a^2 Z_L
$$

จากค่าต่าง ๆ ที่โอนย้ายค่ามานำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลดังรูปที่ 9.5



รูปที่ 9.5 วงจรสมมูลจริงของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อโอนย้ายค่าต่าง ๆ อยู่ทางด้านปฐมภูมิ

จากวงจรสมมูลจริงรูปที่ 9.5 นำมาเขียนเป็นแผนภาพเฟสเซอร์ได้ดังรูปที่ 9.6 โดยให้เฟสเซอร์ของแรงดัน V_2' เป็นแกนอ้างอิง มีเฟสเซอร์ของกระแส I_2' ล้าหลัง V_2' เป็นมุม θ_2' เฟสเซอร์ $I_2'R_2$ ร่วมเฟสกับ I_2' และเฟสเซอร์ $I_2'X_{L2}$ นำหน้า $I_2'R_2$ เป็นมุม 90° ผลรวมของเฟสเซอร์ V_2', $I_2'R_2$ และ $I_2'X_{L2}$ ได้เฟสเซอร์ E_1 โดยมีเฟสเซอร์ I_1R_1 ร่วมเฟสกับ I_1 และเฟสเซอร์ I_1X_{L1} นำหน้า I_1R_1 เป็นมุม 90° ผลรวมของเฟสเซอร์ E_1, I_1R_1 และ I_1X_{L1} จะได้เฟสเซอร์ V_1 จะเห็นได้อีกว่าเฟสเซอร์ของกระแส I_C ร่วมเฟสกับเฟสเซอร์ E_1 เฟสเซอร์ของกระแส I_m ร่วมเฟสกับเฟสเซอร์ Φ



รูปที่ 9.6 แผนภาพเฟสเซอร์เมื่อโอนย้ายค่าต่าง ๆ อยู่ทางด้านปฐมภูมิ

จากแผนภาพเฟสเซอร์รูปที่ 9.6 ได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$E_1 = V_2' + I_2'R_2' + I_2'X_{L2}') \qquad \text{..... (9.7)}$$

และ $$V_1 = E_1 + I_1R_1 + I_1X_{L1}) \qquad \text{..... (9.8)}$$

9.4.2 การโอนย้ายวงจรสมมูลจากทางด้านปฐมภูมิไปไว้ทางด้านทุติยภูมิ เป็นการนำค่าต่าง ๆ ซึ่งได้แก่แรงดัน V_1, E_1 กระแส I_1 ความต้านทาน R_1, X_{L1} และ R_C, X_m ไปไว้ทางด้านทุติยภูมิ โดยค่าต่าง ๆ ที่โอนย้ายไปมีค่าดังนี้

$$V_1' = \frac{V_1}{a} \qquad E_1' = \frac{E_1}{a}$$

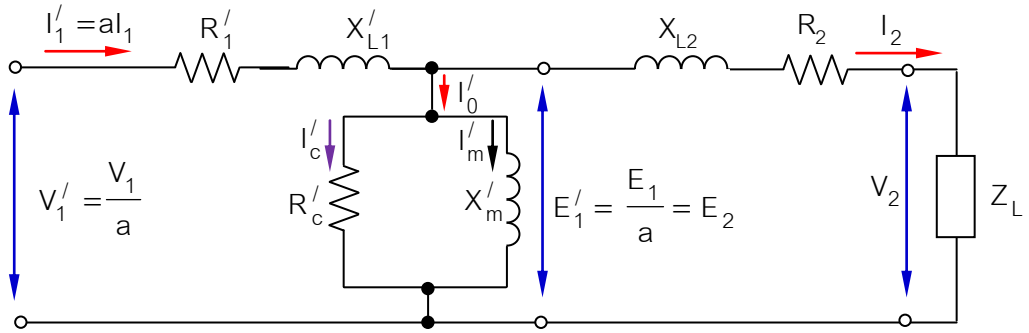
$$I_0' = aI_0 \qquad I_1' = aI_1$$

$$I_C' = aI_C \qquad I_m' = aI_m$$

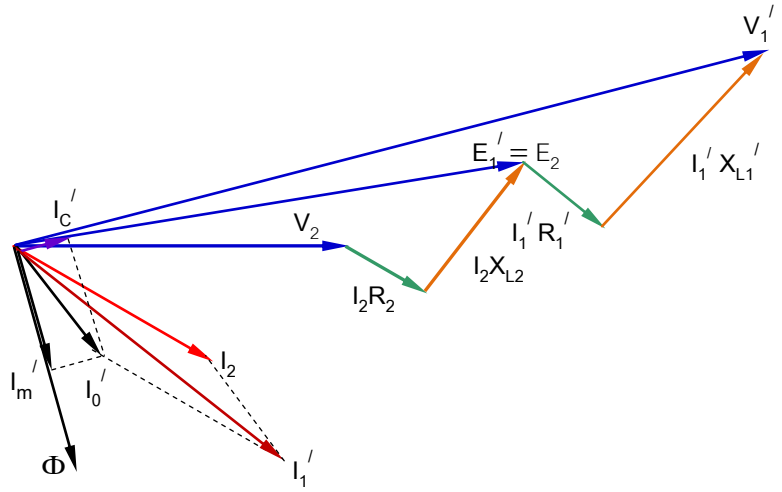
$$R_1' = \frac{R_1}{a^2} \qquad X_{L1}' = \frac{X_{L1}}{a^2}$$

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

จากค่าต่าง ๆ ที่โอนย้ายค่ามานำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลดังรูปที่ 9.7 และเขียนแผนภาพเฟสเซอร์ดังรูปที่ 9.8



รูปที่ 9.7 วงจรสมมูลจริงของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อโอนย้ายค่าต่าง ๆ อยู่ทางด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 9.8 แผนภาพเฟสเซอร์เมื่อโอนย้ายค่าต่าง ๆ อยู่ทางด้านทุติยภูมิ

จากวงจรรูปที่ 9.7 และแผนภาพเฟสเซอร์รูปที่ 9.8 ได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

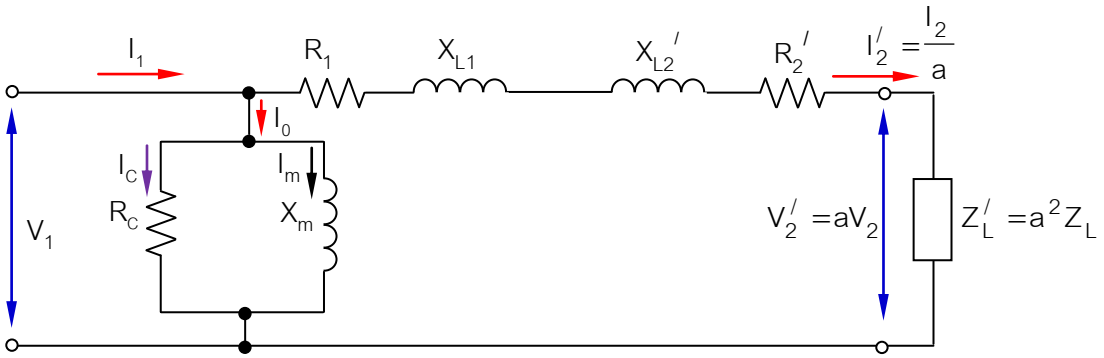
$$E_1' = V_2 + I_2R_2 + I_2X_{L2}) \qquad \text{..... (9.9)}$$

และ

$$V_1' = E_1' + I_1'R_1' + I_1'X_{L1}') \qquad \text{..... (9.10)}$$

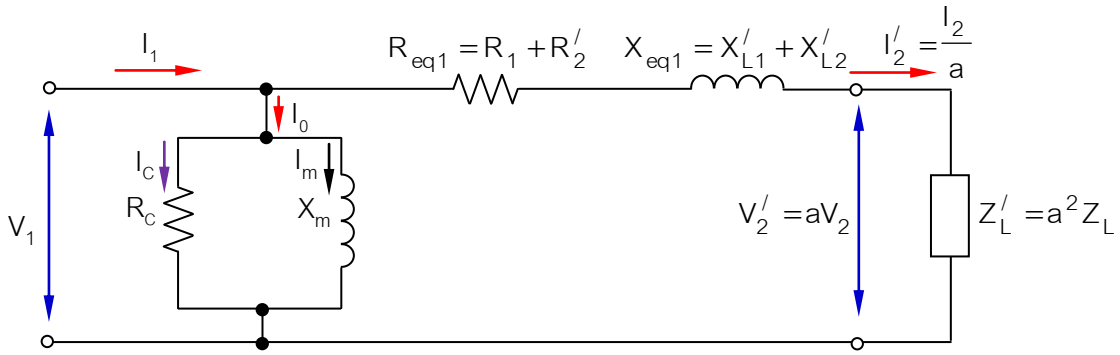
9.5 วงจรสมมูลค่าโดยประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้า

9.5.1 วงจรสมมูลค่าโดยประมาณจากทางด้านทุติยภูมิมาไว้ทางด้านปฐมภูมิ จากวงจรสมมูลค่าจริงของหม้อแปลงไฟฟ้ารูปที่ 9.5 เพื่อให้การวิเคราะห์เกี่ยวกับค่าต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้ามีความสะดวกและรวดเร็ว เนื่องจากกระแส I_0 มีค่าน้อยประมาณ 4-8 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับกระแสพิกัด ดังนั้นจึงนำค่า R_C และค่า X_m ที่ต่อขนานกันนำมาไว้ด้านหน้าซึ่งต่อเข้ากับแรงดัน V_1 ดังรูปที่ 9.9

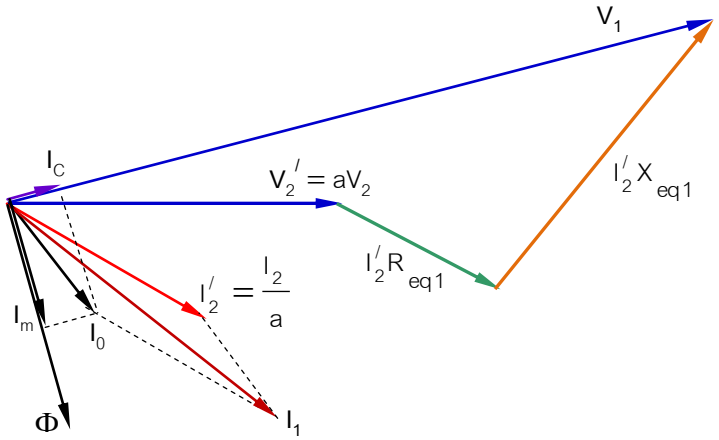


รูปที่ 9.9 วงจรสมมูลค่าโดยประมาณเมื่อโอนย้ายค่าต่าง ๆ อยู่ทางด้านปฐมภูมิ

จากรูปที่ 9.9 จะเห็นว่าค่าความต้านทาน R_1 และ R_2' ต่ออนุกรมกันสามารถนำมารวมกันได้เป็นค่าความต้านทานค่าใหม่เรียกว่า **ค่าความต้านทานสมมูลแบบอนุกรม** (Equivalent series resistance) เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิกำหนดให้เป็น R_{eq1} และค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึม X_{L1} และ X_{L2}' ต่ออนุกรมกันเช่นกัน ดังนั้นสามารถนำมารวมกันได้เป็นค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึมค่าใหม่เรียกว่า **ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลแบบอนุกรม** (Equivalent series reactance) กำหนดให้เป็น X_{eq1} เขียนเป็นวงจรสมมูลได้ใหม่ดังรูปที่ 9.10



รูปที่ 9.10 วงจรสมมูลในรูปแบบค่าความต้านทานสมมูลและรีแอกแตนซ์สมมูลทางด้านปฐมภูมิ

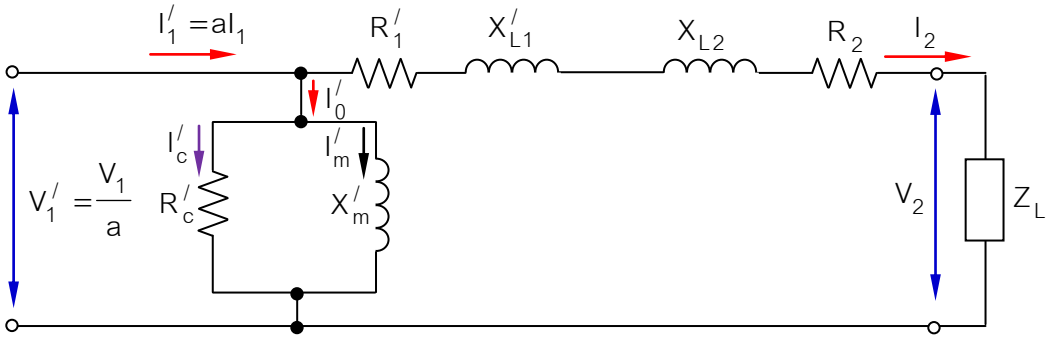


รูปที่ 9.11 แผนภาพเฟสเซอร์เมื่อโอนย้ายค่าต่าง ๆ อยู่ทางด้านปฐมภูมิ

จากวงจรรูปที่ 9.10 และแผนภาพเฟสเซอร์รูปที่ 9.11 หาค่าเฟสเซอร์ของแรงดัน V_1 ดังนี้

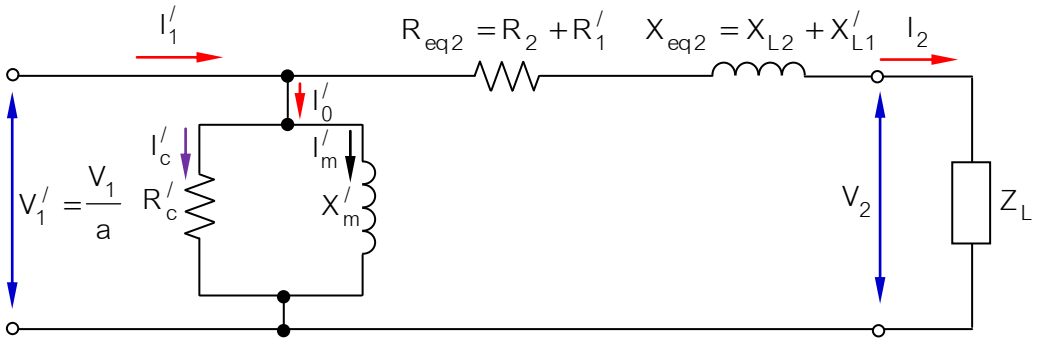
$$V_1 = V_2' + I_2'(R_{eq1} + jX_{eq1}) \qquad \text{..... (9.11)}$$

9.5.2 วงจรสมมูลค่าโดยประมาณจากทางด้านปฐมภูมิไปไว้ทางด้านทุติยภูมิ จากวงจรสมมูลค่าจริงของหม้อแปลงไฟฟ้ารูปที่ 9.5 นอกจากการย้ายค่าจากทางด้านทุติยภูมิมาไว้ทางด้านปฐมภูมิแล้ว ยังสามารถย้ายค่าจากทางด้านปฐมภูมิไปไว้ทางด้านทุติยภูมิได้เช่นกัน ดังรูปที่ 9.12

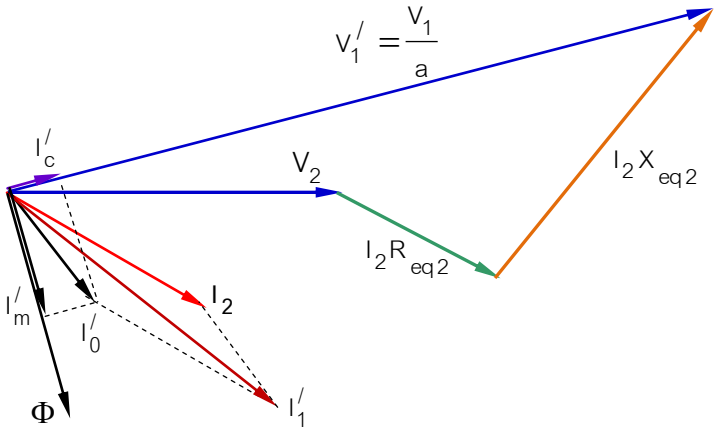


รูปที่ 9.12 วงจรสมมูลค่าโดยประมาณเมื่อโอนย้ายค่าต่าง ๆ อยู่ทางด้านทุติยภูมิ

จากรูปที่ 9.12 จะเห็นว่าค่าความต้านทาน R_1' และ R_2 ต่ออนุกรมกันสามารถนำมารวมกันได้เป็นค่าความต้านทานค่าใหม่เรียกว่า **ค่าความต้านทานสมมูลแบบอนุกรม** (Equivalent series resistance) เมื่อพิจารณาทางด้านทุติภูมิกำหนดให้เป็น R_{eq2} และค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึม X_{L1}' และ X_{L2} ต่ออนุกรมกันเช่นกัน ดังนั้นสามารถนำมารวมกันได้เป็นค่า รีแอกแตนซ์รั่วซึมค่าใหม่เรียกว่า **ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลแบบอนุกรม** (Equivalent series reactance) กำหนดให้เป็น X_{eq2} เขียนเป็นวงจรสมมูลได้ใหม่ดังรูปที่ 9.13 และแผนภาพเฟสเซอร์ดังรูปที่ 9.14



รูปที่ 9.13 วงจรสมมูลในรูปแบบค่าความต้านทานสมมูลและรีแอกแตนซ์สมมูลทางด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 9.14 แผนภาพเฟสเซอร์เมื่อโอนย้ายค่าต่าง ๆ อยู่ทางด้านทุติยภูมิ

จากวงจรรูปที่ 9.13 และแผนภาพเฟสเซอร์รูปที่ 9.14 หาค่าเฟสเซอร์ของแรงดัน V_1' ดังนี้

$$V_1' = V_2 + I_2 (R_{eq2} + jX_{eq2}) \qquad \text{..... (9.12)}$$

ตัวอย่างที่ 9.2 จากตัวอย่างที่ 9.1 ถ้ามีการโอนย้ายค่าต่าง ๆ มาไว้ทางด้านปฐมภูมิ และใช้วิธีค่าโดยประมาณ จงคำนวณหา

ก. แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ

ข. กระแสไฟฟ้าเมื่อไม่โหลด

ค. กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ

วิธีทำ โจทย์กำหนดค่าต่าง ๆ ของตัวอย่างที่ 9.1 ดังนี้

พิกัด = 72 kVA อัตราส่วนแรงดัน = 2400/240 V pf_2 = 0.8 ล้าหลัง V_2 = 240 V

$R_1 = 1\ \Omega$ $X_{L1} = 1.5\ \Omega$ $R_C = 4000\ \Omega$

$R_2 = 0.01\ \Omega$ $X_{L2} = 0.015\ \Omega$ $X_m = 1280\ \Omega$

หาค่าต่าง ๆ ก่อนได้ดังนี้

$$a = \text{อัตราส่วนแรงดัน} = \frac{2400}{240} = 10$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}(pf_2) = \cos^{-1}(0.8) = 36.87^\circ$$

$$I_2 = \frac{kVA}{V_2} = \frac{72\times10^3}{240} = 300\ A$$

$$I_2' = \frac{I_2}{a} = \frac{300\angle -36.87^\circ}{10} = 30\angle -36.87^\circ$$

$$V_2' = aV_2 = 10\times240\angle 0^\circ = 2400\angle 0^\circ$$

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

$$= 1 + (10^2 \times 0.01)$$

$$R_{eq1} = 2\ \Omega$$

$$X_{eq1} = X_{L1} + X'_{L2} = X_{L1} + a^2 X_{L2}$$
$$= 1.5 + (10^2 \times 0.015)$$
$$X_{eq1} = 3\ \Omega$$

ก. แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ

จากสมการ $V_1 = V'_2 + I'_2 (R_{eq1} + jX_{eq1})$

$$= 2400\angle 0^\circ + 30\angle -36.87^\circ \times (2 + j3)$$
$$= 2400\angle 0^\circ + (30\angle -36.87^\circ \times 3.605\angle 56.31^\circ)$$
$$= 2400\angle 0^\circ + 108.15\angle 19.44^\circ$$
$$V_1 = 2502.24\angle 0.82^\circ\ V$$

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 2502.24 V **ตอบ**

แต่จากตัวอย่างที่ 9.1 เป็นการคำนวณโดยใช้ค่าของวงจรสมมูลจริง **ตอบ** 2505.59 $\angle 0.8^\circ$ V เห็นว่าค่าที่ได้จากวงจรสมมูลโดยประมาณมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าของวงจรสมมูลจริง

ข. กระแสไฟฟ้าเมื่อไม่โหลด

$$I_c = \frac{V_1}{R_c} = \frac{2502.24\angle 0.82^\circ}{4000\angle 0^\circ}$$
$$I_c = 0.625\ \ 0.82^\circ\ A$$
$$I_m = \frac{V_1}{jX_m} = \frac{2502.24\angle 0.82^\circ}{1280\angle 90^\circ}$$
$$I_m = 1.954\angle -89.18^\circ\ A$$

ดังนั้น $I_0 = I_c + I_m$

$$= 0.625\angle 0.82^\circ + 1.954\angle -89.18^\circ$$
$$I_0 = 2.051\angle -71.44^\circ\ A$$

กระแสไฟฟ้าเมื่อไม่โหลดมีค่าเท่ากับ 2.051 A **ตอบ**

ค. กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ

ดังนั้น $I_1 = I_0 + I'_2 = I_0\angle -\theta_0 + I'_2\angle -\theta_2$

$$= 2\angle -71.44^\circ + 30\angle -36.87^\circ$$
$$= 31.66\angle -38.92^\circ$$

กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 31.66 A **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 9.3 จากตัวอย่างที่ 9.1 ถ้ามีการโอนย้ายค่าต่าง ๆ มาไว้ทางด้านทุติยภูมิ และใช้วิธีค่าโดยประมาณจงคำนวณหา

ก. แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ

ข. กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ

วิธีทำ

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

$$= 0.01 + (\frac{1}{10^2})$$

$$R_{eq2} = 0.02\ \Omega$$

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

$$= 0.015 + (\frac{1.5}{10^2})$$

$$X_{eq1} = 0.03\ \Omega$$

ก. แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ

จากสมการ $V_1' = V_2 + I_2(R_{eq2} + jX_{eq2})$

$$= 240\angle 0^\circ + 300\angle -36.87^\circ \times (0.02 + j0.03)$$

$$= 240\angle 0^\circ + (300\angle -36.87^\circ \times 0.036\angle 56.31^\circ)$$

$$= 240\angle 0^\circ + 10.815\angle 19.44^\circ$$

$$V_1' = 250.22\angle 0.82^\circ\ V$$

ดังนั้น $V_1 = aV_1' = 10 \times 250.22\angle 0.82^\circ$

$$= 2502.2\angle 0.82^\circ\ V$$

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 2502.2 V **ตอบ**

ข. กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ

$$I_1' = I_0' + I_2 = aI_0\angle -\theta_0 + I_2\angle -\theta_2$$

$$= (10 \times 2)\angle -71.44^\circ + 300\angle -36.87^\circ$$

$$I_1' = 316.6\angle -38.92^\circ$$

ดังนั้น $I_1 = \frac{I_1'}{a} = \frac{316.6\angle -38.92^\circ}{10} = 31.66\angle -38.92^\circ\ A$

กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 31.66 A **ตอบ**

เห็นว่าคำตอบจากตัวอย่างที่ 9.2 และจากตัวอย่างที่ 9.3 มีค่าเท่ากันทั้งขนาดและทิศทางไม่ว่าจะมีการโอนย้ายค่าต่าง ๆ จากด้านหนึ่งไปไว้อีกทางด้านหนึ่ง