

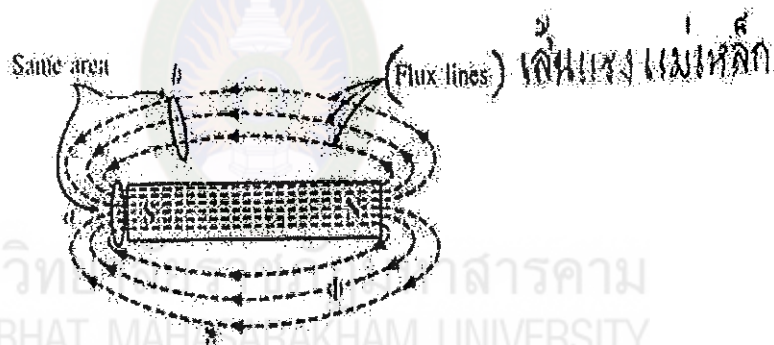
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แม่เหล็ก (Magnetism)

2.1.1 สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field)

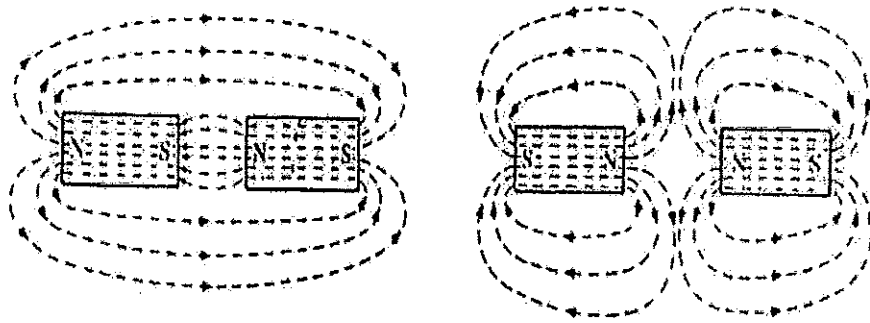
บริเวณรอบๆแท่งแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) จะมีเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Lines) กระจายอยู่รอบๆ โดยวิ่งจากขั้วเหนือ ไปยังขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็ก บริเวณที่มีเส้นแรงแม่เหล็กนี้เรียกว่า สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อบริเวณพื้นที่นั้น



รูป 2.1 สนามแม่เหล็กรอบๆแท่งแม่เหล็ก

ในรูป 2.1 จะเห็นว่า ที่พื้นที่ a และพื้นที่ b ซึ่งมีพื้นที่เท่ากันนี้จะมีจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กไม่เท่ากัน ดังนั้นความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กที่บริเวณพื้นที่ a จะไม่เท่ากับบริเวณพื้นที่ b

ในรูป 2.2 แสดงความแตกต่างของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อนำแท่งแม่เหล็ก 2 แท่งมาวางใกล้กัน ในรูป 2.2(ก) หันขั้วต่างกันเข้าหากัน ในรูป 2.2(ข) หันขั้วเหมือนกันเข้าหากัน



รูป 2.2 สนามแม่เหล็กรอบๆแท่งแม่เหล็ก 2 แท่ง

วิธีการวัดสนามแม่เหล็กจะใช้การวัดจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดที่สนามแม่เหล็กผ่าน ดังนั้นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)

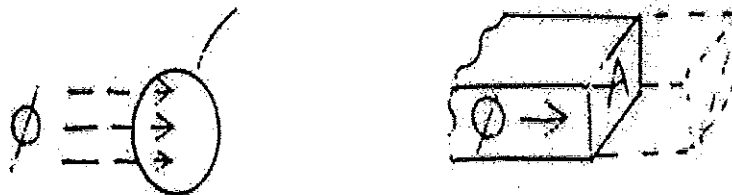
$$B = \frac{\phi}{A} \quad \text{Weber / Square Meter (Wb/m}^2\text{)}$$

เมื่อ B = Magnetic Flux Density มีหน่วยเป็น เทสลา (T)

ϕ = Magnetic Flux มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Wb)

A = พื้นที่หน้าตัดที่เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่าน มีหน่วยเป็น Square Meters (m^2)

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$$



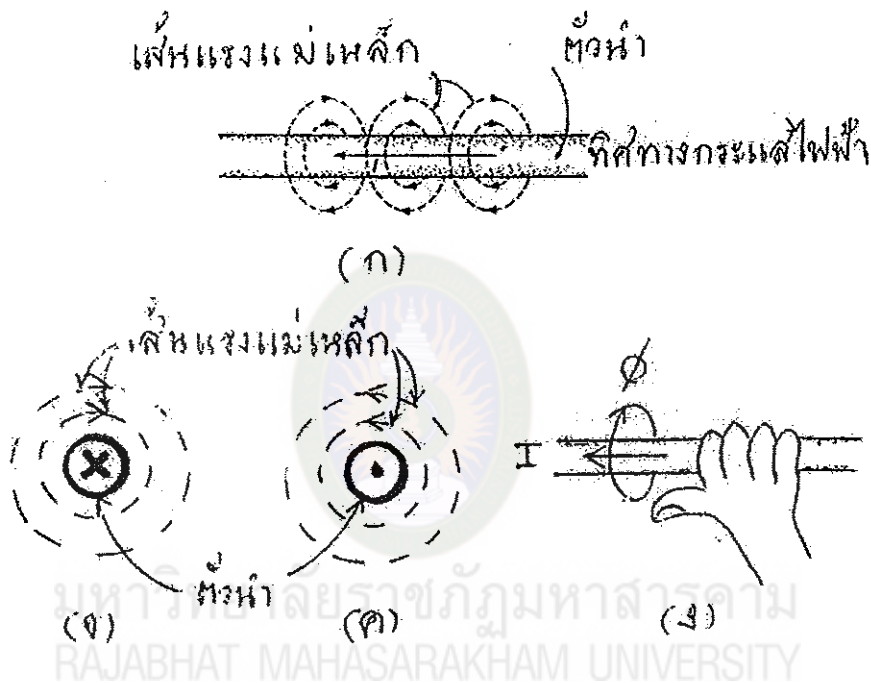
รูป 2.3 เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่านพื้นที่หน้าตัด

ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กในโลกมีค่าประมาณ 10^{-5} T

ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้า มีค่าประมาณ 1 T

2.1.2 สนามแม่เหล็กรอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหล

ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ (Conductor) จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆตัวนำนั้น ลักษณะนี้เรียกว่าแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet)

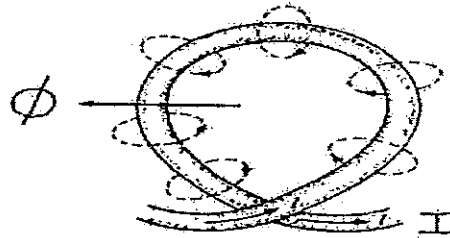


รูป 2.4 (ก) แสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน
 (ข) กระแสไฟฟ้าเข้า
 (ค) กระแสไฟฟ้าออก
 (ง) กฎ Ampere's Right - Hand Rule

กฎ Ampere's Right - Hand Rule เป็นกฎที่ทำให้ทราบทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยให้นิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวและและนิ้วทั้งสี่จะแสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำนั้น

2.1.3 สนามแม่เหล็กในขดลวด

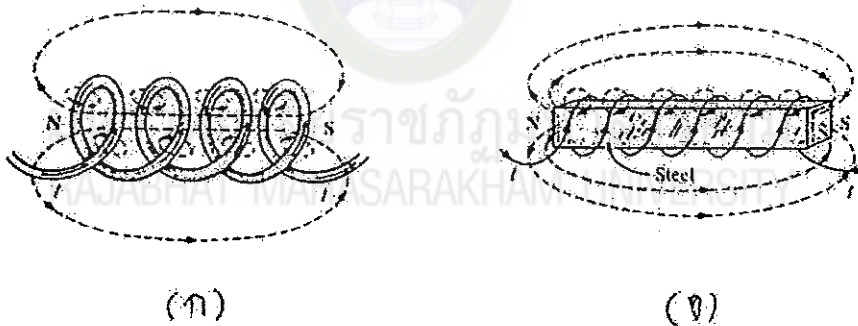
ถ้ามีขดลวดที่มีจำนวนรอบ 1 รอบ และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางดังรูป 2.5 ซึ่งจะเห็นว่า เส้นแรงแม่เหล็กรวมมีทิศทางพุ่งออกผ่านศูนย์กลางของขดลวด



รูปที่ 2.5 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

ถ้าขดลวดที่มีจำนวนรอบมาก ลักษณะทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นดังรูป

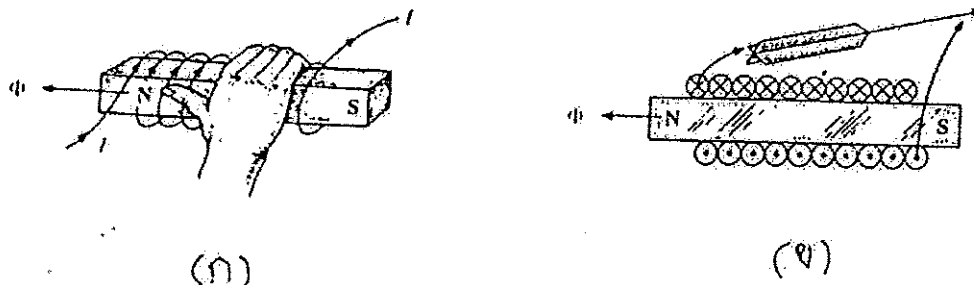
2.6



รูป 2.6 เส้นแรงแม่เหล็กรอบขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้า

(ก) แกนอากาศ (ข) พันขดลวดรอบแกนเหล็ก

ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสามารถทราบได้จากกฎมือขวา CorScrew's Rule ดังรูป 2.7 นิ้วทั้งสี่ชี้ทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก



รูป 2.7 ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกฎมือขวา Cork's Screw Rule

2.1.4 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force , MMF)

ถ้าขดลวดมีจำนวนรอบ N รอบ พันรอบแกนเหล็ก และมีกระแสไฟฟ้า I แอมแปร์ ไหลผ่านในขดลวด จะเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก MMF ขึ้นและ MMF นี้จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น

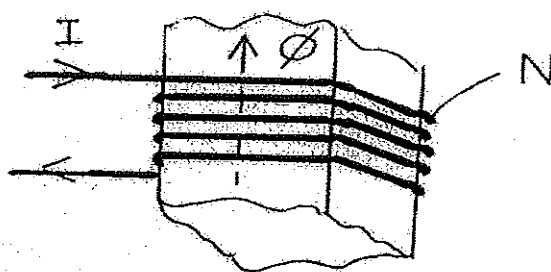
แรงเคลื่อนแม่เหล็ก , MMF , $M = NI$ Ampere-Turns , (AT)

N = จำนวนรอบขดลวด

I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด , Ampere

MMF นี้สามารถเปรียบเทียบกับ Electromotive Force , EMF ในวงจรไฟฟ้า

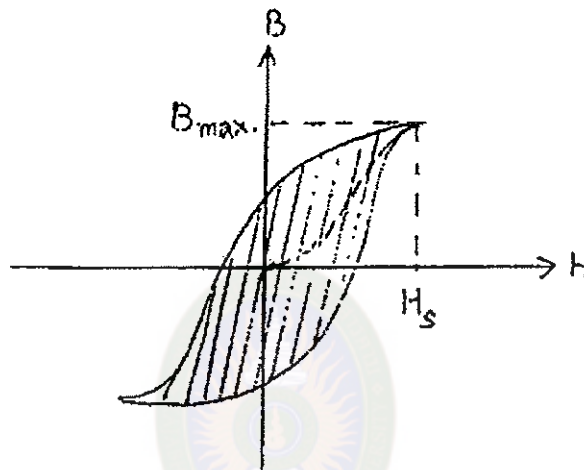
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



รูป 2.8 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดพันรอบแกนเหล็ก

2.1.5 การสูญเสียในแกนแม่เหล็ก (Magnetic Core Losses)

การสูญเสียในแกนแม่เหล็ก ก็คือ พื้นที่ภายใน Hysteresis Loop ซึ่งจะแสดงพลังงานที่สูญเสียในรูปของความร้อน การสูญเสียเกิดความร้อนในแกนแม่เหล็กจะเกิดขึ้นในกรณีที่เกิดมี Hysteresis Loop คือ หมายความว่า จะต้องมีการเปลี่ยนแปลง H และ B ตลอดเวลานั่นเอง ลักษณะนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้า I ที่ไหลในขดลวดจะต้องเปลี่ยนแปลงไปมาตลอดเวลา ซึ่งก็คือ กระแสไฟฟ้า I นี้เป็นกระแสไฟฟ้าสลับนั่นเองจึงจะทำให้เกิด Hysteresis Loop ขึ้น



รูป 2.9 Hysteresis Loss

ถ้าพื้นที่ภายใน Loop มาก ความร้อนที่เกิดในแกนแม่เหล็กก็จะมากปริมาณความร้อนที่สูญเสีย Hysteresis Loss เท่ากับ

$$P_h = k_h V f B_{\max}^n \quad \text{Watts1.8}$$

เมื่อ V = ปริมาตรของสารแม่เหล็ก, ลูกบาศก์เมตร (m^3)

k_h = Hysteresis Constant ขึ้นอยู่กับพื้นที่ภายใน Loop

n = ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองมีค่าประมาณระหว่าง 1.5 ถึง 2.5

f = ความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับ I, Hz

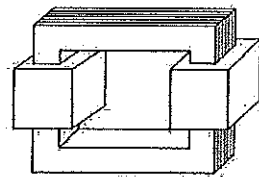
B_{\max}^n = ค่าสูงสุดของ Magnetic Flux Density, Wb

2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (TRANSFORMERS)

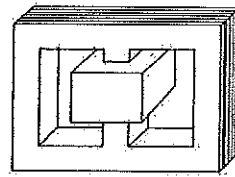
2.2.1 โครงสร้าง

หม้อแปลงไฟฟ้าใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้ายังใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นตัวปรับอิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) และใช้เป็นตัวแยกระบบไฟฟ้าไม่ให้ต่อเนื่อกัน (Isolation Transformer) เพื่อสำหรับการวัดกับเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นวงจรมแม่เหล็กที่มีขดลวด 1 ขด หรือหลายขดพันรวมกันในวงจรมแม่เหล็กเดียวกัน (Magnetic Circuit or Core)



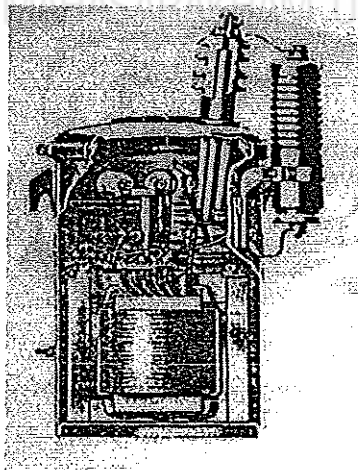
(a) Core Type



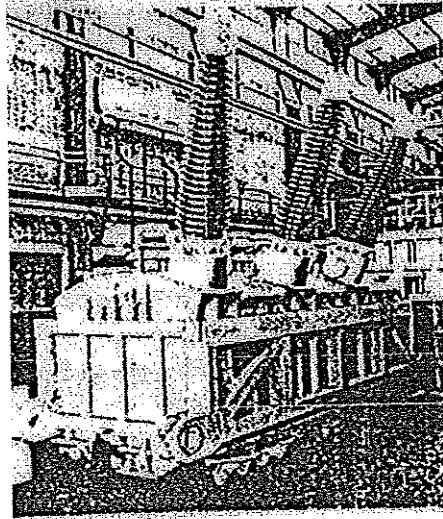
(b) Shell Type

รูป 2.10 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ (ก) Core type และ (ข) Shell - type

แกนของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปจะเป็นแกนเหล็กที่ใช้แผ่นเหล็กบางๆ มาอัดซ้อนกัน หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูงจะนำขดลวดเข้าอยู่ในน้ำมันที่เป็นฉนวน และปลายสายไฟด้านไฟฟ้าแรงสูงจะต่อผ่านออกทางขั้วต่อกระเบื้องเคลือบ (Porcelain Bushing)



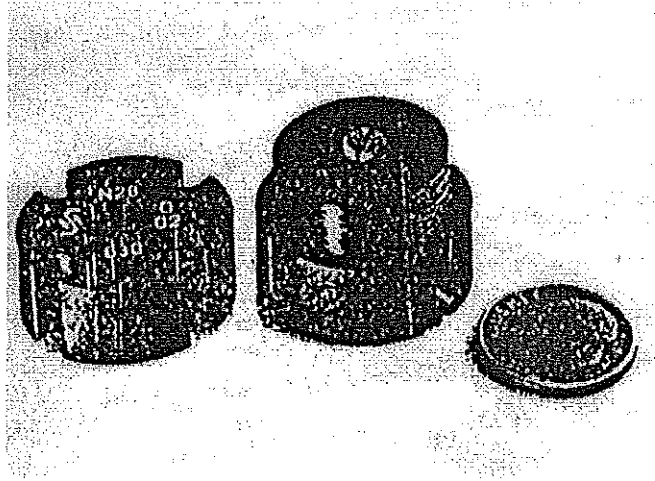
รูป 2.11 หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการจ่ายโวลต์ให้แก่ผู้ใช้ไฟ (Distribution Transformer) ขนาด 2 ถึง 25 KVA 7200 V : 240/120 V



รูป 2.12 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 660 MVA. 50 Hz ใช้สำหรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจาก 20 kV. ให้เป็น 405 kV.

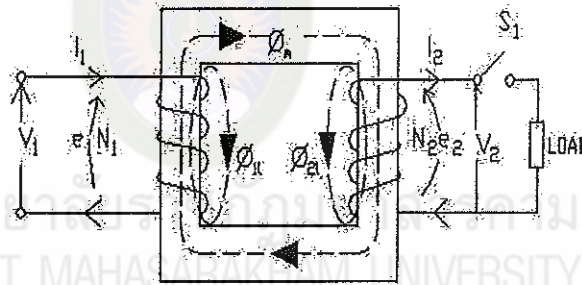


รูป 2.13 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์



รูป 2.14 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ pulse ซึ่งใช้สำหรับวงจร gate ของ SCR

2.2.2 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูป 2.15 แผนภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงแรงดันไฟฟ้า กระแสและเส้นแรงแม่เหล็ก

ในขณะที่ไม่มีโหลด (No - Load)

ถ้าสวิตช์ S_1 เปิดวงจร กระแสไฟฟ้า $i_2 = 0$ ในขณะนี้อธิบายว่า no - load หรือ Exciting Transformer เมื่อใส่แรงดันไฟฟ้า v_1 จะมีกระแสไฟฟ้า i_1 ไหลในขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) จะเกิด $mmf = N_1 i_1$ สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux) ขึ้นในวงจรแม่เหล็ก

เส้นแรงแม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้นในขดลวดปฐมภูมินี้จะมี 2 อัน คือ Primary Leakage Flux . ϕ_{ll} และ Mutual Flux . ϕ_m แต่เนื่องจากกระแสไฟฟ้า i_1 เป็น

กระแสลับรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) ดังนั้น ϕ_m จะเป็น Sine Wave ด้วย

$$\phi_m = \phi_{max} \sin \omega t \tag{.....2.1}$$

เมื่อ ϕ_{max} = ค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก , wb

$\omega = 2 \pi f$ = ความเร็วเชิงมุม , rad / sec.

f = ความถี่ของไฟฟ้ากระแสลับ , Hz

จากกฎของ Faraday กล่าวว่า ถ้ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่มากล้องขดลวดจะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induced Voltage) เกิดขึ้นในขดลวดนั้น นั่นคือ

$$e_i = N_1 \frac{d\phi_m}{dt} = N_1 \frac{d \phi_{max} \sin \omega t}{dt}$$

$$= \omega N_1 \phi_{max} \cos \omega t \tag{.....2.2}$$

$$e_i = E_{m1} \cos \omega t \tag{.....2.3}$$

เมื่อ E_{m1} = ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้า

$$= \omega N_1 \phi_{max}$$

เนื่องจากค่า RMS ของ $E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}}$ เพราะเป็นรูปคลื่นไซน์

$$E_1 = \frac{2 \pi f N_1 \phi_{max}}{\sqrt{2}}$$

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

$$[\therefore E_1 = 4.44 f N_1 \phi_{max}] \text{ Volts} \tag{.....2.4}$$

กระแสไฟฟ้า i_1 ในขณะไม่มีโหลดเรียกว่า Magnetizing Current เพราะเป็นกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า

ให้ $i_{10} = i_{1 \text{ no-load}} = \text{Magnetizing Current}$

$$\text{MMF} \cdot M_1 = N_1 i_{10}$$

$$i_{10} = \frac{M_1}{N_1} = \frac{\phi_m \mathcal{R}}{N_1} = \frac{\mathcal{R}}{N_1} \phi_{max} \sin \omega t \tag{.....2.5}$$

เพราะว่า $E_{m1} = \omega N_1 \phi_{max}$

$$\therefore \phi_{max} = \frac{E_{m1}}{\omega N_1} \tag{.....2.6}$$

นำค่า ϕ_{\max} จากสมการ 2.6 แทนค่าลงในสมการ 2.5 จะได้

$$I_{10} = \frac{\mathcal{R}E_{m1}}{wN_1^2} \sin wt = I_{em} \sin wt \quad \dots 2.7$$

$$I_{em} = \frac{\mathcal{R}E_{m1}}{wN_1^2} \frac{E_{m1}}{I_{em}} = X_o = \frac{wN_1^2}{\mathcal{R}} \quad \dots 2.8$$

X_o = Magnetizing Reactance ซึ่งเกิดจาก ϕ_m

ค่า \mathcal{R} = ค่ารีลักแตนซ์ (Reluctance) ของวงจรแม่เหล็ก , H/m
เส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_{ll} ที่คล้องขดลวดปฐมภูมิจะทำให้เกิด Leakage Inductance

$$L_{ll} = \frac{N_1 \phi_{ll}}{I_1} \quad \text{H} \quad \dots 2.9$$

ดังนั้น Primary Leakage Reactance , X_{ll}

$$X_{ll} = w L_{ll} = 2\pi f L_{ll} \quad \dots 2.10$$

เนื่องจากกระแสไฟฟ้า i_1 เป็นกระแสสลับรูปคลื่นซายน์ จึงทำให้เกิด Hysteresis Loop ในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งจะเกิด Hysteresis และ Eddy Current Losses ทำให้เกิดความร้อนสูญเสียในแกนเหล็ก จึงต้องใช้แผ่นเหล็กบางๆ (Lamination Sheet Steel) มาอัดซ้อนกันเป็นแกนเหล็ก การใช้แกนเหล็กที่ทำด้วยแผ่นเหล็กบางมาอัดซ้อนกันนี้ จะมีผลทำให้ Manetic Flux Density น้อยกว่า เมื่อใช้แกนเหล็กแบบหล่อเป็นชิ้นเดียวกัน ดังนั้นค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Manetic Flux Density) จะเปลี่ยนแปลงตามความหนาของแผ่นเหล็กบางๆ ด้วย

$$\text{Stacking Factor} = \frac{\text{ปริมาตรของเนื้อแกนเหล็กจริง}}{\text{ปริมาตรของวงจรแม่เหล็ก}}$$

ค่าของ Stacking Factor สำหรับแผ่นเหล็กบางๆ

<u>ความหนาของแม่เหล็ก</u>	<u>ค่าของ Stacking Factor</u>
หน่วยมิลลิเมตร	
0.0127	0.5
0.254	0.75
0.508	0.85
0.10 - 0.25	0.90
0.27 - 0.36	0.95

เนื่องจากเกิด Magnetic Losses หรือ Core Losses ในหม้อแปลงไฟฟ้าจึงใช้ความต้านทาน R_c เขียนแทน Core Losses ซึ่งเสมือนมีกระแสไฟฟ้า i_{1c} ไหลวนในแกนเหล็กแล้วทำให้เกิดความร้อนสูญเสียในแกนเหล็ก

จึงสรุปได้ว่าในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีโหลด กระแสไฟฟ้า Exciting Current จะเท่ากับ

$$I_{10} = I_{1\phi} + I_{1c} \quad \dots\dots 2.11$$

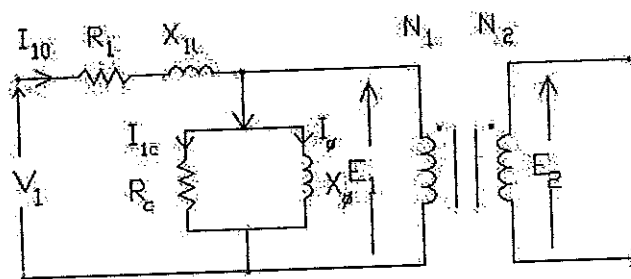
และ

$$[V_1 = E_1 + j I_{1\phi} X_{1l} + I_{1c} R_1] \quad \dots\dots 2.12$$

- เมื่อ
- I_{10} = ค่า RMS ของ Exciting Current , A
 - $I_{1\phi}$ = ค่า RMS ของ Magnetizing Current , A
 - I_{1c} = ค่า RMS ของกระแสไฟฟ้าไหลวนในแกนเหล็ก , A
 - V_1 = ค่า RMS ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ , V
 - E_1 = ค่า RMS ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิ , V
 - X_{1l} = Leakage Reactance ของขดลวดปฐมภูมิ , \square
 - R_1 = ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิ , \square

จากสมการ 2.11 และ 2.12 ทำให้สามารถเขียนแผนภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นวงจรเหมือนทางไฟฟ้า (Equivalent Circuit) ได้ดังรูป 2.16

2.2.3 Equivalent Circuit



รูป 2.16 Equivalent Circuit ของด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในขณะที่ไม่มีโหลด เส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_m จะไปคล้องขดลวดด้านทุติยภูมิ (Secondary Winding) จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induced Emf) e_2 ในขดลวดทุติยภูมินี้

$$\begin{aligned} e_2 &= N_2 \frac{d\phi_m}{dt} = N_2 \frac{d\phi_{\max} \sin \omega t}{dt} \\ &= \omega N_2 \phi_{\max} \cos \omega t \end{aligned} \quad \dots\dots 2.13$$

ดังนั้นในขณะที่ไม่มีโหลด สมการ 2.2 ทหารด้วยสมการ 2.13 จะได้

$$\left. \begin{aligned} \frac{e_1}{e_2} &= \frac{N_1}{N_2} = a \\ \text{หรือ } \frac{E_1}{E_2} &= \frac{N_1}{N_2} = a \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots 2.14$$

ค่า a = Transformation Ratio ของหม้อแปลงไฟฟ้า

N_1 = จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ

N_2 = จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ

E_1 = ค่า RMS ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

E_2 = ค่า RMS ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลด

จากรูป 2.15 ต่อสวิตช์ S_1 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้า e_2 จะทำให้กระแสไฟฟ้า i_2 ไหลผ่านโหลดที่ต่อด้านทุติยภูมิ และจะได้ mmf ในวงจรแม่เหล็กดังนี้

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \phi_m \mathcal{R} \quad \dots\dots 2.15$$

ผลต่างของ mmf ระหว่างด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิจะเท่ากับ Magnetizing mmf ที่ทำให้ได้ ϕ_m ในวงจรแม่เหล็ก นั่นคือ

$$\begin{aligned} N_1 i_1 - N_2 i_2 &= N_1 i_{1\phi} \\ N_1 (i_1 - i_{1\phi}) &= N_2 i_2 \end{aligned} \quad \dots\dots 2.16$$

ผลต่างระหว่างกระแสรวม i_1 กับ Magnetizing Current , $i_{1\phi}$ จะเท่ากับ

Load Component of Primary Current , i_{1L} คือ $i_1 = i_{1L} + i_{1\phi}$

ดังนั้นจากสมการ 2.16 จะได้

$$N_1 i_{1L} = N_2 i_2 \quad \dots\dots 2.17$$

$$\frac{i_{1L}}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad \dots\dots 2.18$$

ในกรณีที่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ (Power Transformer) กระแสไฟฟ้า Magnetizing น้อยมากเมื่อเทียบกับ i_{1L} ดังนั้นสมการ 2.18 เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{1}{a} = \frac{N_2}{N_1} \quad \dots\dots 2.19$$

ในการกำหนดหม้อแปลงไฟฟ้า จะกำหนดด้วยผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีหน่วยเป็น Volt - Ampere หรือ Apparent Power จากสมการ 2.14 และ 2.19

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{1}{a}$$

$$\text{Volt - Ampere} = E_1 I_1 = E_2 I_2 \quad \dots\dots 2.20$$

I_1 = ค่า RMS ของไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ

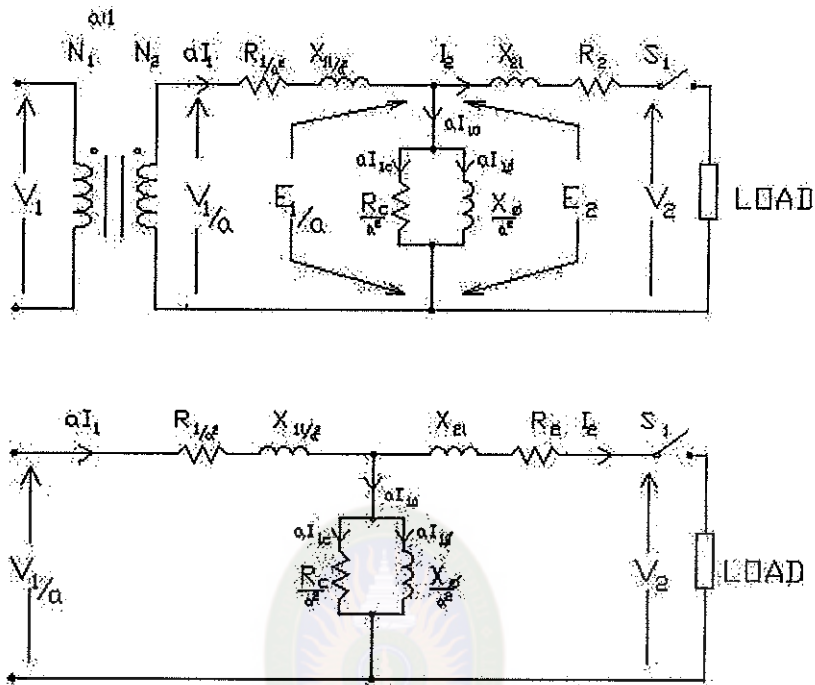
I_2 = ค่า RMS ของไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

เพราะฉะนั้น สมการแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเท่ากับ

$$V_2 = E_2 j I_2 X_{21} - I_2 R_2 \quad \dots\dots 2.21$$

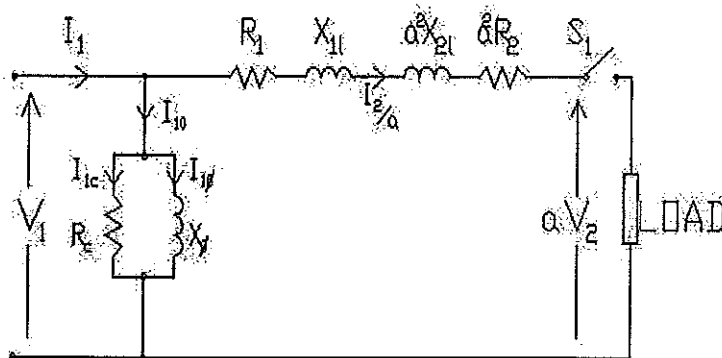
จากสมการ 2.21 สามารถเขียนวงจรเหมือนทางไฟฟ้า (Equivalent Circuit) ด้านทุติยภูมิได้ดังรูป 2.17

สมการ 2.22 หรือ 2.23 อธิบายว่า ถ้าต้องการย้ายอิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิไปยังด้านปฐมภูมิต้องคูณด้วย a^2 หรือถ้าต้องการย้ายอิมพีแดนซ์ด้านปฐมภูมิไปยังด้านทุติยภูมิ จะต้องคูณด้วย $1/a^2$



รูป 2.18 วงจรเทียบทางไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วเพื่อสะดวกในการคำนวณค่าคะแนนการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้ วงจรเทียบทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อค่าอิมพีแดนซ์อ้างอิงด้านปฐมภูมิ และย้ายวงจร Magnetization ไปไว้ด้านหน้าด้วย ดังรูป 2.19



รูป 2.19 Approximate Equivalent Circuit of Transformer เมื่อค่าอิมพีแดนซ์อ้างอิงไปด้านปฐมภูมิ