หน่วยที่ 11

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

หัวข้อเรื่อง (Topics)

11.1 การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า

11.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงที่พิกัดใด ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า

11.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

11.4 การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในการหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

11.5 ภาวะที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า

11.6 ประสิทธิภาพตลอดวัน

11.7 การคำนวณหาประสิทธิภาพตลอดวัน

สมรรถนะย่อย (Element of Competency)

1. แสดงความรู้เกี่ยวกับประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ปฏิบัติการทดลองหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม (Behavioral Objectives)

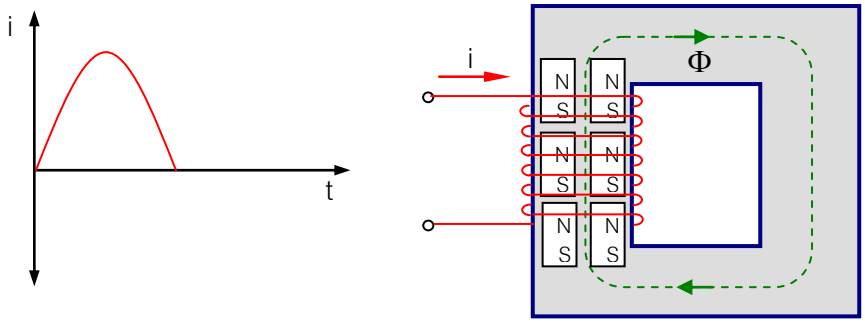
1. อธิบายการสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าได้
2. อธิบายกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงที่พิกัดใด ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้
3. อธิบายประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าได้
4. คำนวณหาค่าต่าง ๆ ในการหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าได้
5. อธิบายภาวะที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้
6. อธิบายประสิทธิภาพตลอดวันได้
7. คำนวณหาประสิทธิภาพตลอดวันได้

11.1 การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า

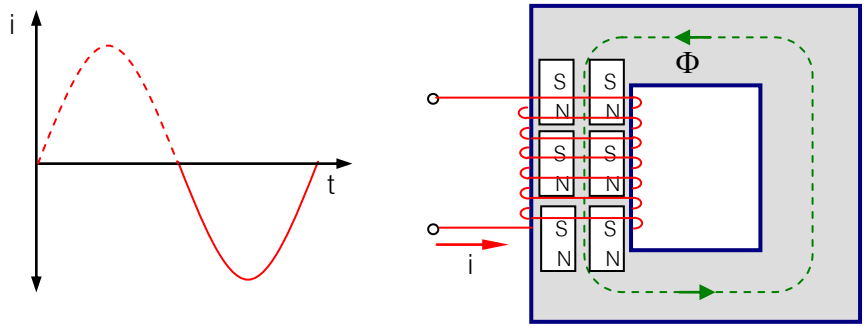
หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่มีค่าการสูญเสียน้อยกว่าเครื่องกลไฟฟ้าประเภทมอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทั้งนี้ก็เพราะว่าหม้อแปลงไฟฟ้านั้นไม่มีการสูญเสียทางกล ดังนั้นจึงทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีการสูญเสียเพียง 2 ส่วน ได้แก่ การสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียในขดลวดทองแดง

11.1.1 **การสูญเสียในแกนเหล็ก** การสูญเสียส่วนนี้จะเกิดขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น

1. การสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส เกิดขึ้นเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตลอดเวลาตามความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายเข้ามาดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 11.1 (ก) เมื่อครึ่งไซเกิลบวกเข้ามาจ่ายให้กับขดลวดของหม้อแปลง ก็ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามไฟฟ้ากระแสสลับและมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กนี้ทำให้โมเลกุลของแกนเหล็กเรียงตัวเป็นแบบ N-S และ N-S รอบแกนเหล็กตามทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเช่นเดียวกัน



(ก) เมื่อครึ่งไซเกิลบวกเข้ามาจ่ายให้กับขดลวด

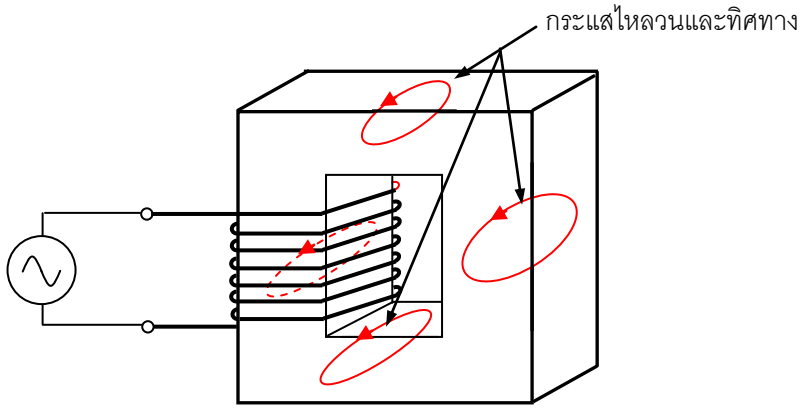


(ข) เมื่อครึ่งไซเกิลลบเข้ามาจ่ายให้กับขดลวด

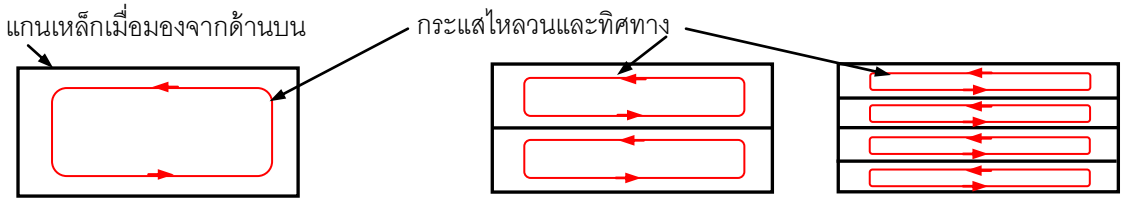
รูปที่ 11.1 การเกิดฮิสเทอรีซิสในแกนเหล็ก

จากรูปที่ 11.1 (ข) เมื่อครึ่งไซเกิลลบเข้ามาจ่ายให้กับขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ก็ทำให้เส้นแรง-แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปตามไฟฟ้าสลับและมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กนี้ทำให้โมเลกุลของแกนเหล็กเรียงตัวเป็นแบบ S-N และ S-N รอบแกนเหล็ก ตามทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กและเกิดการกลับทิศทางของโมกุลในแกนเหล็ก ในการกลับตัวของโมเลกุลต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งซึ่งพลังงานที่ใช้ไปก็คือกำลังสูญเสียซึ่งออกมาอยู่ในรูปของความร้อน

2. การสูญเสียจากกระแสไหลวน เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลวนภายในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 11.2 (ก) ถ้าให้แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแกนเหล็กตันเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้ามาก็ทำให้สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงและตัดกับแกนเหล็กตันตลอดเวลาทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น เนื่องจากแกนเหล็กตันมีค่าความต้านทานและครบวงจรในตัวมันเอง จึงทำให้เกิดกระแสไหลวนและมีทิศทางตามรูปที่ 11.2 (ข) ถ้าต้องการลดกระแสไหลวนที่แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ก็ทำได้โดยลดพื้นที่การไหลของกระแสไหลวนโดยทำเป็นเหล็กแผ่นบางแล้วนำมาอัดซ้อนกัน (ธวัชชัย อัตถวิบูลย์กุล, 2545: 36) ดังรูปที่ 11.2 (ค)



(ก) การเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็กตัน



(ข) แกนเหล็กตันเมื่อยังไม่แบ่งส่วน (ค) แกนเหล็กเมื่อแบ่งออกเป็น 2 ส่วนและ 4 ส่วน

รูปที่ 11.2 การเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็กและทิศทางเมื่อแบ่งออกเป็นส่วน ๆ

จากรูปที่ 11.2 (ค) เมื่อแบ่งแกนเหล็กตันออกเป็น 2 ส่วนและ 4 ส่วน โดยแกนเหล็กที่แบ่งออกไปไม่ถึงกันและทำให้เกิดกระแสไหลวนในแต่ละส่วนลดลง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากกระแสไหลวนลดลงด้วย การสูญเสียที่แกนเหล็กนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เนื่องจากความถี่ของแหล่งจ่าย ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กคงที่และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามามีค่าคงที่ ดังนั้นการสูญเสียนี้จะมีค่าคงที่ด้วยโดยไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกระแสไฟฟ้าโหลด

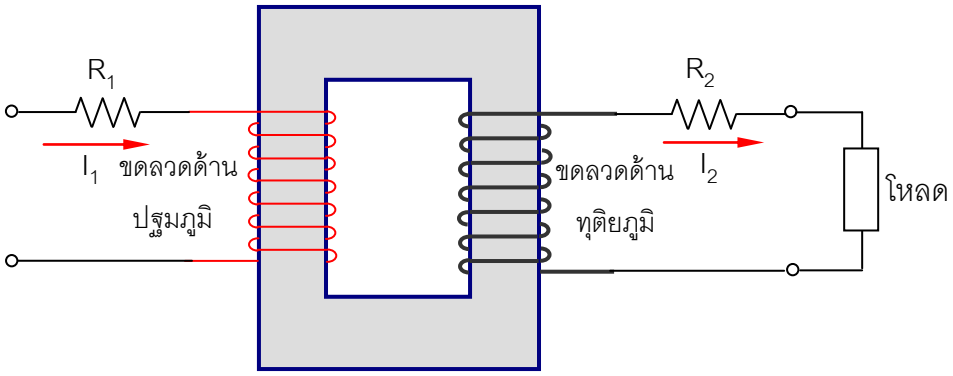
11.1.2 การสูญเสียในขดลวดทองแดง เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าพันจากขดลวดทองแดงทั้งสองด้านจึงมีค่าความต้านทานจากขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ดังนั้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดก็ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวดทั้งสองซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปและออกมาในรูปของความร้อน แบ่งออกเป็น

1. การสูญเสียจากขดลวดทองแดงทางด้านปฐมภูมิ
2. การสูญเสียจากขดลวดทองแดงทางด้านทุติยภูมิ

กำหนดให้ P_{co1} = กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทองแดงทางด้านปฐมภูมิ

P_{co2} = กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทองแดงทางด้านทุติยภูมิ

จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาเฉพาะค่าความต้านทาน



รูปที่ 11.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากวงจรสมมูลของหม้อแปลง รูปที่ 11.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทองแดงหาได้ ดังนี้

$$P_{co1} = I_1^2 R_1 \quad \text{..... (11.1)}$$

$$P_{co2} = I_2^2 R_2 \quad \text{..... (11.2)}$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดของขดลวด (P_{co})

$$P_{co} = P_{co1} + P_{co2} \quad \text{..... (11.3)}$$

นอกจากนี้การหากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทั้งหมดยังหาได้จากการย้ายค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

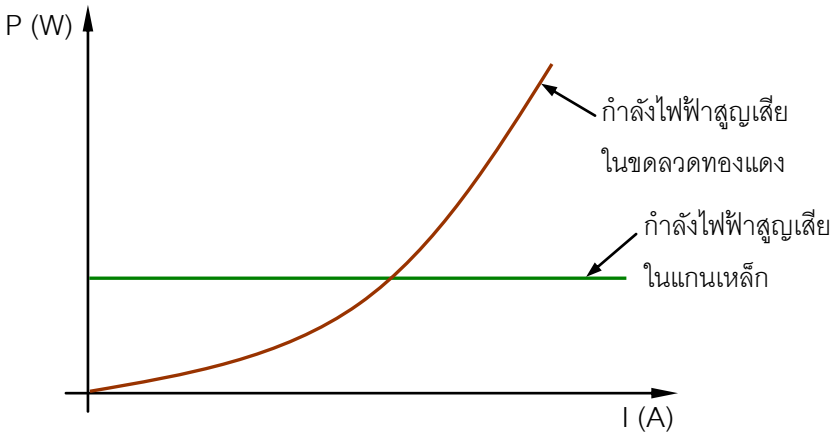
จากทางด้านทุติยภูมิมาไว้ทางด้านปฐมภูมิ

$$P_{co} = I_1^2 R_{eq1} \quad \text{..... (11.4)}$$

จากทางด้านปฐมภูมิมาไว้ทางด้านทุติยภูมิ

$$P_{co} = I_2^2 R_{eq2} \quad \text{..... (11.5)}$$

การสูญเสียที่ขดลวดทองแดงนี้มีค่าไม่คงที่โดยเปลี่ยนแปลงไปตามกระแสไฟฟ้าที่โหลด นั่นคือถ้ากระแสไฟฟ้าที่โหลดเพิ่มขึ้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทองแดงก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากการสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยการสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียในขดลวดทองแดง สามารถนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ดังรูปที่ 11.4



รูปที่ 11.4 เส้นกราฟกำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้าที่โหลดเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 11.4 เห็นว่าเส้นกราฟกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกระแสไฟฟ้าที่โหลด ส่วนเส้นกราฟการสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งสองด้านของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามกระแสไฟฟ้าที่โหลดยกกำลังสอง ($I_2^2R_{eq2}$ หรือ $I_1^2R_{eq1}$)

11.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงที่พิกัดใด ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทองแดงนั้นเป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดหรือได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะลัดวงจรเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทองแดงเมื่อเต็มพิกัดเช่นเดียวกัน แต่ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจ่ายโหลดน้อยกว่าพิกัดหรือมากกว่าพิกัดทำให้การสูญเสียจากขดลวดทองแดงนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งสามารถหาค่าได้ที่โหลดต่าง ๆ กันดังนี้

กำหนดให้ P_{co} = กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทองแดงทั้งหมดเมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัด

P_{con} = กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทองแดงทั้งหมดเมื่อจ่ายโหลดที่พิกัดใด ๆ

และ n = จำนวนเท่าที่พิกัดใด ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดเทียบกับพิกัด

จาก $P_{co} = I^2R_{eq}$

ดังนั้นจำนวนเท่าที่พิกัดใด ๆ $P_{con} = (nI)^2 R_{eq}$

และอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้า $\dfrac{P_{con}}{P_{co}} = \dfrac{(nI)^2 R_{eq}}{I^2R_{eq}}$

$$\frac{P_{con}}{P_{co}} = \frac{n^2I^2R_{eq}}{I^2R_{eq}} = n^2$$

$$P_{con} = n^2P_{co} \qquad \text{..... (11.6)}$$

11.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

กำลังอินพุตที่จ่ายเข้ามาให้กับหม้อแปลงเป็นกำลังไฟฟ้า และมีกำลังไฟฟ้าบางส่วนได้สูญเสียไปในแกนเหล็กและในขดลวด โดยกำลังที่เหลือเป็นกำลังไฟฟ้าทางเอาต์พุต ถ้ากำหนดให้อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกับกำลังไฟฟ้าอินพุตก็คือประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังเอาต์พุต}}{\text{กำลังอินพุต}} \times 100$$

$$= \frac{\text{กำลังเอาต์พุต}}{\text{กำลังเอาต์พุต} + \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด}} \times 100$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100 \qquad \text{..... (11.7)}$$

$$P_{out} = V_2 I_2 \cos\theta_2 = kVA \times pf_2$$

$$P_{loss} = P_c + P_{co}$$

11.4 การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในการหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

ตัวอย่างที่ 11.1 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 25 kVA ขนาดแรงดัน 2200/250 V มีค่าความต้านทานจากขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น 1.5 Ω และ 0.01936 Ω ตามลำดับ เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดที่ค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลังและมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก 260 W จงคำนวณหา

ก. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมด

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด

ค. ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

วิธีทำ โจทย์กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$V_1 = 2200\ V \quad \text{และ} \quad V_2 = 250\ V$$

$$R_1 = 1.5\ \Omega \quad \text{และ} \quad R_2 = 0.01936\ \Omega$$

$$Pf_2 = 0.8 \text{ ล้าหลัง และ } P_c = 260\ W$$

พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า $= 25\ kVA$

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2200}{250} = 8.8$$

$$I_1 = \frac{kVA}{V_1} = \frac{25 \times 10^3}{2200} = 11.36\ A$$

$$I_2 = \frac{kVA}{V_2} = \frac{25\times10^3}{250} = 100 \text{ A}$$

ก. กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทองแดงทั้งหมด

$$P_{co1} = I_1^2R_1 = (11.36)^2\times1.5$$
$$= 193.5 \text{ W}$$
$$P_{co2} = I_2^2R_2 = (100)^2\times0.01936$$
$$= 193.6 \text{ W}$$
$$P_{co} = P_{co1} + P_{co2} = 193.5 + 193.6$$
$$P_{co} = 387.1 \text{ W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทองแดงทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 387.1 W **ตอบ**

หรือหาได้จาก $P_{co} = I_1^2R_{eq1}$

โดย $R_{eq1} = R_1 + a^2R_2 = 1.5 + (8.8^2 \times 0.01936)$

$= 3\ \Omega$

$P_{co} = I_1^2R_{eq1} = (11.36)^2\times3$

$= 387.1$ W จะเห็นว่าคำตอบมีค่าเท่ากัน

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด

$$P_{loss} = P_c + P_{co}$$
$$= 260+387.1$$
$$P_{loss} = 647.1 \text{ W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 647.1 W **ตอบ**

ค. ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$P_{out} = kVA \times pf_2 = 25\times10^3\times0.8$$
$$= 20\times10^3 \text{ W} = 20 \text{ kW}$$
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}}\times100$$
$$= \frac{20\times10^3}{20\times10^3 + 647.1}\times100$$
$$= 96.87\ \%$$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 96.87 % **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 11.2 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 75 kVA ขนาดแรงดัน 3300/400 V จากการทดสอบ มีดังนี้

	แรงดัน (V)	**กระแส** (A)	**กำลังไฟฟ้า** (kW)
ทดสอบแบบเปิดวงจร (เปิดวงจรทางด้านปฐมภูมิ)	400	7.5	1.4
ทดสอบแบบลัดวงจร (ลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ)	230	22.73	2.5

ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้จ่ายโหลดออกไป $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, เต็มพิกัด และ $\frac{3}{2}$ เท่าของพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่ค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง จงคำนวณหา

ก. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมดที่จ่ายโหลดพิกัดค่าต่าง ๆ

ค. ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่จ่ายโหลดพิกัดค่าต่าง ๆ

วิธีทำ โจทย์กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

ทดสอบเปิดวงจร (เปิดวงจรทางด้านปฐมภูมิ) $P_0 = P_c = 1.4\,kW$

ทดสอบลัดวงจร (ลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ) $P_{sc} = P_{co} = 2.5\ kW$

$V_1 = 3300\ V$ และ $V_2 = 400\ V$

พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า $= 75\ kVA$ และ $pf_2 = 0.8$ ล้าหลัง

ก. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

การทดสอบแบบเปิดวงจร กำลังไฟฟ้าที่ได้จากวัตต์มิเตอร์เป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมด และไม่ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าจะจ่ายโหลดไปเท่าใดก็ตามกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าคงที่

$$P_o = P_c = 1.4\ kW$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ 1.4 kW **ตอบ**

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมดที่จ่ายโหลดพิกัดค่าต่าง ๆ

การทดสอบแบบลัดวงจร กำลังไฟฟ้าที่ได้จากวัตต์มิเตอร์เป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมดและเปลี่ยนแปลงไปตามโหลดพิกัดค่าต่าง ๆ

$$P_{sc} = P_{co} = 2.5\ kW$$

เมื่อจ่ายโหลดที่ $\frac{1}{2}$ ของพิกัดจะได้

$$P_{co(1/2)} = n^2 P_{co} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 2.5\ kW$$
$$= 0.625\ kW$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงที่ $\frac{1}{2}$ ของพิกัดมีค่าเท่ากับ 0.625 kW **ตอบ**

เมื่อจ่ายโหลดที่ $\frac{3}{4}$ ของพิกัดจะได้

$$P_{co(3/4)} = n^2 P_{co} = \left(\frac{3}{4}\right)^2 \times 2.5 \text{ kW}$$
$$= 1.406 \text{ kW}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงที่ $\frac{3}{4}$ ของพิกัดมีค่าเท่ากับ 1.406 kW **ตอบ**

เมื่อจ่ายโหลดที่เต็มพิกัดจะได้

$$P_{co(1/1)} = n^2 P_{co} = \left(\frac{1}{1}\right)^2 \times 2.5 \text{ kW}$$
$$= 2.5 \text{ kW}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงที่เต็มพิกัดมีค่าเท่ากับ 2.5 kW **ตอบ**

เมื่อจ่ายโหลดที่ $\frac{3}{2}$ ของพิกัดจะได้

$$P_{co(3/2)} = n^2 P_{co} = \left(\frac{3}{2}\right)^2 \times 2.5 \text{ kW}$$
$$= 5.625 \text{ kW}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงที่ $\frac{3}{2}$ ของพิกัดมีค่าเท่ากับ 5.625 kW **ตอบ**

ค. ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่จ่ายโหลดพิกัดค่าต่าง ๆ

เมื่อจ่ายโหลดที่ $\frac{1}{2}$ ของพิกัดจะได้

$$P_{out} = \frac{1}{2} \times \text{kVA} \times pf_2$$
$$= \frac{1}{2} \times 75 \times 10^3 \times 0.8$$
$$= 30 \times 10^3 \text{ W} = 30 \text{ kW}$$
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100$$
$$= \frac{30\,\text{kW}}{30\,\text{kW} + (1.4\,\text{kW} + 0.625\,\text{kW})} \times 100$$
$$\eta = 93.67\ \%$$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ $\frac{1}{2}$ ของพิกัดมีค่าเท่ากับ 93.67 % **ตอบ**

เมื่อจ่ายโหลดที่ $\frac{3}{4}$ ของพิกัดจะได้

$$P_{out} = \frac{3}{4} \times \text{kVA} \times pf_2 = \frac{3}{4} \times 75 \times 10^3 \times 0.8$$
$$= 45 \text{ kW}$$
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100$$

$$\eta = \frac{45\,kW}{45\,kW + (1.4\,kW + 1.406kW)} \times 100$$

$$\eta = 94.13\ \%$$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ $\frac{3}{4}$ ของพิกัดมีค่าเท่ากับ 94.13 % **ตอบ**

เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดจะได้ $P_{out} = kVA \times pf_2 = 75\times10^3 \times 0.8$

$$= 60\ kW$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100$$

$$= \frac{60\,kW}{60\,kW + (1.4\,kW + 2.5\,kW)} \times 100$$

$$\eta = 93.89\ \%$$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เต็มพิกัดมีค่าเท่ากับ 93.89 % **ตอบ**

เมื่อจ่ายโหลดที่ $\frac{3}{2}$ ของพิกัดจะได้

$$P_{out} = \frac{3}{2} \times kVA \times pf_2 = \frac{3}{2} \times 75 \times 10^3 \times 0.8$$

$$= 90\ kW$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100$$

$$= \frac{90\,kW}{90\,kW + (1.4\,kW + 5.625kW)} \times 100 = 92.76\ \%$$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ $\frac{3}{2}$ ของพิกัดมีค่าเท่ากับ 92.76 % **ตอบ**

11.5 ภาวะที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่โหลด ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทั้งหมดเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย แต่กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกระแสไฟฟ้าที่โหลด จากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดนี้จะมีค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งหาค่าได้ดังนี้

เมื่อ P_{co} = กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทั้งหมดเมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัด

โดย $P_{co} = I_1^2 R_{eq1} = I_2^2 R_{eq2}$

และ P_c = กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

จากสมการของประสิทธิภาพ $\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_c + P_{C02}}$

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos\theta_2}{V_2 I_2 \cos\theta_2 + P_c + I_2^2 R_{eq2}}$$

จากเรื่องค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดทำการอนุพันธ์ (Differentiate) ค่า η เทียบกับ I_2 แล้วให้มีค่าเท่ากับศูนย์

จะได้ $$\frac{d\eta}{dI_2} = 0 = \frac{d}{dI_2}\left(\frac{V_2I_2\cos\theta_2}{V_2I_2\cos\theta_2 + P_c + I_2^2R_{eq2}}\right)$$

$$0 = \frac{(V_2I_2\cos\theta_2 + P_c + I_2^2R_{eq2})\frac{d}{dI_2}(V_2I_2\cos\theta_2) - (V_2I_2\cos\theta_2)\frac{d}{dI_2}(V_2I_2\cos\theta_2 + P_c + I_2^2R_{eq2})}{(V_2I_2\cos\theta_2 + P_c + I_2^2R_{eq2})^2}$$

$$0 = (V_2I_2\cos\theta_2 + P_c + I_2^2R_{eq2})(V_2\cos\theta_2) - (V_2I_2\cos\theta_2)(V_2\cos\theta_2 + 0 + 2I_2R_{eq2})$$

นำ $V_2\cos\theta_2$ หารตลอดจะได้

$$0 = (V_2I_2\cos\theta_2 + P_c + I_2^2R_{eq2}) - I_2(V_2\cos\theta_2 + 2I_2R_{eq2})$$

$$0 = V_2I_2\cos\theta_2 + P_c + I_2^2R_{eq2} - V_2I_2\cos\theta_2 - 2I_2^2R_{eq2})$$

$$0 = P_c - I_2^2R_{eq2}$$

$$I_2^2R_{eq2} = P_c \quad \text{..... (11.8)}$$

เห็นว่าเกิดประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดทั้งหมดเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

$$P_{co} = P_c \quad \text{..... (11.9)}$$

โดยกระแสไฟฟ้าทางด้านโหลดหรือกระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ จะมีกระแสไฟฟ้าค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด กำหนดให้เป็น $I_{2\eta max}$ หาค่าได้ดังนี้

$$I_{2\eta max}^2R_{eq2} = P_c$$

$$I_{2\eta max}^2 = \frac{P_c}{R_{eq2}}$$

$$I_{2\eta max} = \sqrt{\frac{P_c}{R_{eq2}}} \quad \text{..... (11.10)}$$

และค่า kVA ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด กำหนดให้เป็น $kVA_{\eta max}$ หาได้ดังนี้ โดยนำค่าแรงดัน V_2 คูณเข้าไปในสมการที่ 14.10 จะได้

$$V_2I_{2\eta max} = V_2 \times \sqrt{\frac{P_c}{R_{eq2}}}$$

$$V_2I_{2\eta max} = V_2 \times \sqrt{\frac{P_c}{R_{eq2}}} \times \frac{I_2}{I_2}$$ ← นำค่า I_2 คูณทั้งเศษและส่วน

$$V_2I_{2\eta max} = V_2I_2 \times \sqrt{\frac{P_c}{I_2^2R_{eq2}}}$$

$$kVA_{\eta max} = kVA \times \sqrt{\frac{P_c}{P_{co}}} \qquad \text{..... (11.11)}$$

เมื่อ $kVA_{\eta max}$ = ค่า kVA ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด

kVA = ค่าพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า

ตัวอย่างที่ 11.3 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 50 kVA ขนาดแรงดัน 2400/240 V มีค่าความต้านทานสมมูลทางด้านทุติภูมิ 0.015 Ω เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก 173 W จงคำนวณหา

ก. กระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ข. ค่า kVA ที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ค. ประสิทธิภาพสูงสุดที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง

วิธีทำ โจทย์กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้ พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า = 50 kVA pf_2 = 0.8 ล้าหลัง

$V_1 = 2400$ V $V_2 = 240$ V

$R_{eq2} = 0.015\ \Omega$ $P_c = 173$ W

ก. กระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

$$I_{2\eta max} = \sqrt{\frac{P_c}{R_{eq2}}} = \sqrt{\frac{173}{0.015}}$$

$$I_{2\eta max} = 107.39 \text{ A}$$

กระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเท่ากับ 107.39 A **ตอบ**

ข. ค่า kVA ที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

$$I_2 = \frac{kVA}{V_2} = \frac{50 \times 10^3}{240} = 208.33 \text{ A}$$

$$P_{co} = I_2^2 R_{eq2} = (208.33)^2 \times 0.015$$

$$= 651 \text{ W}$$

จากสมการ $$kVA_{\eta max} = kVA \times \sqrt{\frac{P_c}{P_{co}}} = 50 \times 10^3 \times \sqrt{\frac{173}{651}}$$

$$= 50 \times 10^3 \times 0.5155$$

$$kVA_{\eta max} = 25.775 \times 10^3 \text{ VA} = 25.755 \text{ kVA}$$

kVA ที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดมีค่า 25.775 kVA **ตอบ**

ค. ประสิทธิภาพสูงสุดที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง

ที่ประสิทธิภาพสูงสุดจะได้ $P_{out} = kVA_{\eta max} \times pf_2$

$$= 25.775 \times 10^3 \times 0.8 = 20620 \text{ W}$$

และ $P_{co} = P_c = 173$ W

จากสมการ $$\eta_{max} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_c + P_{co}} \times 100$$

$$= \frac{20620}{20620 + 173 + 173)} \times 100$$

$$\eta_{max} = 98.35\ \%$$

ประสิทธิภาพสูงสุดที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลังมีค่าเท่ากับ 98.35 % **ตอบ**

11.6 ประสิทธิภาพตลอดวัน

หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายนั้น โดยตัวหม้อแปลงถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าตลอดเวลา 24 ชั่วโมง ถึงแม้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้ายังไม่จ่ายโหลดยังคงมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กอยู่ตลอดเวลา และมีค่าคงที่ ถ้าโหลดในวันนั้นมีการเปลี่ยนแปลงก็ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย จึงสามารถหาประสิทธิภาพตลอดวัน (All day efficiency) (ไชยชาญ หินเกิด, 2553: 189) ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพตลอดวัน} = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต}}{\text{พลังงานไฟฟ้าทางด้านอินพุต}} \times 100$$

$$\eta_{all\ day} = \frac{W_{out}}{W_{in}} \times 100$$

หรือ $$\eta_{all\ day} = \frac{W_{out}}{W_{out} + W_c + W_{co}} \times 100 \qquad \text{..... (11.12)}$$

11.7 การคำนวณหาประสิทธิภาพตลอดวัน

ตัวอย่างที่ 11.4 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาด 500 kVA มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก 3.5 kW กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด 4.5 kW ระหว่างวันใน 24 ชั่วโมง มีการจ่ายโหลดดังนี้

จำนวนชั่วโมง	โหลดที่จ่ายออกไป	ตัวประกอบกำลัง (pf_2)
6	500 kVA	0.8 ล้าหลัง
10	400 kVA	0.75 ล้าหลัง
4	125 kVA	0.8 ล้าหลัง
4	–	–

(B.L. Theraja ; 1975, 748) จงคำนวณหาประสิทธิภาพตลอดวัน

วิธีทำ ที่โหลด 500 kVA หม้อแปลงไฟฟ้าทำงาน 6 ชั่วโมง (h = 6)

$$n = \frac{\text{kVA ที่จ่ายโหลด}}{\text{kVA ที่พิกัด}} = \frac{500\,\text{kVA}}{500\,\text{kVA}} = 1$$

$$P_{co(1/1)} = n^2 P_{co} = \left(\frac{1}{1}\right)^2 \times 4.5\ \text{kW} = 4.5\ \text{kW}$$

$$W_{co(1/1)} = P_{co(1/1)} \times h = 4.5\ \text{kW} \times 6 = 27\ \text{kWh}$$

$$P_{out(1/1)} = kVA_{\text{ที่จ่าย}} \times pf_2 = 500\ kVA \times 0.8 = 400\ kW$$

$$W_{out(1/1)} = P_{out(1/1)} \times h = 400\ kW \times 6 = 2400\ kWh$$

ที่โหลด 400 kVA หม้อแปลงไฟฟ้าทำงาน 10 ชั่วโมง (h = 10)

$$n = \frac{kVA\ \text{ที่จ่ายโหลด}}{kVA\ \text{ที่พิกัด}} = \frac{400\,kVA}{500\,kVA} = \frac{4}{5}$$

$$P_{co(4/5)} = n^2 P_{co} = \left(\frac{4}{5}\right)^2 \times 4.5\ kW = 2.88\ kW$$

$$W_{co(4/5)} = P_{co(4/5)} \times h = 2.88\ kW \times 10 = 28.8\,kWh$$

$$P_{out(4/5)} = kVA_{\text{ที่จ่าย}} \times pf_2 = 400\ kVA \times 0.75 = 300\ kW$$

$$W_{out(4/5)} = P_{out(4/5)} \times h = 300\ kW \times 10 = 3000\ kWh$$

ที่โหลด 125 kVA หม้อแปลงไฟฟ้าทำงาน 4 ชั่วโมง (h = 4)

$$n = \frac{kVA\ \text{ที่จ่ายโหลด}}{kVA\ \text{ที่พิกัด}} = \frac{125\,kVA}{500\,kVA} = \frac{1}{4}$$

$$P_{co(1/4)} = n^2 P_{co} = \left(\frac{1}{4}\right)^2 \times 4.5\ kW = 0.281\ kW$$

$$W_{co(1/4)} = P_{co(1/4)} \times h = 0.218\ kW \times 4 = 1.124\,kWh$$

$$P_{out(1/4)} = kVA_{\text{ที่จ่าย}} \times pf_2 = 125\ kVA \times 0.8 = 100\ kW$$

$$W_{out(1/4)} = P_{out(1/4)} \times h = 100\ kW \times 4 = 400\ kWh$$

เนื่องจากการสูญเสียในแกนเหล็กเกิดขึ้นตลอด 24 ชั่วโมง (h = 24) และมีค่าคงที่จะได้

$$W_c = P_c \times h = 3.5\ kW \times 24 = 84\ kWh$$

ดังนั้น

$$W_{out} = W_{out(1/1)} + W_{out(4/5)} + W_{out(1/4)}$$
$$= 2400\,kWh + 3000\,kWh + 400\,kWh$$
$$= 5800\,kWh$$

และ

$$W_{co} = W_{co(1/1)} + W_{co(4/5)} + W_{co(1/4)}$$
$$= 27\,kWh + 28.8\,kWh + 1.124\,kWh$$
$$= 56.924\,kWh$$

จากสมการ

$$\eta_{all\ day} = \frac{W_{out}}{W_{out} + W_c + W_{co}} \times 100$$
$$= \frac{5800\ kWh}{5800\,kWh + 84\,kWh + 56.924\ kWh} \times 100$$
$$\eta_{all\ day} = 97.63\ \%$$

ประสิทธิภาพตลอดวันมีค่า 97.63 % **ตอบ**