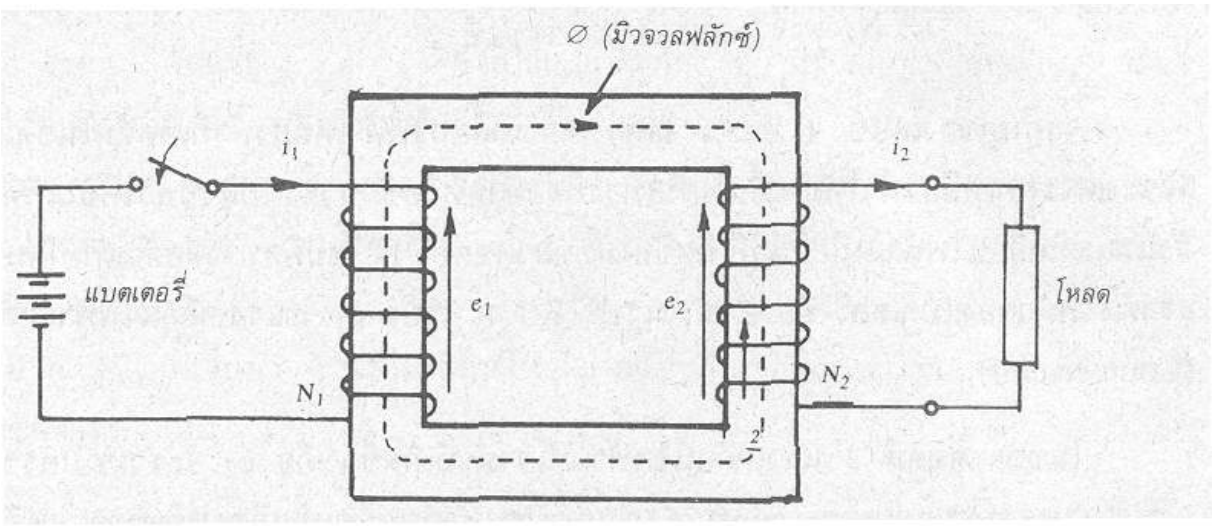
บทที่ 2
หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.1 หลักการทำงานของหม้อแปลง

หม้อแปลงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ไม่มีการเคลื่อนที่ จึงไม่มีการสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลม (การสูญเสียทางกล)

จุดมุ่งหมายการสร้างหม้อแปลงเพื่อต้องการการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปยังวงจรหนึ่งโดยอาศัยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กตัดกับขดลวดทั้งสองชุดของหม้อแปลง โดยการจัดวางตำแหน่งขดลวดทั้งสองชุดของหม้อแปลงให้อยู่ในวงจรแม่เหล็กเดียวกัน



ขดลวดชุดหนึ่งต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ขดอีกชุดหนึ่งต่อกับโหลด เมื่อสับสวิทช์วงจรมีกระแสไหลผ่านตามทิศทาง i_1 เข้าไปในขดลวด Primary เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก $\varnothing$ ขึ้นในขดลวด Primary ตามหลักการเมื่อเกิดเส้นแรงแม่เหล็กก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด Primary ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแหล่งจ่าย V_1 ที่จ่ายให้กับขด Primary เส้นแรงแม่เหล็กจะไหลผ่านไปแกนเหล็กตามทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปตัดผ่านขดลวด Secondary เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด Secondary จึงเกิดกระแส i_2 ไหลเข้าไปในโหลด ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบและอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก $\varnothing$ เราเรียกเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในแกนเหล็กนี้ว่า มิวจวลฟลักซ์ (Mutaul flux) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$e_1 = N_1 \frac{\Delta \varnothing}{\Delta t}$$

$$e_2 = N_2 \frac{\Delta \varnothing}{\Delta t}$$

N_1 = จำนวนรอบขดลวด Primary

N_2 = จำนวนรอบขดลวด Secondary

กฎของเลนส์กล่าวว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด แต่ละขดจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในทิศทางที่ต่อต้านหรือขัดขวางกับสิ่งที่ทำให้เกิดขึ้น ดังนั้น e_1 จึงมีทิศทางต่อต้านกับทิศทางของแบตเตอรี่

เรียก e_1 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อต้านในขด Primary มีทิศทางตรงข้ามกับแหล่งจ่าย V1

e_2 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อต้านในขด Secondary มีทิศทางตรงข้ามกับ Mutual Flux

หรืออาจจะเรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตนเอง (Self induced emf) ก็ได้

สังเกตว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ Mutual flux ซึ่งในขณะนี้เราต่อแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของ Mutual flux เป็นศูนย์ $\frac{\Delta\varnothing}{\Delta t} = 0$ ดังนั้นจึงไม่เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด Primary และ Secondary และไม่เกิดกระแสไหลขึ้นภายในหม้อแปลงด้วย i_2

2.2 การศึกษาการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

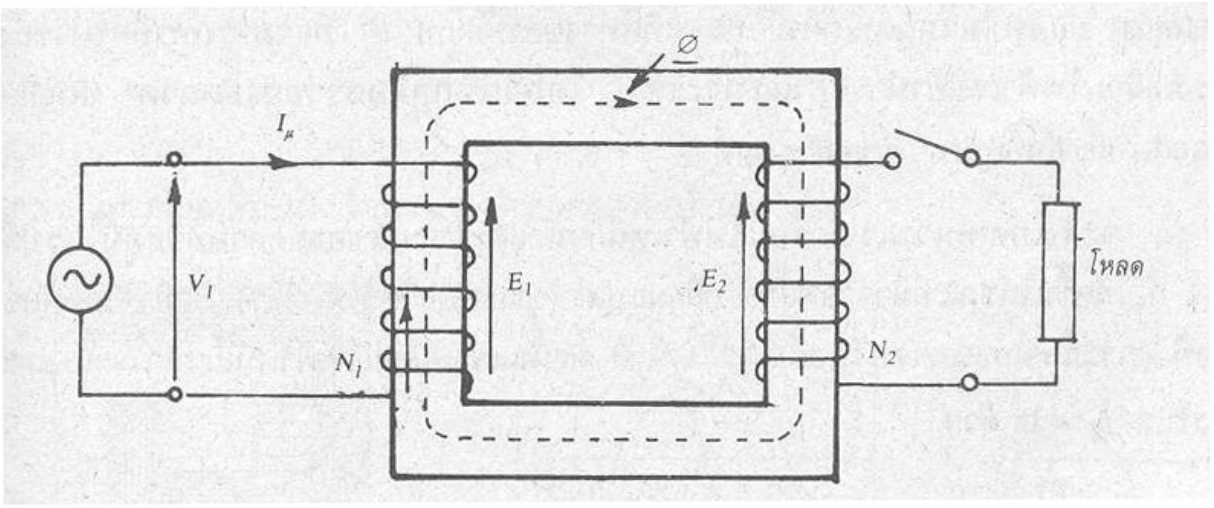
แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 แบบคือ

- หม้อแปลงในอุดมคติ
- หม้อแปลงใช้งานจริง

2.2.1 หม้อแปลงในอุดมคติ

ลักษณะของหม้อแปลงในอุดมคติคือ

- ไม่มีการสูญเสีย (No losses)
- ไม่มีความต้านทาน ไม่มีค่าความเหนี่ยวนำในขดลวด Primary และ Secondary
- ไม่มีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก (ไม่มีลีคเกจฟลักซ์)



จากรูปต่อขด Primary เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากขดลวดไม่มีค่าความเหนี่ยวนำ และในขณะนี้ไม่มีกระแสไหลด้าน Secondary เนื่องจากขดลวดเปิดวงจรอยู่

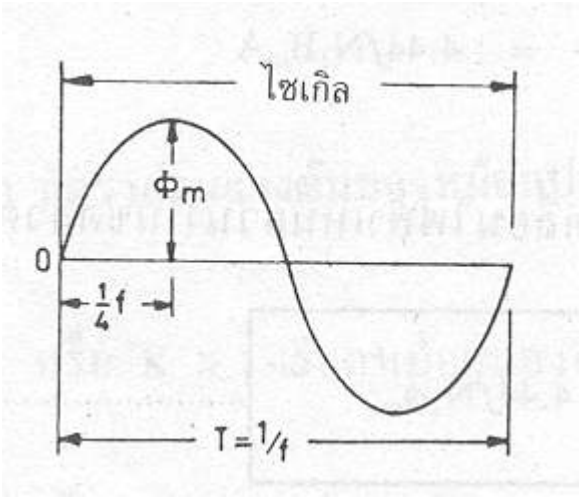
ในขณะนี้มีกระแสไหลเข้าไปในขดลวด Primary ซึ่งเป็นกระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นภายในขดลวด Primary ซึ่งจะเรียกกระแสที่ใช้ในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่า *กระแสแมกเนไตซ์* หรือ *กระแสที่สร้างฟลักซ์ (Magnetizing Current) (I_μ)* จำนวนเล็กน้อยและจะล้าหลัง V1 = 90° ไหลผ่านขดลวด Primary ซึ่งทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นในขดลวด Primary เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ I_μ และเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตนเอง E_1 ขึ้นภายในขดลวด Primary ด้วย ซึ่งจะมีทิศทางตรงข้ามกับแหล่งจ่าย V_1

ในทำนองเดียวกันก็จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปในแกนเหล็กตามทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขด Primary E_1 ไปตัดกับขดลวดด้าน Secondary ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด Secondary (E_2) เรียกแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นในขดลวด Secondary E_2 นี้ว่า มิวจวลอินดิวซ์ อี.เอ็ม.เอฟ (Mutual induced emf) และมีทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็ก (Mutual flux) E_2 มีสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (∅) และจำนวนรอบของขดลวด Secondary

2.2.2 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า (e.m.f. equation)

กำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

N_1	=	จำนวนรอบของขดลวด Primary	รอบ
N_2	=	จำนวนรอบของขดลวด Secondary	รอบ
$\varnothing_m$	=	ค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก (ฟลักซ์) (Maximum flux)	เวเบอร์
	=	B_m . A	
B_m	=	ค่าสูงสุดของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนหม้อแปลง	เวเบอร์/ม^2
A	=	พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กหม้อแปลง	ม^2
f	=	ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า V_1	Hz



เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด $\varnothing_m$ เกิดขึ้นในเวลา $\frac{1}{4}$T วินาที

จาก $T = \frac{1}{f}$ ดังนั้น เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด $\varnothing_m$ เกิดขึ้นในเวลา $\frac{1}{4}.\frac{1}{f} = \frac{1}{4f}$ วินาที

ค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด $\varnothing_m$ $= \frac{\varnothing_m}{\frac{1}{4f}}$ [Wb/s]

$= 4.f.\varnothing_m$ [Wb/s]

ค่าที่ได้เป็นค่าที่เกิดเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด $\varnothing_m$ ต่อรอบของการเกิดรูปคลื่นไซน์ ซึ่งก็เป็นผลทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฉลี่ย / รอบ $= 4.f.\varnothing_m$ [V]

ในการใช้งานจริงต้องใช้ค่า rms ในการคำนวณ

จากความสัมพันธ์ของค่า E_m , E_{av} , E_{rms}

$E_{av} = 0.636\ E_m$

$E_{rms} = 0.707\ E_m$

ดังนั้น $E_m = \frac{E_{av}}{0.636} = \frac{E_{rms}}{0.707}$

$\therefore\ E_{rms} = \frac{E_{av}}{0.636} x 0.707$

$= 1.11\ E_{av}$

$\therefore$ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ / รอบ $= 1.11 \times 4.f.\varnothing_m$

$= 4.44.f. .\varnothing_m$

ค่า rms ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขด Primary = (แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ / รอบ) x จำนวนรอบทางด้าน Primary

$$E_1 = 4.44.f. .\varnothing_m \text{ x } N_1 \quad [V]$$

ในทำนองเดียวกันแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทางด้าน Secondary

$$E_2 = 4.44.f. .\varnothing_m \text{ x } N_2 \quad [V]$$

หม้อแปลงในอุดมคติในสภาวะไร้โหลด

V_1 = แรงดันไฟฟ้าด้าน Primary หรือแรงดันที่ป้อน [V]

V_2 = แรงดันไฟฟ้าด้าน Secondary [V]

E_1 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขด Primary [V]

E_2 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขด Secondary [V]

เนื่องจากเป็นหม้อแปลงในอุดมคติไม่มีการสูญเสียในหม้อแปลง ดังนั้นจึงมีผลทำให้

$$V_1 = E_1$$

$$V_2 = E_2$$

2.2.3 อัตราส่วนของหม้อแปลง (Transformer Ratio)

- อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง (Voltage Transformer Ratio)
- อัตราส่วนกระแสของหม้อแปลง (Current Transformer Ratio)

จากสมการ

$$E_1 = 4.44.f. .\varnothing_m \text{ x } N_1$$

$$E_2 = 4.44.f. .\varnothing_m \text{ x } N_2$$

เมื่อนำเอา E_1 / E_2

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44.f.\varnothing_m.N_1}{4.44.f.\varnothing_m.N_2}$$

จะได้

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

เมื่อ $V_1 = E_1$, $V_2 = E_2$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงในอุดมคติ

Power Input = Power Output

VA = VA

$V_1I_1 = V_2I_2$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = a$$

อัตราส่วนกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้า

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า (a)มีค่าเท่ากับ

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

2.2.4 หม้อแปลงที่ใช้ในงานจริง (Actual Transformer)

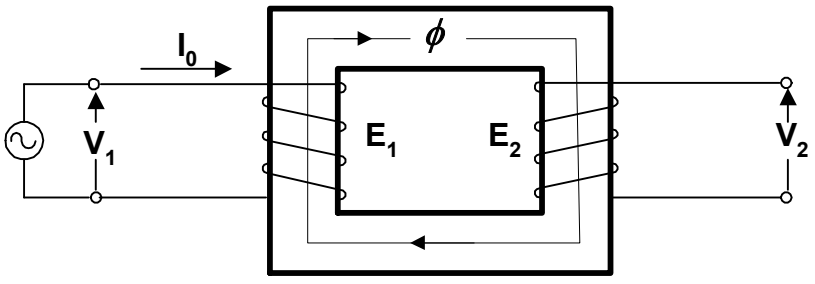
หม้อแปลงที่ใช้ในงานจริงจะพิจารณาค่าความต้านทานของขดลวดทั้งสองชุด ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Losses) การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ในแกนเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียที่เกิดจากลีคเกจฟลักซ์

พิจารณาการทำงานของหม้อแปลงที่ใช้ในงานจริงเป็นสองกรณี คือ

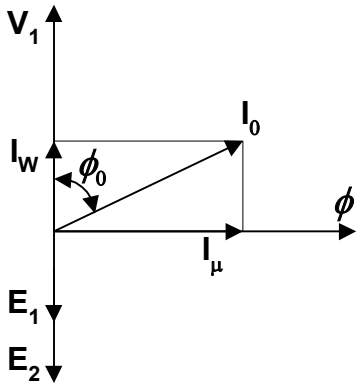
1) หม้อแปลงเมื่อไร้โหลด (No Load)

2) หม้อแปลงเมื่อมีโหลด (On Load)

2.2.4.1 หม้อแปลงเมื่อไร้โหลด (Transformer on No - Load)



หม้อแปลงเมื่อไร้โหลด



เฟสเซอร์ไดอะแกรม

ก) กระแสใช้งาน หรือ กระแสส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron Loss) ; I_w

$$I_w = I_0 \cos \theta_0$$

ข) กระแสที่ใช้สร้างฟลักซ์ หรือ กระแสแมกเนไตซ์ ; $I\mu$

$$I\mu = I_0 \sin \theta_0$$

จะเห็นว่า กระแส I_0 คือ ผลบวกทางเวคเตอร์ของ I_w และ $I\mu$

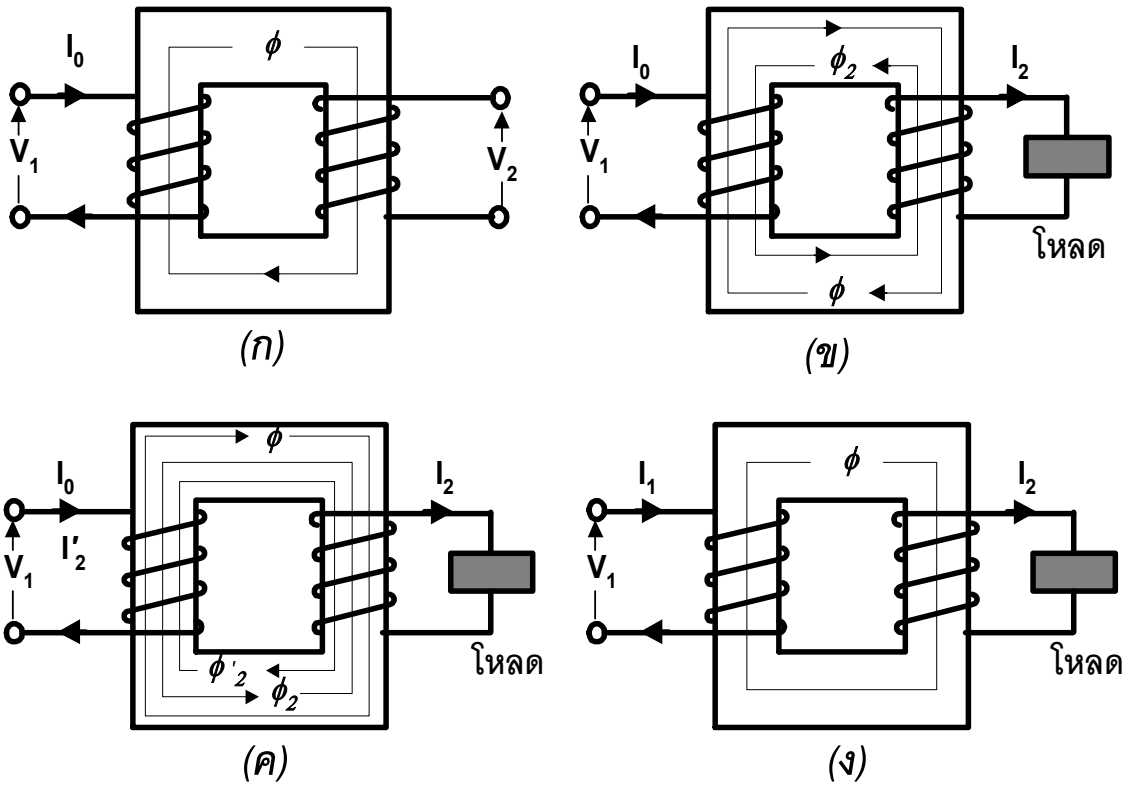
ดังนั้น $$I_0 = \sqrt{(I_\mu^2 + I_w^2)}$$

กำลังอินพุทเมื่อไร้โหลด

$$P_0 = V_1 I_0 \cos \theta_0 \quad \text{.....} \text{ W.}$$

$\cos \theta_0$ เป็น เพาเวอร์แฟคเตอร์ด้านปฐมภูมิเมื่อไร้โหลด

2.2.4.2 หม้อแปลงเมื่อมีโหลด (Transformer on Load)



ก) เมื่อไร้โหลดกระแสด้านปฐมภูมิ คือ I_0 ฟลักซ์ในแกนเหล็กมีแต่ $\varnothing$

ข) เมื่อจ่ายโหลด กระแสด้านทุติยภูมิ คือ I_2 ทำให้เกิดฟลักซ์ $\varnothing_2$ ขึ้นสวนทางกับเมนฟลักซ์ $\varnothing$

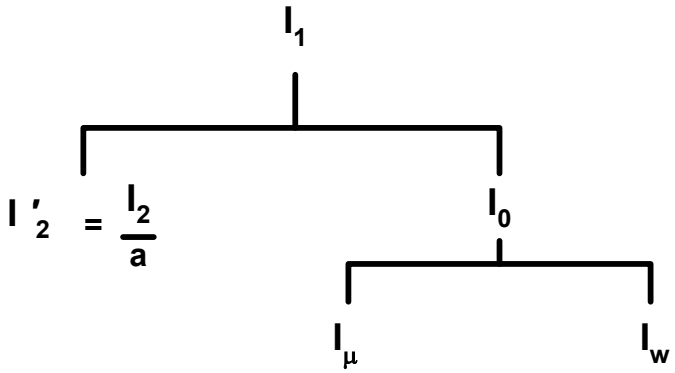
ค) ขณะที่เมนฟลักซ์ $\varnothing$ ลดลง ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้าน E_1 ลดลง เกิดกระแส I'_2 ไหลเพิ่มขึ้นในขดลวดปฐมภูมิ เป็นเหตุให้เกิดฟลักซ์ $\varnothing'_2$ มีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกับ ฟลักซ์ $\varnothing_2$ จึงหักร้างกัน

ง) ฟลักซ์ในแกนเหล็กจึงเหลือเพียง $\varnothing$ เช่นเดียวกับรูปที่ ก. แต่กระแสด้านปฐมภูมิเปลี่ยนจาก I_0 เป็น I_1 ซึ่ง $\vec{I}_1 = \vec{I}_o + \vec{I}'_2$ โดยกระแสโหลดด้านทุติยภูมิคือ I_2

ขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลด กระแสทางด้านปฐมภูมิจึงประกอบด้วยกระแสสองส่วน คือ I_0 และ I'_2 ซึ่งมีเฟสตรงข้ามกับ I_2 และขนาดของกระแส I'_2 หาได้จากสมการ

$$I'_2 = \frac{I_2}{a}$$

องค์ประกอบของกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



2.3 หม้อแปลงเมื่อคำนึงถึงค่าความต้านทานของขดลวด (Transformer with winding resistance)

หม้อแปลงในอุดมคติ เราสมมติว่าขดลวดไม่มีค่าความต้านทาน แต่หม้อแปลงที่ใช้งานจริงนั้น ขดลวดทั้งสองชุดจะมีค่าความต้านทานอยู่และเนื่องจากค่าความต้านทานดังกล่าว จึงทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) คร่อมความต้านทานของขดลวดทั้งสองชุด คือ

ก) ด้านปฐมภูมิ สมการของแรงดันนี้คือ

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 \qquad \text{(ผลรวมทางเวคเตอร์)}$$

หรือ $$E_1 = V_1 - I_1 R_1 \qquad \text{(ผลต่างทางเวคเตอร์)}$$

ข) ด้านทุติยภูมิ สมการของแรงดันคือ

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 \qquad \text{(ผลรวมทางเวคเตอร์)}$$

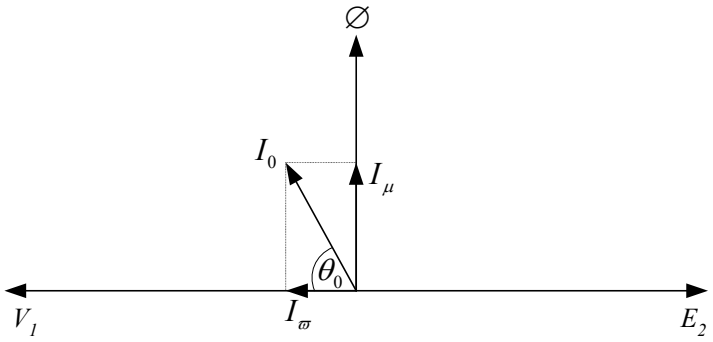
หรือ $$V_2 = E_2 - I_2 R_2 \qquad \text{(ผลต่างทางเวคเตอร์)}$$

2.4 เวคเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้า

การพิจารณาเวคเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้ *2* กรณีคือ

1. ในสภาวะหม้อแปลงไร้โหลด *(No Load)*
2. ในสภาวะหม้อแปลงจ่ายโหลด *(On Load)*

2.4.1 เวคเตอร์ไดอะแกรมในสภาวะหม้อแปลงไร้โหลด (No Load)



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

$$I_\varpi = I_0 \cos\theta_0$$

$$I_0 = \sqrt{I_0^{\,2} + I_\varpi^{\,2}}$$

2.4.2 เวคเตอร์ไดอะแกรมในสภาวะหม้อแปลงมีโหลด (On Load)

เมื่อหม้อแปลงต่อเข้ากับโหลดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะมีกระแส I_2 ไหลผ่านขดลวด *Secondary* ขนาดและทิศทางของ I_2 จะขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของโหลด ซึ่งมี 3 ชนิดคือ

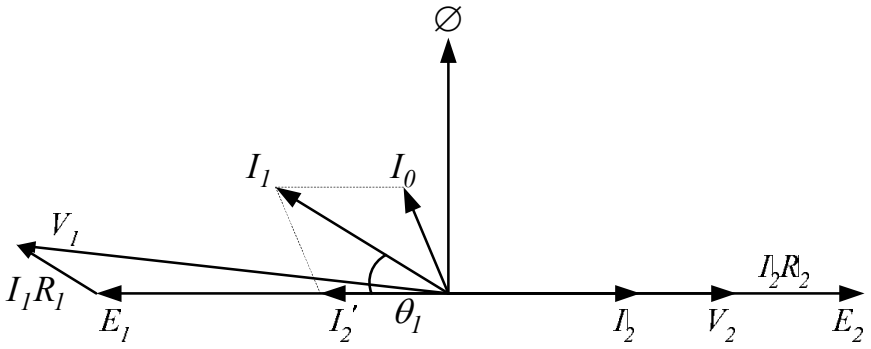
1. โหลดที่เป็นความต้านทาน หรือรีซีสตีฟโหลด *(Resistive load, R)* ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เป็นหนึ่ง *(Unity p.f.)* กระแส I_2 จะอินเฟส *(Inphase)* กับ V_2

2. โหลดที่เป็นขดลวด หรืออันดัคตีฟโหลด *(Inductive load, L)* หรือ $R+L$ หรือโหลดที่มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลัง *(Lagging p.f.)* กระแส I_2 จะล้าหลัง *(Lagging)* กับ V_2 เป็นมุม θ_2

3. โหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์ หรือคาปาซิตีฟโหลด *(Capacitive load , C)* หรือ $R+C$ หรือโหลดที่มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์นำหน้า *(Leading p.f.)* กระแส I_2 จะนำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว V_2 เป็นมุม θ_2

1. โหลดที่เป็นความต้านทาน หรือรีซีสตีฟโหลด *(Resistive load, R)*

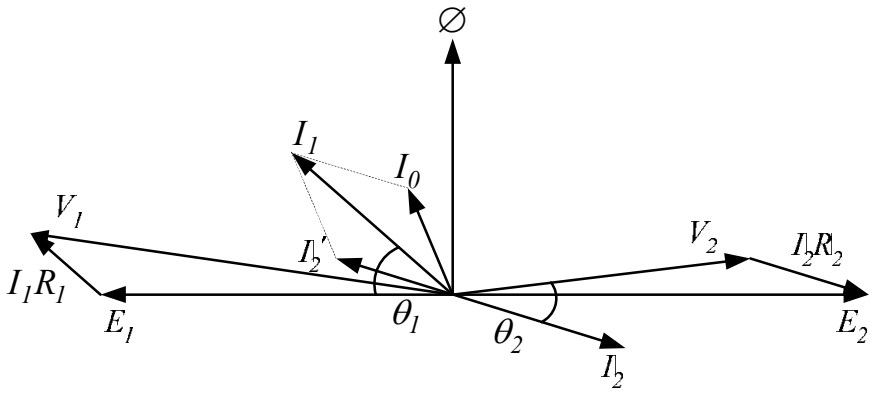
ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เป็นหนึ่ง *(Unity p.f.)* กระแส I_2 จะอินเฟส *(Inphase)* กับ V_2



$$V_1 = E_1 + I_1R_1 \qquad E_2 = V_2 + I_2R_2$$

2. โหลดที่เป็นขดลวด หรืออันดัคตีฟโหลด *(Inductive load, L)* หรือ *R+L*

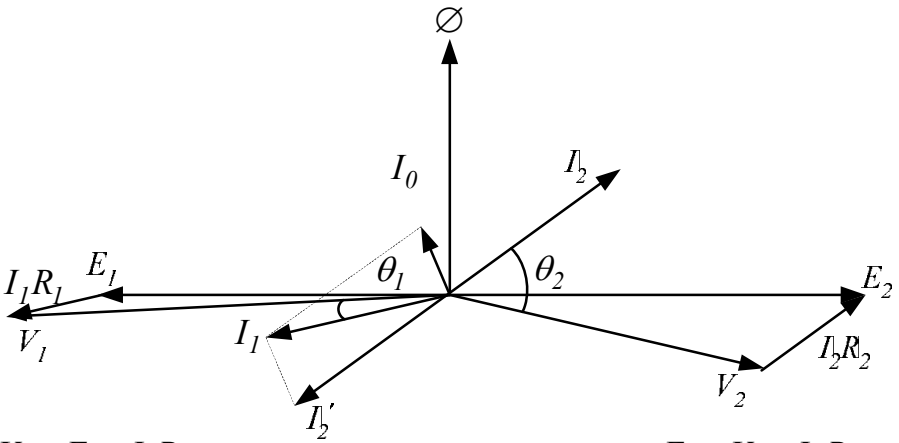
หรือโหลดที่มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลัง *(Lagging p.f.)* กระแส I_2 จะล้าหลัง *(Lagging)* กับ V_2 เป็นมุม θ_2



$V_1 = E_1 + I_1R_1$ $\qquad$ $E_2 = V_2 + I_2R_2$

3. โหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์ หรือคาปาซิตีฟโหลด *(Capacitive load , C)*

หรือ $R+C$ หรือโหลดที่มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์นำหน้า *(Leading p.f.)* กระแส I_2 จะนำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว V_2 เป็นมุม θ_2



$V_1 = E_1 + I_1R_1$ $\qquad$ $E_2 = V_2 + I_2R_2$