

## บทที่ 2

# วงจรฮาร์ฟบริดจ์เรโซแนนซ์อินเวเตอร์แบบอนุกรม และหลักการควบคุม

### 2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ในปี 1831 Faraday ได้ทำการทดลองและค้นพบความจริงเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงผ่านขดลวดนั้นไปมา ต่อมา Lenz ได้ทำการศึกษาและสรุปเป็นกฎดังต่อไปนี้

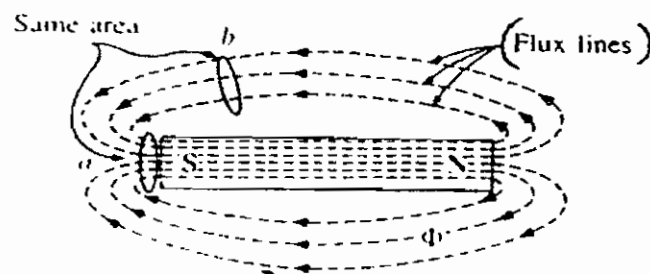
กฎข้อที่ 1 Lenz's Law กล่าวว่า ในวงจรปิดใด ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสในวงจร ย่อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในวงจรมานั้น โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสในวงจร ๆ

กฎข้อที่ 2 Faraday's Law กล่าวว่า การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของขดลวดหรือ loop อันหนึ่งนั้น เป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบขดลวดนั้น ๆ หรือการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของแท่งตัวนำอันหนึ่งนั้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการที่ตัวนำตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กนั้น ๆ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (2.1)$$

#### 2.1.1 สนามแม่เหล็ก ( Magnetic field )

บริเวณรอบ ๆ แท่งแม่เหล็กถาวร ( Permanent magnet ) จะมีเส้นแรงแม่เหล็ก ( Magnetic Flux Lines ) กระจายอยู่รอบ ๆ โดยวิ่งจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็ก บริเวณที่มีแรงแม่เหล็กนี้เรียกว่า สนามแม่เหล็ก ( Magnetic Field ) ความเข้มสนามแม่เหล็ก ( Magnetic Field Strength ) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อบริเวณพื้นที่



รูปที่ 2.1 สนามแม่เหล็กรอบๆ แท่งแม่เหล็ก

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux density )

$$B = \Phi/A \quad (2.2)$$

เมื่อ  $B =$  Magnetic Flux density (Tesla ,Wb/m<sup>2</sup>)

$\Phi =$  Magnetic Flux (Wb)

$A =$  พื้นที่หน้าตัดที่เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่าน (m<sup>2</sup>)

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

สนามแม่เหล็กรอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหล

ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ (Conductor) จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนั้น ลักษณะนี้เรียกว่าแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet)



กฎ Ampere's Right – Hand Rule เป็นกฎที่ทำให้ทราบทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน โดยให้นิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำและนิ้วทั้งสี่จะแสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำนั้น สนามแม่เหล็กในขดลวด

ถ้ามีขดลวดที่มีจำนวนรอบ 1 รอบ และมีกระแสไหลไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทาง ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งออกผ่านศูนย์กลางของขดลวด ถ้าถ้าขดลวดมีจำนวนรอบมาก ลักษณะทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นดัง รูปที่ 2.2

ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กทราบได้จากกฎมือขวา Cork Srew's Rule ดังรูปที่ 2.2 นิ้วทั้งสี่ชี้ทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก

### 2.1.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก ( Magnetomotive Force , MMF )

ถ้าขดลวดมีจำนวนรอบ  $N$  รอบ พันรอบแกนแม่เหล็ก และมีกระแสไฟฟ้า  $I$  แอมแปร์ ไหลผ่านในขดลวดจะเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก MMF ขึ้นและ MMF นี้จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก

$$\text{MMF} = NI \quad \text{Ampere-turn} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\text{MMF} =$  แรงเคลื่อนไฟฟ้า (A-t)

$N =$  จำนวนรอบขดลวด (t)

$I =$  กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด (A)

Magnetic Force (  $H$  ) คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหน่วยความยาวของวงจรมแม่เหล็ก

$$H = NI/l \quad (2.4)$$

เมื่อ  $H =$  แรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหน่วยความยาวของวงจรมแม่เหล็ก (A-t/m)

$l =$  ความยาวเฉลี่ยของวงจรมแม่เหล็ก (m)

$N =$  จำนวนรอบของขดลวด (turn)

Permeability ปริมาณความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ,  $B$  ขึ้นอยู่กับ Magnetizing Force ในสารแต่ละชนิดที่มี Magnetizing Force เท่ากัน จะให้ค่า Magnetic Flux Density ไม่เท่ากันทั้งนี้เพราะคุณสมบัติของสารนั้น ในสารแต่ละชนิด

$$B = \mu H \quad (2.5)$$

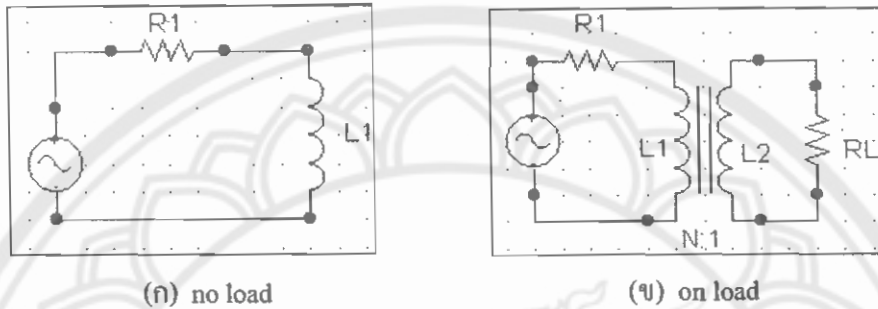
สารที่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ดีจะเป็นพวก Magnetic Materials ซึ่งจะทำให้ค่า Permeability (  $\mu$  ) มีค่าสูงมาก ดังนั้น ค่า Permeability จะแสดงความสามารถของสารในการนำเส้นแรงแม่เหล็กของสารแต่ละชนิด

### 2.1.3 ความเหนี่ยวนำ ( Inductance )

หลักการ คือ เมื่อเราป้อนไฟกระแสสลับที่มีความถี่สูง ๆ ให้ขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนในภาชนะ แล้วจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน

$$L = N\Phi_{ca} / I_{ca} \quad (2.6)$$

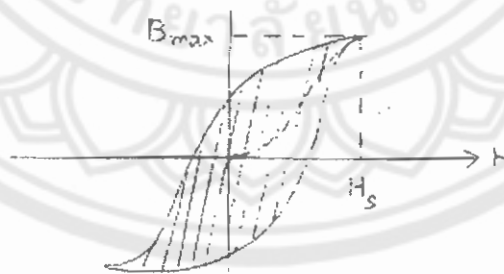
- เมื่อ  $L$  = ความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น  
 $N$  = จำนวนรอบของขดลวด  
 $\Phi_{e}$  = ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นโดย  $I_{e}$   
 $I_{e}$  = กระแสไหลวน



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของขดลวด

#### 2.1.4 การสูญเสียในแกนแม่เหล็ก (Magnetic Core Loss)

การสูญเสียในแกนแม่เหล็ก ก็คือ พื้นที่ภายใน Hysteresis Loop ซึ่งจะแสดงพลังงานที่สูญเสียในรูปของความร้อน การสูญเสียเกิดความร้อนในแกนแม่เหล็ก จะเกิดขึ้นในกรณีที่เกิดมี Hysteresis Loop คือ หมายความว่า จะต้องมีการเปลี่ยนแปลง  $H$  และ  $B$  ตลอดเวลานั้นเอง ลักษณะนี้ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้า  $I$  ที่ไหลในขดลวดจะต้องเปลี่ยนแปลงไปมาตลอดเวลา ซึ่งก็คือ กระแสไฟฟ้า  $I$  นี้เป็นกระแสไฟฟ้าสลับจึงจะทำให้เกิด Hysteresis Loop ขึ้น



รูปที่ 2.4 Hysteresis Loop

ถ้าพื้นที่ภายใน Loop มาก ความร้อนที่เกิดในแกนแม่เหล็กก็จะมาก ปริมาณความร้อนที่สูญเสีย Hysteresis Loop เท่ากับ

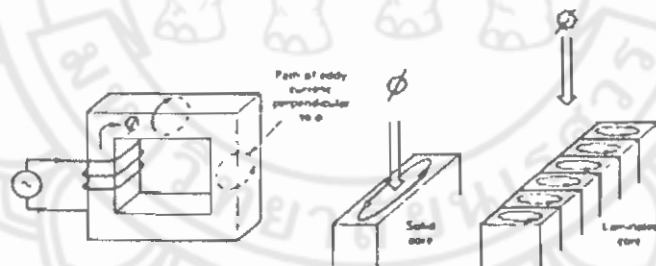
$$P_h = \mu_h V f B_{max}^2 \quad \text{Watt} \quad (2.7)$$

- เมื่อ  $V$  = ปริมาตรของสารแม่เหล็ก  $m^3$   
 $\mu_h$  = Hysteresis constant ขึ้นอยู่กับพื้นที่ภายใน Loop  
 $n$  = ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองมีค่าประมาณระหว่าง 1.5 – 2.5  
 $f$  = ค่าความถี่กระแสไฟฟ้า Hz  
 $B_{max}$  = ค่าสูงสุด Magnatic Flux Density Wb

### 2.1.5 eddy current loss

Eddy current เป็นกระแสไฟฟ้าไหลวนที่เกิดขึ้นในเนื้อเหล็กของแกนแม่เหล็ก ถ้าใส่กระแสไฟฟ้าสลับ  $I$  ให้แก่ขดลวดจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตามปริมาณกระแสไฟฟ้า ปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า ( Electromotive force , EMF ) และมีกระแสไหลวนในเนื้อเหล็กของแกนแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าที่ไหลวนในเนื้อเหล็กนี้จะทำให้เกิดความร้อนในแกนเหล็ก และเรียกกระแสดังกล่าวนี้ว่า Eddy current

ถ้าต้องการให้กระแส Eddy current น้อยลง จะต้องลดพื้นที่หน้าตัดของเนื้อเหล็กโดยใช้แผ่นเหล็กบาง ๆ ( thin Lamination Steels ) มาซ้อนกันเป็นแกนเหล็กซึ่งจะทำให้มีความต้านทานสูงมาก และต้านทานกระแส Eddy current ให้น้อยลง



รูปที่ 2.5 การใช้เหล็กบาง ๆ มาซ้อนอัดเป็นแกนแม่เหล็ก

จากรูปแสดงให้เห็นว่า กระแส Eddy current จะเกิดในลักษณะไหลวนตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก

ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากกระแสไฟฟ้า Eddy current เท่ากับ

$$P_e = \mu_c (B_{max} t f)^2 \quad W/m^3 \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\mu_c$  = ค่าคงที่สารที่ทำแกนแม่เหล็ก

$t$  = ความหนาของแผ่นเหล็กบางแต่ละแผ่นที่มาอัดซ้อนกันเป็นแกนแม่เหล็ก , m

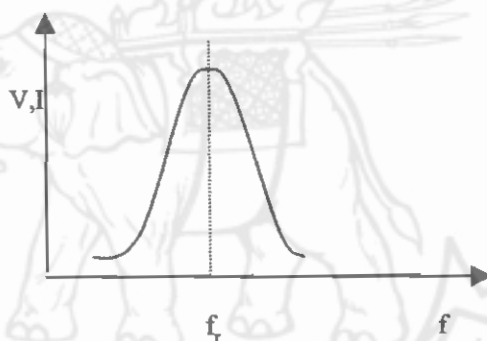
$f$  = ความถี่กระแสไฟฟ้า  $I$  ที่ไหลในขดลวด

$B_{max}$  = ค่าสูงสุดของ Magnetic Flux Density , Wb

โดยทั่วไป จะรวมเรียก Hysteresis Loss และ Eddy current ว่า Magnetic Core Loss ซึ่งการสูญเสียนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่กระแสไฟฟ้าในขดลวดเป็นกระแสสลับเท่านั้น

## 2.2 หลักการเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์ประกอบด้วยองค์ประกอบที่เป็น R, L และ C โดยมีคุณลักษณะการตอบสนองเชิงความถี่ ตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งเรโซแนนซ์

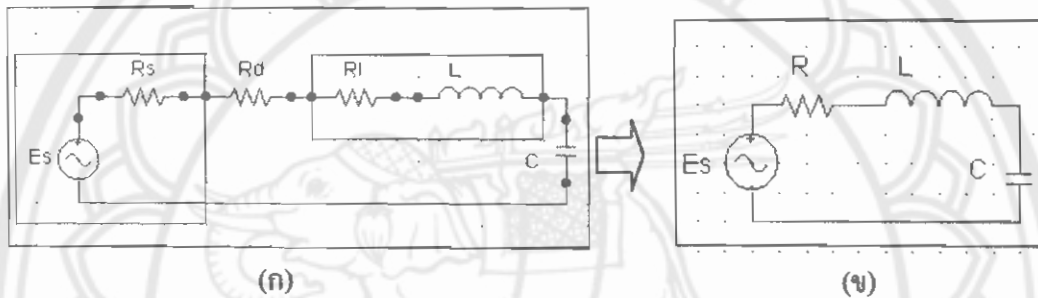
จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าการตอบสนองสูงสุดที่ความถี่  $f_r$  และจะมีการตอบสนองลดลงเมื่อความถี่เปลี่ยนไปทางซ้ายหรือขวาของความถี่นี้ เครื่องรับวิทยุหรือโทรทัศน์จะมีเส้นโค้งการตอบสนองสัญญาณแต่ละสถานีที่ส่งสัญญาณตามที่ระบุในรูปที่ 2.6 เมื่อเครื่องรับตั้งหรือจูนวงจรเรโซแนนซ์ให้มีความถี่ตรงกับสถานีที่ส่ง นั่นคือการจูนวงจรเรโซแนนซ์ของเครื่องรับให้มีความถี่ตรงกันหรือใกล้เคียงกับ ความถี่  $f_r$  ของรูปที่ 2.6 กระบวนการจูนความถี่ที่ได้กล่าวมานี้จึงมีคำศัพท์เกี่ยวกับ วงจรจูน (tuned circuit) เกิดขึ้น เมื่อมีการจูนความถี่จนทำให้มีการตอบสนองสัญญาณสูงสุดที่ความถี่  $f_r$  เราจะเรียกความถี่  $f_r$  ว่า ความถี่เรโซแนนซ์

เรโซแนนซ์ของวงจรไฟฟ้าต้องประกอบด้วยอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ นอกจากนี้จะปรากฏความต้านทานอยู่ด้วยเสมอ เนื่องจากไม่สามารถสร้างอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ให้เป็นองค์ประกอบที่บริสุทธิ์ได้ หรือเพิ่มความต้านทานเข้าไปในวงจรเพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมรูปร่างของเส้นโค้งเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์มีอยู่ 2 ชนิดได้แก่ วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม และวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งเราจะเสนอมงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมเฉพาะที่เราใช้เท่านั้น

#### วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance Circuit)

วงจรเรโซแนนซ์ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน จะต้องมียอดประกอบที่เป็นอินดักทีฟและคาปาซิทีฟ ส่วนองค์ประกอบที่เป็นความต้านทานก็จะปรากฏอยู่ด้วย เนื่องจากความต้านทานของแหล่งจ่าย ( $R_s$ ) ความต้านทานภายในของอินดักเตอร์ ( $R_l$ ) หรือความต้านทานที่เพิ่มเข้าไปเพื่อใช้ในการควบคุมรูปร่างของเส้นโค้งตอบสนอง ( $R_{design}$ ) โดยรูปแบบพื้นฐานของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 (ก) ส่วนรูปที่ 2.7 (ข) ได้รวมความต้านทานทั้งหมดให้เป็นความต้านทานรวมค่าเดียว นั่นคือ



รูปที่ 2.7 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

$$R = R_s + R_l + R_d \quad (2.9)$$

อิมพีแดนซ์รวมของวงจรที่ความถี่ใด ๆ คือ

$$Z_T = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) \quad (2.10)$$

เรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออินดักทีฟรีแอกแตนซ์ มีค่าเท่ากับคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์  
หรือ

$$X_L = X_C \quad (2.11)$$

หรือกล่าวได้ว่าเทอมรีแอกแตนซ์ในสมการของอิมพีแดนซ์รวมมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นอิมพีแดนซ์รวมในขณะที่จะเกิดเรโซแนนซ์จะมีค่าเป็น

$$Z_T = R \quad (2.12)$$

ซึ่งจะได้อิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ  $Z_T$  ที่ความถี่ใด ๆ และตัวห้อย  $s$  เป็นการระบุว่าป็นเงื่อนไขของเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

สำหรับความถี่เรโซแนนซ์สามารถหาได้จากเทอมอินดักแตนซ์ และคาปาซิแตนซ์ตามสมการที่

เมื่อ  $X_L = X_C$  (2.13)

หรือ  $\omega L = 1 / \omega C$  (2.14)

และ  $\omega^2 = 1 / LC$  (2.15)

ดังนั้น  $\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  (2.16)

หรือ  $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  (2.17)

เมื่อ  $f_s$  มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

$L$  มีหน่วยเป็นเฮนรี่ (H)

$C$  มีหน่วยเป็นฟารัด (F)

กระแสที่ไหลผ่านในวงจรขณะเกิดเรโซแนนซ์คือ

$$I = E \angle 0^\circ / R \angle 0^\circ = E/R \angle 0^\circ \quad (2.18)$$

จะเห็นได้ว่านี่คือกระแสสูงสุด เมื่อจ่ายแรงดัน  $E$  และ  $Z_T = R$  ซึ่งมีค่าต่ำสุด นอกจากนี้แรงดันและกระแสในวงจรที่เกิดเรโซแนนซ์จะมีเฟสเดียวกันหรือมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับหนึ่ง

เมื่อกระแสที่ไหลผ่านอินดักเตอร์และคาปาซิเตอร์มีค่าเท่ากัน ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมอินดักเตอร์และคาปาซิเตอร์ขณะที่เกิดเรโซแนนซ์จะมีขนาดเท่ากัน แต่มีมุมเฟสต่างกัน  $180^\circ$  โดยที่

$$V_L = IX_L = (I \angle 0^\circ)(X_L \angle 90^\circ) = IX_L \angle 90^\circ \quad (2.19)$$

$$V_C = IX_C = (I \angle 0^\circ)(X_C \angle -90^\circ) = IX_C \angle -90^\circ \quad (2.20)$$

มุมเฟส

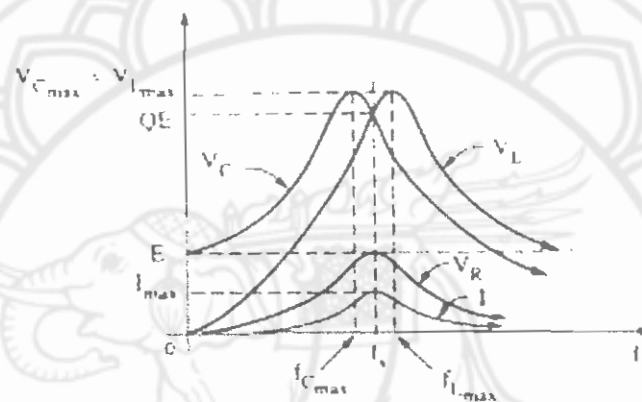
ต่างกัน  $180^\circ$



และเมื่อ  $X_L = X_C$  คั้งนั้น

$$V_{Ls} = V_{Cs} \quad (2.21)$$

แรงดัน  $V_R, V_L, V_C$  และ  $I$  สามารถพล็อตได้เส้นโค้งที่สัมพันธ์กับความถี่บนแกนเดียวกัน  
ได้คั้งนี้



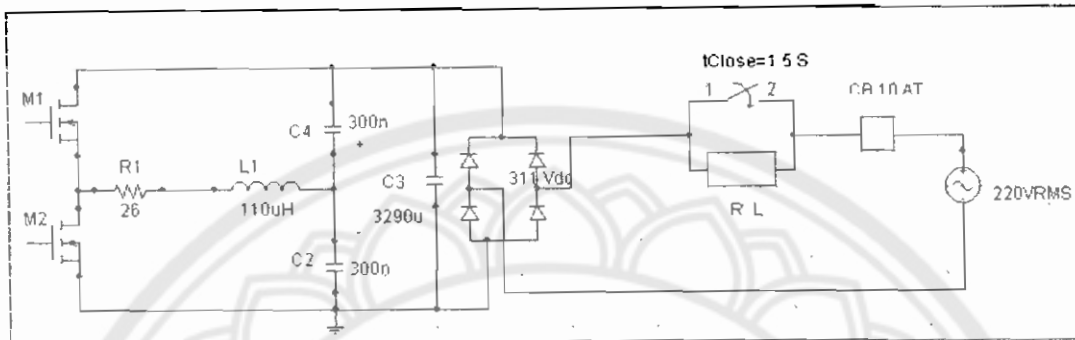
รูปที่ 2.8 เส้นโค้งแรงดัน  $V_R, V_L, V_C$  และกระแส  $I$  กับความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า เส้นโค้ง  $V_R$  จะมีรูปร่างเหมือนกับเส้นโค้ง  $I$  และค่าสูงสุดจะเท่ากับขนาดของแรงดันขาเข้า  $E$  ส่วนเส้นโค้ง  $V_C$  เริ่มเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จากค่าเท่ากับแรงดันขาเข้า เนื่องจากที่ความถี่เท่ากับศูนย์ รีแอกแตนซ์ของ คาปาซิเตอร์จะมีค่าเป็นอนันต์ (เหมือนกับคาปาซิเตอร์เปิดวงจร) และที่ความถี่เดียวกันนี้ รีแอกแตนซ์ของอินดักเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ (ลัดวงจร) เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น เทอม  $1/\omega C$  ของสมการ  $V_C = IX_C = I(1/\omega C)$  ซึ่งจะมีค่าน้อยลง แต่กระแส  $I$  จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่เร็วกว่าการลดลงของ  $1/\omega C$  ด้วยเหตุนี้  $V_C$  จึงมีค่าเพิ่มขึ้นและเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อสู่สภาวะเรโซแนนซ์ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสจะลดลง นอกจากนี้เทอม  $1/\omega C$  ก็จะลดลงไปตามการเพิ่มขึ้นของความถี่ จึงเป็นจุดที่เริ่มต้นการลดขนาดลงทั้ง  $I$  และ  $V_C$  โดยค่าของ  $V_C$  จะเกิดขึ้นที่ความถี่ก่อนความถี่เรโซแนนซ์ หลังจากความถี่เรโซแนนซ์ทั้งขนาดของ  $I$  และ  $V_C$  จะลดลงเข้าใกล้ศูนย์

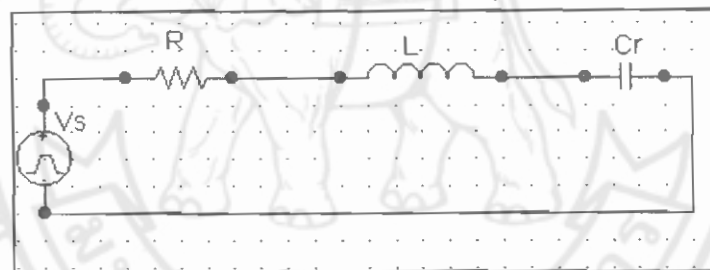
ซึ่งสาเหตุที่เลือกใช้เรโซแนนซ์แบบอนุกรมก็เพราะว่าวงจรอนุกรมนั้นสัญญาณจะผ่านได้สูงสุด ซึ่งถ้าเป็นวงจรขนานสัญญาณจะผ่านได้ต่ำสุด

## 2.3 หลักการทำงานพื้นฐานของวงจร

หลักการทำงานของวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ วงจรเรกติไฟเออร์ และวงจรควบคุมกระแสเริ่มต้น



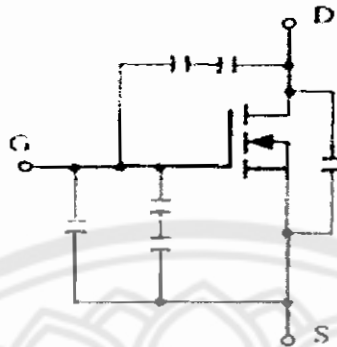
รูปที่ 2.9 วงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ วงจรเรกติไฟเออร์ และวงจรควบคุมกระแสเริ่มต้น



รูปที่ 2.10 วงจรเทียบเท่าของวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ วงจรเรกติไฟเออร์ และวงจรควบคุมกระแส

จากรูปวงจรสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

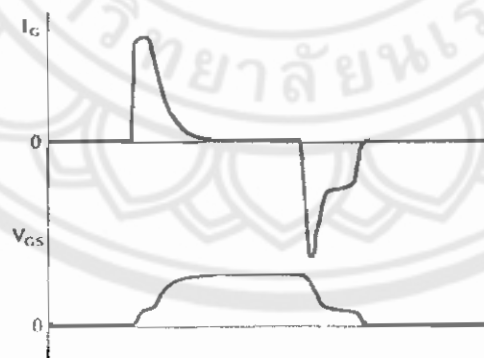
วงจรนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 220 V 50 Hz ผ่านวงจรควบคุมกระแสโดยอาศัยการทำงานของไทม์เมอร์และคอนแทกเตอร์ หน่วงกระแสและคอนแทกเตอร์จะอนุกรมด้วยตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำเพื่อลดค่ากระแสทรานเซียนจะหน่วงเวลา 1.5 วินาที จากนั้นคอนแทกเตอร์จะปิดวงจรโดยจะช็อตผ่านตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำทำให้กระแสไหลได้เต็มพิกัด หลักการ Self start ของวงจรเพื่อป้องกันความเสียหายของมอเตอร์ที่สวิตช์ซึ่งขณะเร่งคันสูงในเวลาทันทีทันใด และเนื่องจากโหลดเป็นอินดักทีฟ จึงทำให้กระแสค่อยๆเพิ่มหรือลดลงการเปลี่ยนแปลงของกระแสนี้จะเป็นไปในลักษณะเฟสตามของแรงดันอินพุท จากนั้นแรงดันกระแสสลับที่ปรับค่าได้ก็จะผ่านวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ทำการแปลงแรงดันกระแสสลับ 220 Vrms เป็นแรงดันกระแสตรง 311V



รูปที่ 2.11 ตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ที่ขาต่าง ๆ ภายในตัวเพาเวอร์ MOSFET

ตัวเก็บประจุเหล่านี้ บังคับให้เพาเวอร์ MOSFET ต้องชาร์จประจุเข้าไปที่ตัวเก็บประจุเสียก่อน เพื่อให้แรงดันตกคร่อมที่ขาเกต  $V_{GS}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันขีดเริ่ม เพาเวอร์ MOSFET จึงจะเริ่มนำกระแส ในทางกลับกันการหยุดการนำกระแสของเพาเวอร์ MOSFET จะต้องทำให้ตัวเก็บประจุคายประจุออกไปจนแรงดันตกคร่อมที่ขาเกต  $V_{GS}$  มีค่าลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม เพาเวอร์ MOSFET จึงหยุดนำกระแส ลักษณะของกระแสและแรงดันที่ขาเกตจึงมีลักษณะดังรูปที่ 2.11

โดยทั่วไปแล้ว ค่าความจุของตัวเก็บประจุในตัวเพาเวอร์ MOSFET นี้เองจะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเปลี่ยนสถานะ



รูปที่ 2.12 ลักษณะแรงดันและกระแสที่ขาเกตขณะเพาเวอร์ MOSFET ถูกไบแอสให้นำกระแส

การกำหนดเวลาในการเปลี่ยนสถานะ ปกติแล้วผู้ผลิตมักจะให้กราฟของค่าแรงดัน  $V_{GS}$  ในขณะที่ค่าประจุสะสมที่ขาเกตเพิ่มขึ้น หรือที่เรียกกันว่า gate charge chart มาในคาต้าลิต

โดยมีตัวเก็บประจุที่เรียกว่าฟิลเตอร์เป็นตัวรักษาระดับแรงดันและกระแสให้ราบเรียบขึ้นก่อนที่จะเข้าสู่จอร์อินเวอร์เตอร์

วงจรถ่ายรูปรีดจอร์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้จะสวิตซ์ถึงความถี่สูงถึง 45 KHz ที่แรงดัน DC = 311 V มี DC Link = 155.5 V ดังนั้นการเลือกใช้มอสเฟตต้องเลือกมอสเฟตกำลังที่สามารถทำงานที่แรงดันสูงและใช้กับการสวิตซ์ที่ความถี่สูงได้ การทำงานของวงจรถ่ายรูปรีดจอร์อินเวอร์เตอร์เริ่มการให้สัญญาณสวิตซ์ความถี่ 45 KHz ที่ขาเกตของมอสเฟตให้มอสเฟตสองตัวทำงานสลับกัน ฟรีวีล ไดโอดที่อยู่ภายในมอสเฟต  $C_r/2$  เป็นเรโซแนนซ์ลาปาซีสเตอร์ ส่วนอินดักแตนซ์และความต้านทานจะใช้เขียนแทนขดลวดเหนี่ยวนำและภาชนะหุ้มคัม เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหา Reverse Recovery ของไดโอดขณะทำงานที่ความถี่สูง กระแสไหลจะถ่วงหลังแรงดันคร่อมสวิตซ์ที่มอสเฟต เป็นผลทำให้มอสเฟตสองตัวเกิดมีช่วงการทำงานที่พร้อมกัน ทำให้เกิดการลัดวงจรที่ DC Link หรือการช็อต (shot two) เพื่อป้องกันเหตุการณ์นี้จะใช้หลักการให้สวิตซ์ที่นำกระแสอยู่ก่อนหน้านั้นหยุดทำงานก่อนแล้วจึงให้ตัวใหม่เริ่มนำกระแส เรียกหลักการนี้ว่า วงจรเดดไทม์

## 2.4 เงื่อนไขของวงจรถ่ายรูปเพาเวอร์มอสเฟต

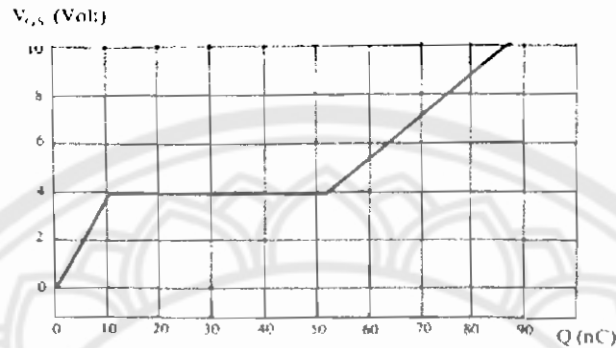
การขับพาวเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสที่แตกต่างจากการขับกระแสไบแอสในไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีเงื่อนไขการไบแอสที่แตกต่างกัน สำหรับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กระแสจะไหลผ่านคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ได้ก็ต่อเมื่อ มีกระแสไบแอสไหลผ่านที่เบสและอิมิตเตอร์ แต่พาวเวอร์มอสเฟตจะมีกระแสไหลผ่านเดรนและซอร์สได้ก็ต่อเมื่อ แรงดันคร่อมที่ขาเกตและซอร์สมีค่าอย่างต่ำเท่ากับค่า แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) ของมัน แต่ใช้กระแสต่ำ การขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสจึงทำได้ง่าย และยุ่งยากน้อยกว่าไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มาก

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เพาเวอร์มอสเฟตทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงจำเป็นต้องศึกษาเงื่อนไขต่าง ๆ สำหรับการบังคับให้เพาเวอร์มอสเฟตนำกระแส เป็นอันดับแรกก่อน

ค่าความจุไฟฟ้าด้านอินพุท (Input Capacitance)

เนื่องจากโครงสร้างภายใน ตัวเพาเวอร์มอสเฟตจึงเหมือนกับมีตัวเก็บประจุต่ออยู่รอบ ๆ ขาต่าง ๆ ของมันดังรูปที่ 2.11

ด้วย (รูปที่ 2.13) กราฟนี้มีประโยชน์มากในการคำนวณค่ากระแสไบแอสเกตและเวลาในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟต

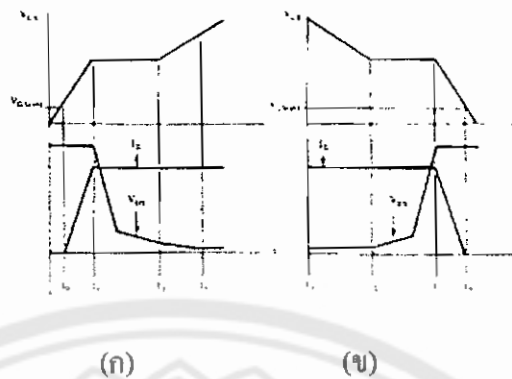


รูปที่ 2.13 ตัวอย่างของ gate charge chart

ลักษณะของกราฟแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ตามผลของประจุที่เพิ่ม คือ

1. ช่วงเวลาหน่วงก่อนเริ่มนำกระแส (turn on delay)  $t_0$
2. ช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (rise time)  $t_1-t_2$
3. ช่วงเวลาสะสมประจุส่วนเกิน (excess charge time)  $t_2-t_3$

เมื่อเพาเวอร์มอสเฟตเริ่มชาร์จประจุที่ขาเกต จนกระทั่งพ้นช่วงเวลาหน่วงก่อนเริ่มนำกระแสเมื่อแรงดันที่ขาเกตมากกว่า แรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS(th)}$ ) จึงจะเริ่มมีกระแสไหลผ่านเดรนและซอร์สที่เวลา  $t_0$  ค่าของแรงดันจะยังไม่ลดลงจนกว่าจะผ่านเวลาเท่ากับ  $t_1$  แรงดันคกคร่อมเดรนและซอร์ส  $V_{DS}$  จึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจากค่าแรงดันที่ประมาณ 90% จนเหลือเพียง 10% ของค่าแรงดันคกคร่อม  $V_{DS}$  สูงสุด เพาเวอร์มอสเฟตจะนำกระแสได้อย่างเต็มที่ในช่วงเวลาเริ่มนำกระแส  $t_1$  และ  $t_2$  นี้เอง และแรงดันคกคร่อมที่ขาเกต  $V_{GS}$  จะคงที่ จนกว่าเพาเวอร์มอสเฟตจะสามารถนำกระแสได้อย่างเต็มที่ ดังรูปที่ 4 ในช่วงเวลาสะสมประจุส่วนเกิน ค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอร์สจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ หากปล่อยให้มีการสะสมประจุต่อไปในช่วงเวลา  $t_2$  ถึง  $t_3$  แต่ประจุสะสมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการหน่วงขณะเริ่มหยุดนำกระแส เนื่องจากเพาเวอร์มอสเฟตจะต้องใช้เวลามากในการคายประจุส่วนเกินนี้ทิ้งไป ดังนั้นการขับเพาเวอร์มอสเฟตที่ขาเกตด้วยแรงดันสูงเกินความจำเป็น จะทำให้ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลเสีย



รูปที่ 2.14 ลักษณะการชาร์จประจุที่ขาเกตตามเวลาที่มีผลต่อการเริ่มนำกระแส (ก) และ ผล เมื่อเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ MOSFET (ข)

เนื่องจากเพาเวอร์ MOSFET ไม่เกิดประจุสะสมขึ้นขณะนำกระแส การหยุดการนำกระแสของเพาเวอร์ MOSFET จึงทำได้ง่าย ๆ ด้วยการคายประจุที่ขาเกตทิ้งไป เช่นเดียวกับขณะเริ่มนำกระแส และถ้าขนาดกระแสเพื่อชาร์จประจุและคายประจุมีค่าเท่ากัน ช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากันด้วย ยกเว้นหากมีประจุสะสมมากในช่วงเวลา  $t_2$  ถึง  $t_3$  การหยุดนำกระแสจะมีช่วงเวลานานเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องใช้เวลาส่วนหนึ่งในการคายประจุส่วนเกินทิ้งไป

จากกราฟรูปที่ 2.15 ของเพาเวอร์ MOSFET แต่ละเบอร์ จะนำมาหาค่าช่วงเวลาเริ่มนำกระแส  $t_1$  และช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส  $t_2$  ได้จาก

$$t = Q_G / I_G \quad (2.22)$$

เมื่อ  $Q_G$  คือ ค่าประจุที่ได้จากกราฟ เป็นคูลอมบ์

$I_G$  คือ ค่ากระแสที่ใช้ชาร์จประจุที่ค่ากระแสคงที่ เป็นแอมป์

หมายเหตุ กราฟ gate charge chart ที่ได้จากคาต้าล๊อก ปกติในการวัดผู้ผลิตจะกำหนดให้กระแสเกตสำหรับชาร์จประจุมีค่าคงที่ ในการใช้งานจริงแล้ว วงจรขับเพาเวอร์ MOSFET อาจให้ค่ากระแสเกตไม่คงที่ จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่นอกเหนือจากข้อมูลใน gate charge chart ซึ่งในการออกแบบวงจรเพาเวอร์ MOSFET ให้จ่ายกระแสได้มากพอ การคำนวณที่ได้จากสมการดังกล่าวก็นับว่าใกล้เคียงแล้ว

จะเห็นว่าการขับเพาเวอร์ MOSFET ให้นำกระแสได้นั้น จะต้องมีการชาร์จประจุและคายประจุที่ขาเกต วงจรขับเพาเวอร์ MOSFET จะต้องมียุทธศาสตร์ของการจ่ายและรับกระแส (source and

sink) ใต้ที่ประมาณ 200 ถึง 400 มิลลิแอมป์ด้วย และต้องให้แรงดันคคร่อมที่ขาเกต  $V_{GS}$  ค่ามากพอเพื่อที่เพาเวอร์มอสเฟตจะทำงานได้อย่างเต็มที่ด้วย (ประมาณ 10 โวลต์)

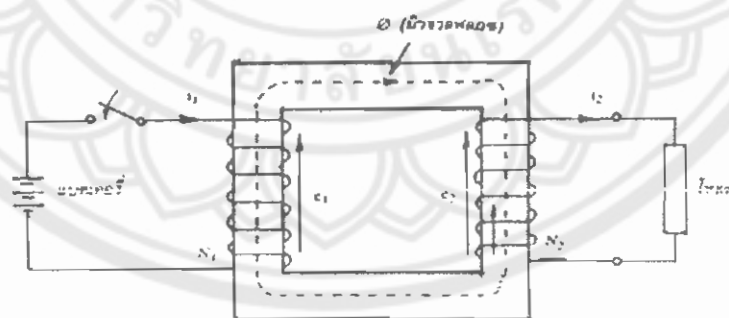
## 2.5 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ใช้ถ่ายโอน (Transfer) พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่ง โดยความถี่ไม่เปลี่ยนแปลงแต่เป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือลดต่ำลงได้ตามต้องการ

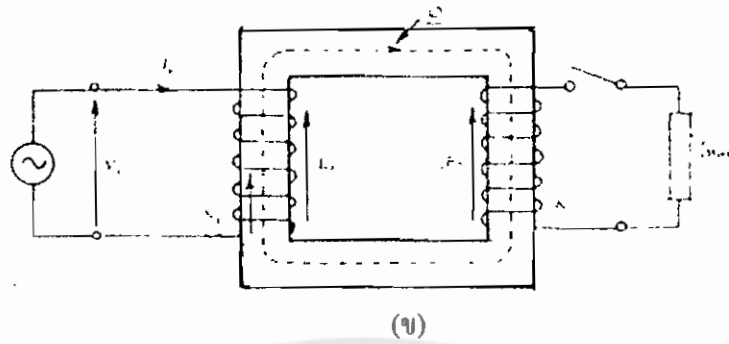
หม้อแปลงที่มีแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิสูงกว่าด้านทุติยภูมิ เรียกว่า หม้อแปลงเพิ่มแรงดัน ถ้าแรงดันด้านปฐมภูมิต่ำกว่าด้านทุติยภูมิ เรียกว่า หม้อแปลงเพิ่มแรงดัน หม้อแปลงที่มีแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิเท่ากับด้านทุติยภูมิ เรียกว่า หม้อแปลงหนึ่งต่อหนึ่ง (One to one transformer)

### หลักการทํางาน

เราสามารถอธิบายหลักการทํางานหรือพฤติกรรมของหม้อแปลงได้โดยใช้หม้อแปลงในรูปแบบที่ 3-1 ก. ซึ่งมีขดลวดที่ 1 ต่อกับแบตเตอรี่โดยต่อผ่านสวิตช์และขดลวดที่ 2 ต่อกับตัวความต้านทานหนึ่งตัวในขณะที่สับสวิตช์ปิดวงจรจะมีกระแสไหลผ่านขดลวดขดที่ 1 สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก  $\Phi$  ให้เกิดขึ้นในแกนเหล็กโดยมีทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดแต่ละขด ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด และอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดแต่ละขด (สมมติว่าไม่มี leakage flux) ด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนเดียวกัน (เรียกว่า mutual flux)



(ก)



รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของหม้อแปลง

รูปที่ 2.15 (ก) เมื่อวงจรขดลวดปฐมภูมิต่อกับแบตเตอรี่เพื่อใช้ประกอบอธิบายพฤติกรรมของหม้อแปลง

รูปที่ 2.15 (ข) เมื่อวงจรขดลวดปฐมภูมิต่อกับแหล่งจ่ายไฟ เอ.ซี. (Sinusoidal source) และวงจรขดลวดทุติยภูมิเป็นวงจรเปิด

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ 1 คือ

$$e_1 = N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.23)$$

และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดขดที่ 2 คือ

$$e_2 = N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $N_1$  = จำนวนรอบขดลวดขดที่ 1

เมื่อ  $N_2$  = จำนวนรอบขดลวดขดที่ 2

จะสังเกตเห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสของขดลวดทุติยภูมิในรูปที่ 3-1 ก. เกิดขึ้นในขณะที่ mutual flux เปลี่ยนแปลง (ขณะสับสวิตช์ปิดวงจร) เมื่อ mutual flux คงที่ (กระแสจากแบตเตอรี่คงที่)  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 0$  ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเท่ากับศูนย์ และกระแส  $i_2 = 0$  ด้วย

สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลง (E.M.F. equation)

ให้  $N_1$  = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ



$N_2$  = จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

$\Phi_m$  = ค่าสูงสุดของฟลักซ์ (Maximum flux) ในแกนหม้อแปลงเป็นเวเบอร์ (Weber)

$$= B_m A$$

$f$  = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า  $V_1$  เป็น Hz

เมื่อ  $B_m$  = ค่าสูงสุดของความหนาแน่นของฟลักซ์ในแกนหม้อแปลงเป็นเวเบอร์/ม.<sup>2</sup>

หรือ เทสลา (Tesla)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนหม้อแปลงเป็น ม.<sup>2</sup>

ค่า r.m.s. ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิ

$$= (\text{แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ} / \text{รอบ}) \times \text{จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ}$$

$$E_1 = 4.44fN_1\Phi_m \quad \text{โวลต์} \quad (2.25)$$

หรือ

$$E_1 = 4.44fN_1B_m A \quad \text{โวลต์} \quad (2.26)$$

ในทำนองเดียวกัน

ค่า r.m.s. ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิ

$$E_2 = 4.44fN_2\Phi_m \quad \text{โวลต์} \quad (2.27)$$

หรือ

$$E_2 = 4.44fN_2B_m A \quad \text{โวลต์} \quad (2.28)$$

อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง (Voltage transformation ratio),  $K$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} = K \quad (2.29)$$

หรือ

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = K \quad (2.30)$$

ค่าคงที่  $K$  มีชื่อเรียกว่า “อัตราส่วนแรงดัน” หรือ “อัตราส่วนจำนวนรอบ” ของหม้อแปลง

### 2.5.1 กำลังไฟฟ้าในหม้อแปลงอุดมคติ

หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ หมายถึง หม้อแปลงที่ไม่มีการสูญเสียใดๆ เลย ดังนั้นกำลังอินพุตจะมีค่าเท่ากับกำลังเอาต์พุต ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{กำลังอินพุต (VA)} = \text{กำลังเอาต์พุต (VA)} \quad (2.31)$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (2.32)$$

หรือ

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{K} \quad (2.33)$$

### 2.5.2 หม้อแปลงที่ใช้งานจริง (Actual transformer)

หม้อแปลงที่ใช้งานจริงแตกต่างจากหม้อแปลงในอุดมคติ เนื่องจากหม้อแปลงที่ใช้งานจริงย่อมต้องมีค่าความต้านทานในขดลวดทั้งสองขด ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper loss) การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ในแกนเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron loss or Core loss) และการสูญเสียที่เกิดจากลิกเนจฟลักซ์

เราจะพิจารณาการทำงานของหม้อแปลงที่ใช้งานจริง โดยไม่คำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดจากลิกเนจฟลักซ์เป็นสองกรณี คือ

ก. หม้อแปลงเมื่อไร้โหลด (No-load)

ข. หม้อแปลงเมื่อมีโหลด (On-load)

**หม้อแปลงเมื่อไร้โหลด (Transformer on no-load)**

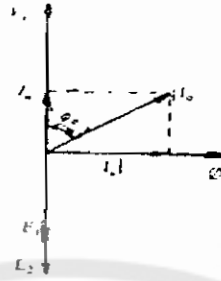
เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_1$  ให้กับหม้อแปลงที่ไม่มีโหลดต่ออยู่ หรือวงจรขดลวดทุติยภูมิเป็นวงจรเปิด กระแส  $I_0$  ที่ไหลในขดลวดปฐมภูมิจะมีค่าน้อยมาก (เมื่อเทียบกับกระแสเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเต็มพิกัด) ดังนั้นการสูญเสียในขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมีย่อมมีค่าน้อยด้วย (ไม่มีการสูญเสียในขดลวดทองแดงด้านทุติยภูมิ เนื่องจากเป็นวงจรเปิด) ดังนั้นเฟเซอร์ของกระแสเมื่อไร้โหลดด้านปฐมภูมิ (No-load primary input current)  $I_0$  จะล้าหลังแรงดันไฟฟ้า  $V_1$  เป็นมุม  $\phi_0$  (เมื่อมุม  $\phi_0 < 90^\circ$ )

ดังนั้นกำลังอินพุตของหม้อแปลงเมื่อไร้โหลด จึงหาได้จาก

$$P_0 = V_1 I_0 \cos \phi_0 \quad (2.34)$$

เมื่อ  $\cos \phi_0$  เป็นเพาเวอร์แฟกเตอร์เมื่อไร้โหลดด้านปฐมภูมิ

สถานะการทำงานของหม้อแปลงที่ใช้งานจริง เมื่อไร้โหลด สามารถนำมาเขียนเป็นเวกเตอร์ ไดอะแกรมดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 เวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงเมื่อไว้โหลดในรูปดังกล่าว จะสังเกตเห็นว่า กระแสด้านปฐมภูมิเมื่อไว้โหลด  $I_0$  ประกอบด้วยกระแสสองส่วนคือ  $I_w$  และ  $I_\mu$

- กระแสส่วนที่อินเฟสกับแรงดันไฟฟ้า  $V_1$  เรียกว่า กระแสใช้งาน (Active or working current) หรือ กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron loss) " $I_w$ " รวมทั้งการสูญเสียในขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ (Primary Cu loss) จำนวนเล็กน้อย

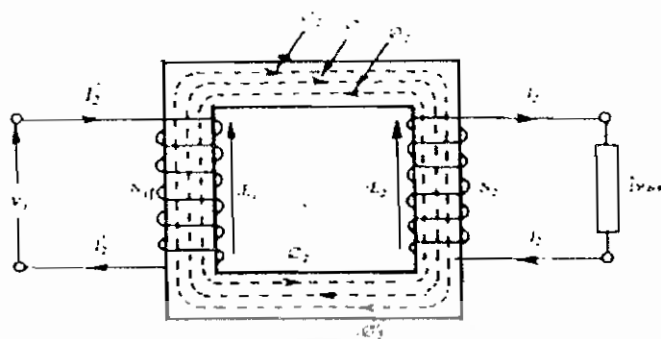
$$I_w = I_0 \cos \phi_0 \quad (2.35)$$

- กระแสส่วนที่ล่าหลัง หรือตั้งฉากกับแรงดันไฟฟ้า  $V_1$  เรียกว่า กระแสสร้างฟลักซ์ (กระแสที่ทำให้เกิด mutual flux  $\Phi$ ) หรือ กระแสแมกเนไตซ์, " $I_\mu$ " กระแสส่วนนี้จะอินเฟสกับฟลักซ์  $\Phi$  และไม่ทำให้เกิดการสูญเสียใด ๆ ในหม้อแปลง

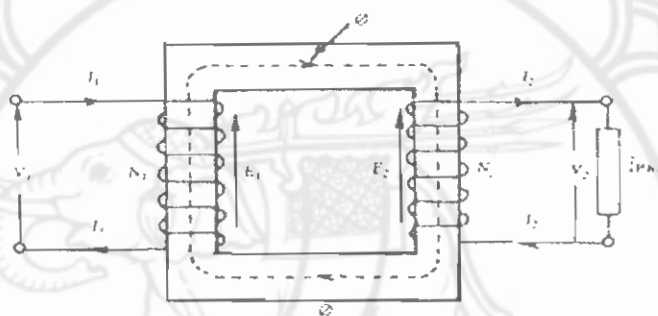
$$I_\mu = I_0 \sin \phi_0 \quad (2.36)$$

จากเวกเตอร์ไดอะแกรมจะสังเกตเห็นว่ากระแส  $I_0$  คือ ผลบวกทางเวกเตอร์ของกระแส  $I_w$  และ  $I_\mu$  ดังนั้น

$$I_0 = \sqrt{I_w^2 + I_\mu^2} \quad (2.37)$$



รูปที่ 2.17 ขณะที่ mutual flux,  $\Phi$  ลดลง ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้าน  $E_1$  ลดลงเกิด กระแส  $I_2$  ไหลเพิ่มขึ้นในขดลวดปฐมภูมิ สร้างฟลักซ์  $\Phi_2$  มีขนาดเท่ากันแต่มี ทิศทางตรงข้ามกับฟลักซ์  $\Phi_1$  จึงหักล้างกันหมด



รูปที่ 2.18 ฟลักซ์ในแกนเหล็กจึงเหลือเพียง mutual flux

นั่นหมายความว่าไม่ว่าโหลดทางค้ำทุติยภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปเท่าใดก็ตาม ฟลักซ์ทั้งหมดในแกนเหล็กมือเปล่งยังคงมีค่าเท่าเดิม คือเท่ากับฟลักซ์ในสภาวะไร้อุณหภูมิด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้ การสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าคงที่ทุกสภาวะโหลดด้วย เมื่อ  $\Phi_1 = \Phi_2$

$$N_2 I_2 = N_1 I_2' \quad (2.38)$$

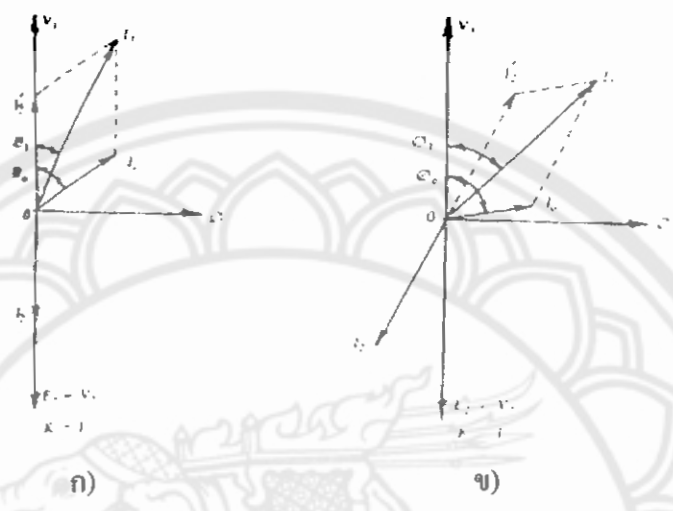
$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} \times I_2 \quad (2.39)$$

$$I_2' = KI_2 \quad (2.40)$$

ดังนั้นในขณะมือเปล่งจ่ายโหลด กระแสทางค้ำปฐมภูมิจึงประกอบด้วยกระแสสอง ส่วน คือ กระแส  $I_0$  และกระแส  $I_2$  เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_1^w = I_0^w + I_2^w \quad (2.41)$$

เวกเตอร์ไออะแกรมของหม้อแปลง



รูปที่ 2.19 เวกเตอร์ไออะแกรมของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลด

- ก) กระแส  $I_2$  อินเฟสกับ  $E_2$  หรือ  $V_2$
- ข) กระแส  $I_2$  ล้าหลังกับ  $E_2$  เป็นมุม  $\theta_2$

รูปที่ 2.20 เมื่อโหลดเป็นค่าความต้านทาน ซึ่งมีค่า p.f. = 1 ดังนั้นกระแสด้านทุติยภูมิ  $I_2$  จึงอินเฟสกับ  $E_2$  หรือ  $V_2$  เป็นสาเหตุให้มีกระแสไหลเพิ่มขึ้นทางด้านปฐมภูมิ คือ  $I_1$  ซึ่งมีเฟสตรงข้ามและมีขนาดเท่ากับ  $I_2$  ( $K=1$ ) ดังนั้นกระแสด้านปฐมภูมิ  $I_1$  จึงเป็นผลบวกเวกเตอร์ของกระแส  $I_0$  และ  $I_2$  และ  $I_1$  จะล้าหลังแรงดันไฟฟ้า  $V_1$  เป็นมุม  $\theta_1$

ในรูป ข. เมื่อโหลดเป็นอินดักทีฟ ซึ่งมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ล้าหลังจึงทำให้กระแสด้านทุติยภูมิ  $I_2$  ล้าหลัง  $E_2$  หรือ  $V_2$  เป็นมุม  $\theta_2$  จะมีกระแสเพิ่มขึ้นทางด้านปฐมภูมิ คือ  $I_1$  เช่นเดิม ดังนั้น กระแส  $I_1$  คือ ผลบวกทางเวกเตอร์ของ  $I_0$  และ  $I_2$  และ เวกเตอร์ของ  $I_1$  จะล้าหลัง  $V_1$  เป็นมุม  $\theta_1$

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแอมแปร์-เทิร์นของขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลด (ถ้าไม่คำนึงถึง  $I_0$ ) ได้ดังนี้

$$N_1 I_2 = N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (2.42)$$

4460620  
Tx  
657.53  
07 748  
2844 C.3

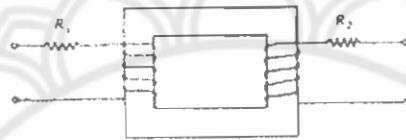
$$\frac{I'_2}{I_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = K \quad (2.43)$$

### 2.5.3 โวลต์เตจเรกกูเลชัน และประสิทธิภาพ (Voltage Regulation and Efficiency)

ค่าความต้านทานสมมูล (Equivalent resistance)

ให้  $R_1$  = ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิ

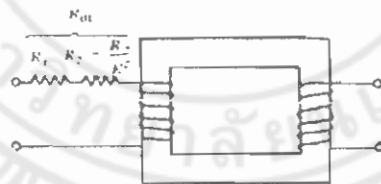
และ  $R_2$  = ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 2.20 แสดงค่าความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง

ค่าความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงที่ขดลวดปฐมภูมิจะมีค่าเป็น  $R_{01}$  เมื่อ

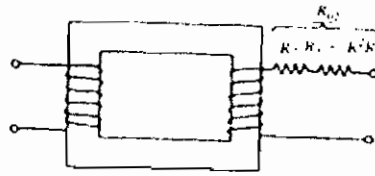
$$R_{01} = R_1 + R_2 / K^2 \quad (2.44)$$



รูปที่ 2.21 วงจรของหม้อแปลง เมื่อย้ายค่าความต้านทานจากด้านทุติยภูมิไปไว้ทางด้านปฐมภูมิ

ค่าความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงที่ขดลวดทุติยภูมิจะมีค่าเป็น  $R_{02}$  เมื่อ

$$R_{02} = R_2 + K^2 R_1 \quad (2.45)$$

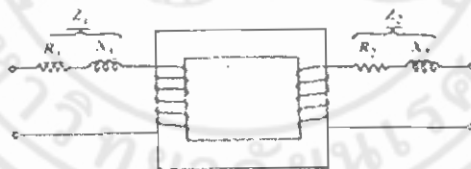


รูปที่ 2.22 วงจรของหม้อแปลง เมื่อย้ายค่าความต้านทานจากปฐมภูมิไปไว้ทางด้านทุติยภูมิ โดยมี  $R_{02}$  เป็นค่าความต้านทานทั้งหมดของหม้อแปลงที่ขดลวดทุติยภูมิ

#### 2.5.4 ลีคเฟกซ์และลีคเกอริแอกแตนซ์ (Leakage flux and leakage reactance)

ฟลักซ์ที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิได้เคลื่อนที่ไปตัดขดลวดทุติยภูมิทั้งหมด แต่จะมีฟลักซ์บางส่วนจะตัดหรือคล้องเฉพาะขดลวดปฐมภูมิ คือ ฟลักซ์  $\phi_{L1}$  และฟลักซ์บางส่วนจะตัดหรือคล้องเฉพาะขดลวดทุติยภูมิ คือ ฟลักซ์  $\phi_{L2}$  ดังรูป ทั้งฟลักซ์  $\phi_{L1}$  และ  $\phi_{L2}$  เรียกว่า ลีคเฟกซ์ของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

ลีคเฟกซ์แต่ละตัว ต่างก็เหนี่ยวนำให้เกิดค่าลีคเกอริแอกแตนซ์ขึ้นในขดลวดแต่ละขด และค่าลีคเกอริแอกแตนซ์เหล่านี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมลีคเกอริแอกแตนซ์ (Leakage reactance drop)  $I_1 X_1$  ในขดลวดปฐมภูมิ และ  $I_2 X_2$  ในขดลวดทุติยภูมิ เมื่อนำค่าลีคเกอริแอกแตนซ์ของขดลวดทั้งสองขด คือ  $X_1$  และ  $X_2$  มาเขียนไว้ในวงจรโดยต่ออนุกรมกับค่าความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ของขดลวดทั้งสองขดของหม้อแปลง จะได้วงจรดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 2.23 ความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ค่าลีคเกอริแอกแตนซ์  $X_1$  และ  $X_2$  ของขดลวดทั้งสองขดในหม้อแปลง

จากรูปสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดปฐมภูมิได้ดังนี้

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \quad (2.46)$$

ในทำนองเดียวกันค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดทุติยภูมิ คือ

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \quad (2.47)$$

ค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ก็สามารถย้ายได้ด้วยวิธีเดียวกัน

ค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงที่ขลวดปฐมภูมิ จะมีค่าเป็น  $X_{01}$  เมื่อ

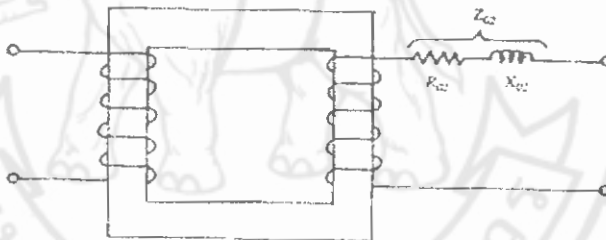
$$X_{01} = X_1 + X_2 / K^2 \tag{2.48}$$

ค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงที่ขลวดทุติยภูมิ จะมีค่าเป็น  $X_{02}$  เมื่อ

$$X_{02} = K_2 + K^2 X_1 \tag{2.49}$$

ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงที่ขลวดปฐมภูมิ จะมีค่าเป็น  $Z_{01}$  เมื่อ

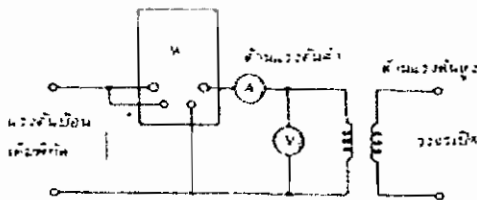
$$Z_{01} = \sqrt{R_{01}^2 + X_{01}^2} \tag{2.50}$$



รูปที่ 2.24 ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงที่ขลวดทุติยภูมิ จะมีค่าเป็น  $Z_{02}$

**2.5.5 การทดสอบในสภาวะวงจรเปิด (Open-circuit or no-load test)**

เพื่อหาค่าการสูญเสียในสภาวะไร้โหลด หรือ การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss or iron loss) ซึ่งจะทำโดยเปิดวงจรทางด้านแรงสูง ดังรูป



รูปที่ 2.25 การต่อวงจรทดสอบในสภาวะวงจรเปิดเพื่อหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก



- ถ้า  $P_0$  = ค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์  
 $V_1$  = แรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์  
 $I_0$  = กระแสเมื่อไรโพลต์ที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์

$$P_0 = V_1 I_0 \cos \phi_0 \quad (2.51)$$

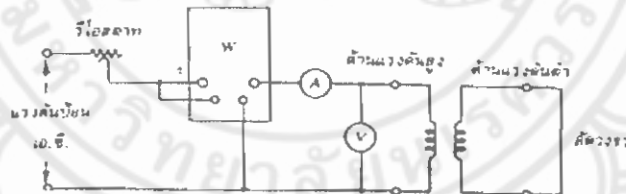
จะได้

$$\cos \phi_0 = \frac{P_0}{V_1 I_0} \quad (2.52)$$

### 2.5.6 การทดสอบในสถานะลัดวงจร (Short circuit test)

มีจุดมุ่งหมายดังนี้

- เพื่อหาค่าการสูญเสียในขดลวดทองแดง เมื่อโหลดเต็มพิกัด
- เพื่อหาค่าความต้านทานสมมูลย์-ค่าลิกเกจรีแอคแตนซ์สมมูลย์ และค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลง
- คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอิมพีแดนซ์สมมูลย์ และค่าโวลต์เตจเรกกูเลชันของหม้อแปลงได้



รูปที่ 2.26 การลัดวงจรในสถานะลัดวงจร เพื่อหาค่าการสูญเสียในขดลวดทองแดง

การทดสอบดังกล่าวทำได้โดยการลัดวงจรทางด้านขดลวดแรงต่ำด้วยขดลวดทองแดงใหญ่ ส่วนขดลวดแรงดันสูงจะต่อกับวัตต์มิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ และแอมมิเตอร์ไว้ในวงจร แล้วจ่ายไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดแรงสูง

จากรูปค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ และแอมมิเตอร์ ก็คือค่า  $P_{sc}$ ,  $V_{sc}$ , และ  $I_{sc}$  ซึ่งนำไปใช้คำนวณหาค่า  $R_{01}$ ,  $X_{01}$ , และ  $Z_{01}$  ได้ดังนี้

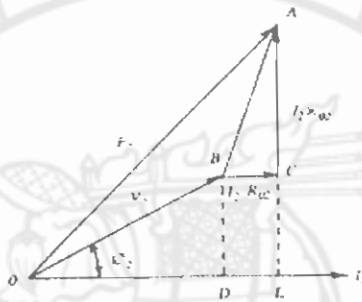
$$P_{sc} = I_{sc}^2 R_{01} \quad (2.53)$$

$$R_{01} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (2.54)$$

$$Z_{01} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (2.55)$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} \quad (2.56)$$

เวกเตอร์ไดอะแกรม เมื่อโหลดมีเพาเวอร์แฟกเตอร์ล่าช้า (Lagging p.f.)

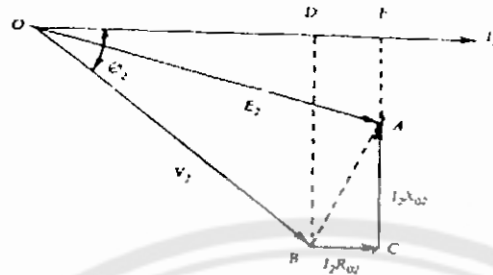


รูปที่ 2.27 เวกเตอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วด้านขดลวดทุติยภูมิกับกระแสโหลดที่ค่า p.f. ล่าช้า

เมื่อโหลดมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ล่าช้า แสดงว่ากระแสโหลด  $I_2$  ล่าช้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว  $V_2$  เป็นมุม  $\phi_2$  กรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโหลดเป็นอินดักทีฟ เขียนเวกเตอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_2$  และ  $I_2$  ได้ดังรูปดังกล่าว ซึ่งจะได้

$$E_2 = \sqrt{(V_2 \cos \phi_2 - I_2 R_{02})^2 + (V_2 \sin \phi_2 + I_2 X_{02})^2} \quad (2.57)$$

เวกเตอร์ไดอะแกรมเมื่อโหลดมีเพาเวอร์แฟกเตอร์นำหน้า (Leading p.f.)



รูปที่ 2.28 เวกเตอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วด้านขดลวดทุติยภูมิ  
กับกระแสไหลที่ค่า p.f. นำหน้า

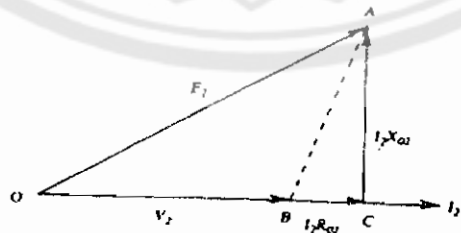
กรณีที่โหลดมี p.f. นำหน้า แสดงว่ากระแสไหล  $I_2$  นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว  $V_2$  เป็นมุม  $\phi_2$  กรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโหลดเป็นคาปาซิทีฟ เขียนเวกเตอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_2$  และ  $I_2$  ได้ดังรูปดังกล่าว ซึ่งจะได้

$$E_2 = \sqrt{(V_2 \cos \phi_2 + I_2 R_{02})^2 + (V_2 \sin \phi_2 - I_2 X_{02})^2} \quad (2.58)$$

เวกเตอร์ไดอะแกรมเมื่อโหลดมีเพาเวอร์แฟกเตอร์เป็นหนึ่ง (Unity p.f.)

กรณีที่โหลดมี p.f. เป็นหนึ่ง แสดงว่ากระแสไหล  $I_2$  อินเฟสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว  $V_2$  กรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโหลดเป็นความต้านทาน (Resistive Load) เขียนเวกเตอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_2$  และ  $I_2$  ได้ดังรูปดังกล่าว ซึ่งจะได้

$$E_2 = \sqrt{(V_2 + I_2 R_{02})^2 + (I_2 X_{02})^2} \quad (2.59)$$



รูปที่ 2.29 เวกเตอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วด้านขดลวดทุติยภูมิ  
กับกระแสไหลที่ค่า p.f. เป็นหนึ่ง

### 2.5.7 การสูญเสียในหม้อแปลง (Losses in a transformer)

หม้อแปลงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าซึ่งไม่มีส่วนประกอบใด ๆ เคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านจากลม (Friction and windage losses) ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงมีการสูญเสียเพียงสองส่วนคือ

#### 1. การสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron loss or core loss)

การสูญเสียในแกนเหล็กประกอบด้วย การสูญเสียสองส่วนคือ การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss) ในแกนเหล็ก ทั้งนี้เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหรือฟลักซ์ในแกนเหล็กหม้อแปลงที่เรียกว่า mutual flux มีค่าคงที่ตลอดเวลาทุกสภาวะโหลด (อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงบ้างแต่น้อยมากประมาณ 1-3% เท่านั้น) ดังนั้นจึงถือว่าการสูญเสียดังกล่าวมีค่าคงที่ทุกสภาวะโหลด

- การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส เกิดขึ้นเนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตลอดเวลาด้วยอัตราเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นโมเมนต์ของเหล็กจึงมีการกลับทิศทางจากขั้วเหนือเป็นขั้วใต้และจากขั้วใต้เป็นขั้วเหนืออยู่ตลอดเวลา การกลับทิศทางจากขั้วเหนือไปเป็นขั้วใต้จะต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อเอาชนะความฝืดของโมเมนต์ พลังงานที่ใช้ไปคือพลังงานสูญเสียในรูปของพลังงานความร้อน เรียกการสูญเสียนี้ว่า ฮิสเทอรีซิส

- การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟสลับมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงและตัดกับแกนเหล็กอยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไหลวนในแกนเหล็ก เนื่องจากแกนเหล็กมีค่าความต้านทานอยู่ด้วย ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสีย  $I^2R$  ขึ้นในแกนเหล็กและจะแสดงผลออกมาในรูปของความร้อน จะลดการสูญเสียนี้อย่างไรได้ โดยเลือกใช้เหล็กแผ่นบาง ๆ (Very thin laminations)

การสูญเสียในแกนเหล็กนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยใช้เหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนหรือเหล็กประเภทเกรนโอเรียนเตด เราสามารถหาการสูญเสียได้จากการทดสอบในสภาวะวงจรเปิด กำลังอินพุตเมื่อไร้โหลดของหม้อแปลงซึ่งวัดและอ่านได้จากวัตต์มิเตอร์ คือ การสูญเสียในแกนเหล็ก

#### 2. การสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper loss)

การสูญเสียในขดลวดทองแดงเกิดขึ้นเนื่องจากค่าความต้านทานของขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ขณะหม้อแปลงไร้โหลดจะมีกระแสจำนวนเล็กน้อยไหลเฉพาะด้านขดลวดปฐมภูมิเท่านั้น การสูญเสียที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีโหลดมาต่อกับขดลวดทุติยภูมิจะมีกระแสไหลในขดลวดทุติยภูมิและมีกระแสไหลเพิ่มขึ้นในขดลวดปฐมภูมิ ดังนั้นการสูญเสียจึงเกิดขึ้นทั้งในขดลวดด้านทุติยภูมิและปฐมภูมิ และมีค่ามากกว่าขณะไร้โหลดหลายเท่า ดังนั้นจึงกล่าว

ได้ว่าการสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลงจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของโหลดและสูญเสียไปในรูปของความร้อน เราสามารถหาการสูญเสียดังกล่าวได้โดยการทดสอบในสภาวะลัดวงจร ซึ่งการสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลงหาได้จาก

$$I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 R_{01} = I_2^2 R_{02} \quad (2.60)$$

### 2.5.8 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง (Efficiency of a transformer)

ประสิทธิภาพของหม้อแปลง คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังเอาต์พุต (Power output) ต่อกำลังอินพุต (Power input) ซึ่งจะต้องมีหน่วยเดียวกัน อาจเป็นวัตต์ หรือกิโลวัตต์ ก็ได้ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังเอาต์พุต}}{\text{กำลังอินพุต}} \quad (2.61)$$

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงมาก มีการสูญเสียน้อยมาก ดังนั้นการวัดค่าของกำลังอินพุตและกำลังเอาต์พุตจึงได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากวิธีที่ดีกว่าคือ การหาค่าสูญเสียทั้งหมดในหม้อแปลง แล้วนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพจากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังเอาต์พุต}}{\text{กำลังเอาต์พุต} + \text{การสูญเสียทั้งหมด}} \quad (2.62)$$

หรือ

$$\eta = \frac{\text{Output}}{\text{Output} + \text{Losses}} \quad (2.63)$$

หรือ

$$\eta = \frac{\text{Output}}{\text{Output} + \text{Cu loss} + \text{Iron Loss}} \quad (2.64)$$