



เอกสารวิชาการ

# ช่างไฟฟ้ากำลัง

## เล่ม ๒

(เครื่องกลไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า)

---

กรมอุทการเรือ

---

(จัดพิมพ์เมื่อ กันยายน ๒๕๔๘)

## บทที่ 1

# สนามแม่เหล็ก แรงเคลื่อนแม่เหล็ก การกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงรูปพลังงาน

### 1-1. บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวย่อเกี่ยวกับความเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก รวมทั้งพื้นฐานทางไฟฟ้าและฟิสิกส์ และจะกล่าวถึงการสร้างแรงทางกลซึ่งจะเกิดจากการกระทำของสนามแม่เหล็กอันเป็นพื้นฐานของมอเตอร์โดยทั่วไป กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) จะทำให้เราทราบแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก และกฎของเลนซ์ (Lenz's law) จะทำให้เราทราบความสัมพันธ์ของแรงบิดและแรงบิดต้านที่ถูกสร้างขึ้นมา

### 1-2. สนามแม่เหล็ก (Magnetic field)

สนามแม่เหล็กเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุเล็กทรอนิกส์ สนามแม่เหล็กที่อยู่รอบ ๆ แท่งแม่เหล็กสามารถที่จะเคลื่อนที่ผ่านสิ่งใดก็ได้ แต่เราไม่สามารถที่จะมองเห็นมันได้หรือสัมผัสได้ แต่เราทราบว่ามันมีจริงและสามารถนำมาใช้งานได้ ตัวอย่างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่นำสนามแม่เหล็กมาใช้งาน เช่น

- ๑ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวเปลี่ยนการเคลื่อนที่ให้เกิดพลังงานไฟฟ้า
- ๑ มอเตอร์ ใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เกิดการเคลื่อนที่
- ๑ หม้อแปลงไฟฟ้า ใช้สนามแม่เหล็กในการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้า

### $\pi$ ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและไฟฟ้า

เมื่อใดก็ตามที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำตัวหนึ่ง จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำนั้น หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในตัวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ล้อมรอบตัวนำเคลื่อนที่สัมพันธ์กับตัวนำ ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนในตัวนำ และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ ปรากฏการณ์นี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ หรือที่เรียกว่า “แรงดันไฟฟ้า emf” และกระแสไฟฟ้าในทุก ๆ ตัวนำที่เคลื่อนที่ตัดกับสนามแม่เหล็กถูกเรียกว่า “การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า”

การหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของตัวนำหาได้จากกฎมือขวา (right-hand rule) คือ

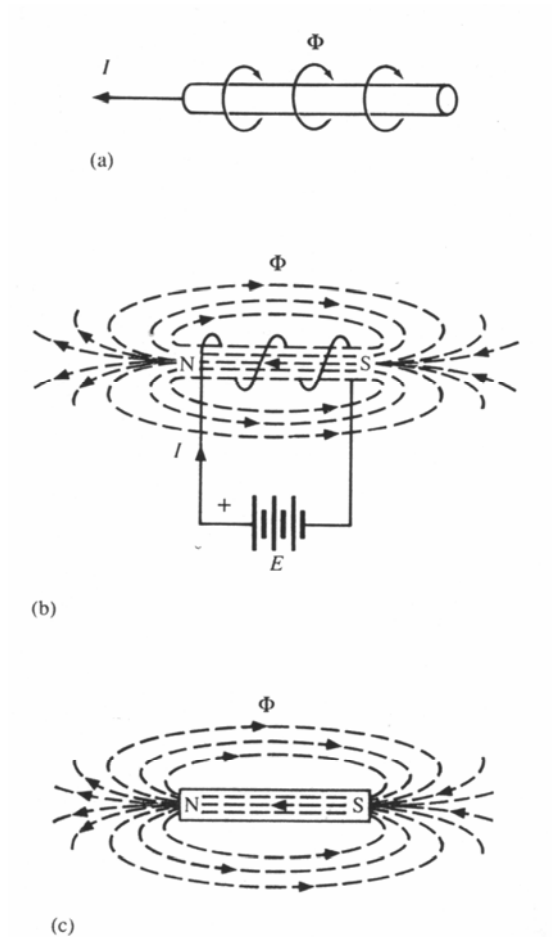
#### ๑ กฎมือขวาสำหรับตัวนำเส้นเดียว (conductor)

จากรูป 1-1 (a) เมื่อเรากำลวดตัวนำด้วยมือขวาจะได้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กคือ นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้า (I) และนิ้วทั้งสี่จะชี้ทิศทางของสนามแม่เหล็ก ( $\Phi$ )

#### ๑ กฎมือขวาสำหรับขดลวดตัวนำ (coil)

สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำเส้นเดียว จะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อย ดังนั้นเราสามารถเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ โดยการนำเอาลวดตัวนำ (conductor) มาพันเป็นขดลวดตัวนำ (coil) ซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มทุก ๆ จุดบนลวดตัวนำมารวมกันที่จุด ๆ เดียว จึงทำให้สนาม

แม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากขึ้นและถ้าเราใช้แกนเหล็กใส่เข้าไปที่กึ่งกลางของขดลวดตัวนำ สนามแม่เหล็กของขดลวดตัวนำจะทำให้แกนเหล็กกลายเป็นแม่เหล็ก ซึ่งเราเรียกว่า “แม่เหล็กไฟฟ้า” (electromagnet) และทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มเพิ่มขึ้นอีก สำหรับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเรียกว่า “สนามแม่เหล็กไฟฟ้า” (electromagnet field)



รูปที่ 1-1 ทิศทางของสนามแม่เหล็ก : (a) รอบตัวนำที่มีกระแสไหล ; (b) ในขดลวด ; (c) แท่งแม่เหล็ก

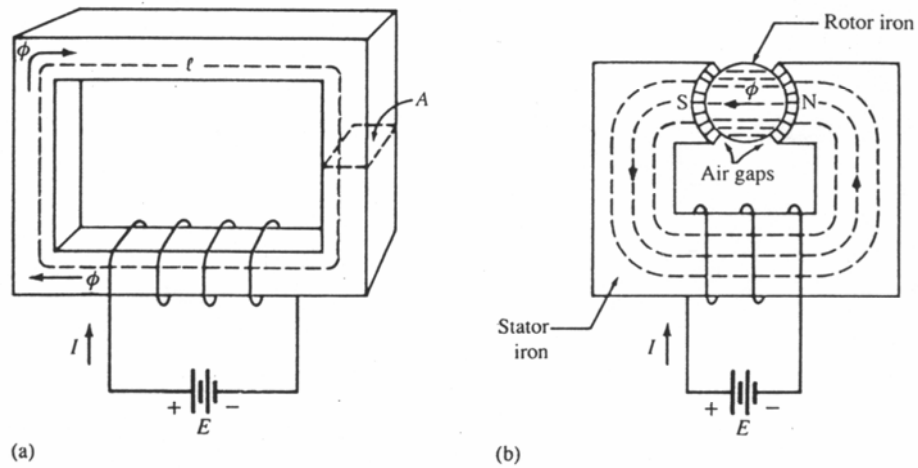
จากรูปที่ 1-1 (b) เมื่อนำลวดตัวนำมาพันเป็นขดลวดตัวนำ และใส่แกนเหล็กเข้าไปที่กึ่งกลางของขดลวดตัวนำ และเมื่อนำขดลวดตัวนำต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ( $E$ ) จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ไหลในขดลวดตัวนำ และจากรูปที่ 1-1 (c) แท่งเหล็กจะกลายเป็นแท่งแม่เหล็ก

เมื่อเราใช้กฎมือขวากำรอบขดลวดตัวนำ จะได้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก คือ นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของสนามแม่เหล็ก ( $\Phi$ ) และนิ้วทั้งสี่จะชี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้า ( $I$ )

ทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากแท่งแม่เหล็กจะออกจากขั้วเหนือ (N) ไปหาขั้วใต้ (S) และจะมีทิศทางกระจายไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นเราจะต้องจำกัดทิศทางของสนามแม่เหล็กไม่ให้กระจายด้วยการทำแกนเหล็กให้เป็นรูป core ตามที่แสดงในรูป 1-2

### 1-3. วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit defined)

การแสดงวงจรแม่เหล็กในรูปที่ 1-2 ได้จากการนำสารแม่เหล็กที่จัดเป็นรูปแกนเหล็ก (core) ซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นไม่กระจายและมีทิศทางเฉพาะ



รูปที่ 1-2 วงจรแม่เหล็ก : (a) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า ; (b) สำหรับมอเตอร์ชนิด 2 ขั้ว

จากรูปที่ 1-2 (a) แสดงวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer)

จากรูปที่ 1-2 (b) แสดงวงจรแม่เหล็กของมอเตอร์ชนิด 2 ขั้ว ที่ประกอบด้วย stator core, rotor core และ air gap

### $\pi$ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magneto motive Force)

แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magneto motive Force หรือ mmf) เป็นตัวขับเคลื่อนสนามแม่เหล็กให้ปรากฏในวงจรแม่เหล็ก โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวดและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$F = NI$$

1.1

เมื่อ :  $F$  = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf)

มีหน่วยเป็น ampere-turns (A-t)

$N$  = จำนวนรอบของขดลวด

มีหน่วยเป็น turns (t)

$I$  = กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด มีหน่วยเป็น ampere (A)

### $\pi$ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity)

ความเข้มสนามแม่เหล็ก บางทีเรียกว่า “mmf gradient” ซึ่งหมายถึง แรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็กหรือส่วนของวงจรแม่เหล็ก และเมื่อคิดเป็นตัวเลขจะเท่ากับจำนวน ampere-turns ที่ใส่เข้าไปในวงจรแม่เหล็กหารด้วยความยาวเฉลี่ยของวงจรแม่เหล็ก ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$H = F / \ell = NI / \ell \quad \text{————— 1.2}$$

เมื่อ :  $H$  = ความเข้มสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น ampere-turns/meter (A-t/m)

$F$  = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) มีหน่วยเป็น ampere-turns (A-t)

$\ell$  = ความยาวของวงจรแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น meter (m)

วงจรแม่เหล็กที่มีสารแม่เหล็กชนิดเดียวกัน ความเข้มของสนามแม่เหล็กจะเท่ากันทุกจุดในวงจรแม่เหล็ก ส่วนวงจรแม่เหล็กผสมที่ประกอบด้วยสารแม่เหล็กต่างชนิดกัน และ/หรือมีพื้นที่หน้าตัดต่างกัน ก็จะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างกันในแต่ละส่วน

ความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีใช้งานมากในการคำนวณวงจรแม่เหล็ก เช่น หาความต่างศักย์ที่แตกต่างของแม่เหล็ก หรือแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ตกคร่อมในส่วนของวงจรแม่เหล็ก ซึ่งคล้ายกับ โวลต์เตลตกคร่อม (voltage drop) ของตัวนำในวงจรไฟฟ้า

### $\pi$ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux Density)

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นการวัดจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็ก ซึ่งหาได้จากสมการ

$$B = \Phi / A \quad \text{————— 1.3}$$

เมื่อ :  $B$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Weber/sq.meter ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ ) หรือ Teslas (T)

$\Phi$  = เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Weber (Wb)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น sq.meter ( $\text{m}^2$ )

#### 1-4. ความต้านทานแม่เหล็กและสมการวงจรแม่เหล็ก (Reluctance and the magnetic circuit equation)

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็ก, แรงเคลื่อนแม่เหล็กและความต้านทานแม่เหล็กคือ

$$\Phi = F / R = (NI) / R \quad 1.4$$

เมื่อ :  $\Phi$  = เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Weber (Wb)

$F$  = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) มีหน่วยเป็น ampere-turns (A-t)

$R$  = ความต้านทานของวงจรแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น ampere-turns/ Weber (A-t/wb)

ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) เป็นการวัดแรงต้านทานแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กที่เกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งคล้ายกับความต้านทานของวงจรไฟฟ้า ค่าความต้านทานแม่เหล็กจะสัมพันธ์กับความยาวของวงจรแม่เหล็ก ( $\ell$ ), พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (A) และค่าเปอร์มีเอะบิลิตี ( $\mu$ ) ซึ่งถ้านำเอาความยาวไปหารสมการที่ 1.4 แล้วจัดสมการใหม่จะได้

$$R = (NI) / \Phi = (NI / \ell) / (\Phi / \ell) = H / (B \cdot A / \ell) = \ell / (B / H) \cdot A \quad 1.5$$

กำหนดให้  $\mu = B / H \quad 1.6$

นั่นคือ  $R = \ell / \mu \cdot A \quad 1.7$

เมื่อ :  $B$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น  $\text{Wb/m}^2$  หรือ Teslas (T)

$H$  = ความเข้มสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น A-t/m

$\ell$  = ความยาวของวงจรแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น m

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2$

$\mu$  = ความซึมซาบการเป็นแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น  $\text{Wb} / \text{A-t-m}$

จากสมการที่ 1.7 จะต้องเป็นวงจรแม่เหล็กที่มีสารแม่เหล็กชนิดเดียวกัน และมีพื้นที่หน้าตัดที่เป็นรูปแบบเดียวกัน

#### $\mu$ ความซึมซาบการเป็นแม่เหล็ก (Magnetic Permeability)

อัตราส่วน  $\mu = B / H$  ถูกเรียกว่า Magnetic Permeability และจะมีค่าแตกต่างกันตามความสามารถในการเป็นแม่เหล็กของวัสดุที่ใช้ทำแกนแม่เหล็ก

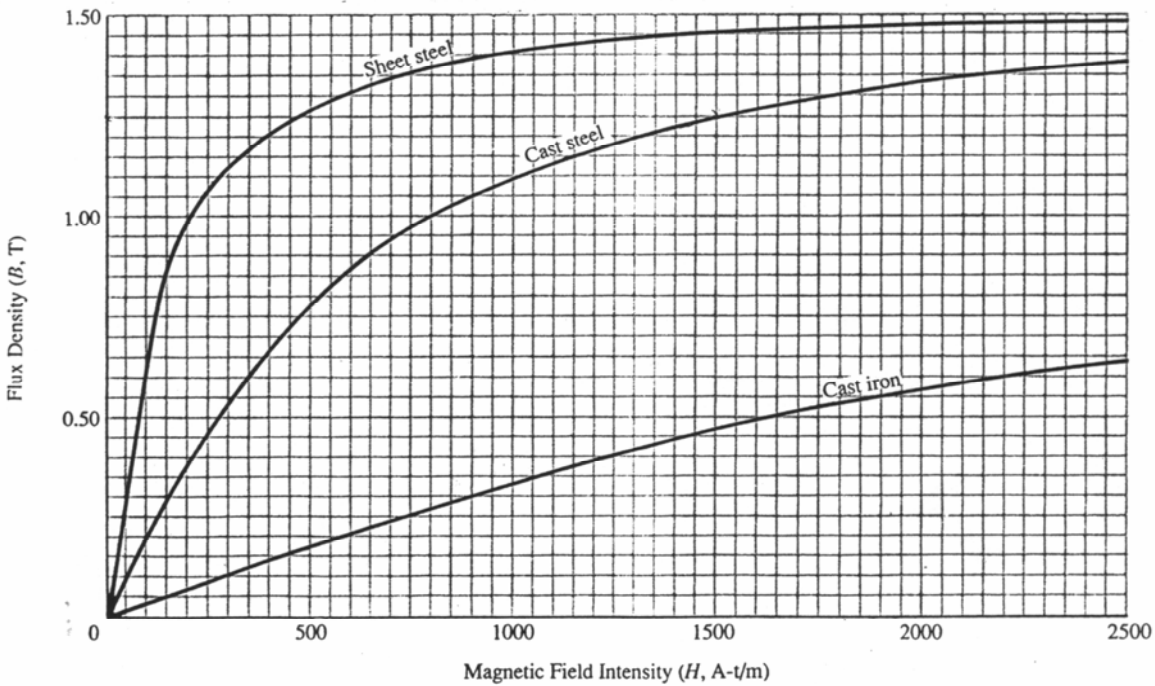
**1-5. ความซึมซาบสัมพัทธ์และกราฟแสดงการเป็นแม่เหล็ก (Relative permeability and Magnetization curves)**

Relative permeability คือ อัตราส่วนของความซึมซาบการเป็นแม่เหล็กต่อความซึมซาบของบรรยากาศ ซึ่งใช้เป็นค่าตัวเลขแสดงค่าความแตกต่างของการเป็นแม่เหล็ก ดังสมการ

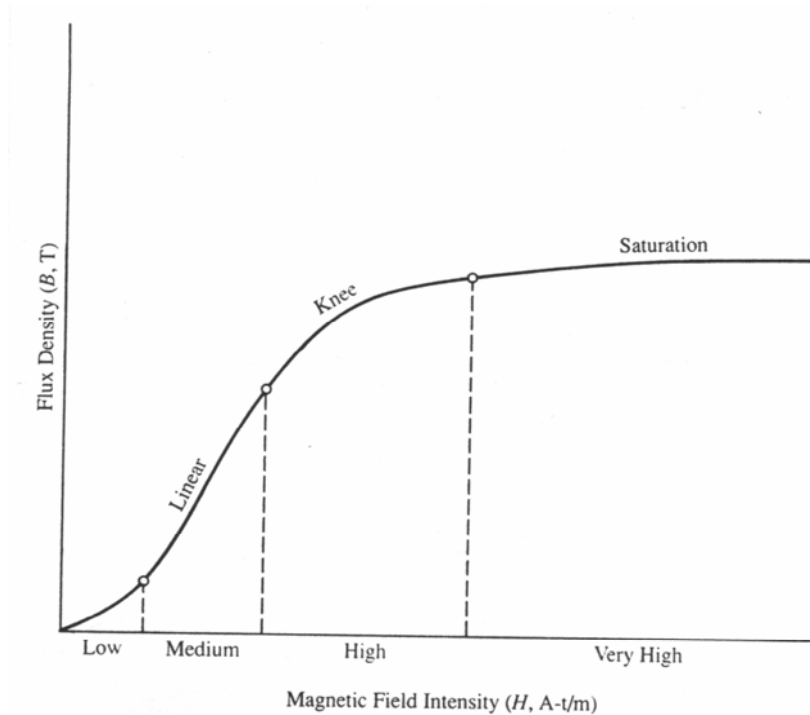
$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad \text{————— 1.8}$$

- เมื่อ :
- $\mu_r$  = Relative permeability : ความซึมซาบสัมพัทธ์ (ไม่มีหน่วย)
  - $\mu$  = Magnetic Permeability : ความซึมซาบการเป็นแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb/ A-t-m
  - $\mu_0$  = Permeability of free space : ความซึมซาบของบรรยากาศ =  $4\pi \times 10^{-7}$  Wb/ A-t-m

จากสมการที่ 1.6  $\mu = B/H$  สามารถนำมาแสดงเป็นกราฟแสดงการเป็นแม่เหล็กตามที่แสดงในรูปที่ 1-3 เรียกว่า เส้นโค้ง B-H (B-H curve) หรือเส้นโค้งการเป็นแม่เหล็ก (magnetization curve) หรือเส้นโค้งอิ่มตัว (saturation curve) ซึ่งจะนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบและวิเคราะห์คุณสมบัติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 1-3 เส้นโค้ง B-H ของสารแม่เหล็กบางชนิด



รูปที่ 1-4 เส้นโค้งแม่เหล็กสมมุติที่แสดงพื้นฐาน 4 ส่วน

จากรูปที่ 1-4 แสดงคุณลักษณะ 4 ประการ ของเส้นโค้งการเป็นแม่เหล็ก เส้นโค้งขึ้นสำหรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำ (Low) เส้นโค้งที่เป็นเส้นตรง (Linear) จะแสดงความเข้มสนามแม่เหล็กปานกลาง (Medium) ส่วนโค้งตรงที่มีเส้นโค้งเว้าลง เรียกว่า นิ (Knee) จะแสดงความเข้มแม่เหล็กสูง (High) และส่วนที่เหลือเกือบแนวแบนราบเป็นเส้นตรงจะแสดงความเข้มสูงมาก (Very High) เรียกว่า เขตอิ่มตัว (Saturation)

สนามแม่เหล็กจะอิ่มตัว เมื่อโดเมนแม่เหล็กถูกจัดอยู่ในทิศทางของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป เขตอิ่มตัวจะเริ่มตั้ง Knee จนถึงแนวแบนราบ ขึ้นอยู่การใช้งานชนิดใด แท่งแม่เหล็กอาจจะเอามาใช้สำหรับเขตเส้นตรง (Linear) เขต Knee หรือเขตอิ่มตัว ตัวอย่างเช่น

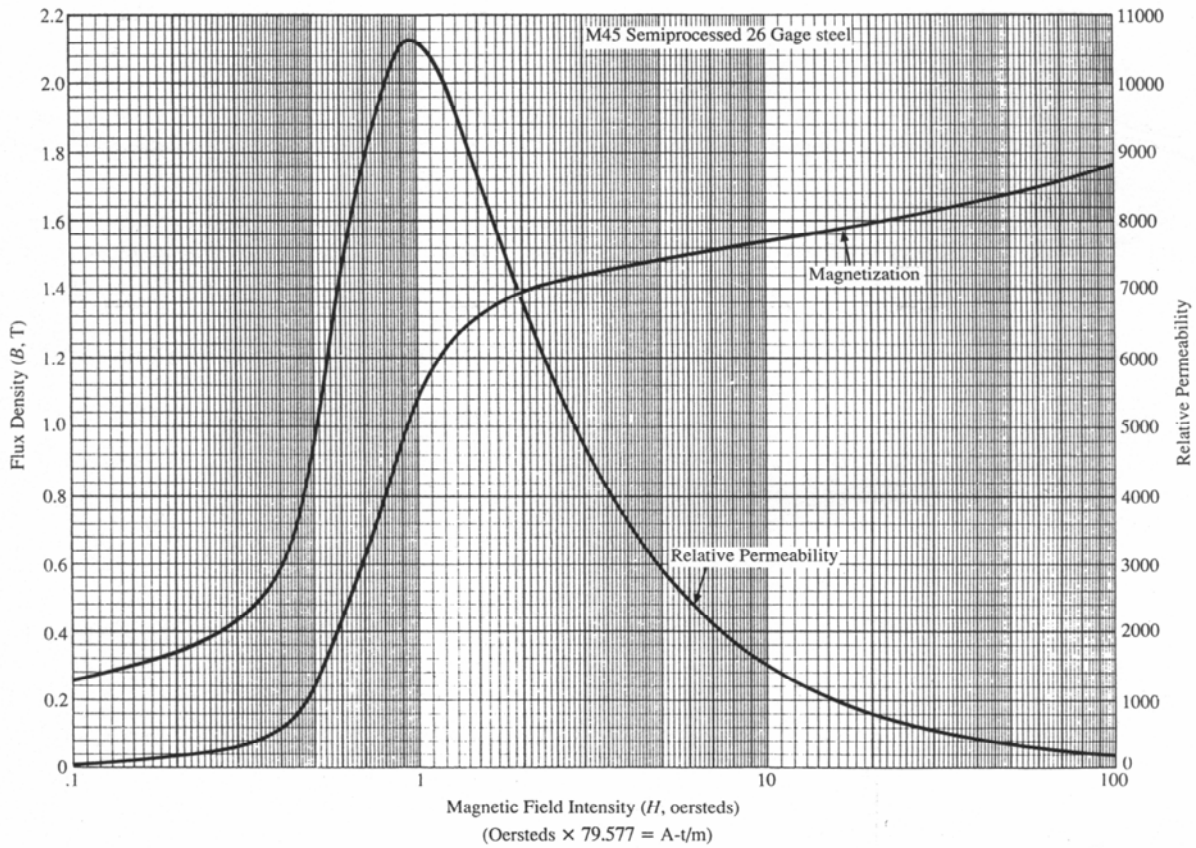
๑ เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับและหม้อแปลงไฟฟ้า จะถูกใช้ในเขตเส้นตรง Linear และส่วนล่างของเขต Knee

๑ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นภายในตัวเอง (self excited) และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะถูกใช้ในส่วนปลายบนของเขต Knee ขยายไปจนถึงเขตอิ่มตัว

๑ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นจากภายนอก (separately excited) จะถูกใช้ในเขตเส้นตรง Linear และส่วนล่างของเขต Knee



เส้นโค้งแสดงการเป็นแม่เหล็กจะทำมาจากโรงงานผู้ผลิต สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำมาจากเหล็กแผ่นหรือเหล็กหล่อ และจะบันทึกลงกระดาษเซมิคอนดักเตอร์เป็นรูปโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง relative permeability ต่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก ตามที่แสดงในรูปที่ 1-5



รูปที่ 1-5 เส้นโค้งแม่เหล็ก และ permeability ของแผ่นเหล็กที่นำมาใช้เป็นแม่เหล็ก

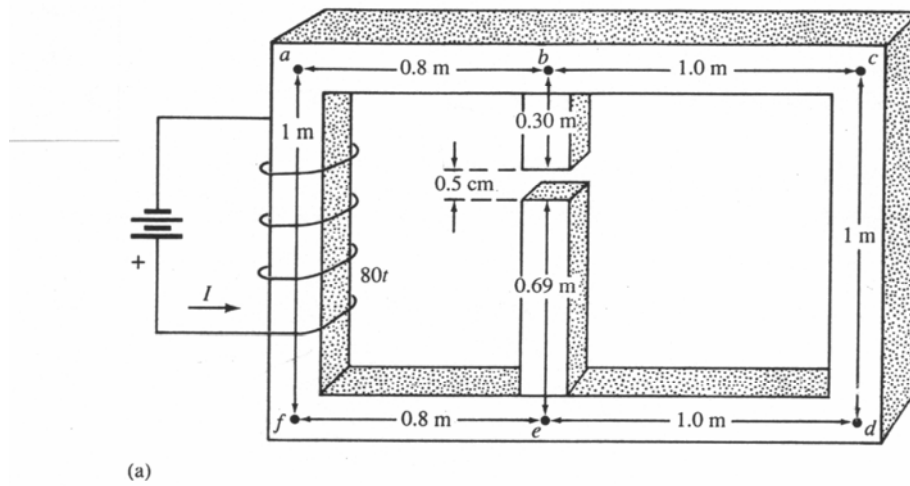
ความสัมพันธ์ระหว่าง relative permeability และ Reluctance ของแท่งแม่เหล็กหาได้จากสมการที่ 1.8 เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการที่ 1.7 จะได้

$$R = l / \mu A = l / \mu_r \mu_o A \quad 1.9$$

จากสมการที่ 1.9 แสดงให้เห็นว่า Reluctance ของวงจรมแม่เหล็กที่มีผลมาจากค่า relative permeability ของสารตามที่แสดงในรูปที่ 1-5 ขึ้นอยู่กับความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งไม่ใช่ค่าที่คงที่

**Example 1-1** (a) Determine the voltage that must be applied to the magnetizing coil in Figure 1-6 (a) in order to produce a flux density of 0.2 T in the air gap. *Flux fringing*, which always occurs along the sides of an air gap, as show in Figure 1-6 (b), will be assumed negligible. Assume the magnetization curve for the core material (which is homogeneous) is that given in Figure 1-5. The coil has 80 turns and a resistance of  $2.05 \Omega$ . The cross section of the core material is  $0.04 \text{ m}^2$

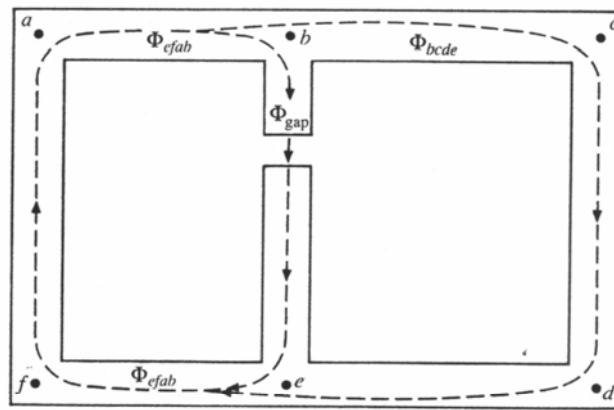
(b) Using Eqs. 1.6 and 1.8 Determine the relative permeability of each of the three legs of the core and compare the calculated values with the corresponding values obtains from the permeability curve in Figure 1-5



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 1-6 วงจรแม่เหล็กของตัวอย่างที่ 1-1 (a) รูปเขียนแบบกำหนดขนาด ; (b) เส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (c) การกระจายเส้นแรงแม่เหล็ก

**Solution\_** (a) รูปเขียนแบบและขนาดของวงจรแม่เหล็กตามที่แสดงในรูป 1-6 (a) จะใช้เกี่ยวกับเส้นโค้ง B-H เพื่อหาความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เป็นส่วนประกอบเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายอยู่ในรูปที่ 1-6 (c) ลำดับขั้นตอนการแก้ปัญหาทำได้ดังต่อไปนี้

Step 1 : หาค่า  $\Phi_{\text{gap}}$  และ  $F_{\text{be}}$

Step 2 : หาค่า  $H_{\text{bcde}}$ ,  $B_{\text{bcde}}$  และ  $\Phi_{\text{bcde}}$

Step 3 : หาค่า  $\Phi_{\text{efab}}$ ,  $B_{\text{efab}}$ ,  $H_{\text{efab}}$  และ  $F_{\text{efab}}$

Step 4 : หาค่า  $F_T$  เมื่อทราบจำนวนรอบของขดลวด และหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการ

Step 5 : ใช้กฎของ Ohm's law หาค่า Voltage ที่ต้องการ

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนขากลางตรง air gap หาได้จากสมการ

$$\Phi_{\text{gap}} = B_{\text{gap}} \cdot A_{\text{gap}} = 0.2 \times 0.04 = 0.008 \text{ Wb}$$

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ทะลุผ่านแท่งแม่เหล็กทั้งสองขา คือ 0.2 T ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ต้องการหาได้จาก magnetization curve ในรูปที่ 1-5 คือ

$$H_{0.30} = H_{0.69} \approx 0.47 \times 79.577 = 37.4 \text{ A-t/m}$$

ผลลัพธ์ของความต่างศักย์แม่เหล็กที่ตกคร่อมตรงขากลางของแท่งเหล็กแต่ละขาหาได้จากสมการ

$$F_{0.30} = H \cdot \ell = 37.4 \times 0.30 = 11.22 \text{ A-t}$$

$$F_{0.69} = H \cdot \ell = 37.4 \times 0.69 = 25.81 \text{ A-t}$$

ความต่างศักย์แม่เหล็กที่อยู่คร่อม air gap เพื่อให้ได้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็น 0.2 T หาได้จากสมการที่ 1.6 คือ

$$\mu_{\text{gap}} = B_{\text{gap}} / H_{\text{gap}} \Rightarrow H_{\text{gap}} = B_{\text{gap}} / \mu_{\text{gap}}$$

$$H_{\text{gap}} = 0.2 / 4 \pi \times 10^{-7} = 159,155 \text{ A-t/m}$$

ผลลัพธ์ของความต่างศักย์แม่เหล็กที่ตกคร่อม air gap คือ

$$F_{\text{gap}} = H_{\text{gap}} \cdot \ell_{\text{gap}} = 159,155 \times 0.005 = 795.77 \text{ A-t}$$

ดังนั้นผลรวมของความต่างศักย์แม่เหล็กที่ตกคร่อมขากลางของแท่งเหล็กจะเป็น

$$\begin{aligned} F_{\text{be}} &= F_{0.30} + F_{0.69} + F_{\text{gap}} \\ &= 11.22 + 25.81 + 795.77 = 832.8 \text{ A-t} = 833 \text{ A-t} \end{aligned}$$

เนื่องจาก  $F_{\text{be}}$  คือ ค่าความต่างศักย์แม่เหล็กที่ตกคร่อม bcde ด้วยเช่นกัน ดังนั้นความเข้มของสนามแม่เหล็กในเขตนี้ก็คือ

$$H_{\text{bcde}} = F / \ell = 833 / (1 + 1 + 1) = 277.67 \text{ A-t/m}$$

เปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจากหน่วย A-t/m เป็น โอเออร์สเตด (oersteds) จากกราฟรูปที่ 1-5 จะได้

$$277.67 \div 79.577 = 3.49 \text{ oersteds}$$

เมื่อนำค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก = 3.49 oersteds ไปเทียบกับกราฟ magnetization curve จากรูปที่ 1-5 จะได้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก คือ

$$B_{bcde} \approx 1.45 \text{ T}$$

ดังนั้นจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กในส่วน of bcde คือ

$$\Phi_{bcde} = B.A = 1.45 \times 0.04 = 0.058 \text{ Wb}$$

และผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่จ่ายโดยขดลวด คือ

$$\Phi_{efab} = \Phi_{gap} + \Phi_{bcde} = 0.008 + 0.058 = 0.066 \text{ Wb}$$

และ 
$$B_{efab} = \Phi_{efab} / A = 0.066 / 0.04 = 1.65 \text{ T}$$

ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ต้องการใช้สร้างค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 1.65 T ในขาซ้ายของแท่งเหล็กหาได้จากกราฟ magnetization curve รูปที่ 1-5 จะได้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก  $\approx 37$  oersteds นั่นคือ

$$H_{efab} = 37 \times 79.577 = 2944.35 \text{ A-t/m}$$

ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ตกคร่อมในส่วน efab คือ

$$F_{efab} = H_{efab} \cdot \ell = 2944.35 \times (1 + 0.8 + 0.8) = 7655.31 \text{ A-t}$$

และผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งหมดที่จ่ายโดย magnetizing coil คือ

$$F_T = F_{bc} + F_{efab} = 7655.31 + 833 = 8488.31 \text{ A-t}$$

หาค่ากระแสไฟฟ้าจากสมการ

$$F_T = NI \Rightarrow I = F_T / N = 8488.31 / 80 = 106.1 \text{ A}$$

หาค่า Voltage ที่จ่ายให้กับ magnetizing coil โดยใช้กฎของ Ohm's law คือ

$$E = IR = 106.1 \times 2.05 = 217.5 \text{ V}$$

**Ans**

(b) ใช้สมการที่ 1.6 and 1.8 หาค่า relative permeability ทั้งสามขาของแท่งเหล็ก จากสมการ

$$\mu_r = \mu / \mu_0 = (B / H) / (4 \pi \times 10^{-7}) = B / [(4 \pi \times 10^{-7}) \cdot H]$$

$$\mu_{left} = 1.65 / [(4 \pi \times 10^{-7}) \times 2944] = 446$$

$$\mu_{center} = 0.2 / [(4 \pi \times 10^{-7}) \times 37.4] = 4256$$

$$\mu_{right} = 1.45 / [(4 \pi \times 10^{-7}) \times 277.67] = 4156.1$$

จะสังเกตเห็นได้ว่าแม้ว่าแท่งเหล็กจะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด แต่ค่า permeability จะไม่ได้เท่ากันตลอด ทุกส่วนของแท่งเหล็ก โดยที่ขาซ้ายมีอำนาจแม่เหล็กมากกว่าจะเข้าใกล้จุดอิ่มตัว แต่จะมีค่า permeability ต่ำกว่าขาอื่นอยู่มาก

ตารางต่อไปนี้จะเป็นการเปรียบเทียบค่า relative permeability ของขาของแท่งเหล็กที่หาได้จากกราฟ magnetization curve รูปที่ 1-5 กับค่าที่ได้จากการคำนวณ

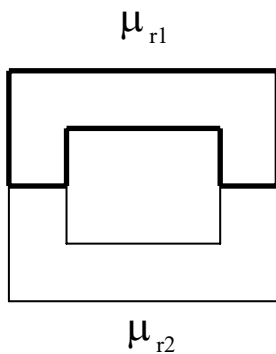
Core	H (A-t/m)	B (T)	$\mu_r$ (calc)	$\mu_r$ (curve)
Left leg	2944	1.65	446	450
Center leg	37.4	0.20	4256	4000
Right leg	277.67	1.45	4156	4100

**Example 1-2** ขดลวดจำนวน 300 รอบ มีความต้านทาน 4.8  $\Omega$  ต่ออยู่กับแบตเตอรี่ขนาด 48 V พันรอบแกนเหล็กต่างชนิดประกอบกันดังแสดงในรูปภาพ (a) แกนเหล็กมีพื้นที่หน้าตัด 1224 cm<sup>2</sup> และมีความยาวโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4 m ค่า relative permeability ของแกนเหล็กมีค่า

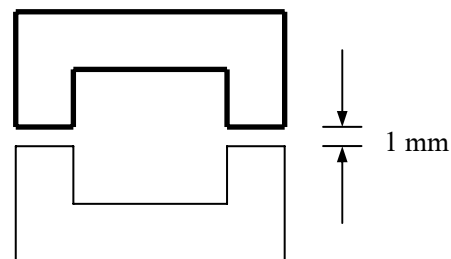
$$\mu_{r1} = 20000$$

$$\mu_{r2} = 37150$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A-t.m}$$



(a)



(b)

จงหา (a) เส้นแรงแม่เหล็ก (core flux)

(b) ถ้าแกนเหล็กถูกทำให้แยกออกจากกันเป็นระยะห่าง 1 mm ตามรูป (b) โดยไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว และค่า reluctance ของแกนเหล็กไม่เปลี่ยนแปลง จงหาเส้นแรงแม่เหล็ก (new core flux) และแรงเคลื่อนแม่เหล็กคร่อม air gap

**Solution** (a) เส้นแรงแม่เหล็ก (core flux)

$$\text{จากสมการ } \mu = \mu_{r1} \mu_0 = 2000 (4\pi \times 10^{-7}) = 0.025 \text{ Wb/A-t.m}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } R_1 &= \ell / \mu \cdot A = (4/2) / [(0.025)(1224 \times 10^{-4})] \\ &= 653.595 \text{ A-t/Wb} \end{aligned}$$

$$\text{จากสมการ } \mu = \mu_{r2} \mu_0 = 37150 (4\pi \times 10^{-7}) = 0.047 \text{ Wb/A-t.m}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } R_2 &= \ell / \mu \cdot A = (4/2) / [(0.047)(1224 \times 10^{-4})] \\ &= 347.657 \text{ A-t/Wb} \end{aligned}$$

ใช้กฎของ ohm's law หาค่ากระแสไฟฟ้า

$$I = E / R = 48 / 4.8 = 10 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } \Phi &= (NI) / R = (NI) / (R_1 + R_2) \\ &= (300 \times 10) / (653.595 + 347.657) \\ &= 2.996 \text{ Wb} \end{aligned}$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

(b) ถ้าแกนเหล็กถูกทำให้แยกออกจากกันเป็นระยะห่าง 1 mm ตามรูป (b) โดยไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กไว้ และค่า reluctance ของแกนเหล็กไม่เปลี่ยนแปลง จงหาเส้นแรงแม่เหล็ก (new core flux) และแรงเคลื่อนแม่เหล็กคร่อม air gap

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } R_{\text{gap}} &= \ell / \mu_0 \cdot A = (1 \times 10^{-3}) \times 2 / [(4\pi \times 10^{-7})(1224 \times 10^{-4})] \\ &= 13002.855 \text{ A-t/Wb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \Phi_{\text{new}} &= (NI) / (R_1 + R_2 + R_{\text{gap}}) \\ &= (300 \times 10) / (653.595 + 347.657 + 13002.855) \\ &= 0.214 \text{ Wb} \end{aligned}$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } F_{\text{gap}} &= \Phi_{\text{new}} \cdot R_{\text{gap}} = (0.214)(13002.855) \\ &= 2782.61 \text{ A-t} \end{aligned}$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

-----

**1-6. ความคล้ายคลึงระหว่างวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก (Analogies between Electric and Magnetic circuit)**

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็ก และความต้านทานแม่เหล็ก ในวงจรแม่เหล็ก จะเหมือนกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความต้านทานในวงจรไฟฟ้า คือ

$$\Phi = F / R \Rightarrow I = E / R$$

$\Phi$  = เส้นแรงแม่เหล็ก                                      จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับ  $I$  = กระแสไฟฟ้า

$F$  = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf)                                  จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับ  $E$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf)

$R$  = ความต้านทานในวงจรแม่เหล็ก                              จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับ  $R$  = ความต้านทานในวงจรไฟฟ้า

**$\pi$  ค่า reluctance ต่ออนุกรม**

ค่าสมมูล reluctance ของ reluctance จำนวน  $n$  ตัว ต่ออนุกรมกัน หาได้จากสมการ

$$R_{ser} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_n$$

—————1.10

**$\pi$  ค่า reluctance ต่อขนาน**

ค่าสมมูล reluctance ของ reluctance จำนวน  $n$  ตัว ต่อขนานกัน หาได้จากสมการ

$$1/R_{par} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4 \dots + 1/R_n$$

หรือ

$$R_{par} = 1 / (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4 \dots + 1/R_n)$$

—————1.11

**$\pi$  ค่า reluctance ต่ออนุกรม-ขนาน**

ค่าสมมูล reluctance ของ reluctance ที่ต่ออนุกรม-ขนานกัน ตามที่แสดงในรูปที่ 1-7 (a) ใช้แทนด้วย lumped reluctances ที่อยู่ในวงจรแม่เหล็กสมมูล และในรูปที่ 1-7 (b) โดยใช้วิธีที่พัฒนามาจากวงจรไฟฟ้า ค่า reluctance ทั้งหมดของวงจรแม่เหล็กที่ต่ออนุกรมและขนานกันก็คือ

$$R_T = R_1 + (R_2 \cdot R_3) / (R_2 + R_3)$$

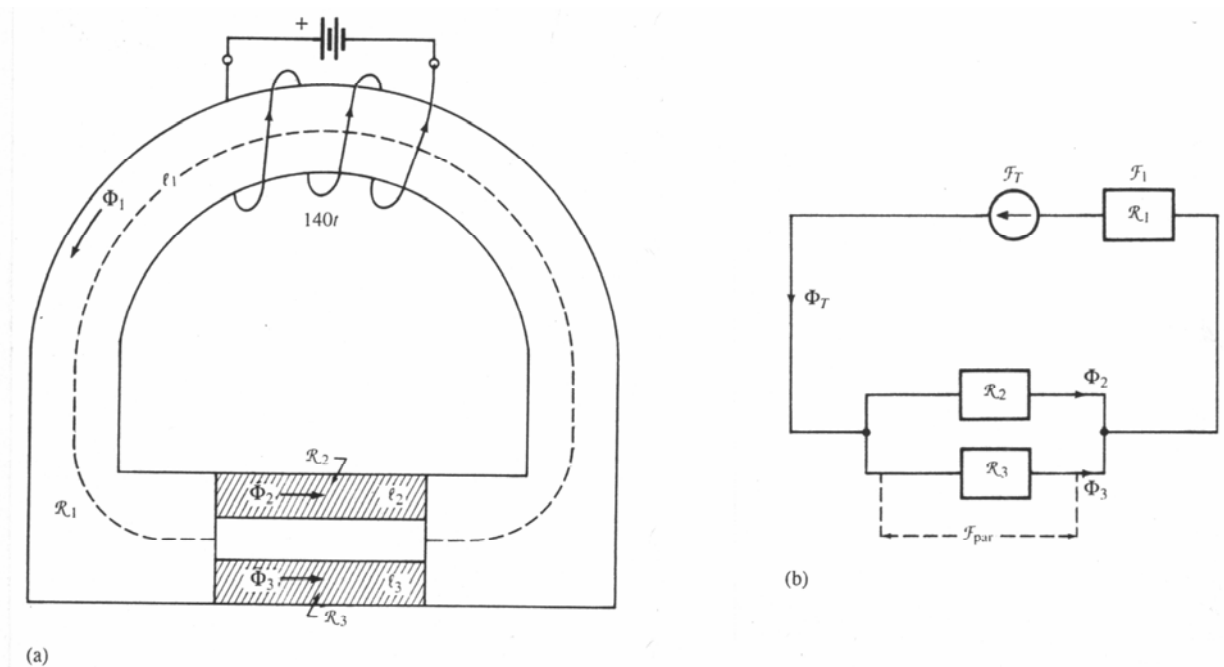
—————1.12

**Example 1-3.** Assume that flux  $\Phi_T$  in Figure 1-7 (a) is 0.25 Wb. and that the magnetic circuit parameters for this condition are

$$R_1 = 10,500 \text{ A-t/Wb} \quad R_2 = 40,000 \text{ A-t/Wb} \quad R_3 = 30,000 \text{ A-t/Wb}$$

The magnetizing coil is wound with 140 turns of copper wire. Determine

- (a) the current in coil                      (b) the magnetic-potential difference across  $R_3$   
 (c) the flux in  $R_2$



รูปที่ 1-7 วงจรแม่เหล็กของตัวอย่าง 1-3 (a) รูปทางกายภาพ (b) วงจรแม่เหล็กสมมูล

**Solution** (a) จากรูปที่ 1-7 (b) วงจรแม่เหล็กสมมูล จะได้

$$R_{\text{par}} = (R_2 \cdot R_3) / (R_2 + R_3) = (40,000 \times 30,000) / (40,000 + 30,000) = 17,142.8571 \text{ A-t/Wb}$$

$$R_T = R_1 + R_{\text{par}} = 10,500 + 17,142.8571 = 27,642.8571 \text{ A-t/Wb}$$

จากสมการ

$$\Phi_T = NI / R_T \Rightarrow I = (\Phi_T \cdot R_T) / N$$

$$I = (0.25 \times 27,642.8571) / 140 = 49.36 \text{ A}$$

**Ans**



(b) หาค่าความต่างศักย์แรงเคลื่อนแม่เหล็กตกคร่อม  $R_3$

ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กตกคร่อม  $R_1$  หาได้จากสมการ

$$F_1 = \Phi_T \cdot R_1 = 0.25 \times 10,500 = 2625 \text{ A-t}$$

ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของวงจร ( $R_T$ ) หาได้จากสมการ

$$F_T = NI = 140 \times 49.36 = 6910.40 \text{ A-t}$$

ดังนั้นค่าความต่างศักย์แรงเคลื่อนแม่เหล็กตกคร่อม  $R_3$  คือ

$$F_{\text{par}} = F_3 = F_T - F_1 = 6910.40 - 2625 = 4285.40 \text{ A-t}$$

**Ans** \_\_\_\_\_

(c) หาค่าเส้นแรงแม่เหล็กใน  $R_2$  จากสมการ

$$\Phi_2 = F_{\text{par}} / R_2 = 4285.40 / 40,000 = 0.1071 \text{ Wb}$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

หรือหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กใน  $R_2$  จากกฎการแบ่งกระแส (current divider rule)

$$\Phi_2 = \Phi_T \times [R_3 / (R_2 + R_3)] = 0.25 \times [30,000 / (40,000 + 30,000)]$$

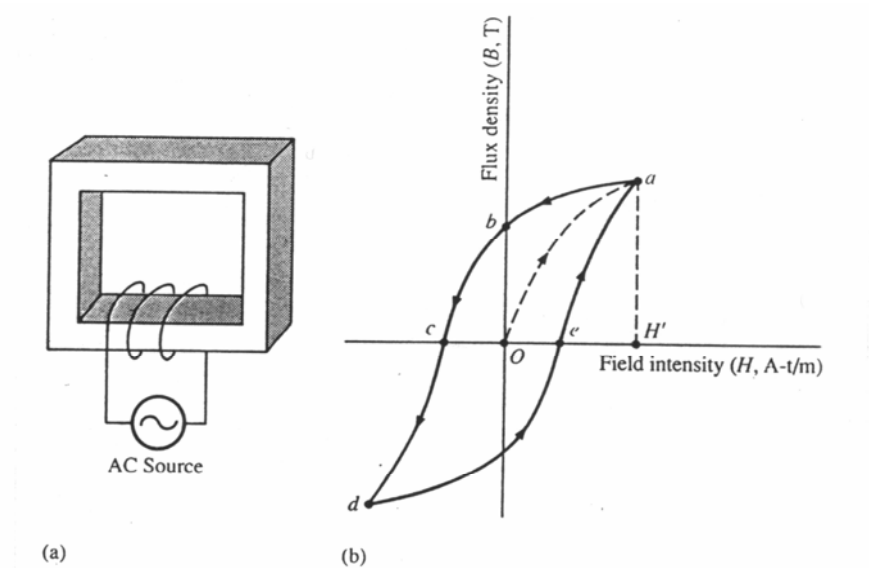
$$\Phi_2 = 0.1071 \text{ Wb}$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

-----

## 1-7 Magnetic Hysteresis and Hysteresis Loss

ถ้าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของไฟฟ้ากระแสสลับถูกใส่เข้าไปในสารแม่เหล็ก ตามที่แสดงในรูปที่ 1-8 (a) ก็จะสามารถบันทึกเส้นโค้ง B-H ได้ โดยผลของเส้นโค้งที่เห็นจะแสดงความไม่กลับเข้าสู่ที่เดิมตามที่แสดงในรูปที่ 1-8 (b) เราเรียกว่า hysteresis และผลของเส้นโค้งที่เกิดจากกราฟเรียกว่า hysteresis loop



รูปที่ 1-8 (a) วงจรแม่เหล็กที่จ่ายแรงเคลื่อนแม่เหล็กสลับ; (b) representative hysteresis loop

การเริ่มต้นจากแท่งเหล็กที่ยังไม่กลายเป็นแม่เหล็ก ที่จุด O ค่า  $H=0$  และ  $B=0$  เมื่อทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าในขดลวดในทิศทางบวกจะทำให้ค่า ampere-turns เพิ่มขึ้น และความเข้มของสนามแม่เหล็กคือ

$$H = NI / \ell$$

เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงสุด ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดตามลำดับ โดยเส้นโค้งจะเริ่มจากจุด O ไปยังจุด a ตามที่แสดงด้วยเส้นไขว่ปลา ซึ่งเราเรียกว่า เวอร์จินของเส้นโค้ง (virgin section) และเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มลดลง เส้นโค้งจะเปลี่ยนทางเดิน เมื่อกระแสไฟฟ้าลดลงมาที่ศูนย์ ค่า H จะเป็นศูนย์ แต่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแท่งเหล็กจะตามหลังมาอยู่ที่จุด b ของเส้นโค้ง ซึ่งความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่จุด b ก็คือ อำนาจแม่เหล็กตกค้าง(residual magnetism) และค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ตามหลังความเข้มของสนามแม่เหล็กนี้ คือ ผลกระทบของ hysteresis (hysteresis effect)

ถ้ากระแสไฟฟ้าและความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องถูกเพิ่มขึ้นในทิศทางลบ อำนาจแม่เหล็กตกค้างที่จุด b จะลดลงแต่ยังคงเป็นบวกอยู่จนกระทั่งถึงจุด c ซึ่งเป็นเวลาที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแท่งเหล็กเป็นศูนย์ และความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เป็นลบต้องการแรงบังคับให้อำนาจ

แม่เหล็กตกค้างอยู่เป็นศูนย์ เรียกว่า แรงโคเวอร์ซีฟ (coercive force) ซึ่งแทนด้วยเส้น Oc บนแกน H ขณะที่กระแสไฟฟ้าอยู่ใน cycle ถบ การ plot กราฟ B ต่อ H ก็จะไปตามจุด c-d-e-a-b-c บน hysteresis loop

Hysteresis ของแม่เหล็กจะมีผลกระทบต่ออัตราการตอบสนองของเส้นแรงแม่เหล็กต่อสนามแม่เหล็กในเรื่องเกี่ยวกับทางไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งต้องการคุณสมบัติที่จำเป็นของความเร็วและสัดส่วนการตอบสนองของเส้นแรงแม่เหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยการมีค่าแม่เหล็กหลงเหลืออยู่น้อย ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าจึงต้องใช้เหล็กซิลิคอนที่มีคุณภาพสูง ส่วนเครื่องจักรกลไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด self-excited ต้องการแท่งเหล็กที่คงไว้ซึ่งอำนาจแม่เหล็กตกค้าง เพื่อที่จะสร้าง voltage สะสม (buildup voltage) ส่วน stepper motor และ DC motor ต้องใช้แม่เหล็กถาวรที่จะทำให้อำนาจแม่เหล็กมีค่าสูงและคงอยู่ได้นาน ดังนั้นการเลือกแท่งเหล็กเพื่อให้ได้สารแม่เหล็กที่ต้องการขึ้นอยู่กับว่าจะนำไปใช้งานกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทใด

### π การสูญเสียในฮิสเตอร์รีซิสของแม่เหล็ก (Magnetic Hysteresis Loss)

ถ้าเอาไฟฟ้ากระแสสลับต่อเข้ากับขดลวดแม่เหล็กตามที่แสดงในรูปที่ 1-8 (a) ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กกระแสสลับจะทำให้กลุ่มแม่เหล็กเล็ก ๆ เรียงตัวไปตามแนวแกนแม่เหล็ก การเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะทำให้เกิดความร้อน โดยเหล็กที่มีความแข็งมากจะเกิดความร้อนมาก การสูญเสียกำลังฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Loss) กำหนดได้จากชนิดของสารที่นำมาทำแท่งเหล็ก ซึ่งจะเปลี่ยนค่าไปตามความถี่ (frequency) และค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กยกกำลัง n ซึ่งสามารถนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_h = K_h f B_{\max}^n \quad \text{1.13}$$

เมื่อ :

$P_h$  = hysteresis Loss มีหน่วยเป็น Watt (W)

$K_h$  = constant

$f$  = frequency of flux wave มีหน่วยเป็น Hz

$B_{\max}$  = maximum value of flux density wave มีหน่วยเป็น T

ค่าคงที่  $K_h$  ขึ้นอยู่กับความเป็นแม่เหล็กของสาร ความหนาแน่นของสารและหน่วยที่ใช้

**Example 1-4.** The hysteresis loss in a certain electrical apparatus operating at its rated voltage and rated frequency of 240 V and 25 Hz is 846 W. Determine the hysteresis loss if the apparatus is connected to a 60 Hz source whose voltage is such as to cause the flux density to be 62 percent of its rated value.

Assume the Steinmetz exponent is 1.4

**Solution** จากสมการ  $P_h = K_h f B_{\max}^n$  จะได้

$$(P_h)_1 / (P_h)_2 = (K_h f B_{\max}^n)_1 / (K_h f B_{\max}^n)_2$$

$$P_{h2} = P_{h1} \times (K_h f B_{\max}^n)_2 / (K_h f B_{\max}^n)_1$$

$$= P_{h1} \times (f_2 / f_1) \times (B_{\max 2} / B_{\max 1})^n$$

$$= 846 \times (60/25) \times (0.62/1.0)^{1.4}$$

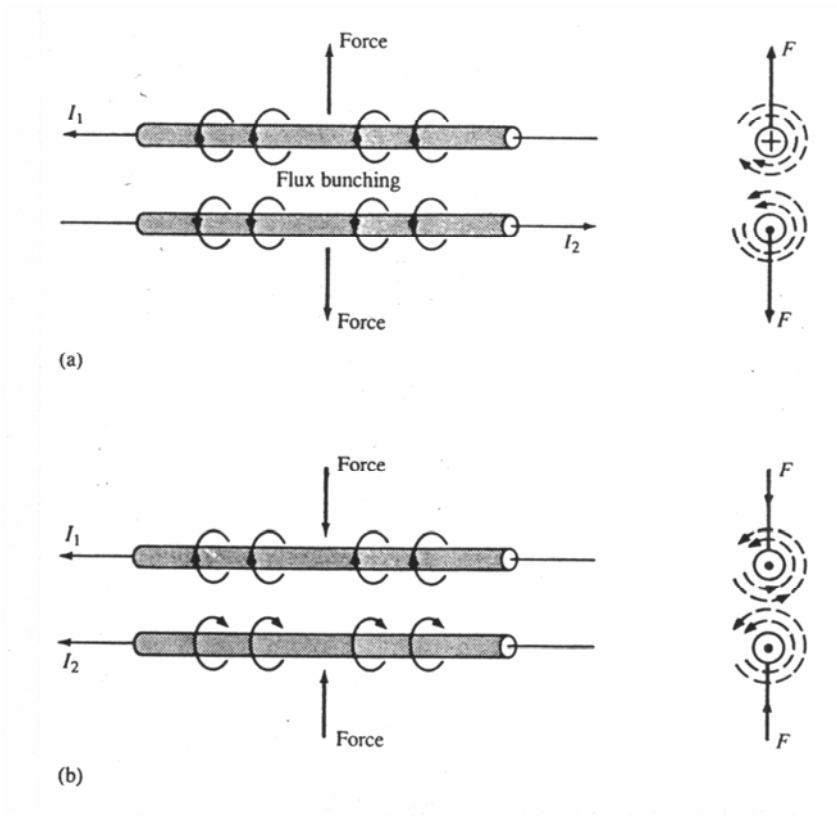
$$= 1.04 \text{ kW}$$

Ans

-----

### 1-8 การกระทำของสนามแม่เหล็กร่วมกัน (Motor Action)

การกระทำของสนามแม่เหล็กร่วมกัน (ปฏิกิริยาการเกิดมอเตอร์) คือ เมื่อสนามแม่เหล็ก 2 สนาม หรือมากกว่าถูกจัดให้เส้นแรงแม่เหล็กขนานกันในพื้นที่ร่วมกัน จะทำให้เกิดแรงทางกล (mechanical force) จากการผลักของแรงแม่เหล็กซึ่งกันและกัน แรงผลักจะเกิดขึ้นถ้าแม่เหล็กสองแหล่งมีเส้นแรงแม่เหล็กขนานกันและมีทิศทางเดียวกัน จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กรวมเพิ่มขึ้นในพื้นที่ร่วมกัน เราเรียกว่า ฟลักซ์ บันจิง (Flux bunching)



รูปที่ 1-9 (a) กระแสไฟฟ้าอยู่ในทิศทางตรงข้ามกัน; (b) กระแสไฟฟ้าอยู่ในทิศทางเดียวกัน

จากรูปที่ 1-9 (a) แสดงแม่เหล็กร่วมของตัวนำที่วางอยู่ใกล้กันที่มีทิศทางกระแสไฟฟ้าตรงข้ามกัน จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางเดียวกัน และการรวมของเส้นแรงแม่เหล็ก เรียกว่า Flux bunching ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดแรงผลัก

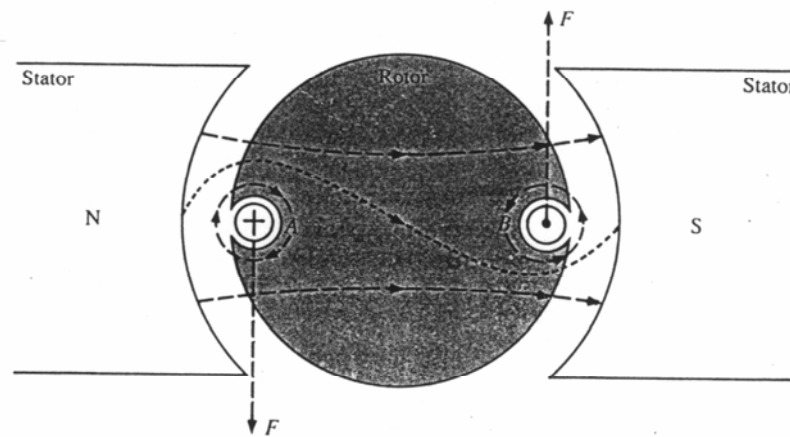
ถ้าสนามแม่เหล็กที่ขนานกัน มีทิศทางกระแสไฟฟ้าทางเดียวกัน จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางตรงข้ามกัน และเส้นแรงแม่เหล็กรวมจะหักล้างกัน ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแรงดูด ตามที่แสดงในรูปที่ 1-9 (b)

### 1-9 Elementary two-pole motor

ส่วนประกอบของมอเตอร์จะประกอบด้วยส่วนที่อยู่กับที่ เรียกว่า Stator และส่วนที่หมุน เรียกว่า Rotor

๑ Stator เป็นส่วนที่อยู่กับที่ โดยมีขดลวดตัวนำพันลงใน slot ของ stator ที่เป็นแกนเหล็ก และต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็กทำให้แกนเหล็กกลายเป็นแม่เหล็กและเกิดขั้วแม่เหล็กประจำที่ขึ้น คือ ขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) โดยสนามแม่เหล็กจะเดินทางจากขั้ว N ไปยังขั้ว S

๒ Rotor เป็นส่วนที่หมุนเคลื่อนที่ โดยจะวางอยู่ตรงกลางของ stator และจะประกอบด้วยขดลวดตัวนำหุ้มด้วยฉนวนวางอยู่ในร่อง slot ของ rotor



รูปที่ 1-10 ปฏิบัติการเกิดมอเตอร์

จากรูปที่ 1-10 แสดงมอเตอร์สองขั้วแบบพื้นฐาน โดยแท่งเหล็ก rotor ประกอบด้วยตัวนำหุ้มฉนวน 2 ตัว คือ ตัวนำ A และตัวนำ B วางอยู่ในร่อง slot ของ rotor โดยเครื่องหมาย + ที่ตัวนำ A คือ หางลูกศรซึ่งแสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหลเข้าตัวนำ A และจุด  $\ominus$  ตรงกลางตัวนำ B คือ หัวลูกศรซึ่งแสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหลออกจากตัวนำ B และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำ A และ B เราสามารถหาได้จากกฎมือขวา คือ

๑ ตัวนำ A เครื่องหมาย + คือ หางลูกศรซึ่งแสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหลเข้าตัวนำ A ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำ A มีทิศทางตามเข็มนาฬิกา (Clock Wise : CW)

๒ ตัวนำ B เครื่องหมาย  $\ominus$  คือ หัวลูกศรซึ่งแสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหลออกจากตัวนำ A ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำ B มีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (Counter Clock Wise : CCW)

๓ เส้นปะ จะแสดงทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้ว N ไปยังขั้ว S ซึ่งสมมุติว่า rotor และ stator ถูกส่งพลังงานในเวลาที่แตกต่างกัน

\* เส้นจุดไขว้ปลาตรงกลาง จะแสดงทิศทางและเส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งเป็นผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รวมระหว่าง rotor กับ stator จะสังเกตเห็นว่าผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดส่วนบนของตัวนำ A ของ rotor บวกกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กของ stator ที่เราเรียกว่า flux-bunching จะทำให้เกิดแรงทางกล F กดลง และในทำนองเดียวกันเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กที่รวมเกิดขึ้นที่ส่วนล่างของตัวนำ B บวกกับทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กของ stator จะทำให้เกิดแรงทางกล F ดันขึ้น ซึ่งการกระทำทั้งสองนี้จะเป็นผลลัพธ์ทำให้เกิดแรงบิด และ rotor จะหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า “Motor action”

### 1-10 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า (Generator Action)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดโดยสนามแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบในขดลวด และอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อเวลา ความสัมพันธ์นี้รู้จักกันในนามของกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) ที่กล่าวไว้ว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในวงจรไฟฟ้า จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\Phi$ ) ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลา (t)” ดังนั้นเราสามารถจะแสดงข้อความทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการ คือ

$$e = N (d\Phi / dt) \quad \text{_____} \quad 1.14$$

เมื่อ :

$e$  = induced voltage (electromotive force : emf) (V)

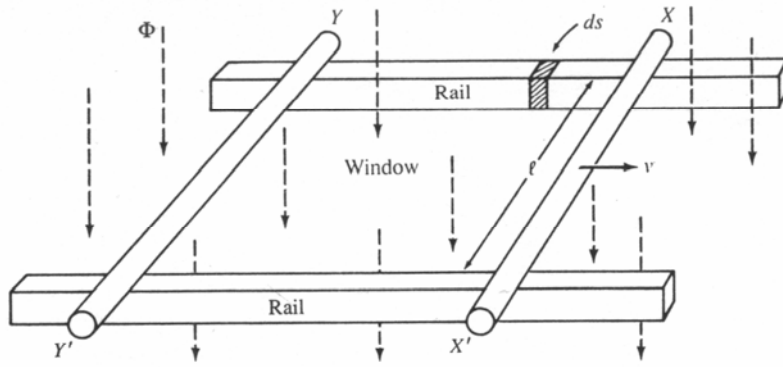
$N$  = number of series-connected turns (t)

$d\Phi / dt$  = rate of change of flux through window (Wb/s)

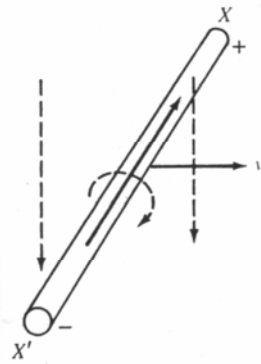
แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำถูกสร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของตัวนำ ค่า voltage ที่เกิดจากปฏิกิริยาหม้อแปลงไฟฟ้า หาได้จากเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปต่อเวลา โดยผ่าน window ของขดลวด stationary coil การกำเนิด voltage เกิดจากการเคลื่อนที่สัมพันธ์ร่วมกันระหว่างขดลวดเคลื่อนที่ตัดกับแม่เหล็กที่อยู่นิ่ง หรือแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตัดกับขดลวดที่อยู่นิ่ง แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่สัมพันธ์นี้ เรียกว่า “speed voltage” หรือ “flux cutting”

### $\pi$ Speed Voltage and the BLV Rule

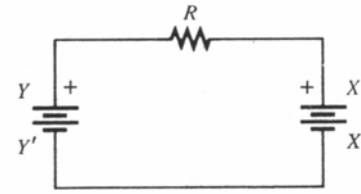
จากกฎของ Faraday's law กล่าวไว้ว่า “แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ถูกสร้างขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อเวลา” ดังนั้นการกำเนิด voltage คือ การเคลื่อนที่สัมพันธ์ร่วมกันของขดลวดเคลื่อนที่ตัดกับแม่เหล็กที่อยู่นิ่ง หรือแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดกับขดลวดที่อยู่นิ่ง



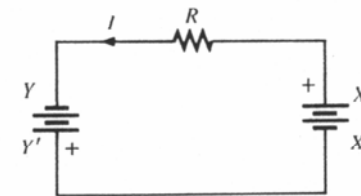
(a)



(b)



(c)



(d)

- รูปที่ 1-11 (a) วงจรปิดที่ประกอบด้วยตัวนำ 2 อัน และรางเหนี่ยวนำคู่  
 (b) ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้า emf และกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากตัวนำ X เคลื่อนที่ไปทางขวา  
 (c) วงจรไฟฟ้าสมมูลเมื่อตัวนำทั้งสองเคลื่อนที่ไปทิศทางเดียวกัน  
 (d) วงจรไฟฟ้าสมมูลเมื่อตัวนำเคลื่อนที่ทิศทางตรงข้ามกัน

๑ จากรูปที่ 1-11 (a) ในวงจรปิดจะประกอบด้วยตัวนำ 2 ตัว คือ ตัวนำ X และตัวนำ Y วางอยู่บนรางตัวนำคู่ ซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กมาตรฐาน โดยตัวนำ Y จะอยู่กับที่ และตัวนำ X เคลื่อนที่ออกไปทางขวาด้วยความเร็ว  $v$  เมตร/วินาที (m/sec) เมื่อตัวนำ X เคลื่อนที่ออกไปทางขวา จะทำให้พื้นที่ใน window เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่าน window เพิ่มขึ้นไปตามเวลาที่ตัวนำ X เคลื่อนที่ จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเกิดขึ้นใน Loop

จากการเคลื่อนที่ของตัวนำ X ออกไปทางขวา จะทำให้พื้นที่ใน window เพิ่มขึ้น (A) และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) เพิ่มขึ้น จึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น นั่นคือ

$$\Phi = B \cdot A$$



แต่การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กกับพื้นที่หน้าตัดใน window ที่เพิ่มขึ้น เกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวนำ X ที่เคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังนั้นเมื่อทำการดิริวาตีฟต่อเวลา (derivative) สมการที่ 1.15 จะได้

$$(d\Phi / dt) = d(B.A) / dt = B (dA / dt) \quad \text{_____} \quad 1.16$$

แทนค่าสมการที่ 1.14 ลงในสมการที่ 1.16 จะได้

$$(e / N) = B (dA / dt)$$

$$e = N.B (dA / dt) \quad \text{_____} \quad 1.17$$

จากการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดใน window ที่ละน้อย ขณะที่ตัวนำ X เคลื่อนที่ อาจแสดงในรูปความยาว ( $\ell$ ) ของตัวนำ และการเปลี่ยนแปลงระยะของตัวนำ ( $ds$ ) ไปตามรางต่อเวลา นั่นคือ

$$dA = \ell ds \quad \text{_____} \quad 1.18$$

แทนค่าสมการที่ 1-18 ลงในสมการที่ 1.17 จะได้

$$e = N.B [\ell (ds / dt)] \quad \text{_____} \quad 1.19$$

แต่ตัวนำ X ที่เคลื่อนที่มีเพียง 1 ตัวนำ นั่นคือ  $N=1$  ดังนั้นจากสมการที่ 1.19 จะได้

$$e = B \ell (ds / dt) \quad \text{_____} \quad 1.20$$

และ  $(ds / dt)$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของตัวนำ X ต่อเวลา ซึ่งก็คือความเร็ว  $v$  นั่นเอง เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการที่ 1.20 จะได้

$$e = B \ell v \quad \text{_____} \quad 1.21$$

เมื่อ :

$e$  = induced voltage (V)

$B$  = flux density of field (T)

$\ell$  = effective length of conductor (m)

$v$  = velocity of conductor (m/s)

๑ จากรูปที่ 1-11 (c) วงจรไฟฟ้าสมมูลเมื่อตัวนำทั้งสองเคลื่อนที่ไปทิศทางเดียวกัน

ถ้าตัวนำ X และตัวนำ Y เคลื่อนที่ไปทางขวาพร้อมกันด้วยความเร็วที่เท่ากัน มันจะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กได้เท่ากันด้วยความเร็วและทิศทางเหมือนกัน จะทำให้เกิด voltage เท่ากัน ซึ่งผลลัพธ์ก็คือ voltage ร่วมกันใน Loop จะเป็นศูนย์

\* การวิเคราะห์ จาก  $d\Phi / dt$  เมื่อตัวนำ X และ Y เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เท่ากันและเวลาที่เท่ากัน ดังนั้นจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อเวลา นั่นคือ  $d\Phi / dt = 0$  ผลที่เกิดขึ้นคือจะไม่ทำให้เกิด voltage ใน loop (voltage = 0)

๑ จากรูปที่ 1-11 (d) วงจรไฟฟ้าสมมูลเมื่อตัวนำทั้งสองเคลื่อนที่ทิศทางตรงข้ามกัน ถ้าตัวนำ Y เคลื่อนที่ไปทางซ้าย ขณะที่ตัวนำ X เคลื่อนที่ไปทางขวา ด้วยความเร็วที่เท่ากัน ตัดเส้นแรงแม่เหล็กที่เท่ากัน แต่ทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้าม นั่นคือ voltage ภายในตัวนำ Y จะเป็นจาก Y ไป Y' ขณะที่ตัวนำ X จะเป็นจาก X' ไป X ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งสองตัวนำจะรวมกันเป็นผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็น 2 เท่า ดังนั้น voltage ที่เกิดขึ้นใน Loop จะมีค่าเป็น 2 เท่า ด้วย

\* การวิเคราะห์ เช่นเดียวกันบนพื้นที่  $d\Phi / dt$  ผ่าน window แสดงด้วยด้านข้างของขดลวดเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้าม จะได้  $d\Phi / dt$  ผ่าน window เป็น 2 เท่า แล้ว voltage ที่จ่ายจะเป็น 2 เท่าด้วย

**Example 1-5.** Determine the length of conductor required to generate 2.5 V when passing through and normal to a magnetic field of 1.2 T at a speed of 8.0 m/s

**Solution** จากสมการ  $e = B l v \Rightarrow l = e / (B.v)$

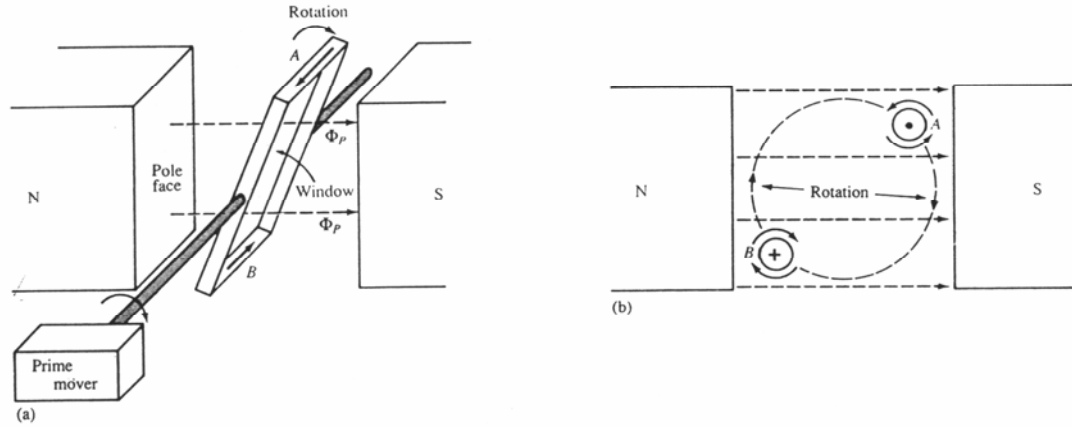
$$l = 2.5 / (1.2 \times 8.0)$$

$$= 0.26 \text{ m}$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

-----

1-11 Elementary Two-pole Generator



รูปที่ 1-12 (a) ขดลวดวงจรปิดหมุนตามเข็มนาฬิกาภายในสนามแม่เหล็ก  
 (b) ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้า emf และกระแสไฟฟ้าที่แสดงในรูป (a)

จากรูปที่ 1-12 (a) แสดงขดลวดวงจรปิดตั้งในสนามแม่เหล็ก แล้วถูกหมุนด้วยต้นกำลังขับ (prime mover) ไปทางทิศตามเข็มนาฬิกา (CW)

ตามกฎของ Lenz's law แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ กระแสไฟฟ้า และเส้นแรงแม่เหล็กพร้อมต้องอยู่ในทิศทางที่จะสร้างแรงบิดใหม่ต้านกับแรงบิดขับจาก prime mover เพื่อให้เกิดเช่นนั้น flux bunching จะต้องเกิดด้านบนของขดลวด B และด้านล่างของขดลวด A และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กหาได้จากกฎมือขวา ดังนั้นตัวนำ A กระแสจะไหลพุ่งออก ส่วนตัวนำ B กระแสจะไหลเข้าตัวนำ นั่นคือถ้ามองจากขั้วได้ในรูปที่ 1-12 (a) กระแสในขดลวดจะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (CCW)

π แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าสลับ (Sinusoidal emfs)

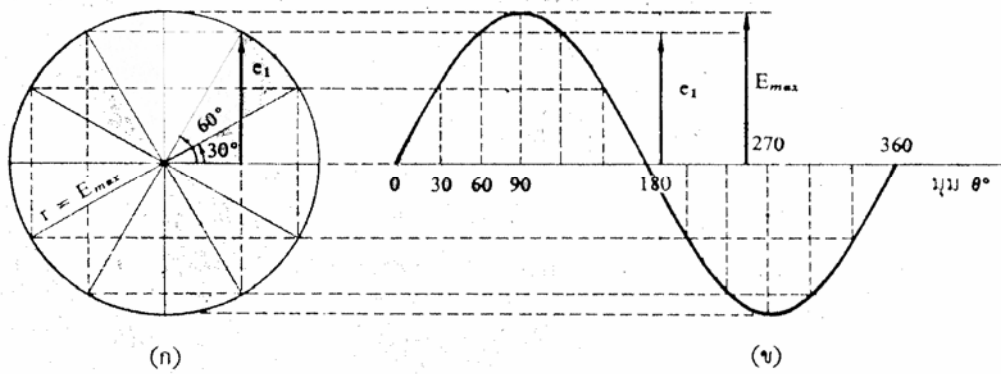
จากรูปเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพื้นฐานในรูปที่ 1-12 (a) ถ้าขดลวดหมุนตามความเร็วเชิงมุม (angular velocity) คงที่ ในสนามแม่เหล็กมาตรฐาน การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่าน window ขดลวดจะเป็นซิงนูซอยคอด (sinusoidal)

$$\phi = \Phi_{max} \sin(\omega t) \quad \text{-----} \quad 1.22$$

เมื่อ :

- $\Phi_{max}$  = ค่าเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่ผ่าน window ของขดลวด (Wb)
- $\omega t$  = มุมของขดลวดทำกับแนวเส้นแรงแม่เหล็ก (rad)

ความเร็วเชิงมุม (angular velocity) คือ ความเร็วเชิงมุมของอัตราการหมุนครบรอบวงกลม ซึ่งเป็นอัตราการหมุนที่ทำให้ค่าของมุมเปลี่ยนแปลงไปต่อเวลาที่หมุน ( $\omega = \theta / t \Rightarrow \theta = \omega t$ )



รูปที่ 1-12 (c) แสดงการหมุนครบรอบวงกลม 1 รอบ

จากรูป 1-12 (c) เมื่อขดลวดทำมุมตั้งฉากกับหน้าขั้วแม่เหล็กตำแหน่งที่ 0 องศา จะไม่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\sin 0^\circ = 0$ ) และเมื่อขดลวดเริ่มหมุนเปลี่ยนไปจากมุม  $0^\circ \rightarrow 30^\circ \rightarrow 60^\circ \dots\dots\dots 90^\circ$  จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นทีละน้อยตามมุมที่เคลื่อนที่จนกระทั่งค่าเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงสุด ( $\Phi_{max}$ ) เมื่อขดลวดหมุนอยู่ในแนวขนานกับหน้าของขั้วแม่เหล็ก คือที่มุม  $\sin 90^\circ = 1$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กผ่าน window ขณะขดลวดหมุนภายใต้สนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับเวลา เมื่อทำการ derivative สมการที่ 1.22 จะได้

$$\begin{aligned}
 d\phi / dt &= d [\Phi_{max} \sin(\omega t)] / dt \\
 &= \Phi_{max} d [\sin(\omega t)] / dt \\
 &= \Phi_{max} \cos (\omega t) [d (\omega t) / dt] \\
 &= \Phi_{max} \cos (\omega t) \omega \\
 d\phi / dt &= \omega \Phi_{max} \cos (\omega t) \quad \text{————— 1.23}
 \end{aligned}$$

แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นชั่วขณะ (e) จะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อเวลา และจำนวนรอบของขดลวด คือ

$$e = N(d\phi / dt) \quad \text{————— 1.24}$$

เมื่อแทนค่า  $d\phi / dt$  ในสมการที่ 1.23 ลงในสมการที่ 1.24 จะได้

$$e = N \omega \Phi_{\max} \cos(\omega t) \quad \text{_____} \quad 1.25$$

ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นชั่วขณะใด ๆ จะมีค่าสูงสุด เมื่อมุม  $\cos(\omega t) = 1$  ดังนั้นสมการที่ 1.25 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำสูงสุด ( $E_{\max}$ ) จะมีค่าเท่ากับ

$$E_{\max} = 2 \pi f N \Phi_{\max} \quad \text{_____} \quad 1.26$$

เมื่อ  $\omega = 2 \pi f$

แต่ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่นำมาใช้งานไม่ใช่ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำสูงสุด ( $E_{\max}$ ) แต่จะใช้ค่า Root mean square of emf ( $E_{\text{rms}}$ ) คือ ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่มีผลในการใช้งาน (Effective value) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$E_{\text{rms}} = 0.707 E_{\max} = E_{\max} / \sqrt{2} \quad \text{_____} \quad 1.27$$

แทนค่า จากสมการที่ 1.26 ลงในสมการที่ 1.27 จะได้

$$E_{\text{rms}} = (2 \pi f N \Phi_{\max}) / \sqrt{2}$$

$$E_{\text{rms}} = 4.44 f N \Phi_{\max} \quad \text{_____} \quad 1.28$$

เมื่อ :

$E_{\text{rms}}$  = root mean square of emf (V)

$f$  = ความถี่ที่แรงเคลื่อนแม่เหล็กจ่ายออกมา (Hz)

$N$  = จำนวนรอบของขดลวด (t)

$\Phi_{\max}$  = ค่าเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Wb)

**Example 1-6.** An elementary four-pole generator with a six-turn rotor coil generates the following voltage wave :

$$e = 24.2 \sin(36.t)$$

Determine the pole flux.

**Solution** จาก  $\omega = 2\pi f \Rightarrow f = \omega / 2\pi = 36 / (2 \times 3.14) = 5.73 \text{ Hz}$

$$\text{จากสมการ } E_{\max} = 2\pi f N \Phi_{\max} \Rightarrow \Phi_{\max} = E_{\max} / 2\pi f N$$

$$\Phi_{\max} = 24.2 / (2 \times 3.14 \times 5.73 \times 6)$$

$$= 0.112 \text{ Wb}$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

$$\text{หรือหาจากสมการ } E_{\text{rms}} = 4.44 f N \Phi_{\max} \Rightarrow \Phi_{\max} = E_{\text{rms}} / 4.44 f N$$

$$\Phi_{\max} = (E_{\max} / \sqrt{2}) / 4.44 f N$$

$$= (24.2 / \sqrt{2}) / (4.44 \times 5.73 \times 6)$$

$$= 0.112 \text{ Wb}$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

## $\pi$ Frequency (ความถี่ไฟฟ้า)

ความถี่ปกติที่ใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้ามีขนาด 25 Hz, 50 Hz, 60 Hz และ 400 Hz

๑ ความถี่ 25 Hz เป็นระบบที่ล้าสมัย ไม่ค่อยนิยมใช้ ส่วนใหญ่จะใช้กับเครื่องจักรกลเก่า ๆ เช่น โรงงานทำกระดาษ เป็นต้น

๑ ความถี่ 50 Hz เป็นระบบที่ใช้ในประเทศทวีปยุโรป เอเชีย และประเทศอื่น ๆ ถ้าใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง จะเป็นระบบไฟ 380 V 50 Hz และระบบไฟฟ้าแสงสว่างจะเป็นระบบไฟ 220 V 50 Hz

๑ ความถี่ 60 Hz เป็นระบบที่ใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา ถ้าใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นระบบไฟ 440 V 60 Hz และระบบไฟฟ้าแสงสว่างจะเป็นระบบไฟ 220 V 60 Hz หรือ 115 V 60 Hz

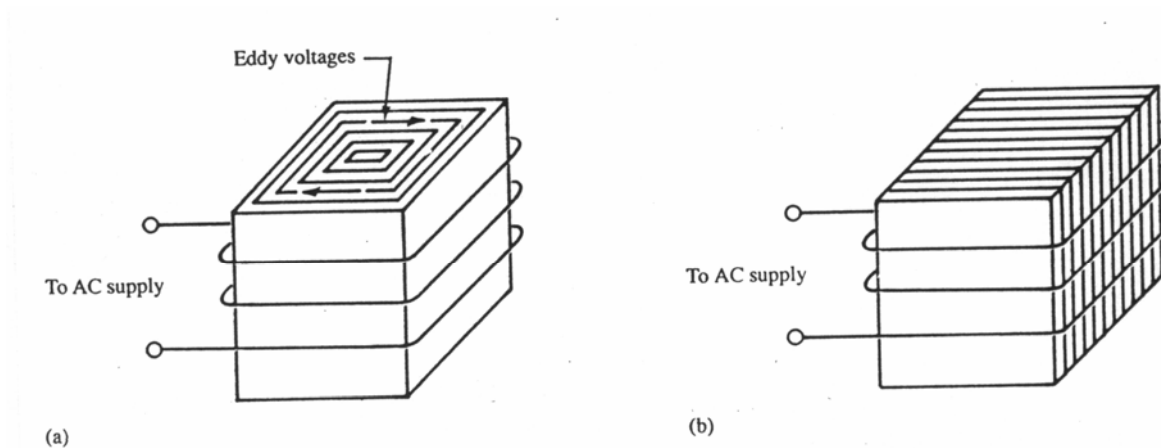
๑ ความถี่ 400 Hz ส่วนใหญ่จะเป็นระบบไฟ 115 V 400 Hz ที่ใช้กับระบบอาวุธในเรือรบ และใช้ในระบบเครื่องบิน เพราะว่ามีน้ำหนักเบา

## 1-12 Eddy current and Eddy-current Losses

Eddy current เป็นกระแสที่ไหลหมุนเวียนในแท่งแกนเหล็ก กล่าวคือ เมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับเข้าขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็กจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าสลับเกิดการเปลี่ยนแปลง cycle ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปด้วย การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็ก (eddy voltage) และแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นภายในแกนเหล็กจะเป็นตัวทำให้เกิดกระแสไหลหมุนเวียนภายในแกนอีกทีหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า “กระแสไหลวน” (eddy current)

Eddy current losses คือ กำลังงานที่สูญเสียในรูปความร้อนอันเนื่องมาจากการไหลวนของกระแสการสูญเสียชนิดนี้จะเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ถ้าแท่งเหล็กเป็นแบบเหล็กตันที่เป็นท่อนเดียวกันตลอด

เนื่องจากค่าความต้านทานของแท่งเหล็กตันมีค่าสูงมาก ความร้อนที่เกิดจากการสูญเสีย คือ  $P = I^2R$



รูปที่ 1-13 (a) Eddy current ที่เกิดในแท่งเหล็กตัน; (b) Eddy current ที่เกิดใน laminated core

จากรูปที่ 1-13 (a) เป็นแท่งเหล็กตันที่แสดงให้เห็นการเกิด eddy voltage โดยการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กผ่าน window ของวงรอบ คือ

$$e_c \propto d\Phi/dt$$

เมื่อแสดงในรูปของความถี่ และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ที่ได้รับจากสมการ 1.28 คือ

$$E_c \propto f \cdot B_{\max} \quad \text{—————} \quad 1.29$$

การสูญเสียกำลังงานความร้อนเนื่องจากกระแสไหลวนสามารถทำให้ลดลงได้ โดยการเชื่อมแท่งเหล็กออกเป็นแผ่นบาง ๆ แล้วกั้นด้วยฉนวนกันความร้อนระหว่างแผ่นและนำมาอัดซ้อนกัน ซึ่งเราเรียกว่า “Laminated core” ตามที่แสดงในรูปที่ 1-13 (b)

การสูญเสียจาก eddy current ในรูปของกำลังความร้อนของค่าความต้านทานของแท่งเหล็กในวงรอบ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ eddy voltage ยกกำลังสอง นั่นคือ

$$P_e \propto E_e^2 \quad \text{-----} \quad 1.30$$

แทนค่าสมการที่ 1.29 ลงในสมการที่ 1.30 และปรับแต่งองค์ประกอบให้เหมาะสมจะได้ผลลัพธ์ คือ

$$P_e = k_e \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \quad \text{-----} \quad 1.31$$

เมื่อ :

$P_e$  = eddy current loss (W)

$k_e$  = ค่าคงที่

$f$  = ความถี่ของ flux wave (Hz)

$B_{\max}$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (T)

ค่าคงที่  $k_e$  ขึ้นอยู่กับความหนาของการเคลื่อนแผ่นเหล็กบาง ความต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่น และมวลสารที่นำมาทำแท่งเหล็ก

**Example 1-7.** The eddy-current loss in a certain electrical apparatus operating at its rated voltage and rated frequency of 240 V and 25 Hz is 642 W

Determine the eddy-current loss if the apparatus is connected to a 60 Hz source whose voltage is such as to cause the flux density to be 62 percent of its rated value.

**Solution** จากสมการที่ 1.31  $P_e = k_e \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2$

$$P_{e1} / P_{e2} = [k_e \cdot f_1^2 \cdot B_{\max,1}^2] / [k_e \cdot f_2^2 \cdot B_{\max,2}^2]$$

$$P_{e2} = P_{e1} \times [f_2 / f_1]^2 \times [B_{\max,2} / B_{\max,1}]^2$$

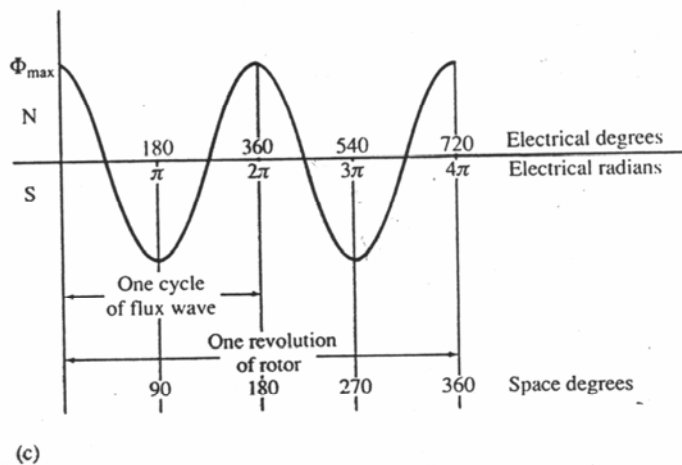
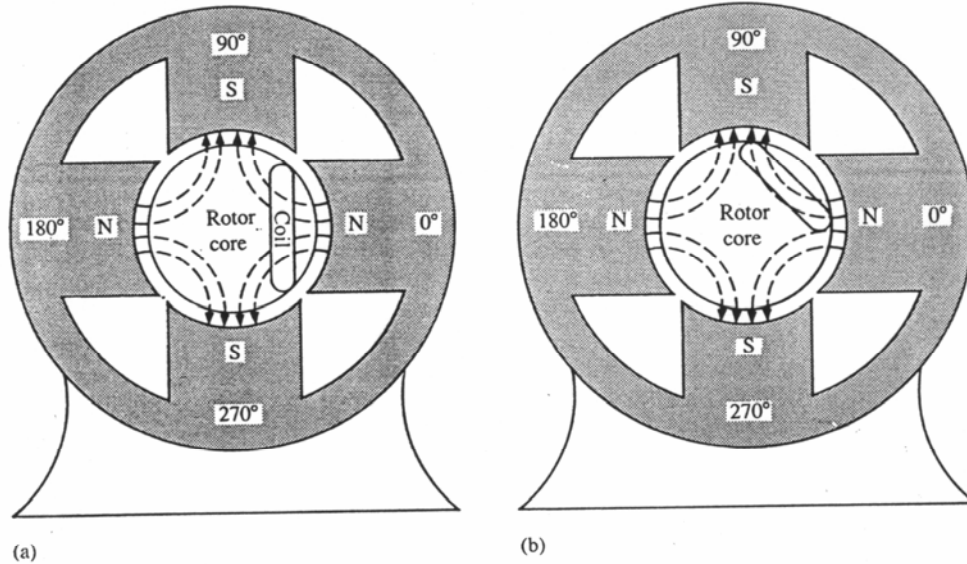
$$= 642 \times [60 / 25]^2 \times [0.62 / 1.0]^2$$

$$= 1.42 \text{ kW} \quad \text{-----} \quad \text{Ans}$$

-----



### 1-13 Multi polar Machines, Frequency, and Electrical degrees (เครื่องจักรกลชนิดหลายขั้วความถี่ และองศาไฟฟ้า)



- รูปที่ 1-14 generator ชนิด 4 ขั้ว (a) เส้นแรงแม่เหล็กผ่านขดลวด window มีค่าสูงสุด  
 (b) ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กผ่านขดลวด window มีค่าเป็นศูนย์  
 (c) เส้นแรงแม่เหล็กผ่านขดลวด window ขึ้น ๆ ลง ๆ ขณะ rotor หมุนทวนเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 1-14 (a) แสดงวงจรแม่เหล็กของ generator ชนิด 4 ขั้ว โดยมีแท่งเหล็ก stator 4 ขั้ว จะวางขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) สลับกัน และมีขดลวดอาร์เมเจอร์พันบนแท่งเหล็ก rotor โดยมีความกว้าง  $\frac{1}{4}$  ของวงรอบ rotor และที่ตัว stator จะมีเครื่องหมายเป็นองศา เรียกว่า “องศาทางกล” (mechanical degrees)

จากรูปที่ 1-14 (a) ถ้า rotor coil อยู่ในตำแหน่ง  $0^\circ$  จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กจากขั้ว N ผ่านขดลวด window มีค่าสูงสุด

จากรูปที่ 1-16 (b) ถ้า rotor coil หมุนทำมุม  $45^\circ$  กับขั้วแม่เหล็ก N และ S ของ stator จะทำให้ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์

๑ องศาทางกล (mechanical degrees) คือ การหมุนขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งเป็นการหมุนทางกลครบ 1 รอบ

๑ องศาทางไฟฟ้า (electrical degrees) คือ การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวด ซึ่งเป็นการหมุนทางไฟฟ้าครบ 1 cycle

๑ Cycle คือ การที่ตัวนำ conductor ตัวหนึ่งเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก 1 รอบ ของจำนวนขั้วแม่เหล็ก 1 คู่ (ขั้ว N และขั้ว S) เราจะได้รูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับออกมาจำนวน 1 รอบ หรือ 1 cycle

๑ ความถี่ (frequency) คือ ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตัดขั้วแม่เหล็ก 1 คู่ (ขั้ว N และขั้ว S) ใน 1 cycle ด้วยเวลา 1 วินาที

จากรูปที่ 1-14 (c) แสดงการ plot ค่าความแตกต่างของเส้นแรงแม่เหล็กผ่าน window ของขดลวดสำหรับการหมุน 1 รอบของ rotor

จะเห็นว่าเครื่องจักรกลชนิด 4 ขั้ว ที่แสดงในรูปที่ 1-14 นั้น เมื่อ rotor หมุนครบ 1 รอบ จะทำให้เกิด cycle ขึ้นจำนวน 2 cycle ของเส้นแรงแม่เหล็กผ่านขดลวด window เนื่องจาก 1 cycle จะเกิดต่อขั้วแม่เหล็ก 1 คู่ (ขั้ว N และ S) ในทำนองเดียวกันถ้าเครื่องจักรกลชนิด 6 ขั้ว จะเกิด cycle ขึ้นจำนวน 3 cycle ต่อการหมุนครบ 1 รอบของ rotor ดังนั้นเราสามารถแสดงได้ด้วยสมการ คือ

$$f = (P \cdot n) / 2 \quad \text{-----} \quad 1.32$$

เมื่อ:

$f$  = ความถี่ (Hz)

$P$  = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

$n$  = จำนวนรอบการหมุน (รอบ/วินาที)

สำหรับเครื่องจักรกลชนิด 4 ขั้ว ถ้าเราจ่ายรูปคลื่นจำนวน 1 cycle ( $360^\circ$ ) ให้กับ stator จะทำให้ขั้วแม่เหล็กหมุนเพียง  $\frac{1}{2}$  รอบ เท่านั้น (ผ่านขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว) ถ้าต้องการให้หมุนครบ 1 รอบ (ผ่านขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว) จะต้องจ่ายรูปคลื่นจำนวน 2 cycle คือ  $720^\circ$  ซึ่งจำนวน  $720^\circ$  ของคลื่นจะตรงกับ  $360^\circ$  ของการกวาดของ rotor ครบ 1 รอบ นั่นคือความแตกต่างระหว่างองศาไฟฟ้า (electrical degrees) กับองศาทางกล (mechanical degrees) หรือองศาช่องว่าง (space degrees) ตามที่แสดงในรูปที่ 1-14 (c) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างองศาไฟฟ้ากับองศาทางกลหรือองศาช่องว่าง คือ

$$\text{Elec. deg} = \text{space deg} \times (P / 2) \quad \text{-----} \quad 1.33$$

**Example 1-8.** A special-purpose 80 pole, 100 kVA generator is operating at 20 r/s. Determine:

- (a) the number of cycle per revolution.
- (b) the number of electrical degrees per revolution.
- (c) the frequency in Hz.

**Solution** (a) จำนวนรอบ 1 cycle คือ การหมุนผ่านขั้วจำนวน 2 ขั้ว (ขั้ว N และขั้ว S) ดังนั้นจำนวนขั้ว 80 ขั้ว จะได้จำนวน cycle คือ

$$\text{จำนวน cycle} = P / 2 = 80 / 2 = 40 \text{ cycle} \quad \text{—————} \quad \text{Ans}$$

(b) จำนวนองศาไฟฟ้าต่อรอบการหมุน หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \text{Elec. deg} &= \text{space deg} \times (P / 2) \\ &= 360 \times (80 / 2) = 14,400 \end{aligned} \quad \text{—————} \quad \text{Ans}$$

(c) ความถี่ หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} f &= (P \cdot n) / 2 \\ &= (80 \times 20) / 2 = 800 \text{ Hz} \end{aligned} \quad \text{—————} \quad \text{Ans}$$

-----

## SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING

$$F = NI \quad (\text{A-t}) \qquad H = F / \ell = NI / \ell \quad (\text{A-t/m})$$

$$B = \Phi / A \quad (\text{Wb/m}^2 \text{ หรือ T}) \qquad \Phi = F / R = (NI) / R \quad (\text{Wb})$$

$$\mu = B / H \quad (\text{Wb/A-t.m}) \qquad \mu_r = \mu / \mu_0 \quad (\text{ไม่มีหน่วย})$$

$$R = \ell / \mu A \quad (\text{A-t/Wb}) \qquad R = \ell / \mu_r \mu_0 A \quad (\text{A-t/Wb})$$

$$R_{\text{ser}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_n \quad (\text{A-t/Wb})$$

$$1/R_{\text{par}} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4 + \dots + 1/R_n \quad (\text{A-t/Wb})$$

$$\text{หรือ } R_{\text{par}} = 1 / (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4 + \dots + 1/R_n) \quad (\text{A-t/Wb})$$

$$R_T = R_1 + (R_2 \cdot R_3) / (R_2 + R_3) \quad (\text{A-t/Wb})$$

$$P_h = K_h f B_{\text{max}}^n \quad (\text{W}) \qquad P_e = k_e \cdot f \cdot B_{\text{max}}^2 \quad (\text{W})$$

$$e = N (d\Phi / dt) \quad (\text{V}) \qquad e = B \ell v \quad (\text{V})$$

$$e = N \omega \Phi_{\text{max}} \cos(\omega t) \quad (\text{V}) \qquad \phi = \Phi_{\text{max}} \sin(\omega t) \quad (\text{Wb})$$

$$E_{\text{max}} = 2 \pi f N \Phi_{\text{max}} \quad (\text{V}) \qquad E_{\text{rms}} = 4.44 f N \Phi_{\text{max}} \quad (\text{V})$$

$$f = (P \cdot n) / 2 \quad (\text{Hz}) \qquad \text{Elec. deg} = \text{space deg} \times (P / 2) \quad (\text{องศา})$$

-----

## บทที่ 2

### หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

#### 2-1 บทนำ

Transformer (หม้อแปลงไฟฟ้า) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพิ่มหรือลดระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (voltage) เช่น ในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง (Transmission Line) จะใช้ Transformer ในการเพิ่มระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้สูงมาก ๆ จากระบบ 12/24 kV หรือ 11/33 kV ให้เป็นระบบ 69 kV หรือ 115 kV หรือ 230 kV สำหรับส่งกำลังไฟฟ้าจำนวนมหาศาลไปยังสถานที่ห่างไกลมาก ๆ เพื่อประหยัดขนาดของสายส่งหรือในเครื่องจักรไฟฟ้า AC motor จะใช้ Auto transformer ในการลดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขณะ start มอเตอร์

- Transformer ที่ใช้ในการเพิ่มหรือลดระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า เรียกว่า “Potential Transformer” ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- Step-up Transformer คือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเพิ่มระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า เช่น เพิ่มระดับแรงเคลื่อนที่ไฟฟ้าจาก 220 V เป็น 380 V (220V / 380 V)

- Step-down Transformer คือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับลดระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า เช่น ลดระดับแรงเคลื่อนที่ไฟฟ้าจาก 380 V ลงเหลือ 220 V (380V / 220 V)

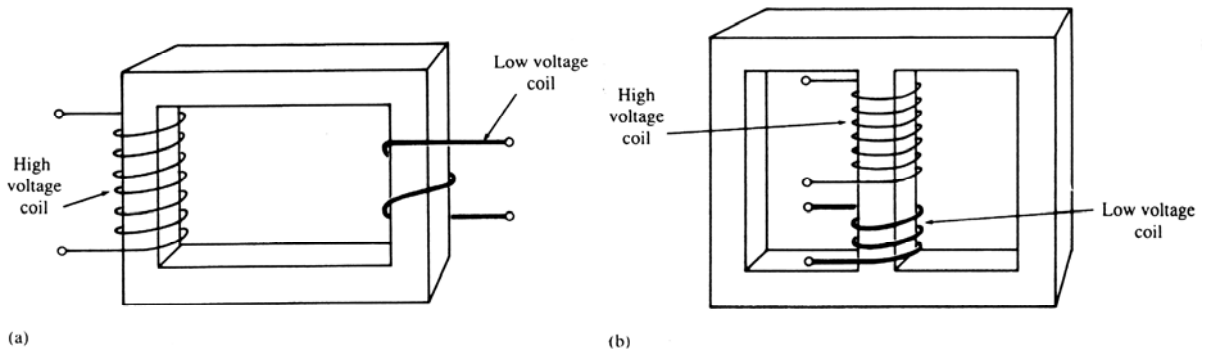
- Current transformer คือ หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า สำหรับใช้ร่วมกับอุปกรณ์เครื่องวัดและอุปกรณ์ป้องกัน (circuit breaker) เรียกชื่อว่า “CT”

#### 2-2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

โครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วยแกนเหล็ก (core), ขดลวดทางด้านรับไฟ (input power) และขดลวดทางด้านจ่ายไฟ (Distribution) หรือ output power โดยขดลวดทางด้านรับไฟเป็นขดลวดที่รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ เราเรียกว่า “ขดลวดปฐมภูมิ” (Primary winding) หรือ High voltage coil และขดลวดทางด้านจ่ายไฟเป็นขดลวดที่จ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับ load เรียกว่า “ขดลวดทุติภูมิ” (Secondary winding) หรือ Low voltage coil ตามที่แสดงในรูปที่ 2-1

จากรูปที่ 2-1 (a) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ core type ขดลวดที่พันทางด้าน Primary ซึ่งเป็นด้าน High voltage จะใช้ขดลวดที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็ก แต่พันด้วยรอบจำนวนมาก ส่วนทางด้าน secondary ซึ่งเป็นด้าน Low voltage จะใช้ขดลวดที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ แต่จำนวนรอบน้อย

สำหรับ Transformer แบบ core type มักใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่

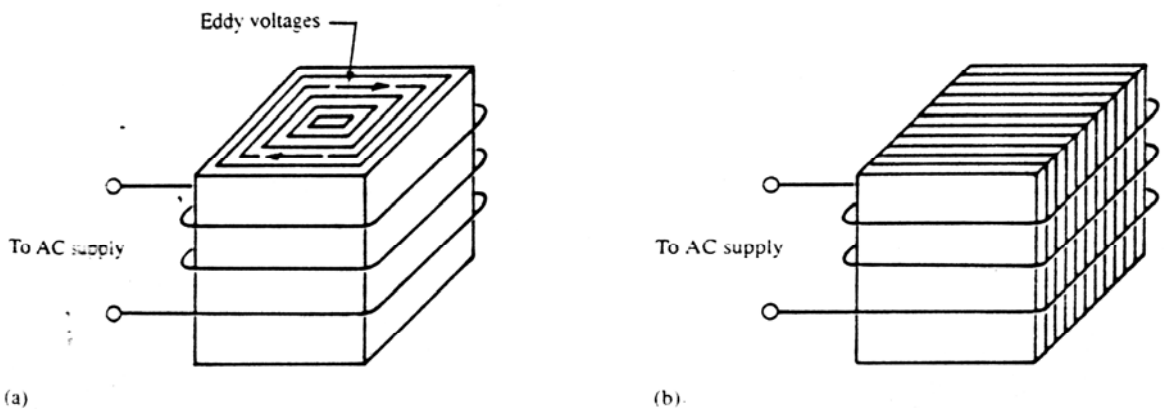


รูปที่ 2-1 Transformer construction (a) core type; (b) shell type

จากรูปที่ 2-1 (b) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ shell type โดยขดลวดทางด้าน Primary และ secondary จะพันร่วมกันไว้ที่แกนกลางของแกนเหล็กส่วนแกนเหล็กที่เหลือ ๒ขา จะทำหน้าที่เป็น Low reluctance flux path ข้อดีของการพันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ shell type คือ จะลดการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก (flux leakage)

● ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า

0. แกนเหล็ก (core) วัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็กจะเป็นแบบ nonaging, cold-rolled, high - permeability silicon steel laminations ที่หุ้มฉนวนและมีค่าการเป็นแม่เหล็กสูง และจะนำเอาแกนเหล็กแผ่นบาง ๆ มาอัดซ้อนกัน (lamination) แล้วทำการหุ้มฉนวนด้วยการอบวาณิช หรือเคลือบด้วย oxide เพื่อลดกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก (Eddy current)



รูปที่ 2-2 (a) Eddy current in solid iron core; (b) laminated core

O. ขดลวดตัวนำ (coil) ขดลวดตัวนำที่พันอยู่บนแกนเหล็กจะเป็นลวดทองแดงหรืออลูมิเนียม จะขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบและการนำไปใช้งาน

- การระบายความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า

การระบายความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเฉพาะหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ตั้งแต่ 1000 kVA ขึ้นไป วิธีการระบายความร้อนมีด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าว่ามีขนาด kVA มากน้อยเท่าใด และมีขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงเท่าใด

ความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดจาก Eddy current , การสูญเสียในแกนเหล็ก (Hysteresis Loss) และการสูญเสียในขดลวดทองแดง (copper loss) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงมากเกินไปจนเกิดอันตรายต่อฉนวนของขดลวด วิธีการระบายความร้อนมีดังต่อไปนี้

#### O. Ventilated Dry-type Transformer

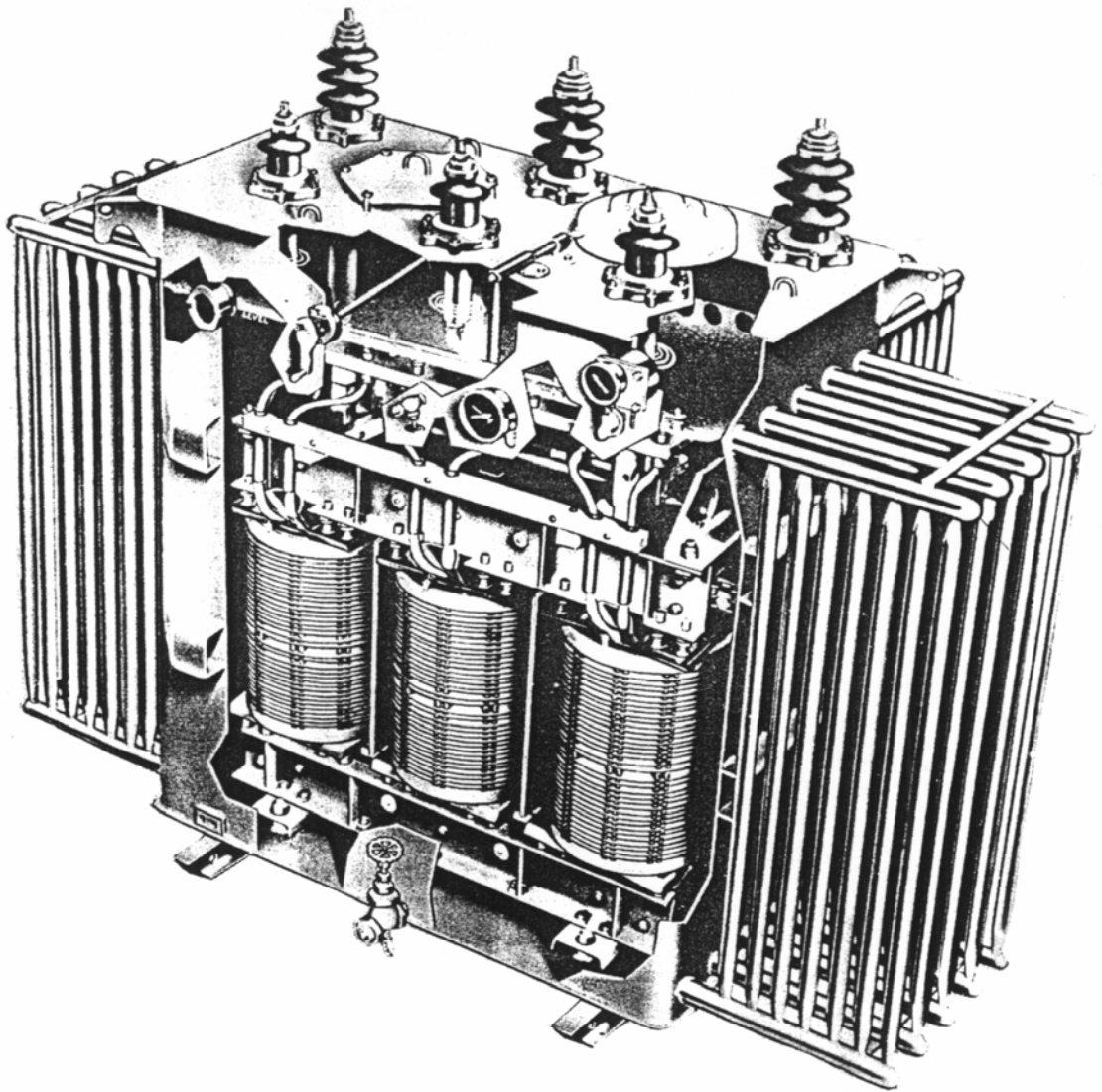
หม้อแปลงไฟฟ้าที่ระบายความร้อนแบบ Ventilated Dry-type จะใช้อากาศเป็นตัวระบายความร้อน โดยใช้อากาศรอบ ๆ ตัวมันเองเป็นตัวระบายความร้อน การระบายความร้อนด้วยวิธีนี้เหมาะสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กประมาณ 2-3 kVA และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำ (low voltage) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้จะติดตั้งในโรงเรียน/โรงพยาบาล/ร้านค้า ที่ไม่เป็นอันตรายต่อคนที่เกิดจากการเผาไหม้

#### O. Gas-filled Dry-type Transformer

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ระบายความร้อนแบบ Gas-filled Dry-type จะใช้ gas เป็นตัวระบายความร้อน โดยจะบรรจุ gas ประเภทก๊าซไนโตรเจน หรือฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon : $C_2F_6$ ) หรือซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (sulfurhexafluoride :  $SF_6$ ) เพื่อเป็นตัวระบายความร้อน หม้อแปลงชนิดนี้จะเป็นแบบผนึกกันทั้งลูก จึงเหมาะสำหรับติดตั้งภายในอาคารหรือภายนอกอาคารหรือใต้ดิน

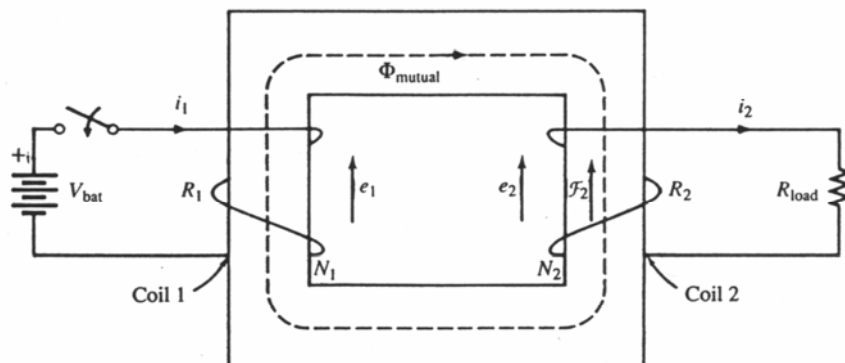
#### O. Liquid immersed Transformer

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ระบายความร้อนแบบ Liquid immersed จะใช้ของเหลวประเภทน้ำมัน (oil) เป็นตัวระบายความร้อน โดยให้ตัวหม้อแปลงจุ่มลงไปลงในน้ำมัน แล้วใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นตัวทำให้น้ำมันเกิดจากไหลหมุนเวียน และให้อากาศที่อยู่บริเวณรอบนอกเป็นตัวระบายความร้อน หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้จะเป็นหม้อแปลงขนาดใหญ่ประเภท Power Transformer ตามที่แสดงในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 Cutaway view of a large 3-phase oil-cooled power transformer

### 2-3 พื้นฐานการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า





รูปที่ 2-4 Transformer with battery in primary circuit to aid in the explanation of transformer action

จากรูปที่ 2-4 แสดงพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อเราปิดสวิตช์ SW จะทำให้ขดลวดทางด้าน Primary ครบวงจร และขดลวดจะต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า DC ( $V_{bat}$ ) จึงทำให้เกิดกระแส  $I_1$  ไหลในวงจร เมื่อกระแส  $I_1$  ไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก จึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ( $\Phi$ ) ขึ้น จากกฎของ Faraday's law “แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (induced voltage : emf) ที่เกิดขึ้นในวงจรไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวด (N) และอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อเวลา ( $d\phi/dt$ )” ดังนั้นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นชั่วขณะใด ๆ ในขดลวดทางด้าน Primary คือ

$$e_1 = N_1 (d\phi / dt)$$

จากกฎของ Lenz's law “เมื่อตัวนำตัดกับสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น (induced voltage : emf) และเมื่อต่อตัวนำให้ครบวงจรจะมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ ซึ่งทิศทางการไหลของกระแสจะสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาต้าน (counter emf : cemf) กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเดิมที่ทำให้มันเกิดขึ้น”

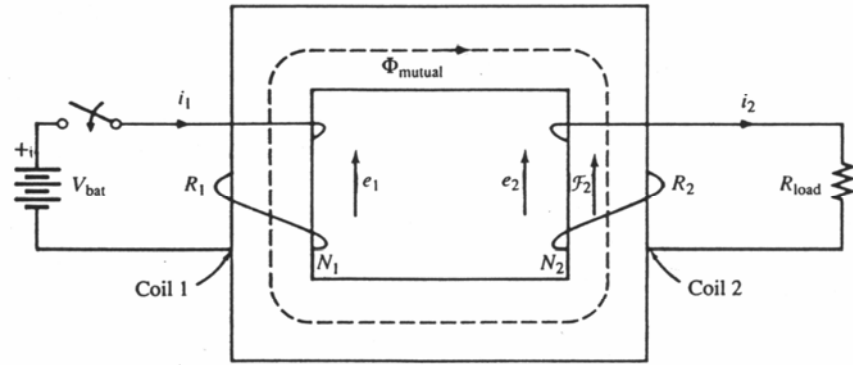
จากรูปที่ 2-4 เมื่อสนามแม่เหล็กทางด้าน Primary มา Link กับขดลวดทางด้าน Secondary จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้น ดังนั้นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นชั่วขณะใด ๆ ในขดลวดทางด้าน secondary คือ

$$e_2 = N_2 (d\phi / dt)$$

เมื่อ :  $N_1 =$  turns in coil 1  
 $N_2 =$  turns in coil 2

ถ้า  $\Phi_{mutual}$  ถึงค่า steady state คือค่าสนามแม่เหล็กทางด้าน secondary ที่สร้างขึ้นมามีค่าเท่ากับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมาจากขดลวด primary จะทำให้  $d\phi/dt = 0$  ดังนั้นค่า induced voltage : emf ทางด้าน secondary = 0 และค่ากระแส  $I_2 = 0$  ด้วย

## 2-4 Transformer with sinusoidal voltage



รูปที่ 2-5 Transformer with sinusoidal source and no load on secondary

จากรูปที่ 2-5 เมื่อนำขดลวดทางด้าน primary ต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_T$ ) สิ่งที่เกี่ยวข้องคือ ความถี่ (frequency) สำหรับหลักการงานจะเหมือนกับ Transformer action ที่ต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{bat}$ ) ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2-3 ค่า voltage induced ในขดลวด primary และขดลวด secondary ที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับจะแสดงในรูปของค่า rms values ( $E_{rms}$ ) คือ

$$E_p = 4.44 N_p f \Phi_{max} \quad \text{_____} \quad 2.1$$

และ

$$E_s = 4.44 N_s f \Phi_{max} \quad \text{_____} \quad 2.2$$

ถ้าไม่มีสนามแม่เหล็กรั่วจะทำให้สนามแม่เหล็ก  $\Phi_M$  เท่ากันทั้งขด primary และ secondary ดังนั้น อัตราส่วนของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะเท่ากับ อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด นั่นคือ

$$(E_p / E_s) = (N_p / N_s) \quad \text{_____} \quad 2.3$$

เมื่อ :  $E_p$  = voltage induced in primary (V)

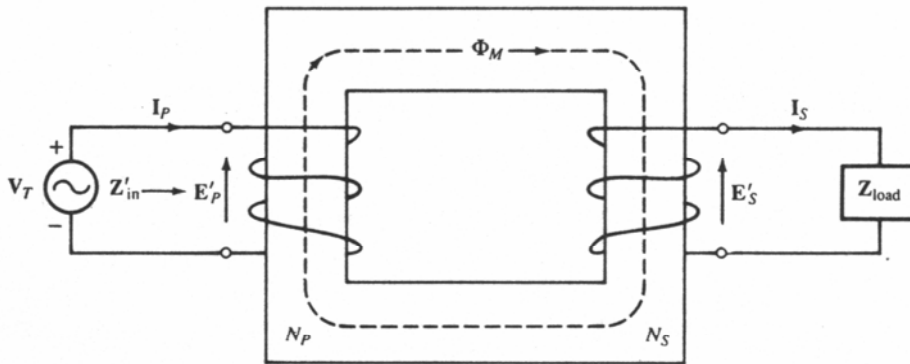
$E_s$  = voltage induced in secondary (V)

$N_p$  = turns in primary coil (turn)

$N_s$  = turns in secondary coil (turn)

## 2-5 Ideal Transformer

Ideal Transformer เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่สมมุติฐานว่าไม่มีสนามแม่เหล็กรั่ว และไม่คิดค่าสูญเสีย (Loss) ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง แม้ว่า Ideal Transformer จะไม่มีจริง แต่จะใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์นำมาใช้ในการสร้างวงจรไฟฟ้าสมมูลสำหรับ Real transformer



รูปที่ 2-6 Ideal Transformer

### ● Turns Ratio

Turns Ratio คือ อัตราส่วนของจำนวนขดลวดทางด้าน Primary (High voltage winding) ต่อจำนวนขดลวดทางด้าน Secondary (Low voltage winding) ซึ่งมันจะเท่ากับอัตราส่วนของ voltage ใน Ideal Transformer และเท่ากันโดยประมาณของอัตราส่วน voltage real transformer นั่นคือ

$$a = E_p / E_s \quad \text{—————} \quad 2.4$$

จากสมการที่ 2.3  $E_p / E_s = N_p / N_s$  คือ อัตราส่วนของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะเท่ากับ อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.4 จะได้

$$a = E_p / E_s = N_p / N_s \quad \text{—————} \quad 2.5$$

เมื่อ :  $a =$  turns ratio

$E_p / E_s =$  อัตราส่วน induced voltage ทางด้าน primary ต่อ secondary

$N_p / N_s =$  อัตราส่วนจำนวนรอบทางด้าน primary ต่อจำนวนรอบ secondary

● **Input impedance of an Ideal Transformer**

ค่า input impedance ทางด้าน primary ของ Ideal Transformer คือ

$$\boxed{Z_{in} = E_p / I_p} \quad \text{————— 2.6}$$

แต่ voltage ทางด้าน primary ( $E_p$ ) และด้าน secondary ( $E_s$ ) คือ voltage เหนี่ยวนำโดยค่าเส้นแรงแม่เหล็กอันเดียวกัน และจำเป็นต้องมีมุม phase angle เท่ากัน ดังนั้นจะได้

$$E_p / E_s = (E_p \angle \alpha) / (E_s \angle \alpha) = a$$

$$\boxed{E_p = a E_s} \quad \text{————— 2.7}$$

ค่า apparent power input ( $S$ ) ที่ปรากฏต่อ ideal transformer ต้องเท่ากับค่า apparent power output นั่นคือ

$$E_p I_p^\vee = E_s I_s^\vee$$

$$I_p^\vee = (E_s / E_p) I_s^\vee$$

แต่  $(E_s / E_p) = (1/a)$  ดังนั้นจะได้  $I_p^\vee = (1/a) I_s^\vee$

นั่นคือ 
$$\boxed{I_p = (1/a) I_s} \quad \text{————— 2.8}$$

แทนค่า  $E_p$  จากสมการที่ 2.7 และค่า  $I_p$  จากสมการที่ 2.8 ลงในสมการที่ 2.6 จะได้

$$Z_{in} = (a E_s) / (1/a) I_s = a^2 (E_s / I_s) \quad \text{————— 2.9}$$

ใช้กฎของ Ohm's หาค่า output impedance ( $Z_{Load}$ ) ในวงจร secondary circuit จะได้

$$\boxed{Z_{load} = E_s / I_s} \quad \text{————— 2.10}$$

แทนค่า  $E_s / I_s = Z_{load}$  จากสมการที่ 2.10 ลงในสมการที่ 2.9 จะได้

$$\boxed{Z_{in} = a^2 Z_{load}} \quad \text{_____ 2.11}$$

เมื่อ :

$Z_{in}$  = input impedance (  $\Omega$  )

$Z_{load}$  = load impedance (  $\Omega$  )

$I_p$  = กระแสไฟฟ้าทางด้าน primary ( A )

$I_s$  = กระแสไฟฟ้าทางด้าน secondary ( A )

$a$  = turns ratio

**Example 2-1** An ideal transformer with a primary of 200 turns and a secondary of 20 turns has its primary connected to a 120 V 60 Hz supply, and its secondary connected to a  $100 \angle 30^\circ \Omega$  load

- Determine : (a) the secondary voltage  
(b) the load current  
(c) the input current to the primary  
(d) the input impedance looking into the primary terminal

**Solution** (a) the secondary voltage ( $E_s$ )

จากสมการ  $a = N_p / N_s = 200 / 20 = 10$

จากสมการ  $a = E_p / E_s \Rightarrow E_s = E_p / a$

$E_s = 120 / 10 = 12 \text{ V}$  \_\_\_\_\_ **Ans**

(b) the load current (  $I_s$  )

จากสมการ  $Z_{load} = E_s / I_s \Rightarrow I_s = E_s / Z_{load}$

$$I_s = (12/\underline{0^\circ}) / (100/\underline{30^\circ})$$

$$= 0.12/\underline{-30^\circ} \text{ A} \quad \text{-----} \quad \text{Ans}$$

(c) the input current ( $I_p$ )

จากสมการ  $I_p = (1/a) I_s = (1/10)(0.12/\underline{-30^\circ})$

$$= 0.012/\underline{-30^\circ} \text{ A} \quad \text{-----} \quad \text{Ans}$$

(d) the input impedance ( $Z_{in}$ )

จากสมการ  $Z_{in} = a^2 Z_{load}$

$$= (10)^2 (100/\underline{30^\circ})$$

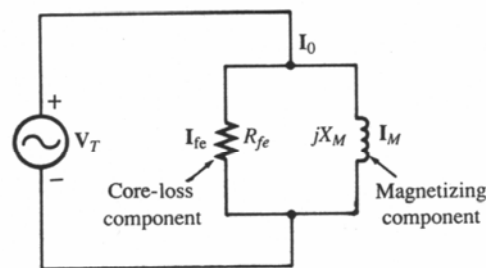
$$= 10,000/\underline{30^\circ} \Omega$$

หรือ  $= 10/\underline{30^\circ} \text{ k}\Omega \quad \text{-----} \quad \text{Ans}$

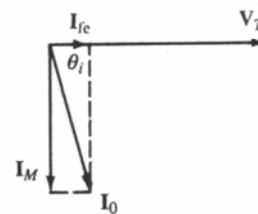
## 2-6 No-Load conditions

เมื่อจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงนั้นจะทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) ขึ้น แม้ว่าจะไม่มี load ต่อทางด้าน secondary สิ่งที่สูญเสียไปในแกนเหล็กก็คือ Hysteresis loss และ eddy current loss สำหรับกระแสในขดลวด primary จะมีมากพอที่จะสร้างสนามแม่เหล็กที่ต้องการ ซึ่งกระแส no-load นี้เรียกว่า Exciting current จะมีค่าประมาณ 1 – 2 % ของ rated current ใน Power transformer ขนาดใหญ่ หรือจะมีค่าประมาณ 6 % ของ rated current ใน Distribution transformer ขนาดเล็ก

Exciting current จะประกอบด้วยกระแสไฟฟ้า 2 ส่วน ซึ่งตั้งฉากกันคือ ส่วนของ core loss กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ hysteresis loss และ eddy current loss ( $I_{h+e}$  หรือ  $I_{fe}$ ) ในแท่งเหล็ก และอีกส่วนคือ กระแสไฟฟ้าที่สร้าง mutual flux ( $\Phi_M$ ) ที่เชื่อมโยงทั้งขด primary และ secondary คือ กระแส magnetizing current ( $I_\Phi$  หรือ  $I_M$ )



(a)



(b)

รูปที่ 2-7 (a) Equivalent-circuit model of transformer with no-load on secondary

(b) phasor diagram showing no-load conditions

จากรูปที่ 2-7 แสดง equivalent circuit ของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะ no-load ด้วย phasor diagram ค่ากระแสไฟฟ้า exciting current ( $I_0$ ) ที่ประกอบด้วยส่วนของ core loss กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ hysteresis loss และ eddy current loss ( $I_h + e$  หรือ  $I_{fe}$ ) และส่วนของ magnetizing กระแสไฟฟ้าที่สร้าง mutual flux ( $\Phi_M$ ) ที่เชื่อมโยงทั้งขด primary และ secondary คือ กระแส magnetizing current ( $I_\phi$  หรือ  $I_M$ ) หาได้จากสมการ

$$I_{fe} = V_T / R_{fe}$$

และ

$$I_M = V_T / j X_M$$

ดังนั้น

$$I_0 = I_{fe} + I_M \quad \text{—————} \quad 2.12$$

เมื่อ :

$I_0$  = exciting current

$I_{fe}$  = core-loss current (hysteresis and eddy current loss)

$I_M$  = magnetizing current

$V_T$  = voltage applied to primary

$R_{fe}$  = fictitious resistance that accounts for the core loss

$X_M$  = fictitious magnetizing reactance that accounts for the magnetizing current

### ● No-load Ampere-Turns

จากสมการที่ 2.12 ถ้าเราคูณด้วยจำนวนรอบของขดลวด primary ( $N_p$ ) จะแสดง no-load mmf ในรูป quadrature component คือ

$$N_p I_0 = N_p I_{fe} + N_p I_M \quad \text{—————} \quad 2.13$$

$N_p I_{fe}$  จะไม่เกี่ยวข้องกับการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กร่วม ( $\Phi_{mutual}$ ) แต่ใช้เพื่อขับเคลื่อน magnetic domain เท่านั้น และใช้จ่าย eddy current ให้กับแกนเหล็ก ถ้าไม่มี core losses ส่วนของ  $N_p I_{fe}$  จะไม่มี และค่าของ ampere-turn จะถูกลดลงเหลือเพียงสร้าง mutual flux เท่านั้น

$N_p I_M$  เรียกว่า magnetizing ampere-turn จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กร่วม ( $\Phi_{mutual}$ ) และทำให้เกิด

ปฏิกิริยา transformer action ซึ่งสามารถแสดงในรูปของค่า rms magnetizing current ได้ดังนี้

$$\Phi_M = (N_p I_M) / R_{core} \quad \text{—————} \quad 2.14$$

เมื่อ :  $\Phi_M$  = mutual flux produced by the magnetizing component of exciting current (Wb)

$N_p$  = จำนวนรอบของขดลวด primary (turn)

$I_M$  = magnetizing current (A)

$R_{core}$  = reluctance transformer core (A-t/wb)

จากการศึกษาในบทที่ 1 เราจะได้สมการของ  $\Phi = B.A$  และ  $R = H / [(B.A) / \ell]$  เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.14 เพื่อหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) จะได้

$$B.A = (N_p I_M) / \{H / [(B.A) / \ell]\} = (N_p I_M) / (H \cdot \ell) \quad B.A$$

$$H = (N_p I_M) / \ell \quad \text{—————} \quad 2.15$$

เมื่อ : H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (A-t/m)

$\ell$  = ความยาวของแกนเหล็ก (m)

และเมื่อใช้กฎของ Kirchhoff's voltage law กับวงจร primary circuit ในรูปที่ 2-5 โดยกำหนดให้  $I_p = I_0$  ที่ no-load จะได้

$$V_T = I_p R_p + E_p \quad \text{—————} \quad 2.16$$

และหาค่ากระแส  $I_p$  จะได้

$$I_p = (V_T - E_p) / R_p \quad \text{—————} \quad 2.17$$



เมื่อ :  $V_T =$  applied voltage

$I_T =$  primary current

$E_p =$  voltage induced in the primary

$R_p =$  resistance of primary winding

**Example 2-2** A 15 kVA 2400-240 V 60 Hz transformer has a magnetic core of  $50 \text{ cm}^2$  cross section and a mean length of 66.7 cm. The application of 2400 V causes a magnetic field intensity of 450 A-t/m rms, and a maximum flux density of 1.5 T. Determine:

- (a) the turns ratio (b) the number of turn in each winding  
(c) the magnetizing current

**Solution** (a) the turns ratio

จากสมการ  $a = E_p / E_s = 2400 / 240 = 10$  \_\_\_\_\_ **Ans**

(b) the number of turn in each winding

จากสมการ  $\Phi_{\max} = B_{\max} \times A = (1.5)(50 \times 10^{-4})$   
 $= 7.5 \times 10^{-3} \text{ Wb}$

จากสมการ  $E_p = 4.44 N_p f \Phi_{\max} \Rightarrow N_p = E_p / (4.44 f \Phi_{\max})$   
 $N_p = (2400) / (4.44 \times 60 \times 7.5 \times 10^{-3})$   
 $= 1200 \text{ turns}$  \_\_\_\_\_ **Ans**

จากสมการ  $a = N_p / N_s \Rightarrow N_s = N_p / a$

$N_s = 1200 / 10 = 120 \text{ turns}$  \_\_\_\_\_ **Ans**

(c) the magnetizing current

จากสมการ  $H = (N_p I_M) / \ell \Rightarrow I_M = (H \cdot \ell) / N_p$

$I_M = [450 \times (66.7/100)] / (1200)$   
 $= 0.25 \text{ A}$  \_\_\_\_\_ **Ans**

## 2-7 Voltage regulation

ผลกระทบของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่ว (leakage flux) และค่าความต้านทาน (resistance) ของขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นเหตุทำให้เกิด voltage drop ในหม้อแปลง ซึ่งเป็นผลลัพธ์ทำให้ค่า output voltage มีความแตกต่างกันระหว่างตอนไม่มี load (no-load) กับตอนที่มี load ต่ออยู่

Voltage regulation คือ อัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ลดลงไปจากตอนที่ยังไม่ได้จ่ายไฟ (no load) ไปยังตอนที่จ่ายไฟเต็มที่ (Full load) ต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายไฟเต็มที่ (Full load)

$$\text{Reg} = (E - V_{\text{rated}}) / V_{\text{rated}} \quad \text{—————} \quad 2.18$$

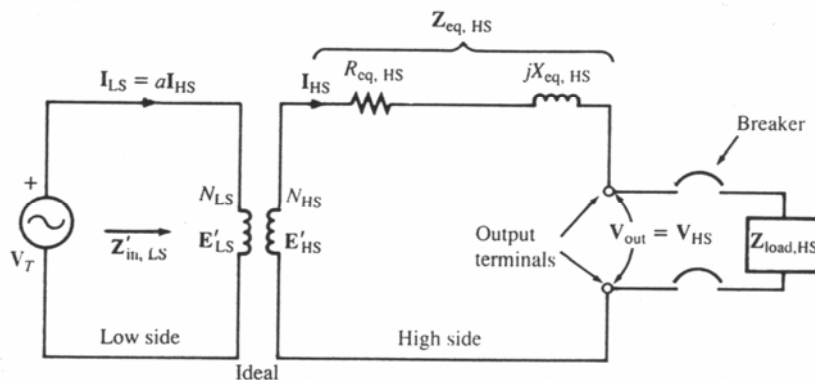
เมื่อ :

$E$  = voltmeter reading at the output terminals when no-load is connected to the transformer

$V_{\text{rated}}$  = voltmeter reading at the output terminals when the transformer is supply rated apparent power

จากสมการที่ 2.18 ค่า voltage regulation จะแสดงเป็นจุดทศนิยม เรียกว่า per-unit regulation หรือ อาจแสดงในรูปของ percent (%) คือ

$$\% \text{ Reg} = (E - V_{\text{rated}}) / V_{\text{rated}} \times 100 \quad \text{—————} \quad 2.19$$



รูปที่ 2-8 Equivalent-circuit in terms of high-side and low-side values for step-up operation

จากรูปที่ 2-8 เมื่อ output terminals ไม่มี load ต่อ (no-load) ค่ากระแส  $I_{HS} = 0$  จึงไม่เกิด voltage drop ที่ค่า impedance ( $Z_{eq}$ ) ดังนั้นค่า output terminals จะเท่ากับค่า  $E_{HS}$  ( $V_{out} = E_{HS}$ )

ถ้านำ load ต่อเข้ากับ output terminals จะทำให้เกิดกระแส  $I_{HS}$  ไหลในวงจร และเกิด voltage drop ที่ค่า impedance ( $Z_{eq}$ ) ดังนั้นเราสามารถหาค่าของ  $E_{HS}$  ได้จากสมการ

$$E_{HS} = I_{HS} Z_{eq} + V_{HS} \quad \text{2.20}$$

## 2-8 กำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

### ● กำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Losses)

การสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า ประกอบด้วย การสูญเสียในขดลวดทาง primary และ secondary และการสูญเสียในแกนเหล็ก คือ hysteresis losses และ eddy-current losses

1. การสูญเสียในขดลวดทองแดงทาง primary และ secondary คือ copper losses เป็นการสูญเสียในรูปของกำลังงานความร้อน ( $P = I^2 R$ )

$$P_{\text{copper losses}} = I^2 R = I_{HS}^2 R_{HS} + I_{LS}^2 R_{LS} \quad \text{2.21}$$

2. การสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses) ขึ้นอยู่กับความถี่ของไฟที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า และความหนาแน่นสูงสุดของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ซึ่งประกอบด้วย

2.1 Hysteresis loss คือ การสูญเสียในรูปของกำลังงานความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับสารที่นำมาใช้ทำแกนเหล็ก ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และความถี่

$$P_h = K_h f^2 B_{\max}^2 \quad \text{_____} \quad 2.22$$

2.2 Eddy current loss คือ การสูญเสียกำลังงานความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลเวียนในแกนเหล็ก

$$P_e = K_e f B_{\max}^{1.6} \quad \text{_____} \quad 2.23$$

ดังนั้นผลรวมของการสูญเสียในแกนเหล็ก คือ

$$P_{\text{core}} = P_h + P_e \quad \text{_____} \quad 2.24$$

● ประสิทธิภาพ (Efficiency)

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า คือ อัตราส่วนระหว่าง power output (ไฟที่จ่ายออกมาทางด้าน secondary) ต่อ power input (ไฟที่รับเข้ามาทางด้าน primary)

$$\eta = P_{\text{out}} / P_{\text{in}} \quad \text{_____} \quad 2.25$$

แต่กำลังไฟที่รับเข้ามา ( $P_{\text{in}}$ ) =  $P_{\text{out}}$  + กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก + กำลังสูญเสียในขดลวด

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_{\text{core}} + P_{\text{cu}} \quad \text{_____} \quad 2.26$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า คือ

	$\eta = P_{\text{out}} / (P_{\text{out}} + P_{\text{core}} + P_{\text{cu}})$	
หรือ	$\eta = P_{\text{out}} / (P_{\text{out}} + P_{\text{core}} + I^2 R)$	_____ 2.27

**Example 2-3** หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 500 kVA มีการสูญเสียที่แกนเหล็กและขดลวดเป็นจำนวน 2500 W และ 7500 W ตามลำดับ ในขณะที่จ่ายไฟฟ้าเต็มที จงหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงขณะจ่ายไฟเต็มที ขณะที่ Power factor เป็น 1 และ 0.8 ตามลำดับ

**Solution** เมื่อ Power factor = 1

$$\text{หา } P_{\text{out}} \quad \text{จาก } \text{kW} = \text{kVA} \times P_f = 500 \times 1 = 500 \text{ kW}$$

$$P_{\text{core}} = 2500 \text{ W} = 2500 / 10^3 \text{ kW} = 2.5 \text{ kW}$$

$$P_{\text{cu}} = 7500 \text{ W} = 7500 / 10^3 \text{ kW} = 7.5 \text{ kW}$$

$$\text{จากสมการ} \quad \eta = P_{\text{out}} / (P_{\text{out}} + P_{\text{core}} + P_{\text{cu}})$$

$$= 500 / (500 + 2.5 + 7.5)$$

$$= 0.98 \text{ หรือ } 98\%$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

เมื่อ Power factor = 0.8

$$\text{หา } P_{\text{out}} \quad \text{จาก } \text{kW} = \text{kVA} \times P_f = 500 \times 0.8 = 400 \text{ kW}$$

$$\text{จากสมการ} \quad \eta = P_{\text{out}} / (P_{\text{out}} + P_{\text{core}} + P_{\text{cu}})$$

$$= 400 / (400 + 2.5 + 7.5)$$

$$= 0.9756 \text{ หรือ } 97.56\%$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

-----

## SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING

$$E_p = 4.44 N_p f \Phi_{\max} \quad (\text{V}) \qquad E_s = 4.44 N_s f \Phi_{\max} \quad (\text{V})$$

$$a = E_p / E_s = N_p / N_s \qquad a = E_p / E_s \qquad a = N_p / N_s$$

$$E_p = a E_s \quad (\text{V}) \qquad I_p = (1/a) I_s \quad (\text{A})$$

$$Z_{\text{in}} = E_p / I_p \quad (\Omega) \qquad Z_{\text{load}} = E_s / I_s \quad (\Omega)$$

$$Z_{\text{in}} = a^2 Z_{\text{load}} \quad (\Omega) \qquad I_0 = I_{\text{fe}} + I_M \quad (\text{A})$$

$$\Phi_M = (N_p I_M) / R_{\text{core}} \quad (\text{Wb}) \qquad H = (N_p I_M) / \ell \quad (\text{A-t/m})$$

$$I_p = (V_T - E_p) / R_p \quad (\text{A}) \qquad E_{\text{HS}} = I_{\text{HS}} Z_{\text{eq}} + V_{\text{HS}} \quad (\text{V})$$

$$\text{Reg} = (E - V_{\text{rated}}) / V_{\text{rated}} \qquad \% \text{ Reg} = (E - V_{\text{rated}}) / V_{\text{rated}} \times 100$$

$$P_{\text{copper losses}} = I^2 R = I_{\text{HS}}^2 R_{\text{HS}} + I_{\text{LS}}^2 R_{\text{LS}} \quad (\text{W}) \qquad P_{\text{core}} = P_h + P_e \quad (\text{W})$$

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_{\text{core}} + P_{\text{cu}} \qquad \eta = P_{\text{out}} / P_{\text{in}}$$

$$\eta = P_{\text{out}} / (P_{\text{out}} + P_{\text{core}} + P_{\text{cu}}) \qquad \eta = P_{\text{out}} / (P_{\text{out}} + P_{\text{core}} + I^2 R)$$

-----

## บทที่ 3

### การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดพิเศษ

#### 3-1 บทนำ

การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกต้อง และการวิเคราะห์คุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดพิเศษที่ถูกต้อง จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลบนแผ่นป้ายของหม้อแปลงไฟฟ้า และการเข้าใจข้อของหม้อแปลงไฟฟ้าและมุมเฟส

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับใช้งานพิเศษ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ (Auto transformer)

และหม้อแปลงประกอบอุปกรณ์ (Instrument transformer) การทำงานจะมีพื้นฐานเช่นเดียวกับหม้อแปลงทั่วไป แต่มีการจัดวงจรที่แตกต่างกัน

หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ (Auto transformer) ใช้ขดลวดหนึ่งขดกับมีการต่อแยก (taps) หนึ่ง tap หรือหลาย taps เพื่อให้ได้การทำงานเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า หม้อแปลงเหล่านี้มีใช้กว้างขวางในโรงงานสำหรับลด

voltage ที่จะใช้ในการเริ่ม start ของ induction motor หรือใช้สำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์ขนาดเล็ก

หม้อแปลงประกอบอุปกรณ์ (Instrument transformer) ถูกใช้ในการเปลี่ยนกระแสสูงและ voltage สูง ให้มีค่าต่ำสำหรับอุปกรณ์และการควบคุม อุปกรณ์หม้อแปลงความต่างศักย์ถูกใช้ในการวัด voltage และอุปกรณ์หม้อแปลงกระแสถูกใช้ในการวัดกระแส และทั้งสองชนิดยังถูกใช้เป็นจนวนกันอุปกรณ์ที่มี voltage ต่ำจากระบบที่มี voltage สูงด้วย

ระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส ต้องการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว 3 ตัว มาต่อเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส หนึ่งตัว หรือหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 1 ตัว ที่มีขดลวด primary และขดลวด secondary ถูกต่อแบบ wye-connected หรือ delta-connected

การขนานหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพจะต้องมีข้อมูลของอัตราส่วนจำนวนรอบ (turns ratio) , equivalent impedance และ phase angle ของขดลวด secondary การลัดวงจรที่จะนำข้อมูลเหล่านี้มาพิจารณา เมื่อขนานหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วอาจทำให้มี load มากเกินไป (overload) ซึ่งจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าได้รับความเสียหายได้

#### 3-2 ข้อของหม้อแปลงไฟฟ้าและมาตรฐานเครื่องหมายที่ปลายขั้ว (Transformer Polarity and Standard Terminal Markings)

การให้เครื่องหมายที่ปลายสายที่ออกมาจากหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งทางด้านรับไฟ (primary) และด้านจ่ายไฟ (secondary) นั้นเป็นสิ่งสำคัญมาก หากการให้เครื่องหมายที่ขั้วผิดพลาด เมื่อนำหม้อแปลงไฟฟ้า

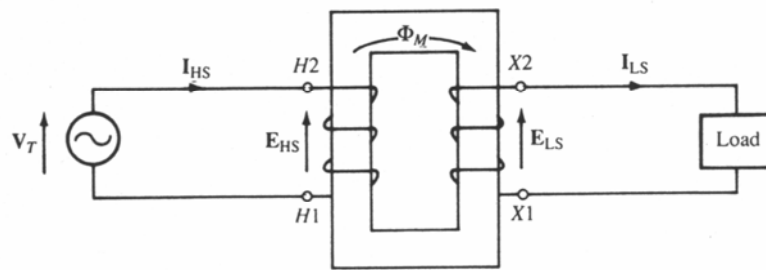
มาต่อขนานกัน จะทำให้เกิดการลัดวงจรอย่างรุนแรง ทำความเสียหายให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้า หรืออาจทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าระเบิดเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้

มาตรฐานขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ตามโรงงาน ในทางปฏิบัติของประเทศสหรัฐอเมริกา หรืออังกฤษ จะให้เครื่องหมายขั้วปลายสายของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนี้

■ เครื่องหมายขั้วของปลายสายทางด้านแรงสูง (High voltage) เป็น  $H_1$  และ  $H_2$

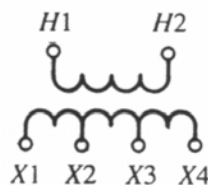
■ เครื่องหมายขั้วของปลายสายทางด้านแรงต่ำ (low voltage) เป็น  $X_1$  และ  $X_2$

การให้เครื่องหมายขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับการพันขดลวดที่อยู่บนแกนเหล็กนั้นๆ โดยที่  $H_1$  และ  $X_1$  จะต้องมีขั้วสอดคล้องกัน นั่นคือ ถ้า  $H_1$  เป็น + (บวก) หรือต้น coil แล้ว  $X_1$  ก็ต้องมีขั้วเป็น + (บวก) หรือต้น coil เช่นเดียวกัน และในทำนองเดียวกัน  $H_2$  และ  $X_2$  ก็สอดคล้องซึ่งกันและกันด้วย นั่นคือ ถ้า  $H_2$  เป็น - (ลบ) หรือปลาย coil แล้ว  $X_2$  ก็ต้องเป็น - (ลบ) หรือ ปลาย coil ด้วย ตามที่แสดงในรูปที่ 3-1 (a)



รูปที่ 3-1 (a) Transformer polarity marks.

■ ในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีขดลวดต่อแยก (tap winding) จะใช้ระดับความต่างศักย์ (potential gradient) ตามด้วยลำดับของตัวเลข นั่นคือ ความต่างศักย์สัมพัทธ์จะแตกต่างกันระหว่างปลายขั้วที่ต่อแยกออกมา ตามที่แสดงในรูปที่ 3-1 (b)

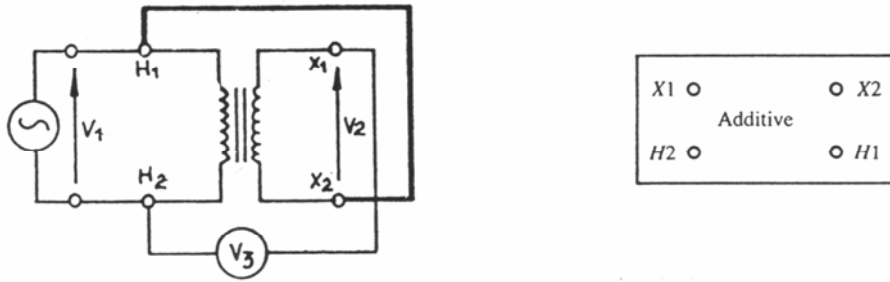




รูปที่ 3-1 (b) Tap winding transformer

● การบวกขั้วและลบขั้ว (Additive and subtractive Polarity)

0. การบวกขั้ว (Additive Polarity)



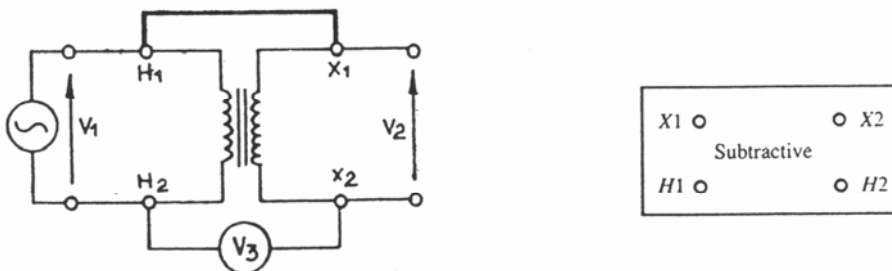
รูปที่ 3-2 Additive polarity

จากรูปที่ 3-2 แสดงการให้เครื่องหมายขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อนำขั้วที่ต่างกันมาต่อกัน คือนำ  $H_1$  (ขั้วบวก) มาต่อกับ  $X_2$  (ขั้วลบ) แล้ว ทำการวัด voltage  $V_3$  ที่ขั้ววัด  $H_2$  กับ  $X_1$  จะได้ค่า voltage ที่สูงกว่าค่า voltage ที่วัดจาก  $H_1$  กับ  $H_2$  นั่นคือ

$$V_3 = V_1 + V_2$$

สาเหตุที่ค่า voltage  $V_3$  มีค่ามากกว่า  $V_1$  เพราะว่า เมื่อต่อ  $H_1$  เข้ากับ  $X_2$  จะทำให้ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้า  $V_1$  เสริมกับทิศทางของแรงเคลื่อน  $V_2$  (มีทิศทางไปทางเดียวกัน) ดังนั้นเราจึงเรียกว่า “การบวกขั้ว” (additive polarity)

0. การลบขั้ว (Subtractive Polarity)



### รูปที่ 3-3 Subtractive polarity

จากรูปที่ 3-3 เมื่อนำขั้วที่เหมือนกันมาต่อกัน คือ นำ  $H_1$  (ขั้วบวก) มาต่อกับ  $X_1$  (ขั้วบวก) แล้วทำการวัด voltage  $V_3$  ที่ขั้ว  $H_2$  และ  $X_2$  จะได้ค่า voltage ต่ำกว่าค่า voltage ที่วัดจาก  $H_1$  และ  $H_2$  นั่นคือ

$$V_3 = V_1 - V_2 \quad (V_1 > V_2)$$

สาเหตุที่ค่า voltage  $V_3$  มีค่าน้อยกว่า  $V_1$  เพราะว่าเมื่อต่อ  $H_1$  กับ  $X_1$  จะทำให้ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้า  $V_1$  มีทิศทางสวนกับทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้า  $V_2$  ดังนั้นจึงเรียกว่า “การลบขั้ว” (subtractive polarity)

### 3-3 ข้อมูลบนแผ่นป้ายหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Nameplate)

ข้อมูลบนแผ่นป้ายของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน NEMA (National Electrical Manufacturers Association) จะประกอบด้วยอัตราแรงเคลื่อนไฟฟ้า (voltage rating : V) อัตรากำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง (kilovolt-ampere rating : kVA) ความถี่ (frequency) จำนวนเฟส (number of phase) , อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (temperature rise) ชั้นของการระบายความร้อน (cooling class) เปอร์เซ็นต์เอนดิมพีแดนซ์ (percent impedance) และชื่อบริษัทผู้ผลิต (name of manufacturer)

สำหรับแผ่นป้ายของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ประเภท Power transformer จะบอกค่า basic impulse insulation level (BIL) , เฟสเซอร์ไดอะแกรมของการทำงาน 3 เฟส (phasor diagram for 3 phase operation) และข้อมูลการเปลี่ยนตำแหน่ง tap (tap changing information)

#### ● Voltage rating

อัตราแรงเคลื่อนไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (primary) และด้านแรงต่ำ (secondary) คือ ค่าเมื่อไม่มี Load (no load) สำหรับค่า Full load จะขึ้นอยู่กับค่า power factor ของ load ที่นำมาต่อ และตามมาตรฐานของ NEMA ได้กำหนดเครื่องหมายไว้ดังนี้

- เครื่องหมายขีด (-) หมายถึง ใช้แสดง voltage ที่มาจากต่างขดลวดกัน
- เครื่องหมายขีดเฉียง (/) หมายถึง ใช้แสดง voltage ที่มาจากขดลวดเดียวกัน
- เครื่องหมายกากบาท (X) หมายถึง ใช้แสดง voltage ขดลวด 2 อัน นำมาต่ออนุกรมหรือขนานกัน
- เครื่องหมายวาย (Y) หมายถึง ใช้แสดง voltage ของขดลวดที่ต่อแบบ Wye connected

ตัวอย่างต่อไปนี้แสดงวิธีการกำกับขดลวดที่ใช้ใน Single phase และ Three phase

#### 0. Single-phase

■ 240 / 120 : แรงเคลื่อนไฟฟ้า 240 V มีขดลวดต่อ Tap ตรงกลาง ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 120 V

■ 240 X 120 : ขดลวดมี 2 ขด เมื่อต่ออนุกรมจะได้ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 240 V และต่อขนานจะได้ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 120 V

■ 240 - 120 : ขดลวดทางด้าน High voltage หรือ primary มีระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 240 V และด้าน Low voltage หรือ Secondary มีระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 120 V

### O. Three - phase

■ 4160 – 480 Y / 277 : ขดลวดทางด้าน primary ต่อแบบ Delta connected มีระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 4160 V และขดลวดทางด้าน secondary หรือ Low voltage ต่อแบบ Wye connected มีระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 480 V และมีขดลวด Tap ตรงกลางที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 277 V

- **Frequency**

Frequency คือ อัตราความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น 50 Hz หรือ 60 Hz

- **Kilovolt-ampere rating**

Kilovolt-ampere rating (kVA) คือ อัตรากำลังงานไฟฟ้าของหม้อแปลง ซึ่งมีค่ากำลังงานไฟฟ้าเป็น apparent power (S) เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 100 kVA หรือ 500 kVA หรือ 1000 kVA

- **Percent impedance**

Percent impedance (% Z) หมายถึง อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรง และทางด้านแรงต่ำ ลัดวงจรเพื่อให้ได้พิกัดกระแส กับแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดทางด้านแรงสูง

พิกัด output (kVA)	% impedance
มาตรฐานของประเทศเยอรมัน	
30 - 630	4
1,000 - 1,600	6
2,000 - 10,000	8
มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา	
75 - 500	3 – 4.5
750 - 1,500	5.75

- **Temperature rise**

Temperature rise คือ ค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ยอมรับได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยมีฐานของอุณหภูมิแวดล้อม (ambient temperature) ที่ 30° C

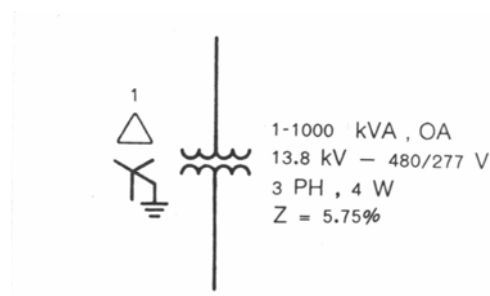
- **Basic Impulse Insulation Level**

Basic Impulse Insulation Level (BIL) คือ ความสามารถของหม้อแปลงที่จะทนต่อแรงดันไฟฟ้าแบบกระตุ้น (impulse) โดยหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่ได้ได้รับความเสียหาย

- **Cooling class**

Cooling class คือ การระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะใช้อักษรแสดงสัญลักษณ์ตามรายละเอียดดังนี้

ชนิดของตัวอักษร	วิธีการระบายความร้อน
AN	หม้อแปลงแบบแห้ง, ระบายความร้อนโดยการหมุนเวียนอากาศตามธรรมชาติ
OA	น้ำมันท่วม, ระบายความร้อนด้วยตัวเอง
ONAN	น้ำมันท่วม, ระบายความร้อนด้วยตัวเอง
FOA	น้ำมันท่วม, ระบายความร้อนด้วยการอัดน้ำมันพร้อมอัดอากาศ (ใช้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่มากกว่า 10,000 kVA)



รูปที่ 3-4 แสดงสัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ one line diagram

### 3-4 Auto transformer

Auto transformer เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติที่มีขดลวดเพียงชุดเดียวที่เป็นทั้งทางด้านรับไฟ (primary) และด้านจ่ายไฟ (secondary) จึงทำให้ประหยัดขดลวด ในทางทฤษฎีการทำงานของ Auto transformer จะมีหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบธรรมดาทั่วไป

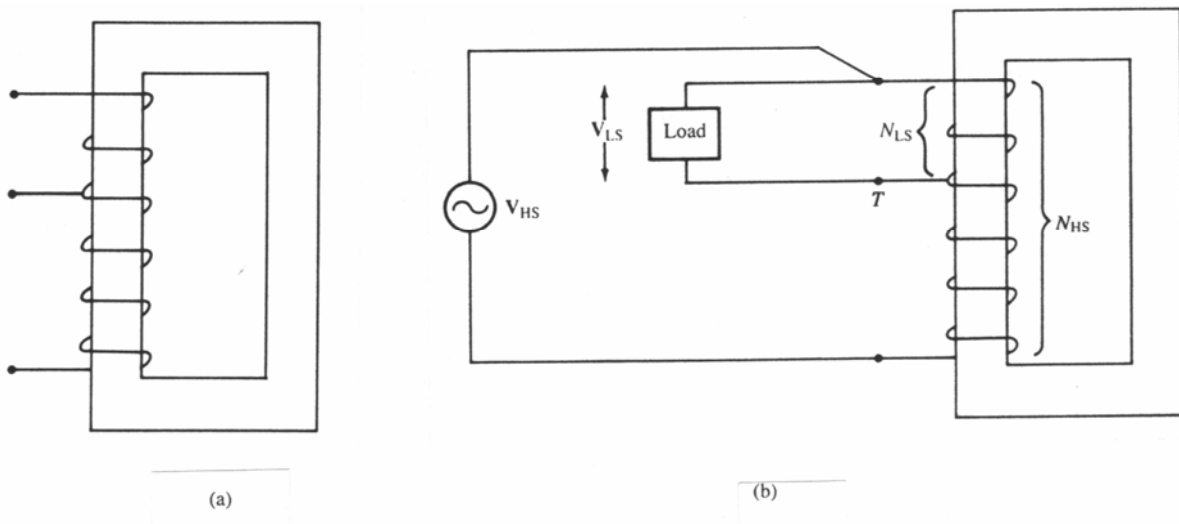
#### ☒ ข้อดีของ Auto transformer

เนื่องจากโครงสร้างของ Auto transformer มีขดลวดเพียงชุดเดียว จึงใช้ลวดทองแดงน้อยและแกนเหล็กน้อย ทำให้การรั่วของเส้นแรงแม่เหล็กน้อย และมีน้ำหนักเบา ใช้พื้นที่น้อย แต่มีประสิทธิภาพมาก และราคาถูกกว่าหม้อแปลงชนิด 2 ชุด ที่มีขนาด power และ voltage เท่ากัน

#### ☒ ข้อเสียของ Auto transformer

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Auto transformer จะไม่มีฉนวนป้องกันระหว่างขดลวด primary และ secondary เมื่อนำไปใช้กับ load ที่กำลังงานไฟฟ้ามาก ๆ อาจจะทำให้เกิดกระแสลัดวงจรได้สูง ซึ่งเป็นผลทำให้เกิด fault ได้

0. ในทางปฏิบัติ จะใช้ Auto transformer เป็นตัว start ของ induction motor ในระหว่าง start โดยที่สามารถใช้ค่า voltage ของตัวมันเองได้สูงถึง 50-60 % ของ full load ของ motor



รูปที่ 3-5 Auto transformer : (a) basic auto-transformer circuit ; (b) connected for step-down operation

เมื่อ  $N_{HS}$  = จำนวนรอบด้านแรงสูง (high side)

$N_{LS}$  = จำนวนรอบที่เกาะรัด (embraced) ของด้านแรงต่ำ (low side)

$V_{HS}$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าของด้านแรงสูงหรือด้านรับไฟ

$V_{LS}$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าของด้านแรงต่ำ หรือด้านจ่ายไฟให้กับ load

- **Transformed current**

Transformed current ( $I_{tr}$ ) กระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง คือ ผลต่างของ vector กระแสไฟฟ้าทางด้าน High side ( $I_{HS}$ ) กับกระแสไฟฟ้าทางด้าน Low side ( $I_{LS}$ ) ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วกระแสไฟฟ้า  $I_{HS}$  และ  $I_{LS}$  จะมี Phase ตรงข้ามกัน ซึ่งหาได้จากสมการ

$$I_{tr} = I_{LS} - I_{HS} \quad \text{—————} \quad 3.1$$

- **Apparent power conducted**

Apparent power conducted ( $S_{cond}$ ) คือ การนำกำลังงานไฟฟ้าปรากฏ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$S_{cond} = V_{LS} \cdot I_{HS} \quad \text{—————} \quad 3.2$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้จะใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้าน Low side ( $V_{LS}$ ) สาเหตุที่ไม่ใช้แรงดันไฟฟ้าทางด้าน High side ( $V_{HS}$ ) เพราะถ้าใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้าน High side แล้ว ค่า  $S_{cond}$  จะมีค่าเท่ากับ  $S_{load}$  ( $S_{cond} = S_{load}$ )

- **Apparent power transformed**

Apparent power transformed ( $S_{tr}$ ) คือ กำลังงานไฟฟ้าแปลงที่ปรากฏ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$S_{tr} = I_{tr} \cdot V_{LS} \quad \text{—————} \quad 3.3$$

- **Apparent power load**

Apparent power load ( $S_{load}$ ) คือ กำลังงานไฟฟ้าปรากฏที่ Load ซึ่งหาได้จากสมการ

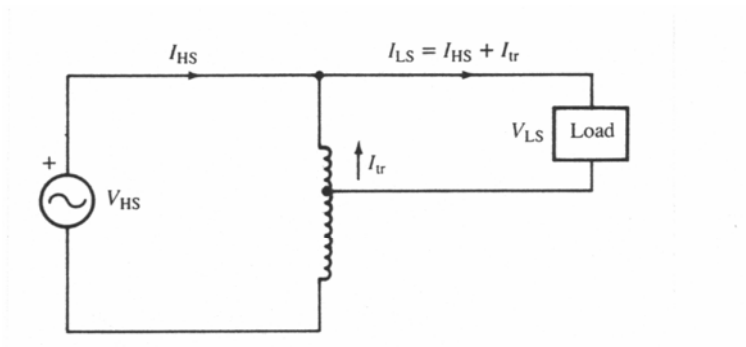
$$S_{load} = V_{LS} \cdot I_{LS} \quad \text{—————} \quad 3.4$$

หรือ

$$S_{\text{load}} = S_{\text{cond}} + S_{\text{tr}} \quad \text{—————} \quad 3.5$$

**Example 3-1** A 400 turns auto transformer, operating in the step-down mode with a 25 percent tap supplies a 4.8 kVA , power factor 0.8 lagging load. The input to the transformer is 2400 V 60 Hz Neglecting the small losses and leakage effects , Determine :

- (a) the load current
- (b) the incoming line current
- (c) the transformed current
- (d) the apparent power conducted and the apparent power transformed



รูปที่ 3-6 Circuit diagram for Example 3-1

**Solution** (a) the load current ( $I_{LS}$ )

จากสมการ  $N_{HS} / N_{LS} = a$   
 $(400) / (25 \% \times 400) = a$   
 $a = (400) / (100) = 4$

และจากสมการ  $V_{HS} / V_{LS} = a \Rightarrow V_{LS} = V_{HS} / a$   
 $V_{LS} = (2400) / 4 = 600 \text{ V}$

ดังนั้นค่า the load current ( $I_{LS}$ ) หาได้จากสมการ

$$S_{\text{load}} = V_{LS} I_{LS} \Rightarrow I_{LS} = S_{\text{load}} / V_{LS}$$

$$I_{LS} = (4.8 \text{ kVA}) / (600) = 8 \text{ A} \quad \text{—————} \quad \text{Ans}$$

(b) the incoming line current (กระแสที่จ่ายเข้ามา :  $I_{HS}$ )

จากสมการ  $I_{LS} / I_{HS} = a \Rightarrow I_{HS} = I_{LS} / a$   
 $I_{HS} = 8 / 4 = 2 \text{ A}$  \_\_\_\_\_ **Ans**

(c) the transformed current ( $I_{tr}$ )

จากสมการ  $I_{tr} = I_{LS} - I_{HS} = 8 - 2$   
 $I_{tr} = 6 \text{ A}$  \_\_\_\_\_ **Ans**

(d) the apparent power conducted ( $S_{cond}$ ) and the apparent power transformed ( $S_{tr}$ )

จากสมการ  $S_{cond} = I_{HS} V_{LS} = (2)(600)$   
 $= 1200 \text{ VA}$  \_\_\_\_\_ **Ans**

จากสมการ  $S_{tr} = I_{tr} V_{LS} = (6)(600)$   
 $= 3600 \text{ VA}$  \_\_\_\_\_ **Ans**

☞ จากตัวอย่างที่ 3-1

Apparent power load = apparent power conducted + apparent power transformed

$$S_{load} = S_{cond} + S_{tr} = 1200 + 3600 = 4800 \text{ VA} = 4.8 \text{ kVA}$$

จะเห็นว่าค่า Apparent power load ( $S_{load}$ ) ที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากับที่โจทย์กำหนด

☞ ค่า apparent power conducted ( $S_{cond} = I_{HS} V_{LS}$ ) สาเหตุที่เราไม่ใช้ค่า voltage ทางด้าน high side ( $V_{HS}$ ) มาคิดคำนวณ เพราะถ้าใช้ค่า voltage ทางด้าน high side จะได้

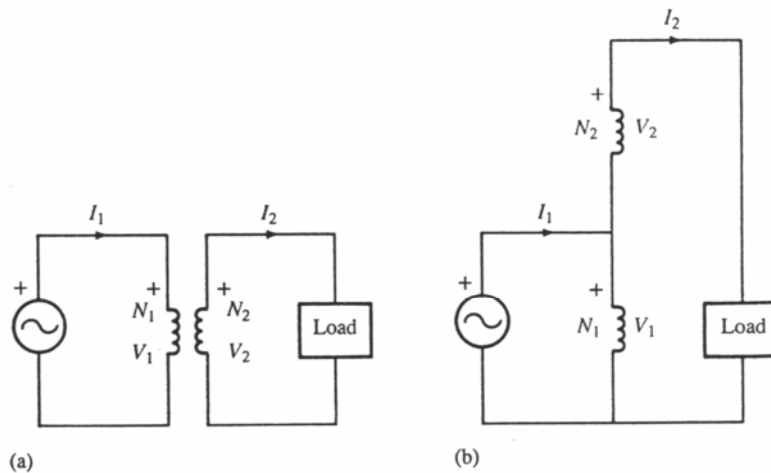
$$S_{cond} = I_{HS} V_{HS} = (2)(2400) = 4800 \text{ VA} = 4.8 \text{ kVA}$$

เมื่อนำค่า voltage ทางด้าน high side มาคิดคำนวณ จะได้  $S_{cond} = 4.8 \text{ kVA}$  ซึ่งจะเท่ากับค่าของ

Apparent power load ( $S_{load}$ )



- ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรอบและอัตรากำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 2 ขด เมื่อถูกใช้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ (Relationship between Turns Ratio and Power Rating of 2 – Winding Transformer when reconnected as Auto transformer)



รูปที่ 3-7 (a) Two winding transformer ; (b) reconnected as an Auto transformer

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนรอบและอัตรากำลังงานไฟฟ้าของหม้อแปลงชนิด 2 ขด และอัตรากำลังงานไฟฟ้าของหม้อแปลงเมื่อถูกต่อใหม่เป็น Auto transformer ตามรูปที่ 3-7 (b) คือ

$$S_{at} = (V_1 + V_2) \cdot I_2 \quad \text{_____} \quad 3.6$$

จากรูปที่ 3-7 (a) จะได้ Turns ratio ของหม้อแปลง คือ

$$a = V_1 / V_2 = N_1 / N_2$$

$$V_1 = V_2 (N_1 / N_2) \quad \text{_____} \quad 3.7$$

แทนค่า  $V_1 = V_2 (N_1 / N_2)$  จากสมการที่ 3.7 ลงในสมการที่ 3.6 จะได้

$$\begin{aligned} S_{at} &= [V_2 (N_1 / N_2) + V_2] I_2 \\ &= [(N_1 / N_2) + 1] V_2 I_2 \end{aligned}$$

แต่  $N_1 / N_2 = a$  คือ turns ratio และ  $V_2 I_2$  คือ อัตรากำลังไฟฟ้าปรากฏขณะเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 2 ขด ซึ่งก็คือ  $S_{2w}$  ดังนั้นจะได้

$$S_{at} = (a + 1) \cdot S_{2w}$$

เมื่อ : a = turn ratio ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 2 ขด

$S_{at}$  = apparent power ratings ของ Auto transformer

$S_{2w}$  = apparent power ratings ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 2 ขด

**Example 3-2** A 10 kVA , 60 Hz , 2400-240 V distribution transformer is reconnected for use as a step-up auto-transformer with a 2640 V output and a 2400 V input. Determine

- (a) the rated primary and rated secondary currents when connected as an auto-transformer.
- (b) the apparent-power rating when connected as an auto-transformer.

**Solution** (a) the rated primary and rated secondary currents when connected as an auto-transformer.

อัตรากระแสไฟฟ้าทางด้าน Primary เมื่อต่อเป็น auto-transformer หาได้จากสมการ

$$I_p = \text{kVA} / V_p = (10 \times 10^3) / 2400 = 4.167 \text{ A} \quad \text{_____ Ans}$$

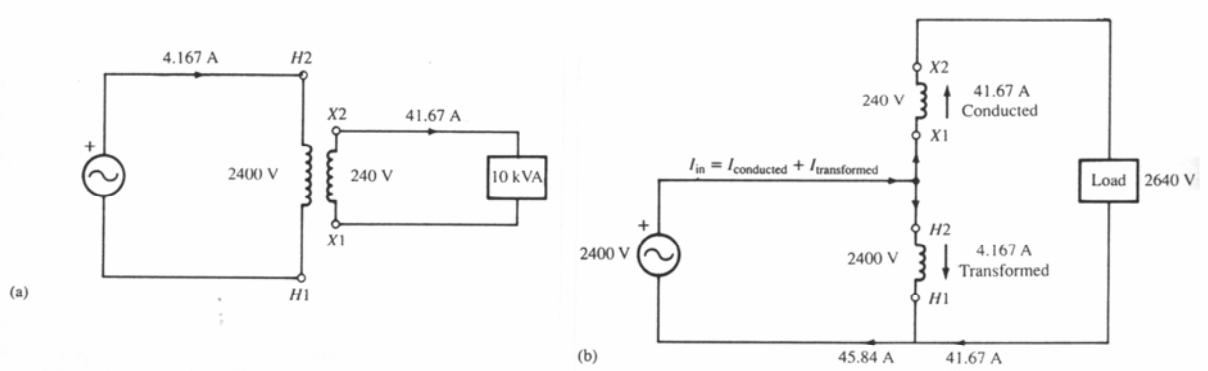
อัตรากระแสไฟฟ้าทางด้าน Secondary เมื่อต่อเป็น auto-transformer หาได้จากสมการ

$$I_s = \text{kVA} / V_s = (10 \times 10^3) / 240 = 41.67 \text{ A} \quad \text{_____ Ans}$$

- (b) the apparent-power rating when connected as an auto-transformer.

ค่า apparent power เมื่อต่อเป็น auto-transformer หาได้จากสมการ

$$S_{at} = (a + 1) \cdot S_{2w} = [(2400/240) + 1] (10 \text{ kVA}) = 110 \text{ kVA} \quad \text{_____ Ans}$$



รูปที่ 3-8 Circuit diagram for Example 3-2

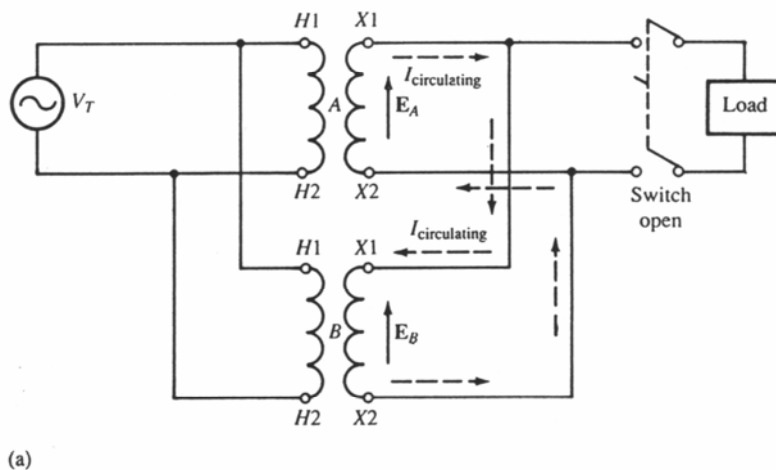
### 3-5 การต่อขนานหม้อแปลงไฟฟ้า (Parallel operation of transformer)

เมื่อมีการใช้ Load เพิ่มมากขึ้นจนใกล้อัตราสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนั้นที่จะยอมรับได้ก็จำเป็นจะต้องมีหม้อแปลงไฟฟ้าอีกตัวหนึ่งที่มีอัตราขนาดคล้ายกันมาต่อขนานกับหม้อแปลงไฟฟ้าตัวเดิม และจะแบ่ง Load ซึ่งกันและกัน หม้อแปลงไฟฟ้าที่จะนำมาต่อขนานจะต้องมีอัตราส่วนรอบของขดลวด ( $N_p$  และ  $N_s$ ) เท่ากัน , impedance ของหม้อแปลงต้องเท่ากัน และอัตราส่วนความต้านทานต่อ reactance ต้องเท่ากัน

■ ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานกันมีอัตราส่วนรอบไม่เท่ากันจะทำให้เกิดกระแสหมุนเวียนในวงรอบปิด (Loop) ที่ขนานกัน โดยเกิดที่ขดลวด secondary ของหม้อแปลง

■ ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มี impedance ไม่เหมือนกัน จะแบ่ง Load ในอัตราส่วนกลับกันกับ impedance ของหม้อแปลงตัวเดิม

- ผลกระทบจากการมีอัตราส่วนรอบต่างกันเมื่อทำงานแบบขนาน (Effects of Different turns ratios on parallel operation)



รูปที่ 3-9 Circulating current in paralleled transformer : (a) load switch open

จากรูปที่ 3-9 (a) แสดงหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัวต่อขนานกัน ซึ่งเรียกว่า Bank (แบงก์) โดยยังไม่ต่อ Load เข้ากับขดลวด secondary สมมุติว่ามีอัตราส่วนจำนวนรอบต่างกัน ดังนั้นค่า output voltage ที่

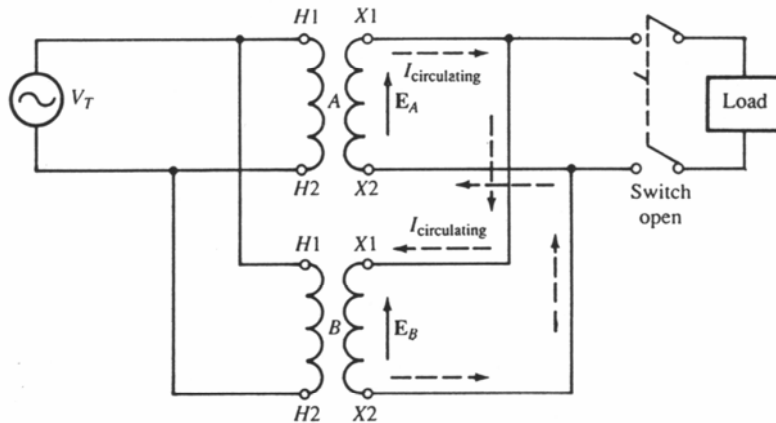
$E_A$  และ  $E_B$  จะไม่เท่ากัน และกระแสไหลหมุนเวียน ( $I_{\text{circulating}}$ ) ในวงจรรอบปิด (Loop) ของขดลวด secondary ทั้ง 2 ขด ถูกแสดงโดยลูกศรเส้นปะ

ผลรวมของ voltage ทาง Phasor ของวงรอบ (Loop) คือ  $E_A - E_B$  และ impedance ของวงรอบ คือ  $Z_A + Z_B$  นั่นคือจากกฎของ ohm's law จะได้

$$I_{\text{circulating}} = (E_A - E_B) / (Z_A + Z_B) \quad \text{-----} \quad 3.9$$

ถ้าสวิตช์ของ Load ปิดลง (Switch closed) ตามที่แสดงในรูปที่ 3-9 (b) กระแสไหลเวียน ( $I_{\text{circulating}}$ ) จะไปรวมกับกระแส Load ในหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรก ( $I_A$ ) และลบบอกจากกระแส Load ในหม้อแปลงไฟฟ้าอีกตัวหนึ่ง (หม้อแปลง B) นั่นคือ ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ bank กัน จะมีผลต่อ load ดังนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้าที่มี voltage ทางด้าน secondary สูงกว่า จะมี Load มากเกินไป (over load)
- หม้อแปลงไฟฟ้าตัวอื่นที่มี voltage ทางด้าน secondary ต่ำ จะมี Load ต่ำเกินไป (under load)



(a)

รูปที่ 3-9 Circulating current in paralleled transformer : (b) load switch closed

### 3-6 การนำหม้อแปลงไฟฟ้า single-phase มาต่อเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส (Three phase connection of single-phase transformer)

เราสามารถนำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส (single-phase) จำนวน 3 ตัว มาต่อให้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส (three phase) จำนวน 1 ตัว ได้ โดยการนำต้น coil และปลาย coil ของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัว มาต่อกันเป็นแบบ Wye connected หรือ Delta connected

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ความสัมพันธ์ของ line voltage , phase voltage และ line current, phase current สำหรับการต่อแบบ Wye connected คือ

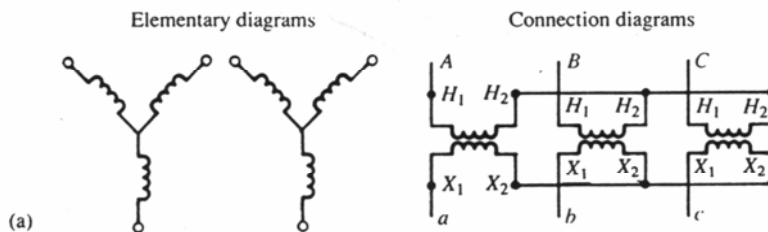
$$V_{\text{line}} = \sqrt{3} V_{\text{phase}} \quad \text{และ} \quad I_{\text{line}} = I_{\text{phase}}$$

และความสัมพันธ์ของ line voltage , phase voltage และ line current, phase current สำหรับการต่อแบบ Delta connected คือ

$$V_{\text{line}} = V_{\text{phase}} \quad \text{และ} \quad I_{\text{line}} = \sqrt{3} I_{\text{phase}}$$

- การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Wye-Wye

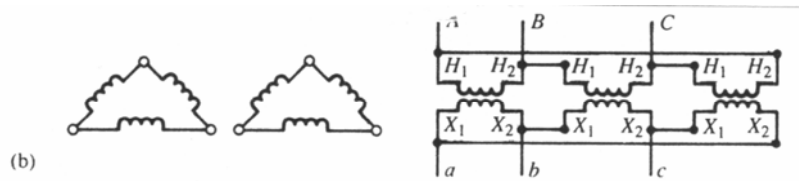
การนำหม้อแปลงไฟฟ้ามาต่อเป็นแบบ Wye-Wye คือ การนำเอาปลาย coil ของแต่ละเฟสมาต่อรวมกัน (neutral connected) และนำต้น coil ทางด้าน primary ไปต่อกับแหล่งจ่ายไฟ ส่วนต้น coil ทางด้าน secondary ไปต่อกับ load ตามที่แสดงในรูปที่ 3-10 (a)



รูปที่ 3-10 (a) Three-phase connection of single transformer : Wye-Wye bank

- การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Delta-Delta

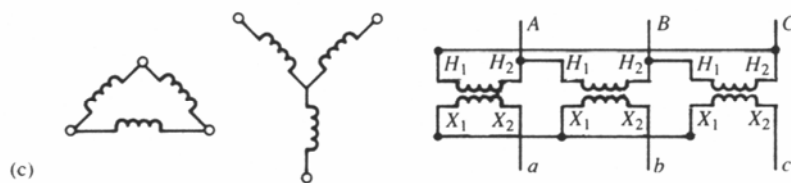
การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Delta-Delta คือ การนำเอาปลาย coil ไปต่อกับต้นของอีก coil แล้วนำขดลวดทางด้าน primary ไปต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ ส่วนขดลวดทางด้าน secondary ไปต่อเข้ากับ load ตามที่แสดงในรูป 3-10 (b)



รูปที่ 3-10 (b) Three-phase connection of single transformer : Delta-Delta bank

● การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Delta-Wye

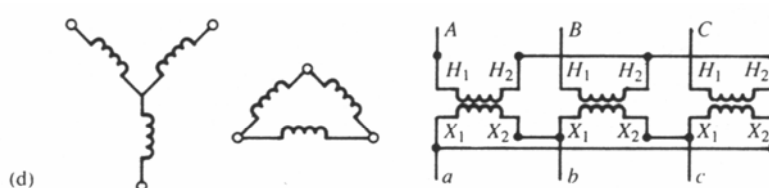
การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Delta-Wye โดยขดลวดทางด้าน primary จะต่อเป็นแบบ Delta-connected และนำไปต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ ส่วนขดลวดทางด้าน secondary จะต่อเป็นแบบ Wye-connected แล้วนำไปต่อเข้ากับ load ตามที่แสดงในรูปที่ 3-10 (c)



รูปที่ 3-10 (c) Three-phase connection of single transformer : Delta-Wye bank

● การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Wye - Delta

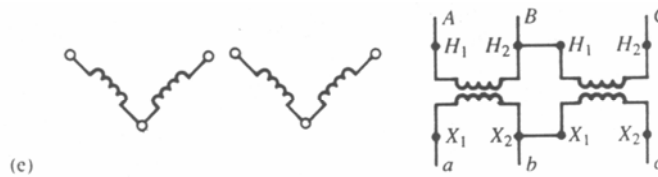
การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Wye-Delta โดยขดลวดทางด้าน primary จะต่อเป็นแบบ Wye-connected และนำไปต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ ส่วนขดลวดทางด้าน secondary จะต่อเป็นแบบ Delta-connected แล้วนำไปต่อเข้ากับ load ตามที่แสดงในรูปที่ 3-10 (d)



รูปที่ 3-10 (d) Three-phase connection of single transformer : Wye-Delta bank

- การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ V-V bank (Open Delta)

การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ V-V bank คือ การนำหม้อแปลงไฟฟ้า single-phase จำนวน 3 ตัว มาต่อเป็นแบบ Delta-Delta และถ้าหากหม้อแปลงไฟฟ้า single-phase ที่นำมาต่อตัวใดตัวหนึ่งชำรุด เราสามารถที่จะปลดออกนำมาซ่อมทำได้ ทำให้หม้อแปลงส่วนที่เหลือจำนวน 2 ตัว จะถูกต่อเป็นแบบ V-V bank หรือเราเรียกการต่อแบบนี้ว่า “open delta” ตามที่แสดงในรูปที่ 3-10 (e)



รูปที่ 3-10 (e) Three-phase connection of single transformer : V-V bank

**Example 3-3** A 150 kVA bank of wye-delta connected step-down transformer has an input line-voltage of 4160 V and an output line-voltage of 240 V Determine :

- (a) bank ratio
- (b) transformer ratio
- (c) rated line and phase currents for the high side
- (d) rated line and phase currents for the low side

**Solution** (a) bank ratio

bank ratio คือ อัตราส่วนของ line voltage ทางด้านแรงสูง (primary) ต่อ line voltage ทางด้านแรงต่ำ (secondary) นั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{bank ratio} &= V_{\text{line}}(\text{primary}) / V_{\text{line}}(\text{secondary}) \\ &= 4160 / 240 = 17.33 \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{Ans} \end{aligned}$$

(b) transformer ratio

transformer ratio คือ อัตราส่วนของ phase voltage ทางด้าน primary ต่อ phase voltage ทางด้าน secondary

ด้าน primary ต่อแบบ Wye connected ดังนั้นจะได้ phase voltage คือ

$$V_{\text{line}} = \sqrt{3} V_{\text{phase}} \Rightarrow V_{\text{phase}} = V_{\text{line}} / \sqrt{3}$$

$$V_{\text{phase}} = 4160 / \sqrt{3} = 2402 \text{ V}$$

ด้าน secondary ต่อแบบ Delta conneted ดังนั้นจะได้ phase voltage คือ

$$V_{\text{line}} = V_{\text{phase}} = 240 \text{ V}$$

ดังนั้น transformer ratio =  $V_{\text{phase}} (\text{primary}) / V_{\text{phase}} (\text{secondary})$

$$= 2402 / 240 = 10.008$$

$$= 10 \quad \text{-----} \quad \text{Ans}$$

(c) rated line and phase currents for the high side

จากสมการ  $S = \sqrt{3} V_{\text{line}} I_{\text{line}} \Rightarrow I_{\text{line}} = S / \sqrt{3} V_{\text{line}}$

$$I_{\text{line (primary)}} = (150 \times 10^3) / \sqrt{3} (4160)$$

$$= 20.82 \text{ A} \quad \text{-----} \quad \text{Ans}$$

เนื่องจากทางด้าน primary ต่อแบบ Wye connected ดังนั้นจะได้ phase currents คือ

$$I_{\text{phase}} = I_{\text{line}} = 20.82 \text{ A} \quad \text{-----} \quad \text{Ans}$$

(d) rated line and phase currents for the low side

จากสมการ  $S = \sqrt{3} V_{\text{line}} I_{\text{line}} \Rightarrow I_{\text{line}} = S / \sqrt{3} V_{\text{line}}$

$$I_{\text{line (secondary)}} = (150 \times 10^3) / \sqrt{3} (240)$$

$$= 360.8 \text{ A} \quad \text{-----} \quad \text{Ans}$$

เนื่องจากทางด้าน secondary ต่อแบบ Delta connected ดังนั้นจะได้ phase currents คือ

$$I_{\text{phase}} = I_{\text{line}} / \sqrt{3}$$

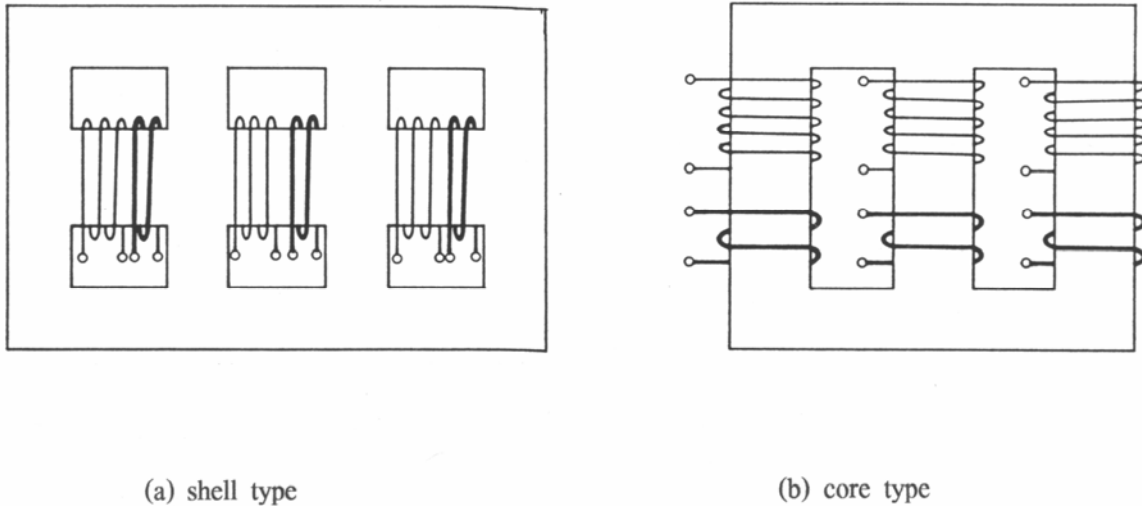
$$= 360.8 / \sqrt{3} = 208.3 \text{ A} \quad \text{-----} \quad \text{Ans}$$

-----



### 3-7. Three-phase Transformer

หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส จะมีขดลวดจำนวน 3 เฟส พันอยู่บนแท่งเหล็กอันเดียวกัน ตามที่แสดงในรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 Basic construction of three-phase transformer

หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส จะใช้วัสดุน้อยกว่าการนำหม้อแปลงไฟฟ้า single-phase 3 ตัว มาต่อกัน เมื่อเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาด power และ voltage เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้มีน้ำหนักน้อยและราคาถูกลง สำหรับการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส แบบ Wye connected หรือ Delta connected สามารถต่อภายในหม้อแปลงได้

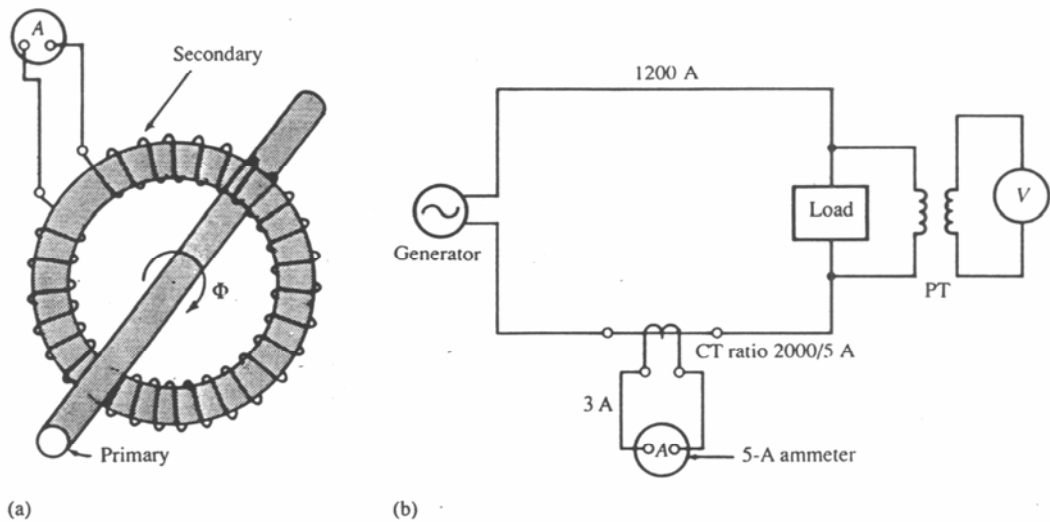
☒ ข้อเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส เมื่อเปรียบเทียบกับการนำหม้อแปลงไฟฟ้า single-phase จำนวน 3 ตัว มาต่อเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 1 ตัว คือ ถ้าเฟสหนึ่งเฟสใดลัดวงจรหรือชำรุด จะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าไม่สามารถใช้งานได้

### 3-8. Instrument Transformer

หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดอุปกรณ์ เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับแปลงระดับกระแสไฟฟ้าสูง และแรงดันไฟฟ้าสูงให้มีค่าต่ำ เพื่อใช้กับเครื่องมือและอุปกรณ์ควบคุม เช่น instrument potential transformer และ instrument current transformer

- **Potential transformer** หมายถึง หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าสูงให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำ สำหรับใช้ในอุปกรณ์ เครื่องวัด , relay และอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ เรียกชื่อย่อว่า “PT” โดยขดลวด primary จะถูกต่อคร่อมกับค่า voltage ที่มันจะวัด และขด secondary ของมันถูกต่อเข้ากับ voltmeter หรือ relay ที่มี impedance สูง

- **Current transformer** หมายถึง หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสำหรับใช้ร่วมกับอุปกรณ์เครื่องวัดและอุปกรณ์ป้องกัน เรียกชื่อย่อว่า “CT” โดยด้าน primary จะถูกต่ออนุกรมกับวงจร load และด้าน secondary จะถูกต่อกับอุปกรณ์ หรือ relay ซึ่งเรียกว่า “เบอร์เดน” (burden)



รูปที่ 3-12 Current transformer ; (a) window type ; (b) circuit conection

## SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING

$$I_{tr} = I_{LS} - I_{HS}$$

$$S_{cond} = V_{LS} \cdot I_{HS}$$

$$S_{tr} = I_{tr} \cdot V_{LS}$$

$$S_{load} = V_{LS} \cdot I_{LS}$$

$$S_{load} = S_{cond} + S_{tr}$$

$$S_{at} = (a + 1) \cdot S_{2w}$$

$$I_{circulating} = (E_A - E_B) / (Z_A + Z_B)$$

### Three-phase connections

Wye connected ;  $V_{line} = \sqrt{3} V_{phase}$   $\Leftrightarrow$   $I_{line} = I_{phase}$

Delta connected ;  $V_{line} = V_{phase}$   $\Leftrightarrow$   $I_{line} = \sqrt{3} I_{phase}$

Transformer ratio =  $V_{phase} \text{ (primary)} / V_{phase} \text{ (secondary)}$

Bank ratio =  $V_{line} \text{ (primary)} / V_{line} \text{ (secondary)}$

---

## บทที่ 4

# เครื่องกลไฟฟ้าสามเฟสแบบเหนี่ยวนำ (Three-phase Induction Machines)

### 4-1. บทนำ

Induction machines เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่

Induction machines ประกอบด้วย

- 0. Induction motor (มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ)
- 0. Induction generator (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ)
- 0. Induction frequency converter (เครื่องแปลงความถี่แบบเหนี่ยวนำ)
- 0. Induction phase converter (เครื่องแปลงเฟสแบบเหนี่ยวนำ)
- 0. Electromagnetic slip coupling (สลিপคู่ควบที่เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า)

### 4-2. Induction motor action (ปฏิบัติการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ)

หลักการทำงานพื้นฐานของ induction motor จะใช้วิธีการถ่ายเทพลังงานจากส่วนที่อยู่กับที่ (stator)

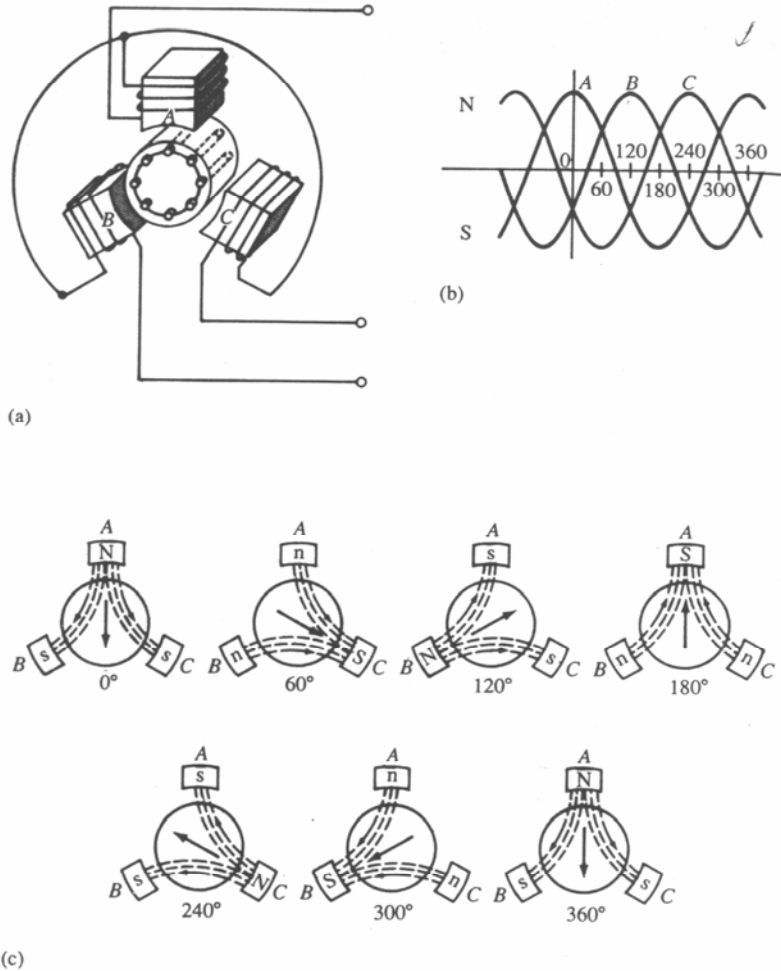
ไปยังส่วนที่หมุน (rotor) กล่าวคือ เมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับเข้าที่ขดลวด stator จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นภายใน stator และเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ rotor และเมื่อ rotor

ถูกต่อให้ครบวงจร จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าใน rotor ซึ่งผลลัพธ์ที่เป็นการกระทำร่วมกันของการเหนี่ยวนำจากกระแสไฟฟ้าของ rotor กับสนามแม่เหล็กหมุนของ stator จะสร้างแรงบิด (torque) ทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน

จากรูปที่ 4-1 แสดงมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส แบบพื้นฐาน ซึ่งตัว stator จะประกอบด้วยขดลวดจำนวน 3 ขด พันอยู่บนแท่งแกนเหล็ก วางห่างจากกันเป็นมุม  $120^\circ$  ไฟฟ้า และขดลวดทั้งสามจะต่อแบบ Wye-connected และนำด้านต้นของขดลวดต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าระบบ 3 เฟส

เมื่อขดลวด stator ถูกจ่ายไฟจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดแต่ละเฟส จะเกิดในเวลาที่แตกต่างกันและมีค่าสูงสุด (maximum) ในเวลาที่ต่างกันด้วย เนื่องจากขดลวดแต่ละขดวางทำมุมห่างกัน  $120^\circ$  ไฟฟ้า ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเกิดตามค่ากระแสไฟฟ้าเป็นมุม  $120^\circ$  ด้วย ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสที่ขดลวด stator ได้รับ ทำให้เกิดผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปด้วย นั่นคือ ตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปตามสนามแม่เหล็กหมุน

“สนามแม่เหล็กหมุน” ไม่ได้หมายความว่า เส้นแรงของสนามแม่เหล็กหมุนไปรอบตัวนำ แต่หมายถึง เส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ของทุก phase หมุนอยู่ภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้น ๆ และความเร็วของ สนามแม่เหล็กหมุน เรียกว่า “**synchronous speed**”



รูปที่ 4-1 (a) Elementary 3-phase induction motor; (b) 3-phase flux waves; (c)instantaneous direction of resultant stator flux

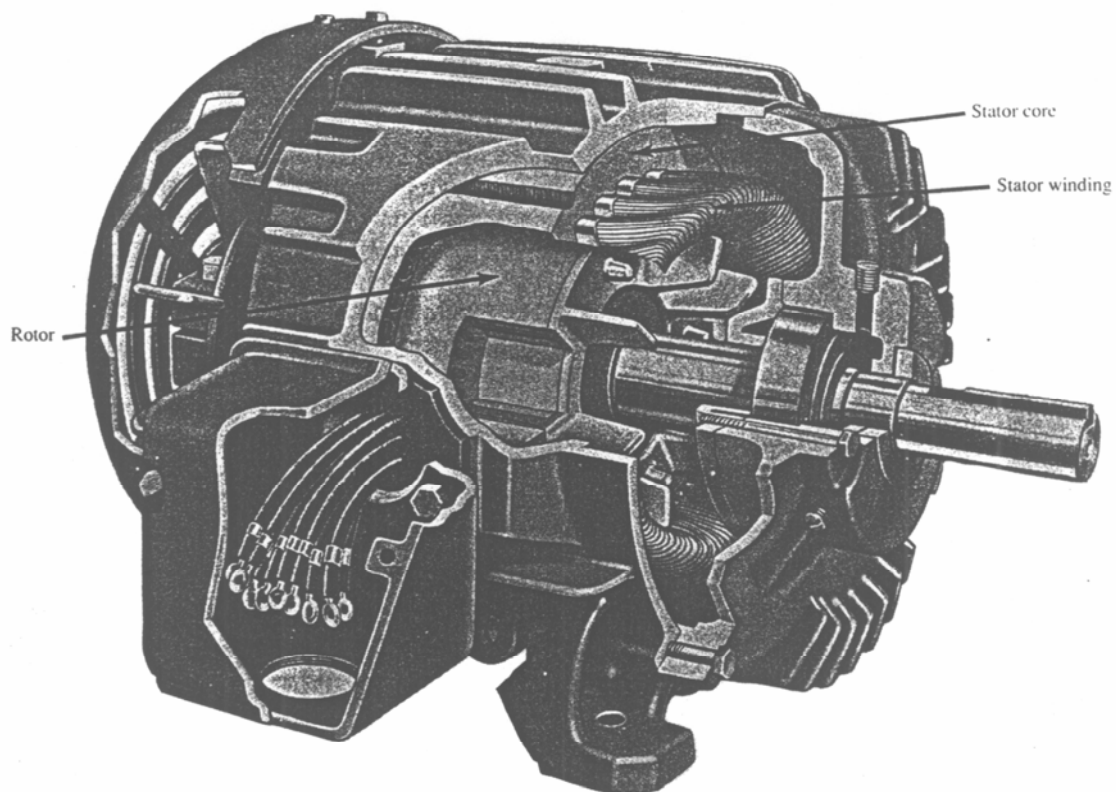
- จากรูปที่ 4-1 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟส เข้าที่ขดลวด stator จะได้เส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ดังนี้
- ที่ตำแหน่ง  $0^\circ$  Phase A จะมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงสุดอยู่ที่ขั้วเหนือ (N) ของ Phase A ส่วน phase B และ phase C ขั้วแม่เหล็กจะเป็นขั้วใต้ (S)
  - ที่ตำแหน่ง  $120^\circ$  Phase B จะมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงสุดอยู่ที่ขั้ว (N) ของ phase B ส่วน phase A และ phase C ขั้วแม่เหล็กจะเป็นขั้วใต้ (S)
  - ที่ตำแหน่ง  $240^\circ$  Phase C จะมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงสุดอยู่ที่ขั้ว (N) ของ phase C ส่วน phase A และ phase B ขั้วแม่เหล็กจะเป็นขั้วใต้ (S)

■ ที่ตำแหน่ง  $360^\circ$  เป็นตำแหน่งที่เส้นแรงแม่เหล็กหมุนครบ 1 รอบ ดังนั้นจะกลับมาที่ Phase A ใหม่อีกครั้ง ทำให้ phase A มีเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดอยู่ที่ขั้วเหนือ (N) ส่วน phase B และ phase C ขั้วแม่เหล็กจะเป็นขั้วใต้ (S) และจะทำงานในลักษณะดังที่กล่าวมาแล้วไปเรื่อย ๆ

### 4-3. โครงสร้างของ Induction motor

โครงสร้างของ induction motor จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ

1. Stator เป็นส่วนที่อยู่กับที่
2. Rotor เป็นส่วนที่หมุนเคลื่อนที่



induction motor

- **Stator**

แท่งเหล็ก stator ประกอบด้วยแผ่นเหล็กอัลลอยผสมซิลิกอน (silicon-ally sheet steel) นำมาแบ่งเป็นแผ่นบาง ๆ แล้วตอกยึดติดกัน (lamination) การใช้สารซิลิกอนเพื่อลดการสูญเสีย hysteresis losses และการ lamination โดยการเคลือบ oxide หรือวานิช เพื่อลดการสูญเสีย eddy current losses

ขดลวดที่พันบนแท่งเหล็ก stator เป็นขดลวดที่หุ้มด้วยฉนวนและวางอยู่ในร่อง slot ของ stator โดย

ขดลวดที่พันจะวางซ้อนทับกันและถูกต่อเป็นแบบอนุกรมหรือขนาน และถูกจัดเป็นกลุ่ม 3 เฟส แล้วนำมาต่อเป็นแบบ wye-connected หรือ delta-connected ซึ่งขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน

## ● Rotor

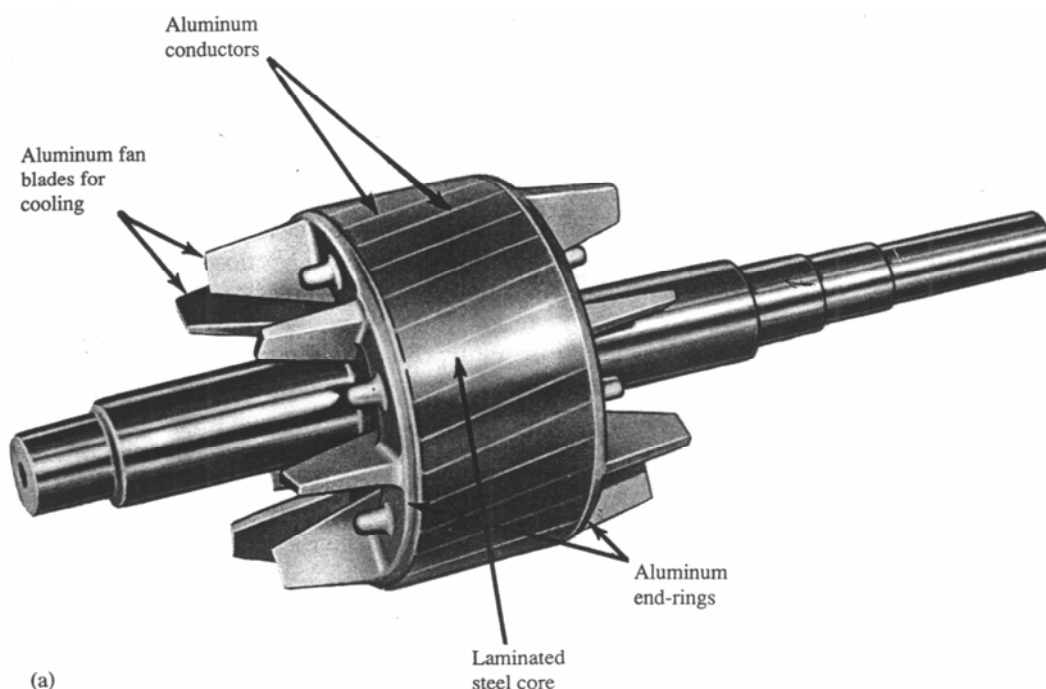
Rotor ที่เป็นแบบพื้นฐานมี 2 แบบ คือ squirrel cage rotor และ wound rotor

### 0. squirrel cage rotor (โรเตอร์แบบกรงกระรอก)

squirrel cage rotor จะมีลักษณะคล้ายกับกรงกระรอก ซึ่งเป็นแบบที่ไม่ต้องการวงแหวน (slip ring) ติดอยู่ที่ตัว rotor squirrel cage rotor จะใช้แท่งเหล็กที่มีร่องทำมาจากเหล็กที่ lamination และมีตัวนำซึ่งเป็นอลูมิเนียมหล่ออยู่ภายในและจะถูกลัดวงจรที่ปลายทั้งสองด้าน

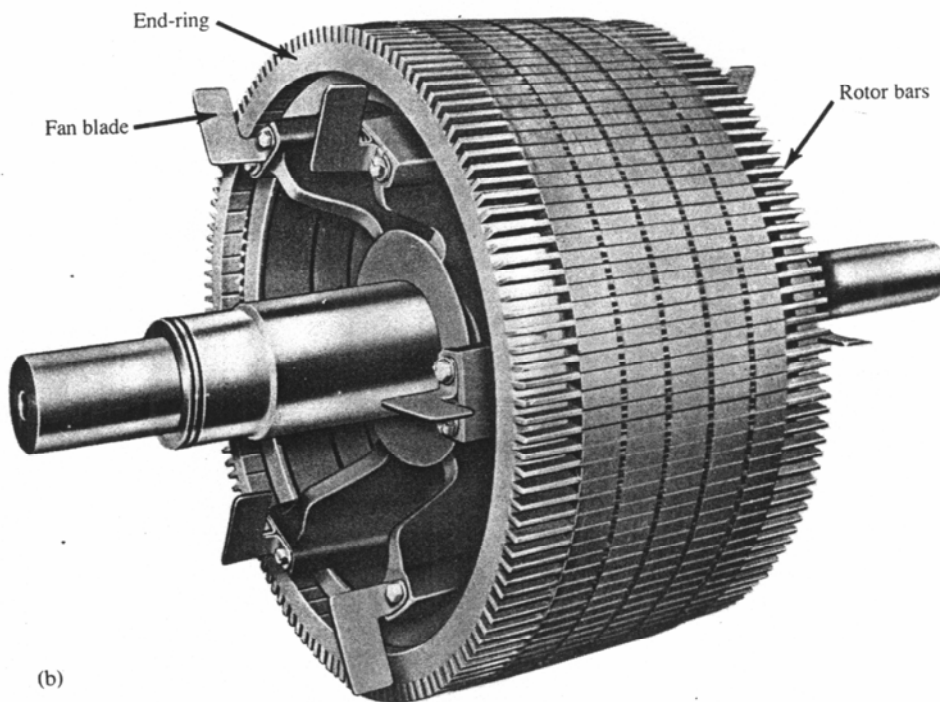
■ rotor แบบ squirrel cage ขนาดเล็ก จะใช้แท่งเหล็กที่มีร่องทำมาจากเหล็กที่ lamination และมี

อลูมิเนียมหลอมอยู่ภายในซึ่งหล่อให้เป็นตัวนำ และตัวนำอลูมิเนียมจะถูกลัดวงจรที่ปลายทั้งสองด้าน และมีใบพัดลมแบบ aluminum fan เพื่อใช้ในการระบายอากาศขณะที่ rotor หมุน ตามที่แสดงในรูปที่ 4-3 (a)



รูปที่ 4-3 Squirrel cage rotor : (a) cast-aluminum conductors.

■ rotor แบบ squirrel cage ขนาดใหญ่ จะใช้รางทองเหลือง (brass bars) และวงแหวนปลายสุดจะเป็นทองเหลือง ซึ่งถูกหลอมเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอก ตามที่แสดงในรูปที่ 4-3 (b)



รูปที่ 4-3 Squirrel cage rotor : (b) brazed conductors and end-rings.

squirrel cage rotor จะมีแรงบิดเริ่มแรกต่ำ (low starting torque) และตัวนำที่ฝังลงในร่อง slot



จะเหนี่ยวนำกับแกนของ rotor ซึ่งจะเป็นผลทำให้ motor วิ่งได้เร็วขึ้น และลดเสียงหึ่งของ สนามแม่เหล็ก (magnetic hum)

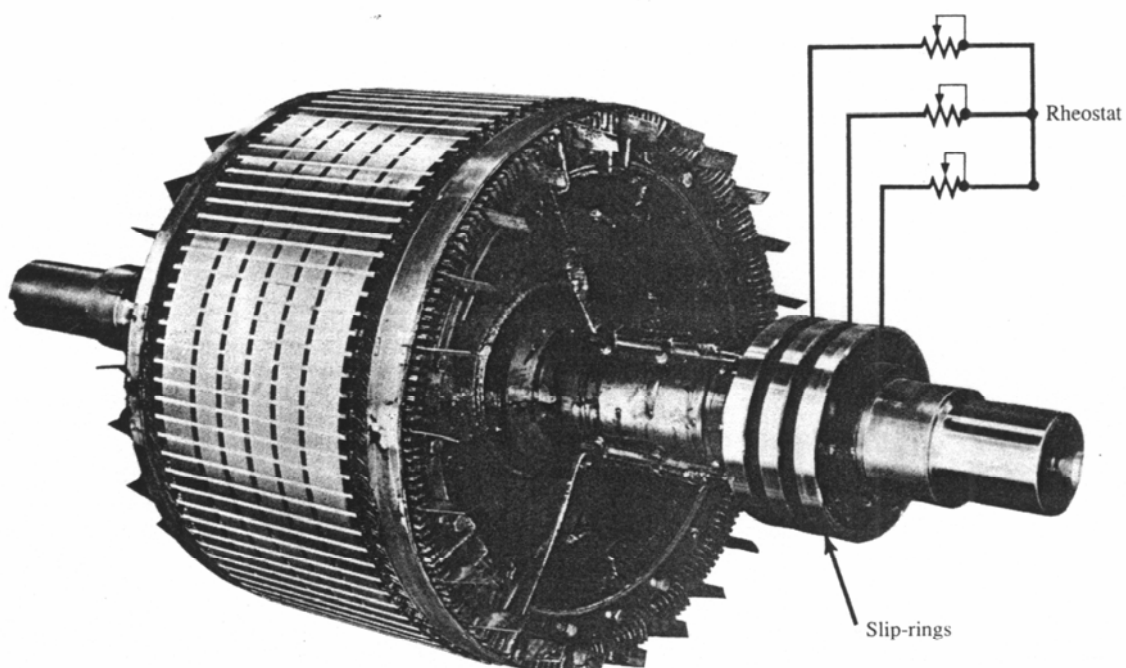
## 0 Wound rotor

Wound rotor เป็น rotor ที่มีขดลวดหุ้มฉนวนพันลงในร่อง slot และขดลวด 3 เฟส จะถูกต่อแบบ wye-connected แล้วนำไปต่อเข้ากับ slip ring, แปรงถ่าน (carbon brushes) และ rheostat โดยตัว

rheostat 3 เฟส จะประกอบด้วย rheostat 3 ตัว ต่อแบบ wye-connected และมีคันโยกร่วม (common lever)

เพื่อใช้ปรับแกนของ rheostat ทั้ง 3 ตัว ให้ทำงานพร้อมกัน การเลื่อน rheostat ไปตำแหน่งที่ค่าความต้านทานเท่ากับศูนย์ (zero) ซึ่งอยู่ทางซ้ายสุด จะตัดค่าความต้านทานออกจากวงจร และจะเปรียบเสมือนเป็น

เป็นมอเตอร์ชนิด squirrel cage rotor สำหรับ rheostat จะถูกใช้เพื่อปรับแรงบิดเริ่ม start และ running speed



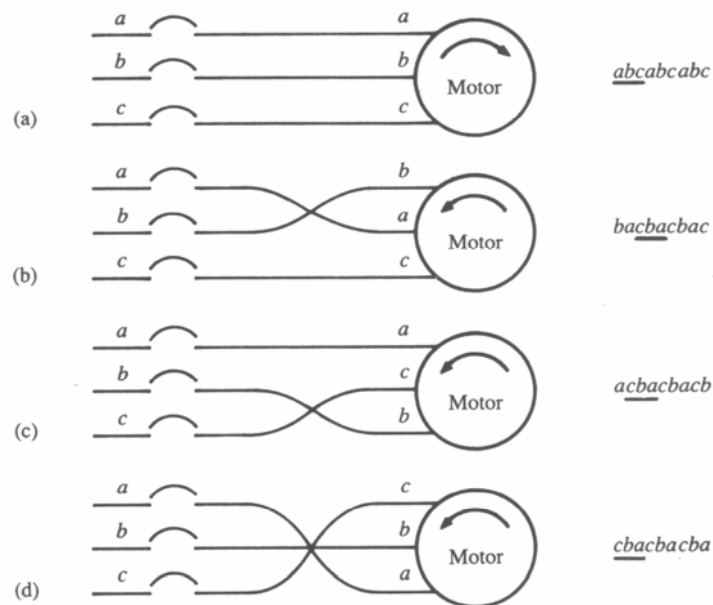
รูปที่ 4-4 Wound-rotor induction motor showing rheostat connections.

การถ่ายพลังงานจาก stator ไปยัง rotor ไม่ว่าจะเป็นแบบ squirrel cage rotor หรือ wound rotor ทำได้โดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และจะเกิดในลักษณะเช่นเดียวกับ หม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยเหตุ

นี้ตัว stator จึงเปรียบเสมือนขดลวด primary ของหม้อแปลงไฟฟ้า และตัว rotor เปรียบเสมือนขดลวด secondary ของหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากพลังงานที่ใช้ทำงานเป็นการถ่ายเท สนามแม่เหล็กไฟฟ้าข้ามช่องว่าง air gap ระหว่าง stator กับ rotor ซึ่งช่องว่าง air gap นี้ จะมีขนาดเล็กมากจนนับได้ว่ามีค่า reactance น้อยมาก

#### 4-4. Reversal of rotation (การกลับทิศทางการหมุน)

ทิศทางการหมุนของ Induction motor ขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของเส้นแรงแม่เหล็ก ของ stator ดังนั้นการกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์จะต้องกลับลำดับเฟสของแหล่งจ่ายไฟ โดยการ สลับสายของแหล่งจ่ายไฟจำนวน 1 คู่ คือ สาย 2 สาย ใน 3 สาย จะทำให้กลับลำดับของเฟส และ มอเตอร์ 3 เฟส จะกลับทิศทางการหมุน



รูปที่ 4-5 Reversing the phase sequence by interchanging any two line leads.

จากรูปที่ 4-5 (a) ลำดับเฟสของแหล่งจ่ายไฟให้มอเตอร์คือ **abc** ทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (CW)

จากรูปที่ 4-5 (b), (c) และ (d) เมื่อทำการสลับสาย 1 คู่ คือสาย 2 สาย ใน 3 สาย จะทำให้ลำดับเฟสของแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้มอเตอร์เปลี่ยนไปเป็น **cba** จึงทำให้มอเตอร์กลับทิศทางการหมุนเป็นการหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (CCW)

## 4-5. Synchronous speed

Synchronous speed คือ ความเร็วการหมุนของเส้นแรงแม่เหล็ก (speed of rotating flux) ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ (f) ของ voltage ที่จ่ายให้กับ stator และเป็นส่วนกลับกับจำนวนคู่ของขั้ว (P/2) ที่สร้างในขดลวด stator ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

วินาที)	$n_s = (f_s) / (P/2) = (2 f_s) / P$	(rps : รอบต่อ
(rpm : รอบต่อนาที)	$n_s = (120 f_s) / P$	_____

เมื่อ :

$n_s$  = synchronous speed (rps หรือ rpm)

$f_s$  = frequency of the 3-phase supply (Hz)

P = number of pole of the stator winding (pole : P)

2 = poles only occur in pairs

**Example 4-1** Determine the synchronous speed of a six-pole, 460 V, 60 Hz induction motor if the frequency is reduced to 85 percent of its rated value.

**Solution**

จากสมการ

$$n_s = (120 f_s) / P$$

$$= 120 (60 \times 0.85) / 6$$

$$= 1020 \text{ r/min}$$

**Ans**

-----

**4-6. Slip และผลกระทบต่อความถี่และ Voltage บน Rotor (Slip and its effect on rotor frequency and voltage)**

Slip speed (ความเร็วสลลิป) คือ ความแตกต่างระหว่างความเร็วของเส้นแรงแม่เหล็กหรือสนามแม่

เหล็กหมุน (synchronous speed) กับความเร็วของ rotor (rotor speed)

4.2

$$n = n_s - n_r$$

Slip (สลลิป) คือ อัตราส่วนของ slip speed ต่อ synchronous speed หรือความแตกต่างระหว่าง synchronous speed กับ rotor speed ต่อ synchronous speed นั่นคือ

4.3

$$S = n / n_s = (n_s - n_r) / n_s$$

เมื่อ :  $n$  = slip speed (r/min : รอบ/นาที)

$n_s$  = synchronous speed (r/min : รอบ/นาที)

$n_r$  = rotor speed (r/min : รอบ/นาที)

$S$  = slip (PU = เปอรเซ็นต์)

■ ค่า slip จะขึ้นอยู่กับภาระมี load ทางกลต่ออยู่กับเพลารอง rotor ถ้าเราเพิ่ม load จะทำให้ความเร็วของ rotor ลดลง และเมื่อเราเพิ่ม load มากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง rotor ถูกทำให้หยุดหมุนด้วยการ brake ที่เราเรียกว่า “blocked rotor” หรือ “locked rotor” นั่นคือ  $n_r = 0$  ทำให้ค่า slip = 1 ดังนั้นจากสมการที่ 4.3 จะได้

$$1) \quad \boxed{4.4} \quad S = (n_s - n_r) / n_s = (n_s - 0) / n_s = 1 \quad (S = 1)$$

■ ถ้าเราปล่อย brake จะทำให้ rotor เริ่มหมุนและจะเร่งความเร็วขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นค่า slip จะค่อยๆ ลดลงจาก 1 ไปเรื่อยๆ ตามความเร็วของ rotor ที่เพิ่มขึ้น และค่า slip จะลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งเราสามารถ

หาความเร็วของ rotor ได้จากสมการ

$$= 1 \rightarrow 0) \quad \boxed{4.5} \quad n_r = n_s (1 - S) \quad (S = 1 \rightarrow 0)$$

■ ถ้า load ทางกลทั้งหมดถูกปลดออกจากแกนของ rotor (no shaft load) จะทำให้ความเร็วของ rotor เท่ากับความเร็วของ synchronous speed นั่นคือ ค่า slip = 0

$$(S = 0) \quad \boxed{4.6} \quad n_r = n_s \quad (S = 0)$$

### ● ผลกระทบของ Slip ต่อความถี่บน Rotor

ความถี่ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำใน rotor โดยสนามแม่เหล็กหมุนของ stator หาได้จากสมการ

$$4.7 \quad \boxed{4.7} \quad f_r = (P \cdot n) / 120$$

เมื่อ :

$$f_r = \text{ความถี่ของ rotor (Hz)}$$

$P$  = จำนวน pole

$n$  = slip speed (รอบ/นาที)

แทนค่า  $n = n_s - n_r$  จากสมการที่ 4.2 ลงในสมการที่ 4.7 จะได้

$$f_r = \frac{P(n_s - n_r)}{120}$$

4.8

และแทนค่า  $S = (n_s - n_r) / n_s \Rightarrow n_s - n_r = S \cdot n_s$  จากสมการที่ 4.3 ลงในสมการที่ 4.8 จะได้

$$f_r = \frac{P(S \cdot n_s)}{120} = \frac{(S \cdot P \cdot n_s)}{120}$$

4.9

ถ้า rotor ถูกทำให้หยุดหมุน (blocked rotor) โดย load ทางกล จะได้ค่า slip = 1 ดังนั้นสมการที่ 4.9 จะได้

$$f_{BR} = \frac{P \cdot n_s}{120}$$

4.10

$f_{BR}$  = ความถี่ของ voltage ที่จ่ายออกมาจาก stator เมื่อ rotor ถูกทำให้หยุดหมุน

เมื่อแทนค่า  $f_{BR} = P \cdot n_s / 120$  จากสมการที่ 4.10 ลงในสมการที่ 4.9 จะได้ผลลัพธ์ที่แสดงออกในรูปทั่วไปของความถี่ rotor และในรูปของ slip นั่นคือ

$$f_r = S f_{BR}$$

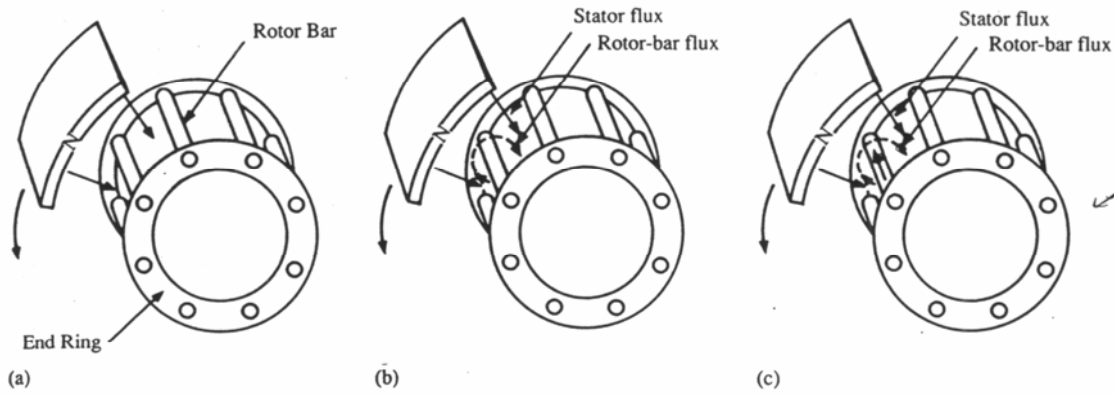
4.11

เมื่อ rotor ถูกทำให้หยุดนั้น จะไม่มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่าง rotor กับ stator ดังนั้นค่า slip = 1 และความถี่ของ rotor จะเท่ากับความถี่ของ stator นั่นคือ

$$f_{BR} = f_{stator}$$

4.12

- ผลกระทบของ Slip ต่อ Voltage บน Rotor



รูปที่ 4-6 (a) Rotating field sweeping a rotor bar; (b) direction of flux generated around rotor bar;  
 (c) direction of rotor bar current

จากรูปที่ 4-6 Voltage ที่กำเนิดใน rotor loop ที่สร้างโดยรางของ rotor 2 อัน และส่วนที่ปิดท้าย ขณะที่มันถูกกวาดโดยเส้นแรงแม่เหล็กหมุนของ stator จะถูกกำหนดได้จากสมการ

$$E_r = 4.44 N f_r \Phi_{\max}$$

4.13

แทนค่า  $f_r = S f_{BR}$  จากสมการที่ 4.11 ลงในสมการที่ 4.13 จะได้

$$E_r = 4.44 N S f_{BR} \Phi_{\max}$$

4.14

ขณะที่ rotor ถูกทำให้หยุดหมุน (blocked rotor) จะได้ค่า slip = 1 ดังนั้นจากสมการที่ 4.14 จะได้

$$E_{BR} = 4.44 N f_{BR} \Phi_{\max}$$

(S = 1)

4.15

แทนค่า  $4.44 N f_{BR} \Phi_{\max} = E_{BR}$  จากสมการที่ 4.15 ลงในสมการที่ 4.14 จะได้

$$E_r = S E_{BR}$$

4.16

จากสมการที่ 4.16 เป็นการแสดงค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำใน rotor loop ขณะที่ความเร็วใด ๆ ใน terms ของ blocked-rotor voltage และ slip

- สรุป

■ Synchronous speed ( $n_s$ ) คือ ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน

นาฬิกา) 
$$n_s = (120 f_s) / P$$
 (r/min : รอบต่อ

■ Slip speed ( $n$ ) คือ ความแตกต่างระหว่าง Synchronous speed กับ rotor speed

(r/min : รอบต่อนาที) 
$$n = n_s - n_r$$

■ Slip ( $S$ ) คือ อัตราส่วนของ slip speed ต่อ synchronous speed หรือ ความแตกต่างระหว่าง synchronous speed กับ rotor speed ต่อ synchronous speed

$$S = (n_s - n_r) / n_s$$

■ ค่า slip จะขึ้นอยู่กับ load ทางกลที่ต่ออยู่กับเพลลาของ rotor ถ้าเราเพิ่ม load ทางกลมากจนกระทั่งทำให้ rotor หยุดหมุนด้วยการ brake (blocked rotor หรือ locked rotor) จะทำให้ rotor speed ( $n_r$ ) = 0 ดังนั้น ค่า slip = 1 ( $S = 1$ )

rotor หยุดหมุน) 
$$S = (n_s - n_r) / n_s = (n_s - 0) / n_s = 1$$
 (เมื่อ



■ ถ้าเราปล่อย **brake** จะทำให้ **rotor** เริ่มหมุนและจะเร่งความเร็วขึ้นเรื่อย ๆ ค่า **slip** จะค่อย ๆ ลดลงจาก 1 ไปเรื่อย ๆ ตามความเร็วของ **rotor** ที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งค่า **slip** เข้าใกล้ศูนย์ ( $S = 1 \rightarrow 0$ ) ดังนั้นความเร็วของ **rotor** จะได้

เริ่มหมุนและเร่งความเร็วขึ้น) 
$$\boxed{n_r} = n_s (1 - S) \quad (\text{เมื่อ rotor})$$

■ ถ้า **load** ทางกลทั้งหมดถูกปลดออกจากแกนของ **rotor** (no shaft load) จะทำให้ความเร็วของ **rotor** เท่ากับความเร็วของ **synchronous speed** นั่นคือ ค่า **slip** = 0 ( $S = 0$ )

load ออก) 
$$\boxed{n_r} = n_s \quad (\text{เมื่อปลด})$$

■ ผลกระทบของ **slip** ต่อความถี่ของ **rotor**

$$\boxed{f_r} = S f_{BR}$$

■ ถ้า **rotor** หยุดหมุน (blocked rotor) จะได้

$$\boxed{f_{BR} = f_{stator}}$$

■ ผลกระทบของ **slip** ต่อ **voltage** ของ **rotor**

$$\boxed{E_r} = S E_{BR}$$

**Example 4-2** The frequency and induced voltage in the rotor of a certain six-pole wound rotor induction motor, whose shaft is blocked, are 60 Hz and 100 V, respectively. Determine the corresponding values when the rotor is running at 1100 r/min

**Solution** หาค่า synchronous speed

จากสมการ  $n_s = (120 f_s) / P$  (ขณะ blocked rotor ค่า

$f_{BR} = f_{stator}$ )

$$= (120 \times 60) / 6$$

$$= 1200 \text{ r/min}$$

หาค่า slip เมื่อความเร็วของ rotor = 1100 r/min

จากสมการ  $S = (n_s - n_r) / n_s = (1200 - 1100) / 1200$

$$= 0.083$$

ดังนั้น

$$f_r = S f_{BR} = (0.083 \times 60)$$

$$= 4.98 \text{ Hz}$$

**Ans**

และ  $E_r = S E_{BR} = (0.083 \times 100)$

$$= 8.33 \text{ V}$$

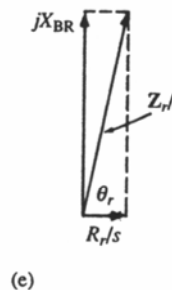
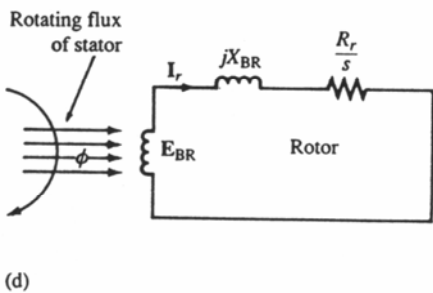
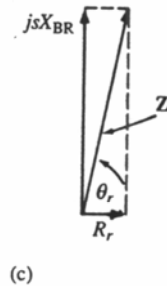
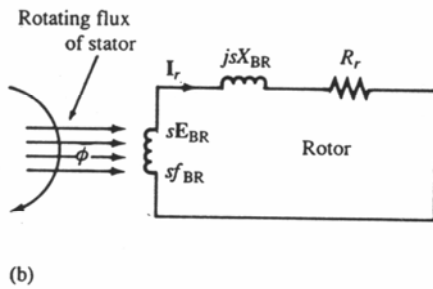
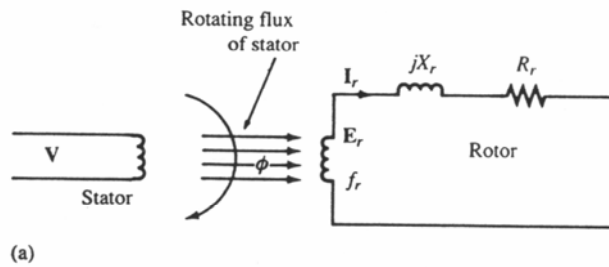
**Ans**

-----

## 4-7. Equivalent Circuit ของ Induction Motor

Induction motor อาศัยหลักการถ่ายเทพลังงานจาก stator ไปยัง rotor โดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ไฟฟ้า ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานเหมือนหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้น stator จะเหมือนกับขดลวด primary ของหม้อแปลงไฟฟ้า และ rotor จะเหมือนกับขดลวด secondary ของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะฉะนั้นวงจรสมมูลของ induction motor จึงคล้ายกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า



for a

or diagram

otor

จากรูปวงจรสมมูลของ induction motor แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของ rotor ( $E_r$ ) จะถูกจ่ายออกมาที่ความถี่  $f_r$  โดยเส้นแรงแม่เหล็กหมุนของ stator สำหรับค่าความต้านทานของ rotor ( $R_r$ ) จะขึ้นอยู่กับความยาวของพื้นที่หน้าตัด และความสามารถในการต้านและผลจากผิวพื้นของตัวนำของ rotor (skin effect) ส่วนค่า inductive reactance ของ

rotor ( $X_r$ ) เรียกว่า Leakage reactance ซึ่งจะเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่ว (leakage flux)

ค่า reactance ที่รั่วใน rotor แสดงได้ในรูปของความถี่ของ rotor คือ

$$4.17 \quad \boxed{X_r} = 2 \pi f_r L_r \text{ -----}$$

ค่าความถี่ของ rotor ( $f_r$ ) ในรูปของ slip และความถี่ที่จ่ายจาก stator ขณะ rotor ถูกทำให้หยุดหมุน คือ

$f_r = S f_{BR}$  เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.17 จะได้

$$4.18 \quad X_r = 2 \pi (S f_{BR}) L_r = S (2 \pi f_{BR} L_r)$$

แต่ค่า  $(2 \pi f_{BR} L_r) = X_{BR}$  เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.18 จะได้

$$4.19 \quad \boxed{X_r = S X_{BR}} \text{ -----}$$

จากวงจรสมมูล ค่า impedance ของ rotor คือ

$$4.20 \quad Z_r = R_r + j X_r \text{ -----}$$

แทนค่า  $X_r = S X_{BR}$  จากสมการที่ 4.19 ลงในสมการที่ 4.20 จะได้

$$4.21 \quad Z_r = R_r + j S X_{BR} \text{ -----}$$

จากรูปที่ 4.7 (b) เมื่อใช้กฎของ ohm's law กับวงจร rotor เพื่อหาค่ากระแส  $I_r$  จะได้

$$4.22 \quad I_r = S E_{BR} / Z_r = S E_{BR} / (R_r + j S X_{BR})$$

จากสมการที่ 4.22 เมื่อนำค่า slip (S) หารทั้งเศษและส่วน จะได้

$$4.23 \quad I_r = E_{BR} / (Z_r / S) = E_{BR} / (R_r / S + j X_{BR})$$

จากรูปที่ 4.7 (c) ค่ากระแสของ rotor ( $I_r$ ) ในรูปของขนาด magnitude และมุมเฟส คือ

$$I_r = E_{BR} \angle 0^\circ / (Z_r / S) \quad \text{or} \quad \angle \equiv [E_{BR} / (Z_r / S)] - \theta_r$$

or

ดังนั้นเราจะได้อ่านขนาดของกระแสใน rotor คือ

$$4.24 \quad \boxed{I_r = E_{BR} / (Z_r / S)}$$

ค่า impedance rotor และมุม  $\theta_r$  ในรูปองค์ประกอบของ resistance (R) และ reactance (x) จาก phasor diagram ในรูปที่ 4-7 (e) จะได้อ่านค่ากระแสของ rotor คือ

$$4.25 \quad \boxed{I_r = E_{BR} / \sqrt{(R_r / S)^2 + (X_{BR})^2}}$$

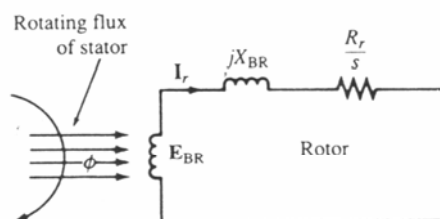
และ

$$4.26 \quad \boxed{\theta_r = \tan^{-1} [X_{BR} / (R_r / S)]}$$

$\theta_r =$  rotor impedance angle

### 4-8. Air-gap power

Air-gap power คือ กำลังงานของการส่งผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าข้ามช่องว่างระหว่าง stator กับ rotor



(d)

จากรูปที่ 4-7 (d) air-gap power ต่อเฟส ในรูปของ complex คือ

$$S_{\text{gap}} = \underline{E_{\text{BR}}} \cdot \underline{I_{\text{r}}}^*$$

4.27

เมื่อ :  $E_{\text{BR}} \angle E_{\text{BR}} \ 0^\circ \quad \underline{I_{\text{r}}} = I_{\text{r}} \angle -\theta_{\text{r}}$

แทนค่า  $E_{\text{BR}}$  และ conjugate กระแส  $I_{\text{r}}$  ลงในสมการที่ 4.27 จะได้

$$\underline{S}_{\text{gap}} \angle \underline{=} (E_{\text{BR}} \ 0^\circ) (I_{\text{r}} \angle -\theta_{\text{r}})^*$$

$$\underline{S}_{\text{gap}} \angle \underline{=} (E_{\text{BR}} \ 0^\circ) (I_{\text{r}} \angle \theta_{\text{r}})$$

$$\underline{S}_{\text{gap}} = E_{\text{BR}} I_{\text{r}} \angle \theta_{\text{r}}$$

VA

4.28

แปลงจากรูป polar form เป็น rectangular form จะได้

$$S_{\text{gap}} = E_{\text{BR}} I_{\text{r}} \cos \theta_{\text{r}} + j E_{\text{BR}} I_{\text{r}} \sin \theta_{\text{r}}$$

sin  $\theta_{\text{r}}$

ดังนั้นองค์ประกอบของ air-gap power ในรูปของ active power และ reactive power คือ

W 
$$P_{\text{gap}} = E_{\text{BR}} I_{\text{r}} \cos \theta_{\text{r}}$$
 4.29

และ 
$$Q_{\text{gap}} = E_{\text{BR}} I_{\text{r}} \sin \theta_{\text{r}}$$

VAR

4.30

เมื่อ :  $S_{\text{gap}} =$  apparent air-gap power (VA)

$P_{\text{gap}} =$  active air-gap power (W)

$Q_{\text{gap}} =$  reactive air-gap power (VAR)

$E_{\text{BR}} =$  blocked rotor voltage (V)

$I_{\text{r}} =$  magnitude of rotor current (A)

$\theta_{\text{r}} =$  rotor impedance angle

$\cos \theta_{\text{r}} =$  power factor of rotor

## 4-9. Mechanical power and Developed Torque

- **Mechanical power** (กำลังงานทางกล)

กำลังงานที่ถูกถ่ายข้ามช่องว่าง air-gap จาก stator ไปยัง rotor ส่วนใหญ่เป็นกำลังงานทางไฟฟ้า และเมื่อส่งไปยัง rotor จะเกิดการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าในรูปของกำลังความร้อน ( $I^2R$ ) ในตัวนำ rotor (rotor conductor losses:  $P_{rc1}$ ) และกำลังงานส่วนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังงานทางกล ( $P_{mech}$ ) ที่เพลาของ rotor ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

(W) เมื่อ :

$$\boxed{4.31 \quad P_{gap}} = P_{mech} + P_{rc1}$$

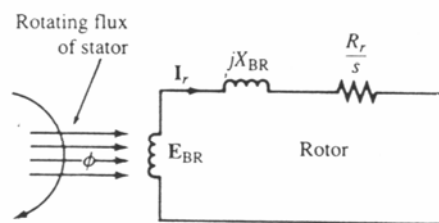
$P_{gap}$  = air-gap power (W)

$P_{mech}$  = mechanical power (W)

$P_{rc1}$  = rotor conductor losses (W)

$P_{rc1}$  = rotor conductor losses คือ การสูญเสียในรูปของความร้อนของขดลวดตัวนำใน rotor นั่นคือ

$$P_{rc1} = I_r^2 R_r \quad (W)$$



(d)

จากรูปวงจรสมมูลของ rotor ระบบ 1 เฟส แสดงให้เห็นการส่งถ่ายกำลังงานไฟฟ้าข้ามช่องว่าง air-gap จาก stator ไปยัง rotor และไม่มีกรรมวิธีที่จะสร้างกำลังงานทางกลเลย ซึ่งความจริงกำลังงานในช่องว่าง air-gap ( $P_{gap}$ ) ทั้งหมดจะถูกแยกสลายไปในรูปการสูญเสียความร้อนของค่าความต้านทาน คือ  $R_r/S$  โดย reactance ( $X_{BR}$ ) จะไม่ดึงกำลังงาน active power นั่นคือ กำลังงานช่องว่างทั้งหมดจะถูกส่งไปยัง rotor ในรูปของการสูญเสียพลังงานความร้อนที่ค่าความต้านทาน และรูปของ slip คือ

(W) 4.32

$$P_{gap} = (I_r^2 R_r) / S$$

ดังนั้นระบบไฟฟ้า 3 เฟส จะได้

$$P_{gap} = (3 I_r^2 R_r) / S \quad \text{---(W)}$$

4.33

กำลังความร้อนที่ถูกใช้ไปในวงจรสมมูลค่าความต้านทานของ rotor ( $R_r/S$ ) อย่างไรก็ตาม ความต้านทานจริงของ rotor คือ  $R_r$  นั่นคือ กำลังงานความร้อนที่ถูกใช้ไปจริงในตัวนำของ rotor จริง ๆ สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส จะเป็น

$$P_{rc1} = 3 I_r^2 R_r \quad \text{(W) ---}$$

4.34

แทนค่า  $P_{rc1} = 3 I_r^2 R_r$  จากสมการที่ 4.34 ลงในสมการ 4.33 จะได้

$$\boxed{4.35} \quad P_{gap} = P_{rc1} / S \quad \text{---}$$

และแทนค่า  $P_{gap} = (3 I_r^2 R_r) / S$  จากสมการที่ 4.33 และ  $P_{rc1} = 3 I_r^2 R_r$  จากสมการที่ 4.34 ลงใน

สมการที่ 4.31 เพื่อหา  $P_{mech}$  จะได้

$$\begin{aligned} (3 I_r^2 R_r) / S &= P_{mech} + 3 I_r^2 R_r \\ P_{mech} &= [3 I_r^2 R_r (1 - S)] / S \end{aligned}$$

(W)

4.36

แต่  $(3 I_r^2 R_r) / S = P_{gap}$  เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.36 จะได้

$$\boxed{P_{mech} = P_{gap} (1 - S)} \quad \text{(W) ---}$$

4.37

### • Developed Torque (แรงบิดที่สร้างขึ้นมา)

ความเร็วของ rotor เราหาได้จากสมการ

$$n_r = n_s (1 - S)$$

ดังนั้น

$$n_r / n_s = (1 - S)$$



แทนค่า  $(1-S) = n_r / n_s$  ลงในสมการที่ 4.36 จะได้สมการของกำลังงานกลที่สร้างขึ้นใน rotor ของมอเตอร์ 3 เฟส ที่อยู่ในรูปของความเร็ว rotor คือ

$$(W) \quad 4.38 \quad P_{mech} = [3 I_r^2 R_r n_r] / S \cdot n_s$$

จากแผ่นป้าย nameplate ของมอเตอร์ และข้อมูลของมอเตอร์จะแสดงค่ากำลังงานกลมีหน่วยเป็นแรงม้า (hp) ความเร็วของ rotor มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (r/min) และแรงบิดมีหน่วยเป็นปอนด์-ฟุต (lb-ft) นั่นคือ จากสมการที่ 4.38 เปลี่ยนจากหน่วย watt เป็นแรงม้า (1 hp = 746 W) จะได้

$$4.39 \quad P_{mech} = [3 I_r^2 R_r n_r] / (746) S \cdot n_s \text{ (hp)}$$

และจากสมการพื้นฐานของกำลังงานทางกลในรูปของแรงม้า (hp) ที่แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานทางกล กับแรงบิดที่สร้างขึ้นมา และความเร็วของ rotor คือ

$$(hp) \quad \boxed{4.40 \quad P_{mech} = (T_D \cdot n_r) / 5252}$$

เมื่อ :

$P_{mech}$  = mechanical power developed in rotor (hp)

$T_D$  = developed torque (lb-ft)

$n_r$  = rotor speed หรือ shaft speed (r/min)

เมื่อแทนค่า  $P_{mech} = (T_D \cdot n_r) / 5252$  จากสมการที่ 4.40 ลงในสมการที่ 4.39 และแก้สมการหาค่าของ developed torque ( $T_D$ ) จะได้

$$(lb-ft) \quad 4.41 \quad (T_D \cdot n_r) / 5252 = [3 I_r^2 R_r n_r] / (746) S \cdot n_s$$

$$T_D = 7.04 [(3 I_r^2 R_r) / S \cdot n_s]$$

$$= [21.21 I_r^2 R_r] / S \cdot n_s$$

จากสมการที่ 4.33  $P_{gap} = (3 I_r^2 R_r) / S$  เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.41 จะได้

$$4.42 \quad \boxed{T_D = 7.04 P_{gap} / n_s} \quad (lb-ft)$$

- **Shaft Torque** (แรงบิดที่เพลา)

แรงบิดที่เพลาเป็นแรงบิดของเพลาที่ใช้ในการขับ load ซึ่งได้หักจากการสูญเสียจากแรงเสียดทาน

ที่เกิดจาก bearing (friction losses) และการสูญเสียจากการระบายอากาศที่เกิดจากพัดลมระบายอากาศบนเพลา (windage losses) หาได้จากสมการ

$$T_{\text{shaft}} = \frac{7.04 P_{\text{shaft}}}{n_r} \quad \text{ft) (lb-} \quad \text{4.43}$$

**Example 4-3** A 3-phase, 460 V , 25 hp , 60 Hz , four-pole induction motor operating at reduced load requires 14.58 kW input to the rotor. The rotor copper losses are 263 W , and the combined friction , windage , and stray power losses are 197 W. Determine:

- (a) shaft speed                      (b) mechanical power developed                      (c) developed torque

**Solution** (a) shaft speed

$$\text{จากสมการ} \quad P_{\text{gap}} = P_{\text{rcl}} / S \Rightarrow (14.58 \times 10^3) = 263 / S$$

$$S = 263 / (14.58 \times 10^3) =$$

0.018

จากสมการ  $n_s = (120 f_s) / P = (120 \times 60) / 4 = 1800$   
r/min

จากสมการ  $n_r = n_s (1 - S) = 1800 (1 - 0.018)$   
 $= 1767.6$  r/min

**Ans**

(b) mechanical power developed

จากสมการ  $P_{gap} = P_{mech} + P_{rcl} \Rightarrow P_{mech} =$   
 $P_{gap} - P_{rcl}$

$$P_{mech} = (14.58 \times 10^3) - 263 = 14,317 \text{ W}$$

**Ans**

$P_{mech}$  ในรูปของแรงม้า (hp) คือ

$$P_{mech} = 14,317 \text{ W} / 746 = 19.19 \text{ hp}$$

**Ans**

(c) developed torque

จากสมการ  $T_D = 7.04 P_{gap} / n_s$   
 $= [7.04 (14.58 \times 10^3)] / 1800$   
 $= 57.02$  lb-ft

**Ans**

หรือ จากสมการ  $P_{mech} = (T_D \cdot n_r) / 5252 \Rightarrow T_D = (5252$   
 $P_{mech}) / n_r$

$$T_D = (5252 \times 19.19) / 1767.6$$
  
 $= 57.02$  lb-ft

**Ans**

-----

#### **4-10. กำลังงานสูญเสีย, ประสิทธิภาพ และ power factor (Losses, Efficiency and Power- factor)**

- กำลังงานสูญเสีย (Losses)

ในการคำนวณหาประสิทธิภาพ (efficiency) ของมอเตอร์ จำเป็นจะต้องนำค่ากำลังงานการสูญเสีย (losses) ในมอเตอร์มาคิดคำนวณด้วย ซึ่งกำลังงานการสูญเสียในมอเตอร์จะประกอบด้วยกำลังงานสูญเสียใน stator และกำลังงานสูญเสียใน rotor

### 0. กำลังงานสูญเสียใน Stator

กำลังงานการสูญเสียใน stator ประกอบด้วย

1. Core losses ( $P_{core}$ ) คือ กำลังงานการสูญเสียในแท่งแกนเหล็กที่เกิดจาก hysteresis losses และ eddy current losses

2. Stator copper losses ( $P_{sc1}$ ) คือ กำลังงานการสูญเสียในขดลวดของ stator ซึ่งเป็นการสูญเสียในรูปของความร้อน  $I^2R$  ในขดลวด stator

เมื่อเราจ่ายกำลังงานไฟฟ้า input power ให้กับ stator และเกิดกำลังงานการสูญเสียในแท่งแกนเหล็กและขดลวดของ stator ดังนั้นกำลังงานข้ามช่องว่าง air-gap ( $P_{gap}$ ) คือ

$$(W) \quad \boxed{P_{gap} = P_{in} - P_{core} - P_{sc1}} \quad 4.44$$

เมื่อ :

$$P_{gap} = \text{air-gap power} \quad (W)$$

$$P_{in} = \text{total 3 phase power input to stator} \quad (W)$$

$$P_{core} = \text{core losses} \quad (W)$$

$$P_{sc1} = \text{stator copper losses} \quad (W)$$

### 0. กำลังงานสูญเสียใน Rotor

กำลังงานการสูญเสียใน rotor ประกอบด้วย

1. Rotor copper losses ( $P_{rc1}$ ) คือ กำลังงานการสูญเสียในขดลวดของ rotor ซึ่งเป็นการสูญเสียในรูปของความร้อน  $I^2R$  ในขดลวด rotor

2. Mechanical losses ( $P_{mech}$ ) เป็นกำลังงานการสูญเสียทางกลซึ่งจะประกอบด้วย

2.1 Friction and windage losses ( $P_{f,w}$ ) เป็นกำลังงานการสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทานของ bearing ระหว่างแปรงถ่านกับ slip ring เรียกว่า “friction losses”

และการสูญเสียจากการระบายอากาศที่เกิดจากการหมุนของคัลิปพัดลมที่ติดอยู่บนเพลลา rotor เรียกว่า “windage losses”

2.2 Stray power losses ( $P_{stray}$ ) เป็นกำลังงานการสูญเสียจากสภาพความเป็นแม่เหล็กและการสูญเสียทางกล ซึ่งเป็นการสูญเสียเล็ก ๆ ที่มีค่าคงที่

0 กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในมอเตอร์

กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในมอเตอร์ คือ ผลรวมของกำลังงานสูญเสียใน stator กับกำลังงานสูญเสียใน rotor ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{stray} \text{ (W)} = P_{sc1} + P_{core} + P_{rc1} + P_{f,w}$$

4.45

สำหรับมอเตอร์ชนิด 3 เฟส 4 ขั้ว แบบ Design B ตามมาตรฐาน NEMA

(National Electrical Manufacturers Association : มาตรฐานอุตสาหกรรมของโรงงานผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าประเทศสหรัฐอเมริกา)

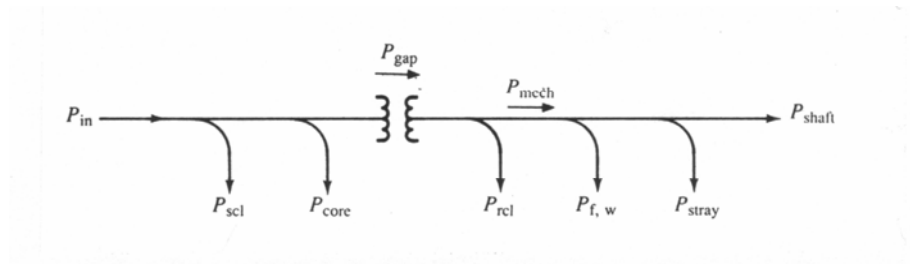
ที่มีขนาดตั้งแต่ 1-125 แรงม้า มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียดังนี้

Losses	Percent of total losses	
Factor affecting these losses		
$P_{sc1}$ conductor size	35-40	Stator
$P_{rc1}$ conductor size	15-25	Rotor
$P_{core}$ quantity of magnetic material	15-25	Type and
$P_{stray}$ manufacturing and design methods	10-15	Primary
$P_{f,w}$ design of fans and bearing	5-10	Selection and

- **Power flow diagram**

Power flow diagram เป็นการแสดงการไหลของกำลังงานจากแหล่งจ่ายไฟ input power ที่จ่ายให้

stator ไปจนถึง output power ของเพลลา ( $P_{shaft}$ ) ที่ใช้ในการขับ load โดยจะรวมกำลังงานสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นใน stator และ rotor ตามที่แสดงในรูปที่ 4-8 สำหรับการเขียน Power flow diagram จะมีประโยชน์ในการช่วยแก้ปัญหา ซึ่งจะสะดวกในการคำนวณหาค่าตอบ



รูปที่ 4-8 Power-flow diagram showing flow of power from stator input to shaft output.

จากรูป Power-flow diagram เราสามารถที่จะหาค่าต่าง ๆ ได้ เช่น

4.46 
$$P_{loss} = P_{in} - P_{shaft} \quad \text{---(W)---}$$

หรือ

(W) 
$$P_{loss} = P_{scl} + P_{core} + P_{rcl} + P_{f,w} + P_{stray}$$

และ



$$P_{\text{mech}} = P_{\text{shaft}} + P_{f,w} + P_{\text{stray}} \quad \text{(W)}$$

4.47

- **Useful Shaft-power output** (กำลังงาน output ของเพลลา)

กำลังงาน output ของเพลลา ( $P_{\text{shaft}}$ ) เป็นกำลังงานทางกล ( $P_{\text{mech}}$ ) ที่สร้างขึ้นมาจากกำลังงานไฟฟ้า

ลบด้วยการสูญเสียกำลังงานทางกลที่ประกอบการสูญเสียจากแรงเสียดทานและระบายอากาศ ( $P_{f,w}$ ) และ

กำลังงานสูญเสีย stray ( $P_{\text{stray}}$ ) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$(W) \quad \boxed{4.48 \quad P_{\text{shaft}} = P_{\text{mech}} - P_{f,w} - P_{\text{stray}}}$$

- **Efficiency** (ประสิทธิภาพ)

ประสิทธิภาพของ induction motor เท่ากับอัตราส่วนของ output power ต่อ input power ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$4.49 \quad \boxed{\eta = P_{\text{out}} / P_{\text{in}} = P_{\text{shaft}} / P_{\text{in}}}$$

- **Power-factor**

Power factor คือ อัตราส่วนของกำลังงาน active power ต่อกำลังงาน apparent power ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$4.50 \quad \boxed{P_f = P_{\text{in}} / S_{\text{in}}}$$

เมื่อ :

$P_f$  = power factor

(W)  $P_{in} = \text{active power} = \sqrt{3} V_{line} I_{line} \cos\theta$

(VA)  $S_{in} = \text{apparent power} = \sqrt{3} V_{line} I_{line}$

**Example 4-4** A 3-phase, 230 V , 60 Hz , 100 hp , six-pole induction motor operating at rated condition has an efficiency of 91.0 percent and draws a line current of 248 A. The core loss, stator copper loss and rotor conductor loss are 1697 W , 2803 W and 1549 W respectively. Determine :

- (a) power input
- (b) total losses
- (c) air-gap power
- (d) shaft speed
- (e) power factor
- (f) combined windage , friction and stray power loss
- (g) mechanical power
- (h) sketch the power-flow diagram and enter known values

**Solution** (a) power input

จากสมการ  $\eta = P_{shaft} / P_{in} \Rightarrow P_{in} = P_{shaft} / \eta$

$$P_{in} = (100 \text{ hp}) (746 \text{ W}) / (91/100) = 81,978 \text{ W}$$

**Ans**

(b) total losses

จากสมการ  $P_{loss} = P_{in} - P_{shaft} = 81,978 - (100 \text{ hp}) (746 \text{ W}) = 7378 \text{ W}$

**Ans**

(c) air-gap power



จากสมการ  $P_{\text{gap}} = P_{\text{in}} - P_{\text{core}} - P_{\text{scl}} =$   
 $81,978 - 1697 - 2803$   
 $= 77,478 \text{ W}$

**Ans**

(d) shaft speed

จากสมการ  $P_{\text{gap}} = P_{\text{rcl}} / S \Rightarrow S = P_{\text{rcl}} / P_{\text{gap}}$   
 $S = 1549 / 77,478 = 0.02$

จากสมการ  $n_s = (120 f_s) / P = (120 \times 60) / 6 = 1200$   
r/min

จากสมการ  $n_r = n_s (1 - S) = 1200 (1 - 0.02)$   
 $= 1176 \text{ r/min}$

**Ans**

(e) power factor

จากสมการ  $S_{\text{in}} = \sqrt{3} V_{\text{line}} I_{\text{line}} = \sqrt{3} (230)$   
(248)  $= 98,796 \text{ VA}$

จากสมการ  $P_f = P_{\text{in}} / S_{\text{in}} = 81,978 / 98,796$   
 $= 0.83$

**Ans**

(f) combined windage , friction and stray power loss

จากสมการ  $P_{\text{loss}} = P_{\text{scl}} + P_{\text{core}} + P_{\text{rcl}} + P_{f,w} +$   
 $P_{\text{stray}}$

$P_{f,w} + P_{\text{stray}} = P_{\text{loss}} - P_{\text{scl}} - P_{\text{core}} - P_{\text{rcl}}$   
 $= 7378 - 2803 - 1697 - 1549$   
 $= 1329 \text{ W}$

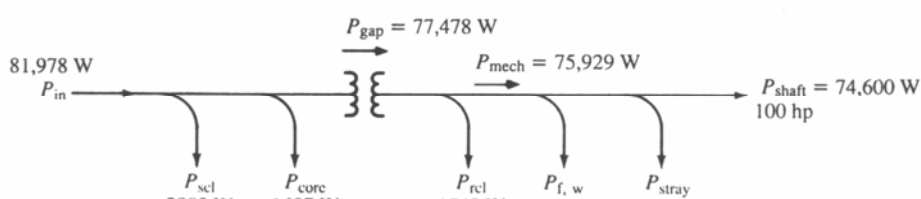
**Ans**

(g) mechanical power

จากสมการ  $P_{\text{mech}} = P_{\text{shaft}} + P_{f,w} + P_{\text{stray}}$   
 $= (100 \text{ hp}) (746 \text{ W}) + 1329$   
 $= 75,929 \text{ W}$

**Ans**

(h) sketch the power-flow diagram and enter known values



-----

## SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING

$$n_s = (120 f_s) / P \quad (\text{rpm})$$

$$n = n_s -$$

$$n_r$$

$$S = n / n_s = (n_s - n_r) / n_s$$

$$n_r =$$

$$n_s (1 - S)$$

$$f_r = S f_{BR}$$
$$= S E_{BR}$$

$$E_r$$

$$X_r = S X_{BR}$$

$$I_r$$

$$= E_{BR} / (Z_r / S)$$

$$I_r = \frac{E_{BR}}{\sqrt{(R_r/S)^2 + (X_{BR})^2}} \quad \theta_r = \tan^{-1} [X_{BR} / (R_r / S)]$$

$$P_{gap} = E_{BR} I_r \cos \theta_r \quad P_{gap} = P_{mech} + P_{rcl} \quad (W)$$

$$P_{gap} = (3 I_r^2 R_r) / S \quad (W) \quad P_{gap} = P_{rcl} / S \quad (W)$$

$$P_{mech} = P_{gap} (1 - S) \quad (W) \quad P_{mech} = (T_D \cdot n_r) / 5252 \quad (hp)$$

$$T_D = 7.04 P_{gap} / n_s \quad (lb-ft) \quad T_{shaft} = 7.04 P_{shaft} / n_r \quad (lb-ft)$$

$$P_{gap} = P_{in} - P_{core} - P_{scl} \quad (W) \quad P_{loss} = P_{in} - P_{shaft} \quad (W)$$

$$P_{loss} = P_{scl} + P_{core} + P_{rcl} + P_{f,w} + P_{stray} \quad (W)$$

$$P_{mech} = P_{shaft} + P_{f,w} + P_{stray} \quad (W) \quad P_{shaft} = P_{mech} - P_{f,w} - P_{stray} \quad (W)$$

$$\eta = P_{out} / P_{in} = P_{shaft} / P_{in} \quad P_f = P_{in} / S_{in}$$

-----

## บทที่ 5

### การแบ่งประเภท คุณลักษณะ และการทำงานของ เครื่องกลไฟฟ้าสามเฟสแบบเหนี่ยวนำ

#### 5-1 บทนำ

การเลือก motor ที่ดีที่สุดให้เหมาะสมกับการใช้งาน จะต้องพิจารณาองค์ประกอบหลายประการ เช่น

กำลังงาน, แรงบิด, คุณสมบัติของความเร็วที่จะใช้ขับ load เป็นแบบความเร็วคงที่ หรือปรับความเร็วได้

หรือความเร็วเปลี่ยนแปลงตาม load และลักษณะการทำงานว่าจะทำงานเป็นแบบต่อเนื่อง หรือทำงานใน

ระยะสั้น หรือทำงานแบบเดิน ๆ หยุด ๆ

ในการพยายามที่จะเลือก motor ให้เหมาะสมกับการใช้งาน NEMA ได้กำหนดค่ามาตรฐานสำหรับ

motor รวมทั้ง frame dimensions, voltage and frequency, power rating, service factor, temperature rises

และ performance characteristics สำหรับประโยชน์ที่ได้รับจากมาตรฐาน NEMA คือ จะได้ขนาด motor

ที่ถูกต้องและเหมาะสมในการขับเครื่องจักร

ข้อมูลของ NEMA ที่ติดตั้งอยู่บน nameplate ของ motor จะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานของ motor, คุณสมบัติและการใช้งาน และการทำงานที่เหมาะสมภายใต้ขอบเขตของ rating บน nameplate ซึ่งจะทำให้ motor ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้

#### 5-2 การแบ่งประเภทและการแสดงคุณลักษณะของ Squirrel Cage Induction Motor ตามมาตรฐาน NEMA

NEMA (The National Electrical Manufacturers Association : มาตรฐานอุตสาหกรรมของโรงงานผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าของสหรัฐอเมริกา) ได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบ squirrel cage induction motor ไว้ 4 แบบ เพื่อสะดวกในการพิจารณาเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน โดยพิจารณาถึง

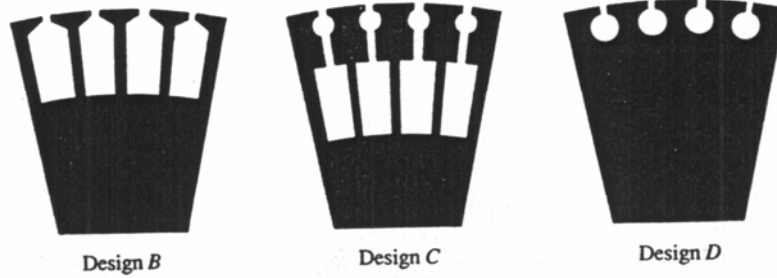
Torque-speed ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันของมอเตอร์ในเรื่องแรงบิด (torque) ความเร็วรอบ (speed) และ

ค่ากระแสไฟฟ้าขณะ starting

- มาตรฐานการออกแบบสำหรับ squirrel cage induction motor ที่กำหนดไว้ 4 แบบ มีดังต่อไปนี้

■ **Design A** เป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดขณะเริ่ม start ปกติ ค่ากระแสไฟฟ้าขณะเริ่ม start สูง และมีค่า slip ต่ำ มอเตอร์ชนิดนี้จึงไม่นิยมนำมาใช้งานในเรือ เนื่องจากมีคุณสมบัติค่ากระแสไฟฟ้าขณะ

■ **Design B** start ต่ำ และมีใช้กับปั๊มชนิดแรงเหวี่ยง

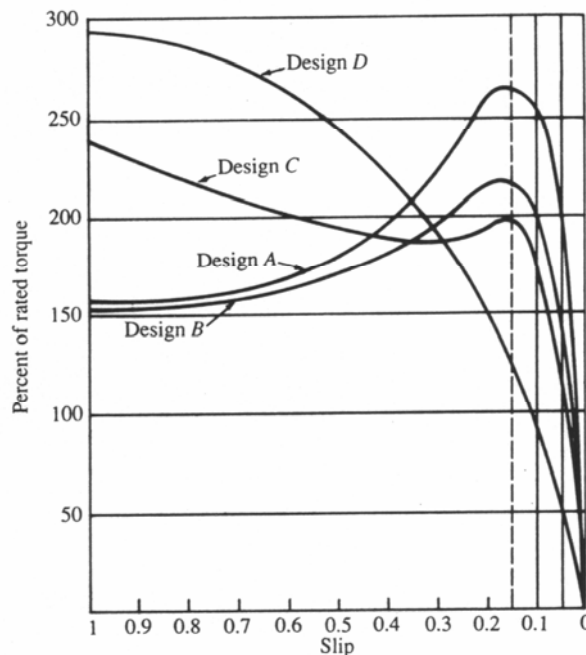


ขณะเริ่มเปิดติจะต้องการ

แรงบิดสูงขณะเริ่ม starting

■ **Design C** เป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดขณะเริ่ม start สูง ค่ากระแสไฟฟ้าขณะเริ่ม start ต่ำ และมีค่า slip ต่ำ มอเตอร์ชนิดนี้จึงนิยมนำมาใช้งานในเรือเช่นกัน โดยปกติจะใช้กับเครื่องทางเสื่อ, กว้านสมอ ปั๊มชนิดลูกสูบ และเครื่องอัดอากาศที่ต้องการแรงบิดสูงขณะเริ่ม starting

■ **Design D** เป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดขณะเริ่ม start สูง ค่ากระแสไฟฟ้าขณะเริ่ม start ปานกลางและมีค่า slip สูง มอเตอร์ชนิดนี้จึงนิยมนำมาใช้งานในเรือเช่นกัน โดยปกติจะใช้กับกว้านสมอ, กว้านท้ายเรือ, อุปกรณ์ควบคุมลิ้นปิด-เปิด, เครื่องมือสำหรับเคลื่อนย้ายของหนัก และเครื่องยกของต่าง ๆ



รูปที่ 5-1 Torque-speed characteristics of basic NEMA design squirrel cage induction motor

☐ ค่า Minimum locked- rotor torque ที่ได้มาจากการออกแบบของ NEMA สำหรับ squirrel cage induction motor คูได้จากตารางที่ 5-1 โดยหาจากค่าของแรงม้า (hp) , synchronous speed , frequency และค่า Minimum locked-rotor torque จะถูกแสดงในรูป percent (%) ของ full-load torque (rated torque)

☐ ค่า Minimum breakdown torque ที่ได้มาจากการออกแบบของ NEMA สำหรับ squirrel cage induction motor คูได้จากตารางที่ 5-2 โดยหาจากค่าของแรงม้า (hp) , synchronous speed , frequency และค่า Minimum breakdown torque จะถูกแสดงในรูป percent (%) ของ full-load torque (rated torque)

☐ ค่า Minimum pull-up torque คือ แรงบิดดึงขึ้นที่มีค่าต่ำสุดของมอเตอร์ระหว่างช่วงเวลาของการเร่งจาก locked-rotor ไปจนถึง breakdown โดยค่า Minimum pull-up torque จะถูกแสดงในรูป percent (%) ของ full-load torque (rated torque) ซึ่งคูได้จากตารางที่ 5-3

● ตารางที่ 5-1

TABLE 5-1  
Minimum locked-rotor torque, in percent of full-load torque, of single-speed, 60-50-Hz, polyphase, squirrel-cage, continuous rated, medium motors with rated voltage and frequency applied<sup>a</sup>

Hp	Synchronous Speed (rpm)							
	60 Hertz	3600	1800	1200	900	720	600	514
	50 Hertz	3000	1500	1000	750	—	—	—
<i>Designs A and B</i>								
$\frac{1}{2}$	—	—	—	140	140	115	110	—
$\frac{3}{4}$	—	—	175	135	135	115	110	—
1	—	275	170	135	135	115	110	—
$1\frac{1}{2}$	175	250	165	130	130	115	110	—
2	170	235	160	130	125	115	110	—
3	160	215	155	130	125	115	110	—
5	150	185	150	130	125	115	110	—
$7\frac{1}{2}$	140	175	150	125	120	115	110	—
10	135	165	150	125	120	115	110	—
15	130	160	140	125	120	115	110	—
20	130	150	135	125	120	115	110	—
25	130	150	135	125	120	115	110	—
30	130	150	135	125	120	115	110	—
40	125	140	135	125	120	115	110	—
50	120	140	135	125	120	115	110	—
60	120	140	135	125	120	115	110	—
75	105	140	135	125	120	115	110	—
100	105	125	125	125	120	115	110	—
125	100	110	125	120	115	115	110	—
150	100	110	120	120	115	115	—	—

● ตารางที่ 5-2

TABLE 5-2

Minimum breakdown torque, in percent of full-load torque, of single-speed, 60-50-Hz, polyphase, squirrel-cage, continuous rated, medium motors with rated voltage and frequency applied<sup>a</sup>

Hp	Synchronous Speed (rpm)							
	60 Hertz	3600	1800	1200	900	720	600	514
	50 Hertz	3000	1500	1000	750	—	—	—
<i>Designs A and B</i>								
$\frac{1}{2}$	—	—	—	225	200	200	200	200
$\frac{3}{4}$	—	—	275	220	200	200	200	200
1	—	300	265	215	200	200	200	200
1½	250	280	250	210	200	200	200	200
2	240	270	240	210	200	200	200	200
3	230	250	230	205	200	200	200	200
5	215	225	215	205	200	200	200	200
7½	200	215	205	200	200	200	200	200
10-125, inclusive	200	200	200	200	200	200	200	200
150	200	200	200	200	200	200	—	—
200	200	200	200	200	200	—	—	—
250	175	175	175	175	—	—	—	—
300-350	175	175	175	—	—	—	—	—
400-500, inclusive	175	175	—	—	—	—	—	—
<i>Design C</i>								
3	—	—	225	200	—	—	—	—
5	—	200	200	200	—	—	—	—
7½-200, inclusive	—	190	190	190	—	—	—	—

<sup>a</sup> Reproduced by permission of the National Electrical Manufacturers Association from *NEMA Standards Publication MG 1-1987. Motors & Generators*. Copyright 1987 by NEMA, Washington, D.C.

TABLE 5-3

Minimum pull-up torque, in percent of full-load torque of single-speed, 60-50-Hz, polyphase, squirrel-cage, continuous rated, medium motors with rated voltage and frequency applied (designs A, B, and C)<sup>a</sup>

Column 1 Locked-Rotor Torque from Table 5-1	Column 2 Pull-Up Torque, Percent
110 percent or less	90 percent of column 1
Greater than 110 percent, but less than 145 percent	100 percent of full-load torque
145 percent or more	70 percent of column 1

<sup>a</sup> Reproduced by permission of the National Electrical Manufacturers Association from *NEMA Standards Publication*

**Example 5-1** Determine the minimum values of locked-rotor torque, breakdown torque and pull-up torque that can be expected from a 3-phase, 10 hp , 460 V , 60 Hz , six-pole , NEMA design C motor whose rated speed is 1150 r/min

**Solution** จากสมการ  $n_s = 120 f/P = (120 \times 60)/6 = 1200 \text{ r/min}$

$$\text{จากสมการ } P_{\text{mech}} = T_D \cdot n_r / 5252 \Rightarrow T_D =$$

$$P_{\text{mech}} (5252) / n_r$$

$$T_D = T_{\text{rated}} = (10 \text{ hp})$$

$$(5252) / (1150) = 45.67 \text{ lb-ft}$$

จากตารางที่ 5-1 นำขนาดของมอเตอร์ 10 hp , design C , synchronous speed = 1200 r/min ไปเทียบหาค่า percent ของ rated torque เพื่อนำมาหาค่า Minimum locked-rotor torque จะได้

$$\begin{aligned} T_{\text{locked-rotor}} &= 225 \% (T_{\text{rated}}) = \\ 2.25 (45.67) &= \underline{102.8 \text{ lb-ft}} \end{aligned}$$

**Ans**

จากตารางที่ 5-2 นำขนาดของมอเตอร์ 10 hp , design C , synchronous speed = 1200 r/min ไปเทียบหาค่า percent ของ rated torque เพื่อนำมาหาค่า Minimum breakdown torque จะได้

$$\begin{aligned} T_{\text{breakdown}} &= 190 \% (T_{\text{rated}}) = \\ 1.90 (45.67) &= \underline{86.8 \text{ lb-ft}} \end{aligned}$$

**Ans**

และจากตารางที่ 5.3 จะได้ค่า Minimum pull-up torque คือ



$$(0.70) (102.8) \quad T_{\text{pull-up}} = 70 \% T_{\text{locked-rotor}} = 71.9 \text{ lb-ft}$$

**Ans**

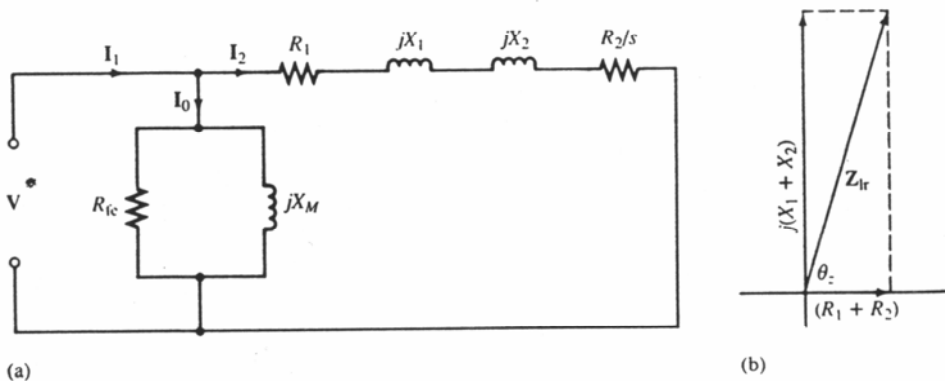
-----

### 5-3 Shaping the Torque-Speed Characteristic

ค่าแรงบิดสูงสุดที่ induction motor สามารถจะสร้างได้จากค่า voltage และค่า frequency ที่กำหนดให้ และจะขึ้นอยู่กับขนาดความสัมพันธ์ของค่าความต้านทาน  $R_1$  และค่า reactance  $X_1$  และ  $X_2$  และจะเป็นอิสระจากค่าความต้านทาน  $R_2$  ค่า slip ที่  $T_{\text{max}}$  จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความต้านทาน  $R_2$  ตามที่แสดงในรูปที่ 5-2 และสามารถหาได้จากสมการ

$$T_D = (21.12 I_2^2 R_2) / (S n_s) \quad \text{--- lb-ft}$$

5.1



รูปที่ 5-2 (a) Approximate equivalent circuit of an induction motor;  
 (b) phasor diagram for locked-rotor condition.

จากรูปที่ 5-2 (a) สามารถหาค่ากระแส  $I_2$  ได้จากสมการ

$$I_2 = V / [R_1 + j X_1 + (R_2/S) + j X_2] \quad 5.2$$

และขนาดของ  $I_2$  จะได้

$$|I_2| = V / \sqrt{[(R_1 + R_2/S)^2 + (X_1 + X_2)^2]} \quad 5.3$$

แทนค่าขนาดของกระแส  $I_2$  จากสมการที่ 5.3 ลงในสมการที่ 5.1 จะได้

$$T_D \cong 21.12 V^2 (R_2/S) / [(R_1 + R_2/S)^2 + (X_1 + X_2)^2] n_s \quad 5.4$$

จากสมการที่ 5.4 สำหรับค่า slip ที่ให้ และค่า parameter ของเครื่องจักร ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ) ที่ให้มีค่าคงที่ ดังนั้นจะเห็นว่า developed torque จะเป็นสัดส่วนกำลังสองของ applied voltage ( $V^2$ ) นั่นคือ

$$T_D \propto V^2 \quad 5.5$$

### 5-4 ผลกระทบของ Off-rated Voltage and Off-rated Frequency

เมื่อ voltage มีการเปลี่ยนแปลงจาก rated voltage หรือการเปลี่ยนแปลงความถี่จากรated frequency คุณสมบัติการทำงานของ induction motor จะแตกต่างออกไป และค่าที่เกิดการเบี่ยงเบนจากค่าที่ทำงานตามปกติจะขึ้นอยู่กับ percent การเปลี่ยนแปลงของ voltage และ frequency

- Effect on running torque

ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความถี่บน developed torque ( $T_D$ ) สามารถหาได้โดยแสดงในรูปของ synchronous speed ( $n_s$ ) และในรูปของความถี่ ( $f$ ) คือ

1. ในรูปของ synchronous speed ( $n_s$ ) หาได้จากสมการ

$$\text{lb-ft} \quad \boxed{T_D = \frac{(21.12 V^2 \cdot S)}{5.6 (R_2 \cdot n_s)}} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

2. ในรูปของความถี่ (frequency) หาได้จากสมการ

$$\text{lb-ft} \quad \boxed{T_D = \frac{(21.12 V^2 \cdot S)}{5.7 R_2 (120 f / P)}} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{เมื่อ } n_s = 120 f / P$$

จากสมการที่ 5.7 จะเห็นได้ว่า developed torque จะเป็นสัดส่วนกับค่า applied voltage ยกกำลังสอง

( $V^2$ ) และค่า slip ( $S$ ) และเป็นส่วนกลับกับค่าความถี่ ( $f$ ) เมื่อค่า  $R_2$  และค่า  $P$  (pole) เป็นค่าที่คงที่ นั่นคือ

$$\text{lb-ft} \quad \boxed{T_D \propto \frac{(V^2 \cdot S)}{f}} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

### ● Operating 60 Hz Motor on a 50 Hz System

การทำงานของ induction motor ที่ค่า frequency ต่ำกว่า rated frequency เช่น นำมอเตอร์ที่มีความถี่

60 Hz ไปใช้กับความถี่ 50 Hz จะเป็นเหตุทำให้ magnetizing reactance ลดลง และผลกระทบจากการอิ่มตัวของแม่เหล็ก ทำให้ magnetizing current ลดลง ซึ่งผลลัพธ์รวมจะทำให้เกิดความร้อนรุนแรงต่อขดลวดของมอเตอร์ (overheating) การป้องกันการเกิด overheating การลด applied frequency จะต้องตามด้วยการลด applied voltage กล่าวง่าย ๆ คือ “อัตราส่วน voltage ต่อ Hz ต้องมีค่าคงที่”

ตามมาตรฐาน NEMA Induction motor 3 phase 60 Hz ที่มี 2 , 4 , 6 และ 8 ขั้ว สามารถทำงานได้จากระบบความถี่ 50 Hz โดยกำหนดให้ค่า hp และ voltage rating ที่ 50 Hz เป็น 5/6 เท่า ของค่า rating ที่ 60 Hz เมื่อทำงานในลักษณะเช่นนี้จะไม่เกิด overheating และค่า locked-rotor torque และ break-down torque ที่ 50 Hz จะเหมือนกับการทำงานที่ 60 Hz

หรือ

$HP_{50} = 5/6 HP_{60}$
$(T \cdot n_r / 5252)_{50} = 5/6 (T \cdot n_r / 5252)_{60}$

เมื่อ :  $P_{mech} = T \cdot n_r / 5252 \quad (hp)$

**Example 5-2** A 230 V , 20 hp , 60 Hz , six-pole , 3 phase induction motor driving a constant torque load at the rated frequency , rated voltage and rated horsepower , has a speed of 1175 r/min , and an

efficiency of 92.1 percent. Determine :

(a) the new operating speed if the system disturbance causes a 10 percent drop in voltage and a 6 percent drop in frequency.

(b) the new shaft horsepower. Assume that windage , friction and stray power losses are essentially constant

**Solution** (a) the new operating speed if the system disturbance causes a 10 percent drop in voltage and a 6 percent drop in frequency.

เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ rated frequency จะมีค่า synchronous speed และค่า slip ดังนี้

จากสมการ  $n_{s,1} = 120 f_1 / P = (120 \times 60) / 6 = 1200$  r/min

จากสมการ  $S_1 = (n_{s,1} - n_{r,1}) / n_{s,1} = (1200 - 1175) / 1200 = 0.02083$

ถ้า voltage ลดลง 10 % จาก rated voltage และความถี่ลดลง 6 %  
จาก rated frequency

จะได้

$$V_2 = 90 \% (230) = 207 \text{ V}$$

$$f_2 = 94 \% (60) = 56.4 \text{ Hz}$$

ดังนั้น  
1128 r/min

แต่โจทย์กำหนดให้ torque load คงที่ นั่นคือ

$$T_{D1} = T_{D2}$$

จากสมการ  $T_D \propto (V^2 \cdot S) / f$  ดังนั้นจะได้

$$(V_1^2 \cdot S_1) / f_1 = (V_2^2 \cdot S_2) / f_2$$

$$S_2 = S_1 (V_1 / V_2)^2 (f_2 /$$

$f_1)^2$

$$= 0.02083 (230 / 207)^2$$

$(56.4 / 60)^2$

$$= 0.02417$$

ดังนั้น new operating speed ( $n_{r,2}$ ) หาได้จากสมการ

$$n_{r,2} = n_{s,2} (1 - S_2) = 1128$$

$(1 - 0.02417)$

$$= 1101 \text{ r/min}$$

**Ans**

(b) the new shaft horsepower.

จากสมการ  $P_{mech} = (T_D \cdot n_r) / 5252$  และโจทย์กำหนดให้  
torque load คงที่ ( $T_1 = T_2$ ) ดังนั้น the new shaft horsepower หาได้จาก

$$P_{mech 1} = (T_{D1} \cdot n_{r,1}) / 5252 = P_{mech 2} =$$

$$(T_{D2} \cdot n_{r,2}) / 5252$$

$$P_{mech 1} / P_{mech 2} = n_{r,2} / n_{r,1}$$

$(T_{D1} = T_{D2})$

$$P_{mech\ 2} = P_{mech\ 1} (n_{r,\ 2} / n_{r,\ 1})$$

$$= 20 (1101 / 1175)$$

$$= \underline{18.74\ hp}$$

**Ans**

หรือ จากสมการ  $P_{mech\ 1} = (T_{D1} \cdot n_{r,\ 1}) / 5252 \Rightarrow T_{D1} = P_{mech\ 1} (5252) / n_{r,\ 1}$

$$T_{D1} = 20 (5252) / 1175$$

$$= 89.3957\ lb-ft$$

โจทย์กำหนดให้ torque load คงที่ ( $T_{D1} = T_{D2} = 89.3957\ lb-ft$ ) ดังนั้น the new shaft horsepower คือ

$$P_{mech\ 2} = (T_{D2} \cdot n_{r,\ 2}) / 5252$$

$$= (89.3957 \times 1101) / 5252$$

$$= \underline{18.74\ hp}$$

**Ans**

### 5-5 ข้อมูลบน Nameplate ของมอเตอร์

ข้อมูลที่แสดงบนแผ่นป้าย nameplate ของมอเตอร์จะแสดงข้อมูลจำกัดเกี่ยวกับขอบเขตการทำงานของมอเตอร์ และคุณสมบัติทั่ว ๆ ไปทางไฟฟ้า โดยข้อมูลที่แสดงบนแผ่นป้ายจะแสดงรายการที่เป็น rated operating condition ของมอเตอร์ ที่ได้รับการรับประกันจากโรงงานผู้ผลิต



## รูปที่ 5-3 Induction motor nameplate (Courtesy Reliance Electric Company)

จากรูปที่ 5-3 แสดงรายละเอียดข้อมูลบนแผ่นป้าย nameplate ของ Induction motor ทำงานที่ rated operating condition ที่ได้รับการรับประกันจากโรงงานผู้ผลิต โดยมีรายละเอียดคือ ถ้าย้ายไฟฟ้าระบบ 460 V , 60 Hz , 3 phase ให้กับ stator และมอเตอร์ตั้งอยู่ในอุณหภูมิแวดล้อม 40°C , load ที่เพลา (shaft load) เท่ากับ 150 hp , มอเตอร์จะเดินด้วยความเร็วประมาณ 1785 r/min , และดึงกระแสจาก line current ประมาณ 163 A และรับประกันว่ามอเตอร์มีประสิทธิภาพ 95.8 %

### ● Nominal Efficiency

ค่า nominal efficiency ที่แสดงบนแผ่นป้าย nameplate เป็นค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของมอเตอร์ โดย

โรงงานผู้ผลิตรับประกันว่าถ้ามอเตอร์ทำงานที่ rated nameplate condition จะได้อัตราประสิทธิภาพที่ต่ำสุด (minimum efficiency) ของมอเตอร์ ความสัมพันธ์ระหว่าง nominal efficiency กับ minimum efficiency

ตามมาตรฐาน NEMA สำหรับ squirrel cage induction motor แบบ design A , B และ C ที่มีขนาด 1-125 hp ดูได้จากตารางที่ 5-4

### ● ตารางที่ 5-4 Induction motor efficiency

Nominal Efficiency	Minimum Efficiency	Nominal Efficiency	Minimum Efficiency
98.0	97.6	87.5	85.5
97.8	97.4	86.5	84.0
97.6	97.1	85.5	82.5
97.4	96.8	84.0	81.5
97.1	96.5	82.5	80.0
96.8	96.2	81.5	78.5
96.5	95.8	80.0	77.0
96.2	95.4	78.5	75.5
95.8	95.0	77.0	74.0
95.4	94.5	75.5	72.0
95.0	94.1	74.0	70.0
94.5	93.6	72.0	68.0
94.1	93.0	70.0	66.0
93.6	92.4	68.0	64.0
93.0	91.7	66.0	62.0
92.4	91.0	64.0	59.5
91.7	90.2	62.0	57.5
91.0	89.5	59.5	55.0
90.2	88.5	57.5	52.5
89.5	87.5	55.0	50.5
88.5	86.5	52.5	48.0
		50.5	46.0

- **Design Letter**

Design letter ที่ออกแบบตามมาตรฐาน NEMA เป็นการแสดงคุณสมบัติของมอเตอร์ ซึ่งจะบอกให้ทราบถึงค่าต่ำสุดของ locked-rotor torque ตามตารางที่ 5-1 , ค่าต่ำสุดของ break-down torque ตามตารางที่ 5-2 และค่าต่ำสุดของ pull-up torque ตามตารางที่ 5-3

- **Service Factor**

ค่า service factor (S.F) ของมอเตอร์ คือ ตัวคูณ ซึ่งเมื่อนำไปคูณกับ rated power แล้ว จะเป็นค่าที่ load ยอมรับได้ โดยค่า service factor จะมีค่ามากกว่า 1 แต่ถ้าวoltage และค่า frequency ที่จ่ายให้มอเตอร์มีค่ามากกว่าที่กำหนดไว้ในแผ่นป้าย nameplate และนำค่า service factor ที่มีค่ามากกว่า 1 ไปคูณ จะทำให้ค่าประสิทธิภาพ , power factor และ speed แตกต่างไปจาก rated load

- **Insulation Class**

Insulation class เป็นตัวอักษรที่แสดงชนิดของฉนวนซึ่งจะประกอบด้วย Class A , B , F , H และ C โดยแต่ละ class จะบอกเป็นค่าสูงสุดที่ยอมให้อุณหภูมิขึ้นสูงสุดได้เท่าไร โดยไม่ทำให้นวนของขดลวดในมอเตอร์เสื่อมสภาพและได้รับความเสียหาย อุณหภูมิของฉนวน เป็นผลรวมของอุณหภูมิรอบข้าง (ambient temperature) , อุณหภูมิของขดลวดในมอเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้นขณะมอเตอร์ทำงาน และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยประมาณในบริเวณที่มีความร้อนสูง

ค่าสูงสุดที่ยอมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเหนืออุณหภูมิรอบข้าง (ambient temperature) สำหรับชนิดของฉนวนในชั้นต่าง ๆ ของ single-phase และ three-phase induction motor ที่ทำงานต่อเนื่อง หรือทำงานในช่วงเวลาอันสั้นประมาณ 5 , 15 , 30 และ 60 นาที ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-5

- ตารางที่ 5-5

TABLE 5-5

Maximum allowable temperature rise for medium single-phase and polyphase induction motors in °C, based on a maximum ambient temperature of 40°C<sup>a</sup>

Class of insulation system (see MG 1-1.65)	A	B	F <sup>b</sup>	H <sup>b,c</sup>
--	---	---	----------------	------------------

Time rating (shall be continuous or any short-time rating given in MG 1-10.36)

Temperature rise (based on a maximum ambient tempera-



จากข้อมูลของแผ่นป้าย nameplate ในรูปที่ 5-3 มี Insulation class คือ class F, Service factor = 1.15

และการทำงานของมอเตอร์ทำงานแบบต่อเนื่อง (continuous duty) เมื่อนำไปเปิดตารางที่ 5-5 ที่อุณหภูมิ

รอบข้าง ambient temperature 40°C จะได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอุณหภูมิได้ คือ 115°C

สำหรับมอเตอร์ที่ติดตั้งใช้งานภายในเรือ ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอุณหภูมิได้จะสูงกว่ามอเตอร์ที่ติดตั้งใช้งานบนบก คือ

Class A	ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอุณหภูมิได้	105°C
Class B	ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอุณหภูมิได้	130°C
Class F	ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอุณหภูมิได้	155°C
Class H	ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอุณหภูมิได้	180°C
Class C	ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอุณหภูมิได้	220°C

- **Code Letter**

Code letter จะแสดงความหมายสำหรับการหาค่าที่คาดไว้ของกระแสกระชอก (inrush current)

ไปยัง stator ในขณะที่ locked-rotor เมื่อเริ่ม start มอเตอร์ด้วย rated voltage และ rated frequency ที่จ่ายโดยตรงให้กับขั้วของ stator

Code letter สามารถอ่านได้จากตาราง locked-rotor เป็น kVA/hp จากค่า inrush current ที่คำนวณ

ได้ ตามที่แสดงในตารางที่ 5-6

• ตารางที่ 5-6 NEMA code letter for locked-rotor kVA per horsepower (kVA/hp)

TABLE 5-6  
NEMA code letters for locked-rotor kVA per horsepower<sup>a</sup>

Code Letter	kVA/hp <sup>b</sup>	Code Letter	kVA/hp <sup>b</sup>
A	0.0–3.15	K	8.0–9.0
B	3.15–3.55	L	9.0–10.0
C	3.55–4.0	M	10.0–11.2
D	4.0–4.5	N	11.2–12.5
E	4.5–5.0	P	12.5–14.0
F	5.0–5.6	R	14.0–16.0
G	5.6–6.3	S	16.0–18.0
H	6.3–7.1	T	18.0–20.0
J	7.1–8.0	U	20.0–22.4
		V	22.4 and up

<sup>a</sup> Reproduced by permission of the National Electrical Manufacturers Association from *NEMA Standards Publication MG 1-1987, Motors & Generators*, Copyright 1987 by NEMA, Washington D.C.

<sup>b</sup> Locked kVA per horsepower range includes the lower figure up to, but not including, the higher figure. For example, 3.14 is designated by letter A, and 3.15 by letter B.

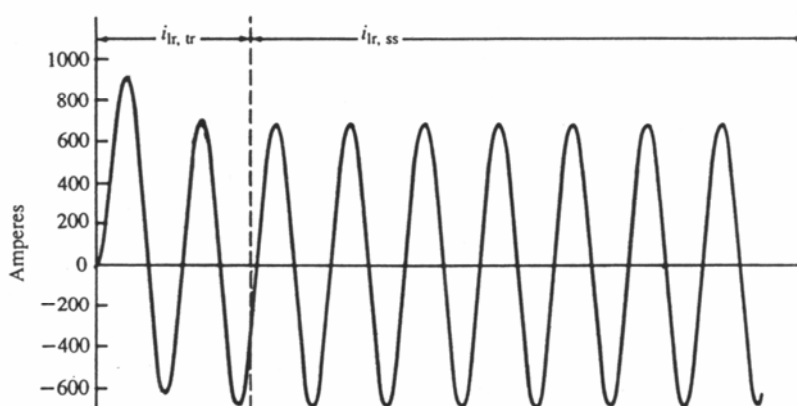
### 5-6 Locked-rotor Inrush Current

ขณะที่ locked-rotor แต่ละ phase ของ induction motor จะมีค่า impedance R และ L ของขดลวดต่ออนุกรมกันในวงจร เมื่อเราทำการปิด switch ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น คือ กระแส transient และ steady-state current

นั่นคือ กระแสกระชาก (inrush current) จาก locked-rotor ไปยัง induction motor จะประกอบด้วย

ส่วนของ steady-state ที่เราเรียกว่า “normal inrush current” ( $I_{lr,ss}$ ) และส่วนของ transient ( $I_{lr,tr}$ ) โดย

ส่วนของ transient จะสลายตัวไปในช่วงเวลาอันสั้น ดังนั้นในเทอมของ locked-rotor current จะหมายถึงกระแสในส่วนของ steady-state ตามที่แสดงในรูปที่ 5-4



### รูปที่ 5-4 Locked-rotor inrush current

ส่วนประกอบที่เป็น steady-state current สำหรับมอเตอร์จะได้อาจมาจากโรงงานผู้ผลิต หรือข้อมูลบนแผ่นป้าย nameplate ค่าส่วนประกอบ steady-state current อาจคำนวณได้จากค่า parameters ของมอเตอร์ คือค่า impedance และค่า rated voltage per phase ดังนั้นจึงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$5.9 \quad \boxed{I_{lr,ss}} = V_{\text{phase}} / Z_{in}$$

**Example 5-3** The motor is a NEMA design B machine rated at 150 hp at 460 V , 60 Hz. It has a rated current of 163 A , a nominal efficiency of 96.2 percent and a Code G designation for locked-rotor Determine :

- (a) the expected inrush current.
- (b) the guaranteed minimum efficiency to be expected when operating at rated conditions.

**Solution** (a) the expected inrush current.

โจทย์กำหนดเป็น code letter G ดังนั้นจากตารางที่ 5-6 ที่ code letter G จะได้อ่า expected range of starting kVA/hp คือ

$$5.6 [ \text{ kVA/hp } ' 6.3$$

ค่า expected range of locked-rotor current หาได้จากสมการของ apparent power คือ

$$S = \sqrt{3} V_{\text{line}} I_{\text{line}}$$

$$(\text{kVA/hp}) \times \bar{\text{hp}} \times 1000 = \sqrt{3} V_{\text{line}} I_{\text{line}}$$

ดังนั้นค่า locked-rotor current ต่ำสุด คือ

$$(5.6) \times 150 \times 1000 = \sqrt{3} \times 460 \times$$

$I_{line}$

$$I_{r,ss} = 1054 \text{ A}$$

และค่า locked-rotor current สูงสุด คือ

$$(6.3) \times 150 \times 1000 = \sqrt{3} \times 460 \times$$

$I_{line}$

$$I_{r,ss} = 1186 \text{ A}$$

ดังนั้นค่ากระแสกระชากที่คาดว่าจะเกิดขึ้นขณะ locked-rotor ด้วย rated voltage และ rated frequency ที่จ่ายให้ stator คือ

$$1054 \text{ A} \quad [ \quad I_{r,ss} \quad ' \quad 1186 \text{ A} \quad ]$$

**Ans**

(b) the guaranteed minimum efficiency to be expected when operating at rated conditions.

โจทย์กำหนดค่า nominal efficiency = 96.2 % เมื่อนำไปเปิดตารางที่ 5-4 จะได้ค่า minimum

efficiency = 95.4 %

ดังนั้นค่า guaranteed minimum efficiency = 95.4 %

**Ans**

## 5-7 Dynamic Braking of Induction Motor

Dynamic braking คือ การลดความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าลงโดยการเปลี่ยนจากพลังงานจลน์ (kinetic energy) ที่อยู่ใน rotating mass ให้เป็นพลังงานความร้อน ( $I^2R$ ) ในขดลวด rotor และ/หรือในขดลวด stator ในการทำเช่นนี้ motor จะต้องเปลี่ยนสวิตซ์จาก line มายังวงจร braking เพื่อให้ motor มีคุณสมบัติเป็น generator ด้วยการต่อ load เข้าไป Load ที่ต่อเข้าไป ก็คือ resistance โดยต่อในขดลวด rotor และ/หรือในขดลวด stator มอเตอร์ก็จะลดความเร็วลง

การ dynamic braking ของ induction motor สามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธี DC Injection และวิธี Capacitor braking

- **DC Injection**

**DC Injection** คือ วิธีการปลดมอเตอร์ออกจาก line และป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เข้าไปโดยผ่านวงจร **rectifier** และต่อค่า **resistor** เพื่อจำกัดกระแส แล้วจึงนำไปต่อเข้ากับขั้วของ **stator** จำนวน 2 ขั้ว ตามที่แสดงในรูปที่ 5-5

ไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้าไปใน **stator** จะสร้างสนามแม่เหล็กที่อยู่กับที่เพื่อให้กำเนิด **voltage** ใน

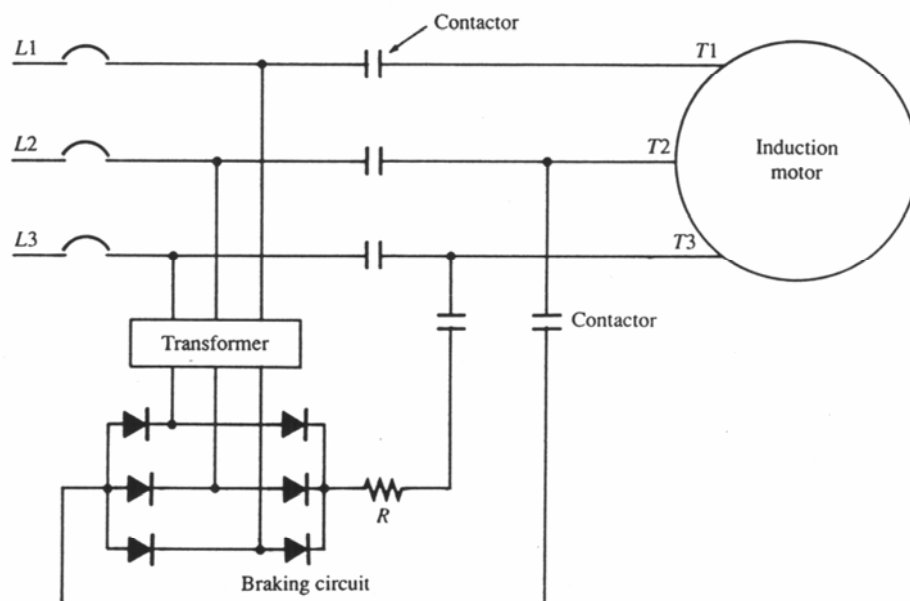
ขดลวด **rotor** ที่หมุน ทำให้ผลลัพท์ของกระแสไฟฟ้าในวงจรปิดที่เกิดจาก **squirrel cage rotor** หรือ **wound rotor** จะใช้กำลังงานที่หมุนในรูปของการสูญเสียพลังงานความร้อน

$I^2R$  จึงทำให้ความเร็วของ

มอเตอร์ลดลงอย่างรวดเร็ว

อัตราของการลดความเร็วโดย **DC Injection** อาจปรับแต่งได้โดยการปรับแต่งค่า **resistor R** ด้วยการ

ใช้ **variable ratio transformer** หรือใช้ **Thyristor (SCR)** ควบคุมวงจรแทนค่า **resistor**



ction

- **Capacitor Braking**

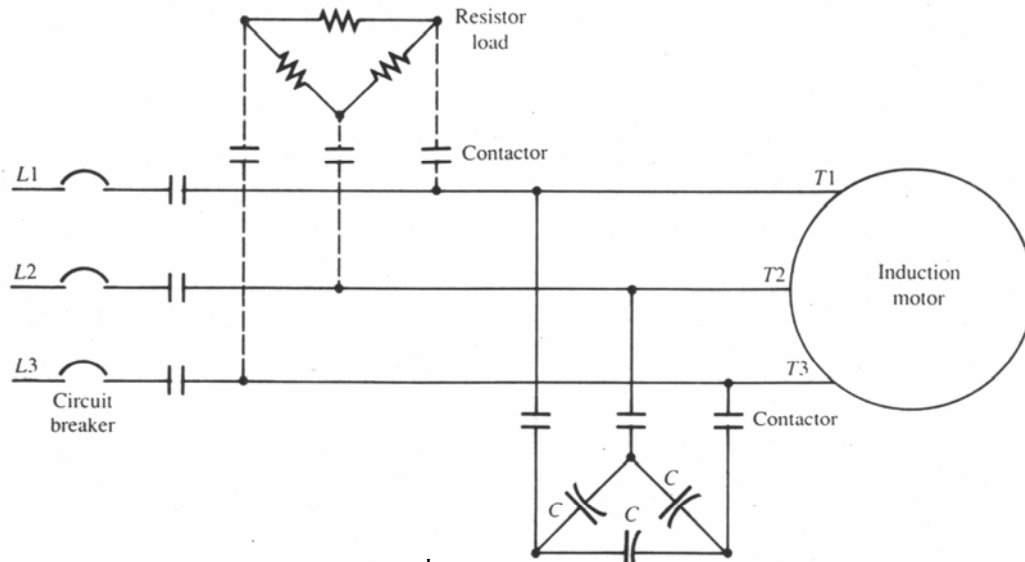
การใช้ **capacitor braking** จะต้องปลดมอเตอร์ออกจาก **line** และต่อ **capacitor bank** เข้าไปที่ขั้วของ

**stator** ตามที่แสดงในรูปที่ 5-6 เมื่อ **braking** มอเตอร์จะทำงานเป็น **self-excited induction generator** และ

ระหว่างที่ทำ **capacitor braking** กำลังงานส่วนที่หมุนจะสูญเสียในรูปของกำลังความร้อน  $I^2R$  ในขดลวด

rotor และขดลวด stator ทำให้มอเตอร์ลดความเร็วลง และถ้าต้องการให้มอเตอร์ลดความเร็วเพิ่มมากขึ้น

จะต้องต่อ resistor load เพิ่มเข้าไป ตามที่แสดงด้วยเส้นปะในรูปที่ 5-6

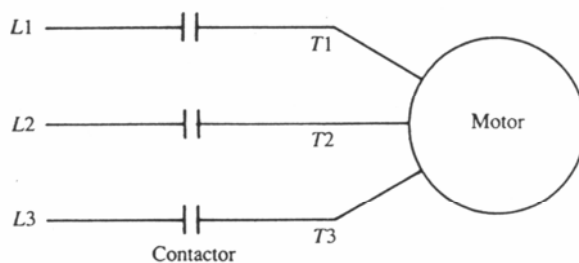


รูปที่ 5-6 Dynamic braking using

capacitors

### 5-8 การสตาร์ท Induction Motor

Induction motor ที่มีขนาดแรงม้าไม่เกิน 5 hp อาจจะทำให้เริ่มเดินโดยการต่อคร่อมกับ full voltage ตามที่แสดงในรูปที่ 5-7



## รูปที่ 5-7 Full-voltage starting

Induction motor ที่มีขนาดพิกัดเกินกว่า 5 hp ค่ากระแสไฟฟ้าขณะเริ่ม starting จะมีค่าสูงประมาณ

5-10 เท่า ของกระแสพิกัด หาก starting ด้วยวิธี full voltage จะทำให้ voltage ส่วนใหญ่ตกในระบบ

distribution ซึ่งจะทำให้เกิดไฟไหม้หรือไฟกระพริบได้

วิธีที่จะลดกระแสไฟฟ้ากระชอก (inrush current) ขณะ starting ก็คือ ต้องลด voltage ขณะเริ่ม starting

ซึ่งวิธีการลด voltage มีด้วยการหลายวิธี เช่น ใช้ auto transformer , การต่อแบบ wye-delta ที่ขดลวดของ

stator เพื่อจำกัดกระแสที่ผ่านขดลวด , การต่อแบบ part-winding , การต่อ series impedance และการควบคุมโดยใช้ solid-state control

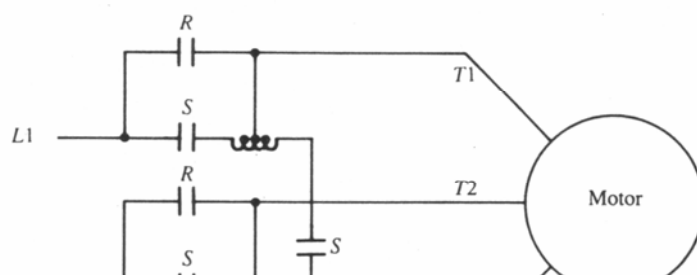
### ● Auto-Transformer Starting

การใช้ Auto-transformer ในการ starting มอเตอร์ จะอาศัยหลักการลด voltage ที่จ่ายให้ stator โดย

ผ่าน auto-transformer ที่มี Tap 50 , 65 และ 80 % ของ full voltage หรือ rated voltage เมื่อทำการ starting

ค่าของ voltage จะลดลงตาม Tap และ contact S (Starting) จะต่อวงจร ขณะที่ contact R (Running) เปิดวงจร เมื่อ rotor เริ่มหมุนจนมีความเร็วเข้าใกล้

synchronous speed จะทำให้ contact S เปิดวงจร และ contact R ต่อวงจรเข้ากับ กระแสไฟฟ้า line โดยตรง



รูปที่ 5-8 Circuit for auto-transformer starting

**Example 5-4** A 3 phase , 125 hp , 460 V , 156 A , 60 Hz , six-pole , 1411 r/min , design B motor with Code letter H is to be started at reduced voltage using an auto-transformer with a 65 percent tap.

Determine :

- (a) locked-rotor torque and expected average inrush current to the stator if the motor is started at rated voltage.
- (b) repeat part (a) assuming the motor is started at reduced voltage using an auto-transformer with a 65 percent tap.
- (c) the inrush line current when starting at reduced voltage.

**Solution** (a) locked-rotor torque and expected average inrush current to the stator if the motor is started at rated voltage.

จากสมการ  $n_s = 120 f / P = 120 (60) / 6 = 1200 \text{ r/min}$

locked-rotor torque ที่ rated voltage หาได้จากสมการ

$$P_{\text{mech}} = T \cdot n_r / 5252 \implies T_{\text{rated}} = P_{\text{mech}} (5252) / n_r$$

$$T_{\text{rated}} = (125) (5252) / 1141 = 575.37 \text{ lb-ft}$$

จากตารางที่ 5-1 ค่า minimum locked-rotor torque สำหรับมอเตอร์ขนาด 125 hp design B ,

6 pole , 1200 r/min จะเท่ากับ 125 % ของ rated torque ดังนั้นจะได้

$$T_{lr,460} = 125 \% T_{\text{rated}} = 1.25 (575.37)$$



$$T_{lr,460} = 719.2 \text{ lb-ft}$$

**Ans**

จากตารางที่ 5-6 ค่า average locked-rotor kVA / hp ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นสำหรับมอเตอร์

Code H คือ  $(6.3 + 7.1) / 2 = 6.70 \text{ kVA / hp}$

ดังนั้นค่ากระแสกระชากเฉลี่ย (average inrush current) ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นที่ stator ที่ rated voltage หาได้จากสมการ

$$S = \sqrt{3} V_{line} I_{line}$$

$$(kVA / hp) \times \bar{hp} \times 1000 = \sqrt{3} V_{line} I_{line}$$

$$(6.70) \times 125 \times 1000 = \sqrt{3} (460) I_{lr,460}$$

$$I_{lr,460} = 1051 \text{ A}$$

**Ans**

(b) repeat part (a) assuming the motor is started at reduced voltage using an auto-transformer with a 65 percent tap.

เมื่อ voltage ลดลง 65 % จาก rated voltage นั่นคือ

$$V_{65\%} = 65\% V_{rated} = 65\%$$

$V_{460}$

$$V_{65\%} = 0.65 (460) = 299 \text{ V}$$

ค่า input impedance ของมอเตอร์มีค่าคงที่ขณะ locked-rotor ดังนั้น

ค่ากระแสกระชากเฉลี่ยที่

stator จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า voltage ที่จ่ายให้ stator นั่นคือ

$$I_{65\%} = 65\% I_{lr,460} = 0.65 (1051)$$

$$I_{65\%} = 683 \text{ A}$$

**Ans**

และค่า locked-rotor torque จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า voltage ยกกำลังสอง ( $T_D \propto V^2$ ) นั่นคือ

$$T_{lr,460} = (V_{460})^2 \quad \text{และ} \quad T_{lr,65\%} = (V_{65\%})^2$$

ดังนั้น  
 $(V_{65\%})^2$

$$T_{lr,460} / T_{lr,65\%} = (V_{460})^2 /$$

$$\begin{aligned} T_{lr,65\%} &= T_{lr,460} (V_{65\%} / V_{460})^2 \\ &= (719.2) (299 / 460)^2 = 303.9 \text{ lb-ft} \end{aligned}$$

**Ans**

(c) the inrush line current when starting at reduced voltage.

จากสมการ turns ratio ของ transformer คือ

$$a = V_{HS,line} / V_{LS,line} = V_{460} /$$

$$V_{65\%} = 460 / 299 = 1.54$$

และ  $a = I_{LS,line} / I_{HS,line} = I_{lr,65\%} /$

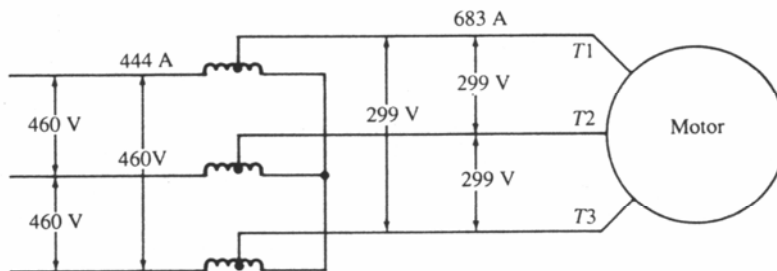
$I_{line,inrush}$

$$I_{line,inrush} = I_{lr,65\%} / a = 683 / 1.54 =$$

444 A

**Ans**

ค่า current และ voltage ที่จ่ายขณะ locked-rotor และค่า voltage ที่ลดลง 65 % จาก rated voltage ด้วย auto-transformer ได้แสดงตามรูปที่ 5-9



รูปที่ 5-9 current and voltage distribution for example 5-4

- **Wye-Delta Starting**

วงจรสำหรับ wye-delta starting บางที่เรียกว่า “star-delta starting” ตามที่แสดงในรูปที่ 5-10 ขณะ

เริ่ม starting มอเตอร์ ขดลวด 3 phase ของ stator จะถูกต่อแบบ wye-connected โดย contact S จะต่อวงจร

และ contact R เปิดวงจร เมื่อ rotor หมุนได้ความเร็วประมาณ 75 % ของ synchronous speed จะทำให้

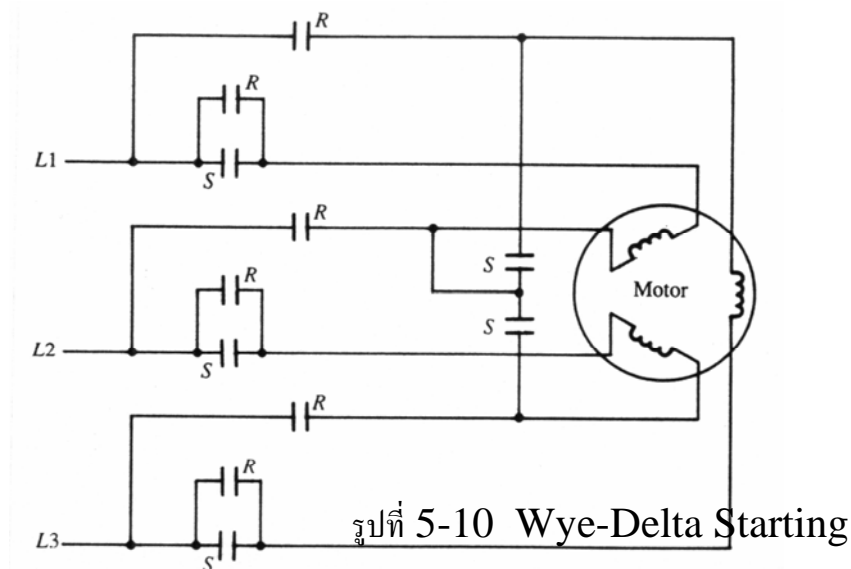
contact S เปิดวงจร และ contact R ต่อวงจร ดังนั้นขดลวด stator จะถูกต่อเป็นแบบ delta-connected

ขณะที่ starting มอเตอร์ ขดลวด 3 phase ของ stator ต่อแบบ wye-connected ทำให้ค่า voltage ต่อ

phase ของ stator ลดลง ประมาณ  $1/\sqrt{3}$  เท่า จาก line voltage เนื่องจากการต่อแบบ wye-connected

$$E_{line} = \sqrt{3} E_{phase}$$

การ starting มอเตอร์แบบ wye-delta Starting เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในทางปฏิบัติ



**Example 5-5** A 60 hp, 460 V, 60 Hz, 77 A, 3 phase, 1750 r/min, design B motor has a locked-rotor impedance of  $0.547 \angle 69.1^\circ \Omega$ /phase. Assuming the machine is connected for wye-delta starting. Determine :

- (a) the locked-rotor current per phase and the expected minimum locked-rotor torque when starting.  
 (b) the locked-rotor current per phase , Assuming the motor is started delta connected.  
 (c) the code letter.

**Solution** (a) the locked-rotor current per phase and the expected minimum locked-rotor torque when starting.

ขณะที่มอเตอร์ starting จะต่อแบบ wye-connected ดังนั้น voltage per phase หาได้จากสมการ

$$V_{\text{line}} = \sqrt{3} V_{\text{phase}} \Rightarrow V_{\text{phase}} = V_{\text{line}} / \sqrt{3}$$

$$V_{\text{phase}} = 460 / \sqrt{3} = 265.6 \text{ V}$$

และ locked-rotor current per phase หาได้จากสมการ

$$I_{\text{lr}} = V_{\text{phase}} / Z = 265.6 / 0.547$$

$$I_{\text{lr}} = 485.5 \text{ A}$$

**Ans**

the locked-rotor torque at rated voltage หาได้จากสมการ

$$P_{\text{mech}} = T \cdot n_r / 5252 \Rightarrow T_{\text{rated}} = P_{\text{mech}} (5252) / n_r$$

$$T_{\text{rated}} = (60) (5252) / 1750 = 180 \text{ lb-ft}$$

จากตารางที่ 5-1 ค่า minimum locked-rotor torque สำหรับมอเตอร์ขนาด 60 hp design B , 1750 r/min (1800 r/min) จะเท่ากับ 140 % ของ rated torque ดังนั้นจะได้

$$T_{\text{lr},460} = 140 \% T_{\text{rated}} = 1.4 (180)$$

$$T_{\text{lr},460} = 252 \text{ lb-ft}$$

เนื่องจากมอเตอร์ต่อแบบ wye-connected ขณะ starting ดังนั้นค่า line voltage จะไม่เท่ากับ phase

voltage ( $V_{line} = \sqrt{3} V_{phase}$ ) และค่า locked-rotor torque จะเป็นสัดส่วน  
กับค่า voltage ยกกำลังสอง ดังนั้นจะได้

$$T_{lr,460} = (V_{460})^2 \quad \text{และ} \quad T_{lr,265.5} = (V_{265.5})^2$$

$$\text{ดังนั้น} \quad T_{lr,460} / T_{lr,265.5} = (V_{460})^2 / (V_{265.5})^2$$

$$T_{lr,265.5} = T_{lr,460} (V_{265.5} / V_{460})^2$$

$$= (252) (265.5 / 460)^2 = 84 \text{ lb-ft}$$

### Ans

(b) the locked-rotor current per phase , Assuming the motor is started delta connected.

เมื่อมอเตอร์ starting แบบ delta connected จะได้ความสัมพันธ์ของ voltage และ current คือ

$$V_{line} = V_{phase} \quad \text{และ} \quad I_{line} = \sqrt{3} I_{phase}$$

ดังนั้นค่า locked-rotor current per phase หาได้จากสมการ

$$I_{lr,\Delta} = V / Z = 460 / 0.547 = 840.95$$

A/phase

### Ans

และ line current คือ

$$I_{line} = \sqrt{3} I_{phase} = \sqrt{3} (840.95) =$$

1457 A

### Ans

(c) the code letter.

Code letter หาได้จากค่า apparent power โดยคิดจากค่า rated voltage และ rated current คือ

$$S_{lr} = \sqrt{3} V_{line} I_{line} = \sqrt{3} (460) (1457) / 1000 = 1161 \text{ kVA}$$

แต่ code letter มีหน่วยเป็น kVA/hp ดังนั้นจะได้

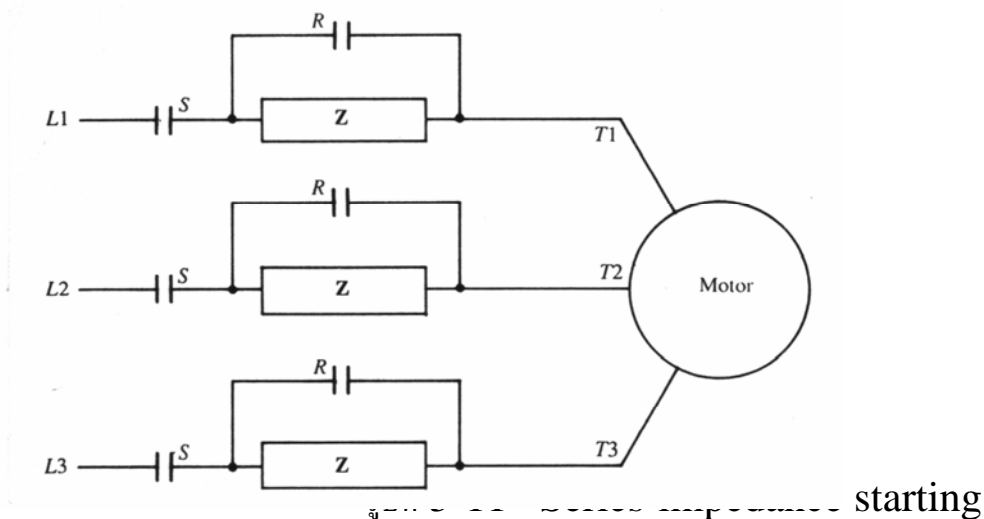
$$\text{kVA/hp} = 1161 / 60 = 19.35 \text{ kVA/hp}$$

เมื่อนำค่า 19.35 kVA/hp ไปเปิดตารางที่ 5-6 จะได้ code letter T ซึ่งมีค่าระหว่าง 18.0-20.0 kVA/hp

**Ans**

- **Series-Impedance Starting**

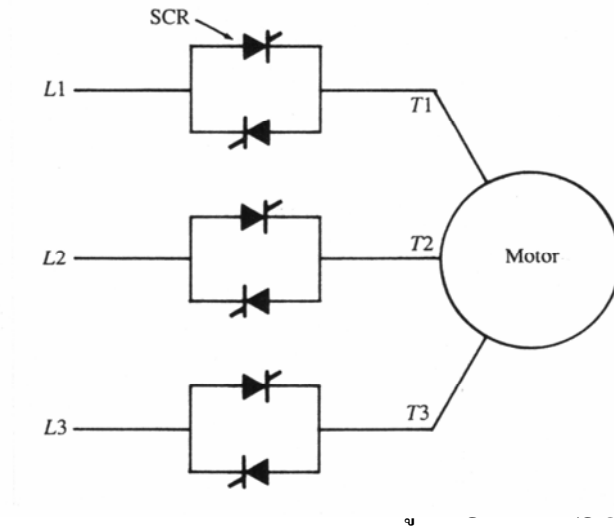
การ starting มอเตอร์แบบ series-impedance starting จะใช้ resistor หรือ inductor ต่ออนุกรมแต่ละ phase กับขดลวด stator เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าขณะ starting มอเตอร์ ตามที่แสดงรูปที่ 5-11 โดย contact R ที่ใช้สำหรับ running จะเปิดวงจร และ contact S จะต่อวงจรขณะ starting และใช้ impedance เป็นตัวจำกัดกระแสกระชาก เมื่อ motor หมุนเข้าใกล้ rated speed ตัว contact S จะเปิดวงจรตัด impedance ออกจากวงจร และ contact R จะต่อวงจร การ starting ด้วย series-impedance จะทำให้การเร่งของมอเตอร์เรียบ และเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการ starting ของ induction motor



- **Solid-state Starting**

การ starting มอเตอร์แบบ solid-state starting จะใช้ back-to-back thyristors (SCRs) เป็นตัวจำกัดกระแส ตามที่แสดงในรูปที่ 5-12 โดยวงจรควบคุมจะยอมให้กระแสเพิ่มทีละน้อย ซึ่งการเพิ่มกระแสทีละน้อย ๆ จะทำให้การ starting มอเตอร์นุ่ม ไม่มี การกระแทกของ load และ voltage จะไม่ตกมากเกินไป

Solid-state starting จะถูกออกแบบร่วมกันหลายรูปแบบ เช่น speed control , power factor control การป้องกัน overload และ single-phasing



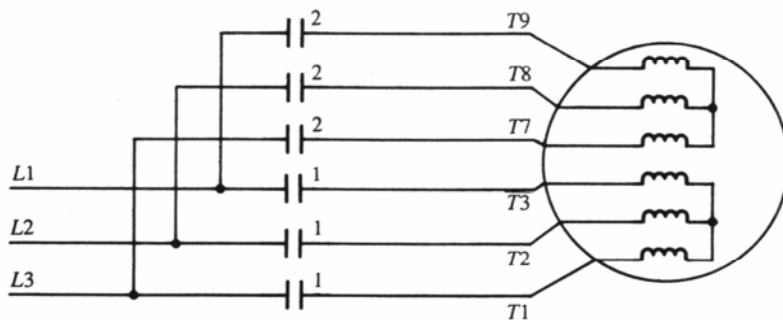
1-state starting

● **Part-winding Method**

การ starting มอเตอร์แบบ Part-winding method จะใช้ขดลวด stator 3-phase ที่เหมือนกัน 2 ชุด

โดยแต่ละชุดจะรับไฟ 1/2 ของ rated power วงจร power circuit สำหรับการ starting มอเตอร์แบบ part-winding แสดงในรูปที่ 5-13 เมื่อ starting มอเตอร์ contact 1 จะปิดวงจรก่อน ส่งกำลังงานให้ขดลวด stator 1 ชุด หลังจากช่วงเวลา time delay จะสั่งให้ contact 2 ปิดวงจร ส่งกำลังงานให้ขดลวด stator อีกชุด

การ starting มอเตอร์แบบ Part-winding จะจำกัด voltage ออกเป็น 2 ส่วน ดังนั้นขดลวด stator จะต่อทำงานที่ low voltage



รูปที่ 5-13 Part-winding starting

**SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING**

$$\begin{aligned} n_s &= 120 f / P && \text{(r/min)} && n_r &= n_s (1 \\ - S) &&& \text{(r/min)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= (n_s - n_r) / n_s && && P_{\text{mech}} &= T \cdot \\ n_r / 5252 &&& \text{(hp)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_D &\propto V^2 && \text{(lb-ft)} && T_D &\propto (V^2 \cdot S) \\ / f &&& \text{(lb-ft)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_D &= (21.12 V^2 \cdot S) / (R_2 \cdot n_s) && \text{(lb-ft)} && T_D &= (21.12 \\ V^2 \cdot S) / R_2 (120 f / P) &&& \text{(lb-ft)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{HP}_{50} &= 5/6 \text{HP}_{60} && \text{(hp)} && (T \cdot n_r / 5252)_{50} &= \\ 5/6 (T \cdot n_r / 5252)_{60} &&& \text{(hp)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3} V_{\text{line}} I_{\text{line}} && \text{(VA)} && (\text{kVA}/\text{hp} \times \text{hp} \times \\ 1000) &= \sqrt{3} V_{\text{line}} I_{\text{line}} && \text{(VA)} \end{aligned}$$

$$I_{l,r,ss} = V_{\text{phase}} / Z \quad \text{(A)}$$

-----



## บทที่ 6

### มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

#### (Single-phase Induction Motor)

##### 6-1. บทนำ

Single phase induction motor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมและเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เช่น ตู้เย็น เครื่องทำน้ำแข็ง พัดลม เครื่องซักผ้า ฯลฯ โดยเป็นมอเตอร์ที่มีขนาดตั้งแต่เศษส่วนของแรงม้า (1/2 hp) จนถึง 15 hp.

จากการศึกษาเกี่ยวกับ Induction motor 3 เฟส เราทราบว่าขดลวด Stator 3 เฟส จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัวตัดกับตัวนำของ rotor จึงเกิดการเหนี่ยวนำและแรงบิดทำให้ rotor หมุนไปได้ แต่ Single-phase induction motor จะมีขดลวด Stator เพียงชุดเดียว และได้รับไฟจากไฟเฟสเดียว ดังนั้นจึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับกันไปมาขึ้นที่ตัว Stator ซึ่งไม่ใช่สนามแม่เหล็กหมุนที่ความเร็ว Synchronous จากเหตุนี้จึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่สลับไปมานี้ไม่สามารถที่จะทำให้เกิดแรงบิดหมุนขึ้นได้ในขณะที่ rotor ยังหยุดอยู่ นี่คือสาเหตุว่าทำไมมอเตอร์เฟสเดียวจึงไม่มีแรงบิดเริ่มแรกในตัวของมันเอง อย่างไรก็ตามก็คิดหาว่าตัว rotor ถูกทำให้หมุนด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ย่อมทำให้เกิดแรงบิดและอัตราเร่งเกิดขึ้นกับมอเตอร์นั้น จนกระทั่งมีความเร็ว synchronous speed ได้

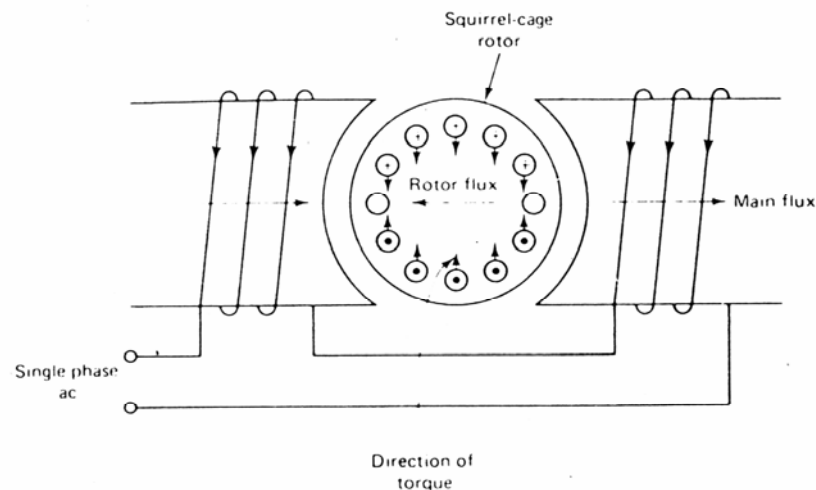
Single phase induction motor ไม่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กหมุน และแรงบิดให้มอเตอร์หมุนได้ ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ช่วย (auxiliary methods) ที่ใช้เริ่มทำให้ rotor เริ่มหมุน

- **Single phase induction motor** แบ่งออกตามความแตกต่างทางด้านโครงสร้างดังนี้
  - Split - phase induction motor (มอเตอร์แบบแยกเฟส)
  - Capacitor - start motor (มอเตอร์แบบเริ่มหมุนด้วย Capacitor)
  - Shaded - pole motor (มอเตอร์แบบบังขั้ว)
  - Universal motor
  - Repulsion motor

##### 6-2. ทฤษฎีการสร้างสนามแม่เหล็กและปฏิกิริยามอเตอร์เหนี่ยวนำ

ลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับในขดลวด Stator เฟสเดียว คือเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด Stator โดยสมมุติว่ารูปคลื่นของกระแสไฟฟ้างกล่าวเป็นรูป Sin ฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลผ่านตัวนำของ rotor จะเปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่น Sin ดังกล่าว

การเกิดรูปคลื่นสนามแม่เหล็กในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งจะมีลักษณะย้อนกลับทุก ๆ 1/2 cycle ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวด Stator ลักษณะเช่นนี้ฟลักแม่เหล็กหลัก (main flux) จากขดลวด Stator จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในแท่งตัวนำของ rotor ในขณะที่เดียวกันกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะสร้างฟลักแม่เหล็กที่ตัวนำ rotor (rotor flux) ต้านกับ main flux ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Lenz's ดังแสดงในรูปที่ 6-1



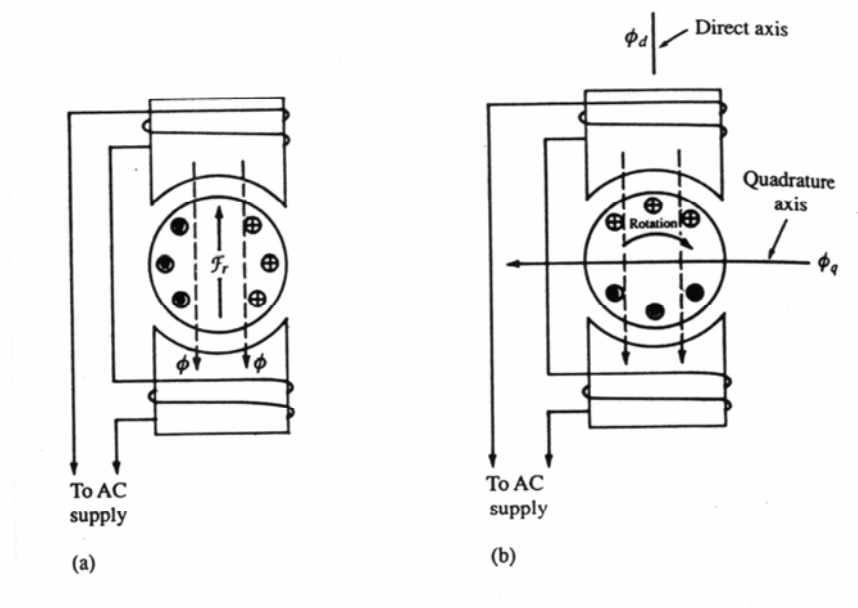
รูปที่ 6-1 main flux และ rotor flux

ฟลักแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ rotor จะทำให้เกิดแรงบิดใน rotor 2 ส่วน คือ แรงบิดในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ( $T_{cw}$ ) และแรงบิดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ( $T_{ccw}$ ) ที่มีขนาดเท่ากันลักษณะเช่นนี้ rotor จะหยุดนิ่ง (Slip = 1) แรงบิดจะมีค่าเป็นศูนย์ ( $T_{cw} = T_{ccw}$ ) แต่ถ้ามีแรงใด ๆ กระทำต่อ rotor ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง แรงบิดนี้จะไม่เป็นศูนย์อีกต่อไป และมอเตอร์จะหมุนในทิศทางของแรงที่ทำให้เกิดการเริ่มต้นหมุนต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมีความเร็วที่พิกัด

จากเหตุผลดังกล่าวเราจึงมีวิธีการทำให้ Single phase induction motor เริ่มต้นหมุนได้ด้วยตัวเองหลายวิธี แต่ละวิธีมักใช้เป็นชื่อเรียกมอเตอร์เหล่านั้น

● ทฤษฎีการสร้างสนามแม่เหล็ก (Quadrature Field Theory)

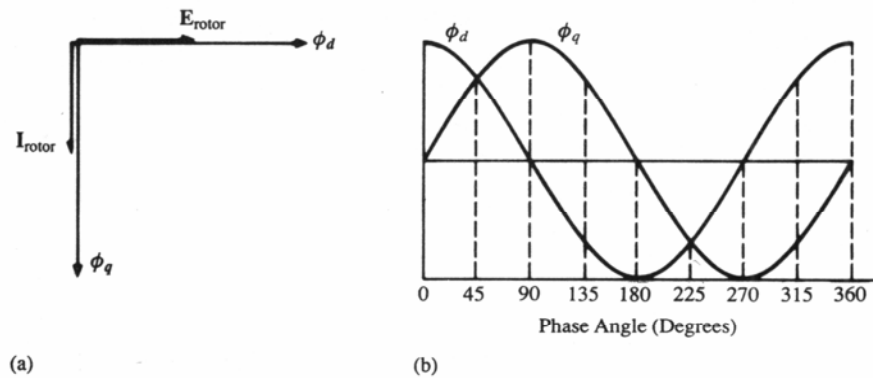
การหมุนของ rotor ทางกลที่สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magneto motive force : mmf :  $F$ ) ตามที่แสดงในรูปที่ 6-2 (b) เป็นเหตุทำให้ตัวนำของ rotor ตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กของ main poles ในขณะที่แสดงนั้นกระแสใน rotor bars ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของ induced speed voltage จะสร้างสนามแม่เหล็กซึ่งทำมุม 90 องศาทางไฟฟ้า จาก centerline ของ main pole flux เส้นแรงแม่เหล็กของ main pole จะเรียกว่า direct - axis flux และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจาก induce speed voltage เรียกว่า “quadrature-axis flux”



รูปที่ 6-2 Instantaneous direction of current in rotor bars caused by.

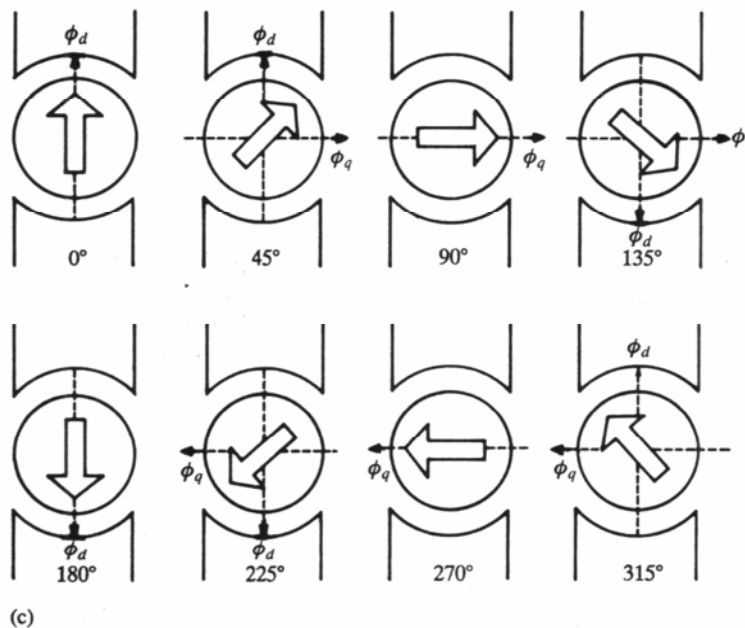
(a) transformer action

(b) speed voltage



(a)

(b)



(c)

รูปที่ 6-3 (a) Phase relationship between main pole flux, speed voltage, associated rotor current and quadrature flux ; (b) flux wave corresponding to phasor diagram in (a) ; (c) instantaneous direction of  $\phi_d$ ,  $\phi_q$  and resultant flux.

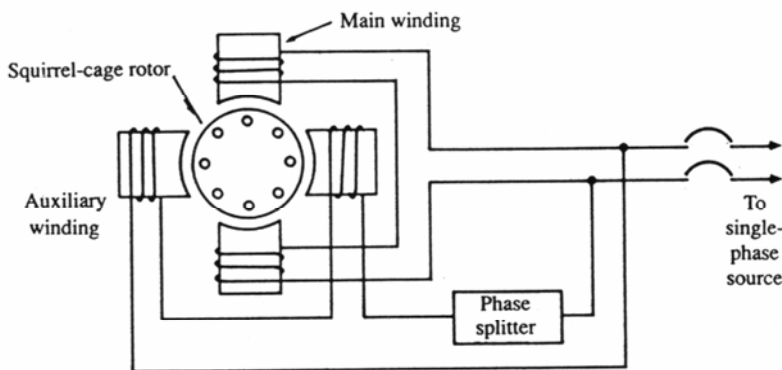
จากรูปที่ 6-3 (a) จะแสดงความสัมพันธ์ของ phase ระหว่าง main pole flux ( $\phi_d$ ) , speed voltage ( $E_{rotor}$ ) , rotor current ( $I_{rotor}$ ) และ quadrature flux ( $\phi_q$ ) โดย quadrature flux จะล้าหลัง induced speed voltage เป็นมุมเกือบ  $90^\circ$

Speed voltage จะอยู่ใน phase เดียวกันกับเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้มันเกิดขึ้นเสมอ คือ เกิดจาก main pole flux ( $\phi_d$ ) และเส้นแรงแม่เหล็ก. quadrature flux ( $\phi_q$ ) จะอยู่ใน phase เดียวกันกับกระแสที่ทำให้มันเกิดขึ้น ( $I_{rotor}$ ) เสมอ ดังนั้น quadrature flux จะล้าหลัง (Lagging) main pole flux หรือ direct-axis flux เป็นมุมเกือบ  $90^\circ$  ฟ้า ตาม flux waves ใน phasor diagram ที่แสดงในรูปที่ 6-3 (b)

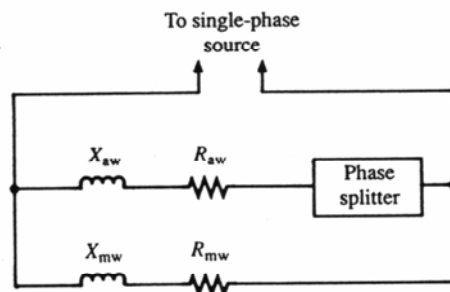
จากรูป 6-3 (c) จะแสดงทิศทางของ direct-axis flux ( main pole flux) , quadrature axis flux และ resultant flux ของ phase angle ของรูปที่ 6-3 (b) โดยลูกศรจะแสดงทิศทางของผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็ก (resultant flux) ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

### 6-3. ปฏิกริยามอเตอร์เหนี่ยวนำผ่าน Phase Splitting

ในการเริ่มต้นหมุนของ magnetic field ใน induction motor ที่ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า Single-phase ถ้าไม่มีตัวกลางทางกลเป็นอุปกรณ์ในการช่วยหมุน จะต้องใช้ขดลวด Stator 2 ชุด คือ ขดลวดสำหรับหมุน (main winding หรือ running winding) และขดลวดช่วยหมุนหรือขดลวดเริ่มต้นหมุน (auxiliary winding หรือ starting winding) โดยขดลวด main winding จะจ่าย direct-axis flux ( $\phi_d$ ) และ ขดลวด auxiliary winding จะจ่าย quadrature-axis flux ( $\phi_q$ ) ซึ่งขดลวด auxiliary winding จะวางตัวอยู่ใน slot ของ stator ห่างจากขด main winding เป็นมุม 90 องศาไฟฟ้า



(a)



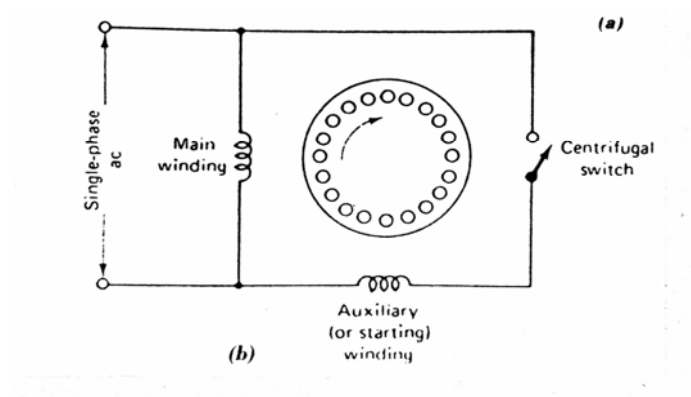
(b)

รูปที่ 6-4 (a) Elementary two-pole single phase motor with phase splitter ;

(b) equivalent circuit diagram

The phase splitter จะต่ออนุกรมกับขดลวด auxiliary winding และกระแสใน auxiliary winding จะ out of phase กับกระแสในขดลวด main winding ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสอยู่ใน phase เดียวกันกับ auxiliary winding คือ quadrature field และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสใน main winding คือ main field ก็จะทำต่าง phase (out of phase) กันด้วย ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน (rotating flux) และเกิดการเหนี่ยวนำที่ rotor จึงทำให้มอเตอร์หมุนไปได้ เมื่อ motor มีความเร็วประมาณ 75-80 % ของความเร็ว synchronous speed สวิตซ์หนีศูนย์กลาง (centrifugal switch) จะตัดวงจรของ auxiliary winding ออก มอเตอร์จะเหลือเพียง main winding เพียงชุดเดียว แต่มอเตอร์จะสร้างแรงบิด (Torque) ได้ใกล้เคียงกับขณะมีขดลวด auxiliary winding ต่อร่วมอยู่ด้วย

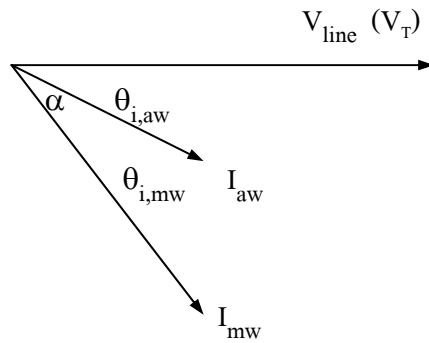
อุปกรณ์ phase splitter อาจจะใช้ Capacitance หรือ Resistance ถ้าใช้ capacitance จะเรียกมอเตอร์นั้นว่า “Capacitor-start split-phase motor” หรือถ้าใช้ resistance จะเรียกมอเตอร์นั้นว่า “Resistance-start split-phase motor”



รูปที่ 6-4 (c) circuit diagram ที่มี Centrifugal switch ต่อร่วม

### 6-4. Locked-rotor Torque

Locked rotor torque ของ split-phase motor (มอเตอร์แบบแยกเฟส) จะเป็นสัดส่วนของขนาดกระแส locked rotor ในขดลวด main winding และ auxiliary winding คูณกับค่า Sin ของมุมระหว่างกระแสทั้งสอง



ดังนั้นจะได้

$$T_{lr} = K_{sp} \cdot I_{mw} \cdot I_{aw} \sin \alpha \quad \text{-----} \quad 6.1$$

และ

$$\alpha = \left| \theta_{i,mw} - \theta_{i,aw} \right| \quad \text{-----} \quad 6.2$$

เมื่อ :  $T_{lr}$  = locked rotor torque

$K_{sp}$  = machine constant, split – phase motor

$I_{mw}$  = current in main winding (A)

$I_{aw}$  = current in auxiliary winding (A)

$\theta_{i,mw}$  = phase angle of current in main winding

$\theta_{i,aw}$  = phase angle of current in auxiliary winding

$\alpha$  = phase displacement between  $I_{aw}$  and  $I_{mw}$

$R_{mw}$  = resistance of main winding ( $\Omega$ )

$R_{aw}$  = resistance of auxiliary winding ( $\Omega$ )

$x_{mw}$  = reactance of main winding ( $\Omega$ )

$x_{aw}$  = reactance of auxiliary winding ( $\Omega$ )

**Example 6-1.** The main and auxiliary winding of a hypothetical 120 V, 60 Hz, split-phase motor have the following locked-rotor parameters:

$$R_{mw} = 2.00 \Omega \quad R_{aw} = 9.15 \Omega \quad x_{mw} = 3.50 \Omega \quad x_{aw} = 8.40 \Omega$$

The motor is connected to a 120 V, 60 Hz system. Determine:

- locked-rotor current in each winding.
- phase-displacement angle between the two current.
- locked-rotor torque in terms of a machine constant
- external resistance required in series with the auxiliary winding in order to obtain a  $30^\circ$  phase displacement between the current in the two winding
- locked-rotor torque for the conditions in (d)
- percent increase in locked-rotor torque due to the addition of external resistance

**Solution** a) locked-rotor current in each winding. ( $I_{mw}$ ,  $I_{aw}$ )

จากสมการ  $Z_{mw} = R_{mw} + j x_{mw} = 2.00 + j 3.50 = 4.0311 \angle 60.2551^\circ \Omega$

$$Z_{aw} = R_{aw} + j x_{aw} = 9.15 + j 8.40 = 12.4211 \angle 42.553^\circ \Omega$$

ดังนั้น current in main winding ( $I_{mw}$ ) จะได้ว่า

$$I_{mw} = V / Z_{mw} = (120 \angle 0^\circ) / (4.0311 \angle 60.2551^\circ) = 29.8 \angle -60.3^\circ \text{ A} \quad \text{--- Ans}$$

และ current in auxiliary winding ( $I_{aw}$ ) จะได้ว่า

$$I_{aw} = V / Z_{aw} = (120 \angle 0^\circ) / (12.4211 \angle 42.553^\circ) = 9.66 \angle -42.6^\circ \text{ A} \quad \text{--- Ans}$$

b) phase-displacement angle between the two current. ( $\alpha$ )

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } \alpha &= |\theta_{i,mw} - \theta_{i,aw}| = |-60.3 - (-42.6)| \\ &= 17.7^\circ \quad \text{--- Ans} \end{aligned}$$

c) locked-rotor torque in terms of a machine constant ( $T_{lr}$ )

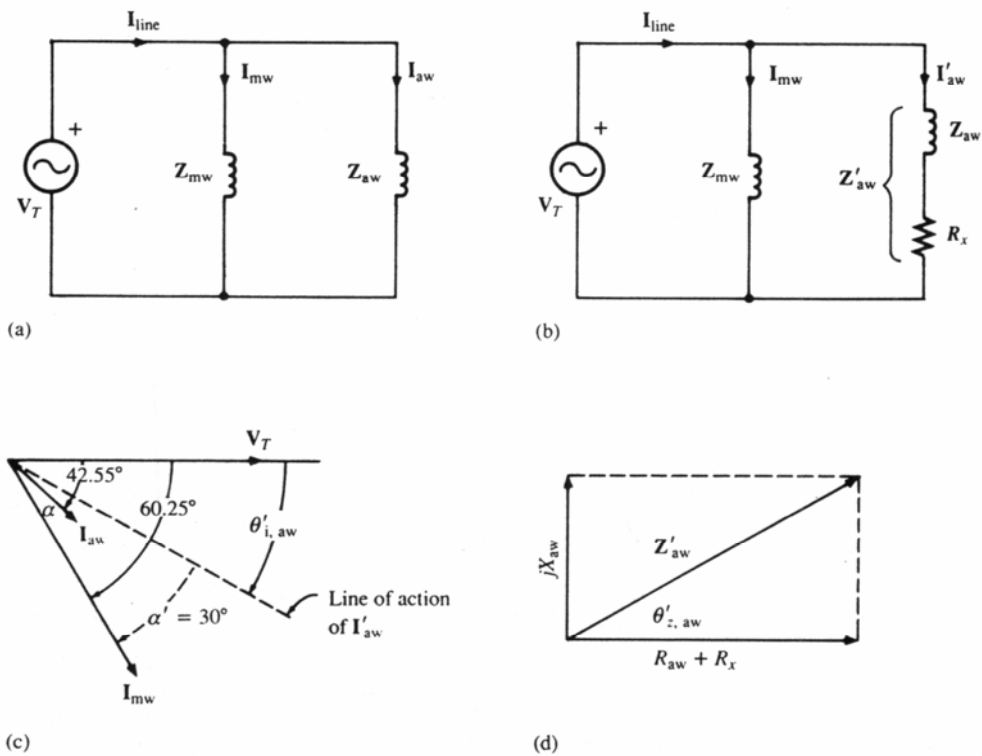
$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } T_{lr} &= K_{sp} \cdot I_{mw} \cdot I_{aw} \cdot \sin \alpha \\ &= K_{sp} (29.8) (9.66) (\sin 17.7^\circ) \end{aligned}$$



$$= 87.5 K_{sp}$$

Ans

d) external resistance required in series with the auxiliary winding in order to obtain a  $30^\circ$  phase displacement between the current in the two windings ( $R_x$ )



รูปที่ 6-5 Diagram for Example 6-1 (a) original circuit ; (b) modified circuit ;

(c) phasor diagram for determining required phase angle of auxiliary current for new condition ; (d) impedance diagram for new angle of auxiliary-circuit branch.

จากรูป (b) เมื่อนำความต้านทานภายนอก ( $R_x$ ) ต่ออนุกรมใน auxiliary winding ด้วยมุม phase displacement  $30^\circ$  ดังนั้นจะได้มุมของกระแส auxiliary winding ใหม่ ( $\theta_{i,aw}$ ) เมื่อเทียบกับแกน

$V_T$  คือ

$$\theta_{I_{1,aw}} = -60.3^\circ + 30^\circ = -30.3^\circ$$

จากกฎของ Ohm's Law เมื่อพิจารณาใน branch ของ auxiliary winding จะได้

$$I_{aw} = V_T / Z_{aw} \Rightarrow I_{aw} \angle -30.3^\circ = (V_T \angle 0^\circ) / (Z_{aw} \angle \theta_{Z_{aw}})$$

ดังนั้น  $\theta_{Z_{aw}} = 0 - (-30.3^\circ) = 30.3^\circ$

จาก impedance diagram สำหรับ auxiliary - circuit branch ใหม่ ในรูป (d) จะได้

$$\tan \theta_{Z_{aw}} = (X_{aw}) / (R_{aw} + R_x) \Rightarrow R_x = (X_{aw} / \tan \theta_{Z_{aw}}) - R_{aw}$$

$$R_x = [(8.40) / \tan (30.3^\circ)] - 9.15$$

$$= 5.25 \Omega$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

e) locked- rotor torque for the condition in (d)  $\Rightarrow (T_{lr})$

$$\text{จากสมการ } I_{aw} = V_T / Z_{aw} = V_T / (R_x + R_{aw}) + j X_{aw}$$

$$I_{aw} = (120 \angle 0^\circ) / [(5.25 + 9.15) + j 8.4]$$

$$= (120 \angle 0^\circ) / [14.4 + j 8.4]$$

$$= (120 \angle 0^\circ) / (16.67 \angle 30.3^\circ) = 7.198 \angle -30.3^\circ \text{ A}$$

$$\text{จากสมการ } T_{lr} = K_{sp} \cdot I_{mw} \cdot I_{aw} \cdot \sin \alpha$$

$$= K_{sp} (29.8) (7.198) (\sin 30^\circ)$$

$$= 107.25 K_{sp}$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

f) percent increase in locked – rotor torque due to the addition of external resistance

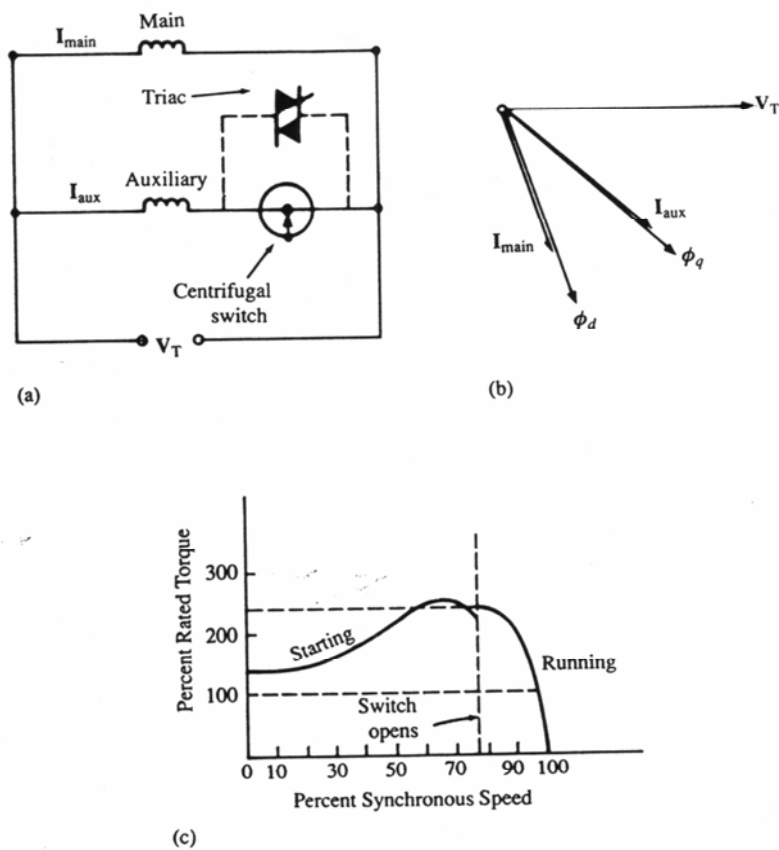
$$(107.25 - 87.5) / (87.5) \times 100 = 22.57 \%$$

ดังนั้น locked – rotor torque จะเพิ่มขึ้น 22.57 %

\_\_\_\_\_ **Ans**

-----

### 6-5. Practical Resistance–Start Split–phase Motor.



รูปที่ 6-6 Resistance–start split–phase motor: (a) circuit diagram ; (b) phasor diagram ; (c) torque-speed characteristic.

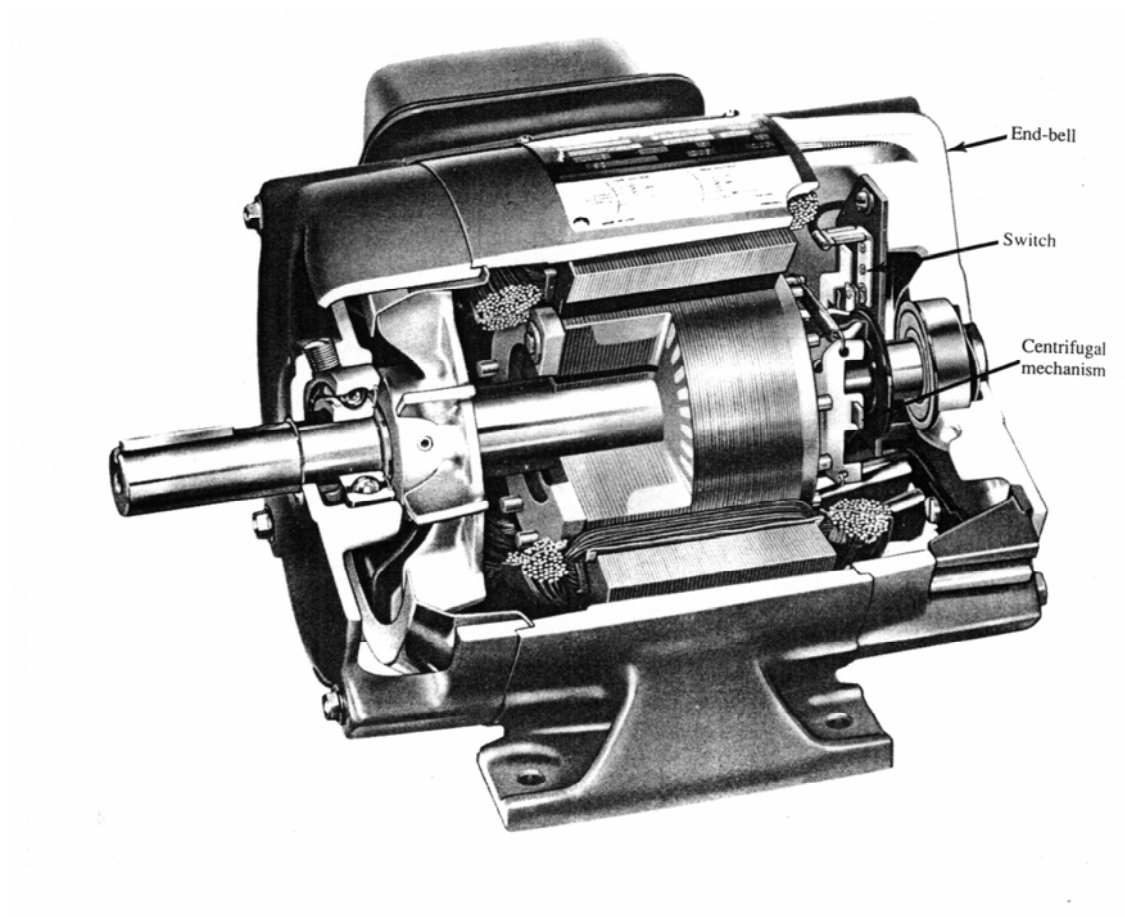
จากรูป 6-6 (a) แสดงวงจร circuit diagram ของ resistance–start split–phase motor โดยขดลวด auxiliary winding จะมีขนาดเล็กกว่าขดลวด main winding จึงทำให้มีค่าความต้านทานสูง และค่า reactance ต่ำ สวิตซ์ที่ติดตั้งใน auxiliary คือ magnetic relay, solid – state switch หรือ centrifugal switch การทำงานของ centrifugal switch จะต่อวงจร (closed) เมื่อเริ่ม start motor และเมื่อโรเต

อร์หมุนมีความเร็วประมาณ 75-80 % ของความเร็ว synchronous speed แล้ว centrifugal switch จะทำงานเปิด(open) วงจรออก

solid-state switch เรียกว่า triac (เส้นปะที่แสดงในรูปที่ 6-6 a) สวิตช์จะปิดวงจรขณะ Start และจะเปิดวงจรที่ตั้งไว้ประมาณ 75 % ของ synchronous speed เช่นเดียวกับ centrifugal switch

magnetic relay ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในรูป ตัว switch จะ close เมื่อมีกระแสเริ่ม Start สูง และตัวสปริงจะ open เมื่อการเร่งของมอเตอร์ลดกระแสไฟฟ้าลงมาประมาณ 80 % ของ locked rotor current

Resistance-start split-phase motor จะใช้งานในอุปกรณ์ centrifugal pump oil burners, blower หรือ load อื่น ๆ ที่ต้องการแรงบิดต่ำและความเร็วคงที่

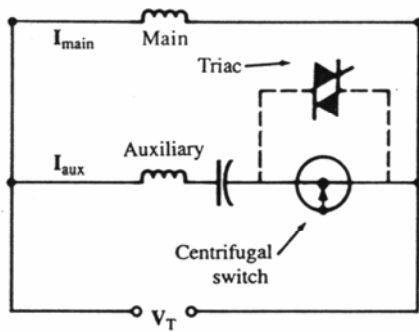


รูปที่ 6-7 Cutaway view of a split-phase motor

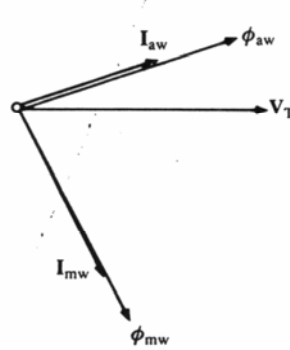
จากรูปที่ 6-7 เป็นมอเตอร์แบบ split-phase induction motor ที่แสดง centrifugal mechanism ติดตั้งอยู่บนเพลลาของ squirrel-cage rotor และตัว switch จะติดอยู่ที่ end-bell

### 6-6. Capacitor-Start Split-phase Motor.

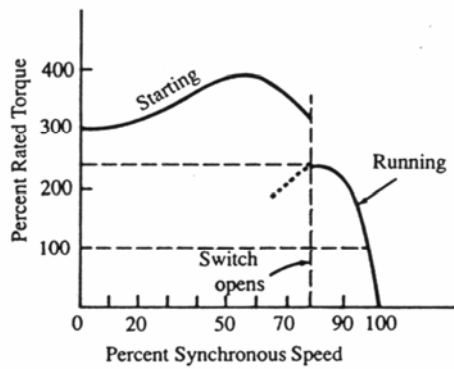
Capacitor-start split-phase motors เป็นมอเตอร์ที่นำเอา capacitor มาต่ออนุกรมกับขดลวด auxiliary winding จึงทำให้กระแสไฟฟ้า  $I_{aw}$  นำหน้าแรงดันไฟฟ้า  $V_T$  ซึ่งเป็นผลทำให้มีแรงบิดเริ่มต้นสูงกว่า resistance-start split-phase motor



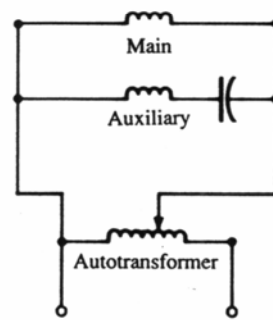
(a)



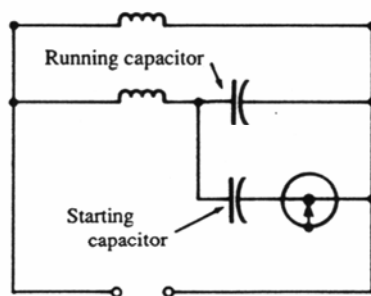
(b)



(c)



(d)



(e)

รูปที่ 6-8 Capacitor motors : (a) circuit for capacitor-start motor ; (b) phasor diagram corresponding to (a) ; (c) torque-speed characteristic for motor in (a) ; (d) permanent-split capacitor motor ; (e) two-value capacitor motor.

ค่าของ capacitor ที่ทำให้เกิด locked rotor torque สูงสุดใน capacitor-start split-phase motor จะทำให้ phase displacement angle ( $\alpha$ ) มีค่าระหว่าง  $75^\circ - 88^\circ$  เมื่อเปรียบเทียบกับ resistance-start split-phase motor ที่มี  $\alpha$  อยู่ระหว่าง  $25^\circ - 30^\circ$  ( $\alpha$  คือ มุมของกระแสไฟฟ้าระหว่าง main winding กับ auxiliary winding)

จากรูป 6-8 (a) แสดงวงจรของ capacitor-start split-phase motor ที่นำเอาค่า capacitor มาต่ออนุกรมกับขดลวด auxiliary winding

จากรูป 6-8 (b) แสดง phasor diagram ของมุมกระแสไฟฟ้าระหว่างขดลวด main winding กับขดลวด auxiliary winding โดยกระแสใน auxiliary winding จะนำหน้าแรงดันไฟฟ้า  $V_T$

จากรูป 6-8 (c) แสดงคุณลักษณะของ torque speed เมื่อเปรียบเทียบกับ resistance-start split-phase motor จะเห็นว่าคุณสมบัติของมอเตอร์ขณะ running จะเหมือนกัน แต่จะแตกต่างกันที่แรงบิดเริ่มต้น (starting torque) โดย capacitor-start split-phase motor จะมีแรงบิดเริ่มต้นประมาณ 300 % จาก rated torque ส่วน resistance-start split-phase motor จะมีแรงบิดเริ่มต้นประมาณ 130 % จาก rated torque ดังนั้น capacitor-start split-phase motor จึงนิยมใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นสูง เช่น เครื่องซักผ้า, เครื่องเป่าอากาศ, เครื่องเป่าผม, ปั๊ม และ compressor

#### ● Permanent-Split Capacitor Motor

Permanent-split capacitor motor ตามที่แสดงในรูปที่ 6-8 (d) จะใช้ capacitance ที่มีขนาดเล็ก และไม่มี switch ต่อในวงจร auxiliary winding การทำงานจะเรียบและเงียบกว่า capacitor-start split-phase motor หรือ resistance-start split-phase motor การปรับ speed จะใช้ auto transformer โดยการใช้ความต้านทานภายนอก หรือ reactance ต่ออนุกรมกับ main winding หรือต่ออนุกรมทั้ง 2 ขด คือ main winding กับ auxiliary winding

#### ● Two-Value Capacitor Motor

Two-value capacitor motor ตามที่แสดงในรูปที่ 6-8 (e) จะใช้ capacitance จำนวน 2 ตัว โดยใช้ในการ starting จำนวน 1 ตัว และ running จำนวน 1 ตัว โดยตัว capacitance ที่ช่วยในการ start จะมีขนาดใหญ่กว่าตัว capacitance ของขดลวด running จึงทำให้แรงบิด locked-rotor torque มากกว่า

permanent-split capacitor motor การใส่ capacitance จำนวน 2 ตัวนี้ จะเป็นผลทำให้การปรับปรุงค่า power factor และประสิทธิภาพดีขึ้น

**Example 6-2** The main and auxiliary winding of a hypothetical 120 V, 60 Hz, split-phase motor have the following locked-rotor parameter :

$$R_{mw} = 2.00 \ \Omega \quad X_{mw} = 3.50 \ \Omega \quad R_{aw} = 9.15 \ \Omega \quad X_{aw} = 8.40 \ \Omega$$

The motor is connected to a 120 V, 60 Hz system. Determine

- the capacitance required in series with the auxiliary winding in order to obtain a  $90^\circ$  phase displacement between the current in the main winding and the current in the auxiliary winding at locked rotor.
- Locked-rotor torque in terms of machine constant.

**Solution** a) the capacitance (c)

จาก  $Z_{mw} = R_{mw} + j X_{mw} = 2.00 + j 3.50 = 4.0311 \angle 60.2551^\circ = 4.03 \angle 60.26^\circ \ \Omega$

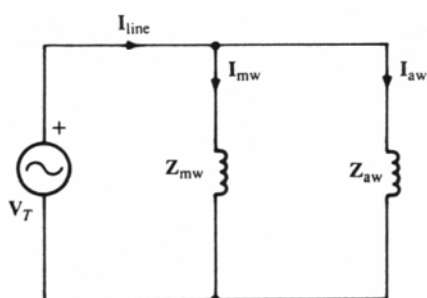
$$Z_{aw} = R_{aw} + j X_{aw} = 9.15 + j 8.40 = 12.4211 \angle 42.5530^\circ = 12.42 \angle 42.55^\circ \ \Omega$$

ดังนั้น current in main winding ( $I_{mw}$ ) จะได้

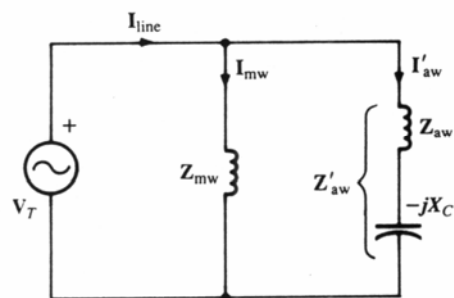
$$I_{mw} = V_T / Z_{mw} = (120 \angle 0^\circ) / (4.03 \angle 60.26^\circ) = 29.78 \angle -60.26^\circ \ \text{A}$$

และ current in auxiliary winding ( $I_{aw}$ ) จะได้

$$I_{aw} = V_T / Z_{aw} = (120 \angle 0^\circ) / (12.4211 \angle 42.55^\circ) = 9.66 \angle -42.55^\circ \ \text{A}$$

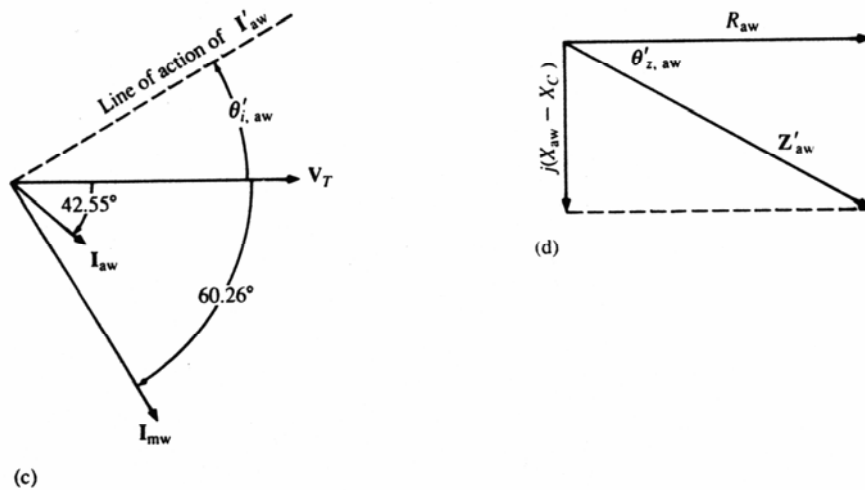


(a)



(b)

รูปที่ 6-9 Diagram for Example 6-2 : (a) original circuit ; (b) modified circuit



- (c) phasor diagram for determining required phase angle of auxiliary current for new conditions
- (d) impedance diagram for new auxiliary-circuit branch.

เมื่อนำ Capacitance มาต่ออนุกรมกับขดลวด auxiliary winding ด้วยมุม phase displacement  $90^\circ$  ดังนั้น phase angle ของกระแสใน auxiliary winding ใหม่ ( $\theta_{i,aw}$ ) เมื่อเทียบกับแกน  $V_T$  คือ

$$\theta_{i,aw} = \alpha - \theta_{i,mw} = 90^\circ - 60.26^\circ = 29.74^\circ$$

จากกฎของ Ohm's Law เมื่อพิจารณาใน branch ของ auxiliary winding จะได้

$$Z_{aw} \angle \theta_{z,aw} = (V_T \angle 0^\circ) / (I_{aw} \angle 29.74^\circ)$$

ดังนั้น  $\theta_{z,aw} = -29.74^\circ$

จาก impedance diagram ในรูปที่ 6-9 (d) จะได้

$$\tan(\theta_{z,aw}) = (X_{aw} - X_C) / (R_{aw})$$

$$\begin{aligned} X_C &= X_{aw} - (R_{aw} \cdot \tan(\theta_{z,aw})) \\ &= 8.40 - (9.15 \times \tan(-29.74^\circ)) = 13.63 \Omega \end{aligned}$$



จากสมการ  $X_c = 1 / (2\pi fC) \Rightarrow C = 1 / (2\pi fX_c)$

$C = 1 / [2 (3.14) (60) (13.63)] = 194.7 \mu F$  ————— **Ans**

b) locked-rotor torque in terms of the machine constant ( $T_{lr}$ )

จากสมการ  $I_{aw} = (V_T) / (Z_{aw}) = (V_T) / [R_{aw} + j(x_{aw} - x_c)]$

$$= (120 \angle 0^\circ) / [9.15 + j(8.40 - 13.63)]$$

$$= (120 \angle 0^\circ) / (9.15 - j 5.23)$$

$$= (120 \angle 0^\circ) / (10.54 \angle -29.75^\circ) = 11.39 \angle 29.74^\circ$$

ดังนั้น  $T_{lr} = K_{sp} \cdot I_{mw} \cdot I_{aw} \cdot \sin \alpha$

$$= K_{sp} (29.78) (11.39) (\sin 90^\circ)$$

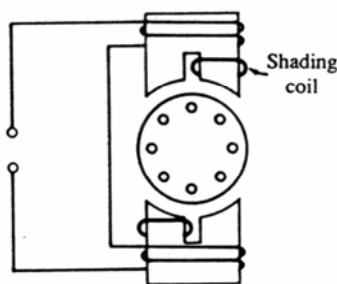
$$= 339.19 K_{sp}$$

————— **Ans**

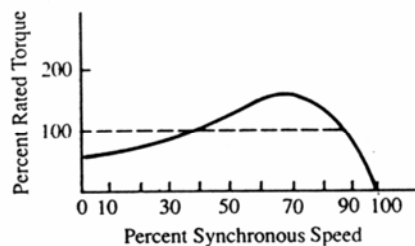
### 6-7. การกลับทิศทางการหมุนของ Single-phase Induction Motor

การกลับทิศทางการหมุนของ single-phase induction motor ทำได้โดยการหยุดมอเตอร์ก่อน แล้วทำการสลับขดลวดของวงจร auxiliary circuit และทำการ starting ใหม่ การกลับด้วยวิธีนี้เป็นการกลับทิศทางของ quadrature-axis flux ซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กที่หมุนมีทิศทางตรงกันข้าม

### 6-8. Shaded-Pole Motor



(a)



(b)

รูปที่ 6-10 Shaded-pole motor : (a) construction ; (b) torque-speed characteristic

โครงสร้างของ shaded-pole motor หรือ “มอเตอร์แบบบังขั้ว” ตามที่แสดงในรูปที่ 6-10 (a) จะมีขั้วส่วนหนึ่งถูกบังไว้ ตัวที่ไปบังขั้วนี้ก็คือ ขดลวดตัวนำที่ครบวงจร (short-circuit coil) หรือขดทองแดง (copper ring) ที่เรียกว่า “shading coil” ในการสร้างแรงบิดขณะ starting โดยขดลวด shading coil จะพันอยู่ที่บริเวณหน้าขั้ว (pole face) และส่วนที่บังขั้วของขั้วบนและขั้วล่างนั้นจะอยู่เยื้องกัน ส่วนนี้จึงเรียกว่าส่วนที่เป็น shaded (บังไว้) และอีกส่วนหนึ่งที่ไม่ถูกบังจะเป็น unshaded (ไม่บัง)

เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดกระตุ้น (exciting coil) ซึ่งพันอยู่รอบ ๆ ขั้วแม่เหล็กทั้งขั้วนั้นย่อมทำให้แกนของขั้วแม่เหล็กเลื่อนจากส่วนที่ unshaded ไปยังส่วนที่ shaded จากการที่แกนของขั้วแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปนี้จึงเป็นผลทำให้คล้ายกับว่ามีขั้วแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปจริง ดังนั้นจึงทำให้ rotor เริ่มต้นหมุนไปในทิศทางที่เคลื่อนที่นี้ นั่นคือเคลื่อนที่จากส่วนที่ยังไม่ได้บังขั้ว (unshaded) ไปยังส่วนที่บังขั้ว (shaded)

รูปที่ 6-10 (b) แสดงคุณลักษณะระหว่างแรงบิดกับความเร็ว synchronous speed ของ shaded-pole motor เมื่อมอเตอร์มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนจนกระทั่งความเร็วประมาณ 70 % ของ synchronous speed แรงบิดจะลดลงจนกระทั่งเท่ากับศูนย์

Shaded-pole motor ไม่สามารถกลับทิศทางหมุนได้ เว้นแต่จะมีชุด shading coil 2 ชุด และ switches 2 ตัว โดยชุดหนึ่งจะมีทิศทางหมุนไปทางหนึ่ง (ตามเข็มนาฬิกา) และอีกชุดหนึ่งจะมีทิศทางหมุนตรงข้ามกัน (ทวนเข็มนาฬิกา) อุปกรณ์เครื่องใช้ที่ใช้ shaded-pole motor ได้แก่ นาฬิกาพกคมนาฬิกาเล็ก , record players เป็นต้น

### 6-9. NEMA Standard Ratings for Single-phase Induction Motor

ตามมาตรฐาน NEMA ได้กำหนด frequency และ voltage rated สำหรับ single-phase induction motor คือ

$$60 \text{ Hz} \Rightarrow 115 \text{ V and } 230 \text{ V}$$

$$50 \text{ Hz} \Rightarrow 110 \text{ V and } 220 \text{ V}$$

และมาตรฐาน NEMA ได้กำหนด power rating สำหรับ single-phase induction motor ไว้ในตารางที่ 6-1

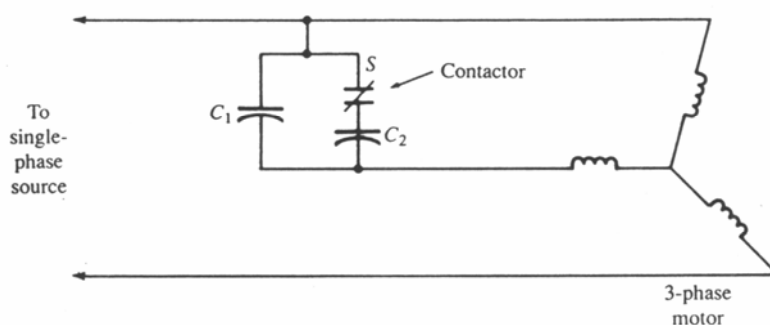
ตารางที่ 6-1 Range of standard power rating single-phase motor

Motor	Power Range
Capacitor start	1 mhp to 10 hp
Resistance start	1 mhp to 10 hp

Two-value capacitor	1 mhp to 10 hp
Permanent-split capacitor	1 mhp to 1.5 hp
Shaded-pole	1 mhp to 1.5 hp

### 6-10 Operation of Three-phase Motor from Single-phase Lines.

ในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า single-phase system เพียงอย่างเดียว และต้องการมอเตอร์ที่มีขนาด power rating มาก ๆ มาใช้งาน เนื่องจากมอเตอร์แบบ single-phase จะมี power rating จำกัดไม่เกิน 10 hp. จึงจำเป็นต้องหา Three-phase motor มาใช้งาน โดยนำมาต่อเข้ากับแหล่งกำเนิด single-phase ก็สามารถทำได้ โดยใช้ capacitors สำหรับแปรสภาพ phase (capacitor phase conversion) เพื่อลด breakdown torque , และอุณหภูมิที่สูงขึ้นของ motor โดยจะลด Power rated ลงประมาณ 2/3 ของ 3 phase power rating.



รูปที่ 6-11 Capacitor connection and switching arrangement for operating 3 phase motor form a single-phase line.

จากรูปแสดงมอเตอร์แบบ 3 phase ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า single-phase โดยมี capacitor และ switching ควบคุมการทำงานในการ starting และ running เมื่อมอเตอร์เริ่ม start ตัว contactor S จะ ปิด (close) ต่อวงจร และเมื่อ rotor วิ่งไปถึงความเร็วประมาณ 80 % ของ synchronous speed แล้ว contactor S จะเปิด (open) วงจร

จากการศึกษาวิเคราะห์ระบบ 220V, 60 Hz, 3 phase induction motor ที่ทำงานในระบบ single-phase ด้วย capacitor phase converter จะพบว่า capacitance ที่ใช้ในการ start ที่ดีที่สุดจะมีค่าเท่ากับ

$$C_1 + C_2 \approx 230 \mu\text{F} / \text{hp} \quad \text{6.3}$$

และค่า capacitance ที่ใช้ในการ running ที่ดีที่สุด คือ

$$C_1 \approx 26.5 \mu\text{F} / \text{hp} \quad \text{6.4}$$

การลด breakdown torque และอุณหภูมิที่สูงขึ้นของ 3 phase motor ที่ทำงานจาก Single phase ด้วย capacitor phase converter จะต้องลด power rated ลงประมาณ 2/3 ของ 3-phase rating นั่นคือ

$$P_{\text{rated } 1-\phi} = \frac{2}{3} P_{\text{rated } 3-\phi} \quad (\text{hp}) \quad \text{6.5}$$

**Example 6-3** A large exhaust fan for a farm building on a remote farm requires a 35 hp, 1175 rpm. motor. The motor is to be operated from a 220 V, 60 Hz single-phase system. Determine:

a) the NEMA – standard horsepower rating of a 3-phase, design B motor that will provide satisfactory service when used with a capacitance phase converter.

b) the required running capacitance. ( $C_1$ )

c) the additional capacitance required for starting. ( $C_2$ )

**Solution** a) horse power rating of 3-phase. ( $P_{\text{rated } 3-\phi}$ )

จากสมการ  $P_{\text{rated } 1-\phi} = \frac{2}{3} P_{\text{rated } 3-\phi}$

ดังนั้น  $P_{\text{rated } 3-\phi} = \frac{3}{2} P_{\text{rated } 1-\phi}$   
 $= \frac{3}{2} \times 35 = 52.5 \text{ hp.}$

จากตารางที่ 5-1 ในบทที่ 5 ขนาดของมอเตอร์ที่ต้องการที่ใกล้เคียงและมีความเหมาะสม คือ ขนาด 4 pole 220 V 60 Hz 60 hp. ดังนั้น

$$P_{\text{rated } 3-\phi} \approx 60 \text{ hp.} \quad \text{Ans}$$

b) the required running capacitance ( $C_1$ )

จากสมการที่ 6.4 ค่า capacitance ที่ใช้ในการ running ที่ดีที่สุดคือ 26.5  $\mu\text{F} / \text{hp}$  ดังนั้นมอเตอร์ ขนาด 60 hp จะได้ค่า capacitance ที่ใช้ในการ running เท่ากับ

$$C_1 = 26.5 \mu\text{F} / \text{hp}$$

$$= 26.5 \times 60 = 1590 \mu\text{F} \quad \text{-----} \quad \underline{\text{Ans}}$$

c) the additional capacitance required for starting ( $C_2$ )

จากสมการที่ 6.3  $C_1 + C_2 \approx 230 \mu\text{F} / \text{hp}$

มอเตอร์ ขนาด 60 hp จะได้อ่า  $C_1 + C_2 = 230 \times 60 = 13,800 \mu\text{F}$

ดังนั้น  $C_2 = 13,800 - C_1$   
 $= 13,800 - 1590 = 12,210 \mu\text{F} \quad \text{-----} \quad \underline{\text{Ans}}$

### 6-11. Single-phasing (a fault condition)

Single – phasing คือ เงื่อนไขการเกิด fault เมื่อมอเตอร์ 3 phase ทำงานอยู่และเกิด fault ที่สายเส้นใดเส้นหนึ่งเปิดวงจรอยู่ ตามที่แสดงในรูป 6-12 (b) และ 6-13 (b) ถึงแม้ว่ามอเตอร์ 3 phase จะไม่ start เมื่อสายที่เกิด fault เปิดวงจรอยู่ แต่ถ้ามอเตอร์กำลังทำงานอยู่ และเกิด fault ในสายเส้นใดเส้นหนึ่งของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3 phase มอเตอร์ก็ยังทำงานอยู่ได้ จนกระทั่ง shaft load น้อยกว่า 80 % ของ rated load และ single phase voltage ที่เหลืออยู่ยังคงทำงานปกติ โดยการหมุนของ rotor จะสร้าง quadrature field ซึ่งจะยังคงให้ rotor หมุนอยู่ได้

Single-phasing จะไม่เหมือนกับการทำงานของ phase converter และเกิดการสั่นสะเทือนมากกว่า โดยมอเตอร์จะไม่ได้รับความเสียหายจาก Single phasing เมื่อมันมี load ต่ออยู่

สมมุติว่า load ที่เพลาครั้งที่เมื่อเกิด Single – phasing ขณะที่มอเตอร์ 3 เฟส กำลังหมุนอยู่จะได้

$$P_{3-\phi} = P_{1-\phi}$$

$$\sqrt{3} V_{\text{line}} I_{\text{line}, 3-\phi} \text{ Pf}_{3-\phi} = V_{\text{line}} I_{\text{line}, 1-\phi} \text{ Pf}_{1-\phi}$$

$$I_{\text{line}, 1-\phi} = \sqrt{3} I_{\text{line}, 3-\phi} (\text{Pf}_{3-\phi} / \text{Pf}_{1-\phi})$$

----- 6.6

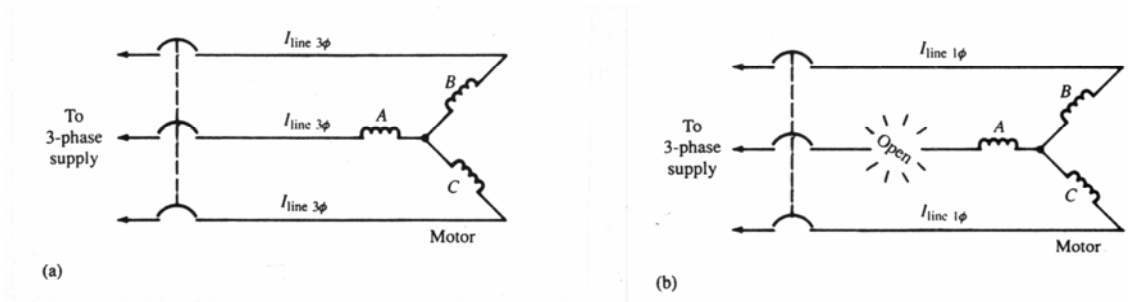
เมื่อ :  $I_{\text{line}, 1-\phi} =$  line current when single – phasing.

$I_{\text{line}, 3-\phi} =$  line current when operating 3 phase.

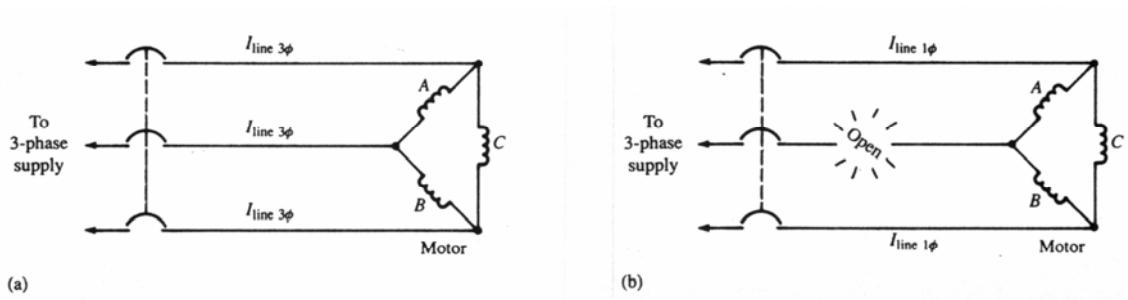
$\text{Pf}_{1-\phi} =$  Power factor when single – phasing.

$\text{Pf}_{3-\phi} =$  Power factor when operating 3 phase.

ถ้า stator ของมอเตอร์ 3 เฟส ต่อเป็นแบบ Wye-connected ตามที่แสดงในรูป 6-12 หรือต่อแบบ Delta-connected ตามที่แสดงในรูปที่ 6-13 เมื่อเกิด Single-phasing กระแสใน line ที่เหลืออยู่ใน 2 เส้น จะเพิ่มขึ้นประมาณ 73 % จาก  $I_{line\ 3\phi}$  โดยกระแสจะกระจายในขดลวด stator winding และจะขึ้นอยู่กับว่าขดลวดต่อเป็นแบบ Wye-connected หรือ Delta-connected



รูปที่ 6-12 Wye-connected motor : (a) normal ; (b) single-phasing



รูปที่ 6-13 Delta-connected motor : (a) normal ; (b) single-phasing

จากรูปที่ 6-12 แสดงมอเตอร์ 3 เฟส ที่ต่อแบบ Wye-connected เมื่อเกิด single-phasing จะได้ phase current เท่ากับ line current นั่นคือ

$I_{YA} = 0$
$I_{YB} = I_{YC} = I_{line\ 1\phi}$

————— 6.7

จากรูปที่ 6-13 แสดงมอเตอร์ 3 เฟส ที่ต่อแบบ Delta-connected เมื่อเกิด single-phasing ตามที่แสดงในรูป 6-13 (b) phase current จะถูกแบ่งเป็นสัดส่วนกับค่า impedance ที่ต่อขนาน ดังนั้นการกระจายของกระแสสำหรับการต่อแบบ Delta connect จะได้ phase current คือ

$I_{\Delta A} = I_{\Delta B} = 1/3 I_{\text{line}, 1-\phi}$	————— 6.8
$I_{\Delta C} = 2/3 I_{\text{line}, 1-\phi}$	

**Example 6-4** A 3 phase, 2300 V. 350 hp 78 A 60 Hz four-pole, Wye-connected design B motor operating at one – half rated load has an efficiency and power factor of a 93.6 and 84.4 percent, respectively. Determine.

- a) motor line current and motor phase current.
- b) motor line current and phase current if one line open. ; assume the efficiency and power factor are essentially the same as before the open occurred
- c) the line and phase current if the power factor when shingle – phasing is 82.0 percent.

**Solution** a) motor line current and motor phase current. ( $I_{\text{line } 3-\phi}, I_{\text{phase } 3-\phi}$ )

โจทย์กำหนดขนาดมอเตอร์ 350 hp ทำงาน ½ ของ rated load ที่ประสิทธิภาพ 93.6 %

ดังนั้นจากสมการ  $\eta = (P_{\text{out } 3-\phi}) / (P_{\text{in } 3-\phi})$

$$\begin{aligned} (P_{\text{in } 3-\phi}) &= (P_{\text{out } 3-\phi}) / \eta \\ &= (350/2) (746) / (0.936) = 139,476.5 \text{ W.} \end{aligned}$$

จากสมการ  $P_{\text{in } 3-\phi} = \sqrt{3} V_{\text{line } 3-\phi} I_{\text{line } 3-\phi} \cos \theta$

$$\begin{aligned} I_{\text{line } 3-\phi} &= P_{\text{in } 3-\phi} / \sqrt{3} V_L \cos \theta \\ &= 139,476.5 / \sqrt{3} (2300) (0.844) \\ &= 41.5 \text{ A} \end{aligned}$$

————— **Ans**

มอเตอร์ต่อแบบ Wye-connected ดังนั้น

$$I_{\text{phase } 3-\phi} = I_{\text{line } 3-\phi} = 41.5 \text{ A} \quad \text{————— } \mathbf{Ans}$$

b) motor line current and phase current if one line open. ( $I_{\text{line } 1-\phi}, I_{\text{phase } 1-\phi}$ )

เมื่อเกิด Single – phasing จากสมการ

$$\begin{aligned} I_{\text{line}, 1-\phi} &= \sqrt{3} I_{\text{line}, 3-\phi} (Pf_{3-\phi} / Pf_{1-\phi}) \\ &= \sqrt{3} (41.5) (0.844 / 0.844) \end{aligned}$$

$$= 71.9 \text{ A} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{Ans}$$

มอเตอร์ต่อแบบ wye-connected เมื่อเกิด single-phasing ค่า  $I_{\text{phase } 1-\text{r}} = I_{\text{line } 1-\text{r}}$

ดังนั้น  $I_{\text{phase } 1-\text{r}} = I_{\text{line } 1-\text{r}} = 71.9 \text{ A.} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{Ans}$

c) the line and phase current ( $I_{\text{line } 1-\text{r}}, I_{\text{phase } 1-\text{r}}$ ) if the power factor when shingle-phasing is 82.0 %

จากสมการ  $I_{\text{line } 1-\text{r}} = \sqrt{3} I_{\text{line } 3-\text{r}} (Pf_{3-\text{r}} / Pf_{1-\text{r}})$

$$= \sqrt{3} (41.5) (0.844 / 0.82)$$

$$= 73.98 \text{ A} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{Ans}$$

มอเตอร์ต่อแบบ wye-connected เมื่อเกิด single-phasing ค่า  $I_{\text{phase } 1-\text{r}} = I_{\text{line } 1-\text{r}}$

ดังนั้น  $I_{\text{phase } 1-\text{r}} = I_{\text{line } 1-\text{r}} = 73.98 \text{ A.} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{Ans}$

-----



## SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING

### Lock-rotor condition (Single-phase motors)

$$T_{lr} = K_{sp} \cdot I_{mw} \cdot I_{aw} \sin \alpha$$

$$\alpha = \left| \theta_{i,mw} - \theta_{i,aw} \right|$$

### Operation of three-phase motor from single-phase lines

$$C_1 + C_2 \approx 230 \mu\text{F} / \text{hp}$$

$$C_1 \approx 26.5 \mu\text{F} / \text{hp}$$

$$P_{\text{rated } 1-\phi} = 2/3 P_{\text{rated } 3-\phi}$$

### Single-phasing (a fault condition)

$$I_{\text{line}, 1-\phi} = \sqrt{3} I_{\text{line}, 3-\phi} (\text{Pf}_{3-\phi} / \text{Pf}_{1-\phi})$$

Wye-connected

$$I_{YA} = 0$$

$$I_{YB} = I_{YC} = I_{\text{line}, 1-\phi}$$

Delta-connected

$$I_{\Delta A} = I_{\Delta B} = 1/3 I_{\text{line}, 1-\phi}$$

$$I_{\Delta C} = 2/3 I_{\text{line}, 1-\phi}$$

-----

## บทที่ 7

### มอเตอร์ชนิดพิเศษ (Specialty Motor)

#### 7-1 บทนำ

Specialty motor คือ เครื่องจักรกลที่นำไปใช้งานพิเศษ เช่น reluctance motor และ hysteresis motor ที่ใช้ในอุปกรณ์เกี่ยวกับเวลา, เครื่องอัดเสียง (tape records), turntable และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องการความเร็วคงที่

Stepper motor เป็นมอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับวงจรที่ขับเคลื่อน pulse (pulse driving circuit) เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่แน่นอนในระบบทางกล ดังนั้น stepper motor จึงนิยมใช้ในอุปกรณ์ disk drivers, printers plotters, robots (หุ่นยนต์) และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องการตำแหน่ง step-by-step ที่ถูกต้อง

Linear induction motor เป็นมอเตอร์ที่ใช้จ่ายแรงทางกล (mechanical forces) และการเคลื่อนที่ในแนวตรง หรือแนวโค้ง ดังนั้นมอเตอร์ชนิดนี้จึงนิยมใช้ในระบบบรรจุ, ระบบเปิดประตู, ปืนแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic guns), Liquid-metal pump สำหรับ nuclear reactors, ระบบขนส่งด้วยรางที่ต้องการความเร็วสูง (high-speed rail transportation)

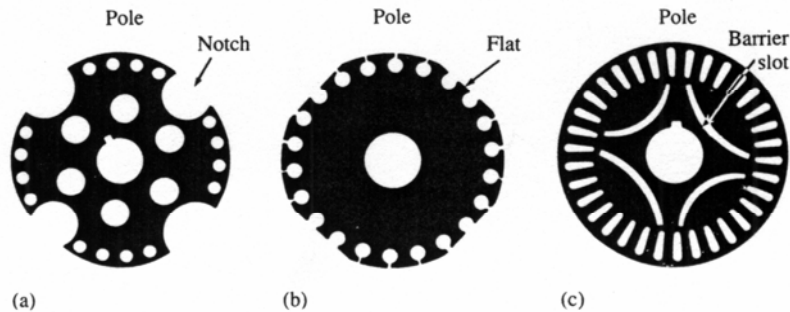
Universal motor เป็นมอเตอร์ที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ที่มีกำลังงานต่ำ เช่น เครื่องดูดฝุ่น เครื่องมือขนาดเล็ก และอุปกรณ์ที่ใช้ภายในครัว

#### 7-2 Reluctance Motor

Reluctance คือ ความต้านทานของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นมอเตอร์ชนิดนี้เริ่มต้นหมุนด้วย reluctance จะอาศัยความไม่เท่ากันของค่า reluctance กล่าวคือ ในบริเวณขั้วแม่เหล็กที่มี air gap แคบ จะมีค่า reluctance ต่ำ และ rotor จะหมุนจากส่วนที่มี air gap กว้างไปยังบริเวณที่แคบ

เมื่อขดลวด field ได้รับการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะสร้างฟลักแม่เหล็กขึ้น 2 ส่วน ที่มีลักษณะไม่ in phase กัน ในส่วนที่มี reluctance สูง จะสร้างฟลักแม่เหล็กที่ in phase กับกระแสไฟฟ้า ส่วนที่มี reluctance ต่ำ จะสร้างฟลักแม่เหล็กล่าช้า (Lagging) แรงดันไฟฟ้าเกือบ  $90^\circ$  ดังนั้นมอเตอร์จึงมีปฏิกิริยาล้ากับมีขดลวด 2 ชุด วางตัวอยู่ใน slot โดยมีมุมต่างเฟสกัน (เช่นเดียวกับ split-phase induction motor) และเป็นตัวการทำให้กระแสไฟฟ้ามีมุมต่างเฟสกันจึงสร้างสนามแม่เหล็กหมุนไปเหนี่ยวนำ rotor ทำให้มอเตอร์ จึงหมุนไปได้

Reluctance motor บางครั้งเรียกว่า “reluctance-synchronous motor” เป็น Induction motor ที่ปรับแต่ง squirrel-cage rotor ตามที่แสดงในรูปที่ 7.1

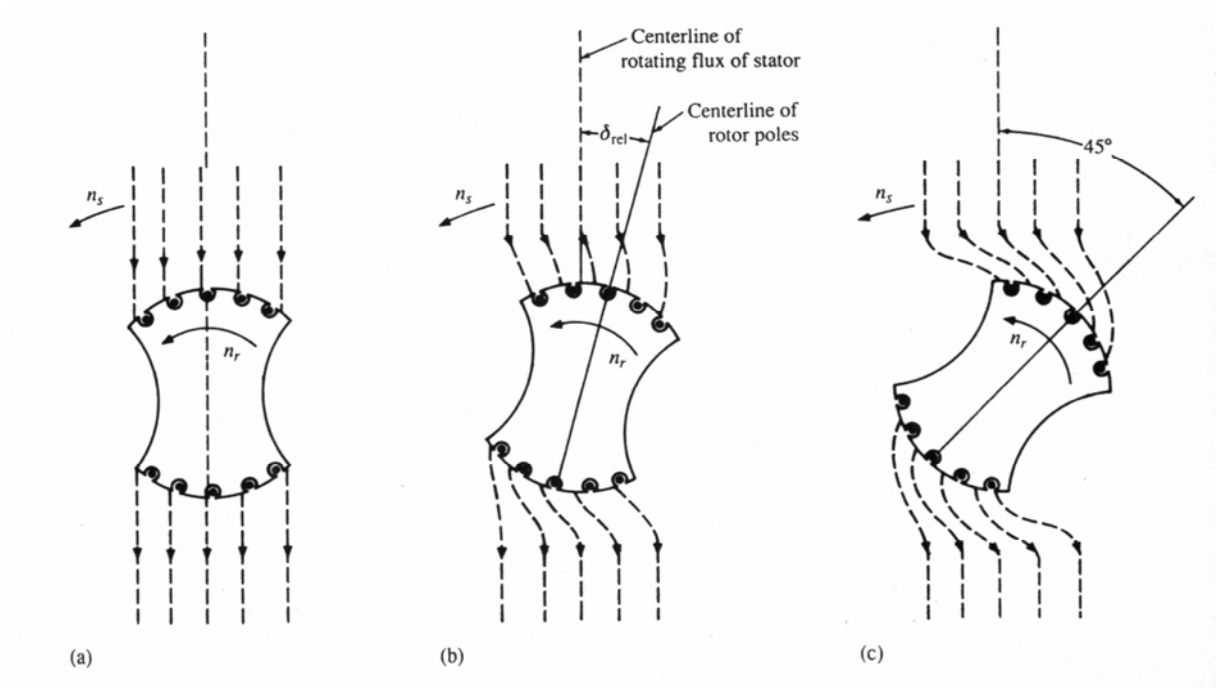


รูปที่ 7-1 Types of rotor laminations used in reluctance motors.

จากรูปที่ 7.1 (a) rotor มีลักษณะเป็นรูปรอยบากเรียกว่า “Notch” รูปที่ 7.1 (b) มีลักษณะที่ ลีกลงและทำให้หน้าเรียบ เรียกว่า “Flat” และรูปที่ 7.1 (c) เป็นแบบร่องกัน เรียกว่า “Barrier slot”

ดังนั้นบริเวณที่มีรอยบากจะลีกลงไปจะเป็นส่วนที่มีค่า reluctance สูง และ Section ของ rotor ในส่วนของพื้นที่มี high- reluctance เรียกว่า “salient pole” (ขั้วที่ล้ำเข้าไป) โดยจำนวนของ salient pole จะเท่ากับจำนวนของ stator pole

เมื่อ stator ทำงาน rotor จะถูกเร่งให้เร็วขึ้นเหมือน squirrel cage induction motor จนเข้าใกล้ synchronous speed ค่า slip จะน้อยมาก และ rotating flux ของ stator จะเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ผ่าน salient pole ของ rotor ส่วนที่เป็น Low- reluctance. ของ salient pole จะกระชอกคล้อยไปกับการหมุน ของเส้นแรงแม่เหล็กของ stator เมื่อเป็นเช่นนั้น ค่า slip จะเท่ากับศูนย์ ทำให้หยุด การเกิด induction motor action และ rotor จะถูกดึงไปรอบ ๆ โดยการดึงดูดจากสนามแม่เหล็ก เราเรียกว่า “reluctance torque” ( $T_{rel}$ )



รูปที่ 7-2 Simulated stroboscopic view of a reluctance motor, showing position of rotor with respect to the rotating field for: (a) no load; (b) partially loaded; (c) maximum load.

จากรูปที่ 7-2 แสดงแบบจำลองรูปการเคลื่อนตัวของ reluctance rotor ขณะเมื่อ No load และมี load. โดยจะทำงานสอดคล้องกับการหมุนของเส้นแรงแม่เหล็กของ stator.

รูปที่ 7-2 (a) เมื่อไม่มี load มาต่อที่เพลลาของ rotor (no shaft load) และไม่คิดค่าการสูญเสีย rotational losses. จะเห็นว่าเส้น centerline ของ rotor จะอยู่ในแนวตรงกับเส้น centerline ของ stator.

รูปที่ 7-2 (b) เมื่อใส่ load ที่เพลลาของ rotor จะทำให้ rotor ลดความเร็วลง ทำให้ salient pole ของ rotor ล้าหลัง (lagging) rotating pole ของ stator โดยมุมที่ล้าหลังเรียกว่า “torque angle” ( $\delta_{rel}$ )

รูปที่ 7-2 (c) ขณะที่ความเร็วของ rotor ลดลงเพื่อปรับแต่งมุมให้เรียบร้อย rotor จะกลับเข้าสู่ความเร็ว synchronous speed ที่มุม torque angle อันใหม่ การเพิ่มของ reluctance torque เกิดจากการเพิ่มของมุม torque angle ทำให้ torque load สมดุลที่เพลลา การเพิ่มของ reluctance torque จากการเพิ่มของมุม torque angle จะมีค่าสูงสุดที่มุม torque angle มีค่าเท่ากับ 45 องศา ( $\delta_{rel} = 45^\circ$ )

ถ้า shaft load เพิ่มขึ้นจนทำให้ค่า torque angle มีค่ามุมมากกว่า  $45^\circ$  ความยาวของสนามแม่เหล็ก ระหว่างเส้น centerline ของ rotating flux ของ stator และ centerline ของ rotor pole จะทำให้เส้นแรง แม่เหล็กลดลง และเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกยืดออกไป rotor จะหลุดออกนอก synchronism คือ ความเร็ว ของ rotor มากกว่าความเร็ว synchronous speed และเครื่องจะวิ่งในลักษณะ induction motor ที่ slip speed ทำให้เกิดการ over- load

slip speed ( $n$ ) คือ ความแตกต่างระหว่างความเร็วของ synchronous-speed กับความเร็วของ rotor ( $n = n_s - n_r$ )

ค่าเฉลี่ยของ reluctance torque ที่แสดงในรูปของ voltage, frequency และมุม torque angle หาได้จากสมการ

$$T_{rel} = k (V^2 / f) \sin (2\delta_{rel}) \quad \text{—————} \quad 7.1$$

- เมื่อ  $T_{rel}$  = average value of reluctance torque. (lb-ft)  
 $V$  = applied voltage (V)  
 $f$  = line frequency (Hz)  
 $(\delta_{rel})$  = torque angle (electric degrees)  
 $k$  = constant of reluctance motor  
 $2$  = จำนวนขั้วแม่เหล็กที่ stator คือ ขั้ว N และ S เนื่องจาก ตำแหน่งที่ rotor ถ้าหลังเป็น มุม torque angle จะอยู่ระหว่างขั้ว N และ S ของ stator

จากสมการที่ 7.1 และจากรูปที่ 7-2 การเพิ่มแต่ละครั้งใน shaft load บวกกับการเพิ่มของมุม torque angle ค่าสูงสุดของ reluctance torque จะเรียกว่า “pull-out torque” จะเกิดเมื่อมุม torque angle มีค่าเท่ากับ  $45^\circ$  ( $\delta_{rel} = 45^\circ$ )

**Example 7-1** A certain 10-hp, four poles, 240 V, 60 Hz reluctance motor, operating under rated load condition. has a torque angle of  $30^\circ$  Determine :

- torque load on the shaft.
- torque angle if the voltage drops to 224 V.
- will the rotor pull out of synchronism ?

**Solution** a) torque load on the shaft\_ ( $T_{\text{shaft}}$  หรือ reluctance torque :  $T_{\text{rel}}$ )

$$\text{จากสมการ } n_s = (120 f) / p = 120 (60) / 4 = 1800 \text{ r/min}$$

$$\text{และสมการ } P_{\text{shaft}} = T n_r / 5252$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } T_{\text{shaft}} \text{ หรือ } T_{\text{rel}} &= [P_{\text{shaft}} (5252)] / n_r \\ &= [(10 \text{ hp}) (5252)] / 1800 \\ &= 29.18 \text{ lb-ft} \end{aligned}$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

b) torque angle if the voltage drops to 224 V ( $\delta_{\text{rel}})_2$

เมื่อ torque load และค่า frequency คงที่ ดังนั้นจากสมการ  $T_{\text{rel}} = k (V^2 / f) \sin (2\delta_{\text{rel}})$  จะ  
ได้

$$[ T_{\text{rel}} ]_1 = [ T_{\text{rel}} ]_2$$

$$[ k (V^2 / f) \sin (2\delta_{\text{rel}}) ]_1 = [ k (V^2 / f) \sin (2\delta_{\text{rel}}) ]_2$$

$$[(240)^2 \sin (2 \times 30)] = (224)^2 \sin (2\delta_{\text{rel}})_2$$

$$\sin (2\delta_{\text{rel}})_2 = [(240)^2 (\sin 60)] / (224)^2 = 0.9942$$

$$(2\delta_{\text{rel}})_2 = \sin^{-1} 0.9942 = 83.8261^\circ$$

$$(\delta_{\text{rel}})_2 = 83.8261^\circ / 2 = 41.91^\circ$$

\_\_\_\_\_ **Ans**

c) Will the pull out of synchronism ?

จากข้อ b) มุม torque angle ( $\delta_{\text{rel}})_2$  มีค่าน้อยกว่า  $45^\circ$  ดังนั้น

The rotor will not pull out of synchronism.

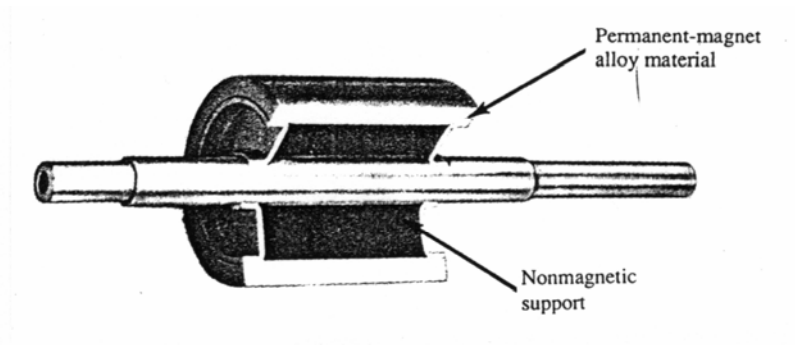
\_\_\_\_\_ **Ans**

-----

### 7-3 Hysteresis Motor

มอเตอร์แบบ Hysteresis เป็นมอเตอร์ที่สร้างแรงบิดได้ โดยอาศัยหลักการเกิด Hysteresis ในโลหะตัวนำแม่เหล็กของ Rotor และหมุนด้วยความเร็ว Synchronous speed

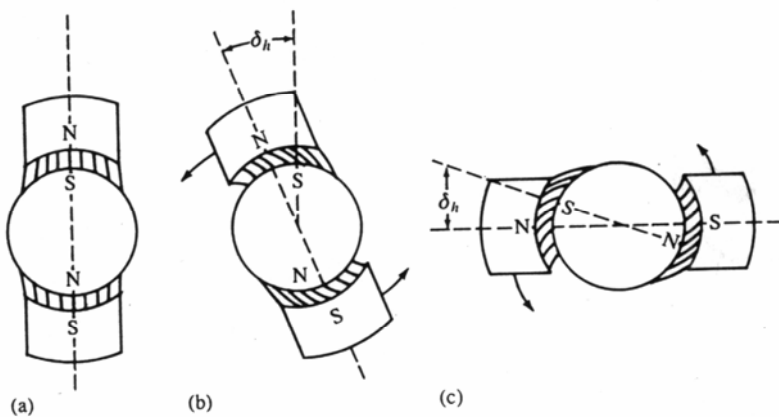
Stator ของ Hysteresis Motor บางทีเรียกว่า Hysteresis-Synchronous Motor จะเหมือนกับของ Induction Motor ส่วน Rotor ทำมาจากวัสดุตัวนำแม่เหล็กชนิดพิเศษโลหะ Alloy ที่เป็น Very Hard Permanent-Magnet และส่วนรองรับที่ไม่เป็นแม่เหล็ก (Nonmagnetic Support) ตามที่แสดงในรูปที่ 7-3



รูปที่ 7-3 Rotor of Hysteresis Motor

การทำงานของ Hysteresis Motor อาศัยหลักการของเส้นแรงแม่เหล็กของ Stator เคลื่อนที่ตัดกับ rotor จะเกิดการเหนี่ยวนำ และทำให้เกิด Hysteresis บริเวณวัสดุตัวนำแม่เหล็ก จึงมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างที่ Rotor

ปฏิกิริยาของเส้นแรงแม่เหล็กของทั้ง 2 ส่วนนี้ ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำใน Rotor และเส้นแรงแม่เหล็กของ Stator มีมุม Torque angle ต่างกันเป็นมุม  $\delta_h$  จึงจะทำให้เกิดแรงบิดที่มุมดังกล่าว ทำให้มอเตอร์หมุนไปได้



รูปที่ 7-4 Hysteresis motor behavior: (a) magnets and rotor stationary; (b) and (c) rotor blocked and magnets rotating.

รูปที่ 7-4 (a) แสดงเส้นแรงแม่เหล็กของ stator จะเหนี่ยวนำขั้วแม่เหล็กตรงข้ามของ hardened - alloy rotor ด้วยแม่เหล็กที่อยู่กับที่ จะเห็นว่าแกนแม่เหล็ก (magnetic axis) ขั้ว S ของ rotor จะอยู่ในแนวตรงกับแกนแม่เหล็กขั้ว N ของ stator

รูปที่ 7-4 (b) แสดงการหมุนของแม่เหล็กใน stator (stator magnet) ขณะที่ rotor อยู่กับที่ (rotor - blocked) ทำให้สนามแม่เหล็กที่หมุนซึ่งใช้แรงบิดกับการเหนี่ยวนำของขั้วแม่เหล็กใน rotor โดยขั้วแม่เหล็กของ rotor (ขั้ว S) จะล่าหลัง (lagging) ขั้วแม่เหล็กของ stator (ขั้ว N) ด้วยมุม  $\delta_h$

รูปที่ 7-4 (c) ขณะที่ขั้วแม่เหล็ก N ของ stator หมุน ขั้วแม่เหล็กเหนี่ยวนำ S ใน rotor จะเปลี่ยนตำแหน่งใหม่อย่างคงที่ ทำให้มุม  $\delta_h$  คงที่ เป็นผลทำให้เกิดแรงดึงดูดคงที่ และก็มีแรงบิดเร่งขึ้นคงที่ด้วย โดยแรงบิดที่คงที่จะเร่ง rotor ไปที่ synchronous speed.

กำลังงานที่ถ่ายให้กับ rotor โดยสนามแม่เหล็กที่หมุนของ stator จะอยู่ในรูปของกำลังงานความร้อน (hysteresis energy) และถูกใช้ไปเป็นการสูญเสียพลังงานความร้อน (heat-power losses) ที่ locked rotor

จากการศึกษาในบทที่ 1 section 1-7 ค่า hysteresis power losses ในรูปของความถี่ (frequency) และความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (flux density) หาได้จากสมการ

$$P_h = K_h f_r B_{max} \quad (1.13)$$

เมื่อ  $P_h$  = hysteresis power loss (W)

$K_h$  = constant of hysteresis motor

$f_r$  = frequency of the flux reversal in rotor (Hz)

$B_{max}$  = maximum value of flux density in air gap (T)

เมื่อ rotor หมุนอย่างอิสระ ค่า hysteresis power จะถูกเปลี่ยนไปในรูปของ mechanical power โดย mechanical power ที่ถูกสร้างใน rotor ระหว่างการเร่งของ rotor จะเป็น function ของ hysteresis power loss และ slip ดังนั้นจะได้สมการ

$$P_{mech} = P_h [(1 - S) / S] \quad \text{—————} \quad 7.2$$

เมื่อ:

$P_{mech}$  = mechanical power developed in the rotor.



จากสมการที่ 7.2 จะคล้ายกับสมการ mechanical power ที่สร้างใน induction motor ในบทที่ 4 คือ  
 สมการ  $P_{mech} = [3 I_r^2 R (1 - S)] / S$  และจากสมการของ  $P_{mech}$  ในเทอมของ torque และ rotor speed  
 คือ

$$P_{mech} = (T n_r) / 5252 \quad \text{————— 7.3}$$

เมื่อแทนค่า  $P_{mech} = (T n_r) / 5252$  จากสมการที่ 7.3 และ  $P_h = K_h f_r B_{max}$  จากสมการที่ 1.11  
 ลงในสมการที่ 7.2 จะได้

$$(T_h n_r) / 5252 = K_h \cdot f_r \cdot B_{max} [(1 - S) / S] \quad \text{————— 7.4}$$

จากบทที่ 4 เราได้สมการของ rotor speed และ ความถี่ในรูปแบบ slip คือ

$$n_r = n_s (1 - S) \quad (4.4)$$

และ

$$f_r = S f_s (1 - S) \quad (4.9)$$

เมื่อแทนค่า  $n_r$  ในสมการ 4.4 และ  $f_r$  ในสมการ 4.9 ลงในสมการที่ 7.4 จะได้

$$T_h [n_s (1 - S)] / 5252 = K_h \cdot (S \cdot f_s) B_{max}^n [(1 - S) / S]$$

$$T_h = (5252 k_h f_s^n B_{max}^n) / n_s \quad \text{————— 7.5}$$

แต่ค่า synchronous speed ใน terms ของความถี่ คือ  $N_s = (120 f_s) / P$  เมื่อแทนค่าลงในสมการ  
 ที่ 7.5 จะได้

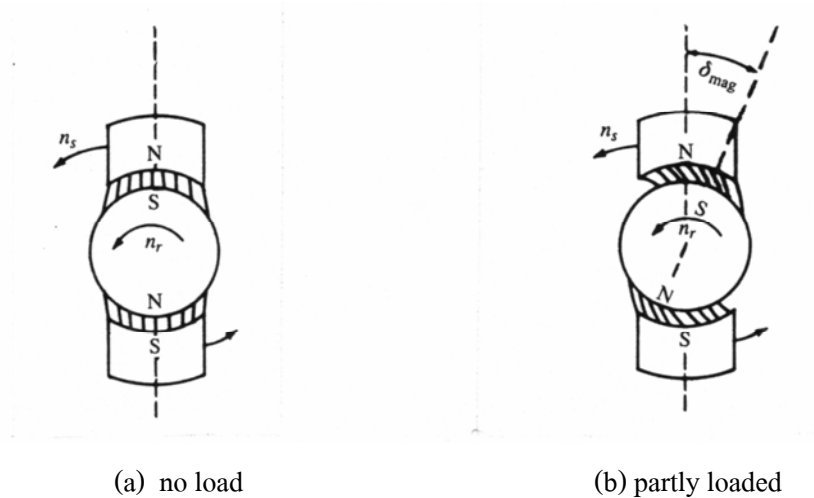
$$T_h = (5252 k_h f_s^n B_{max}^n) / (120 f_s / P)$$

$$T_h = (5252 k_h B_{max}^n) / (120 / P) \quad \text{(lb-ft) ——— 7.6}$$

เมื่อ:  $T_h =$  hysteresis torque

Hysteresis motor จะสร้าง hysteresis torque ( $T_h$ ) ที่คงที่ทุก ๆ ความเร็ว จากที่ rotor หยุดนิ่งไป  
 จนถึงความเร็วเกือบเท่า synchronous speed แต่ไม่รวมความเร็ว synchronous speed เพราะที่ synchronous  
 speed ตัว rotor จะกลายเป็นแม่เหล็กไปตามแกน random (random axis) และจะถูกดึงรอบ ๆ โดยแรง

ดึงดูดพื้นฐานของแม่เหล็ก ดังนั้นค่า hysteresis power ( $P_h$ ) และค่า hysteresis torque ( $T_h$ ) จะมีค่าเป็น ศูนย์ (Zero) ที่ synchronous speed



รูปที่ 7-5 Simulated stroboscopic views of and hysteresis motor operating at synchronous speed: (a) no load; (b) partly loaded.

จากรูปที่ 7-5 แสดงภาพจำลองของ hysteresis motor ทำงานที่ synchronous speed

รูปที่ 7-5 (a) สมมติว่าไม่มี load มาต่อที่เพลลาของ rotor (no load) และไม่คิดค่า rotational losses จะเห็นว่าเส้น centerline ของการเหนี่ยวนำของ rotor ยังอยู่ในแนวเดียวกับ centerline ของ rotating pole ที่สร้างโดย stator

รูปที่ 7-5 (b) เมื่อเพิ่ม load ที่เพลลาของ rotor เป็น step จะทำให้ rotor ค่อย ๆ ลดความเร็วลง ทำให้แม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ rotor (induced rotor - magnet) ล้าหลัง (Lagging) rotating pole ของ stator เป็นมุม  $\delta_{mag}$  และขณะที่ความเร็วช้าลงชั่วขณะ การปรับแต่งมุมก็จะ completed ทำให้ rotor กลับเข้าสู่ synchronous speed ที่มุม torque angle อันใหม่ การเพิ่มแรงบิดแม่เหล็ก (torque magnet) โดยการเพิ่ม torque angle จะทำให้เกิดการสมดุลของ load torque ที่เพลลา

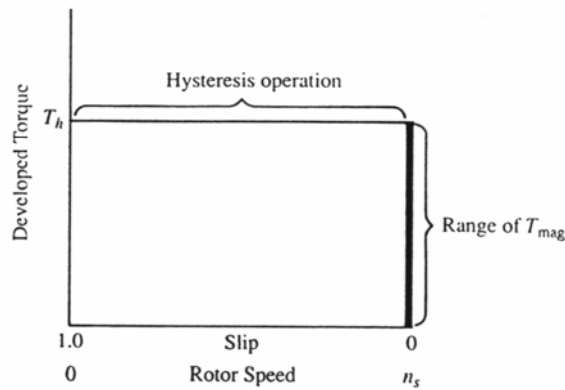
Magnet torque ( $T_{mag}$ ) จะเกิดขึ้นที่ความเร็ว synchronous speed เท่านั้น และเป็นสัดส่วนกับค่า sin ของมุม torque angle ( $\delta_{mag}$ ) นั่นคือ

$$T_{mag} \propto \sin(\delta_{mag}) \quad \text{--- 7.7}$$

$$S = 0$$

Magnet torque ( $T_{mag}$ ) จะเพิ่มตามมุม torque angle และจะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $\delta_{mag} = 90^\circ$

ถ้า shaft load เพิ่มขึ้นจนทำให้ค่ามุมของ torque angle มากกว่า  $90^\circ$  ( $\delta_{mag} > 90^\circ$ ) rotor จะถูกดึงออกนอก synchronism และ magnet torque จะตกลงเป็นศูนย์ ถึงแม้ว่าเครื่องจะพยายามสร้าง hysteresis torque มันก็ยังไม่พอที่จะแบกภาระ load ได้ ซึ่งจะทำให้เสีย synchronism ไป ดังนั้นจึงทำให้เกิดการ over-load.



รูปที่ 7-6 Representative torque-speed characteristic of an hysteresis motor.

จากรูป 7-6 เป็นการแสดงคุณสมบัติของ torque speed ของ hysteresis motor โดยเส้นทึบจะชี้แสดงระยะปกติของการทำงานขณะ running ที่ synchronous speed ซึ่งสามารถแสดงในรูปของคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{T_{mag}}{S=0} \leq T_h \quad \text{—————} \quad 7.8$$

และ

$$T_{mag \max} \Big|_{S=0} = T_h \quad \text{—————} \quad 7.9$$

### ลักษณะพิเศษของ Hysteresis Motor

1. Hysteresis torque มีค่าคงที่จาก locked-rotor ไปถึง synchronous speed ทำให้ hysteresis motor ที่ต่อเข้ากับทุก load สามารถเร่งขึ้นได้ ซึ่ง motor ชนิดอื่น ๆ ไม่สามารถกระทำได้
2. Rotor เป็นแบบเรียบ (smooth rotor) ทำให้การทำงานเงียบ โดยไม่ต้องทนต่อการกระแทกของแม่เหล็กที่เกิดจาก slot หรือ salient pole ซึ่งมีอยู่ใน rotor ของมอเตอร์ชนิดอื่น
3. ค่าความต้านทานสัมพัทธ์ (relatively resistance) และค่า reactance สูง ทำให้จำกัดกระแสขณะ starting ประมาณ 150 % ของ rated current ซึ่งจะตรงข้ามกับ reluctance rotor ที่มีค่า resistance และ reactance ต่ำ ทำให้กระแสของ locked-rotor ประมาณ 600 % ของ rated current.

เมื่อเปรียบเทียบกับ reluctance motor ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน การทำงานของ hysteresis motor จะเงียบมาก และมีอัตราการเร่งสูง นั่นคือจะเปลี่ยนจากสภาพ Locked-rotor ที่เข้าสู่สภาพ synchronous speed

ได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นขณะเริ่ม starting จะมีลักษณะนุ่มนวลและมีความเร็วคงที่ จึงเหมาะสำหรับใช้งานกับ load ที่ต้องการความเร็วคงที่ เช่น เป็นตัวขับเคลื่อนในนาฬิกาไฟฟ้า , ขับแผ่นเสียง และเครื่องบันทึกเสียง

- **Hysteresis - Reluctance Motor**

Hysteresis-reluctance motor จะรวมคุณสมบัติของแรงบิด (torque) ของ hysteresis motor กับ reluctance motor เข้าด้วยกัน โดยคุณสมบัติที่ได้จากการตัด reluctance notch ใน hysteresis ring ซึ่งเป็นผลกระทบต่อ salient pole

Hysteresis- reluctance motor เป็นมอเตอร์ที่ใช้งานในหุ่นยนต์ (robotics) , เครื่องมือกล (machine tool) และโรงงานอุตสาหกรรมทอผ้า (tex - tile industries )

#### 7-4 Stepper Motor

Stepper motor บางทีเรียกว่า "stepping motor" หรือ "step motor" เป็น motor ที่ขับเคลื่อนโดย pulse ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของมุม angular เป็น step ในการตอบสนอง input pulse จากระบบควบคุม digital

Stepper motor จะทำงานเป็น step ดังนั้นจึงนิยมใช้งานในระบบ computer เช่น ใช้ขับเคลื่อนหัวอ่าน disk drive ของ computer , แคร่พิมพ์ , หัวพิมพ์และกระดาษป้อน printer , หุ่นยนต์ และอื่น ๆ ที่ต้องการการทำงานเป็น step

การเปลี่ยนมุม step (step angle :  $\beta$ ) ต่อ input pulse ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของ stepper motor และระบบควบคุมที่ใช้ stepper motor ที่มีมุม step  $45^\circ$  จะทำงานใน 1 รอบ = 8 steps per revolution (คือ  $360^\circ / 45^\circ = 8$  steps ต่อ revolution ) หรือ stepper motor ที่มีมุม step  $1.8^\circ$  จะมีจำนวน step ในการหมุน 1 รอบ คือ  $360^\circ / 1.8^\circ = 200$  steps ต่อ revolution ดังนั้นมุมการเคลื่อนที่ทั้งหมดของ rotor ( $\theta$ ) จะเท่ากับ step angle (มุม step :  $\beta$ ) คูณกับจำนวน step ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\text{Resolution} = \text{steps / revolution} = 360^\circ / \beta \quad \text{————— 7.10}$$

และ 
$$\theta = \beta \times \text{steps} \quad \text{————— 7.11}$$

เมื่อ:  $\theta = \text{total angle traveled by rotor (degrees)} = 360^\circ$

$\beta = \text{step angle (degree/ pulse)}$

steps = number of steps.

resolution = การกระจายของจำนวน steps ต่อ การหมุน 1 รอบ

ความเร็วของ stepper motor (rotor speed หรือ shaft speed) จะเป็น function ของมุม step (step angle:  $\beta$ ) และ stepping frequency ( $f_p$ ) ต่อการหมุน 1 รอบ เรียกว่า "Pulse rate" ดังนั้นจะได้สมการ

$$\boxed{n = (\beta \times f_p) / 360^\circ} \quad \text{————— 7.12}$$

เมื่อ:  $n$  = rotor speed หรือ shaft speed (r/sec : รอบต่อวินาที)  
 $f_p$  = stepping frequency (pulses/sec)

**Example 7-2** A stepper motor has a  $2.0^\circ$  step angle. Determine:

- a) resolution
- b) number of steps required for the rotor to make 20.6 revolution
- c) shaft speed if the stepping frequency is 1800 pules/sec

**Solution** a) resolution (step/revolution)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ resolution} &= \text{steps/revolution} = 360^\circ / \beta \\ &= 360^\circ / 2.0^\circ \\ &= 180 \text{ step/rev} \quad \text{————— Ans} \end{aligned}$$

b) number of steps required for the rotor to make 20.6 revolution (steps)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } \theta &= \beta \times \text{steps} \\ \text{revolution} \times 360^\circ &= \beta \times \text{steps} \\ \text{steps} &= (\text{revolution} \times 360^\circ) / \beta \\ &= (20.6 \times 360^\circ) / 2.0^\circ \\ &= 3708 \text{ steps} \quad \text{————— Ans} \end{aligned}$$

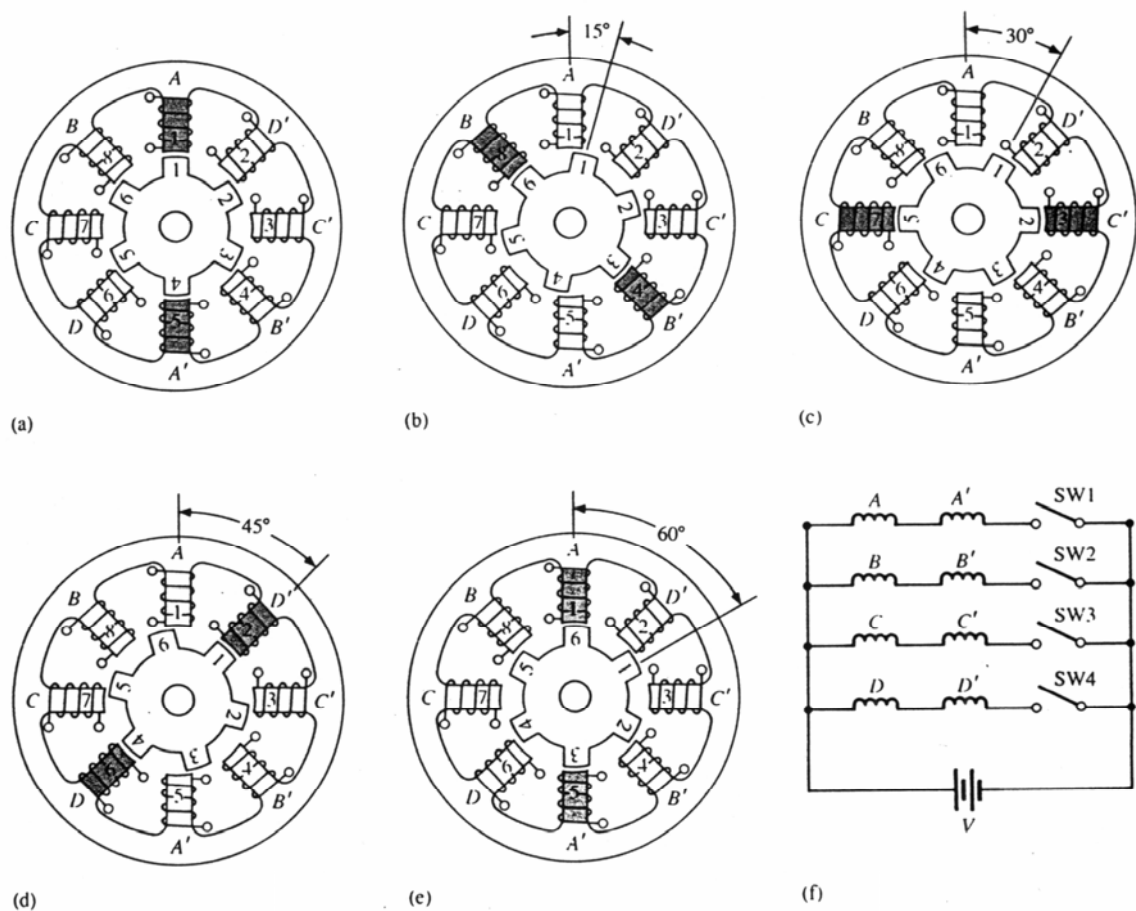
c) shaft speed if the stepper frequency is 1800 pules/sec ( $n$ )

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } n &= (\beta \times f_p) / 360^\circ \\ &= (2.0 \times 1800) / 360^\circ \\ &= 10 \text{ r/sec} \quad \text{————— Ans} \end{aligned}$$


---

## 7-5 Variable - Reluctance Stepper Motor

Variable-reluctance stepper motor เป็น stepper motor ชนิดความต้านทานแม่เหล็กแปรเปลี่ยน โดยการทำงานต้องอาศัยการขับ pulse จากวงจร Logic ภายนอก เช่น ใส่นับวน pulse (pulse train) เข้าไปในขดลวด stator เพื่อให้แกนแม่เหล็กในช่องอากาศ (air gap) เปลี่ยนไปตามตำแหน่งและจำนวน pulse ที่ใส่ไปในขดลวด stator เมื่อใส่ pulse ไปในขดลวด stator ก็จะทำให้ rotor เปลี่ยนตำแหน่งไปตามตำแหน่งขดลวดของ stator การเคลื่อนที่ของ rotor นี้ เกิดจากแรงบิดความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance torque) และ/หรือแรงบิดแม่เหล็กถาวร (permanent-magnet torque) โดยที่การเคลื่อนที่นี้ขึ้นอยู่กับอัตราของ pulse ที่ใส่เข้าไป และแรงบิดที่ต้องการให้เกิดขึ้นรวมทั้งค่าเฉลี่ยของ rotor ด้วย



รูปที่ 7-7 Variable- reluctance stepper motor showing different step positions corresponding to the switching sequence in (f). (Courtesy Superior Electric Company)

รูปที่ 7-7 แสดง Variable-reluctance stepper motor ที่ใช้แสดงโครงสร้างง่าย ๆ และมีพื้นฐานการทำงานทั่วไป คือ ฟันของ stator (teethed stator) มีจำนวน 8 ฟัน และฟันของ rotor (teethed rotor) มีจำนวน 6 ฟัน ที่สร้างมาจากเหล็กอ่อน ซึ่งทำให้มันจะมีอำนาจแม่เหล็กหลงเหลืออยู่ได้เล็กน้อย การพันขดลวด (coil) รอบ ๆ ฟันของ stator ทำให้การดึงดูดแม่เหล็กอยู่บนตำแหน่งของ rotor ความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance) ของวงจรแม่เหล็กถูกสร้างจากฟันของ rotor และ stator ที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมของ rotor การส่งกำลังงานจาก coil เดียว หรือหลาย coil ของ stator ทำให้ rotor ก้าวไปข้างหน้าหรือถอยหลังไปยังที่มีแนว reluctance น้อยที่สุด คือ ช่องว่าง air gap ระหว่าง stator กับ rotor น้อยที่สุด

วงจรง่าย ๆ ของการจัดลำดับกระแสใน stator coil แสดงอยู่ในรูปที่ 7-7 (f) โดย stator มีทั้งหมดจำนวน 8 coil และจัด coil 2 coil มาต่อเป็น 1 วงจร ซึ่งจะได้จำนวน 4 วงจรแยกกัน เรียกว่า “phase” (ในรูปคือ phase A (A-A'), B (B-B'), C (C-C') และ D (D-D')) ตาม input pulse ที่จ่ายให้ stator จำนวน 4 pulse โดยแต่ละ phase จะมี switch อิเล็กทรอนิกส์การทำงานโดย solid state

รูปที่ 7-7 (a) แสดงตำแหน่งของ rotor เมื่อ switch SW 1 ปิด (closed) ตามที่แสดงในรูป 7-7 (f) จะทำให้ phase A (A-A') ทำงาน ดังนั้นจะสร้างแรงดึงดูดแม่เหล็กขึ้นบน rotor ทำให้ rotor อยู่ในตำแหน่งที่มีค่า reluctance น้อยที่สุด นั่นคือ ฟันของ rotor ที่ 1 และ 4 จะอยู่ในตำแหน่งแนวเดียวกับฟันของ stator ที่ 1 และ 5

รูปที่ 7-7 (b) เมื่อทำการเปิด switch SW 1 และปิด switch SW 2 จะทำให้ phase B (B-B') ทำงาน สร้างแรงดึงดูดแม่เหล็กขึ้นบน rotor จุด rotor เข้ามาอยู่ในตำแหน่งเดียวกับ stator คือ ฟันของ rotor ที่ 3 และ 6 จะอยู่ในตำแหน่งแนวเดียวกับฟันของ stator ที่ 4 และ 8 และทำให้เกิดมุม step angle เท่ากับ  $15^\circ$  ( $\beta = 15^\circ$ )

รูปที่ 7-7 (c) เมื่อทำการเปิด switch SW 2 และปิด switch SW 3 จะทำให้ phase C (C-C') ทำงาน สร้างแรงดึงดูดแม่เหล็กจุด rotor เข้ามาอยู่ในตำแหน่งเดียวกับ stator คือ ฟันของ rotor ที่ 2 และ 5 จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกับแนวของฟัน stator ที่ 3 และ 7 ทำให้เกิดมุม step angle เพิ่มขึ้นอีก  $15^\circ$  ดังนั้นมุม step angle ใน phase C จะเท่ากับ  $30^\circ$  ( $\beta = 30^\circ$ )

รูปที่ 7-7 (d) เมื่อเปิด switch SW 3 และปิด switch SW 4 จะทำให้ phase D (D-D') ทำงาน สร้างดึงดูดแม่เหล็กจุด rotor เข้ามาอยู่ในตำแหน่งเดียวกับ stator คือ ฟันของ rotor ที่ 1 ที่ 4 จะอยู่ในแนวตำแหน่งเดียวกับฟันของ stator ที่ 2 และ 6 และทำให้เกิดมุม step angle เพิ่มอีก  $15^\circ$  ดังนั้นมุม step angle ใน phase D จะเท่ากับ  $45^\circ$  ( $\beta = 45^\circ$ )

รูปที่ 7-7 (e) เมื่อทำงานครบทั้ง 4 phase แล้วจะกลับมาทำงานที่ phase A ใหม่ แต่ฟันของ rotor ที่ 3 และ 6 จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกับฟันของ stator ที่ 1 และ 5 ทำให้เกิดมุม step angle อยู่ที่ตำแหน่ง  $60^\circ$  ( $\beta = 60^\circ$ ) นั่นคือ rotor จะหมุนเพียง  $1/6$  รอบเท่านั้น ยังไม่ครบ 1 รอบ

จะเห็นได้ว่าเมื่อ switch แต่ละอันถูกปิด (closed) จะทำให้ rotor หมุนเคลื่อนที่ด้วยมุม step angle ( $\beta$ ) เพิ่มขึ้นทีละ  $15^\circ$  ตามลำดับของ switch เมื่อเราทำซ้ำใหม่จาก switch SW 1 ถึง SW 4 และซ้ำอีกจนกระทั่งการหมุนของ rotor ครบจำนวน 1 รอบ คือ  $360^\circ$

ทิศทางการหมุนจาก SW 1 – SW 4 ตามลำดับ จะเป็นผลทำให้ step ของ rotor หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (clockwise: CW) ถ้าต้องการกลับทิศทางการหมุนให้กลับลำดับของ pulse โดยเริ่มปิด switch ตั้งแต่ SW4 - SW3 - SW2 - SW1 ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ step ของ rotor หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (counter clockwise: CCW)

ความสัมพันธ์ระหว่างมุม step angle และจำนวนฟันของ stator และจำนวนฟันของ rotor หาได้จากสมการ

$$\beta = \left[ (N_s - N_r) / (N_s \cdot N_r) \right] \times 360^\circ \quad \text{—————} \quad 7.13$$

เมื่อ :  $\beta$  = step angle in space degrees (degrees)

$N_s$  = number of teeth in stator core.

$N_r$  = number of teeth in rotor core.

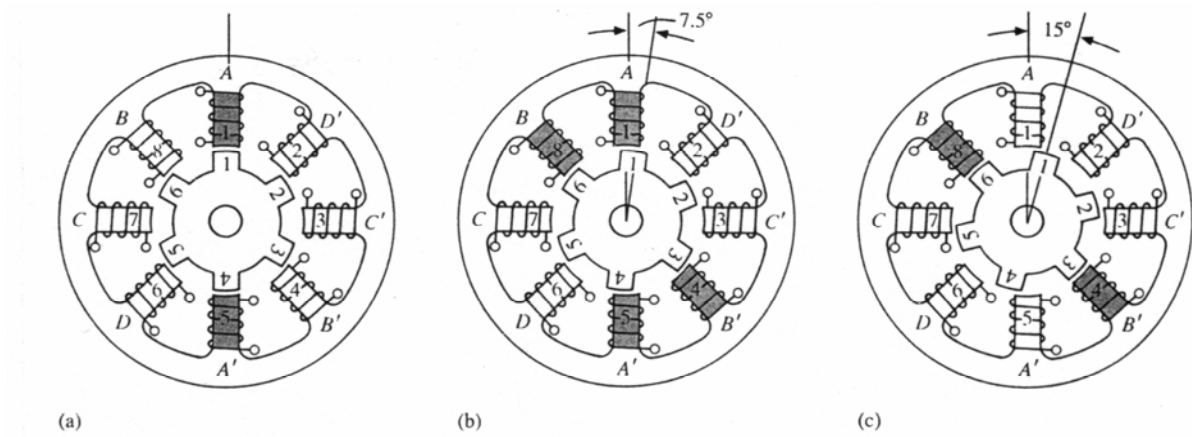
จากสมการที่ 7.13 เมื่อนำไปหาค่ามุม step angle ของ stepper motor ในรูปที่ 7-7 จะได้

$$\begin{aligned} \beta &= \left[ (8 - 6) / (8 \times 6) \right] \times 360^\circ \\ &= 15^\circ \end{aligned}$$



- **Half-step operation ( การทำงานแบบ 1/2 step)**

Half-step operation สามารถทำได้โดยการปรับปรุง pulsing sequence โดยการทำงานเริ่มจาก phase A ทำงาน  $\Rightarrow$  phase A ทำงานร่วมกับ phase B  $\Rightarrow$  phase B ทำงาน  $\Rightarrow$  phase B ทำงานร่วมกับ phase C  $\Rightarrow$  phase C ทำงาน  $\Rightarrow$  phase C ทำงานร่วมกับ phase D  $\Rightarrow$  phase D ทำงาน  $\Rightarrow$  และ phase D ทำงานร่วมกับ phase A. และเลื่อนไปเรื่อย ๆ ตามลำดับที่แสดงในรูปที่ 7.8



รูปที่ 7-8 Variable- reluctance stepper motor sequenced for half- step operation, showing three successive pulses.

รูปที่ 7-8 จะแสดง pulses 3 pulses ที่ทำงานต่อเนื่องกัน โดยเริ่มต้นตั้งแต่ phase A (รูป 7-8 a) phase A และ phase B (รูป 7-8 b) และ phase B เพียง phase เดียว (รูป 7-8 c)

รูปที่ 7-8 (a) แสดงการทำงานของ phase A เพียง phase เดียว ทำให้ตำแหน่งของ rotor ฟันที่ 1 และ 4 อยู่ในตำแหน่งเดียวกับแนวของฟัน stator ที่ 1 และ 5

รูปที่ 7-8 (b) แสดงการทำงานร่วมระหว่าง phase A และ phase B จะเลื่อนตำแหน่งของ rotor ไปที่มุม  $\text{step angle} = 7.5^\circ$

รูปที่ 7-8 (c) แสดงการทำงานของ phase B เท่านั้น ทำให้ตำแหน่งของ rotor ฟันที่ 3 และ 6 อยู่ในตำแหน่งเดียวกับแนวของฟัน stator ที่ 4 และ 8 มุม  $\text{step angle}$  จะเพิ่มขึ้นอีก  $7.5^\circ$  ดังนั้นมุม  $\text{step angle}$  จะอยู่ที่  $15^\circ$

จะเห็นได้ว่าในแต่ละ pulse ที่จ่ายให้ stator จะทำให้ rotor หมุนเคลื่อนที่เป็นมุม  $\text{step angle}$  ทีละ  $1/2$  step เป็นมุม  $7.5^\circ$  ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

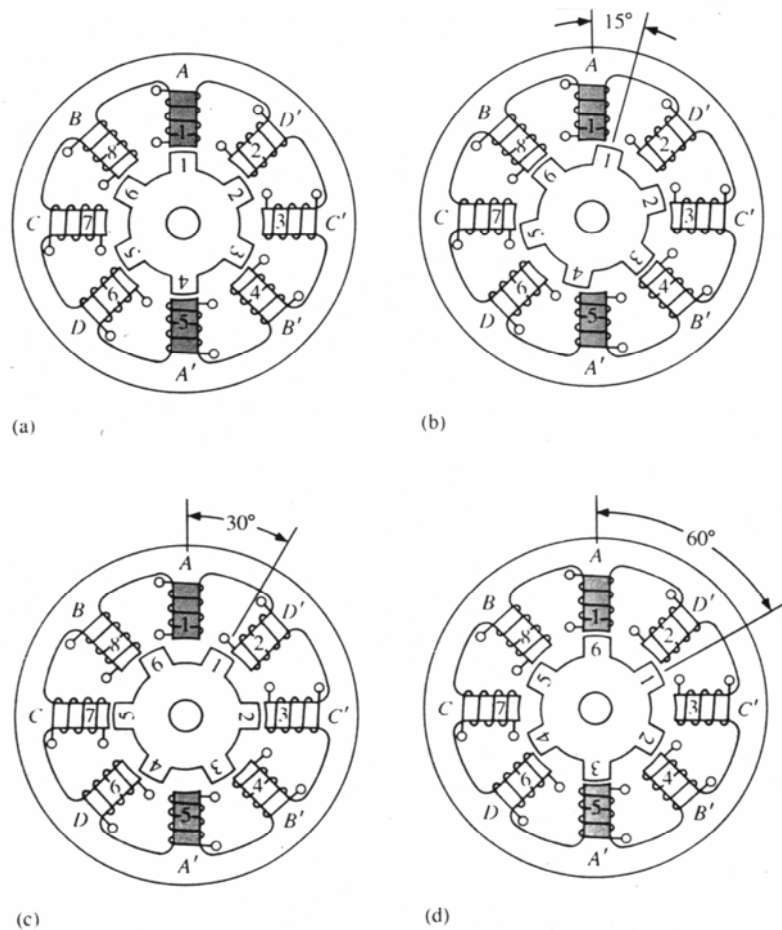
- **Microstepping**

Microstepping จะใช้ phase 2 phase ที่มีกระแสไม่เท่ากัน เช่นจากรูป 7-8 (b) แทนที่จะป้อนกระแสใน phase A และ phase B เท่ากัน เราให้กระแสใน phase A มีค่าคงที่ ขณะที่กระแสใน phase B จะถูกเพิ่มเข้าไปทีละน้อยจาก pulse จนกระทั่งกระแสใน phase B สูงสุด และลดกระแสใน phase A ทีละน้อยจนถึงค่า Zero ซึ่งจะเป็นผลจะทำให้มุม step angle ขนาดเล็กเพิ่มขึ้นทีละน้อย เราจึงเรียกว่า "Microsteps" มอเตอร์แบบนี้จะทำงานที่ความเร็วต่ำ และ resolution สูง

เช่น stepper motor ทำงานที่ resolution = 200 steps/revolution ที่มุม step angle = 1.8° สามารถทำงานเป็น microstepping ที่ resolution = 2,000 steps/revolution ที่มุม step angle = 0.018° ได้

- **Holding torque**

Holding torque เรียกว่า "static torque" คือ ค่าสูงสุดของ load torque ที่สามารถจะใช้ในการทำงานของ stepper motor โดยปราศจากการเกิด slip pole



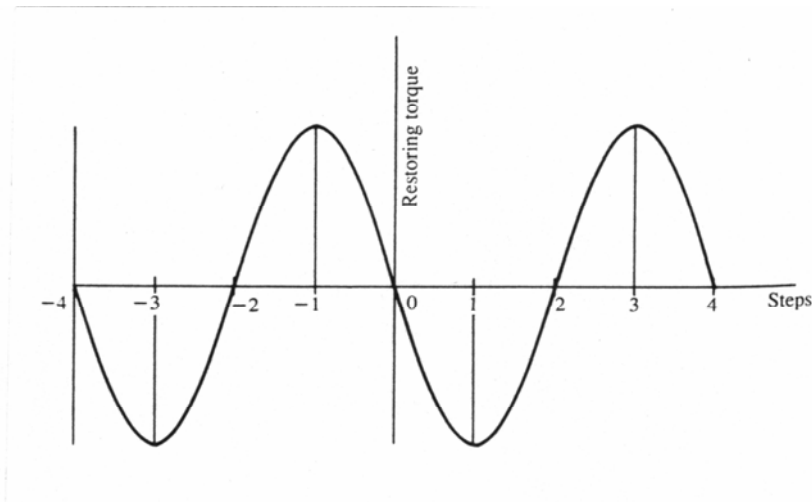
รูปที่ 7-9 Rotor positions that develop restoring torque in a variable reluctance stepper motor with phase A energized: (a) rotor at rest; (b) rotor forced 15° CW; (c) rotor forced 30° CW (unstable) (d) rotor flips to 60° position

รูปที่ 7-9 (a) สมมุติว่า phase A ทำงาน และ rotor อยู่กับที่

รูป 7-9 (b) ถ้ามีแรงทางกล (mechanically force) มากกระทำที่ rotor ให้เคลื่อนที่ไป 1 step ที่  $15^\circ$  และใส่ input pulse ที่ coil ของ phase A ผลก็คือจะเกิดแรงดึงดูดบนฟันของ rotor ที่ 1 และ 4 จากการเป็นแม่เหล็กของฟัน stator ที่ 1 และ 5 ซึ่งจะสร้างแรงบิดสะสม (restoring torque) แต่ถ้าเราปล่อย rotor โดยปลดแรงกลออกจะทำให้ rotor หมุนกลับไปสู่ตำแหน่งเดิม ตามรูป 7-9 (a)

รูปที่ 7-9 (c) ถ้า rotor เคลื่อนที่ไป 2 steps ที่  $30^\circ$  จะเป็นผลทำให้ฟันของ rotor อยู่ในตำแหน่งที่ไม่สมดุล (unstable) เพราะว่าฟันของ rotor ที่ 1 และ 6 จะมีแรงดึงดูดเท่ากัน ทำให้แรงบิดเท่ากับศูนย์ (Zero) เมื่อเราปล่อย rotor จะทำให้ rotor หมุนไปทิศทางใดทิศทางหนึ่ง คือ อาจจะหมุนถอยหลังไป 2 steps อยู่ในตำแหน่งเดิมตามรูป 7-9 (d)

การ plot กราฟระหว่าง restoring torque กับ force step displacement เรียกว่า "static-torque curve" ตามที่แสดงในรูปที่ 7-10



รูปที่ 7-10 Typical static-torque curve for a stepper motor.

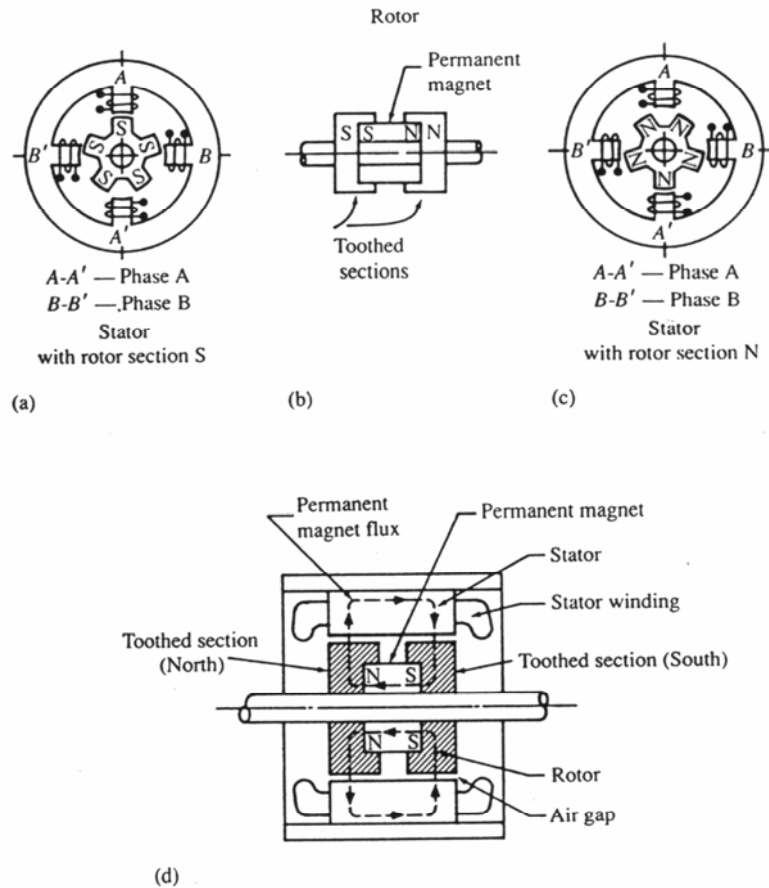
จากรูปที่ 7-10 จะเห็นได้ว่า ค่าสูงสุดของ restoring torque จะอยู่ที่ 1 step ถ้าในตำแหน่ง 2 steps ค่า restoring torque จะมีค่าเป็นศูนย์ และในตำแหน่งนี้ rotor จะอยู่ในตำแหน่งที่ไม่สมดุล ถ้าเราปล่อย rotor จะทำให้ rotor เคลื่อนที่กลับไปสู่ตำแหน่งเดิมที่ 0 step หรือเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอีก 2 steps คือ อยู่ในตำแหน่ง 4 steps

- **Step Accuracy**

ความถูกต้องของ step (step accuracy) จะแสดงเป็น percent โดยค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดใน stepper motor จะคิดเพียง step เดียว ค่าความผิดพลาดจะไม่คิดสะสมและไม่คิดเพิ่มเติมขณะมีการเพิ่ม step และค่าความคลาดเคลื่อนของ step ใน stepper motor จะมีค่าระหว่าง 1-10 % ของขนาด step (step size)

## 7-6 Permanent-Magnet Stepper Motor

Permanent- magnet stepper motor เป็น stepper motor ชนิดแม่เหล็กถาวร และวงจรง่าย ๆ ของ stepper motor ที่แสดงในรูป 7-11 จะแสดงให้เห็นลักษณะทางฟิสิกส์ (physical) ร่วมกับชนิดของมอเตอร์



รูปที่ 7-11 Permanent-magnet stepper motor: (a) stator and south section of rotor; (b) rotor; (c) stator and north section of rotor; (d) axial view of assembled motor.

จากรูปที่ 7-11(b) ตัว rotor จะมีฟันแบ่งเป็น 2 section คือ ขั้ว N และขั้ว S ซึ่งแยกออกจากกันด้วยแม่เหล็กถาวร โดยแต่ละ section ของขั้วแม่เหล็กจะมีระยะประมาณ  $\frac{1}{2}$  ของระยะฟัน ขั้วแม่เหล็กของแต่ละ section ประกอบด้วยขั้ว N จำนวน 5 ขั้ว ใน 1 section ตามที่แสดงในรูป 7-11 (c)

จะสังเกตเห็นว่าขั้ว S จะอยู่ในตำแหน่งตรงกับขั้วของ stator coil และขั้ว N จะอยู่ในตำแหน่งเฉียงกับขั้วของ stator coil

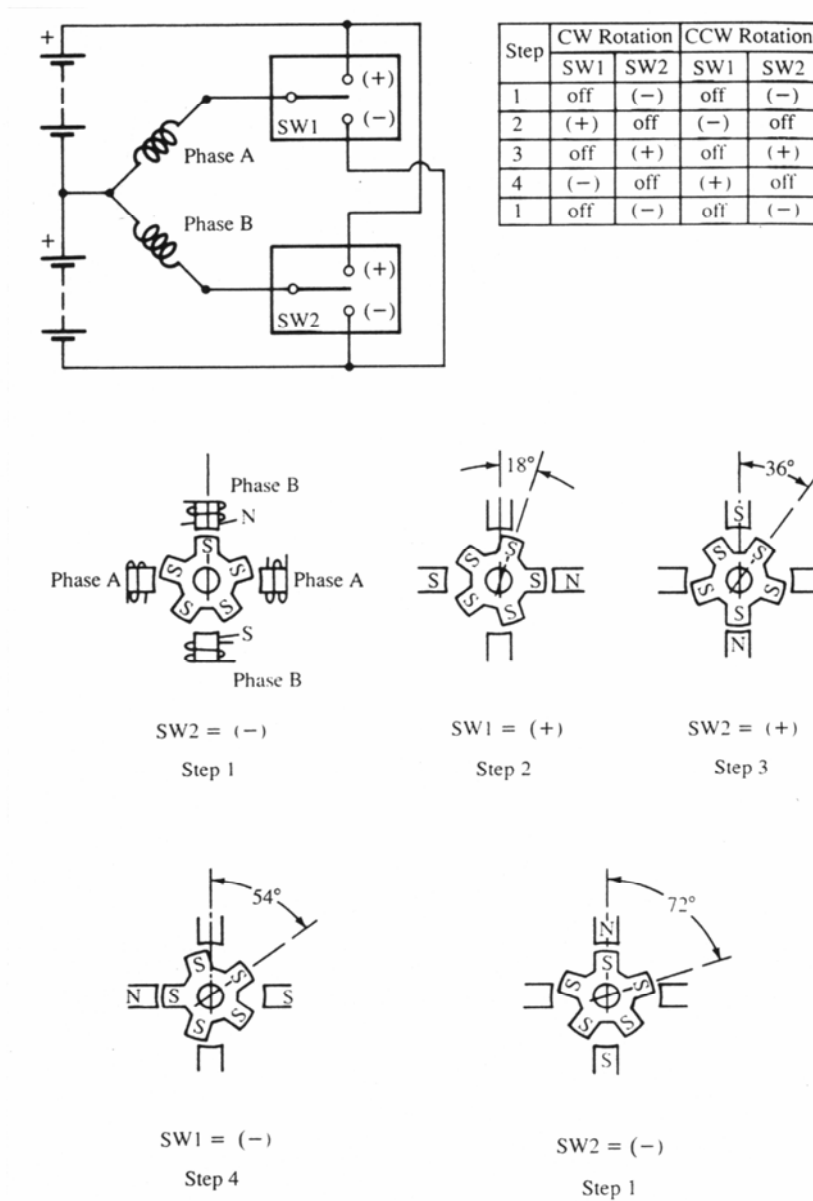
รูปที่ 7-11 (d) เป็นรูปแสดงแนวแกนส่วนประกอบของ stepper motor

จากรูป 7-11 ตัว rotor แต่ละ section จะกระจายกันสร้างแรงบิด เนื่องจากแต่ละ section ขนานกัน ดังนั้นผลลัพธ์ของฟันทั้ง 5 ของ rotor กับฟันทั้ง 4 ของ stator ทำให้ได้มุม step angle ของ stepper motor คือ

$$\beta = [N_s - N_r / N_s \cdot N_r] \times 360$$

$$= [(4 - 5) / 4 \times 5] \times 360 = 18^\circ$$

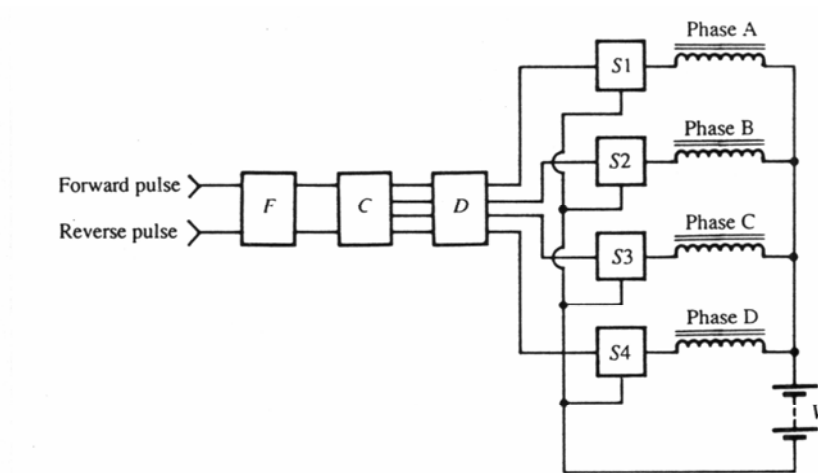
พื้นฐานการทำงานของ stepper motor ชนิดแม่เหล็กถาวร ถูกสร้างขึ้นโดยใช้วงจรไฟฟ้า switch table และตำแหน่งของ rotor ตามที่แสดงในรูป 7-12



รูปที่ 7-12 Circuit diagram of a permanent-magnet stepper motor with rotor positions keyed to switching sequence for CW rotation.

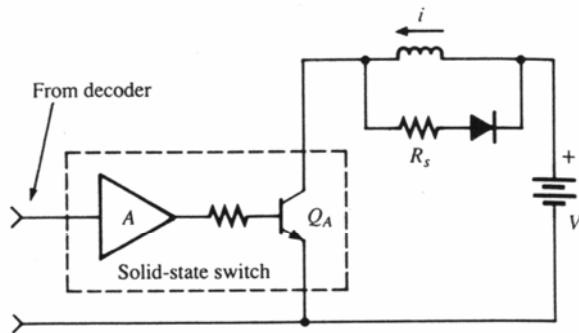
จากรูปที่ 7-12 แสดงเฉพาะส่วนของขั้ว S ของ rotor เท่านั้น ตำแหน่งของ rotor จะหมุนตามลำดับของ switch ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (CW) โดย phase A จะทำงานที่ SW 1 และ phase B ทำงานที่ SW 2 ซึ่ง switch แต่ละตัวจะทำงานสลับกันในตำแหน่ง on (+, -) และ off ทำให้ rotor หมุนไปทีละ  $1/2$  step ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานเหมือน variable-reluctance stepper motor แบบ Half-stepping และ Microstepping ตามที่กล่าวมาแล้ว

### 7-7 Stepper-Motor Drive Circuit



รูปที่ 7-13 Drive circuit for a variable-reluctance stepper motor

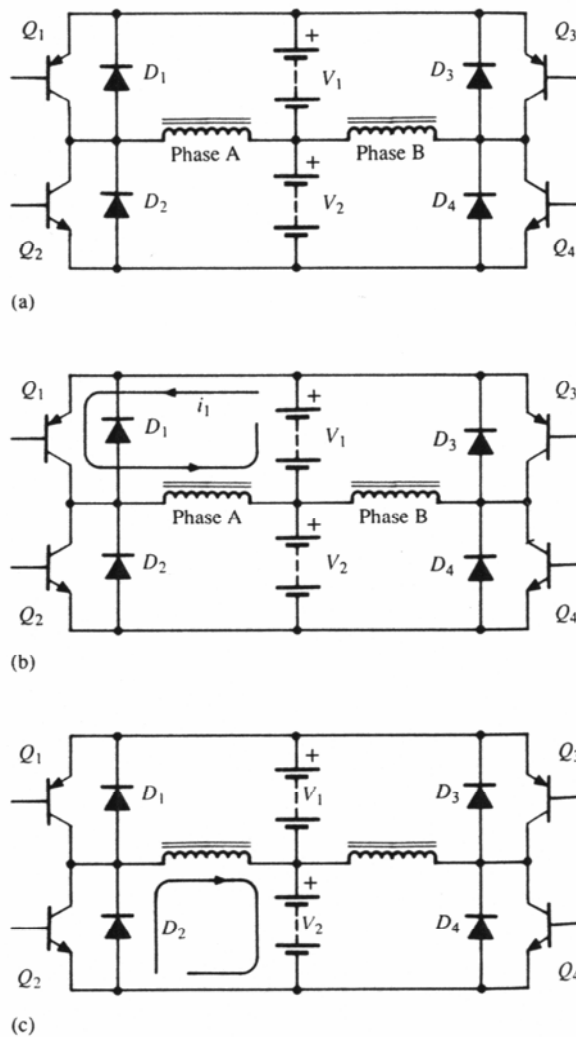
จากรูปที่ 7-13 แสดงโครงสร้างทั่วไปของการขับเคลื่อนวงจรสำหรับ variable-reluctance stepper motor โดยสัญญาณ input pulse ที่ควบคุมมอเตอร์จะจ่ายผ่าน Filter ใน block F และผ่านเข้าไปใน bidirectional counter ใน block C ซึ่งจะแยกสัญญาณออกเป็น 2 ทิศทาง คือ สัญญาณ Forward pulse และ Reverse pulse และ output bit ของ counter ใน block C จะถูกป้อนเข้าไปใน input ของ block D ที่เป็น decoder เพื่อทำการถอดออกจากรหัส และส่งให้ Electronic switch S1, S2, S3, และ S4 เพื่อจ่ายกำลังงานให้กับ phase ต่าง ๆ ตามลำดับที่ input pulse สั่ง



รูปที่ 7-14 Solid-state switching circuit.

รูปที่ 7-14 เป็นภาพขยายของ Electronic switch ที่เป็นแบบ Solid-state switch โดย Amplifier A จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณ Logic ที่ถอดรหัสมาจาก block D ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในรูปของ voltage และ current ที่เพียงพอที่จะทำให้ transistor  $Q_A$  ทำงาน on และ off สำหรับค่าความต้านทาน  $R_s$  จะใช้สำหรับ Discharge พลังงานในขดลวด เมื่อ transistor  $Q_A$  ถูก off

โครงสร้างของวงจรขับเคลื่อน stepper motor ชนิดแม่เหล็กถาวรจะเหมือนกัน คือ ประกอบด้วย Filter, Counter และ Decoder ส่วนที่แตกต่างกันคือ การต่อร่วมของ phase winding, switch และ power supply เพราะว่าการที่ต้องการที่จะกลับเส้นแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 7-15 Drive circuit for a permanent-magnet stepper motor: (a) unenergized circuit; (b)  $Q_1$  is in on state; (c)  $Q_1$  off. diode  $D_1$  provides discharge path.

จากรูปที่ 7-15 แสดงตัวอย่างของ switching  $Q_1, Q_2$  และ  $Q_3, Q_4$  ที่จัดไว้เป็นพวก เพื่อใช้ควบคุม stepper motor ชนิดแม่เหล็กถาวร โดยจะมี Diode เป็นตัวจำกัดกระแส phase current เมื่อ switching หรือ transistor อยู่ในตำแหน่ง off

รูปที่ 7-15 (b) เมื่อ switching หรือ transistor  $Q_1$  อยู่ในตำแหน่ง on และกระแส  $i_1$  จากแหล่งจ่ายไฟ  $V_1$  จ่ายให้ขดลวด phase A และเมื่อ  $Q_1$  อยู่ในตำแหน่ง off โดยตัว inductance ของ phase A และ Diode  $D_1$  จะป้องกันกระแสไหลย้อนกลับ

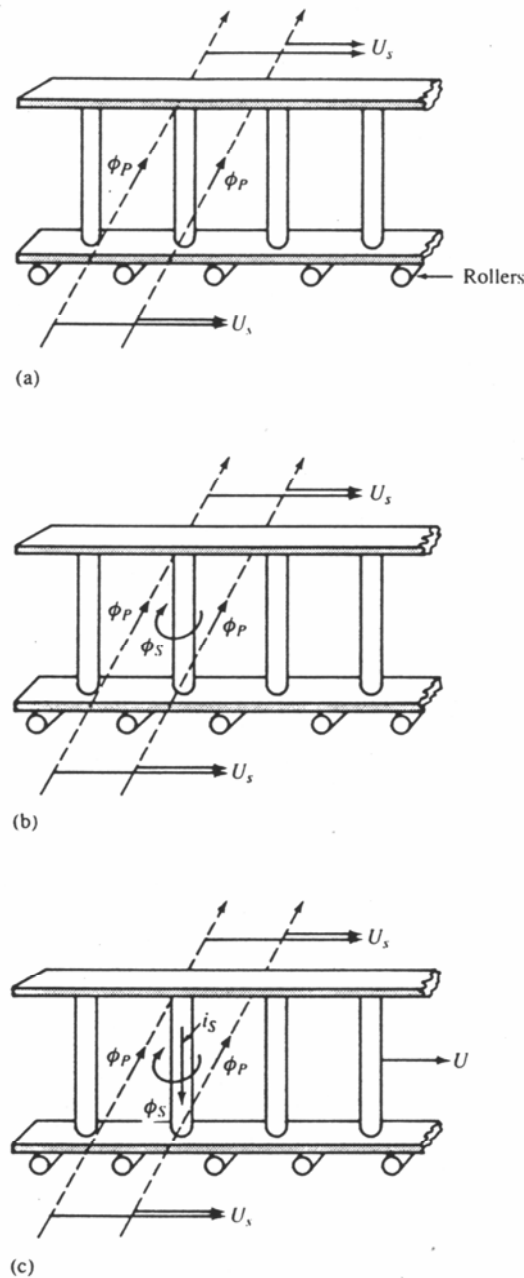
รูปที่ 7-15 (c) Diode  $D_2$  จะทำการ discharge กระแสไฟฟ้าผ่านการต้านจากแหล่งกำเนิด  $V_2$  ทำให้การกำจัดกระแสเป็นไปอย่างรวดเร็ว

ข้อเสียเปรียบของการจัด switching ไว้เป็นพวก คือ ต้องมีแหล่งกำเนิด power supply 2 แหล่ง



## 7-8 Linear Induction Motor

Linear induction motor หรือ LIM มีพื้นฐานการทำงานเหมือนกับ Three-phase induction motor และ single-phase induction motor แต่แทนที่จะใช้สนามแม่เหล็กของ stator หมุนกวาด squirrel cage rotor นั้น Linear induction motor (LIM) จะใช้การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กตามระยะทางยาว (Linear) กวาดรางตัวนำ หรือตัวนำชนิด Ladder-type cage



รูปที่ 7-16 Diagrams of an elementary linear induction motor; (a) magnetic field sweeping rungs of ladder; (b) direction of flux around rung as determined by Lenz's law; (c) direction of current in rung as determined by right-hand rule.

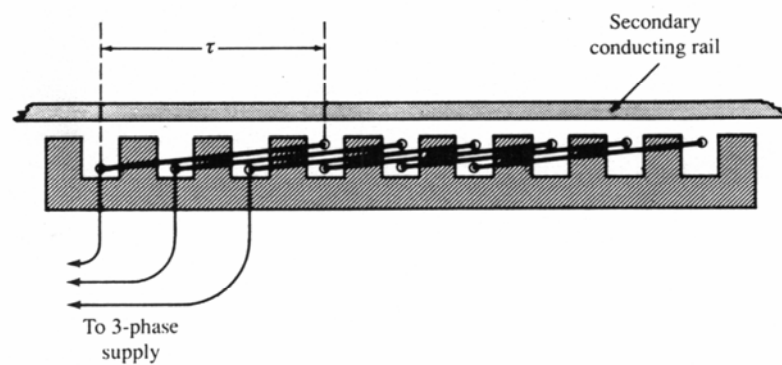
จากรูป 7-16 (a) แสดงสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_s$  กำลังกวาดไปตามราง aluminum ladder ตามกฎของ Lenz's Law เมื่อ voltage และ current ที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ ตัวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อเป็นเช่นนั้นแรงทางกล (mechanical force) ที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกับการกวาดของสนามแม่เหล็ก นั่นคือ flux bunching คือ การบวมของเส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดทางด้านซ้ายของตัวนำ ตามที่แสดงในรูป 7-16 (b)

สำหรับทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำ สามารถหาได้จากกฎมือขวา (right hand rule) ตามที่แสดงในรูป 7-16 (c)

ตามหลักทางวิทยาศาสตร์ของ induction motor วงจรที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนที่กวาดผ่านตัวนำ เรียกว่า primary และตัวนำ, ราง หรือ ladder เรียกว่า secondary ดังนั้นถ้า primary อยู่กับที่ secondary จะต้องเคลื่อนที่ไปทางขวา หรือถ้า primary เคลื่อนที่ secondary จะต้องถูก blocked โดย primary จะเคลื่อนที่ไปทางซ้าย

การกลับทิศทางการหมุนของ Linear induction motor ทำได้ โดยการกลับลำดับ phase ของ voltage ใน primary

ขด primary ของ three-phase linear induction motor จะถูกพันลักษณะคล้ายกับ squirrel cage motor ยกเว้นแต่ว่าขดลวดจะถูกวางนอนเป็นแนวเส้นตรง ตามที่แสดงในรูป 7-17



รูปที่ 7-17 Linear induction motor showing conducting rail and pole pitch.

รูปที่ 17-7 เป็น Linear induction motor ที่แสดงรางตัวนำ (conducting rail) และ pole pitch (ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางขั้วแม่เหล็กที่อยู่ใกล้กันในรูปขององศาทางกล ซึ่งก็คือ ช่วงของขั้วแม่เหล็ก) สำหรับ pole pitch ในรูปองศาทางไฟฟ้า คือ ระยะการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นไฟฟ้า โดย 1 pole pitch จะมีระยะเท่ากับ  $180^\circ$  ทางไฟฟ้าเสมอ

รูปที่ 17-7 เป็น Three-phase Linear induction motor ชนิด 2 ขั้ว ที่มีขดลวด 1 coil ต่อ phase ต่อขั้ว (coil per phase per pole) โดย secondary คือ conducting sheet หรือ rail ของทองแดงหรืออลูมิเนียม

ความเร็วการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็ก primary flux เรียกว่า "synchronous speed" จะเป็น function ของความถี่และระยะกว้างของ primary coil (pole pitch) ใน 1 cycle ของ voltage ที่จ่ายให้โดยเส้นแรงแม่เหล็กที่เดินทางเป็นระยะเส้นตรงเท่ากับ 2 pole pitch ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U_s = 2 \tau f \quad \text{-----} \quad 7.14$$

- เมื่อ :
- $U_s$  = synchronous speed (m/s)
  - $\tau$  = pole pitch (ระยะห่างของขั้วแม่เหล็ก) (m)
  - $f$  = supply frequency (Hz)

Synchronous speed ของ Linear induction motor จะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวน pole อย่างไรก็ตาม ผลรวมของ force developed จะแสดงความเร็วของ secondary (U) ในรูปของ synchronous speed ( $U_s$ ) และ slip (S) นั่นคือ

$$U = U_s (1 - S) \quad \text{-----} \quad 7.15$$

ดังนั้นค่า Slip จะมีค่าเท่ากับ

$$S = (U_s - U) / U_s \quad \text{-----} \quad 7.16$$

- เมื่อ :
- S = slip
  - U = speed of secondary (m/s)
  - $U_s$  = synchronous speed (m/s)

Three-phase Linear induction motor จะใช้ในการเคลื่อนที่ของเครนขนาดใหญ่ มอเตอร์ของรถรางที่มีความสูง เครื่องปั๊มโลหะเหลว (Liquid-metal pump) และเครื่องใช้ที่ต้องการกำลังงานสูง เครื่องบิน และเครื่องร้อนของจรวด

**Example 7-3** A 3-phase moving-rail LIM has three-pole and a pole pitch of 0.24 m. The LIM. is operated from a 50 Hz system. Determine:

- the synchronous speed.
- the rail speed assuming a slip of 16.7 percent

**Solution** a) the synchronous speed ( $U_s$ )

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ } U_s &= 2 \tau f \\
 &= 2 (0.24) (50) \\
 &= 24 \text{ m/s} \qquad \text{-----} \quad \text{Ans}
 \end{aligned}$$

b) the rail speed ( $U$ ) สมมุติให้ค่า slip = 16.7%

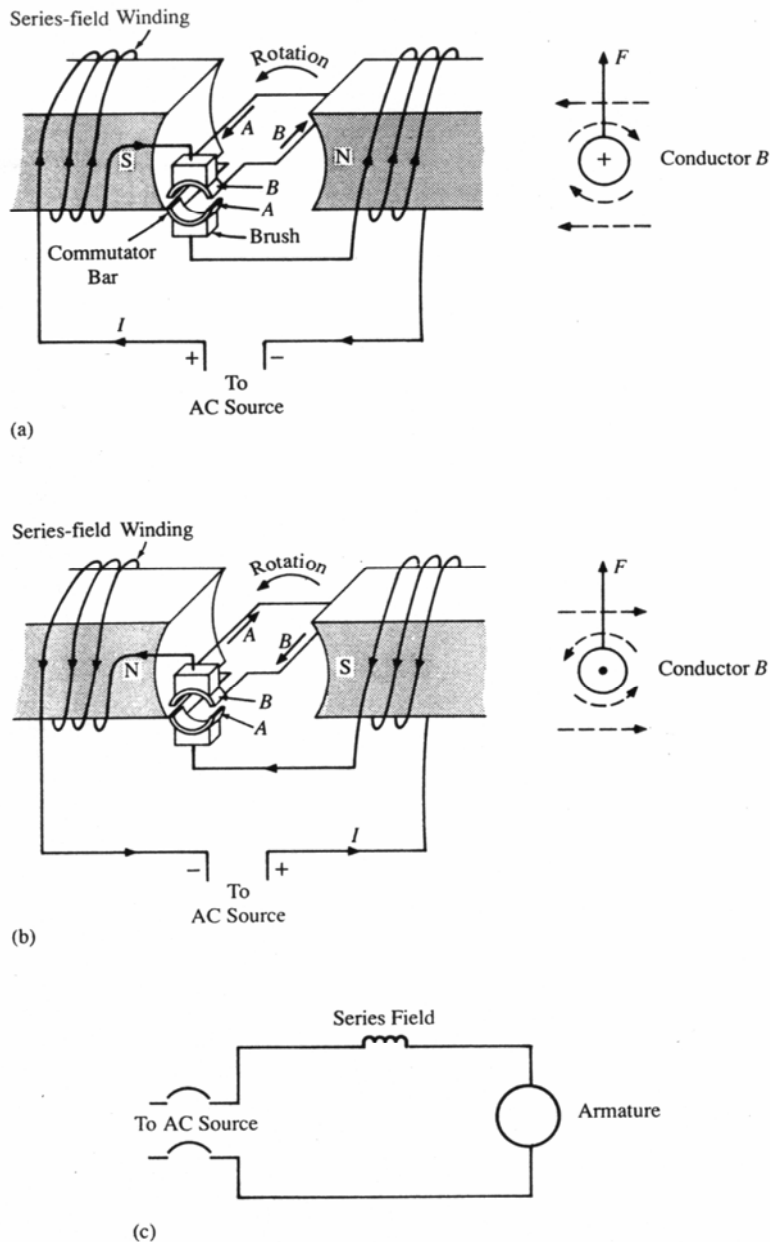
$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ } U &= U_s (1 - S) \\
 &= 24 [1 - (16.7 / 100)] \\
 &= 20 \text{ m/s} \qquad \text{-----} \quad \text{Ans}
 \end{aligned}$$

## 7-9 Universal Motor

Universal motor บางที่เรียกว่า " series motor" เป็นมอเตอร์ single phase ที่ใช้กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) และ กระแสตรง (DC) ได้ โดยต่อขดลวด armature อนุกรมกับขดลวด field เหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ series motor

Universal motor เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กที่ออกแบบให้มีความเร็วอยู่ในช่วง 5,000 ถึง 12,000 รอบต่อนาที ตามมาตรฐาน NEMA จะมีขนาดตั้งแต่ 0.01 hp ถึง 1.0 hp

พื้นฐานของ universal motor ตามแสดงอยู่ในรูป 7-18 (a) และ (b) ส่วนที่หมุนเรียกว่า armature จะต่ออนุกรมกับขดลวด series-field winding โดยผ่าน commutator และแปรงถ่าน (brush) ที่อยู่กับที่



รูปที่ 7-18 Elementary universal motor: sketches (a) and (b) show the same direction of rotation regardless of polarity of voltage source; (c) equivalent circuit.

จากรูป 7-18 (a) และ (b) แสดงทิศทางของ rotation ที่เหมือนกัน โดยไม่คำนึงถึงขั้วของ voltage source

จากรูป 7-18 (c) แสดงวงจรสมมูลของ universal motor โดยมีขดลวด series field ต่ออนุกรมกับ armature

ทิศทาง developed torque และทิศทางของ armature rotation จะขึ้นอยู่กับขั้วของ AC. source ที่แสดงในรูป 7-18 (a) และ (b) สำหรับแรงทางกล (mechanical force) ของขดลวด conductor A และ B หาได้จากกฎของ flux bunching คือ การบวกของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อสนามแม่เหล็ก 2 สนาม ที่อยู่ในพื้นที่เดียวกันและมีทิศทางตรงกันข้ามจะทำให้เกิดแรงกลจากการผลักของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งกันและกัน

Developed torque ของ universal motor จะเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (flux density) ของ series field กับกระแสใน armature conductor ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$T_D \propto B_p I_a \quad \text{-----} \quad 7.17$$

- เมื่อ :
- $T_D$  = developed torque
  - $B_p$  = flux density due to current in series - field winding
  - $I_a$  = armature current

จากรูป 7-18 (c) ขดลวด series field จะต่ออนุกรมกลับ armature ดังนั้นกระแสที่ไหลไป series field ก็คือกระแสที่ไหลใน armature และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กใน series field จะขึ้นอยู่กับค่ากระแส นั้น คือ

$$B_p \propto I_a$$

เมื่อนำ  $B_p \propto I_a$  แทนค่าลงในสมการที่ 7.17 จะได้

$$T_D \propto I_a^2 \quad \text{-----} \quad 7.18$$

จากสมการที่ 7.18 จะเห็นได้ว่า Developed torque จะเป็นสัดส่วนกับกระแส armature ยกกำลังสอง

Universal motor เป็นมอเตอร์ที่สามารถสร้างแรงบิดได้สูง และมีความเร็วตั้งแต่ 5,000-12,000 รอบต่อนาที จึงนิยมใช้ในเครื่องดูดฝุ่น และเครื่องใช้ในครัว เช่น เครื่องปั่นน้ำผลไม้

การกลับทิศทางการหมุนของ universal motor สามารถกระทำได้ โดยกลับทิศทางของกระแสใน armature coil

-----

## SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING

### Reluctance Motor

$$T_{\text{rel}} = k (V^2 / f) \sin (2\delta_{\text{rel}})$$

### Hysteresis Motor

$$P_h = K_h f_r B_{\text{max}}$$

$$P_{\text{mech}} = P_h [(1 - S) / S]$$

$$P_{\text{mech}} = (T n_r) / 5252$$

$$T_h = (5252 k_h f_s B_{\text{max}}) / n_s$$

$$T_h = (5252 k_h B_{\text{max}}) / (120 / P) \quad (\text{lb-ft})$$

$$\begin{array}{l} T_{\text{mag}} \propto \sin (\delta_{\text{mag}}) \\ S = 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} T_{\text{mag}} \leq T_h \\ S = 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} T_{\text{mag max}} = T_h \\ S = 0 \end{array}$$

### Stepper Motor

$$\text{Resolution} = 360^\circ / \beta \quad (\text{step/revolution})$$

$$\theta = \beta \times \text{steps}$$

$$n = (\beta \times f_p) / 360^\circ$$

$$\beta = [(N_s - N_r) / (N_s \cdot N_r)] \times 360^\circ$$

### Linear Induction Motor

$$U_s = 2 \tau f$$

$$U = U_s (1 - S)$$

$$S = (U_s - U) / U_s$$

### Universal Motor (Series Motor)

$$T_D \propto B_p I_a$$

$$T_D \propto I_a^2$$

-----

## บทที่ 8

### มอเตอร์แบบ Synchronous (Synchronous Motor)

#### 8-1. บทนำ

Synchronous motor จะถูกใช้งานกับเครื่องจักรกลที่มีกำลังงานขนาดใหญ่ เนื่องจากการทำงานของ มันจะมีประสิทธิภาพสูง เชื่อถือได้ และสามารถควบคุมค่า Power factor ได้ดี Synchronous motor เป็นมอเตอร์ที่ให้กำลังงานกลคงที่ โดยไม่ต้องคำนึงถึง Load ที่มาต่อที่เพลาว่าจะมากหรือน้อย ดังนั้น

Synchronous motor จึงนิยมใช้ในโรงสี โรงโม่หิน โรงกลั่น โรงไฟฟ้า และอื่น ๆ ที่ใช้ในการขับ Pump

และ Compressor

Synchronous machines ที่ออกแบบโดยเฉพาะสำหรับควบคุม Power-factor จะไม่มีเพลลาต่อภายนอก

(no external shafts) และจะถูกเรียกว่า “Synchronous condensers” โดยจะใส่ลอยไว้กับ Bus เพื่อจ่ายค่า

Reactive power ให้กับระบบ ทิศทางของ Reactive power และ Power-factor ของระบบสามารถปรับแต่งได้โดยการเปลี่ยน Field excitation ของ machine

#### 8-2. โครงสร้างของ Synchronous motor

Synchronous motor จะมีลักษณะแตกต่างจากมอเตอร์อื่น ๆ คือ ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้า 2 แหล่ง คือ

1. Stator รับกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส (Three-phase AC Supply)

2. Rotor รับกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Excitation Supply)

##### ■ Stator

Stator 3 เฟส ของ Synchronous motor เรียกว่า “Armature” จะเหมือนกับ 3 เฟส ของ Induction

motor เมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟส เข้าที่ Stator ขดลวดใน Stator จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กหรือ



สนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งจะหมุนผ่านขั้วแม่เหล็กของ Rotor ด้วยความเร็ว Synchronous speed ในลักษณะ

เช่นเดียวกับใน Induction motor

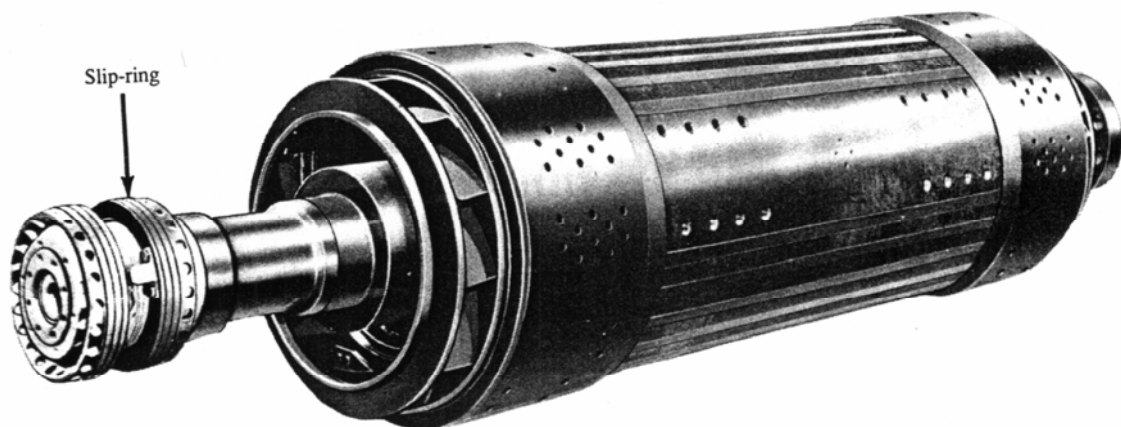
## ■ Rotor

ขดลวดที่พันอยู่บน Rotor จะถูกกระตุ้นให้ทำงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Excitation Supply) เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะถูกลocked อยู่ใน Synchronism กับขั้วของการเป็นขั้วตรง

ข้ามกัน (Opposite polarity) ที่ถูกสร้างจาก Rotating Flux ของ Stator ดังนั้นจำนวนขั้วของ Rotor จึงมี

จำนวนเท่ากับจำนวนขั้วของ Stator

Rotor ของ motor ชนิด 2 pole 60 Hz เช่น cylindrical rotor ตามที่แสดงในรูปที่ 8-1 โครงสร้างจะทำมาจาก solid-steel ซึ่งจะทนต่อแรงเหวี่ยงเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว high speed จึงนิยมใช้กับเครื่องจักรที่มีความเร็วสูง และ cylindrical rotor บางที่เรียกว่า “round rotor” ไม่สามารถเร่งความเร็วตาม load ที่มีแรงเฉื่อยสูงได้ ดังนั้นจึงต้องใช้กับ pump , fans , blowers และ load ที่ต้องการแรงบิดในการเริ่ม starting ต่ำ

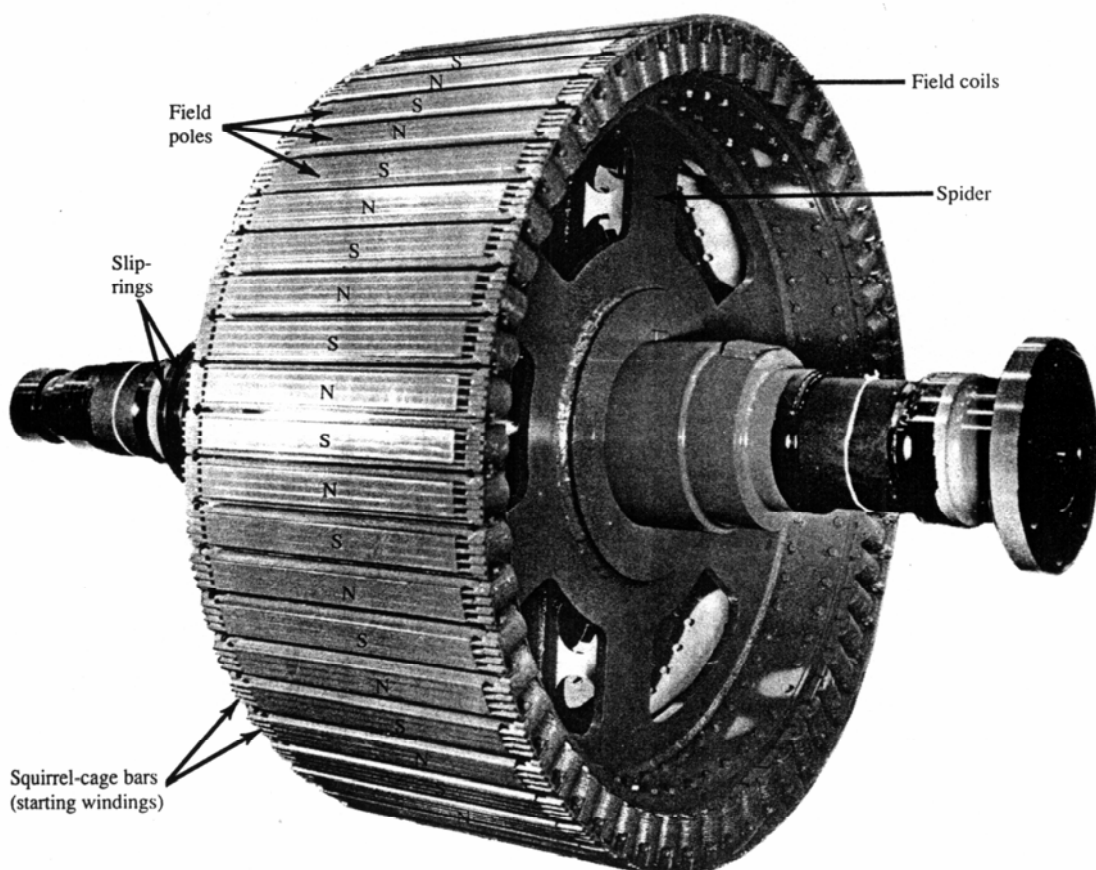


รูปที่ 8-1 Two-pole cylindrical rotor for high-speed synchronous-machine application

Rotor ที่เป็นแบบ squirrel-cage winding หรือเรียกว่า “pole-face winding , amortisseur winding หรือ damper winding” ตามที่แสดงในรูปที่ 8-2 Rotor ชนิดนี้จะเร่งความเร็วเข้าใกล้ Synchronous speed ดังนั้นจึงนิยมใช้งานกับ load ที่ต้องการแรงบิดสูงขณะเริ่ม starting และ rotor แบบนี้จะถูก ออกแบบให้มี

ขดลวด squirrel-cage winding จำนวน 2 ขด ซึ่งจะมัลักษณะเหมือนกับ induction motor ตามมาตรฐาน NEMA design C

Excitation winding ของ rotor บางทีเรียกว่า “Magnet winding หรือ Field winding หรือ Field coil” ขดลวด Field coil ของ Rotor จะถูกต่ออนุกรม หรืออนุกรม-ขนาน เพื่อให้ได้ขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) สลับกับ โขยวงจรของ Rotor จะสิ้นสุดที่ Slip rings และแปรงถ่านที่ติดกับ Slip rings เพื่อต่อระหว่าง Field winding กับ DC Excitation source

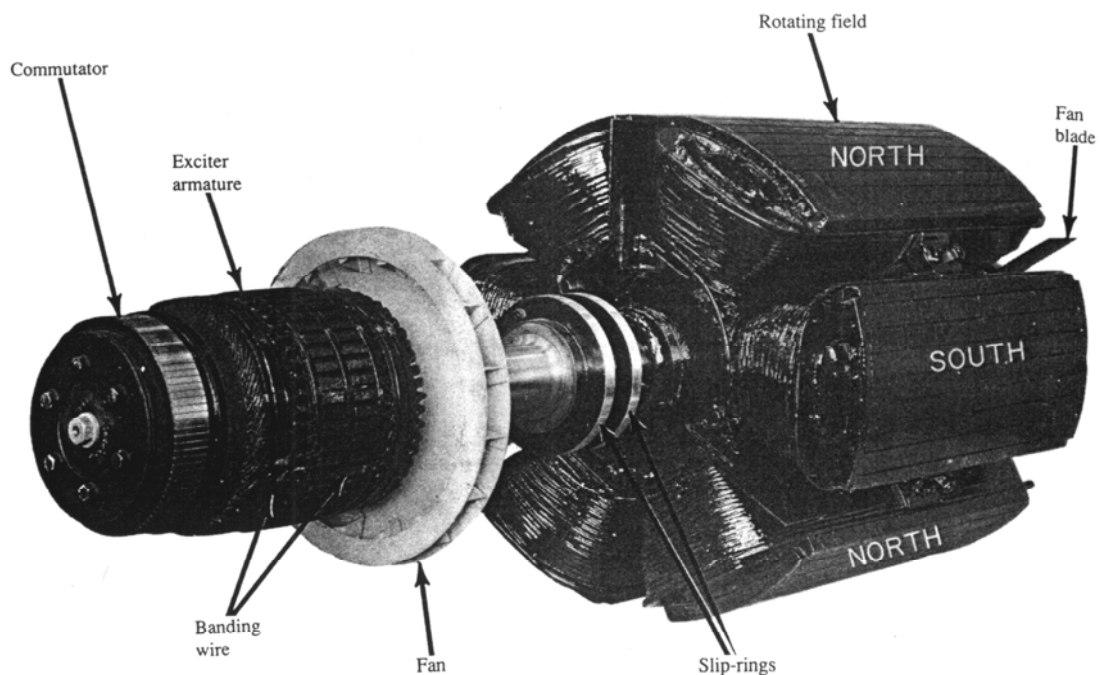


รูปที่ 8-2 Squirrel-cage rotor or Salient-pole rotor for slow-speed synchronous-machine application

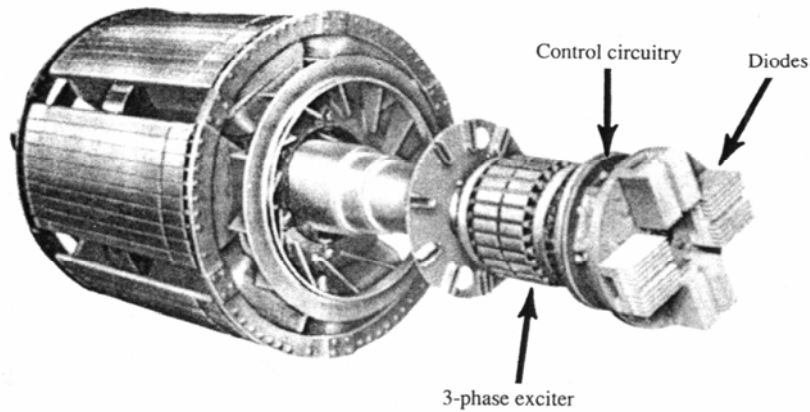
Salient-pole rotor ที่ติดตั้ง DC exciter ไว้ที่ shaft-mounted ตามที่แสดง  
ในรูปที่ 8-3 กระแสไฟฟ้า

DC current จะจ่ายให้กับ Field winding โดยผ่านแปรงถ่านที่ติดอยู่กับ commutator  
และส่งผ่านไปยัง slip-rings

Salient-pole rotor ที่ใช้กับระบบ excitation ที่ไม่มีแปรงถ่าน ตามที่แสดงในรูปที่  
8-4 โดยจะติดตั้ง  
3-phase exciter armature ขนาดเล็ก , 3-phase rectifier และวงจรถวมคูมไว้ที่เพลาอัน  
เดียวกัน



รูปที่ 8-3 Salient-pole rotor with shaft-mounted DC exciter



รูปที่ 8-4

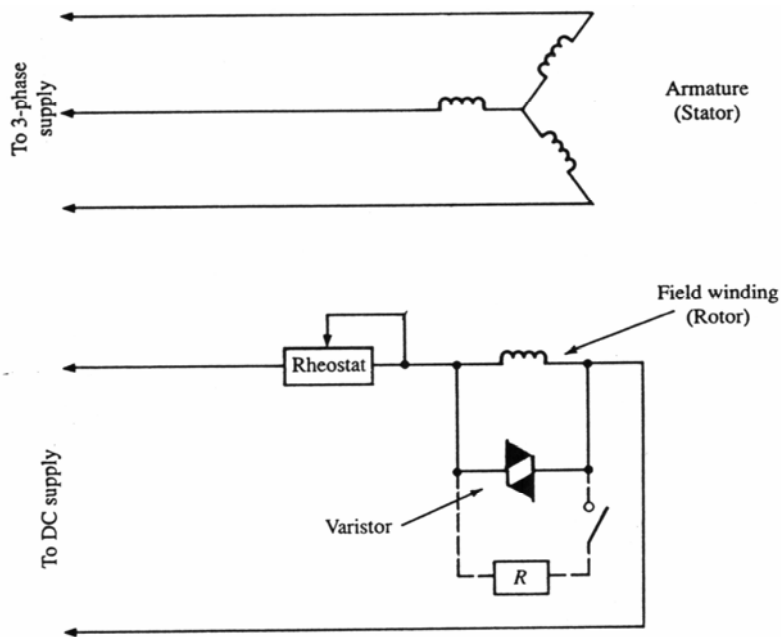
### 8-3. การสตาร์ท Synchronous Motor

เมื่อเราจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ให้กับขดลวด stator จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็กหมุน (stator magnetic field rotation) ผ่านขั้วแม่เหล็กของ rotor ด้วยความเร็ว synchronous speed จึงทำให้เกิดแรงบิดขึ้นชั่วขณะ และแรงบิดที่เกิดขึ้นชั่วขณะนี้ทำให้มีแนวโน้มว่าขั้วเหนือ (N) ของ rotor จะหมุนตามขั้วใต้ (S) ของ stator แต่ยังไม่สามารถทำให้ rotor หมุนได้ ถึงแม้ว่าจะไม่มี load ต่ออยู่ที่เพลาของมอเตอร์ก็ตาม ทั้งนี้เพราะ rotor ยังมีความฝืดอยู่ สำหรับแรงบิดเริ่มต้นหมุน (starting torque) ขณะนี้เป็นศูนย์

จากเหตุผลดังกล่าวที่บริเวณหน้าขั้วแม่เหล็กของ stator จึงมีขดลวดหน่วง (damper winding) ประกอบอยู่ ดังนั้นเมื่อเราจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เข้าที่ stator จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดหน่วง ทำให้ rotor หมุนจนกระทั่งมีความเร็วเกือบจะเท่ากับความเร็ว synchronous speed เราจึงจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงกระตุ้น (DC. excitation source) เข้าที่ขดลวด field winding ของ rotor เมื่อขดลวด field winding ได้รับไฟฟ้ากระแสตรงกระตุ้นจะทำให้เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ rotor เพิ่มขึ้น และขั้วแม่เหล็กของ rotor กับขั้วแม่เหล็กของ stator จะประกบติดกัน (lock in) และหมุนด้วยความเร็ว synchronous ที่คงที่

Synchronous motor เป็นมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ตลอดเวลา ไม่ว่าจะ มี load หรือไม่มี load (no load) ความเร็วนี้คือความเร็วที่วิ่งไปพร้อมกับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนคือ

$$n_s = 120 f / P$$

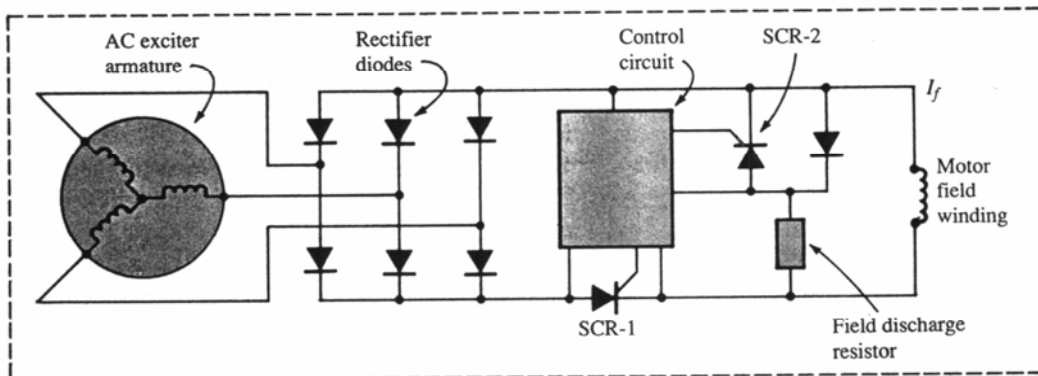


รูปที่ 8-

of a

synchronous motor

จากรูปที่ 8-5 แสดงการต่อวงจรจ่าย ๆ ของ rotor และ stator ใน synchronous motor โดย varistor หรือ resistor และ switch จะต่อพร้อมกับขดลวด field winding และจะอยู่นานี้ระหว่างขณะ locked-rotor และขณะเร่งขึ้นของ rotor เพื่อป้องกันการเกิด induced emf ที่สูงในขดลวด field winding และป้องกัน induced current ในวงจรที่เกิดจากขดลวด field winding การต่อค่าความต้านทานจากภายนอก (external resistor) จะทำให้แรงบิดของ induction motor เพิ่มขึ้น



## รูปที่ 8-6 Circuit diagram of a brushless excitation system for a synchronous machine

จากรูปที่ 8-6 จะแสดงวงจรของระบบ excitation ที่ไม่มีแปรงถ่าน โดยมี frequency-sensitive solid-state ควบคุมวงจรเพื่อตรวจดูความถี่ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (emf) ในขดลวด field winding ของมอเตอร์ โดยการหมุนเส้นแรงแม่เหล็กใน stator ค่าความถี่ของ emf จะเหมือนกันกับของขดลวดแบบ squirrel-cage และจะเป็น function กับความถี่ของ applied voltage ที่จ่ายให้ stator และค่า slip นั่นคือ

$$f_r = \frac{S f_s}{\quad}$$

### 8.1

ขณะ locked-rotor ค่า slip = 1 จะทำให้ความถี่ของ rotor ( $f_r$ ) เท่ากับความถี่ของ stator ( $f_s$ ) และขณะที่ rotor เร่งขึ้น ค่า slip ก็จะช่วย ๆ ลดลง ทำให้ความถี่ของ rotor ลดลงด้วย

เมื่อวงจร frequency-sensitive ตรวจพบความถี่สูง (high frequency) ที่ถูกจ่ายในขดลวด rotor ขณะ locked-rotor และระหว่างการเร่งขึ้นของ rotor ที่ค่า slip สูง วงจร SCR-2 จะปิดวงจร และ SCR-1 เปิดวงจร การเปิดวงจร SCR-1 จะเป็นการ block ค่ากระแส exciter current และการปิดวงจร SCR-2 จะต่อค่า discharge resistor คร่อมกับขดลวด field winding ที่เข้าใกล้กับ synchronous speed ทำให้ค่าความถี่ของ rotor มีค่าต่ำมาก (เกือบจะเท่ากับศูนย์) และเมื่อทำการเปิดวงจร SCR-2 และปิดวงจร SCR-1 การเปิดวงจร SCR-2 จะเป็นการปลดค่าความต้านทานออกจากวงจร และการปิดวงจร SCR-1 จะยอมให้กระแสเข้าสู่ขดลวด field winding

Synchronous motor ที่ไม่มีส่วนประกอบ built-in starting จะไม่ทำงาน จะต้องใช้ auxiliary motor หรือ turbine เป็นตัวขับ rotor จนกระทั่ง rotor เร่งขึ้นจนเข้าใกล้ synchronous speed

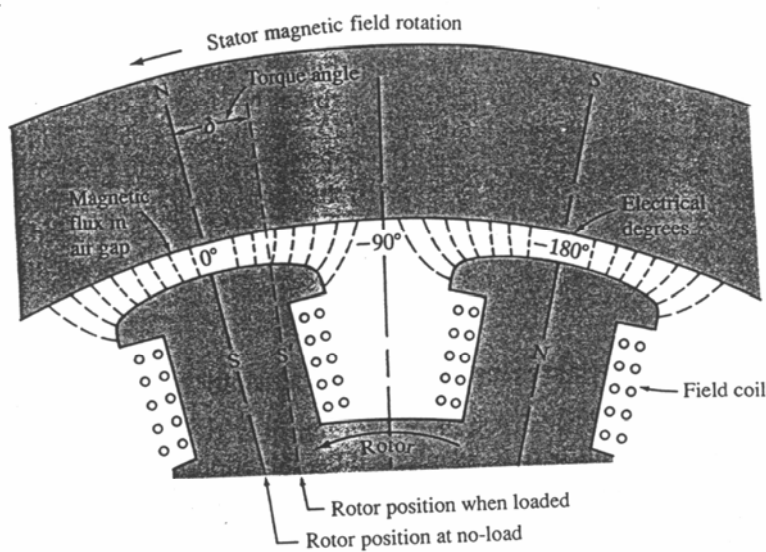
#### ● Reversing a Synchronous motor

การกลับทิศทางการหมุนของ 3-phase Synchronous motor จำเป็นจะต้องหยุด motor ก่อน แล้วจึง

กลับลำดับเฟสของไฟ 3 phase ที่จ่ายให้กับ stator โดยการสลับสายคู่ใดคู่หนึ่งใน 3 สาย จะทำให้ 3-phase Synchronous motor กลับทิศทางการหมุน การกลับกระแสในขดลวด field winding จะไม่มีผลต่อการกลับทิศทางการหมุน

## 8-4 Shaft Load , Power Angle and Developed Torque

แม้ว่า rotor ของ synchronous motor จะหมุนไปพร้อมกัน (synchronism) กับการหมุนของสนามแม่เหล็กของ stator การเพิ่ม load ที่เพลาจะทำให้การเป็นแม่เหล็ก (magnet) ของ rotor เปลี่ยนตำแหน่งมุมของมันที่มีต่อสนามแม่เหล็กที่หมุน มุม displacement angle นี้สามารถมองเห็นได้ โดยการมอง rotor ด้วย strobe light (electronic flash) ที่ synchronized ความถี่ของ stator



รูปที่

at synchronous

speed with no load on the shaft

จากรูปที่ 8-7 แสดง strobe view ของ salient-pole motor ที่ทำงานที่ synchronous speed และไม่มี load (no load) บนเพลา ทิศทางการหมุนจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา ขณะที่ motor มี load ตัว rotor จะเปลี่ยนตำแหน่งของมันโดยขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กที่หมุนของ stator โดยจะอยู่ด้านหลังเป็นมุม Delta ( $\delta$ ) โดยมุม  $\delta$  เป็นมุมองศาทางไฟฟ้า เรียกว่า “Power angle” หรือ “Load angle” หรือ “Torque angle”

Synchronous motor จะใช้งานที่ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับทุกค่าของ load ตั้งแต่จากตอน no load ไปสู่ตอนที่มี load สูงสุด เมื่อ load บน synchronous motor ถูกเพิ่มขึ้นมอเตอร์จะหมุนช้าลง เพื่อให้ rotor ปรับเปลี่ยนตำแหน่งมุมที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ของ stator เท่านั้น แล้วจะกลับเข้าสู่ความเร็วที่ synchronous speed อีกครั้ง จึงทำให้มีความเร็วคงที่

- **Developed Torque**

แรงบิดที่สร้างโดย synchronous motor จะมี 2 ส่วน คือ reluctance torque และ magnet torque

- ▣ **Reluctance torque**

Reluctance torque คือ แรงบิดที่เกิดจากแรงต้านทานของวงจรมแม่เหล็กที่มีต่อสนามแม่เหล็ก เนื่องจากคุณสมบัติของสารแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กที่จะเรียงตัวมันเอง เพื่อว่าวงจรมแม่เหล็กของ reluctance จะได้มีค่าต่ำสุด

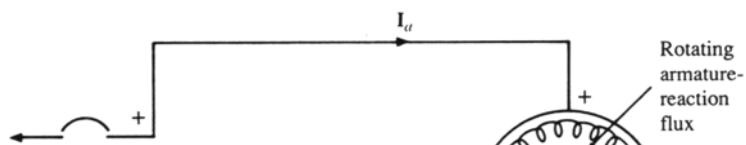
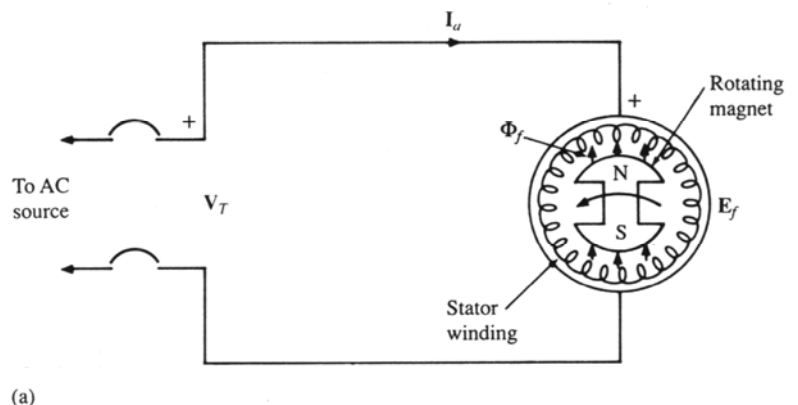
- ▣ **Magnet torque**

Magnet torque คือ แรงบิดที่เกิดจากแม่เหล็ก อันเนื่องมาจากแรงดึงดูดแม่เหล็กระหว่าง field pole บน rotor กับขั้วตรงข้ามของสนามแม่เหล็กที่หมุนบน stator

## 8-5 Counter-voltage (CEMF) และ Armature-reaction Voltage

เส้นแรงแม่เหล็กที่ส่งผ่านช่องว่าง air-gap (air-gap flux) ใน synchronous motor จะประกอบด้วย rotating field flux ( $\Phi_f$ ) ที่เกิดจาก DC current ( $I_f$ ) ใน rotating magnet หรือที่เรียกว่า “magnet flux” และ rotating armature flux หรือที่เรียกว่า “armature-reaction flux” ( $\Phi_{ar}$ ) ที่ถูกสร้างโดยกระแส armature 3-phase ในขดลวด stator ขนาดและมุมของ armature-reaction flux จะเป็น function กับขนาดและมุมของ armature current ส่วนทิศทางการหมุนของ magnet flux และ armature-reaction flux จะมีทิศทางการหมุนทางเดียวกัน

การหมุนของเส้นแรงแม่เหล็ก  $\Phi_f$  และ  $\Phi_{ar}$  จะจ่าย speed voltage ในตัวนำของ stator ตามที่แสดงในรูปที่ 8-8





รูปที่ 8-8 Separate circuit showing emf generated by component magnetic field for one phase of a synchronous motor :  
 (a) due to rotating magnet ; (b) due to rotating armature-reaction flux

จากรูปที่ 8-8 จะแสดงสำหรับ armature เพียง 1 phase ของ synchronous motor แบบ 3-phase โดยจะแสดง diagram แยกเป็น rotating magnet flux ตามรูปที่ 8-8 (a) และ diagram ของ rotating armature-reaction flux ตามรูปที่ 8-8 (b)

● **Counter-emf**

Rotor magnet ที่กำลังกวาดตัวนำของ stator ตามที่แสดงในรูปที่ 8-8 (a) จะจ่าย speed voltage ที่เรียกว่า “Counter-emf” หรือ “Excitation voltage” ซึ่งจะมีทิศทางตรงข้ามกับ applied voltage และค่า speed voltage จะเป็นสัดส่วนกับสนามแม่เหล็ก (field flux) และความเร็วของการหมุน (speed of rotation) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_f = \frac{n_s}{60} \Phi_f k_f \tag{8.2}$$

จากสมการที่ 8.2 ค่าเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\Phi_f$ ) ในเทอมของ magneto motive force (mmf) และความต้านทานของวงจรแม่เหล็ก (reluctance of the magnetic circuit) คือ

$$E_f = \frac{n_s (N_f I_f / \mathcal{R}) k_f}{60} \tag{8.3}$$

เมื่อ :  $E_f$  = excitation voltage/phase (V)

$n_s$  = synchronous speed (r/min)

$\Phi_f$  = pole flux หรือ field flux (Wb)

$N_f$  = number of turns of conductor in field coil  
(turns)

$I_f$  = DC field current (A)

$r$  = reluctance of magnetic circuit (A-t/Wb)

$k_f$  = constant

ความเร็วของ synchronous motor จะเท่ากับความเร็วของ rotating flux และจะคงที่ตามความถี่ที่ป้อนให้ นั่นคือ จากสมการที่ 8.3 ค่า excitation voltage จะเป็น function กับ field current เท่านั้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลกระทบจากการอิ่มตัวของแม่เหล็ก ค่า reluctance ของวงจรแม่เหล็กจะมีค่าไม่คงที่ นั่นคือ ค่า  $\Phi_f$  และ  $E_f$  จะไม่เป็นสัดส่วนกับค่า  $I_f$

ค่า  $cemf$  จะมีบทบาทสำคัญในการทำงานของ synchronous motor และมันอาจจะมีย่านน้อยกว่า หรือเท่ากับ หรือมากกว่าค่า applied voltage ที่จ่ายให้ stator ก็ได้ การปรับแต่งค่า  $cemf$  สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนกระแสใน field ที่ใช้แก่ power factor ของระบบ

### • Armature-reaction Voltage

การหมุนของ armature-reaction flux ที่กวาดตัวของ stator ตามที่แสดงในรูปที่ 8-8 (b) จะจ่าย speed voltage ที่เรียกว่า “armature-reaction voltage” ค่า armature-reaction speed voltage ในเทอมของ armature-reaction flux คือ

$$E_{ar} = \frac{n_s}{60} \Phi_{ar} k_a$$

8.4

เมื่อ :  $E_{ar}$  = armature-reaction voltage (V)

$\Phi_{ar}$  = armature-reaction flux (Wb)

$n_s$  = synchronous speed (r/min)

$k_a$  = constant

ถ้าตัดผลกระทบจากการอิ่มตัวของแม่เหล็กทิ้ง ค่า armature-reaction flux จะเป็นสัดส่วนกับค่า armature current นั่นคือ ค่า armature-reaction voltage อาจจะสามารถแสดงได้ในเทอมของ armature current และ

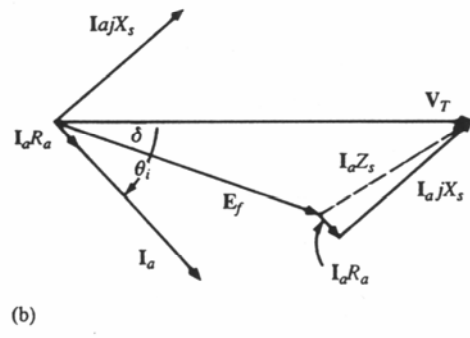
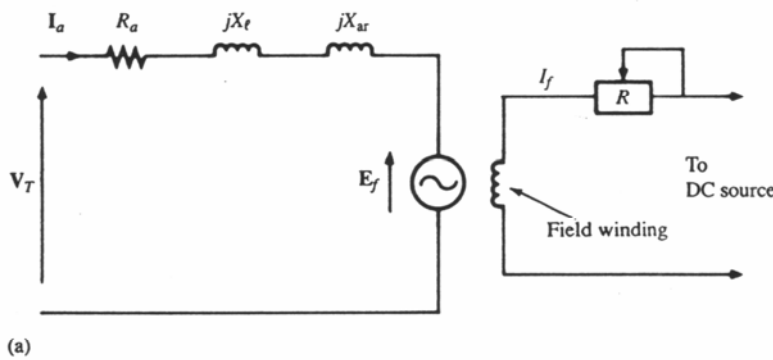
armature-reaction reactance คือ

$$E_{ar} = I_a j X_{ar}$$

8.5

เมื่อ :  $X_{ar}$  = armature-reaction reactance ( $\Omega/\text{phase}$ )

### 8-6 วงจรสมมูล และ Phasor Diagram ของ Synchronous Motor



รูปที่ 8-

(b)

synchronous-

motor;

(b) phasor diagram corresponding to the equivalent-circuit model in (a)

รูปวงจรถสมมูลสำหรับ armature แบบ 1-phase ของ cylindrical rotor synchronous motor ตามที่แสดงในรูปที่ 8-9 (a) ค่าทั้งหมดที่แสดงเป็นค่าต่อ phase เมื่อใช้กฎของ Kirchhoff's voltage law กับรูปที่ 8-9 (a) จะได้

8.6

$$V_T = I_a R_a + I_a j X_s + I_a j X_{ar} + E_f$$

เมื่อรวมค่าของ reactance

$$X_s = X_\ell + X_{ar}$$

8.7

แทนค่า reactance จากสมการที่ 8.7 ลงในสมการที่ 8.6 จะได้

$$V_T = I_a(R_a + jX_\ell + jX_{ar}) + E_f$$

$$V_T = E_f + I_a(R_a + jX_s)$$

8.8

หรือ

$$V_T = E_f + I_a Z_s$$

8.9

เมื่อ :

$$V_T = \text{applied voltage (V)}$$

$$R_a = \text{armature resistance } (\Omega/\text{phase})$$

$$X_\ell = \text{armature leakage reactance } (\Omega/\text{phase})$$

$$X_s = \text{armature reactance } (\Omega/\text{phase})$$

$$Z_s = \text{armature impedance } (\Omega/\text{phase})$$

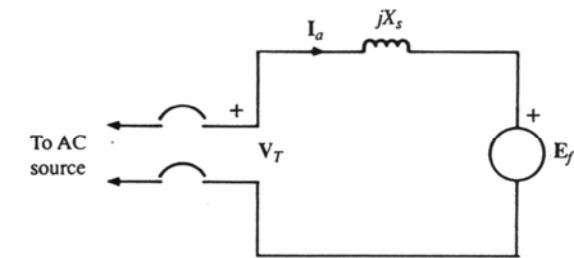
จากรูปที่ 8-9 (b) จะแสดงส่วนประกอบของ phasor diagram มุม phase angle ของ excitation voltage ( $\delta$ ) จะเท่ากับมุม torque angle ( $\delta$ ) ในรูปที่ 8-7 ซึ่ง มุม torque angle นี้จะเรียกว่า “load angle” หรือ “power angle”

## 8-7 Synchronous Motor Power Equation (Magnet Power)

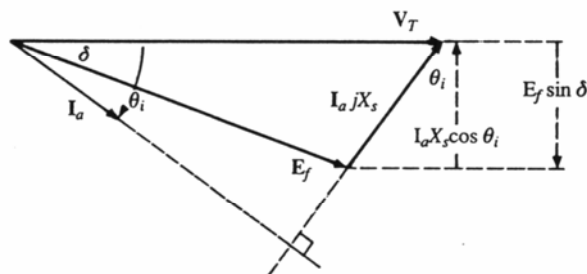
Synchronous motor ขนาดใหญ่ ค่าความต้านทานของ armature ( $R_a$ ) จะไม่ค่อยมีความสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับค่า synchronous reactance ( $X_s$ ) ดังนั้นจากสมการที่ 8.8 เมื่อตัดค่าความต้านทาน  $R_a$  ทิ้ง จะได้

8.10 
$$V_T = E_f + I_a j X_s$$

เมื่อตัดค่าความต้านทานของ armature ( $R_a$ ) ทิ้ง วงจรสมมูลและ phasor diagram จะแสดงในรูปที่ 8-10



(a)



(b)

รูปที่ 8-10 (a) Equivalent-circuit and (b) phasor diagram for a synchronous motor assuming armature resistance negligible

จากรูปที่ 8-10 (b) เมื่อใช้เรขาคณิตวิเคราะห์ phasor diagram ของ synchronous motor ต่อการเปลี่ยนแปลงของ load และ/หรือ การเปลี่ยนแปลงของ field excitation จะได้

8.11 
$$I_a X_s \cos \theta_i = E_f \sin \delta$$

จากสมการที่ 8.11 เมื่อนำค่า applied voltage ( $V_T$ ) คูณตลอด และจัดสมการใหม่ จะได้

$$8.12 \quad V_T I_a \cos\theta_i = - \cancel{(V_T E_f / X_s)} \sin \delta$$

จากสมการที่ 8.12 จะเห็นได้ว่าสมการทางด้านซ้าย  $V_T I_a \cos\theta_i$  ก็คือค่าของ active power-input นั่นคือ

$$8.13 \quad \boxed{P_{in, 1-\phi}} = \cancel{-V_T I_a \cos\theta_i}$$

หรือ

$$8.14 \quad \boxed{P_{in, 1-\phi} =} \cancel{(V_T E_f / X_s) \sin \delta}$$

ดังนั้นถ้าเป็น synchronous motor ระบบ 3-phase จะได้

$$8.15 \quad \boxed{P_{in, 3-\phi} =} 3 \times \cancel{V_T I_a \cos\theta_i}$$

หรือ

$$8.16 \quad \boxed{P_{in, 3-\phi} = 3 \times} \cancel{(V_T E_f / X_s) \sin \delta}$$

จากสมการที่ 8.14 เรียกว่า “synchronous-machine power equation” ซึ่งจะแสดงความหมายของ magnet power ต่อ phase ที่สร้างโดย cylindrical-rotor motor ในเทอมของ excitation voltage และ power angle

ถ้าสมมติให้ source voltage และ frequency คงที่ ดังนั้นสมการที่ 8.13 และ 8.14 ที่ จะใช้ในการวิเคราะห์ synchronous machine จะเป็นสัดส่วนดังนี้

$$8.17 \quad P \propto \cancel{I_a \cos\theta_i}$$

หรือ

$$8.18 \quad \cancel{P} \propto \cancel{E_f \sin \delta}$$

**Example 8-1** A 100 hp , 3-phase , wye-connected , 60 Hz , 460 V , four-pole , cylindrical-rotor synchronous motor is operating at rated condition and 80 percent power-factor leading. The efficiency , excluding field and stator losses , is 96 percent , and the synchronous reactance is 2.72  $\Omega$ /phase.

Determine : (a) developed torque; (b) armature current;  
 (c) excitation voltage;  
 (d) power angle; (e) maximum torque (also called pull-out torque)

**Solution** (a) developed torque ( $T_D$ )

จากสมการ  $n_s = 120 f / P = 120 (60) / 4 = 1800$   
 r/min

และจากสมการ  $P_{mech} = (T_D n_s) / 5252 \Rightarrow T_D = P_{mech} (5252) / n_s$

โจทย์กำหนดให้มอเตอร์ทำงานที่ประสิทธิภาพ 96 % ดังนั้น  $P_{mech} = (100 \text{ hp}) / 0.96$

$$T_D = (100 \text{ hp} / 0.96) (5252) / 1800 = 304 \text{ lb-ft}$$

**Ans**

(b) armature current ( $I_a$ )

จากสมการ  $\eta = P_{shaft} / P_{in} = P_{shaft} / (S_{in} \times \text{Pf})$

$$S_{in, 3-\phi} = P_{shaft} / (\eta \times \text{Pf}) = (100 \text{ hp} \times 746) / (0.96 \times 0.80) = 97,135 \text{ VA}$$

ดังนั้น  $S_{in, 1-\phi} = S_{in, 3-\phi} / 3 = 97,135 / 3 = 32,378.33 \text{ VA}$

โจทย์กำหนดค่าให้มอเตอร์ต่อแบบ wye-connected และค่า line voltage = 460 V ดังนั้น phase voltage จะมีค่าเท่ากับ

$$V_P = V_T = V_L / \sqrt{3} = 460 / \sqrt{3} = 265.58 \text{ V / phase}$$

และค่ามุม power-factor angle is negative for a leading power factor ดังนั้น

$$\theta = -\cos^{-1} 0.8 = -36.87^\circ$$

ดังนั้นจากสมการ

$$S_{1-\phi} = V_T I_a \angle 32,378.33 \angle -36.87^\circ = (265.58 \angle 0^\circ) I_a$$

$$\angle I_a = 121.92 \angle -36.87^\circ$$

$$\angle I_a = 121.92 \angle 36.87^\circ \text{ A}$$

**Ans**

(c) excitation voltage ( $E_f$ )

จากสมการ  $V_T = E_f + I_a j X_s \Rightarrow E_f = V_T - I_a j X_s$

$$E_f \angle 90^\circ = 265.58 \angle 0^\circ - (121.92 \angle 36.87^\circ) (2.72$$

$$\begin{aligned} \angle &= 265.58 \angle 0^\circ - (331.62 \angle 126.87^\circ) \\ &= (265.58 + j 0) - (-198.97 + j 265.3) \\ &= 464.55 - j 265.3 = 534.97 \angle -29.73^\circ \end{aligned}$$

29.73°

**Ans**

(d) power angle ( $\delta$ )

$$\delta = \underline{\hspace{2cm}} - 29.73^\circ$$

**Ans**

(e) maximum torque (also called pull-out torque)

Pull-out torque occurs at  $\delta = -90^\circ$



จากสมการ  $P_{in, 1-\phi} = 3 \times - (V_T E_f / X_S) \sin \delta$

$$= 3 \times - [(265.58 \times 534.97) / 2.72] \sin (-90^\circ)$$

$$= 156,700 \text{ W} = 156,700$$

$$/ 746 \text{ hp} = 210.05 \text{ hp}$$

จากสมการ  $P_{mech} = (T_D n_s) / 5252 \Rightarrow T_D = P_{mech} (5252) / n_s$

$$T_D = [(210.05)(5252) / 1800]$$

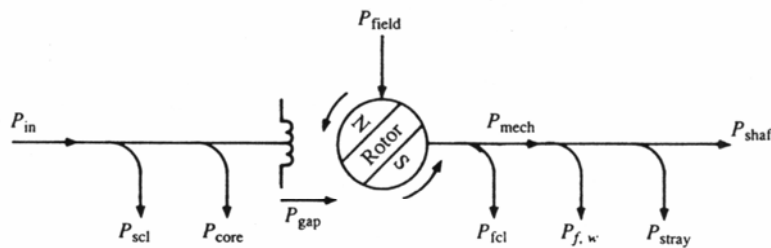
$$T_{pull-out} = \underline{\underline{612.88}} \text{ lb-ft}$$

**Ans**



### 8-8. กำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพของ Synchronous Motor

Power-flow diagram ที่แสดงการไหลกำลังงานไฟฟ้าของ synchronous motor จาก stator และส่งผ่าน rotor ไปยัง shaft output ตามที่แสดงในรูปที่ 8-11



รูปที่ 8-11 Power-flow diagram for a synchronous motor

จากรูป Power-flow diagram เราสามารถหาค่าของกำลังงานสูญเสียทั้งหมดใน synchronous motor ได้จากสมการ

$$W \quad \boxed{P_{\text{loss}} = P_{\text{scl}} + P_{\text{core}} + P_{\text{fcl}} + P_{\text{f,w}} + P_{\text{stray}}}$$

8.19

- เมื่อ :
- $P_{\text{loss}}$  = total power loss (W)
  - $P_{\text{scl}}$  = stator-conductor loss (W)
  - $P_{\text{fcl}}$  = field-conductor loss (W)
  - $P_{\text{core}}$  = core loss (W)
  - $P_{\text{f,w}}$  = friction and windage loss (W)
  - $P_{\text{stray}}$  = stray power loss (W)

- ประสิทธิภาพ (**Efficiency**)

ประสิทธิภาพของ synchronous motor หาได้จากสมการ

$$\boxed{\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{shaft}}}{(P_{\text{in}} + P_{\text{field}})} = \frac{P_{\text{shaft}}}{(P_{\text{shaft}} + P_{\text{loss}})}}$$

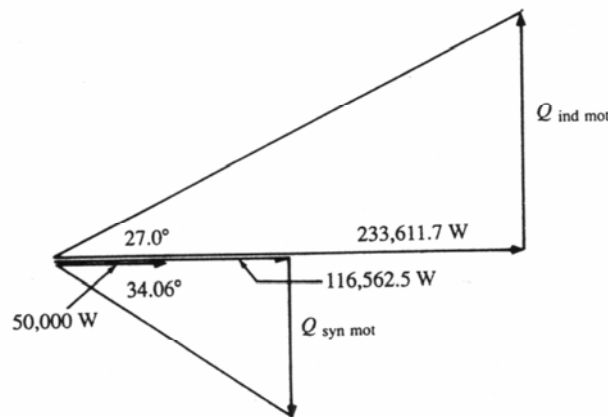
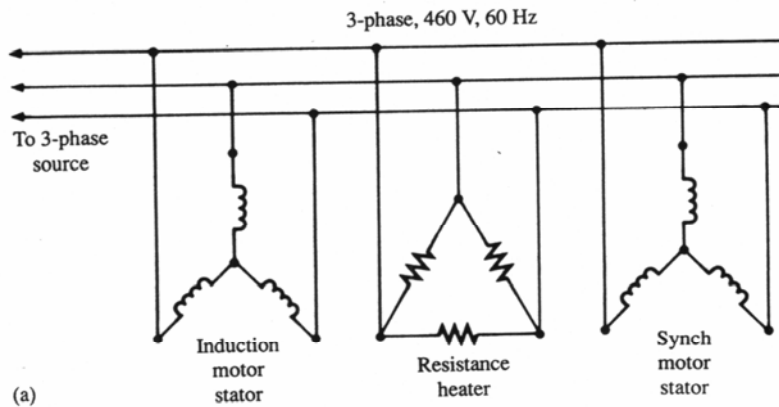
8.20

**Example 8-2** A 3-phase , 60 Hz , 460 V system supplies the following load :

- 1.) A six-pole , 60 Hz , 400 hp , 3-phase , wye-connected induction motor , operating at three-quarters rated load with an efficiency of 95.8 percent and a power-factor of 89.1 percent.
- 2.) A 50 kW , delta-connected , 3-phase resistance heater.
- 3.) A 300 hp , 60 Hz , four-pole , wye-connected , cylindrical-rotor synchronous motor , operating at one-half rated load , with a torque angle of  $-16.4^\circ$

Neglecting copper losses , the synchronous motor is operating at 96 percent efficiency , and its synchronous reactance is 0.667  $\Omega$ /phase. Determine :

- (a) system active power
- (b) power-factor of the synchronous motor
- (c) system power-factor
- (d) percent change in synchronous motor field current required to adjust the system power-factor to unity (neglect saturation effects)
- (e) power angle of the synchronous motor for the condition in (d)



diagram

รูปที่ 8-

**Soluti**

จากสมการ  $\eta = P_{out} / P_{in} \Rightarrow P_{in} = P_{out} / \eta =$

$P_{shaft} / \eta$

$P_{ind\ mot} = (400\ hp \times 746\ w) (3/4) / (95.8/100) = 233,611.7\ W$

$P_{heater} = 50,000\ W$

$P_{syn\ mot} = (300\ hp \times 746\ w) (1/2) / (96/100) = 116,562.5\ W$

$P_{system} = P_{ind\ mot} + P_{heater} + P_{syn\ mot}$   
 $= 233,611.7 + 50,000 + 116,562.5$

$$= 400,174.19 \text{ W} = 400.2 \text{ kW}$$

**Ans**

(b) power-factor of the synchronous motor

synchronous motor ต่อแบบ wye-connected ดังนั้น  $\bar{V}_{\text{phase}} = V_{\text{line}} / \sqrt{3}$

$$V_T = \bar{V}_{\text{phase}} = 460 / \sqrt{3} = 265.581 \text{ V}$$

จากสมการ  $P_{\text{in}, 3-\phi} = 3 \times (V_T E_f / X_s) \sin \delta$

$$E_f = (P_{\text{in}, 3-\phi} X_s / 3 V_T \sin \delta) = (116,562.5) 0.667 / 3 (265.581) \sin (-16.4^\circ)$$

$$\angle = 345.614 - 16.4^\circ \text{ V}$$

จากสมการ

$$E_f = V_T - I_a j X_s$$

$$(0.667 \angle 90^\circ) \angle 345.614 - 16.4^\circ = 265.581 \angle 0^\circ - I_a$$

$$\angle I_a = 176.6 - 34.06 \text{ A}$$

$$\theta = \theta_v - \theta_i \angle = (0 - 34.06)$$

$$= -34.06^\circ$$

$$\text{power factor} = \cos \theta = \cos (-34.06^\circ) = 0.828$$

**Ans**

(c) system power-factor

The power-factor angle for the respective loads are

$$\theta_{\text{ind mot}} = \cos^{-1} 0.891 = 27.0^\circ$$

$$\theta_{\text{heater}} = \cos^{-1} 1.0 = 0^\circ$$

$$\theta_{\text{syn mot}} = -34.06^\circ$$

จาก power diagram ในรูปที่ 8-12 (b) จะได้

$$\tan 27.0^\circ = (Q_{\text{ind mot}}) / 233,611.7 \Rightarrow Q_{\text{ind}}$$

$$\text{mot} = 119,035.3 \text{ var}$$

$$\tan(-34.06^\circ) = (Q_{\text{syn mot}}) / 116,562.5 \Rightarrow$$

$$Q_{\text{syn mot}} = -78,800.1 \text{ var}$$

$$Q_{\text{sys}} = 119,035.3 - 78,800.1 = 40,235.2 \text{ var}$$

$$S_{\text{sys}} = P + jQ = 400,174.19 + j40,235.2 = 402,191 \angle 5.74^\circ \text{ VA}$$

$$\text{Power-factor of system} = \cos(5.74^\circ) = \underline{0.995} \text{ lagging}$$

**Ans**

(d) percent change in synchronous motor field current required to adjust the system power-factor to unity (neglect saturation effects)

To obtain unity power factor, the synchronous motor must supply an additional -40,235.2 var.

$$\text{ดังนั้น} \quad S_{\text{syn mot}} = 116,562.5 - j(78,800.1 + 40,235.2) \\ \angle = 166,602 \angle -45.6^\circ \text{ VA}$$

$$\text{สำหรับ 1 phase} \quad S_{\text{syn mot}} = \underline{(166,602 / 3)} \angle 45.6^\circ = 55,534 \angle -45.6^\circ \text{ VA}$$

$$\text{จากสมการ} \quad S_{\text{syn mot}} = V_T I_a^* \\ \angle 55,534 \angle -45.6^\circ = (265.58 \angle 0^\circ) I_a^* \\ \angle I_a^* = 209.1 \angle -45.60^\circ \\ \angle I_a = 209.1 \angle 45.60^\circ \text{ A}$$

$$\text{จากสมการ} \quad E_f = V_T - I_a j X_s \\ = (265.58 \angle 0^\circ) - \underline{(209.1 \angle 45.60^\circ)} (0.667 \angle 90^\circ) \\ = 265.581 + 99.65 - j97.58 \\ \angle = \underline{378.04 \angle -14.96^\circ} \text{ V}$$

**Ans**

Neglecting magnetic saturation จะได้  $E_f \propto \Phi_f \propto I_f$

$$\Delta E_f = [(378.04 - 345.614) / 345.614] \times 100 = 9.38 \%$$

Ans

(e) power angle of the synchronous motor for the condition in (d)

$$\delta = -14.96^\circ$$

Ans

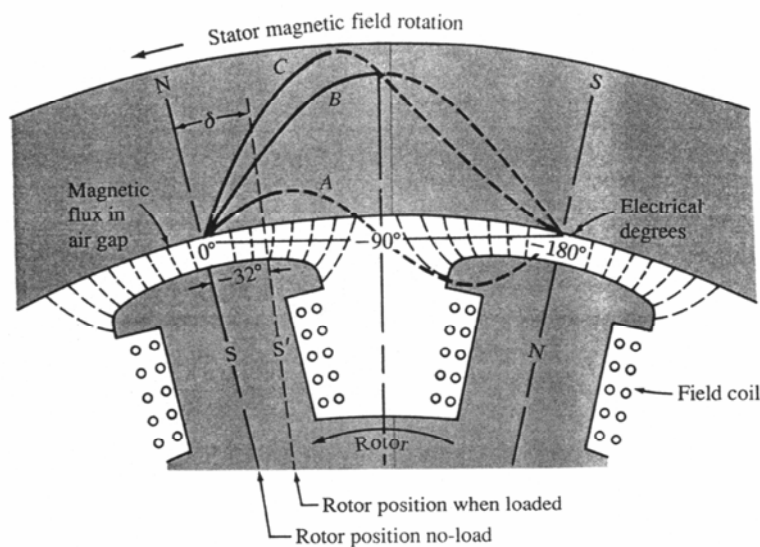
### 8-9 Salient-pole motor

ขั้วของ rotor และ interpole ที่เกี่ยวข้องกับในวงจรมแม่เหล็กของ Salient-pole motor ตามที่แสดงในรูปที่ 8-13 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ครบบรอบของ reluctance (Curve A) ต่อ armature-reaction flux ไปกวาดตัวนำของ stator โดยค่า low-reluctance จะไปตามแกนของแต่ละขั้ว และค่า high-reluctance จะไปตามช่องว่างของ interpole แต่ละอัน ผลกระทบรวมที่เกิดขึ้นบนขดลวด armature winding จะเหมือนกับการสร้างส่วนประกอบของคลื่น 2 คลื่น ของ armature-reaction flux โดยแยกจากกันเป็นมุม  $90^\circ$  ส่วนประกอบของ armature-reaction flux ที่แสดงไปตามแกนของแต่ละขั้ว (field pole) เรียกว่า "direct-axis" และส่วนประกอบของ armature-reaction flux ที่แสดงในช่องว่างของ interpole ระหว่างขั้ว N และขั้ว S เรียกว่า "quadrature-axis" ส่วนประกอบของเส้นแรงแม่เหล็กเหล่านี้จะจ่าย voltage drop ใน armature ซึ่งได้แสดงในรูปของ armature current และ armature-reaction reactance

สมการค่า power ของ salient-pole motor ที่เกี่ยวข้องกับที่แสดงในเทอมของ reactance จะประกอบด้วย magnet power และ reluctance power ตามที่แสดงในสมการที่ 8-21

$$P_{\text{salient}, 1-\phi} = \underbrace{-(V_T E_f / X_d) \sin \delta}_{\text{magnet power}} - \underbrace{V_T^2 [(X_d - X_q) / 2 X_d X_q] \sin 2\delta}_{\text{reluctance power}}$$

เมื่อ :  $X_d$  = direct-axis synchronous reactance ( $\Omega$ /phase)  
 $X_q$  = quadrature-axis synchronous reactance ( $\Omega$ /phase)



Curve A: Reluctance torque  
 Curve B: Magnet torque  
 Curve C: Net torque

รูปที่ 8-13

orque vs

power angle show  
 superimposed on a strobe view of the rotor

• **Normal operation**

ขอบเขตการทำงานปกติจาก half-rated load ไปสู่ rated load และ excitation ปกติ ค่า excitation

voltage ( $E_f$ ) ในสมการที่ 8.21 จะต้องมีค่าสูงพอที่จะทำให้ค่า magnet power ( $P_{mag}$ ) มากกว่า reluctance power ( $P_{rel}$ ) นั่นคือสำหรับการทำงานปกติจะได้สมการ

$$P_{salient} \approx - (V_T E_f / X_d) \sin \delta$$

8.22

■ **หมายเหตุ** ถ้าช่องว่างของ interpolar ระหว่างขั้ว N และ S ถูกลดจนเป็นศูนย์ rotor จะกลายเป็น

cylindrical rotor คือ  $X_d = X_q = X_s$  ส่วนประกอบของ reluctance power = 0 ดังนั้นสมการที่ 8.21 จะถูกลดเหลือเป็นสมการที่ 8.22

เนื่องจากส่วนประกอบของ reluctance power จะเป็นอิสระจาก excitation voltage ค่าต่ำสุดของ excitation จะเป็นตัววัดในส่วนของ magnet power โดยไม่มีผลต่อส่วนของ reluctance power นั่นคือ ถ้ามอเตอร์ไม่มี load หรือมี load น้อย และ field circuit ถูก open ค่า excitation voltage จะ drop ลงมาเหลือค่าเพียงเล็กน้อย จะทำให้ค่า magnet power ในสมการที่ 8.21 ลดลง และมอเตอร์จะทำงานแบบ reluctance synchronous motor

การ plot ค่า reluctance torque และ magnet torque กับค่ามุม  $\delta$  จะแสดงคู่กันในรูปของจังหวะการเคลื่อนที่ของ rotor ตามที่แสดงในรูปที่ 8-13 โดย Curve A คือ reluctance torque , Curve B คือ magnet torque และ Curve C คือ net torque ซึ่งจะรวมค่าของ Curve A และ Curve B สำหรับส่วนของเส้นปะจะแสดงขอบเขตการทำงานที่ไม่สมดุลสำหรับส่วนที่เป็นแรงบิดและผลลัพธ์ของแรงบิด

จากรูปที่ 8-13 และสมการที่ 8.21 ค่าสูงสุดของ reluctance torque ที่เกิดขึ้นขณะใส่ load ที่เพลาจะทำให้ rotor ล้าหลังขณะไม่มี load (no-load) เป็นมุม  $45^\circ$  ( $\delta = -45^\circ$ ) ค่า magnet torque จะมีค่าสูงสุดที่มุม  $\delta = -90^\circ$  ค่า net torque ของ salient-pole motor ที่รวมระหว่างค่า reluctance torque และ magnet torque โดยค่าสูงสุดของ net torque จะเรียกว่า “pull out torque” ที่  $\delta = -70^\circ$  และค่า rated torque ตามที่แสดงในรูปที่ 8-13 เกิดขึ้นที่มุม  $\delta \approx -32^\circ$

**Example 8-3** A 3 phase , 200 hp , 60 Hz , 2300 V , 900 r/min , salient-pole synchronous motor has direct-axis and quadrature-axis resistance equal to 36.66  $\Omega$ /phase and 23.33  $\Omega$ /phase , respectively. Neglecting losses , Determine

- the developed torque if the field current is adjusted so that the excitation voltage is equal to two times the applied stator voltage , and the power angle is  $-18^\circ$
- the developed torque in percent of rated torque , if the load is increased until maximum reluctance torque occurs



**Solution** (a) the developed torque if the field current is adjusted so that the excitation voltage is equal to two times the applied stator voltage, and the power angle is  $-18^\circ$

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad P_{\text{mag}, 1-\phi} &= -(V_T E_f / X_d) \sin \delta \\
 &= - [(2300 / \sqrt{3}) (2 \times 2300 / \sqrt{3})] / 36.66 \sin (-18^\circ) \\
 &= 29,727.7 \text{ W} \\
 P_{\text{rel}, 1-\phi} &= - V_T^2 [(X_d - X_q) / 2 X_d X_q] \sin 2\delta \\
 &= - (2300 / \sqrt{3})^2 [(36.66 - 23.33) / (2 \times 36.66 \times 23.33)] \sin 2(-18^\circ) \\
 &= 8076.9 \text{ W} \\
 P_{\text{salient}, 3-\phi} &= 3 (P_{\text{mag}, 1-\phi} + P_{\text{rel}, 1-\phi}) \\
 &= 3 (29,727.2 + 8076.9) \\
 &= 113,412.3 \text{ W} \\
 &= 113,412.3 / 746 = 152 \text{ hp}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad P &= T n / 5252 \quad \Rightarrow \quad T = 5252 P / n
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T &= (5252 \times 152) / 900 = 887 \text{ lb-ft} \\
 &\quad \underline{\text{Ans}}
 \end{aligned}$$

(b) the developed torque in percent of rated torque, if the load is increased until maximum reluctance torque occurs

The reluctance torque has its maximum value at  $\delta = -45^\circ$

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad P_{\text{mag}, 1-\phi} &= -(V_T E_f / X_d) \sin \delta \\
 &= - [(2300 / \sqrt{3}) (2 \times 2300 / \sqrt{3})] / 36.66 \sin (-45^\circ) \\
 &= 68,023.1 \text{ W} \\
 P_{\text{rel}, 1-\phi} &= - V_T^2 [(X_d - X_q) / 2 X_d X_q] \sin 2\delta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= - (2300 / \sqrt{3})^2 [(36.66 - 23.33) \\
 &/ (2 \times 36.66 \times 23.33) \sin 2 (-45^\circ) \\
 &= 13,741.3 \text{ W} \\
 P_{\text{salient}, 3-\phi} &= 3 (P_{\text{mag}, 1-\phi} + P_{\text{rel}, 1-\phi}) \\
 &= 3 (68,023.1 + 13,741.3) \\
 &= 245,293.2 \text{ W} \\
 &= 245,293.2 / 746 = \\
 &328.8 \text{ hp}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น percent rated load =  $(328.8 / 200) \times 100 = 164$   
 % Ans

---

## 8-10 การควบคุมความเร็ว Synchronous Motor

ความเร็วของ synchronous motor จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ที่จ่ายให้ stator และเป็นส่วนกลับกับจำนวนขั้ว ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$n_r = n_s = 120 f / P$$

8.23

การเปลี่ยนแปลงความเร็วของ synchronous motor จะต้องเปลี่ยนความถี่ของ applied voltage เราไม่สามารถเปลี่ยนจำนวน pole ได้ เนื่องจากโครงสร้างของ synchronous motor แต่ละชนิดจะมีจำนวน pole คงที่ และจากการศึกษาในบทที่ 5 การนำมอเตอร์ที่ใช้ความถี่ 60 Hz ไปใช้กับความถี่ 50 Hz จะทำให้เกิดความร้อนในขดลวด stator winding ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาร้อนที่เกิดขึ้นบนขดลวด stator winding จึงจำเป็นต้อง

ปรับค่าของ volts / Hz ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับความถี่ของ generator ด้วยอุปกรณ์  
volts/Hz regulator หรือใช้ solid-state control

---

### SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING

$$E_f = n_s \Phi_f k_f \qquad E_f =$$

$$n_s (N_f I_f / r) k_f$$

$$V_T = I_a R_a + I_a jX_l + I_a jX_{ar} + E_f \qquad V_T =$$

$$E_f + I_a jX_s$$

$$V_T = E_f + I_a Z_s$$

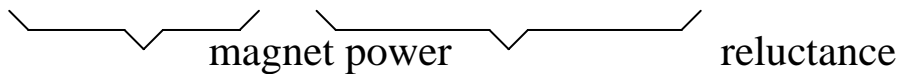
$$P_{in, 1-\phi} = V_T I_a \cos\theta_I \qquad P_{in, 1-\phi}$$

$$= - (V_T E_f / X_s) \sin \delta$$

$$P_{in, 3-\phi} = 3 \times V_T I_a \cos\theta_I \quad P_{in, 3-\phi} = 3 \times -(V_T E_f / X_s) \sin \delta$$

$$P_{loss} = P_{sc1} + P_{core} + P_{fc1} + P_{f,w} + P_{stray}$$

$$P_{salient, 1-\phi} = -(V_T E_f / X_d) \sin \delta - V_T^2 [(X_d - X_q) / 2 X_d X_q] \sin 2\delta$$



$$P_{salient, 3-\phi} = 3 (P_{mag, 1-\phi} + P_{rel, 1-\phi})$$

$$n_r = n_s = 120 f / P$$

-----

## บทที่ 9

# เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Synchronous (Synchronous Generator)

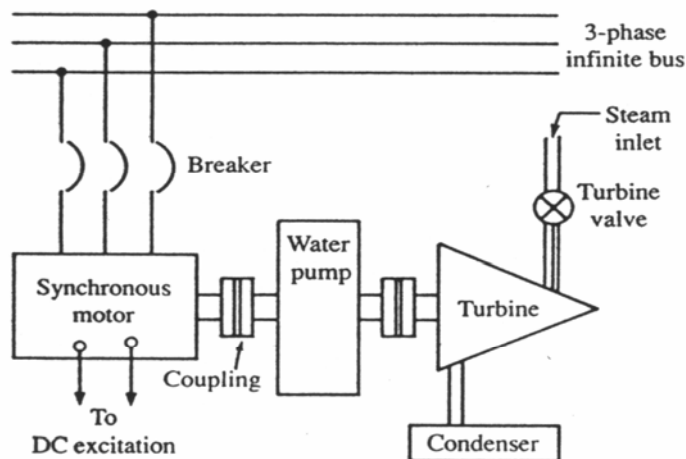
### 9-1. บทนำ

Synchronous generator บางที่เรียกว่า “Alternator หรือ AC. generator” เป็นพื้นฐานของแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าทั่วโลก โดยจะมีขนาดตั้งแต่เป็น kVA ไปจนถึง MVA เครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีตัวต้นกำลังขับ (prime mover) เพื่อขับเพลลาของ rotor ให้หมุนและเกิดสนามแม่เหล็กไป link กับ stator เพื่อจะสร้าง voltage และจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมา ตัวต้นกำลังขับถ้าเป็นเครื่องกำเนิด synchronous generator ขนาดเล็กจะใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นตัวขับ ถ้าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ๆ จะใช้ gas turbine หรือ steam turbine หรือ hydraulic turbine ที่ได้จากเขื่อนกักน้ำเป็นตัวขับ

โครงสร้างของ synchronous generator จะเหมือนกับ synchronous motor ตามที่อธิบายในบทที่ 8 แต่

ที่น่าสนใจคือ synchronous generator ถูกขับด้วย hydraulic turbine และต่อกับระบบกำลังขนาดใหญ่ และบางที่ใช้ synchronous motor ระหว่างช่วงสุดท้ายการใช้งาน โดยผ่านสวิทช์ที่เตรียมไว้ synchronous generator จะถูกขับเคลื่อนเหมือน synchronous motor ในทิศทางกลับกัน ในระบบนี้จะใช้กับการปั้มน้ำจากที่เก็บต่ำไปสู่ที่เก็บสูง การเก็บน้ำไปเพื่อใช้ภายหลังนี้ถูกเรียกว่า “pumped storage”

### 9-2. Motor to Generator Transition

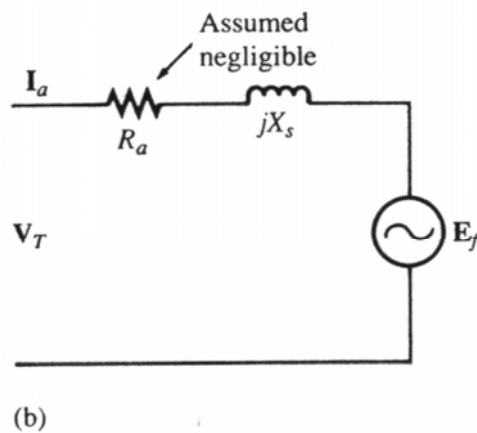


(a)

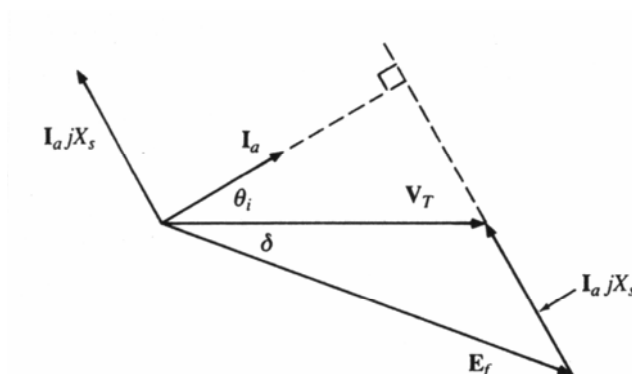
รูปที่ 9-1 (a) Synchronous motor mechanically coupled to a water pump and a steam turbine

จากรูปที่ 9-1 (a) จะแสดง an infinite bus ต่อเข้ากับ synchronous motor ซึ่งเพลลาของมันต่อเข้ากับ water pump และ steam turbine การออกแบบ turbine ไว้เช่นนั้น คือ เมื่อไอน้ำชนใบพัดของ turbine แรงบิดของ turbine จะมีทิศทางเดียวกับแรงบิดของ synchronous motor เมื่อลื่นของ turbine ถูกปิด เพื่อว่าจะไม่มีไอน้ำเข้าสู่ turbine ดังนั้น synchronous motor จะขับ pump และ turbine ด้วย synchronous speed ซึ่ง phasor diagram ของ synchronous motor ตามที่แสดงในรูปที่ 9-1 (b) จะได้สมการที่เกี่ยวข้อง คือ

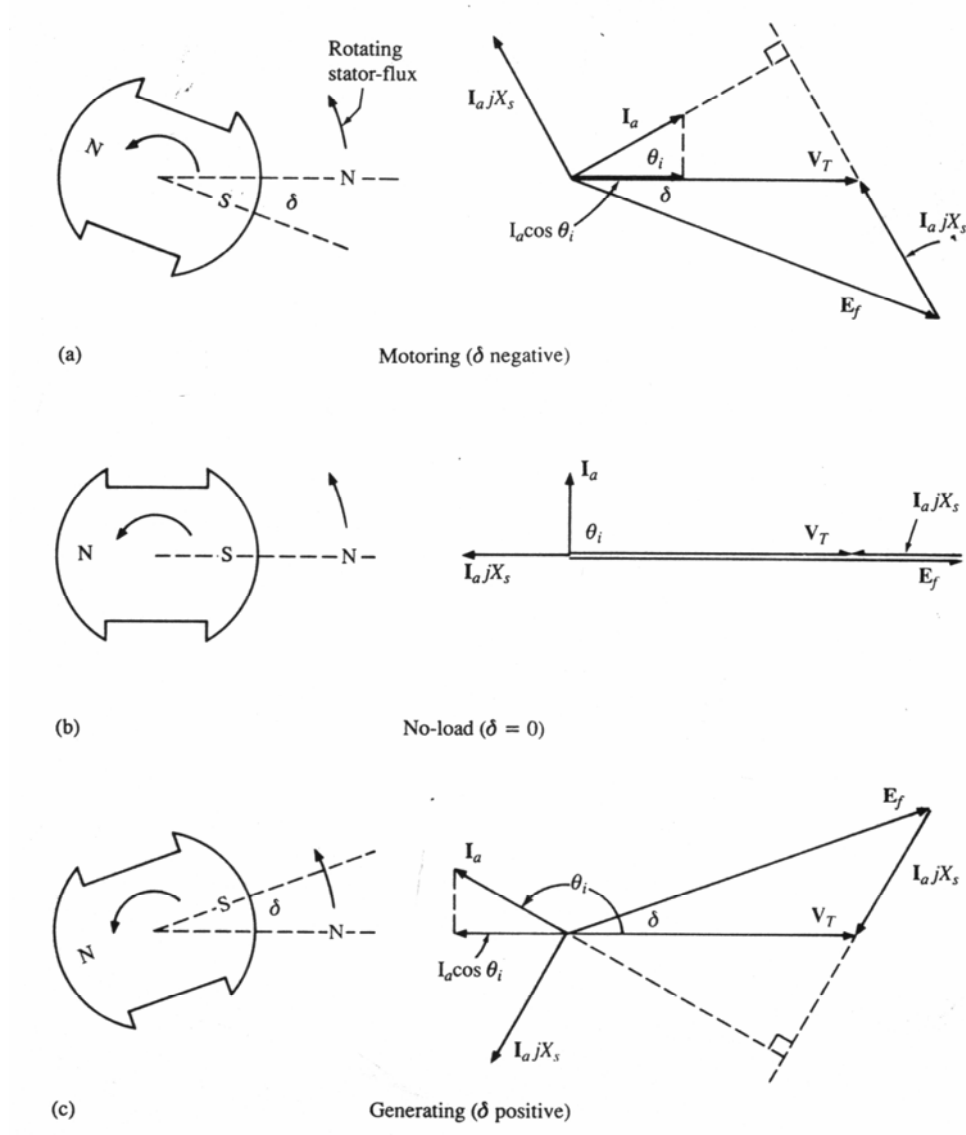
(motor) 
$$V_T = E_f + I_a jX_s \quad \text{9.1}$$



รูปที่ 9-1 (b) Equivalent circuit for one phase of the synchronous motor armature



รูปที่ 9-2 (c) Phasor diagram of the synchronous motor



รูปที่ 9-2 Strobe views of a two-pole rotor and the corresponding phasor diagram for motoring no load and generator

จากรูปที่ 9-2 จะแสดงการเคลื่อนตัวของ rotor ชนิด 2 ขั้ว และ phasor diagram ที่เกี่ยวข้องกับการเป็น motor สำหรับ no load [รูปที่ 9-2 (a)] และสำหรับการเป็น generator [รูปที่ 9-2 (c)]

■ เมื่อเครื่องทำงานเป็น **motor** มุม  $\delta$  (delta) จะมีค่าเป็นลบ ตามที่แสดงในรูปที่ 9-2

(a) มันจะถูกขับโดย bus voltage ( $V_T$ ) และ excitation voltage ( $E_f$ )

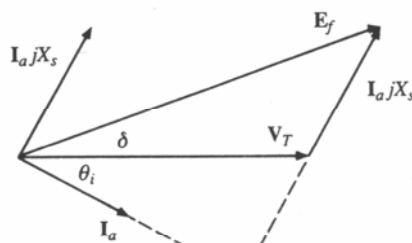
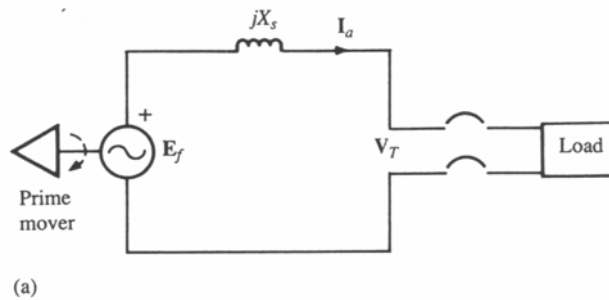
■ เมื่อเครื่องทำงานเป็น **generator** มุม  $\delta$  (delta) จะมีค่าเป็นบวก ตามที่แสดงในรูปที่ 9-2 (c) โดย excitation voltage ( $E_f$ ) จะกลายเป็น source voltage และส่วนที่เป็น active component ของกระแส คือ

$I_a \cos \theta_i$  จะถูกกลับทาง

แม้ว่า phasor diagram ตามที่แสดงในรูปที่ 9-2 (c) จะถูกต้องสำหรับ synchronous generator แต่จะไม่ใช้มันเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของ generator เพราะว่ามันจะมีแต่ส่วนที่เป็น negative power factor ด้วย

เหตุผลที่ว่า การเปลี่ยนใน phasor diagram ของเครื่องที่ทำงานเป็น motor ที่เปลี่ยนไปทำงานเป็น generator นั้นยุ่งยาก

## ● Phasor diagram of a synchronous generator



รูปที่ 9-3 (a) equivalent circuit and (b) phasor diagram for generator action

จากรูปที่ 9-3 แสดงการทำงานเป็น generator จะเห็นว่า excitation voltage ( $E_f$ ) จะกลายเป็น source voltage และ bus voltage จะกลายเป็น voltage ที่จ่ายให้กับ load ( $V_T$ ) ดังนั้นเมื่อใช้กฎของ kirchhoff's



voltage law จะได้สมการคือ

$$\boxed{V_T = E_f - I_a j X_s} \quad \text{9.2}$$

(generator)

เมื่อ:  $V_T =$  terminal voltage / phase (V)

$E_f =$  excitation voltage / phase (V)

$I_a =$  armature current / phase (A)

$X_s =$  synchronous reactance / phase ( $\Omega$ )

จะสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างสมการที่ 9.1 สำหรับการเป็น motor และสมการที่ 9.2

สำหรับการเป็น generator คือ armature current ( $I_a$ ) จะมีทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น phasor diagram ของการเป็น generator จะแสดงตามในรูปที่ 9-3 (b)

### 9-3. Synchronous Generator Power Equation

สมการกำลังงานไฟฟ้าของ Synchronous generator จะเหมือนกับ

Synchronous motor แต่จะแตกต่างกันที่ทิศทางของกำลังงานไฟฟ้าเท่านั้น กล่าวคือ ถ้าเราจ่ายกำลังงานไฟฟ้าเข้าไป (input power) จะทำงานเป็น motor แต่ถ้าจ่ายกำลังงานไฟฟ้าออกมา (output power) จะทำงานเป็น generator ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\boxed{P_{in, 1-\phi} = - [(V_T \cdot E_f) / X_s] \sin \delta} \quad \text{9.3}$$

(motor action)

$$\boxed{P_{out, 1-\phi} = + [(V_T \cdot E_f) / X_s] \sin \delta} \quad \text{9.4}$$

(generator action)

ถ้าเป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส จะได้

$$\boxed{P_{in, 3-\phi} = 3 [(- V_T \cdot E_f) / X_s] \sin \delta} \quad \text{9.5}$$

(motor action)

$$\overline{P_{out, 3-\phi}} = 3 [(+V_T \cdot E_f) / X_s] \sin \delta$$

(generator action) 9.6

**Example 9-1** A certain 3-phase , 460 V , two-pole , 60 Hz , wye-connected synchronous alternator with a synchronous reactance of 1.26  $\Omega$ /phase , is connected to an infinite bus. The power angle , when supplying 112 kW to the bus, is 25 °. Neglecting losses, Determine :

(a) turbine torque supplied to the alternator.  
 (b) excitation voltage. (c) active and reactive component of apparent power.  
(d) power factor.  
 (e) Neglecting saturation effects, determine the excitation voltage if the field current is reduced to 85 percent of its value in (a)  
 (f) Determine the turbine speed.

**Solution** (a) turbine torque supplied to the alternator

จากสมการ  $n_s = 120 f / P = (120 \times 60) / 2 = 3600$   
r/min

เมื่อตัดค่าการสูญเสียทิ้ง (Neglecting losses) ค่า Input power จาก Turbine ไปยัง Synchronous speed คือ 112 kW = 112,000 W หรือเท่ากับ 112,000 / 746 HP

ดังนั้นจากสมการ  $HP = T n_s / 5252 \Rightarrow T = (HP \times 5252) / n_s$

$$T = (112 \times 1000 / 746) (5252) / 3600 = \underline{219 \text{ lb-ft}}$$

**Ans**

(b) excitation voltage.

Synchronous alternator ต่อแบบ wye-connected ดังนั้นจะได้

$$V_T = \bar{V}_P = \bar{V}_L / \sqrt{3} = 460 / \sqrt{3} = 265.581 \text{ V / phase}$$

จากสมการ  $P_{\text{out}, 3-\phi} = 3 [(+V_T \cdot E_f) / X_s] \sin \delta$   
 $(V_T = V_P)$

$$E_f = (P_{\text{out}} \cdot X_s) / 3 (V_T \cdot \sin \delta)$$

$$= (112 \times 1000 \times 1.26) / (3 \times 265.581 \times \sin 25^\circ)$$

$$= \underline{419.1 \text{ V/phase}}$$

**Ans**

(c) active and reactive component of apparent power.

จากสมการ  $V_T = E_f - I_a j X_s$

$$265.581 \angle 0^\circ = (419.1 \angle 25^\circ) - I_a (1.26 \angle 90^\circ)$$

$$265.58 + j 0 - (379.83 + j 177.12) = - I_a (1.26 \angle 90^\circ)$$

$$- 114.25 - j 177.12 = - I_a (1.26 \angle 90^\circ)$$

เอาลบคูณตลอด ;  $114.25 + j 177.12 \angle \underline{\quad} = I_a (1.26 \angle 90^\circ)$

$$\underline{\quad} \angle 210.79 \underline{57.17^\circ} = I_a (1.26 \angle 90^\circ)$$

$$\underline{\quad} \angle I_a = \underline{\quad} \angle (210.79 \underline{57.17^\circ}) /$$

$$(1.26 \angle 90^\circ)$$

$$\underline{\quad} = 167.29 \angle -32.83^\circ$$

A / phase

จากสมการ  $S = 3 (V_T \cdot I_a \angle \underline{\quad}) = 3 (265.58 \angle 0^\circ)$

$$(167.29 \angle -32.83^\circ)$$

$$\underline{\quad} = \underline{\quad} \angle (265.58 \angle 0^\circ)$$

$$(167.29 \angle +32.83^\circ)$$

$$\underline{\quad} = 133,286.63 \angle 32.83^\circ$$

$$= 111,998.47 + j$$

72,261.11 VA

ดังนั้นค่า active power และ reactive power ในส่วนประกอบของ apparent power คือ

$$P = 111,998.47 \text{ W} = 112 \text{ kW}$$

$$Q = 72,261.11 \text{ VAR} = \underline{72.26}$$

kVAR

Ans

d) Power factor

$$\theta = \theta_v - \theta_i = 0 - (-32.83) = 32.83^\circ$$

$$\text{จากสมการ } P_f = \cos \theta = \cos 32.83^\circ = \underline{0.84}$$

Ans

e) หาค่า excitation voltage ( $E_f$ ) ถ้ากระแส field current ลดลงเหลือ 85 %  
เมื่อตัดทิ้งค่าผลกระทบจากการอิ่มตัว (Neglecting saturation effects) จะทำให้ค่า

$V_T, X_s$  มีค่าคงที่

$$\text{จากสมการ } V_T = E_f - I_a j X_s \Rightarrow E_f = V_T + I_a j X_s$$

( $V_T$  และ  $X_s$  คงที่)

ดังนั้นค่า  $E_f \propto I_a$  นั่นคือ

$$E_{f1} = I_{a1} = E_{f2} = I_{a2}$$

$$E_{f2} = E_{f1} (I_{a2} / I_{a1}) = 419.12 (0.85 \times$$

167.29 / 167.29)

$$E_{f2} = 419.12 (0.85) = 356.25 \text{ V/phase}$$

Ans

f) the turbine speed.

$$\text{จากสมการ } n_s = 120 f / P = (120 \times 60) / 2 = \underline{3600}$$

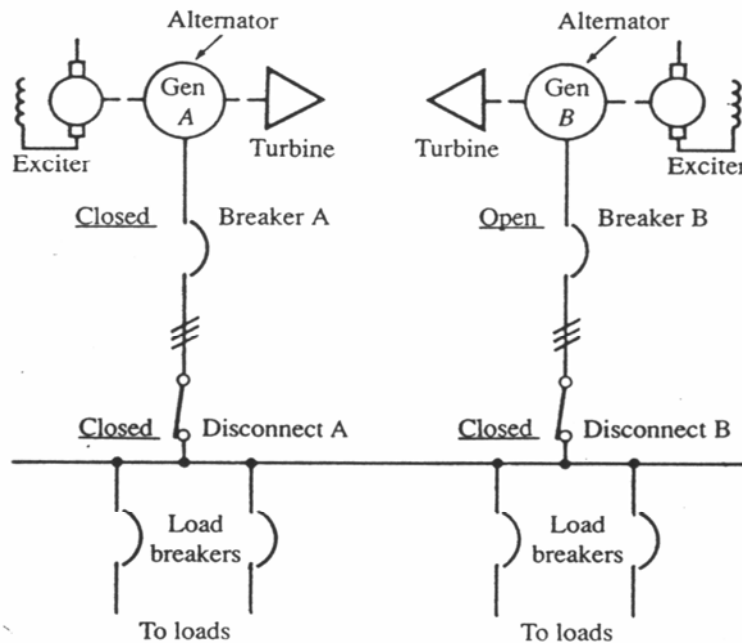
r/min

Ans

## 9-4. การต่อขนาน Synchronous Generator

การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ การนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตั้งแต่ 2 เครื่อง ขึ้นไปมาต่อขนานกัน เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเดิมมีการเพิ่ม load จนกระทั่งเกือบจะเท่ากับ rated load ของเครื่อง ดังนั้น

จึงจำเป็นต้องนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาร่วมกันเพิ่มอีก เพื่อที่จะแบ่งภาระของ load



รูปที่ 9-4 Simplified one-line diagram for a two-generator system

จากรูปที่ 9-4 แสดง one-line diagram ของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 2 เครื่อง ต่อขนานกัน

โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า A (Gen A) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมที่ต่อเข้ากับ bus จะจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับ

load ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า B (Gen B) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใหม่ที่มาไปต่อขนาน

- หลักการในการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาร่วมกัน

การนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาร่วมกันจะต้องพิจารณาเงื่อนไขทางไฟฟ้า 3 ข้อ คือ

1. ต้องมีลำดับ **phase (phase sequence)** เหมือนกัน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาต่อขนานจะต้องมี **phase sequence** ชนิดเดียวกันหรือเหมือนกันจึงจะ

สามารถต่อขนานกันได้ แต่ถ้ามี **phase sequence** ไม่เหมือนกันหรือตรงข้ามกัน จะทำให้เกิดการ **back out** ไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมทั้งอุปกรณ์ได้รับความเสียหายได้

ในปัจจุบันจะใช้เครื่องมือ **Synchroscope** เป็นอุปกรณ์ในการตรวจสอบลำดับ **phase** เมื่อลำดับ **phase** ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานตรงกับลำดับ **phase** ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า **Synchroscope** ก็จะสั่งให้ **circuit breaker** ต่อย่างจรขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ

### ๓ 2. ต้องมี **Voltage** เท่ากัน

ค่า **Voltage** ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาต่อขนาน จะต้องมามีค่าเท่ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิม เมื่อนำไปต่อเข้ากับ **bus** จะต้องปรับค่า **voltage** ให้มีค่าเท่ากับ **bus voltage** ที่จ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมและต้องมีอัตราการผิดพลาด (**error**) ของ **voltage** ไม่เกิน 6-2-3 V.

### ๓ 3. ต้องมีความถี่ (**frequency**) เท่ากัน หรือสูงกว่าเล็กน้อย

ความถี่ (**frequency**) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาต่อขนานจะต้องเท่ากัน หรือสูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมเล็กน้อย ถ้าความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่องไม่เท่ากัน จะทำให้เกิด **power transient** จนกระทั่งทำให้ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเปลี่ยนแปลงไป ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานมีความถี่น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมจะถูกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมขับ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานทำงานเป็น **motor** ได้รับความเสียหายได้

ปัจจุบันการตรวจสอบความถี่จะใช้เครื่องมือวัดความถี่ (**frequency meter**) หรือ **Synchroscope**

#### ● ขั้นตอนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขั้นตอนตามลำดับดังต่อไปนี้

๓ 1. ปรับกระแสไฟฟ้า **field** ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาต่อขนานให้มี **voltage** เท่ากับ **voltage** ของ **bus voltage** เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมที่จ่ายให้กับ **load**

๓ 2. เปรียบเทียบการเรียงลำดับ **phase** (**phase sequence**) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานให้ตรงกับลำดับ **phase** ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิม โดยใช้ **Synchroscope**

๓ 3. ปรับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานให้มีความถี่เท่ากับ หรือสูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมเล็กน้อย เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานทำงานเป็น **generator** ถ้าความถี่

ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิม จะถูกขับให้ทำงานเป็น **motor** การตรวจสอบความถี่จะใช้เครื่องมือวัดความถี่ (**frequency meter**) หรือ **Synchroscope**

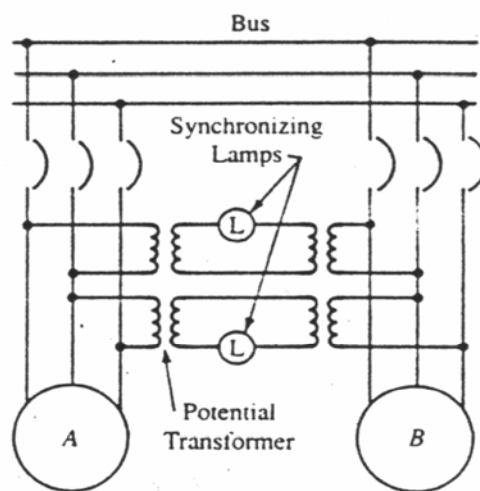
๓ 4. เมื่อความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง เท่ากัน และมุม **phase** ของ **voltage** เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่องเกือบจะ **inphase** กัน หลอดไฟ **synchronizing lamp** จะค่อย ๆ หรี่ลง และเมื่อ **voltage** ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง มีมุมเฟส **inphase** กัน จะทำให้ **voltage** ที่ตกคร่อมหลอดไฟเท่ากับศูนย์

ดังนั้นหลอดไฟ synchronizing lamp จะดับลง และ circuit breaker จะต่อวงจรโดยอัตโนมัติทำให้เครื่อง

กำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง ต่อขนานกัน

สำหรับการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีกำลังงานไฟฟ้ามาก ๆ จะใช้ Computer เป็น

อุปกรณ์ในการควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 9-5 circuit showing synchronizing lamp connection

## ● Synchronizing Lamp

Synchronizing lamp เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แสดงลำดับ phase ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาต่อขนาน

โดยจะสัมพันธ์กับ bus voltage และใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้อง

■ ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานมีลำดับ phase เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิม หลอดไฟ (lamp) ทั้งคู่จะสว่างและมีดพร้อมกัน

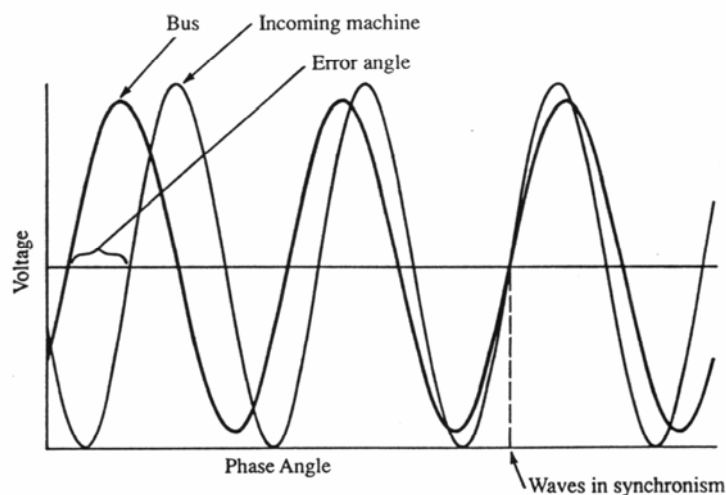
■ ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานมีลำดับ phase ตรงข้ามกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิม หลอดไฟ (lamp) ทั้งคู่จะทำงานสลับกัน คือ หลอดหนึ่งจะสว่าง และอีกหลอดหนึ่งจะมีด

■ ถ้าลำดับ phase ถูกต้อง หลอดไฟทั้งคู่จะมีด เมื่อ Synchroscope มาอยู่ที่ตำแหน่ง 0 องศา ถ้า lamp และ Synchroscope ขัดแย้งกัน หลอดไฟจะกระพริบ

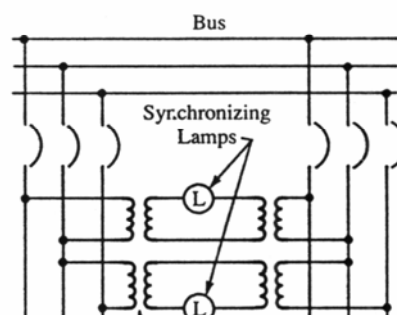
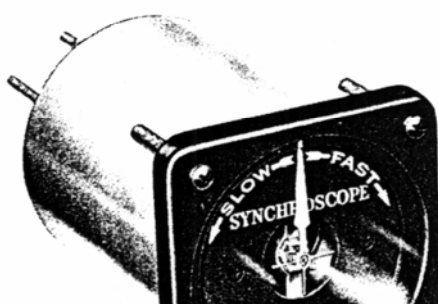
การ Synchronizing ด้วย lamp จะมีข้อเสียเปรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับ Synchroscope คือ ไม่สามารถบอกได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานมีความเร็วหรือช้าไป

- **Synchroscope**

Synchroscope เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดความถี่และลำดับ phase ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนาน โดยจะแสดงเป็นค่ามุมของ Phase displacement ระหว่างคลื่น voltage ทั้งสองเครื่องในขณะนั้น ถ้า voltage wave มีความถี่ต่างกัน ค่ามุมระหว่างคลื่น voltage wave เรียกว่า “Error angle” ทำให้เข็มของเครื่อง Synchroscope ซึ่งเคลื่อนไหวแสดงความเร็วทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อ โดยจะอ้างอิง bus เป็นหลัก



(a)





รูปที่ 9-6 (a) Voltage wave of bus and incoming generator , with incoming machine at a slightly higher voltage and a slightly higher frequency ; (b) Synchroscope ; (c) circuit showing synchronizing lamp connection

■ ถ้าเข็มของเครื่อง Synchroscope จี๋ในตำแหน่งตัวอักษร **Slow** แสดงว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานมีความถี่ (frequency) ต่ำกว่าความถี่ของ bus

■ ถ้าเข็มของเครื่อง Synchroscope จี๋ในตำแหน่งตัวอักษร **Fast** แสดงว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานมีความถี่ (frequency) สูงกว่าความถี่ของ bus

■ ถ้าเข็มของเครื่อง Synchroscope ไม่เคลื่อนไหว แสดงว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานมีความถี่ (frequency) เท่ากับความถี่ของ bus

ตำแหน่งของเข็ม Synchroscope ที่จี๋ในตำแหน่ง slow หรือ fast จะบอกค่ามุมผิดพลาด (Error angle)

เมื่อเป็นเช่นนั้น เครื่องยนต์ขับ (prime mover) ที่ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานจะต้องปรับความเร็ว

โดยการปรับที่ governor เพื่อให้มีความถี่เท่ากับ bus เมื่อความถี่เท่ากันเข็มของ Synchroscope จะจี๋เข้าสู่ที่

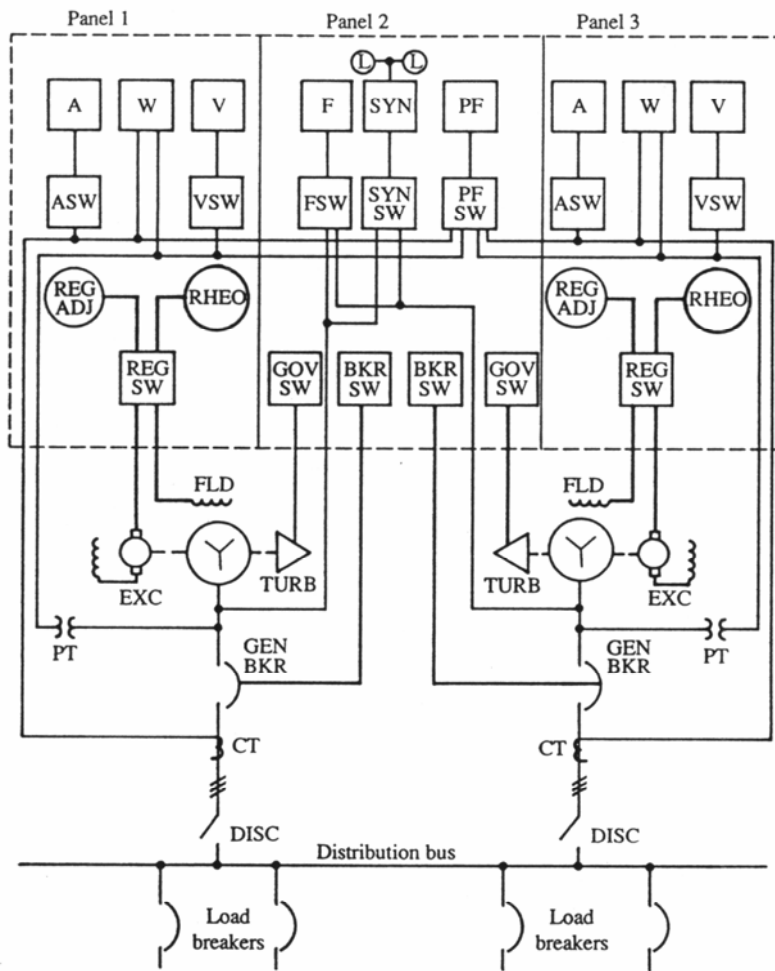
ตำแหน่ง 0 องศา หรือหยุดเคลื่อนไหว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่องจะต่อขนานกันทันที

ข้อดีของ Synchroscope เมื่อเปรียบเทียบกับ Synchronizing lamp คือ สามารถบอกค่ามุมผิดพลาดและ

ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานว่ามีความเร็วหรือช้าเกินไป

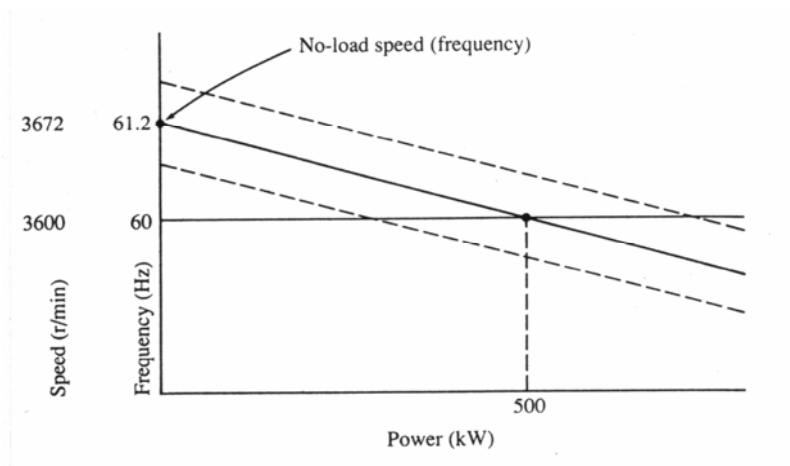
### 9-5. คุณลักษณะของ Prime-mover Governor

การถ่ายโอน active power ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขนานกันสามารถทำได้โดยการปรับแต่ง ความเร็ว no load speed ที่ตัว governor ของเครื่องยนต์ prime-mover และการถ่ายโอน reactive power โดยการปรับแต่งที่ field rheostat หรือ voltage regulator



รูปที่ 9-7 Functional diagram for a two-generator system supplying a common bus load

คุณสมบัติลักษณะทั่วไปของ prime-mover ที่แสดงในรูปที่ 9-8 เป็นการ plot กราฟ ของ prime-mover speed (r/min) , frequency (Hz) กับค่า active power (kW) ซึ่งจะมีลักษณะเป็น กราฟเส้นตรง



รูปที่ 9-8 Typical prime-mover governor characteristics

การตั้ง no load speed หรือ no load frequency ของ synchronous generator สามารถเปลี่ยนได้โดย remote control จากแผงของ generator โดยใช้ remote control switch คือ GOV SW. ตามที่แสดงในรูปที่ 9-7 โดย switch จะไปกระตุ้น servomotor ซึ่งจะย้ายตำแหน่งการตั้ง no load speed ของ governor โดยการ

เพิ่มหรือลด ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง slope ของมัน และเส้นแสดงการตั้ง no load speed ที่แตกต่างกัน

แสดงด้วยเส้นปะในรูปที่ 9-8

Governor parameter ที่แสดงการจัดแบ่ง active power ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขนานกัน คือ

Governor speed regulation และ Governor droop

- **Governor Speed Regulation**

Governor Speed Regulation (GSR) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วตอน no load ไปสู่ความเร็ว

ตอน rated load ต่อความเร็ว rated load ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{GSR}{f_{ratrd}} = \frac{n_{nl} - n_{ratrd}}{n_{ratrd}} \quad \equiv \frac{(f_{nl} - f_{ratrd})}{f_{ratrd}} \quad 9.7$$

เมื่อ : GSR = Governor Speed Regulation

$n_{nl}$  = no-load speed (r/min)  $f_{nl}$  = no-load frequency (Hz)

$n_{ratrd}$  = rated speed (r/min)  $f_{ratrd}$  = rated frequency (Hz)

- **Governor Droop**

Governor Droop (GD) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่จาก no-load frequency กับ rated frequency

ต่อการเปลี่ยนแปลงของ active power ( $P_{rated}$ ) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$GD = \frac{(f_{nl} - f_{ratrd})}{P_{ratrd}} \quad \equiv \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad 9.8$$

Governor Droop จะแสดงในรูปของ Hertz / Watt (Hz / W) หรือ Hertz / Kilowatt (Hz / kW) หรือ Hertz / Megawatt (Hz / MW)

Droop ของ Governor ที่ทำงานอย่างถูกต้องจะคงที่สำหรับค่า droop ที่ตั้งไว้ มันจะเป็นอิสระจาก no-load speed ที่ตั้งไว้ และไม่มีผลกระทบต่อการทำงานในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

**Example 9-2** Referring to Figure 9-8 The governor characteristic drawn with a solid line represents the rated operating conditions for a 500 kW , 460 V , 3-phase , two-pole synchronous generator. Determine : (a) governor speed regulation (b) governor droop

**Solution** (a) governor speed regulation

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } \text{GSR} &= (f_{nl} - f_{ratrd}) / f_{ratrd} \\ &= (61.2 - 60) / 60 = 0.02 \end{aligned}$$

**Ans**

(b) governor droop

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } \text{GD} &= (f_{nl} - f_{ratrd}) / P_{ratrd} = \Delta f / \Delta P \\ &= (61.2 - 60) / 500 = 0.0024 \text{ Hz/kW} \end{aligned}$$

**Ans**

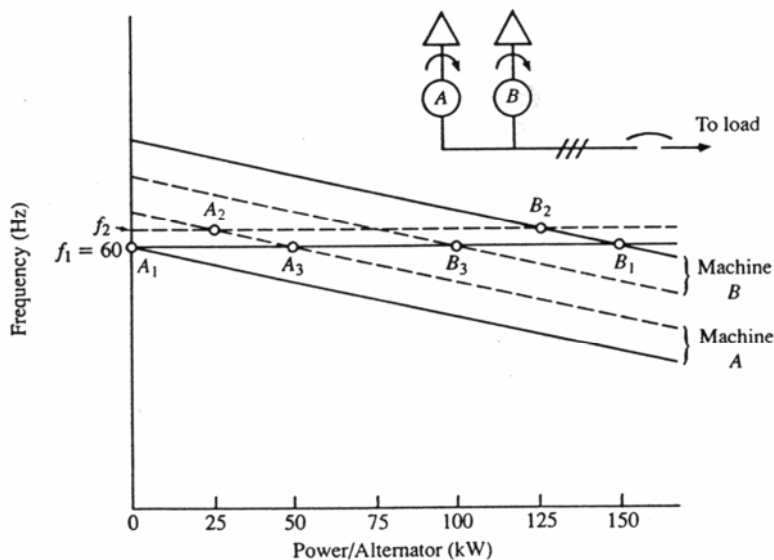
### 9-6. การแบ่งกำลังงานไฟฟ้าระหว่างการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การแบ่งภาระ load ที่มาจาก bus ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขนานกัน หาได้จากการเลื่อนขึ้น-ลง (droop) ของ slope ของ governor ที่เกี่ยวข้อง การเลื่อน bus load ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้ได้การ

กระจายกำลังงานไฟฟ้าที่ต้องการ โดยการเปลี่ยน no-load speed setting ของ governor

การเปลี่ยน load บางส่วนจาก generator ตัวหนึ่งไปยัง generator อีกตัวหนึ่ง ต้องการ  
ใช้พลังงานในการเลื่อนระหว่าง prime-mover โดย generator ที่มีส่วนแบ่งมาจาก load  
bus ที่มากกว่า ต้องการกำลังงาน  
ไฟฟ้าที่มากกว่า ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับเพิ่ม no-load speed จาก governor ของเครื่อง  
ในทำนองเดียวกัน generator ตัวที่เสีย load ไปบางส่วนจะต้องมีกำลังงานไฟฟ้าที่น้อยกว่า ซึ่ง  
สามารถทำได้โดยการ  
ปรับลด no-load speed ให้ต่ำลงจาก governor ของเครื่อง

- เครื่องจักรกลที่มี Governor Characteristics เหมือนกัน (Machines with Identical Governor Characteristics)



รูปที่ 9-9 Graphical method of load transfer between machines with Identical governor characteristics

จากรูปที่ 9-9 เป็นการแสดงกราฟการถ่ายโอน load ของ generator 2 เครื่อง ที่นำมาต่อ  
ขนานกัน โดย

มี droop characteristics เหมือนกัน

■ Machine B จะแบกภาระ load ที่ 150 kW ที่ความถี่ 60 Hz (ที่ตำแหน่ง B<sub>1</sub>) ขณะที่  
Machine A ที่นำมาต่อขนานยังไม่มี load (ที่ตำแหน่ง A<sub>1</sub>) การถ่าย load บางส่วนจาก  
Machine B ไปยัง Machine A โดย

ไม่เปลี่ยนความถี่ของระบบ จึงจำเป็นที่จะต้องปรับที่ governor ของเครื่องทั้งสอง

■ สมมติว่า 1/3 ของ load จาก Machine B ถูกย้ายไปยัง Machine A นั่นคือ Machine B จะแบกภาระ

load ที่ 100 kW และ Machine A จะแบกภาระ load ที่ 50 kW ดังนั้น governor control switch ของ Machine A จะสั่งให้ prime-mover หมุนความเร็วเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง 1/2 ของ load ที่จะถูกย้าย คือ ที่ 25 kW

(ที่ตำแหน่ง A<sub>2</sub>) การปรับเพิ่มนี้จะปรับเพิ่ม no-load speed และจะเพิ่ม characteristic ของ Machine A ทั้งหมด ทำให้มีความถี่สูงกว่าระบบ คือ ที่  $f_2$  ขณะเดียวกัน primer-mover ของ Machine B ก็ จะเพิ่มความเร็ว

ของมันตามเนื่องจากการลด load ของมันเหลือ 125 kW เพื่อให้ความถี่เท่ากับ Machine A

(ที่ตำแหน่ง B<sub>2</sub>) ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองจึงมีความเร็วเท่ากัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานขนานกันจะไม่สามารถทำงานที่ความเร็วต่างกันได้ ถ้าเครื่องหนึ่งเพิ่มความเร็วแล้ว อีกเครื่องหนึ่งต้องเพิ่มความเร็วตามไปด้วย

■ การถ่าย load ที่สมบูรณ์ governor control switch ของ Machine B จะถูกย้ายไปที่ lower เรียบร้อยแล้ว

ความถี่ของระบบก็จะกลับเข้าสู่ค่าปกติของมัน คือ ที่ 60 Hz ดังนั้น Machine A จะแบกภาระ load ที่ 50 kW (ที่ตำแหน่ง A<sub>3</sub>) และ Machine B จะแบกภาระ load ที่ 100 kW (ที่ตำแหน่ง B<sub>3</sub>) จะเห็นว่าตลอดเวลา

ของช่วงการเปลี่ยนแปลง slope นั้น จะไม่ทำให้ curve เปลี่ยนแปลง

ในการทำงานจริง การแบ่ง active power ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง ทำได้โดยการเปลี่ยนความถี่เพียงเล็กน้อย ด้วยการปรับความเร็วที่ governor จนกระทั่งการถ่ายโอน load เสร็จสิ้น ความถี่จะกลับ

เข้าสู่ความถี่ของระบบเดิม คือ  $f_1$  ที่ความถี่ 60 Hz

### ● เครื่องจักรกลที่มี Governor Characteristics ไม่เหมือนกัน (Machines with Dissimilar Governor Characteristics)

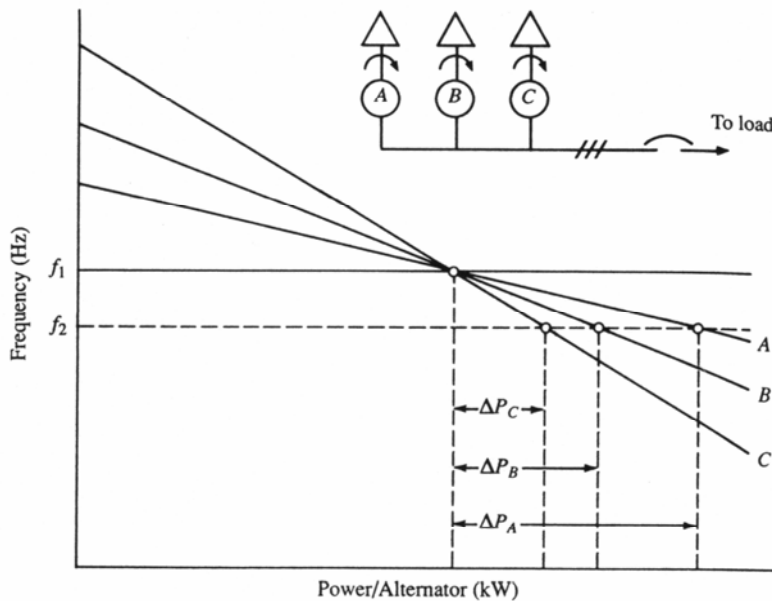
Synchronous generator ที่มี Governor characteristics แตกต่างกัน จะไม่แบ่งการเพิ่มหรือลดใน bus load อย่างเท่ากัน โดยเครื่องที่มี Governor droop น้อยที่สุด จะได้รับส่วนแบ่งใน bus load มากที่สุด และเครื่องที่มี Governor droop มากที่สุด จะได้รับส่วนแบ่งใน bus load น้อยที่สุด

จากรูปที่ 9-10 แสดง generator จำนวน 3 เครื่อง นำมาต่อขนานกัน โดยแต่ละตัวมี governor droop

ที่ต่างกัน กำลังงานไฟฟ้าที่จะแบ่ง bus load ที่เท่า ๆ กัน คือ เส้นประแนวตั้งที่ตัดกับเส้นความถี่  $f_1$  สำหรับ

เส้นประตามแนวนอนของความถี่  $f_2$  จะแสดงผลของ generator ที่มี governor ต่างกัน จะเห็นว่า **Machine A**

มี droop น้อยที่สุด ดังนั้นจะได้รับส่วนแบ่งของภาระ load ไปมากที่สุด ส่วน **Machine C** มี droop มากที่สุด จะได้รับส่วนแบ่งของภาระ load ไปน้อยที่สุด นั่นคือ ถ้านำ generator ที่มีค่า power rating ต่างกันมาต่อขนานกัน governor droop จะถูกปรับแต่ง จนกระทั่งการกระจายของ load ระหว่าง generator จะเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับ power rating ของเครื่อง



รูปที่ 9-10 Effect of oncoming load on frequency and load division , for paralleled machine that have different governor droop

## 9-7. Motoring of Alternator



**Motoring of Alternator** คือ การที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานทำงานเป็น motor กล่าวคือ

เมื่อกำลังงาน **input power** ที่ **prime-mover** ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานไม่เพียงพอที่จะขับมันที่

**synchronous speed** มันไม่เพียงแต่จะเสีย load ของมันไปเท่านั้น แต่มันจะถูกขับด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมที่ต่อร่วมอยู่ใน bus ที่ **synchronous speed** ของระบบ จึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อเข้าไปใหม่ได้รับ

กำลังงานไฟฟ้าเข้ามาจึงทำงานเป็น motor เราเรียกว่า “**Motoring**”

■ วิธีการป้องกันการเกิด **Motoring** คือ จะต้องติดตั้ง **Reverse Power Relay** หรือบางทีเรียกว่า “**Power**

**Directional Relay**” เพื่อสั่งให้ **Trip Circuit Breaker**” ของเครื่องที่จะทำงานเป็น motor หลังจากสิ้นสุดของ

การหน่วงเวลา ตัวชี้ที่จะแสดงให้เห็นการทำงานเป็น motor อย่างชัดเจน คือ การตีกลับของเข็ม

**Wattmeter**

■ การแก้ไขการเกิด **Motoring** คือ เราต้องควบคุม **governor** ของเครื่อง **prime-mover** ที่ขับเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าที่จะนำมาต่อขนานให้มีความเร็ว **synchronous speed** เท่ากับระบบ

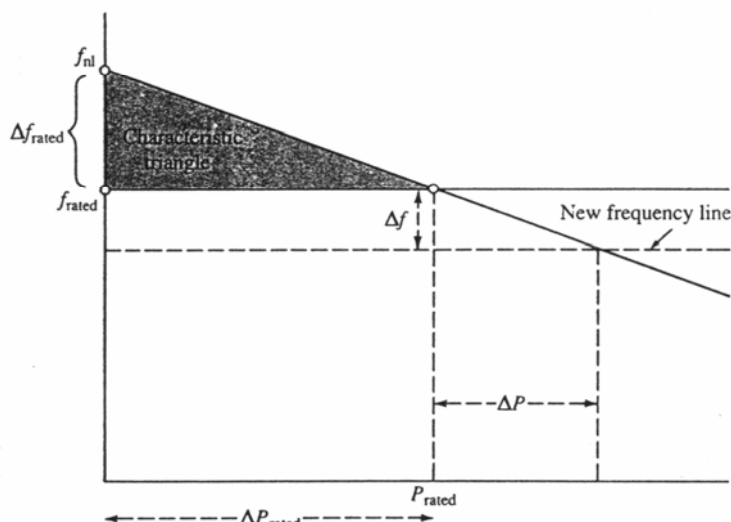
## 9-8. การใช้คุณลักษณะของ **Triangle** แก้ปัญหาระหว่างการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การแก้ปัญหาเกี่ยวกับ **load distribution** ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขนาน อาจทำได้ในลักษณะ

ตรงไปตรงมา โดยการแสดงของคุณสมบัติ **Triangle** ของแต่ละเครื่อง และใช้คุณสมบัติของ

**Triangle** ใน

การแก้ปัญหา



รูปที่ 9-11 Characteristic triangle formed by the governor characteristic and the rated frequency line

จากรูปที่ 9-11 จะแสดงคุณสมบัติของ Triangle ถูกสร้างโดย governor characteristic และ rated frequency line ด้วยเส้นที่ตัดกันที่ rated frequency และ rated active power คุณสมบัติของ Triangle ถูกทำให้คงที่สำหรับ governor droop ที่กำหนดให้ และจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตาม load และจะไม่เปลี่ยนไปกับ

การเปลี่ยนของ no-load speed setting ของ governor

การเพิ่มของ load จะทำให้ความถี่ลดลง และจุดตัดของเส้นความถี่ใหม่ (new frequency line) กับ governor characteristic ที่สร้าง new triangle จะมีลักษณะคล้ายกับ characteristic triangle ดังนั้นจากคุณสมบัติทางตรีโกณมิติ และสมการที่ 9.8 คือ

$$GD = (f_{nl} - f_{ratrd}) / P_{ratrd} = \frac{\Delta f}{\Delta P}$$

9.9

จากสมการที่ 9.7  $GSR = (f_{nl} - f_{ratrd}) / f_{ratrd}$

นั่นคือ  $f_{nl} - f_{ratrd} = GSR \times f_{ratrd}$

เมื่อแทนค่า  $f_{nl} - f_{ratrd} = GSR \times f_{ratrd}$  ลงในสมการที่ 9.9 จะได้

$$GD = (GSR \times f_{ratrd}) / P_{ratrd} = \frac{\Delta f}{\Delta P}$$

9.10

เมื่อ :  $GD =$  governor droop

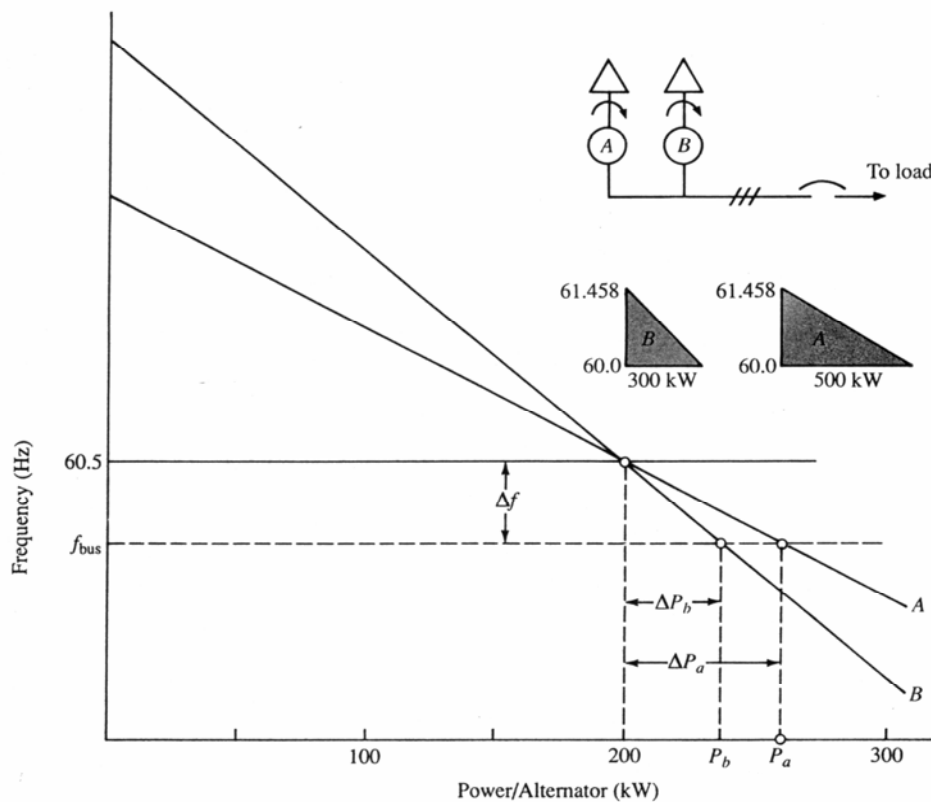
$GSR =$  governor speed regulation

$\Delta f =$  change in frequency due to change in load

$\Delta P =$  change in load (power rating)

**Example 9-3** A 500 kW , 60 Hz , 2300 V , six-pole alternator A is paralleled with a 300 kW , 60 Hz 2300 V , four-pole machine B. Both machine have a speed regulation of 2.43 percent. The machine are carrying equal shares of a 400 kW bus load at a frequency of 60.5 Hz. If the bus load increases to a total of 500 kW. Determine :

- (a) operating frequency (b) load carried by each machine



จากสมการ  $GD = (GSR \times f_{ratrd}) / P_{ratrd} = \Delta f$

/  $\Delta P$

**Machine A**

**Machine B**

$$(2.43/100) (60) / (500) = \Delta f / \Delta P_a \quad (2.43/100)$$

$$(60) / (300) = \Delta f / \Delta P_b$$

$$0.002916 = \Delta f / \Delta P_a$$

$$0.00486 = \Delta f / \Delta P_b$$

$$\Delta P_a = \Delta f / 0.002916 = 342.936 \Delta f \quad \Delta P_b = \Delta f /$$

$$0.00486 = 205.761 \Delta f$$

ดังนั้น  $\Delta P_a + \Delta P_b = 342.936 \Delta f + 205.761 \Delta f = 548.697 \Delta f$

แต่โจทย์กำหนด machine แต่ละตัวแบกภาระเท่า ๆ กัน และให้ bus load เพิ่มขึ้นจาก 400 kW ที่ความถี่

60.5 Hz เป็น 500 kW นั่นคือ

$$\Delta P_{bus} = \Delta P_a + \Delta P_b$$

$$500 - 400 = 342.936 \Delta f + 205.761 \Delta f = 548.697$$

$\Delta f$

$$\Delta f = (500 - 400) / 548.697 = 0.182 \text{ Hz}$$

ดังนั้น  $f_{bus} = f_{rated} - \Delta f = 60.5 - 0.182 = \underline{60.318 \text{ Hz}}$

**Ans**

(b) load carried by each machine ( $P_a$  และ  $P_b$ )

$$\Delta P_a = 342.936 \Delta f = 342.936 (0.182) = 62.414$$

kW

$$\Delta P_b = 205.761 \Delta f = 205.761 (0.182) = 37.586$$

kW

โจทย์กำหนดส่วนแบ่งที่ bus load เท่ากัน คือ 400 kW นั่นคือ  $P_{rated} = 400/2 = 200 \text{ kW}$

ดังนั้น  $P_a = P_{rated} + \Delta P_a = 200 + 62.414 = \underline{262.41 \text{ kW}}$

**Ans**

$$P_b = P_{rated} + \Delta P_b = 200 + 37.586 = \underline{237.59 \text{ kW}}$$

**Ans**

-----

**Example 9-4** A 1000 kW , 60 Hz synchronous alternator A is in parallel with a 600 kW , 60 Hz alternator B. Both machines have identical governor droops of 0.0008 Hz /kW. Machine A take two - thirds of a 900 kW bus load at 60.2 Hz. If an additional 720 kW load is connected to the bus Determine : (a) bus frequency (b) load on each machine

**Solution** (a) bus frequency

โจทย์กำหนดให้ Machine A และ B มี governor droops เหมือนกัน และ load ที่ต่อเข้ากับ bus คือ 720 kW ดังนั้นส่วนแบ่งของ load จะเท่ากัน นั่นคือ

$$\Delta P_a = \Delta P_b = 720 / 2 = 360 \text{ kW}$$

จากสมการ  $GD = (f_{nl} - f_{ratrd}) / P_{ratrd} = \Delta f /$

$$\Delta P_a$$

$$\Delta f = GD \times \Delta P_a = (0.0008 \times 360) =$$

$$0.288 \text{ Hz}$$

$$\text{ดังนั้น } f_{bus} = f_{ratrd} - \Delta f = 60.2 - 0.288 =$$

$$59.91 \text{ Hz}$$

**Ans**

(b) load on each machine

โจทย์กำหนดให้ Machine A take two-thirds of a 900 kW bus load at 60.2 Hz นั่นคือ

$$P_a = (2/3 \times 900) + \underline{360} = 960 \text{ kW}$$

**Ans**

$$P_b = (1/3 \times 900) + \underline{360} = 660 \text{ kW}$$

**Ans**

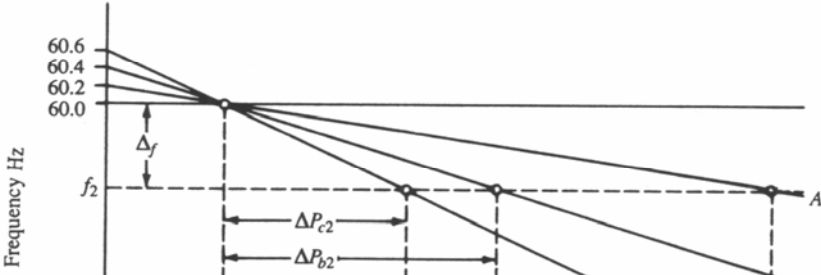
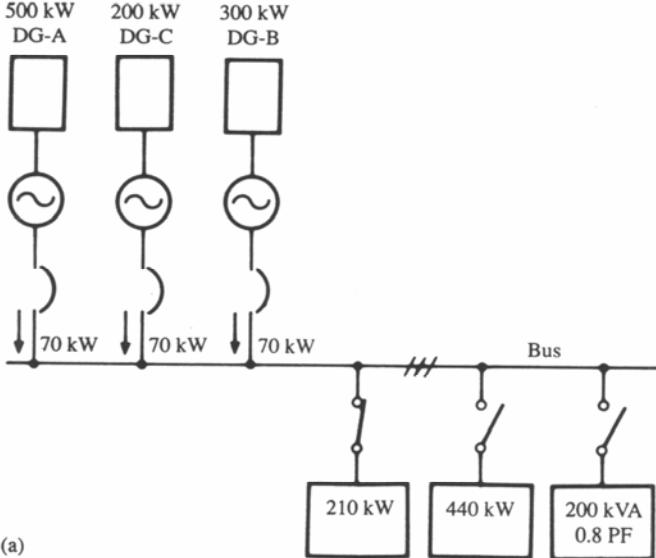
**Note :** Machine B is operating at a 10 percent overload.

-----

**Example 9-5** Three diesel-driven 60 Hz alternator A , C and B are in parallel and taking equal shares of a 210 kW , 60 Hz bus load. The rating of the alternators are 500 kW , 200 kW and 300 kW respectively

The circuit is show in Figure 9-13 (a) , and the governor characteristics are show in Figure 9-13 (b) If a 3-phase , 440 kW resistance load and a 3-phase , 60 Hz induction motor that draws 200 kVA at 0.80 power factor are added to the bus. Determine :

- (a) the system kilowatts
- (b) the system frequency
- (c) the kilowatt loads carried by each machine.



รูปที่ 9-13 Governor characteristics for Example 9-5

**Solution** (a) the system kilowatts

โจทย์กำหนดให้ load เพิ่มขึ้นที่ bus คือ resistance load ขนาด 440 kW และ induction motor

ขนาด 200 kVA ที่ power factor 0.8 นั่นคือ

$$\Delta P_{\text{bus}} = 440 + (200 \times 0.8) = 600 \text{ kW}$$

ดังนั้น active power system ของระบบ คือ

$$P_{\text{sys}} = 210 + 600 = 810 \text{ kW}$$

**Ans**

(b) the system frequency

หา governor droops ได้จากสมการ  $GD = (f_{nl} - f_{\text{rated}}) /$

$$P_{\text{rated}} = \Delta f / \Delta P$$

นั่นคือ  $GD_a = \Delta f_a / \Delta P_a = (f_a - f_{\text{rated}}) / P_{\text{rated}} = (60.2 - 60) / 70 = 0.002857 \text{ Hz / kW}$

$$GD_b = \Delta f_b / \Delta P_b = (f_b - f_{\text{rated}}) / P_{\text{rated}} = (60.4 - 60) / 70 = 0.005714 \text{ Hz / kW}$$

$$GD_c = \Delta f_c / \Delta P_c = (f_c - f_{\text{rated}}) / P_{\text{rated}} = (60.6 - 60) / 70 = 0.008571 \text{ Hz / kW}$$

เมื่อ load เพิ่มขึ้นจะทำให้ bus frequency ลดลง คือ  $f_2$  ตามที่แสดงในรูป

(b) ดังนั้นจะได้

$$\Delta f / \Delta P_{a_2} = 0.002857 \Rightarrow \Delta P_{a_2} = \Delta f / 0.002857 = 350 \text{ kW}$$

$$\Delta f / \Delta P_{b_2} = 0.005714 \Rightarrow \Delta P_{b_2} = \Delta f / 0.005714 = 175 \Delta f$$

$$\Delta f / \Delta P_{c_2} = 0.008571 \Rightarrow \Delta P_{c_2} = \Delta f / 0.008571 = 116.6667 \Delta f$$

จาก  $\Delta P_{a_2} + \Delta P_{b_2} + \Delta P_{c_2} = \Delta P_{bus}$

$$350 \Delta f + 175 \Delta f + 116.6667 \Delta f = 600$$

$$641.6667 \Delta f = 600$$

$$\Delta f = 600 / 641.6667 = 0.9351$$

Hz

ดังนั้นความถี่ของระบบ  $f_2 = 60 - \Delta f = 60 - 0.9351 = \underline{59.0649} \text{ Hz}$

**Ans**

(c) the kilowatt loads carried by each machine.

$$P_{a_2} = 70 + \Delta P_{a_2} = 70 + 350 \Delta f = 70 + (350 \times 0.9351) = 397.3 \text{ kW}$$

**Ans**

$$P_{b_2} = 70 + \Delta P_{b_2} = 70 + 175 \Delta f = 70 + (175 \times 0.9351) = 233.6 \text{ kW}$$

**Ans**

$$P_{c_2} = 70 + \Delta P_{c_2} = 70 + 116.6667 \Delta f = 70 + (116.6667 \times 0.9351) = 179.1 \text{ kW}$$

**Ans**

**Example 9-6** Three diesel-driven 60 Hz synchronous generator are in parallel.

Generator A is rated at 500 kW has a speed regulator of 2.0 percent and supply load 200 kW.

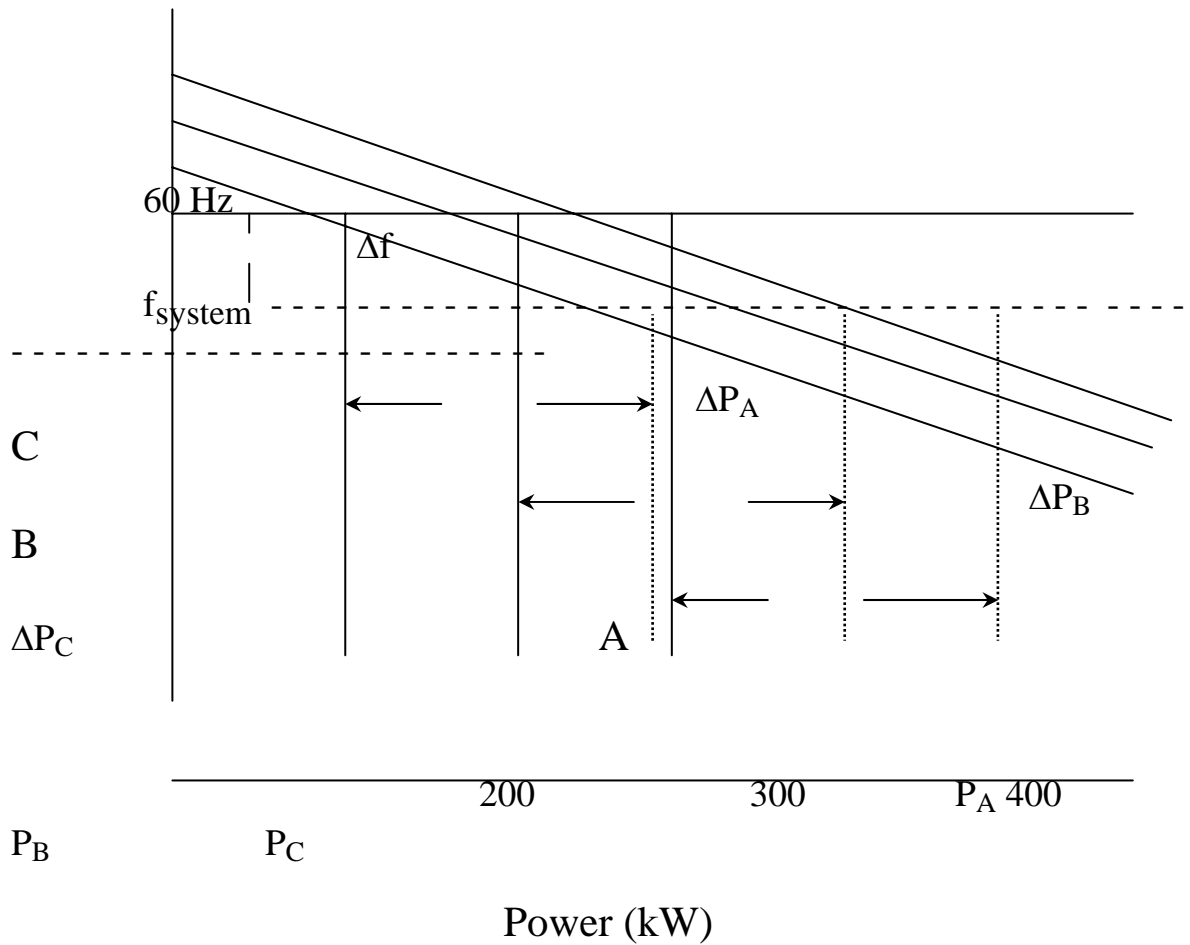
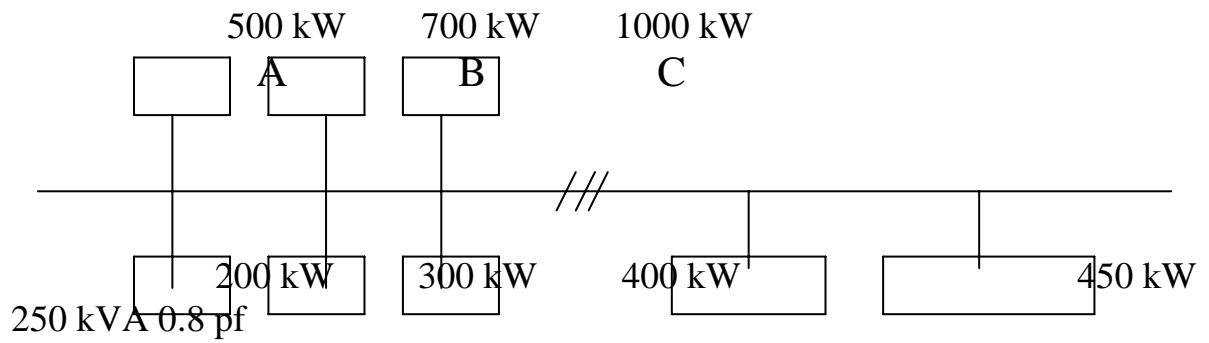
Generator B is rated at 700 kW has a speed regulator of 2.5 percent and supply load 300 kW.

Generator C is rated at 1000 kW has a speed regulator of 2.7 percent and supply load 400 kW.

If a 3-phase, 450 kW resistance load and a 3-phase, 60 Hz induction motor that draws 250 kVA at 0.80 power factor are added to the bus. Determine :

- (a) the new system active power  
 (b) the new system frequency  
 (c) the new active power carried by each machine.





รูปที่ 9-14 Governor characteristics for Example 9-6

**Solution** (a) the new system active power

โจทย์กำหนดให้ load เพิ่มขึ้นที่ bus คือ resistance load ขนาด 450 kW และ induction motor ขนาด 250 kVA ที่ power factor 0.8 นั่นคือ

$$\Delta P_{bus} = 450 + (250 \times 0.8) = 650$$

kW

ดังนั้น active power system ของระบบ คือ

$$P_{\text{sys}} = 200 + 300 + 400 + \Delta P_{\text{bus}}$$

$$= 200 + 300 + \underline{400} + 650$$

= 810 kW

**Ans**

(b) the new system frequency

$$\text{จากสมการ GD} = (\text{GSR} \times f_{\text{rated}}) / P_{\text{rated}} = \Delta f / \Delta P$$

$$\text{Gen A : } (\text{GSR} \times f_{\text{rated}}) / P_{\text{rated}} = \Delta f / \Delta P = (2.0/100)$$

$$(60) / 500 = \Delta f / \Delta P_A$$

$$\Delta P_A = \Delta f / 0.0024 = 416.67 \Delta f$$

$$\text{Gen B : } (\text{GSR} \times f_{\text{rated}}) / P_{\text{rated}} = \Delta f / \Delta P = (2.5/100)$$

$$(60) / 700 = \Delta f / \Delta P_B$$

$$\Delta P_B = \Delta f / 0.00214 = 467.29 \Delta f$$

$$\text{Gen C : } (\text{GSR} \times f_{\text{rated}}) / P_{\text{rated}} = \Delta f / \Delta P = (2.7/100)$$

$$(60) / 1000 = \Delta f / \Delta P_C$$

$$\Delta P_C = \Delta f / 0.00162 = 617.28 \Delta f$$

เมื่อ load เพิ่มขึ้น :

$$\Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C = \Delta P_{\text{bus}}$$

$$(416.67 \Delta f) + (467.29 \Delta f) + (617.28 \Delta f) =$$

650

$$1501.24 \Delta f = 650$$

$$\Delta f = 650 / 1501.24 = 0.43$$

Hz

ดังนั้นความถี่ของระบบ

$$f_{\text{system}} = 60 - \Delta f = 60 - 0.43 = \underline{59.57 \text{ Hz}}$$

**Ans**

(c) the new active power carried by each machine.

$$P_A = 200 + \Delta P_A = 200 + 416.67 \Delta f = 200 + (416.67 \times$$

$$0.43) = 379.17 \text{ kW}$$

**Ans**

$$P_B = 300 + \Delta P_B = 300 + 467.29 \Delta f = 300 + (467.29 \times$$

$$0.43) = 500.93 \text{ kW}$$

**Ans**

$$P_C = 400 + \Delta P_C = 400 + 617.28 \Delta f = 400 + (617.28 \times$$

$$0.43) = 665.43 \text{ kW}$$

**Ans**

-----

## 9-9. Voltage Regulation

Voltage Regulation คือ เปอร์เซ็นต์ของอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจ่ายไฟจากตอนไม่มี load (no-load) ไปสู่ตอนมี load (rated load) โดยอ้างอิงกับ rated load ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$100 \quad \boxed{\text{VR} = \frac{[V_{nl} - V_{rated}]}{V_{rated}} \times 100}$$

เมื่อ : VR = voltage regulation (%)

(V)  $V_{nl}$  = no-load voltage (open circuit voltage)

(V)  $V_{rated}$  = voltage indicated on nameplate of machine

Voltage Regulation เป็นตัวแสดงการเปลี่ยนแปลงใน field current ที่ต้องการทำให้ค่า voltage ของ

ระบบลงที่ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานจากตอน no-load ไปสู่ rated load การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะขึ้น

อยู่กับค่า power factor ของ load แต่ละชนิด ดังนี้

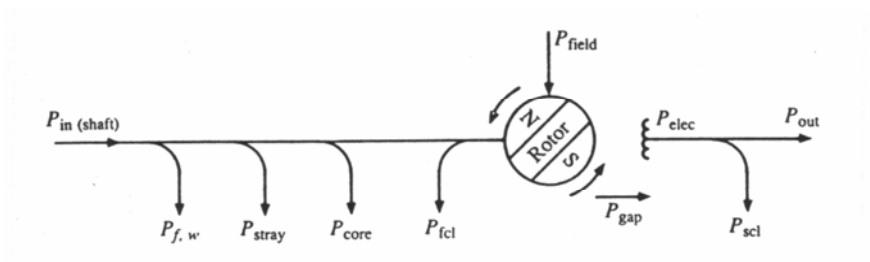
■ Load ที่เป็น Resistor จะทำให้ค่า power factor เท่ากับ 1 (unity power factor)

■ Load ที่เป็น Inductor จะทำให้ค่า power factor ล้าหลัง (Lagging) และจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

ลดลงต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าขณะ no-load

■ Load ที่เป็น Capacitor จะทำให้ค่า power factor นำหน้า (Leading) และจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าสูงขึ้นมากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขณะ no-load

## 9-10. กำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพของ Synchronous Generator



รูปที่ 9-15 Power-flow diagram for a synchronous generator

จากรูป Power-flow diagram ของ synchronous generator ค่า total loss ใน synchronous generator

คือ

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{stray}} + P_{f,w} + P_{\text{core}} + P_{fcl} + P_{scl}$$

9.12

และค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ทั้งหมดของ synchronous generator คือ

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}} + P_{\text{field}}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{loss}}}$$

9.13

## SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING

$$V_T = E_f + I_a jX_s \quad (\text{motor}) \qquad V_T = E_f - I_a j X_s \quad (\text{generator})$$

$$P_{in, 1-\phi} = - [(V_T \cdot E_f) / X_s] \sin \delta \quad (\text{motor action})$$

$$P_{out, 1-\phi} = + [(V_T \cdot E_f) / X_s] \sin \delta \quad (\text{generator action})$$

$$P_{in, 3-\phi} = 3 [(-V_T \cdot E_f) / X_s] \sin \delta \quad (\text{motor action})$$

$$P_{out, 3-\phi} = 3 [(+V_T \cdot E_f) / X_s] \sin \delta \quad (\text{generator action})$$

### Governor Characteristics

$$\begin{aligned} \text{Governor Speed Regulation} \quad GSR &= (n_{nl} - n_{ratrd}) / n_{ratrd} \\ &= (f_{nl} - f_{ratrd}) / f_{ratrd} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Governor Droop} \quad GD &= (f_{nl} - f_{ratrd}) / P_{ratrd} \\ &= \Delta f / \Delta P \end{aligned}$$

$$GD = (GSR \times f_{ratrd}) / P_{ratrd}$$
$$P_{ratrd} = \Delta f / \Delta P$$

### Voltage Regulation

$$VR = [(V_{nl} - V_{rated}) / V_{rated}] \times 100$$

### Losses and Efficiency

$$P_{loss} = P_{stray} + P_{f,w} + P_{core} + P_{fcl} + P_{scl}$$

$$\eta = P_{out} / (P_{in} + P_{field}) = P_{out} / (P_{out} + P_{loss})$$



## บทที่ 10

### เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

## (Direct-Current Machines)

### 10-1 บทนำ

DC motor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ความเร็วของมันสามารถปรับแต่งได้อย่างละเอียด โดยเพิ่มทีละน้อยจาก locked-rotor ไปจนถึง rated speed และความเร็วอาจจะสูงมากเกินไปจนเกิด over load ทำให้เครื่องพัง ถ้าไม่ควบคุมมันอย่างถูกต้อง DC motor สามารถสร้าง rated torque ได้ที่ทุกความเร็วจาก locked-rotor ไปจนถึง rated speed และแรงบิดที่มันสร้างขึ้นตอน locked-rotor

จะมีค่ามากกว่าหลายเท่าของแรงบิดที่สร้างจาก AC motor ที่มีกำลังและ speed rating เท่ากัน

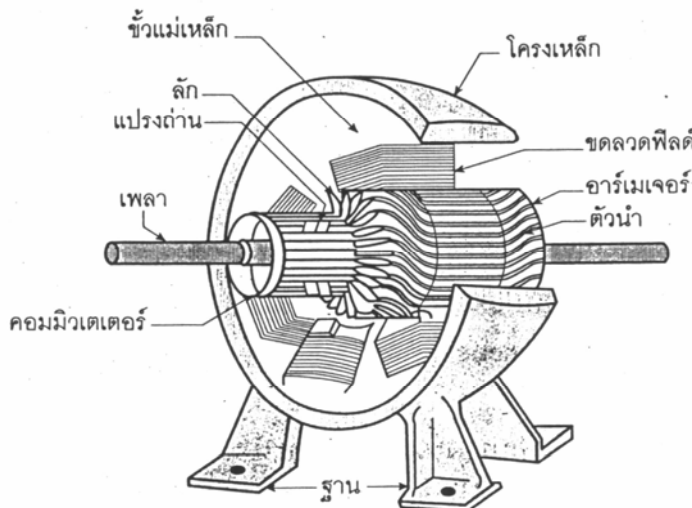
DC motor จะใช้กันอย่างกว้างขวางในโรงงานที่ต้องการการขับเคลื่อน เช่น หุ่นยนต์ , เครื่องมือกล , โรงงานกระดาษ, โรงงานปิโตรเคมี เป็นต้น หรือใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบรถไฟฟ้า หรือถ้าใช้ในเรือจะใช้ในการขับเคลื่อน , กว้านยกเรือยนต์ และอุปกรณ์ต่าง ๆ

DC generator เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีอยู่ในโรงงานไฟฟ้าขนาดใหญ่และเล็ก แต่ในปัจจุบันกำลังถูกแทนที่โดยอุปกรณ์ solid-state ที่เปลี่ยนจากระบบไฟฟ้า AC เป็น DC เพื่อนำไปใช้กับระบบขับเคลื่อนและเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ต่าง ๆ

### 10-2 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Generator)

โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ

- ส่วนที่อยู่กับที่ เรียกว่า “Stator”
- ส่วนที่เคลื่อนที่ เรียกว่า “Rotor”



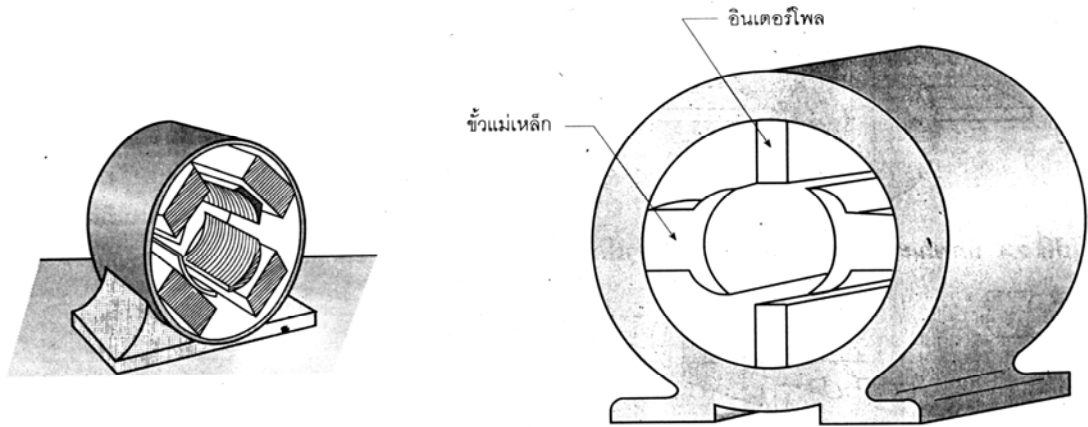
## ■ Stator

Stator มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1. โครงเหล็ก (Magnetic Frame หรือ Yoke) จะทำหน้าที่ 2 อย่าง คือ

1.1 ยึดส่วนประกอบของขั้วแม่เหล็ก และเป็นฝาครอบป้องกันส่วนประกอบทางกล

1.2 เป็นทางเดิน (path) ของฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) ให้ครบวงจรจากขั้วแม่เหล็กแต่ละขั้ว

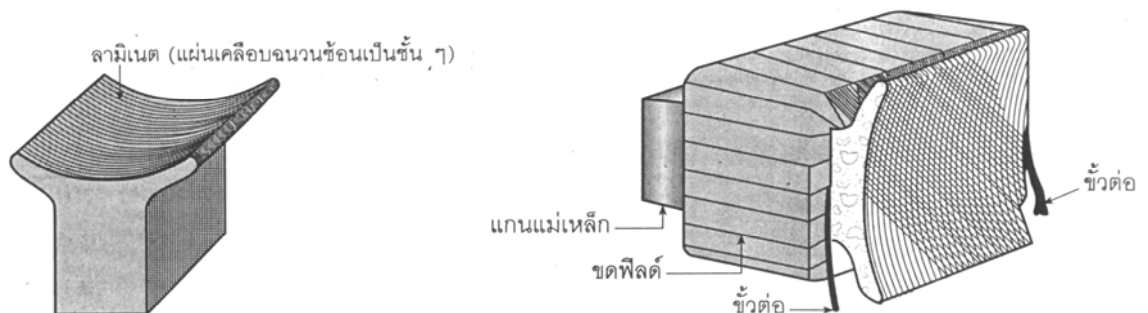


2. แกนเหล็กของขั้วแม่เหล็กและขั้วแม่เหล็ก (Pole Cores and Pole shoes)

แม่เหล็กของขดลวดสนาม (field coil) จะประกอบด้วยขั้วแม่เหล็กและแกนของขั้วแม่เหล็ก โดยขั้วแม่เหล็กจะมีหน้าที่ 2 อย่าง คือ

2.1 แพร่กระจายฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างระหว่างขด field coil กับขดลวด armature (air gap) ถ้ามีพื้นที่หน้าตัดมากก็จะช่วยลดค่า reluctance ทางด้านแม่เหล็ก (ความต้านทานทางแม่เหล็กไฟฟ้า) ได้

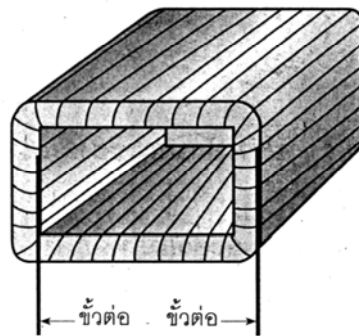
2.2 ช่วยในการยึดขด field (Exciting coil หรือ field coil)



3. ขดลวดสนามแม่เหล็กหรือ field coil



**Field coil** จะประกอบด้วยขดลวดทองแดงที่พันและถูกใส่ลงไปในแกนแม่เหล็ก เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด จะทำให้เกิดแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละขั้วแม่เหล็ก และเคลื่อนที่ตัดกับขดลวดของ **armature** ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า **emf**

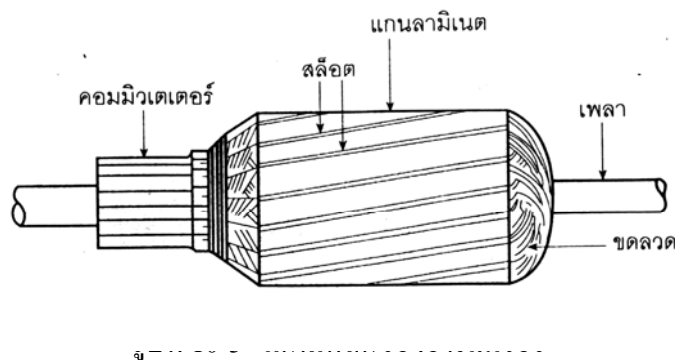


## ๓ Rotor

Rotor มีส่วนประกอบ 4 ส่วน คือ

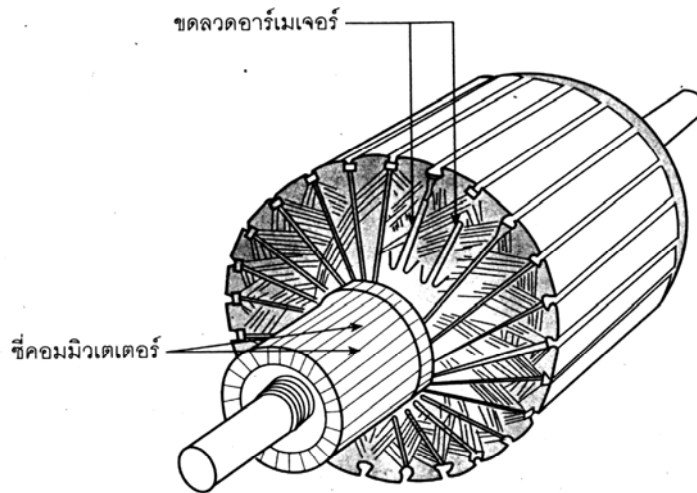
### 1. แกนเหล็กของอาร์เมเจอร์ (Armature Core)

**Armature** เป็นส่วนที่เคลื่อนที่และหมุนได้ ซึ่งทำด้วยแผ่นเหล็กบาง ๆ มาประกบกันเข้าเป็นตัวท่อน แล้วเจาะร่องเป็น **Slot** เพื่อไว้พันขดลวด โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแกนเหล็ก **armature** จะประกอบด้วยชุด **commutator**



### 2. ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding)

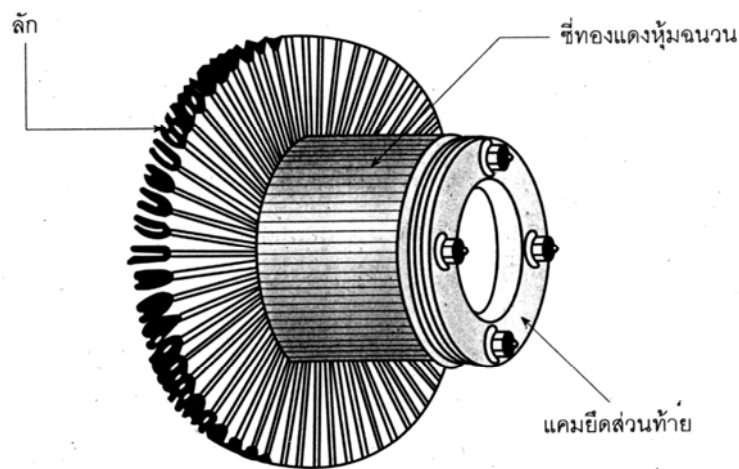
**Armature winding** คือ ขดลวดทองแดงที่ถูกพันลงใน **slot** บนท่อน **armature** และปลายของขดลวดจะต่อเข้ากับ **commutator**



ature

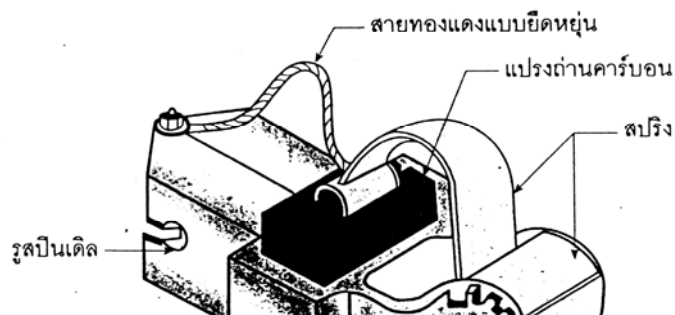
### 3. คอมมิวเตเตอร์ (Commutator)

Commutator มีลักษณะเป็นซี่ทองแดงซึ่งติดอยู่ปลายด้านหนึ่งของแกน armature โดยทำหน้าที่ร่วมกับแปรงถ่าน เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC)



### 4. แปรงถ่านและเบร็ง (Brushes and Bearings)

แปรงถ่านมีลักษณะเป็นแท่งคาร์บอนที่ถูกใส่ลงในช่องแปรงถ่าน (Brush box) และวางแตะอยู่บนซี่ commutator ด้วยแรงกดของสปริง และทำหน้าที่เป็นทางผ่านให้กระแสไฟฟ้าไหลเขาและออกจาก armature ที่กำลังหมุนอยู่



รูปที่ 10-8 รูปร่างของแปรงถ่าน

## • Interpole

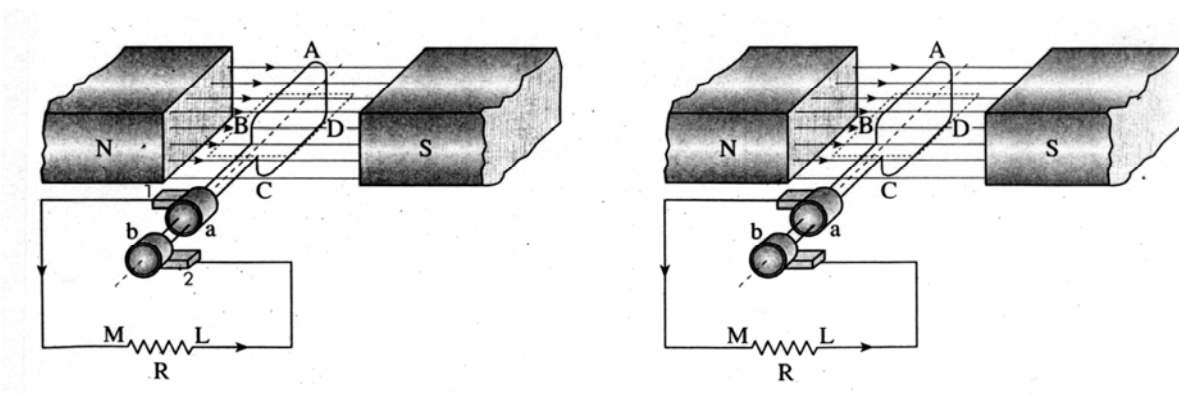
Interpole เป็นขั้วแม่เหล็กเล็ก ๆ ที่ถูกยึดกับโครงเหล็กและถูกใส่อยู่ในขั้วแม่เหล็กหลักซึ่งจะถูกพันด้วยขดลวดทองแดงเพียง 2-3 รอบ และถูกต่ออนุกรมกับขดลวด **armature** ขั้วแม่เหล็กเหล่านี้จะมีขั้วเดียวกันกับขั้วแม่เหล็กและจะนำหน้าขั้วแม่เหล็กในทิศทางของการหมุนเสมอ

## 10-3 พื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

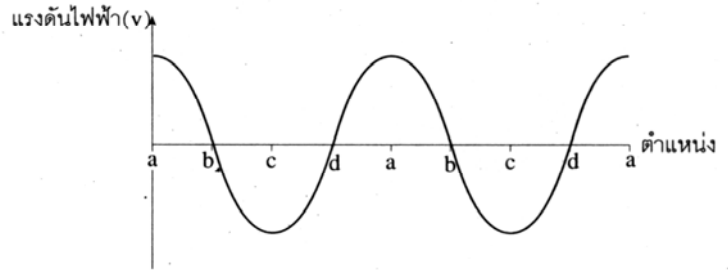
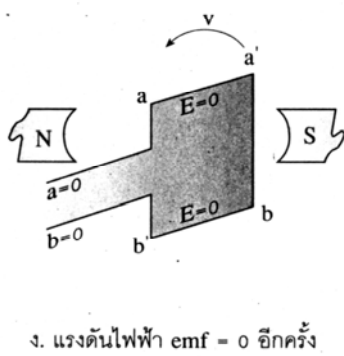
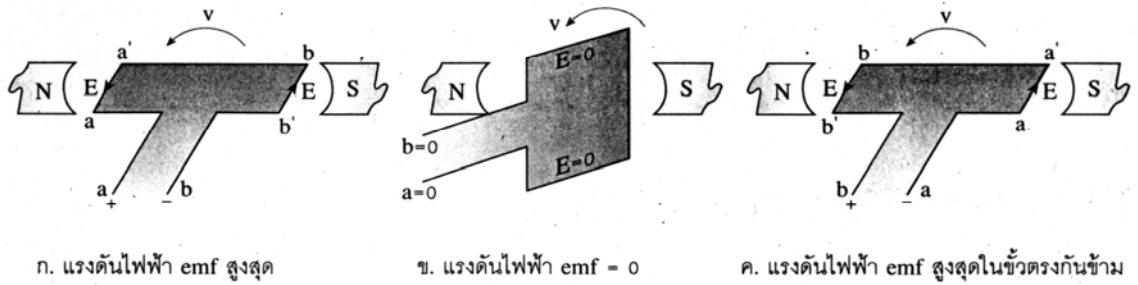
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ เครื่องจักรกลที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า บางทีอาจจะเรียกว่า “Generator” หรือ “Dynamo”

การเปลี่ยนรูปพลังงานจะใช้หลักการของการผลิตแรงดันไฟฟ้า **emf** ตามที่ได้เรียนมาแล้ว ซึ่งก็คือเมื่อใดก็ตามที่ตัวนำเคลื่อนที่ตัดกับสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงดันไฟฟ้า **emf** และแรงดันไฟฟ้า **emf** นี้จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ

หลักการง่าย ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีลักษณะดังรูปที่ 10-9 ซึ่งจะประกอบด้วยขดลวดทองแดงจำนวน 1 รอบ เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก โดยที่ตรงส่วนปลายจะถูกต้องกับ **slip-ring** ผ่าซีก **a** และ **b**

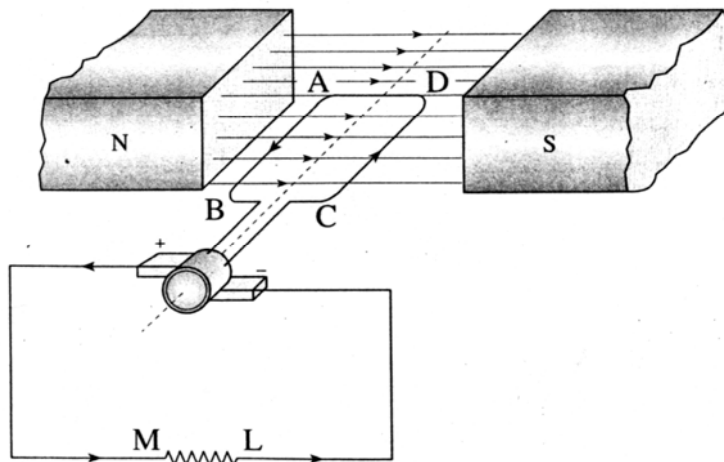


จากกฎมือขวาของเฟลมมิ่งจะได้ลักษณะการเกิดแรงดันไฟฟ้า  $emf$  ขณะขดลวดเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก ดังที่แสดงในรูปที่ 10-10



จ. แรงดันไฟฟ้า  $emf$  ของจุด  $a$  เทียบกับจุด  $b$  สำหรับการหมุน 2 รอบ

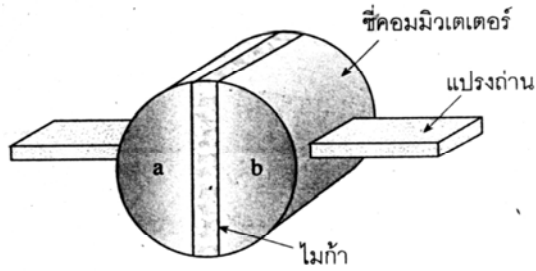
จากรูปที่ 10-10 จะเห็นได้ว่า จะได้แรงดันไฟฟ้า  $emf$  เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ถ้าต้องการให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงต้องใช้แปรงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์ (commutator) ที่มีลักษณะตามรูปที่ 10-11



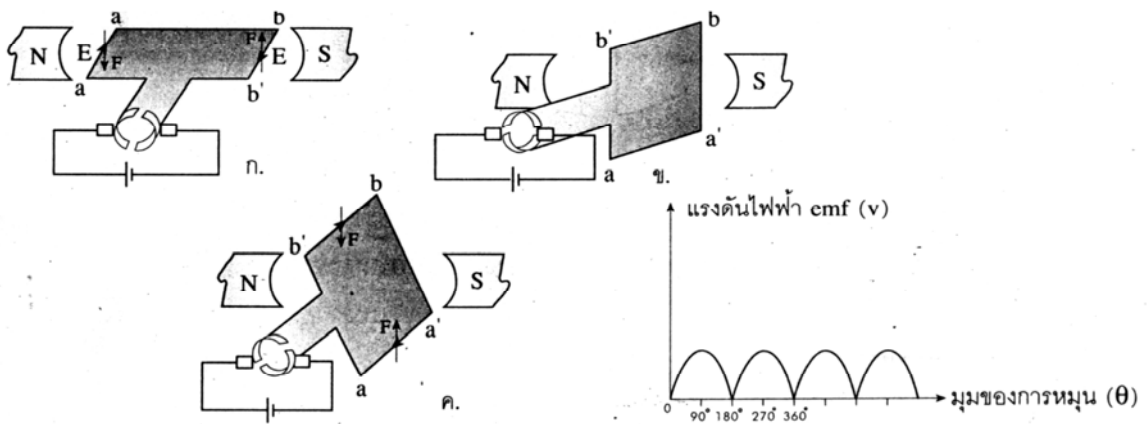
รูปที่ 10-1

้นไฟฟ้า  $emf$  เป็นไฟฟ้า

กระแสตรง



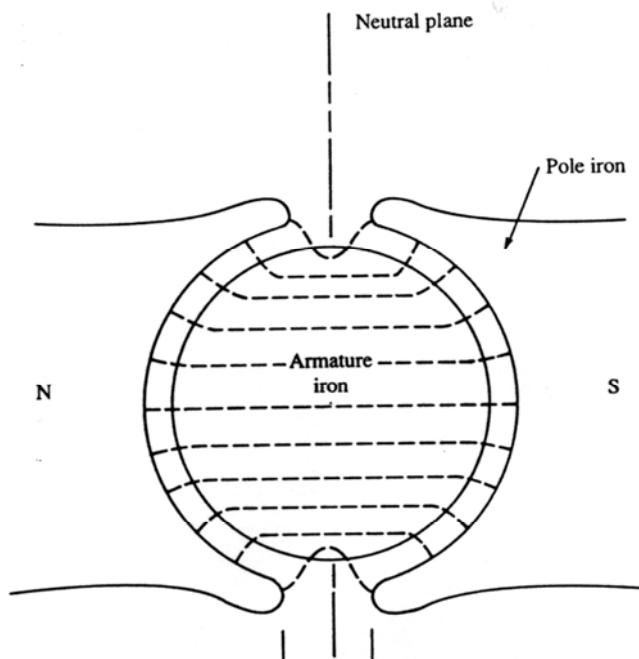
รูปที่ 10-11 (b) ลักษณะของ commutator ที่ถูกผ่าเป็น 2 ซีก



### 10-4 Flux Distribution and Generated Voltage in an Elementary DC Machine

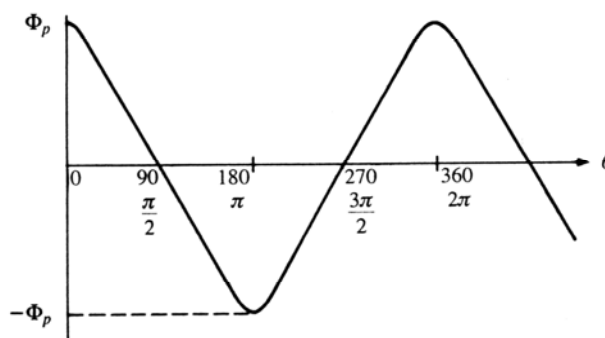
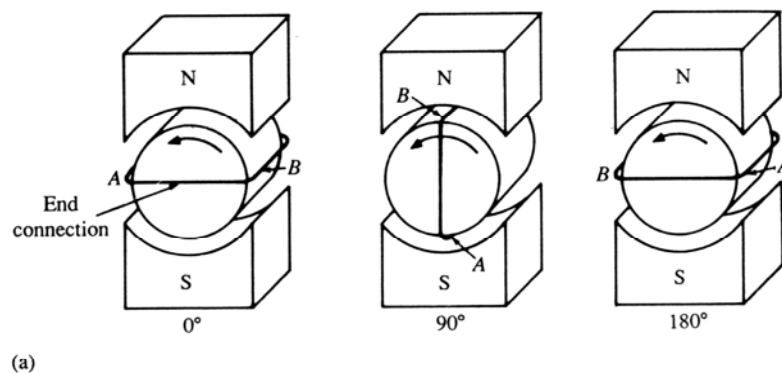
(การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กและการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงเบื้องต้น)

เส้นแรงแม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็กที่กระจายอยู่ใน air gap ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 2 ขั้ว ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 10-12



รูปที่ 10-12 Flux distribution in the air gap of an elementary DC machine

จากรูปที่ 10-12 จะแสดงเส้นแรงแม่เหล็กกระจายอยู่ใน air gap ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า กระแสตรงชนิด 2 ขั้วแบบพื้นฐาน ยกเว้นในเขตของ interpolar โดยที่บริเวณหน้าขั้วแม่เหล็ก N และ S การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่เป็นระเบียบ (unifrom) ซึ่งจะกระจายไปทั่วในช่องว่าง air gap ที่อยู่ระหว่างหน้าขั้วแม่เหล็ก N และ S กับ armature ถึงแม้ว่าจะไม่มีการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณย่าน interpolar แต่ก็ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กเข้าหรือออกจาก armature เมื่อมันอยู่ใน magnetic-neutral plane (plane ที่มีเส้นแรงแม่เหล็กเป็นศูนย์)



รูปที่ 10-1

oil and (b)

(b)

## the window of an armature coil vs. angular position of coil

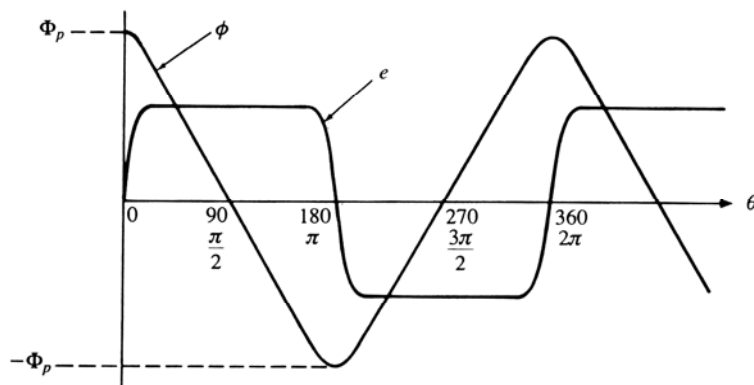
จากรูปที่ 10-3 (a) จะแสดงตำแหน่งของ armature ขณะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counter Clock Wise : CCW) ภายในสนามแม่เหล็ก (magnetic field) และจากรูป 10-13 (b) แสดงการเปลี่ยนแปลงของแม่เหล็กที่ผ่าน Window ของ armature coil โดย plot ต่อองศาทางไฟฟ้า

ที่ตำแหน่ง 0 องศา เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่าน air gap และผ่านทะลุ armature coil ไปยังขั้ว S จะมีค่าสูงสุด เมื่อ armature เริ่มหมุนจากตำแหน่ง 0 องศา ไปยังตำแหน่ง 90 องศา จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งที่ตำแหน่งมุม 90 องศา เส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อผ่านตำแหน่ง 90 องศาไป เส้นแรงแม่เหล็กก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดของมันที่ตำแหน่ง 180 องศา ในทิศทางตรงข้าม และจะเริ่มลดลงจนเส้นแรงแม่เหล็กที่มีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง 270 องศา และจะกระทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบ จำนวน 1 รอบ คือที่ตำแหน่ง 360 องศา

ตามกฎของ Faraday's law ขนาดของ voltage ในขดลวด armature จะเท่ากับจำนวนรอบที่พันในขดลวด คูณด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อเวลา นอกจากนี้ตามกฎของ Lenz's Law แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงข้ามกับการหมุน ดังนั้นเมื่อรวมกฎของ Faraday's law และ Lenz's Law เข้าด้วยกัน สามารถจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$e = -N_a \left( \frac{d\phi}{dt} \right) \quad 10.1$$

เครื่องหมายลบ (-) ของสมการที่ 10.1 เป็นการใช้อีกกฎของ Lenz's Law ในสมการ Faraday equation



รูปที่ 10-14 Rectangular voltage wave generated in an armature coil of a DC machine

by a triangular-shaped flux wave through its window

จากรูป 10-14 จากความสัมพันธ์ของกฎ Faraday 's Law และ Lenz ' s Law ต่อเส้นแรงแม่เหล็กในรูปสามเหลี่ยมจะเป็นผลทำให้เกิด velocity wave ในรูปสี่เหลี่ยมสำหรับ DC. Machine โดยความเร็วเชิงมุม (angular velocity =  $\omega$ ) ของขดลวดที่หมุนด้วยความเร็วคงที่จะได้

$$\omega = dy / dt \Rightarrow dt = dy / \omega$$

10.2

เมื่อแทนค่า  $dt = dy / \omega$  จากสมการที่ 10.2 ลงในสมการที่ 10.1 จะได้

$$e = -N_a [d\Phi / (dy / \omega)]$$

$$e = -N_a \omega [d\Phi / dy]$$

10.3

จากรูปที่ 10-14 เมื่อพิจารณา slope ของ voltage wave ในครึ่ง cycle แรกของคลื่นเส้นแรงแม่เหล็ก (flux wave) จะมีค่าคงที่และประมาณได้โดย

$$d\Phi / dy = -\Delta\Phi / \Delta y = -\Phi_p / (\pi / 2)$$

$$d\Phi / dy = -2\Phi_p / \pi$$

10.4

เมื่อแทนค่า  $d\Phi / dy = -2\Phi_p / \pi$  จากสมการที่ 10.4 ลงในสมการที่ 10.3 จะได้

$$e = -N_a \omega [-2\Phi_p / \pi]$$

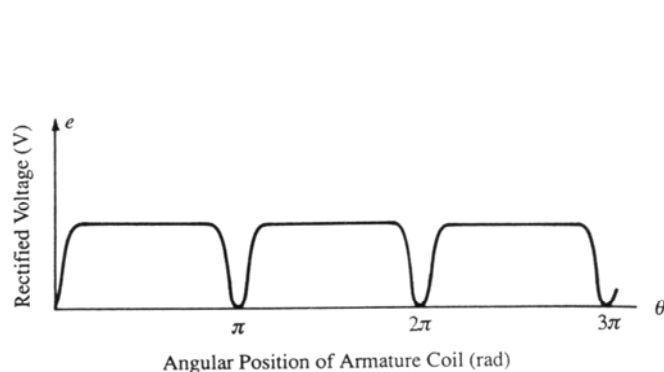
$$e = [2\omega N_a \Phi_p] / \pi$$

10.5

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ voltage ( $E_{av}$ ) ของรูปสี่เหลี่ยมของครึ่ง cycle แรกจะได้

$$E_{av} = [2\omega N_a \Phi_p] / \pi$$

10.6





## รูปที่ 10-15 Rectified voltage wave

■ ความเร็วเชิงมุม (angular velocity) คือ ความเร็วเชิงมุมของอัตราการหมุนรอบวงกลม ซึ่งเป็นอัตราหมุนที่ทำให้ค่าของมุมเปลี่ยนแปลงไปต่อเวลาที่หมุน ( $\omega = \gamma / t \Rightarrow \gamma = \omega t$ )

เมื่อทำการ Rectified voltage wave รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดย solid-state หรือ mechanical methods จะได้รูปคลื่นตามที่แสดงในรูปที่ 10-15 และจากสมการที่ 10.6 เมื่อ applies คลื่นทั้งหมดแสดงในรูปของความเร็วรอบต่อนาที (r/min) โดยการแทนค่า

$$\omega = 2\pi f \quad \text{และ} \quad f = Pn / 120$$

นั่นคือสมการที่ 10.6 จะได้

$$E_{av} = 2 (2\pi Pn / 120) (N_a \Phi_p / \pi)$$

$$E_{av} = (P.n.N_a \Phi_p / 30)$$

10.7

เมื่อ :  $E_{av}$  = average voltage induced in armature (V)

$f$  = frequency (Hz)

$n$  = rotational speed (r/min)

$P$  = number of field poles

$\Phi_p$  = pole flux (Wb)

$N_a$  = number of turns of conductor in armature

ในแต่ละรอบของขดลวดใน armature coil จะมี 2 ด้าน (coil sides) โดยที่ end-connection จะไม่มีการเหนี่ยวนำให้เกิด voltage นั่นคือ ใน terms ของ armature conductor จะได้

$$N_a = Z_a / 2$$

ในเครื่องจักรกลทั่ว ๆ ไป จะมีขดลวดของ coil จำนวนมากพันกระจายไปรอบ ๆ armature ในลักษณะอนุกรม - ขนาน อย่างต่ำ 2 path ที่ขนานกัน ดังนั้นการแสดงค่า average ของ induced emf ในรูปของตัวนำใน armature ทั้งหมด หาได้โดยแทนสมการที่ 10.8 ลงในสมการที่ 10.7 จะได้

$$E_{av} = P \cdot n (Z_a / 2 a) (\Phi_p / 30)$$

$$= (P \cdot n Z_a \Phi_p) / (60 a)$$

10.9

เมื่อ : a = number of parallel paths

Z<sub>a</sub> = total number of armature conductor

จากสมการที่ 10.9 ค่าคงที่จะประกอบด้วย Z<sub>a</sub>, P และ 60 a ดังนั้นจะได้

$$k_G = Z_a P / 60 a$$

10.10

เมื่อแทนค่าคงที่ k<sub>G</sub> จากสมการ 10.10 ลงในสมการที่ 10.9 จะได้

$$E_{av} = n \Phi_p k_G$$

**Example 10-1** A six-pole, 50 kw, DC machine operating at 1180 r/min has a generated emf of 136.8 V. If the speed is reduced to 75 percent of its original value and the pole flux is doubled. Determine :

(a) induced emf

(b) frequency of the rectangular voltage wave in the armature winding

**Solution** (a) induced emf

จากสมการ  $E_{av} = n \Phi_p k_G$  ดังนั้นจะได้

$$E_1 / E_2 = [n \Phi_p k_G]_1 / [n \Phi_p k_G]_2$$

$$E_2 = E_1 \frac{[n \Phi_p k_G]_2}{[(1180) (\Phi_{p1}) k_G]_1}$$

$$= 136.8 \frac{[(0.75 \times 1180) (2 \Phi_{p1}) k_G]}{[(1180) (\Phi_{p1}) k_G]}$$

$$= 205.2 \text{ V}$$

**Ans**

(b) frequency of the rectangular voltage wave in the armature winding

จากสมการ

$$f = P n / 120$$

$$f_2 = (6) (0.75 \times 1180) / 120$$

$$= \underline{44.25 \text{ Hz}}$$

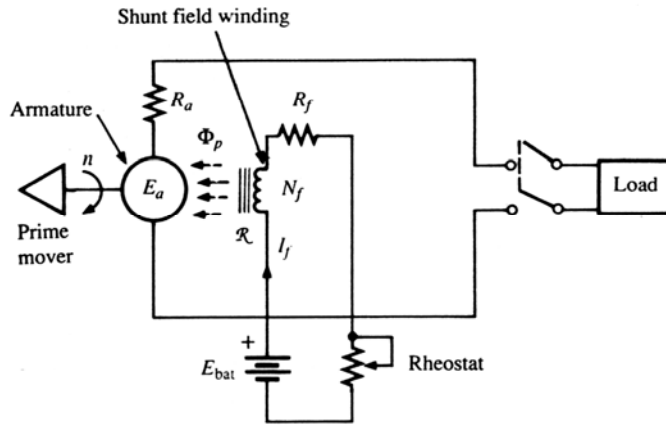
**Ans**

-----

## 10-5 Basic DC Generator

DC Generator แบบพื้นฐาน บางทีเรียกว่า “Shunt generator” เนื่องจากจะมี ขดลวด field winding ต่อขนานกับ armature โดยขดลวด field winding จะต่อเข้ากับ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก คือ Battery หรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้าอื่น ๆ (เรียกว่า “exciter”) เพื่อใช้ในการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 10-16 จะแสดง diagram ของวงจรไฟฟ้า shunt generator ที่ใช้ field winding ต่อขนานกับตัว armature และต่อเข้ากับ battery เพื่อจ่าย field current โดยจะมีค่าความต้านทานของ armature คือ  $R_a$  และความต้านทานของ field winding คือ  $R_f$



รูปที่ 10-16 ]

self-excited shunt

generator

เมื่อตัดอำนาจแม่เหล็กตกค้าง (residual magnetism) ออกไป เส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้ว (pole flux) สามารถหาได้จากสมการ

$$\Phi_p = N_f I_f / \mathcal{R}$$

### 10.12

เมื่อ :  $\Phi_p$  = pole flux (Wb)

$N_f$  = number of turns of wire in a field coil (turns)

$I_f$  = field current (A)

$\mathcal{R}$  = reluctance of magnetic circuit (A-t / Wb)

เมื่อแทนค่า  $\Phi_p = N_f I_f / \mathcal{R}$  จากสมการที่ 10.12 ลงในสมการ 10.11 จะได้

$$E_{av} = n \frac{(N_f I_f / \mathcal{R})}{2} k_G$$

### 10.13

ค่ากระแสใน field winding ( $I_f$ ) หาได้จากกฎของ Ohm 'Law คือ

$$I_f = E_{batt} / (R_f + R_{rheo})$$

### 10.14

เมื่อ :  $I_f$  = field current (A)

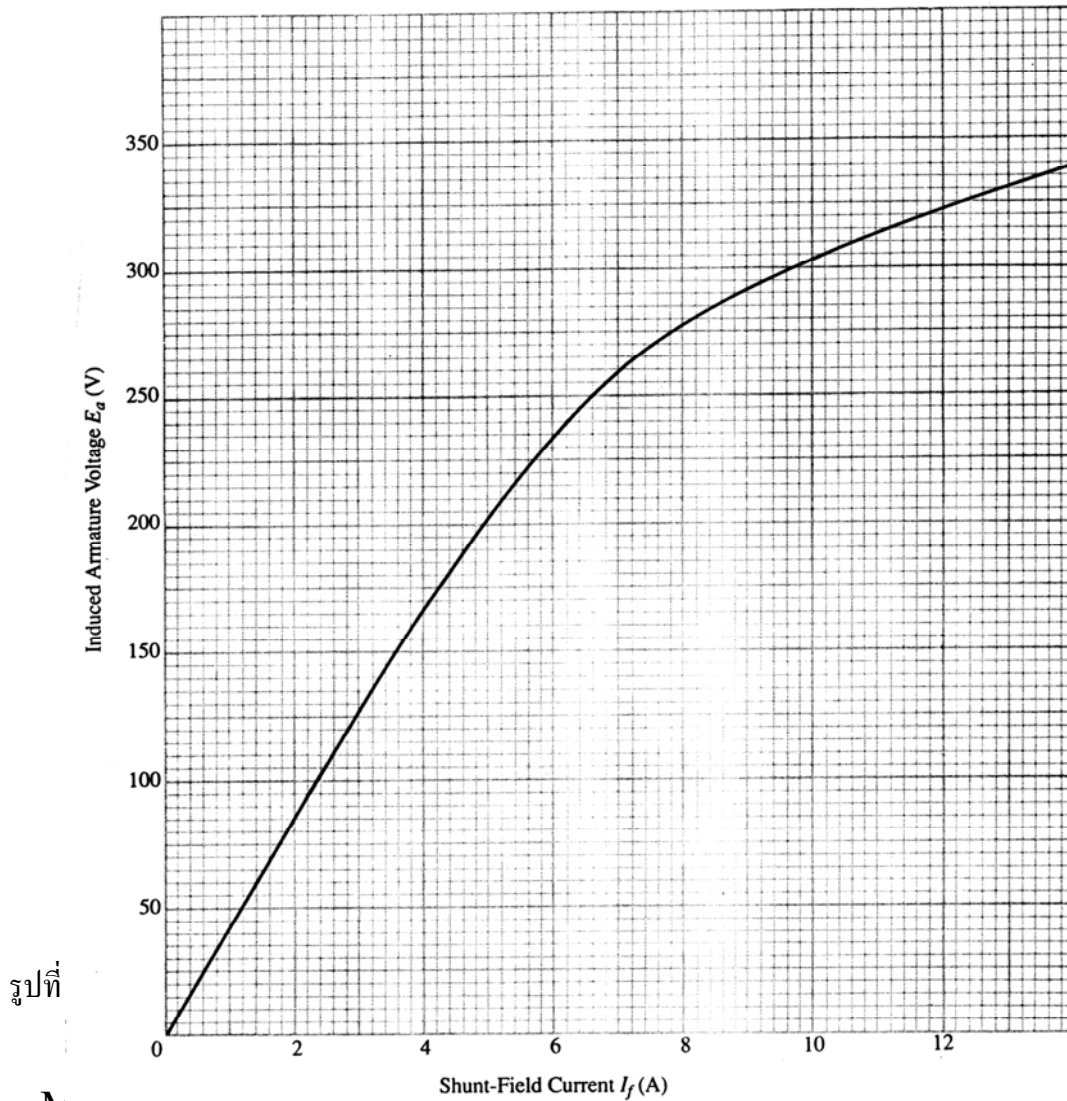
$E_{batt}$  = battery voltage (V)

$R_f$  = resistance of field winding including all poles ( $\Omega$ )

$R_{rheo}$  = resistance of rheostat , at setting ( $\Omega$ )

จากสมการที่ 10.14 ถ้าปรับค่าความต้านทานที่ rheostat ( $R_{rheo}$ ) ให้ลดลง จะทำให้กระแส field current ( $I_f$ ) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้ pole flux ( $\Phi_p$ ) ในสมการที่ 10.12

เพิ่มขึ้นด้วย และทำให้ armature voltage ( $E_{av}$ ) ในสมการที่ 10.13 เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ตามที่แสดงในกราฟรูปที่ 10-17



Magnetization curve หรือ Open circuit characteristic ของเครื่องกำเนิด

ความสัมพันธ์ระหว่าง shunt field current ( $I_f$ ) กับ induced armature voltage ( $E_a$ ) ขณะไม่มี Load (no load) และมีความเร็วรอบคงที่

**Example 10-2** Assume that the resistance of a armature wining and the resistance of the field winding of the generator show in Figure 10-16 are  $0.014 \Omega$  and  $10.4 \Omega$  , respectively and that the

magnetization curve is the one shown in Figure 10-17 Determine the rheostat setting required to obtain an induced emf of 290 V.

**Solution** จากกราฟ magnetization curve ในรูป 10.17 ที่ induced emf = 290 V. จะได้ค่ากระแส field current ( $I_f$ )  $\approx$  8.9 A. และเมื่อ Applying Ohm's Law to the shunt field circuit จากสมการที่ 10.14 จะได้

$$\begin{aligned} I_f &= E_{\text{batt}} / R_f + R_{\text{rheo}} \\ R_{\text{rheo}} &= (E_{\text{batt}} / I_f) - R_f \\ &= (290 / 8.9) - 10.4 \\ &= 22.2 \ \Omega \end{aligned}$$

**Ans**

## 10-6 Voltage Regulation

Voltage Regulation ของ DC Generator คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ terminal ของจุดต่อที่จ่ายให้กับ load ขณะไม่มี load (no load) ไปสู่ขณะมี load เต็มพิกัด (rated load) ต่อแรงดันไฟฟ้าขณะมี load เต็มพิกัด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$10.15 \quad \boxed{\text{VR} = (V_{\text{nl}} - V_{\text{rated}}) / V_{\text{rated}} \times 100 \text{-----}}$$

เมื่อ :  $\text{VR} =$  Voltage regulation (%)  
 $V_{\text{nl}} =$  no-load (open circuit) voltage (V)  
 $V_{\text{rated}} =$  voltage indicated on nameplate of machine (V)

**Example 10-3** A 100 kW, 1800 r/min generator operating at rated load has a terminal voltage of 240 V If the voltage regulation is 2.3 percent. Determine the no-load voltage.

**Solution** จากสมการ  $\text{VR} = (V_{\text{nl}} - V_{\text{rated}}) / V_{\text{rated}}$   
 $V_{\text{nl}} = V_{\text{rated}} \times (1 + \text{VR} / 100)$

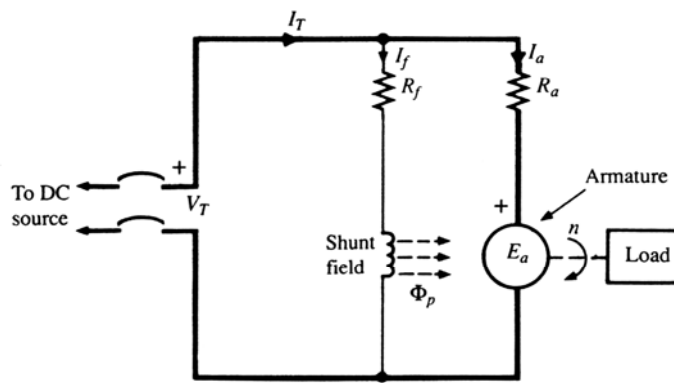
$$= 240 \times (1 + 2.3 / 100)$$

$$= 245.52 \text{ V.}$$

**Ans**

## 10-7 Basic DC Motor

ไดอะแกรมวงจรสมมูลไฟฟ้าสำหรับ DC Motor เรียกว่า “shunt motor” ตามที่แสดงในรูปที่ 10-18



รูปที่ 10-18 Equivalent-circuit diagram for a basic DC motor

จากรูปที่ 10-18 ขดลวด shunt field จะถูกต่อพร้อมขนานกับแหล่งกำเนิด DC Source ซึ่งจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็ก  $\Phi_p$  กระทำร่วมกับกระแสของ armature ทำให้เกิดแรงบิด (Torque) ซึ่งเป็นผลของปฏิกิริยามอเตอร์ (motor action)

ขดลวด shunt field จะไม่ทำให้เกิดงาน แต่จะเป็นเพียงตัวกลางที่จะผลักดันให้ตัวนำ armature สร้างแรงบิดเกิดการหมุนเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับพื้นถนนที่ขยับด้านล้อของรถยนต์ ถนนไม่ทำให้เกิดงาน แต่ถ้าไม่มีถนน รถยนต์ก็จะไม่เกิดการเคลื่อนที่

พลังงานทั้งหมดที่จ่ายให้ขดลวด shunt field จะอยู่ในรูปของการสูญเสียพลังงานความร้อน  $I^2R$  ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้โดยการต่อ wattmeter เพื่อวัดกำลังงานที่ถูกดึงโดย shunt field จะสังเกตเห็นว่าเข็มของ wattmeter จะไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของ power input ต่อ field ขณะที่เครื่องถูกใส่ load แต่ wattmeter ที่ต่อในวงจร armature จะแสดงสัดส่วนการเพิ่มของ power input ต่อการเพิ่มของ load ที่เพลา

สมมุติว่าแรงบิดที่สร้างขึ้นมีเพียงพอที่จะทำให้เกิดการหมุน แรงดันไฟฟ้า emf ด้านกลับ (counter emf : cemf) ที่กำเนิดใน armature จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของ armature (armature speed :  $n$ ) และเส้นแรงแม่เหล็กใน air-gap (air-gap flux :  $\Phi_p$ ) นั่นคือ

$$E_a = n \Phi_p k_G$$

10.16

เมื่อ :  $\Phi_p$  = เส้นแรงแม่เหล็กใน air-gap ที่สร้างโดย shunt field poles มีหน่วยเป็น Wb

จากสมการที่ 10.16 เมื่อทำการแก้สมการเพื่อหาค่า armature speed (n) จะได้

$$n = \frac{E_a}{\Phi_p k_G} \quad \Phi_p \neq 0$$

10.17

จากสมการที่ 10.17 ความเร็วของ DC Motor จะเป็นสัดส่วนกลับกับ  $\Phi_p$  และถ้า  $\Phi_p = 0$  แรงบิดของมอเตอร์จะเท่ากับศูนย์ (Zero) ตัว armature จะไม่หมุน

จากรูปที่ 10-18 เมื่อใช้กฎของ Kirchoff's voltage law ในวงจร armature และแก้สมการเพื่อหาค่ากระแส  $I_a$  จะได้

$$V_T = I_a R_a + E_a$$

10.18

$$I_a = \frac{(V_T - E_a)}{R_a}$$

10.19

**Example 10-4** A 240 V, 20 hp , 850 r/min shunt motor draws 72 A when operating at rated conditions. The respective resistance of the armature and shunt field are 0.242  $\Omega$  and 95.2  $\Omega$

Determine the percent reduction in field flux required to obtain a speed of 1650 r/min , while drawing an armature current of 50.4 A



**Solution**      หาค่ากระแส  $I_{f1}$  และ  $I_{a1}$

จากสมการ                       $I_{f1} = V_T / R_f = 240 / 95.2$   
 $= 2.52 \text{ A}$

$I_{a1} = I_T - I_{f1} = 72 - 2.52$   
 $= 69.48 \text{ A}$

หาค่าแรงดันไฟฟ้า  $E_{a1}$  และ  $E_{a2}$

จากสมการ                       $E_{a1} = V_T - I_{a1} R_a = 240 - (69.48$   
 $\times 0.242) = 223.19 \text{ V}$

$E_{a2} = V_T - I_{a2} R_a = 240 -$   
 $(50.4 \times 0.242) = 227.80 \text{ V}$

หาค่า  $\Phi_{p1}$  และ  $\Phi_{p2}$

จากสมการ                       $n_1 = E_{a1} / \Phi_{p1} k_G \Rightarrow \Phi_{p1}$   
 $= E_{a1} / n_1 k_G$

$\Phi_{p1} = 223.19 / 850 k_G = 0.2626 k_G$

$\Phi_{p2} = E_{a2} / n_2 k_G = 227.80 / 1650 k_G$   
 $= 0.1381 k_G$

ดังนั้น percent reduction in field flux =  $(\Phi_{p1} - \Phi_{p2}) /$   
 $\Phi_{p1} \times 100 \%$

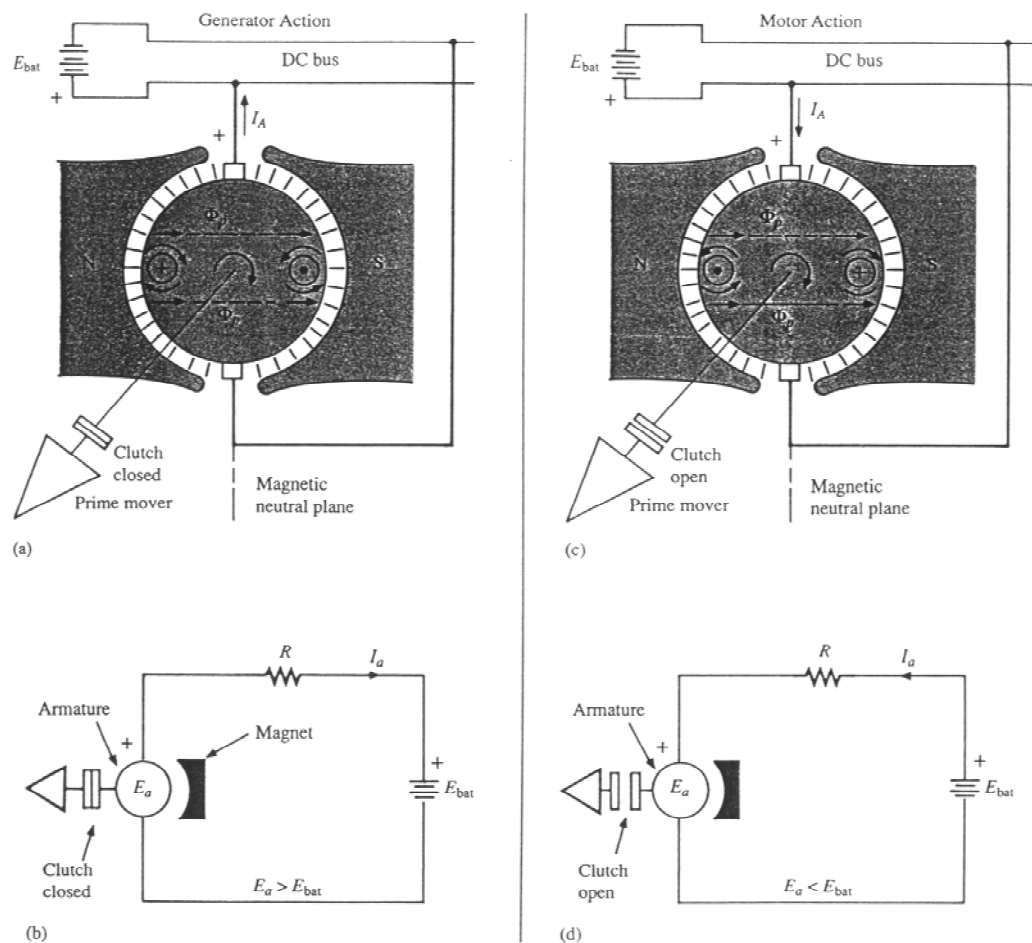
$= (0.2626 - 0.1381) / 0.2626 \times 100 \%$   
 $= 47.41 \%$

**Ans**

-----

## 10-8 Generator- to-Motor Transition and Vice Versa

การเปลี่ยนจาก generator ไปเป็น motor หรือในทางกลับกัน คือเปลี่ยนจาก motor ไปเป็น generator ตามที่แสดงในรูปที่ 10-19 เป็นเครื่องจักรกล DC machine พื้นฐานแบบง่าย ๆ ที่มีขดลวด armature coil เพียงขดเดียว และสนามแม่เหล็ก magnetic field จะถูกจ่ายโดยแม่เหล็กถาวร ขั้ว N และ S และตัว armature จะต่อเข้ากับ battery โดยผ่านทาง DC bus สำหรับตัวต้นกำลังขับเคลื่อน prime mover ซึ่งอาจจะเป็นเครื่องกังหันไอน้ำหรือเครื่องยนต์ดีเซลจะต่อ coupled ทางกลกับ armature โดยผ่านทาง clutch



รูปที่ 10-19 Generator-to-motor transition : (a) and (b) generator action ; (c) and (d) motor action

## Generator Action

จากรูปที่ 10-19 (a) เมื่อ clutch ถูกปิด และตัว prime mover ขับ armature ที่ความเร็วค่าหนึ่ง จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า emf ( $E_a$ ) ที่มีค่ามากกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก battery นั่นคือ  $E_a > E_{batt}$  เครื่องจักรกลก็จะทำงานเป็น generator ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ DC bus และไปชาร์จเข้า battery

ทิศทางของกระแสในตัวนำ armature สำหรับขั้วแม่เหล็กที่กำหนดให้ และทิศทางการหมุนของ armature หาได้จากกฎของ Lenz's Law และกฎของ flux bunching rule

จากรูป 10-19 (b) วงจรสมมูลสำหรับ generator action โดยค่าความต้านทาน R แทนค่าความต้านทานของขดลวด armature ที่ต่ออนุกรมเข้ากับ battery

## Motor Action

เมื่อทำการปลด prime mover โดยการเปิด clutch จะทำให้ความเร็วของ armature ลดลง และแรงเคลื่อนไฟฟ้า emf ที่จ่ายออกมาจาก armature จะลดลงด้วย เมื่อความเร็วลดลงจนกระทั่งค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า emf ( $E_a$ ) มีค่าน้อยกว่าแรงเคลื่อนจาก battery นั่นคือ  $E_a < E_{batt}$  แล้ว battery จะทำงานเป็นแหล่งกำเนิดจ่ายไฟกลับทิศทางกระแสใน armature และจะขับเครื่องจักรกลให้เป็น motor ตามที่แสดงในรูปที่ 10-19 (c)

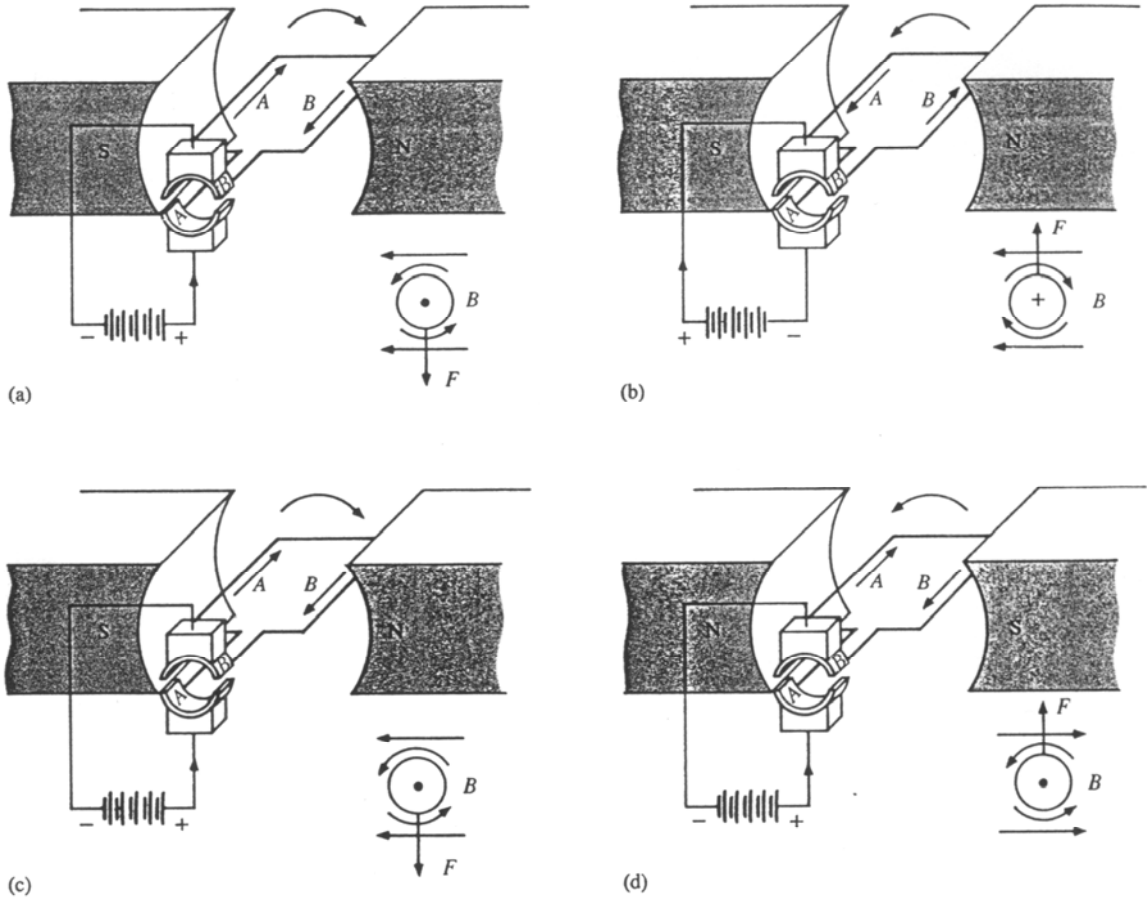
จากรูปที่ 10-19 (c) จะสังเกตเห็นว่าทิศทางการหมุนของ armature เมื่อเป็น motor จะมีทิศทางเช่นเดียวกันกับเมื่อมันถูกขับโดย prime mover ทิศทางการหมุนอาจแสดงโดยกฎของ Lenz's Law และ flux bunching rule

จากรูปที่ 10-19 (b) และ (d) ทิศทางของ induced emf ( $E_a$ ) จะเหมือนกันไม่ว่าเครื่องจักรกลจะทำงานเป็น motor หรือ generator เพราะว่าทั้ง 2 กรณี ขั้วแม่เหล็กและทิศทางการหมุนจะเหมือนกัน

การหมุนของเครื่องจักรกล (generator และ motor) จะผลิต voltage และสร้างแรงบิดเมื่อทำงานเป็น generator ตามที่แสดงในรูป (a) และ (b) เครื่องจักรกลจะกำเนิด voltage และจ่ายกระแสไฟฟ้า สร้างแรงบิดด้านกลับในทิศทางตรงกันข้ามกับการขับแรงบิด และถ้าทำงานเป็น motor ตามที่แสดงในรูป 10-19 (c) และ (d) เครื่องจักรกลจะสร้างแรงบิดขับและถ้าเพลลาหมุนอย่างอิสระจะจ่าย voltage ด้านกลับ เรียกว่า "counter-emf" หรือ cemf ในทิศทางตรงกันข้ามกับ voltage ที่ขับ นอกจากนี้เครื่องจักรกลจะหมุนในทิศทางเดียวกันไม่ว่าจะเป็น motor หรือ generator เพียงแต่จะแสดงกลับกันในการเปลี่ยนแปลงสถานะการทำงาน คือ กลับทิศทางกระแสใน armature ( $I_a$ ) เท่านั้น

## 10-9 การกลับทิศทางการหมุนของ DC Motor

การกลับทิศทางการหมุนของ DC. Motor สามารถทำได้ 2 วิธี คือ กลับทิศทางของกระแสใน armature ตามที่แสดงในรูปที่ 10-20 (a) และ (b) หรือ การกลับขั้วของ field ตามที่แสดงในรูปที่ 10-20 (c) และ (d)



รูปที่ 10-20 Reversing a direct-current motor by : (a) and (b) reversing the armature current ; (c) and (d) reversing the polarity of the field.

รูปที่ 10-20 (a) และ (b) แสดงวิธีการกลับกระแสใน armature รูป (a) armature มีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา (cw) และรูป (b) เมื่อกลับกระแสที่จ่ายให้ armature โดยการสลับขั้วของ battery จะทำให้ armature หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (ccw)

รูปที่ 10-20 (c) และ (d) แสดงวิธีการกลับขั้วของ field รูป (c) armature จะหมุนในทิศทางเข็มนาฬิกา (cw) และรูป (d) เมื่อทำการสลับขั้วของ field จาก N เป็น S และจาก S เป็น N จะทำให้ armature หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (ccw)

ทิศทางการหมุนของแต่ละกรณี หาได้จาก flux bunching rule ซึ่งได้แสดงไว้ในแต่ละรูป

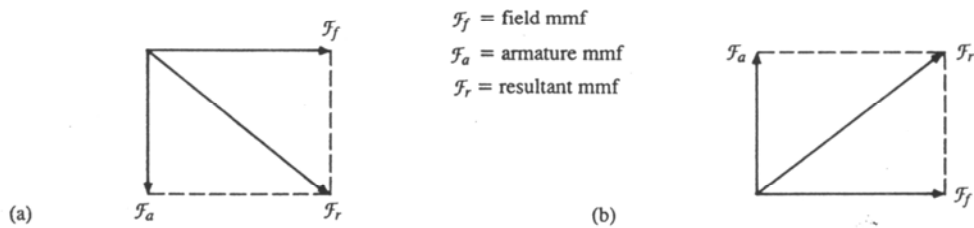
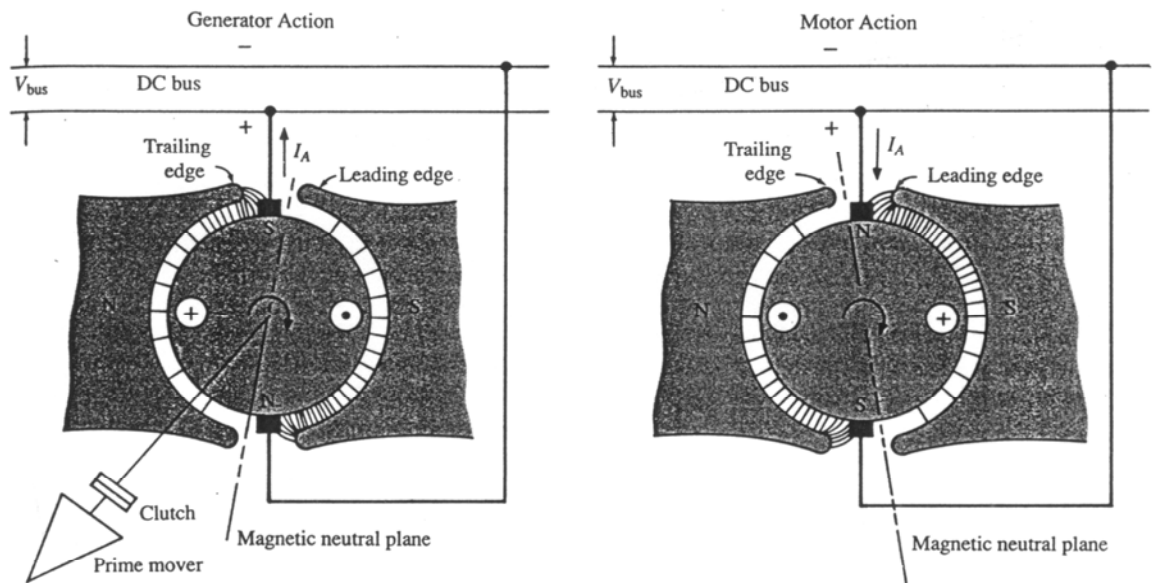


## 10-12 Armature Reaction

เมื่อ generator หรือ motor มี load ต่ออยู่ จะทำให้กระแสใน armature coil สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magneto motive force : mmf) ในตัวมันเอง ซึ่งทำปฏิกิริยากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็ก field pole ทำให้รบกวนเส้นแรงแม่เหล็กใน air-gap ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า “armature reaction”

ผลของ armature reaction ต่อเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกรบกวน จะทำให้เกิดผลเสียต่อเส้นแรงแม่เหล็ก คือ

1. ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็กลดลง ซึ่งจะเป็นผลที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นมามีค่าลดลง
2. ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กหลัก (field pole) เสียรูปร่างหรือบิดเบี้ยว ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของการ commutation ของเครื่องกำเนิดไฟฟาลดลง ทำให้เกิดประกายไฟบนแปรงถ่าน



region

### ▣ Armature Reaction in DC Generator

จากรูปที่ 10-21 (a) แสดงแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf ของ armature reaction ใน generator ซึ่งจะทำให้ neutral plane เคลื่อนออกจากแกนของมันในทิศทางของการหมุน ผลลัพธ์รวม คือ การเพิ่มของเส้นแรงแม่เหล็กที่บริเวณด้านบนของขั้ว N และด้านล่างของขั้ว S และจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงที่บริเวณด้านล่างของขั้ว N และด้านบนของขั้ว S ซึ่งจะเป็นผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วทั้งหมดลดลง ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นมามีค่าลดลงตามไปด้วย และเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนจะรั่วเข้าไปในเขต interpole เนื่องจากการเป็น nonlinear ที่เป็นธรรมชาติของขั้วแม่เหล็ก

### ▣ Armature Reaction in DC Motor

จากรูปที่ 10-21 (b) แสดงแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf ของ armature reaction ใน motor ซึ่งจะทำให้ neutral plane เคลื่อนไปจากแกนของมันทิศทางตรงกันข้าม (ทวนเข็มนาฬิกา) กับทิศทางของการหมุน ผลลัพธ์รวม คือ การเพิ่มของเส้นแรงแม่เหล็กที่บริเวณด้านล่างของขั้วแม่เหล็ก N และด้านบนของขั้วแม่เหล็ก S และเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงที่บริเวณด้านบนของขั้วแม่เหล็ก N และด้านล่างของขั้วแม่เหล็ก S และมีเส้นแรงบางส่วนรั่วที่เขต interpolar ซึ่งผลกระทบทั้ง 2 อย่างของการทำงานของ DC motor คือ

1. เส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วในเขต interpolar ทำให้เกิดประกายไฟที่แปรงถ่าน
2. การลดลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้น

### ▣ Armature Reaction and Interpole

การเกิด armature reaction จะมีผลต่อการทำงานของเครื่องจักรกล DC ไม่ว่าจะเป็น motor หรือ generator ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสใน armature และการเพิ่มของ load จะทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf ของ armature เพิ่มขึ้น

ถ้า interpole ทำให้แข็งแรงพอ โดยการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดให้มากขึ้น มันจะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf เพิ่มขึ้นเพื่อต้านและลบล้างผลกระทบของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก armature ที่อยู่ในเขต interpolar ซึ่งจะเป็นผลในการต้าน emf ของการเหนี่ยวนำตัวเองในขดลวดภายใต้การเป็น commutation แม้ว่ามันจะช่วยลดการเกิดประกายไฟ แต่ว่า interpole ไม่ได้ป้องกันการเคลื่อนของเส้นแรงแม่เหล็กที่คร่อมอยู่หน้าขั้วแม่เหล็ก โดยการทำงานของ armature reaction มันเพียงป้องกันเส้นแรงไม่ให้รั่วไปในเขต interpolar เท่านั้น

### ▣ Net Flux in Air-Gap of DC Machine

ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กใน air-gap ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า DC ไม่ว่าจะ เป็น motor หรือ generator จะแสดงในรูปของ field mmf และ equivalent demagnetizing mmf ที่เกิดจาก armature reaction ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการ คือ

$$F_{net} = F_f - F_d \quad \text{-----} \quad 10.22$$

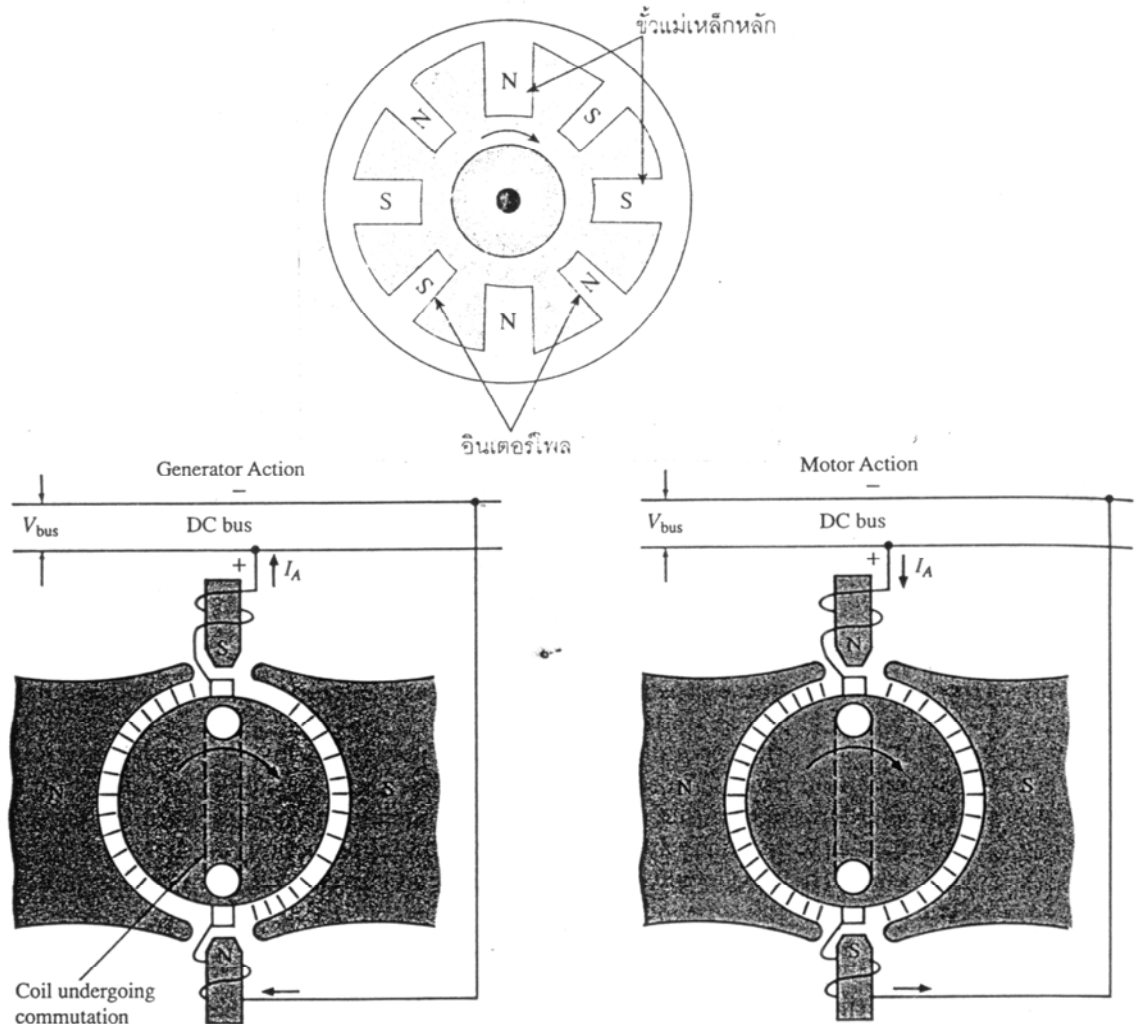
$$\Phi_{gap} = F_{net} / R \quad \text{-----}$$

### 10.23

- เมื่อ :
- $F_{net}$  = net mmf (A- t / pole)
  - $F_f$  = field mmf (A- t / pole)
  - $F_d$  = equivalent demagnetizing mmf (A- t / pole)
  - $R$  = reluctance (nonlinear)

### 10-13 Interpole

การกำจัดประกายไฟที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า emf จากการเหนี่ยวนำตัวเอง ขั้วแคบ ๆ เล็ก ๆ ที่ติดตั้งใน DC machine เรียกว่า “interpole” หรือ “commutating poles”





## รูปที่ 10-22 Location of interpoles , their connections and their polarity for generator and motor

**Interpoles** เป็นขั้วแม่เหล็กเล็ก ๆ ที่ถูกยึดกับโครงเหล็ก และถูกใส่อยู่ในขั้วแม่เหล็กหลัก ซึ่งจะถูกพันด้วยขดลวดทองแดงเพียง 2-3 รอบ และถูกต่ออนุกรมกับขดลวด **armature** ขั้วแม่เหล็กของ **interpoles** จะมีขั้วเดียวกันกับขั้วแม่เหล็กหลัก (**pole**) และจะอยู่นำหน้าขั้วแม่เหล็กหลักในทิศทางของการหมุนเสมอ

- **หน้าที่ของ Interpole มี 2 อย่าง คือ**

1. ป้องกันการเกิดประกายไฟบน **commutator** และแปรงถ่าน เนื่องจากขั้วแม่เหล็กของ **interpole** จะเหมือนกับขั้วแม่เหล็กหลักของ **pole** และจะอยู่นำหน้าเสมอในทิศทางการหมุน มันจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า **emf** ในขดลวด เพื่อจะช่วยในการกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า **emf** จะถูกเหนี่ยวนำด้วย **interpole** จะทำให้เกิด **neutral** ของแรงดันไฟฟ้า **reluctance** เพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟบน **commutator**

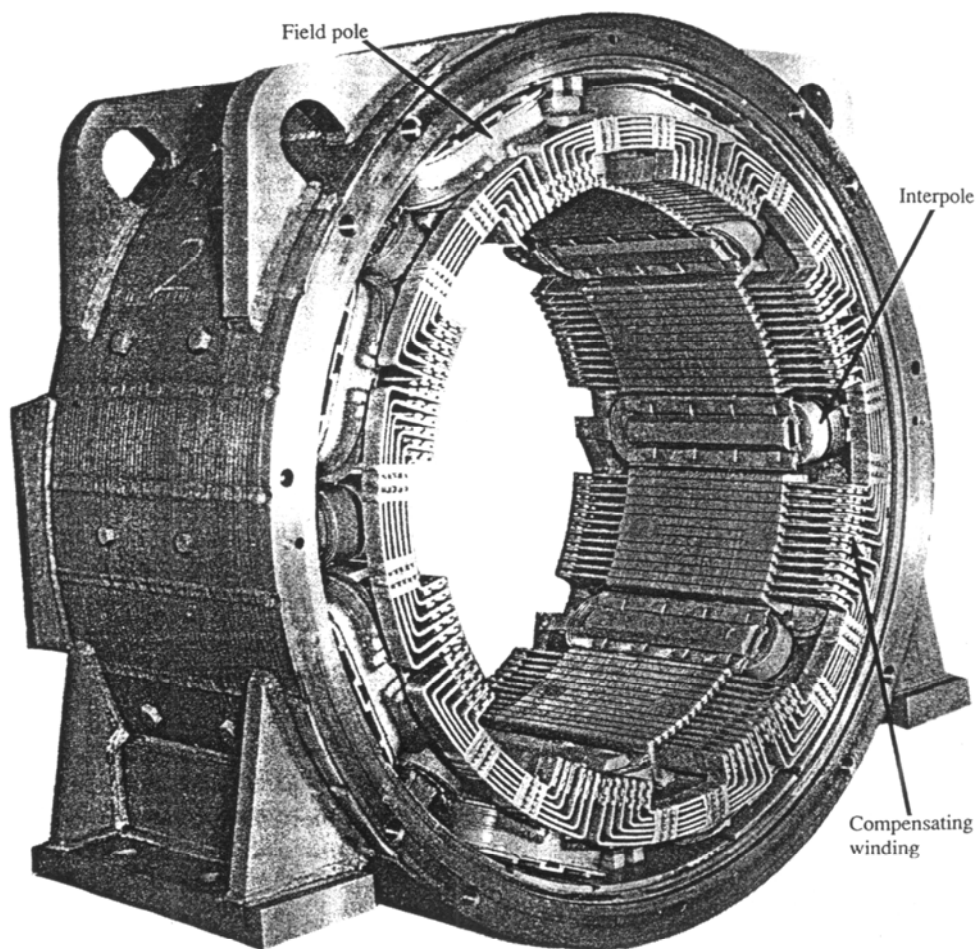
2. ทำให้เกิด **neutral** ของผลการเกิดสนามแม่เหล็กขวางจาก **armature reaction** จะทำให้แปรงถ่านไม่ถูกเปลี่ยนตำแหน่งไปจากจุดเริ่มต้น

## 10-14 Compensating winding (การพันขดลวดชดเชย)

การพันขดลวดชดเชยจะใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า DC. machine ขนาดใหญ่ ที่มีการเปลี่ยนแปลงของ load มาก หรือการกลับทิศทางการหมุนอย่างรวดเร็ว เช่น motor ที่ใช้ในแท่นรีดในอุตสาหกรรมเหล็ก หรือ Turbo generator เป็นต้น

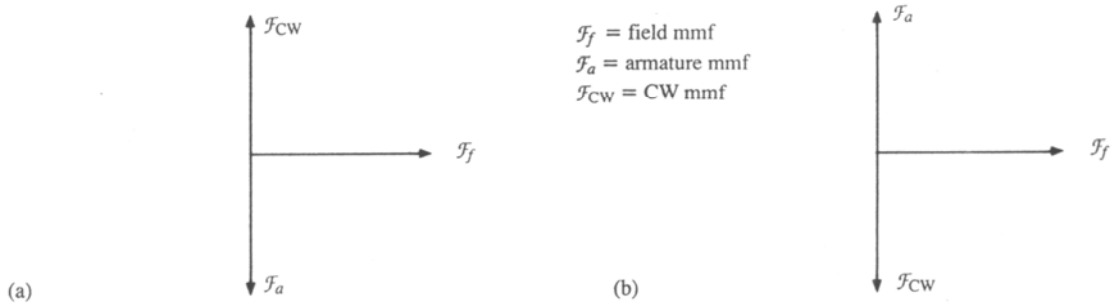
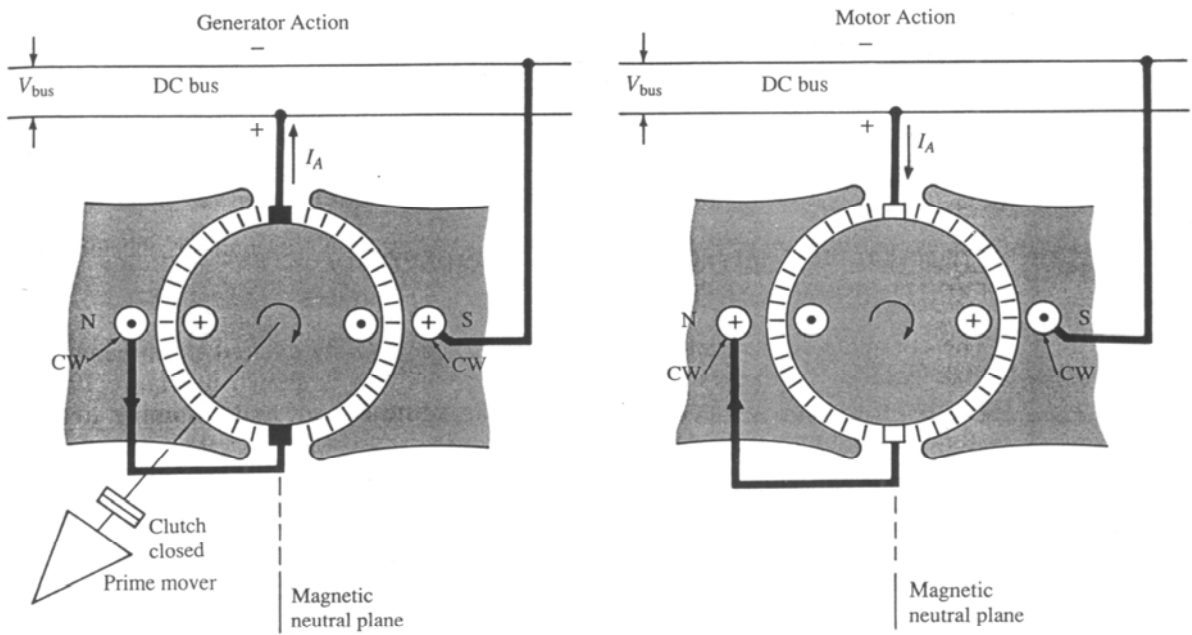
หน้าที่ของขดลวดชดเชย คือ จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กในจำนวนที่เพียงพอเพื่อไปหักล้างกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจาก armature reaction ให้หมดไป และทำให้เส้นแรงแม่เหล็กใน armature เกิดการสมดุล

การพันขดลวดชดเชยจะพันยึดลงใน slot ของขั้วเหล็ก และต่ออนุกรมกับขดลวด armature เพื่อที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลกลับทางในตัวนำ armature



จากรูปที่ 10-23 จะสังเกตเห็นว่า DC. machine ที่มีขดลวดชดเชย ก็ยังต้องการการติดตั้ง **interpole** ในการต้านแรงดันไฟฟ้า **emf** ของตัวมันเอง (self-induction) ในขดลวดภายใต้การกระทำของ **commutation**

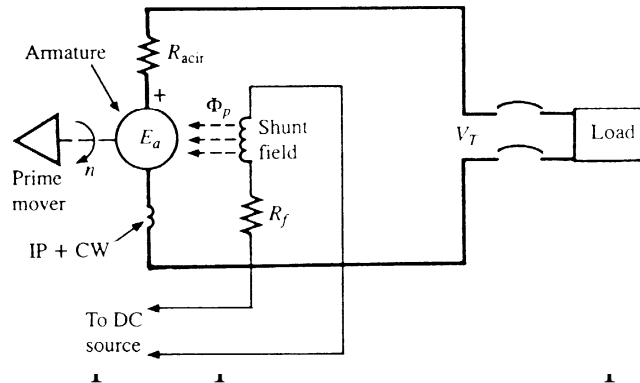
ถ้าไม่มีขดลวดชดเชย จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดการเลื่อนไปข้างหน้าหรือเลื่อนไปข้างหลังทุก ๆ ครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงของ **load** การเลื่อนในลักษณะนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า **emf** สถิตย์ใน ขดลวด **armature** ขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการเปลี่ยนแปลง **load** และขนาดของการเปลี่ยนแปลง **load** จะมีค่าสูงมาก และปะทะกับส่วนโค้งระหว่างที่ **commutator** ทำให้เกิดประกายไฟ (**Flash over**) รอบ ๆ ที่ **commutator** เกิดการลัดวงจรกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน **armature**



รูปที่ 10-24 Elementary diagram showing parallel arrangement of conductor and relative directions of current in armature and compensating winding for : (a) generators ; (b) motor

### 10-15 วงจรสมมูลของ Separately Excited Shunt Generator

วงจรไฟฟ้าสมมูลที่สมบูรณ์ของ separately excited shunt generator จะประกอบด้วย interpoles และขดลวดชดเชย (compensating winding) จะแสดงในรูปที่ 10-25



รูปที่ 10-25

separately excited shunt generator that includes interpoles and compensating winding

จากรูปที่ 10-25 เมื่อใช้กฎของ Kirchhoff 's voltage Law กับวงจรของ armature circuit จะได้

$$10.24 \quad E_a = I_a R_{acir} + V_T$$

โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานของวงจร armature circuit คือ

$$10.25 \quad R_{acir} = R_a + R_{IP} + R_{CW}$$

- เมื่อ :
- $R_{acir}$  = resistance of armature circuit ( $\Omega$ )
  - $R_a$  = resistance of armature winding ( $\Omega$ )
  - $R_{IP}$  = resistance of interpole winding ( $\Omega$ )
  - $R_{cw}$  = resistance of compensating winding ( $\Omega$ )
  - $E_a$  = voltage of armature (V)
  - $I_a$  = current in armature circuit (A)
  - $V_T$  = voltage of terminal (V)

**Example 10-5** A separately excited , compensated shunt generator, rated at 25 kw , 250 V , 1450 r/min has the following parameters :

$$R_a = 0.1053 \Omega \quad R_{IP} = 0.0306 \Omega \quad R_{cw} = 0.0141\Omega \quad R_f = 96.3 \Omega$$

Determine the induced emf.

**Solution** จาก equivalent circuit ที่แสดงในรูป 10-25 จะได้

$$I_a = P / V_T = 25 \text{ kW} / 250 = (25 \times 10^3 \text{ W}) / 250 = 100 \text{ A}$$

และ

$$R_{acir} = R_a + R_{IP} + R_{cw} = 0.1053 + 0.0306 + 0.0141 = 0.15 \Omega$$

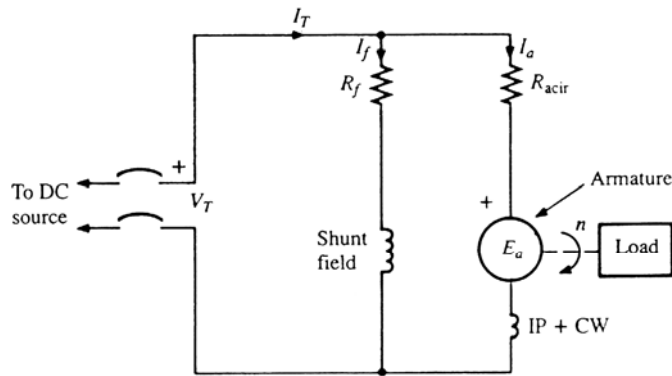
ดังนั้นค่า induced emf หาได้จากสมการ

$$E_a = V_T + I_a R_{acir} = 250 + (100 \times 0.15) = 265 \text{ V}$$

**Ans**

## 10-16 วงจรสมมูลของ Shunt Motor

วงจรไฟฟ้าสมมูลทั้งหมดของ shunt motor ที่ประกอบด้วย interpoles และ compensating winding จะแสดงในรูปที่ 10-26



รูปที่ 10-26 Complete equivalent circuit of a shunt motor that includes interpoles and compensating winding

จากรูป 10-26 เมื่อใช้กฎของ Kirchhoff 's voltage Law กับวงจรของ armature circuit จะได้

$$V_T = E_a + I_a R_{acir}$$

$$\boxed{10.26} \quad E_a = V_T - I_a R_{acir}$$

**Example 10-6** A 30 hp , 500 V , 850 r/min shunt motor draws a line current of 51.0 A when operating at rated condition. The motor parameter are

$$R_a = 0.602 \Omega \quad R_{IP} + R_{cw} = 0.201 \Omega \quad R_f = 408.5 \Omega$$

Determine the cemf

**Solution** จาก equivalent circuit ที่แสดงในรูป 10-26 จะได้

$$I_f = V_T / R_f = 500 / 408.5 = 1.224 \text{ A}$$

ดังนั้นค่ากระแส  $I_a$  หาได้จากสมการ

$$I_T = I_f + I_a \Rightarrow I_a = I_T - I_f$$

$$I_a = 51.0 - 1.224 = 49.78 \text{ A}$$

และค่าความต้านทานของวงจร armature circuit หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} R_{acir} &= R_a + R_{IP} + R_{cw} \\ &= 0.602 + 0.201 = 0.803 \Omega \end{aligned}$$

และค่า  $E_{cmf}$  หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} E_a &= V_T - I_a R_{acir} \\ &= 500 - (49.78 \times 0.803) \\ &= 460 \text{ V} \end{aligned}$$

**Ans**

-----

### 10-17 General Speed Equation for a DC Motor

The general speed equation ของ DC. motor สามารถหาได้โดยการแทนค่าสมการ Kirchhoff 's voltage ของวงจร armature circuit ลงในสมการเบื้องต้นของความเร็ว DC. motor

จากการศึกษาในหัวข้อ 10-7 Basic DC. motor เราสามารถหาความเร็วของ DC. motor ได้จากสมการ

$$n = E_a / \Phi_p k_G \quad \Phi_p \neq 0$$

เมื่อใช้กฎของ Kirchhoff 's voltage Law ของวงจร armature circuit ในสมการที่ 10.26

$E_a = V_T - I_a R_{acir}$  แทนค่าลงไปจะได้

$$n = (V_T - I_a R_{acir}) / \Phi_p k_G \quad \Phi_p \neq 0$$

r /min 10.27

- เมื่อ :
- $R_{acir}$  = armature-circuit resistance ( $\Omega$ )
  - $I_a$  = armature current (A)
  - $n$  = speed of DC. motor (r/min)
  - $\Phi_p$  = flux produced by shunt field winding (Wb)
  - $k_G$  = constant

จากสมการที่ 10.27 จะแสดงความเร็วของ motor โดยทั่ว ๆ ไป เมื่อค่า parameter ต่าง ๆ เปลี่ยนไป แรงบิดจะถูกสร้างให้เพียงพอเพื่อการเร่งความเร็วของ motor เท่าที่จำเป็น และอาจใช้ในการคำนวณหา steady state speed ได้ด้วย

### • Base Speed

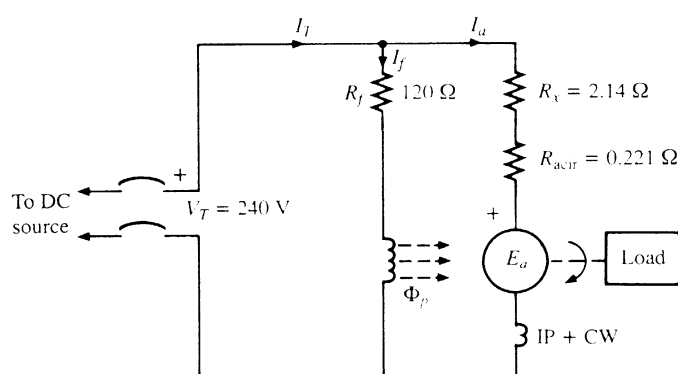
Base speed ของ DC. motor คือ ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่อยู่บน name plate ที่หาได้จาก rated voltage, rated shaft load และ rated operating temperature และไม่มีการเพิ่มของ resistance ที่ต่ออนุกรมกับ armature และ/หรือต่ออนุกรมกับ shunt field.

เมื่อเครื่องจักรกลถูกเร่งให้มีความเร็วสูงกว่า base speed ค่า developed torque จะต้องมีค่ามากกว่า load torque บนเพลลาบวกกับค่า windage และ friction torque เช่นเดียวกันถ้าต้องการลดความเร็ว ค่า develop torque จะต้องมีค่าน้อยกว่า load torque บวกกับ windage และ friction torque

จากสมการที่ 10.27 การเปลี่ยน developed torque จะต้องเปลี่ยนความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และ/หรือ armature current ( $I_a$ )

**Example 10-7** A 25 hp , 240 V shunt motor operating at 850 r/min draws a line current of 91 A when operating at rated condition. A 2.14  $\Omega$  resistor inserted in series with the armature causes the speed to drop to 634 r/min. The respective armature-circuit resistance and field circuit resistance are 0.221  $\Omega$  and 120  $\Omega$  Determine the new armature current.

### Solution





รูปที่ 10-26 Circuit diagram for Example 10-7

จากรูป circuit diagram จะได้

$$I_f = V_T / R_f = 240 / 120 = 2 \text{ A}$$

และกระแสไฟฟ้าที่ไหลใน armature ( $I_a$ ) คือ

$$I_a = I_T - I_f = 91 - 2 = 89 \text{ A}$$

เมื่อนำค่าความต้านทาน  $R_x$  ต่ออนุกรมกับ armature จะทำให้ความเร็วลดลงเหลือ 634 r/min. โดยที่กระแส shunt field current ( $I_f$ ) ไม่เปลี่ยนแปลง และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลใน armature ใหม่ หาได้จากสมการ  $n = (V_T - I_a R_{acir}) / \Phi_p k_G$  นั่นคือ

$$n_1 / n_2 = [V_T - I_a R_{acir}]_1 / [V_T - I_a R_{acir}]_2$$

$$n_1 [V_T - I_a R_{acir}]_2 = n_2 [V_T - I_a R_{acir}]_1$$

$$[V_T - I_a R_{acir}]_2 = n_2 / n_1 [V_T - I_a R_{acir}]_1$$

$R_{acir}]_1$

$$[- I_a R_{acir}]_2 = -V_T + n_2 / n_1 [V_T$$

$- I_a R_{acir}]_1$

เอาลบคูณตลอด ;  $[I_a R_{acir}]_2 = V_T - n_2 / n_1 [V_T - I_a$

$R_{acir}]_1$

$$I_{a2} = V_T - n_2 / n_1 [V_T$$

$- I_a R_{acir}]_1 / R_{acir} 2$

แต่  $R_{acir} 2 = R_{acir} 1 + R_x$  ดังนั้น

$$I_{a2} = V_T - n_2 / n_1 [V_T - I_a$$

$R_{acir}]_1 / (R_{acir} 1 + R_x)$

$$= 240 - (634 / 850) [240 - (89 \times 0.221)] / (0.221 + 2.14)$$

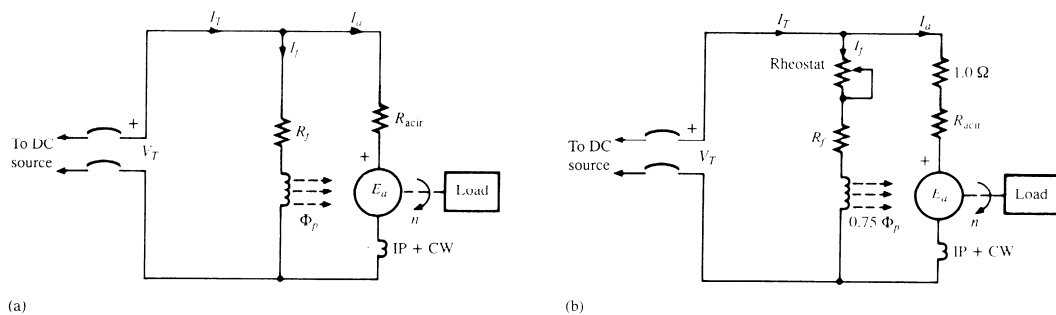
$$= 32.05 \text{ A}$$

**Ans**

**Example 10-8** A shunt motor rated at 10 hp, 240 V, 2500 r/min draws a line current 37.5 A when operating at rated conditions. The motor parameters are  $R_a = 0.213 \Omega$ ,  $R_{cw} = 0.065 \Omega$ ,  $R_{IP} = 0.092 \Omega$  and  $R_f = 160 \Omega$ . Determine :

- (a) The steady-state armature current if a rheostat in the shunt field circuit reduces the flux in the air gap to 75.0 percent of its rated value., a  $1.0 \Omega$  resistor is placed in series with the armature and the load torque on the shaft is reduced to 50 percent rated
- (b) the steady-state speed for the condition in (a)

**Solution** (a) The steady-state armature current if a rheostat in the shunt field circuit reduces the flux in the air gap to 75.0 percent of its rated value., a  $1.0 \Omega$  resistor is placed in series with the armature and the load torque on the shaft is reduced to 50 percent rated



รูปที่ 10-27 Circuit diagram for Example 10-8 : (a) rated condition ;  
(b) external resistor in series with the armature

จากรูป circuit diagram ที่แสดงในรูปที่ 10-27 (a) ที่ rated condition จะได้

$$I_f = V_T / R_f = 240 / 160 = 1.50 \text{ A}$$

และ 
$$I_a = I_T - I_f = 37.5 - 1.5 = 36 \text{ A}$$

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กใน air-gap ลดลง 75 % และมีความต้านทาน  $R_x = 1.0 \Omega$  ต่ออนุกรมกับ armature และ load torque on the shaft ลดลง 50 % จาก rated จะได้ circuit diagram ตามที่แสดงในรูปที่ 10-27 (b)

และสามารถหาค่า armature current ( $I_{a2}$ ) ได้จากสมการ  $T_D = \Phi_p I_a k_M$  นั่นคือ

$$T_1 / T_2 = [\Phi_p I_a]_1 / [\Phi_p I_a]_2 \Rightarrow I_{a2} = I_{a1} [(T_2 / T_1) \times (\Phi_{p1} / \Phi_{p2})]$$

$$I_{a2} = 36 [(0.50 T_1 / T_1) \times (\Phi_{p1} / 0.75 \Phi_{p1})] = \frac{24}{1} \text{ A}$$

**Ans**

(b) the steady-state speed for the condition in (a)

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กใน air gap ลดลง 75 % และมีค่าความต้านทาน ( $R_x$ ) ต่ออนุกรมกับ armature และ load torque ลดลง 50 % จาก rated จะได้

$$R_{acir 1} = R_a + R_{CW} + R_{IP} = 0.213 + 0.065 + 0.092 = 0.370 \Omega$$

$$R_{acir 2} = R_a + R_{CW} + R_{IP} + R_x = 0.213 + 0.065 + 0.092 + 1.0 = 1.370 \Omega$$

และจากสมการ  $n = (V_T - I_a R_{acir}) / \Phi_p k_G$  นั่นคือ

$$n_1 / n_2 = [V_T - I_a R_{acir}]_1 / [V_T - I_a R_{acir}]_2$$

$$n_2 = n_1 [(V_T - I_a R_{acir})_2 / \Phi_{p2} k_G] \times [\Phi_{p1} k_G / (V_T - I_a R_{acir})_1]$$

$$= 2500 [(240 - (24 \times 1.37)) / 0.75 \Phi_{p1}] \times [\Phi_{p1} / (240 - (36 \times 0.37))]$$

$$= \frac{3046}{1} \text{ r/min}$$

**Ans**

-----

## 10-18 Mechanical Power and Developed Torque ( $P_{mech}$ และ $T_D$ )

Mechanical power ที่สร้างโดย DC motor จะเท่ากับ power input ทั้งหมด ของ armature circuit ลบด้วย copper losses ใน armature circuit นั่นคือ

$$10.28 \quad \boxed{P_{mech}} = V_T I_a - I_a^2 R_{acir}$$

$$R_{acir} = R_a + R_{IP} + R_{cw}$$

เมื่อ :  $P_{mech}$  = mechanical power developed (W)

$V_T$  = applied voltage at terminal of motor (V)

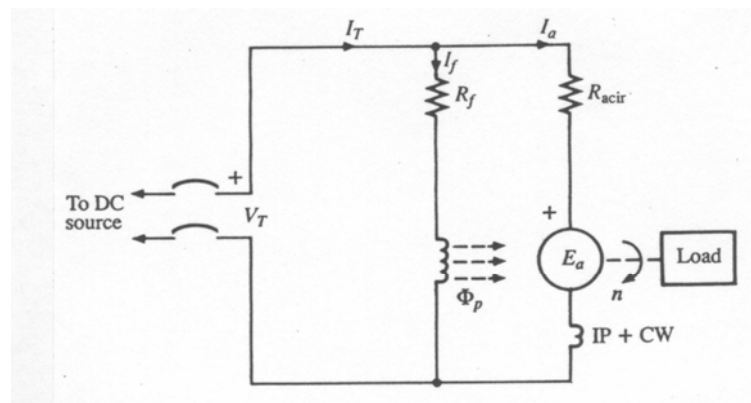
$I_a$  = armature current (A)

$R_{acir}$  = resistance of armature circuit ( $\Omega$ )

$R_a$  = resistance of armature winding ( $\Omega$ )

$R_{IP}$  = resistance of interpole winding ( $\Omega$ )

$R_{cw}$  = resistance of compensating winding ( $\Omega$ )



รูปที่ 10-28 Circuit for derivation of mechanical power equation

จากรูปที่ 10-28 จะแสดง circuit diagram ของ shunt motor เมื่อใช้กฎ Kirchhoff's voltage Law กับ armature circuit และตัด brush drop ทิ้งไป จะได้

$$V_T = E_a + I_a R_{acir} \quad 10.29$$

จากสมการที่ 10.29 เมื่อคูณด้วยกระแส armature ( $I_a$ ) ทั้ง 2 ด้าน จะได้

$$I_a V_T = I_a E_a + I_a^2 R_{acir} \quad 10.30$$

เมื่อจัดสมการใหม่จะได้

$$I_a E_a = I_a V_T - I_a^2 R_{acir} \quad 10.31$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ 10.31 กับสมการที่ 10.28 จะเห็นว่าสมการทางด้านขวามีค่าเท่ากัน ดังนั้นสมการทางด้านซ้ายจะต้องเท่ากันด้วย นั่นคือ

$$10.32 \quad \boxed{P_{mech} = I_a E_a} \quad (W)$$

จากสมการที่ 10.32 แสดงว่า งานทางกลจะเกิดขึ้นเมื่อจ่าย voltage เข้าไป จะทำให้เกิดกระแสใน armature ในทิศทางตรงข้ามกับ cemf ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการเคลื่อนที่ของวัตถุในความเร็วปกติ ที่แรงเสียดทานจะมีทิศทางตรงข้ามกับแรงที่ใส่เข้าไป งานทำให้วัตถุเคลื่อนที่ด้านกับแรงเสียดทาน

## • Motor Nameplate and NEMA

แผ่นป้ายแสดงข้อมูลของมอเตอร์จากโรงงานผู้ผลิต และตามมาตรฐาน NEMA (Notional Electrical Manufacturers Association) จะแสดงในรูปของแรงม้า (hp) , ความเร็วรอบ/นาที (r/min) และ Torque เป็น lb-ft

จากสมการพื้นฐานของ mechanical power ในรูปของแรงม้า (hp) คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง developed torque และ rotor speed หรือ shaft speed นั่นคือ

$$10.33 \quad \boxed{P_{mech} = T_D n / 5252} \quad (hp)$$

เมื่อ :  $T_D = \text{developed torque (lb-ft)}$   
 $n = \text{rotor speed หรือ shaft speed (r/min)}$

จากสมการที่ 10.32 เมื่อทำการแปลงค่า  $P_{\text{mech}} = I_a E_a \text{ (W)}$  ให้อยู่ในรูปของ  
 แรงม้า จะได้

$$P_{\text{mech}} = I_a E_a / 746 \text{ (hp)}$$

10.34

เมื่อแทนค่าจากสมการ 10.34 ลงในสมการที่ 10.33 เพื่อหาค่า developed torque จะได้

$$I_a E_a / 746 = T_D n / 5252$$

$$T_D = 5252 I_a E_a / 746 n$$

$$\boxed{T_D = 7.04 I_a E_a / n \text{ (lb-ft)}} \quad 10.35$$

จากสมการที่ 10.35 จะใช้กับเครื่องจักรกลขณะ **running** ถ้าเครื่องจักรกลหยุด หรือ  
**locked rotor** ความเร็ว  $n = 0$  และ  $\text{cemf} = 0$  นั่นคือ

$$T_D = 7.04 (0) / (0) = 0$$

แต่ถ้าต้องการหา **Torque** ขณะ **blocked rotor** ต้องหาจากสมการ

$$T_D \propto B_p I_a$$

**Example 10-9** A 40 hp, 240 V, 2500 r/min shunt motor operating at rated condition has a line current of 140 A. The armature-circuit resistance and field circuit resistance are 0.0873  $\Omega$  and 95.3  $\Omega$  respectively. Determine.

- (a) the mechanical power developed (b) torque  
 developed  
 (c) Shaft torque

**Solution** (a) the mechanical power developed ( $P_{\text{mech}}$ )

$$\text{จากสมการ } I_f = V_T / R_f = 240 / 95.3 =$$

2.52 A

และ 
$$I_a = I_T - I_f = 140 - 2.52 = 137.48 \text{ A}$$

จากกฎ Kirchhoff's voltage Law ที่จ่ายให้ armature circuit จะได้ว่า

$$E_a = V_T - I_a R_{acir} = 240 - (137.48 \times 0.0873) = 228 \text{ V}$$

จากสมการ 
$$P_{mech} = E_a I_a = (228)(137.48) = 31,345 \text{ W}$$

หรือ 
$$P_{mech} = E_a I_a / 746 = (228)(137.48) / 746 = 42 \text{ hp}$$
 **Ans**

(b) torque developed ( $T_D$ )

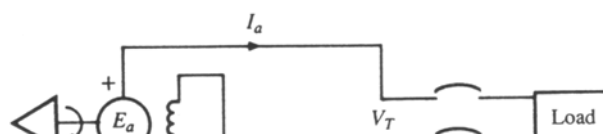
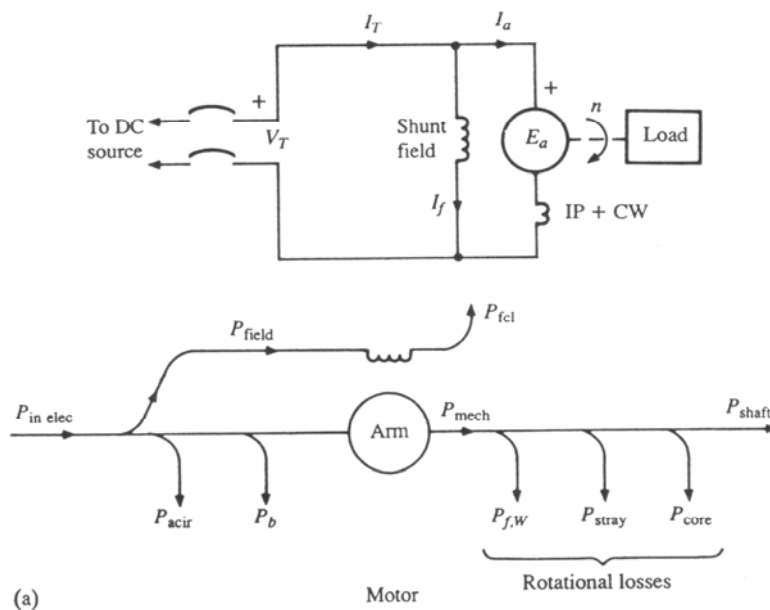
จากสมการ 
$$T_D = 7.04 I_a E_a / n = (7.04)(137.48)(228) / 2500 = 88.3 \text{ lb-ft}$$
 **Ans**

(c) Shaft torque

จากสมการ 
$$P_{mech} = T_D n / 5252 \Rightarrow T_D = P_{mech} 5252 / n$$

$$T_{shaft} = T_D = (42)(5252) / 2500 = 84 \text{ lb-ft}$$
 **Ans**

### 10-19 กำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพ



รูปที่ 10-29 Power-flow diagram : (a) shunt motor ; (b) separately excited shunt generator

จากรูปที่ 10-29 (a) และ (b) แสดง Power-flow diagram การไหลของ Power ใน DC motor (รูป a) และ DC generator (รูป b) ไม่ว่าเครื่องจักรกลจะเป็น DC motor หรือ DC generator ผลรวมของ Power losses ทั้งหมด คือ

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{acir}} + P_b + P_{\text{core}} + P_{\text{fcl}} + P_{\text{f.w}} + P_{\text{stray}} \quad \text{10.36}$$

$$P_b = V_b I_a$$



- เมื่อ :
- $P_{\text{loss}}$  = total power loss (W)
  - $P_{\text{acir}}$  = armature – circuit loss (W)
  - $P_{\text{b}}$  = brush – contact loss (W)
  - $P_{\text{f,w}}$  = friction and windage loss (W)
  - $P_{\text{stray}}$  = stray load loss (W)
  - $P_{\text{core}}$  = core loss (W)
  - $P_{\text{fcl}}$  = field – circuit loss (W)

▣ Core loss ( $P_{\text{core}}$ ) คือ ผลรวมของ hysteresis และ eddy current loss ใน armature และแท่งเหล็ก

▣ Stray-load Loss คือ loss ของขดลวดภายใต้ commutation และ loss ที่เกิดขึ้นจาก eddy current loss ในขดลวดทองแดง ซึ่งไม่ได้รวมอยู่ในการหาค่า  $I_a^2 R_a$  ของ armature

▣ Stray-load loss จะมีค่าประมาณ 1% ของ output power

### ● Electrical Losses

การสูญเสียกำลังงานของไฟฟ้า คือ การสูญเสียในรูปของความร้อนในขดลวด ( $P = I^2 R$ ) ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสียในขดลวด field-circuit loss ( $P_f = I_f^2 R_f$ ) , การสูญเสียกำลังความร้อนในวงจร armature circuit loss [ $P_{\text{acir}} = I_a^2 (R_a + R_{\text{IP}} + R_{\text{cw}})$ ] และการสูญเสียในแปรงถ่าน ( $P_b = V_b I_b$ ) ดังนั้น การสูญเสียในรูปของกำลังไฟฟ้า คือ

$\text{Total electrical losses} = P_f + P_{\text{acir}} + P_b$	(W)      10.37
--	----------------

### ● Rotational Losses ( $P_{\text{rotational}}$ )

การสูญเสียที่เกิดจากการหมุนของ motor หรือ generator เป็นการสูญเสียทางกลที่ประกอบด้วย การสูญเสียจากแรงเสียดทาน (friction loss) ที่เกิดจากแรงเสียดทานของ bearing , การสูญเสียจากระบายอากาศ ที่เกิดจากพัดลมระบายอากาศบนเพลา (windage loss) , การสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) ที่เกิดจาก

hysteresis loss และ eddy current loss และการสูญเสีย stray (stray-load loss) เป็นการสูญเสียเล็ก ๆ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับภาระเปลี่ยนแปลงของ load

	$\text{Rotational losses} = P_{f,w} + P_{\text{stray}} + P_{\text{core}}$	
หรือ	$P_{\text{rotational}} = P_{\text{mech}} - P_{\text{shaft}}$	(W) ——— 10.38

- **Brush-Contact Drop**

Voltage ที่ตกคร่อมแปรงถ่าน เรียกว่า “brush-contact drop” หรือ “brush drop” ซึ่งมีขนาดเล็กมาก โดยสมมุติว่ามันจะมีค่าคงที่สำหรับ load ทั้งหมด

ค่า voltage ที่ตกคร่อมแปรงถ่าน จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการทำแปรงถ่าน โดยมีค่าประมาณดังนี้

- **0.5 V** for metal-graphite brushes
- **2.0 V** for electrographitic and graphite brushes

- **Efficiency**

ประสิทธิภาพทั้งหมดของ DC machine หาได้จากสมการ

$\eta = (P_{\text{out}} / P_{\text{in}}) \times 100 = P_{\text{out}} / (P_{\text{out}} + P_{\text{losses}}) \times 100$	——— 10.39
---	-----------

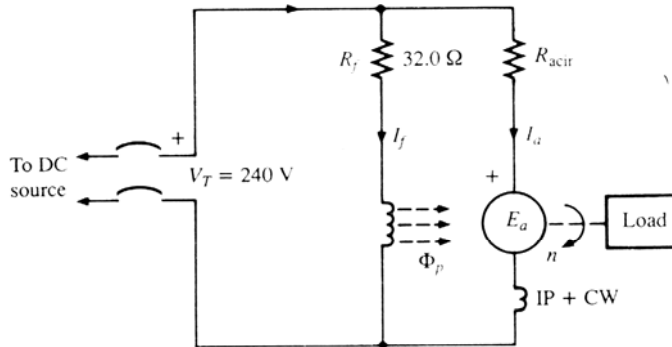
**Example 10-10** A 150 hp, 240V , 650 r/min shunt motor draws 420 A when operating at a reduced load of 124 hp. The brushes are graphite and the motor parameters are :  $R_a = 0.00872 \Omega$  ,  $R_{IP} + R_{cw} = 0.0038 \Omega$  ,  $R_f = 32.0 \Omega$  Determine:

(a) electrical losses

(b) rotational losses

(c) efficiency

**Solution**



รูปที่ 10-30 Circuit for Example 10-10

(a) electrical losses ( $P_{elec}$ )

จากรูปวงจรของ shunt motor จะได้

$$I_f = V_T / R_f = 240 / 32 = 7.5 \text{ A}$$

$$I_a = I_T - I_f = 420 - 7.5 = 412.5 \text{ A}$$

ดังนั้น  $P_f = I_f^2 R_f = (7.5)^2 (32) = 1800 \text{ W}$

$$P_{acir} = I_a^2 (R_a + R_{IP} + R_{CW}) = (412.5)^2 (0.00872 + 0.0038) = 2130.36 \text{ W}$$

โจทย์กำหนดแปรงถ่านเป็นแบบ graphite ดังนั้น Voltage drop ในแปรงถ่าน = 2.0 V นั่นคือ

$$P_b = V_b I_a = (2.0) (412.5) = 825 \text{ W}$$

ดังนั้น Total electrical losses =  $P_f + P_{acir} + P_b$

$$\begin{aligned} (P_{elec}) &= 1800 + 2130.36 + 825 \\ &= 4755.4 \text{ W} \end{aligned}$$

**Ans**

(b) rotational losses ( $P_{rotational}$ )

$$P_{rotational} = P_{mech} - P_{shaft}$$

หา  $P_{mech}$  จากสมการ  $V_T = E_a + I_a R_{acir} + V_b \Rightarrow E_a = V_T - I_a R_{acir} - V_b$

$$\begin{aligned} E_a &= 240 - 412.5 (0.00872 + 0.0038) - 2 \\ &= 232.835 \text{ V} \end{aligned}$$

ดังนั้น  $P_{\text{mech}} = E_a I_a = (232.835)(412.5) = 96,044 \text{ W}$

หา  $P_{\text{shaft}}$  โจทย์กำหนดขนาดของมอเตอร์ 150 hp แต่ทำงานที่ reduced load = 124 hp นั่นคือ

$$P_{\text{shaft}} = (124 \text{ hp}) \times 746 \text{ W} = 92,504 \text{ W}$$

ดังนั้น  $P_{\text{rotational}} = P_{\text{mech}} - P_{\text{shaf}} = 96,044 - 92,504$

$$P_{\text{rotational}} = 3,540 \text{ W}$$

**Ans**

(c) efficiency

จากสมการ  $\eta = P_{\text{out}} / P_{\text{in}} \times 100 = P_{\text{shaft}} / V_T I_T \times 100$

$$= 92,504 / (240)(420) \times 100 = 91.8 \%$$

**Ans**

หรือจากสมการ  $\eta = P_{\text{out}} / (P_{\text{out}} + P_{\text{loss}}) \times 100$

$$= P_{\text{shaft}} / (P_{\text{shaft}} + (P_{\text{elec}} + P_{\text{rotational}})) \times 100$$

$$= 92,504 / (92,504 + 4,755.4 + 3,540) \times 100 = 91.8 \%$$

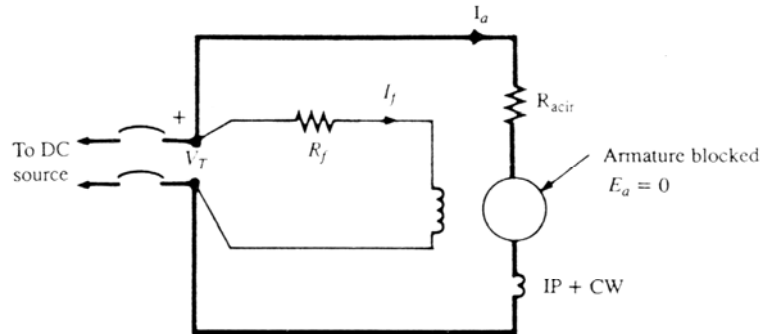
**Ans**

-----

## 10-20 การสตาร์ท DC Motor

เมื่อจ่าย voltage ให้กับ motor จะเกิดผลรวมแรงเฉื่อยของ motor และ shaft load เพื่อป้องกันไม่ให้เพลลาหมุนทันที ผลกระทบนี้จะเหมือนกับตัว rotor ถูก blocked ดังนั้น

ค่ากระแสและ developed torque ที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขนี้ จะเรียกว่าค่า “blocked – rotor” หรือ “locked – rotor”



รูปที่ 10-

จากรูปที่ 10-31 กระแส  $I_a$  ที่ถูกดึงโดย armature คือ

$$10.40 \quad I_a = (V_T - E_a) / R_{acir}$$

ขณะที่เกิดการ locked – rotor ทำให้ rotor ไม่หมุน ดังนั้นความเร็วของ rotor เป็นศูนย์ เมื่อ rotor ไม่หมุน จะไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าต้านกับ cemf ดังนั้น cemf ( $E_a = 0$ ) และ กระแสที่ locked - rotor คือ

$$10.41 \quad I_{a,lr} = (V_T - 0) / R_{acir} = V_T / R_{acir}$$

เมื่อ :  $I_{a,lr}$  = armature current at locked rotor (A)

การลดการสูญเสีย copper losses ให้เหลือน้อยที่สุด และการเพิ่มประสิทธิภาพ จะต้องพัน armature ด้วยลวดตัวนำที่มีหน้าตัดขนาดใหญ่ และการป้องกันกระแสไหลใน armature มากเกินไป ขณะเริ่ม starting DC motor จะต้องนำค่าความต้านทานภายนอกมาต่ออนุกรมกับ armature

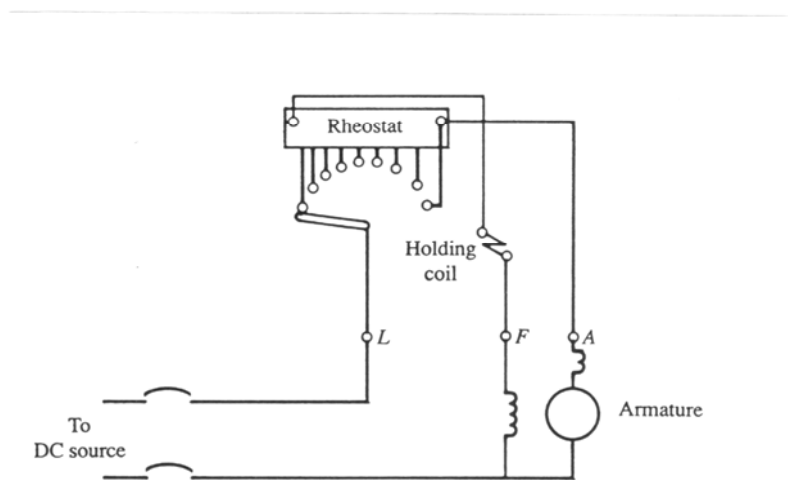
ถ้ากระแสไหลใน armature มากเกินไป จะเป็นผลทำให้เกิดประกายไฟจากการ arcing ที่บริเวณผิวหน้าของแปรงถ่านกับ commutator และเกิดการกระแทกในทันทีทันใดต่ออุปกรณ์

ขับเคลื่อน โดยเกิดจาก high starting torque ซึ่งอาจจะทำความเสียหายทางกลต่ออุปกรณ์ขับเคลื่อน

### • Manual Starter

DC motor ที่มีขนาดเป็นเศษส่วนแรงม้า เช่น ขนาด 1/2 hp ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าความต้านทานภายนอกมาช่วยในการ starting แต่ถ้าเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่จะต้องใช้ความต้านทานภายนอกมาต่ออนุกรมกับ armature ช่วยในการ starting เพื่อที่จะลดกระแสใน armature circuit โดย starting resistance จะทำงานจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ cemf ( $E_a$ ) ถูกสร้างมาเพียงพอที่จะลดกระแสใน armature ได้อย่างปลอดภัย ค่าของ starting resistance ทั่วไปที่ใช้ในการจำกัดกระแสจะมีค่าประมาณ 150 – 250 % ของ rated value และขึ้นอยู่กับ starting torque ที่ต้องการ

โดยปกติ shunt field จะต่อคร่อมกับ full-line voltage เมื่อต้องการ starting เพื่อที่มีกระแส armature เพียงเล็กน้อยไปสร้างแรงบิดที่ต้องการ



รูปที่

ed DC motor

starter

จากรูปที่ 10-32 แสดงชนิดของ rheostat ของ manual starter ต่อกับ shunt motor โดยจุด L จะถูกต่อกับแหล่งจ่ายไฟ จุด F จะถูกต่อกับขด shunt field และจุด A จะถูกต่อกับ armature

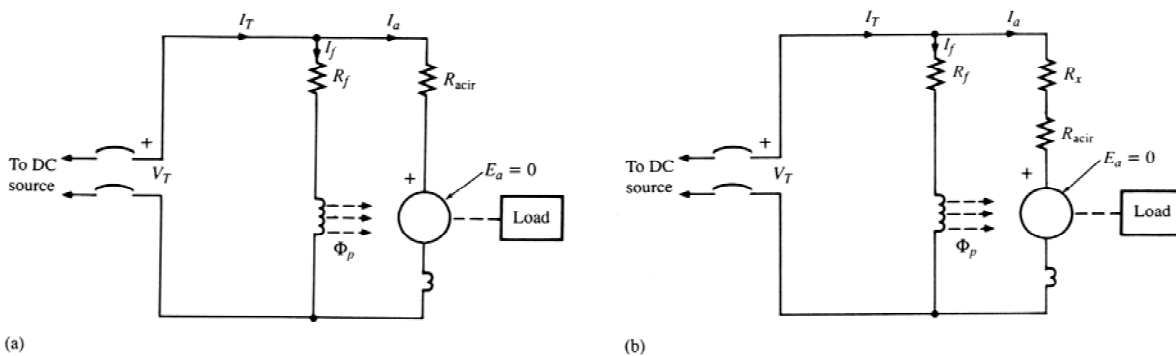
เมื่อมอเตอร์อยู่ในสถานะอยู่นิ่ง contact จะอยู่ในตำแหน่ง OFF เมื่อวงจร closed คับ บังคับจะถูกเลื่อนไปที่ contact 1 ในตำแหน่งนี้ rheostat จะต่ออนุกรมกับ armature และ ขณะที่เร่งเครื่องคับบังคับจะเลื่อนไปอย่างช้า ๆ จนถึงตำแหน่ง Run ในขณะที่ contact เปลี่ยนไปที่ละ step กระแส armature จะตกลง และความเร็วรอบจะมีค่าสูงขึ้น

The holding coil จะยึดติดกับ rheostat ในตำแหน่ง run หลังจาก rheostat ที่ใช้ในการ starting ถูกตัดออกจากวงจร แม่เหล็กที่ทำหน้าที่สร้างแรงดึงดูดใน holding coil จะถูกเรียกว่า “ตัวป้องกันขณะไม่มีแรงดัน ไฟฟ้า” คือเมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้าที่ coil จะไม่มีแรงดูด และจะทำให้ spring ดึงดันบังคับให้มาอยู่ในตำแหน่ง OFF เหมือนเดิม

**Example 10-11** A 15 hp , 230 V , 1750 r/min shunt motor with a compensating winding draws 56.2 A when operating at rated condition. The motor parameter are :  $R_{acir} = 0.280 \Omega$  ,  $R_f = 137 \Omega$  Determine :

- (a) rated torque
- (b) armature current at locked rotor if no starting resistance is used.
- (c) the external resistance required in the armature circuit that would limit the current and develop 200 percent rated torque when starting
- (d) Assuming the system voltage drops to 215 V. determine the locked – rotor torque using the external resistor in (c)

**Solution**



รูปที่ 10-33 Circuit for Example 10-11 (a) without starting resistance; (b) with starting resistance

(a) rated torque ( $T_{rated}$ ) เมื่อทำงานที่ rated condition

จากสมการ  $P = T n / 5252 \Rightarrow T_{rated} = P \times 5252 / n$

$T_{rated} = (15) (5252) / 1750 = 45.02 \text{ lb-ft} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{Ans}$

(b) armature current at locked rotor if no starting resistance is used. ( $I_{a,lr}$ )

ถ้าไม่มี starting resistance :

จากสมการ 
$$I_{a,lr} = (V_T - E_a) / R_{acir} = (230 - 0) / 0.280$$
$$= 821.43 \text{ A} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad \text{Ans}$$

(c) the external resistance required in the armature circuit that would limit the current and develop 200 percent rated torque when starting ( $R_x$ )

จากรูปวงจร motor รูป 10 - 33 (a) เมื่อไม่มี starting resistance ต่อในวงจร จะได้

$$I_f = V_T / R_f = 230 / 137 = 1.68 \text{ A}$$

และ 
$$I_{a1} = I_T - I_f = 56.2 - 1.68 = 54.52 \text{ A}$$

จากวงจร motor รูป 10 - 33 (b) เมื่อมี starting resistance ต่อในวงจร สมมติให้ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กคงที่ และ developed torque = 200 % rated torque ดังนั้นจากสมการ

$$T_D = B_p I_a K_M \Rightarrow T_D = I_a \quad (\text{เมื่อ } B_p \text{ และ } K_M \text{ คงที่})$$

และ 
$$T_{D2} = 200 \% T_{D1} = 2 T_{D1}$$

ดังนั้น 
$$T_{D1} / T_{D2} = I_{a1} / I_{a2} \Rightarrow I_{a2} = (T_{D2} / T_{D1}) \times I_{a1}$$

$$I_{a2} = (2T_{D1} / T_{D1}) \times (54.52) = 109.04 \text{ A}$$

จากกฎ Kirchhoff's voltage Law ของ armature circuit ในรูป 10 - 33 (b) เมื่อมี external resistance ต่ออนุกรมกับ armature จะได้

$$V_T = E_a + I_a (R_{acir} + R_x) \Rightarrow R_x = [(V_T - E_a) / I_{a2}] - R_{acir}$$

$$R_x = [(230 - 0) / 109.04] - 0.28 = 1.83 \ \Omega \quad \underline{\hspace{10em}} \quad \text{Ans}$$

(d) Assuming the system voltage drops to 215 V. determine the locked - rotor torque using the external resistor in (c)



เมื่อมี external resistance ต่อในวงจรและ voltage ระบบลดลงเหลือ 215 V  
ดังนั้น

$$I_{f,lr} = V_T / R_f = 215 / 137 = 1.57 \text{ A}$$

และ

$$I_{a,lr} = (V_T - E_a) / (R_{acir} + R_x)$$

$$= (215 - 0) / (0.28 + 1.83) = 101.9 \text{ A}$$

เมื่อกระแส shunt field current และ armature current ขณะ locked - rotor เปลี่ยนแปลง ดังนั้นค่า developed torque ขณะ locked - rotor จะเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแส คือ

$$T_D \propto I_f I_a$$

นั่นคือ  $T_{D1} / T_{D2} = (I_f I_a)_1 / (I_f I_a)_2 \Rightarrow T_{D2} = [(I_f I_a)_2 / (I_f I_a)_1] \times T_{D1}$

$$I_{f2} = I_{f,lr} \quad I_{a2} = I_{a,lr} \quad T_{D1} = T_{rated}$$

$$T_{D2} = [(1.57 \times 101.9) / (1.68 \times 54.52)] \times 45.02$$

$$= 78.63 \text{ lb-ft}$$

Ans

### SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING

$$E_{av} = (P \cdot n \cdot N_a \Phi_p / 30) \quad (V)$$

$$E_{av} = n \Phi_p k_G \quad (V)$$

$$\Phi_p = N_f I_f / R \quad (Wb)$$

$$E_{av} = n (N_f I_f / R) k_G \quad (V)$$

$$I_f = E_{batt} / (R_f + R_{theo}) \quad (A)$$

$$VR = (V_{nl} - V_{rated}) / V_{rated} \times 100 \quad (\%)$$

$$n = E_a / \Phi_p k_G \Big|_{\Phi_p \neq 0} \quad (r/min)$$

$$T_D = B_p I_a k_M \quad (lb-ft)$$

$$SR = (n_{nl} - n_{rated}) / n_{rated} \times 100 \quad (\%)$$

$$E_a = I_a R_{acir} + V_T \quad (V)$$

$$R_{acir} = R_a + R_{IP} + R_{cw} \quad (\Omega)$$

$$E_a = V_T - I_a R_{acir} \quad (V)$$

$$n = (V_T - I_a R_{acir}) / \Phi_p k_G \Big|_{\Phi_p \neq 0} \quad (r/min)$$

$$P_{mech} = I_a E_a \quad (W)$$

$$T_D = 7.04 I_a E_a / n \quad (lb-ft)$$

$$P_{mech} = T_D n / 5252 \quad (hp)$$

$$P_{loss} = P_{acir} + P_b + P_{core} + P_{fcl} + P_{f,w} + P_{stray} \quad (W)$$

$$P_b = V_b I_a \quad (W)$$

$$\text{Total electrical losses} = P_f + P_{acir} + P_b \quad (W)$$

$$P_{rotational} = P_{mech} - P_{shaft} \quad (W)$$

$$\text{Rotational losses} = P_{f,w} + P_{stray} + P_{core} \quad (W)$$

$$\eta = (P_{out} / P_{in}) \times 100 = P_{out} / (P_{out} + P_{losses}) \times 100 \quad (\%)$$

$$I_a = (V_T - E_a) / R_{acir} \quad (A)$$

$$I_{a,lr} = (V_T - 0) / R_{acir} = V_T / R_{acir} \quad (A)$$

---

## บทที่ 11

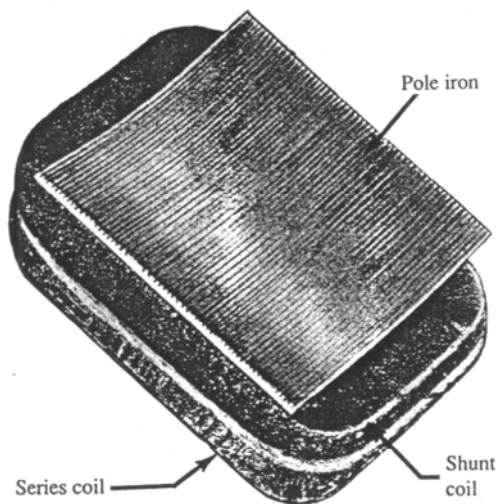
### คุณลักษณะเฉพาะและการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

#### 11-1 บทนำ

DC motor กับ DC generator ต่างกันที่ input power โดยของ motor จะมี input power เป็นพลังงานไฟฟ้า และ output power เป็นพลังงานกล สำหรับ generator input power เป็นพลังงานกล และ Output power เป็นพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีทิศทางของกระแสไฟฟ้าต่างกันด้วย คือ motor รับกระแสไฟฟ้าจากภายนอก ส่วน generator จ่ายกระแสไฟฟ้าออกไปภายนอก

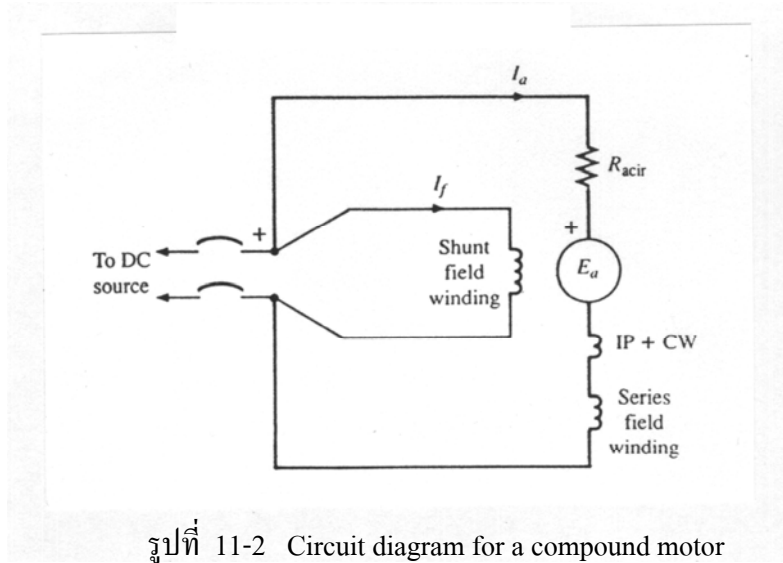
#### 11-2 Compound Motor

DC motor แบบ compound motor จะมีขดลวดเพิ่มขึ้นอีกจำนวน 1 ขด คือ ขดลวด “Series field” ที่พันด้วยลวดทองแดงขนาดใหญ่ และวางอยู่บนขดลวด Shunt field ตามที่แสดงในรูปที่ 11-1



รูปที่ 11-1 Pole iron with shunt and series coils

ขดลวด series field จะต่ออนุกรมกับ armature ตามที่แสดงใน circuit diagram รูปที่ 11-2 โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf จะเป็นสัดส่วนกับ armature current ( $I_a$ ) และอยู่ในทิศทางเดียวกับ mmf ของ shunt field



รูปที่ 11-2 Circuit diagram for a compound motor

ขณะ motor ชนิด compound motor อยู่ในสภาวะไม่มี load (no load) กระแสไฟฟ้า series field จะมีค่าต่ำ แต่กระแสไฟฟ้าที่ shunt field จะมีค่ามาก จึงเกิดการกระตุ้นอย่างเต็มที่ (full excitation) ดังนั้นขณะที่ไม่มี load นี้ compound motor จะทำงานคล้ายกับ shunt motor แต่จะไม่ทำให้ความเร็วรอบสูงจนเป็นอันตราย เพราะมีอำนาจสนามแม่เหล็กของ shunt field ร่วมอยู่ด้วย

- **Stabilized-Shunt Motor**

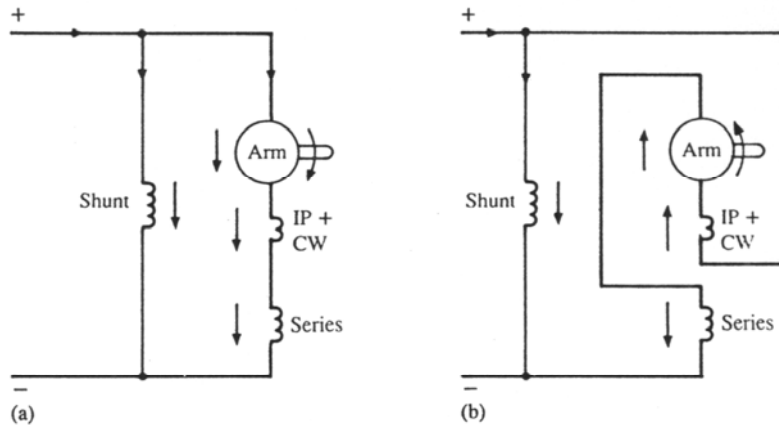
Compound motor ที่มีขดลวด series field จะถูกออกแบบให้สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf เพียงพอที่จะหักล้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf ที่เกิดจาก armature reaction และจะสร้าง speed droop เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ดังนั้น compound motor บางที่จะเรียกว่า “stabilized shunt motor”

ขดลวด series field ของเครื่องจักรกลโดยทั่วไปจะมีจำนวนรอบประมาณ  $\frac{1}{2}$  -  $1\frac{1}{2}$  รอบต่อขั้ว และขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยปกติจะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กประมาณ 3-10% ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf ทั้งหมดที่ rated load

Stabilized-shunt motor จะใช้งานกับอุปกรณ์ที่ต้องการความเร็วคงที่ และมีแรงบิดเริ่มต้นพอประมาณ

### 11-3 การกลับทิศทางการหมุนของ Compound Motor

การกลับทิศทางการหมุนของ compound motor หรือ stabilized-shunt motor ทำได้โดยการกลับทิศทางของกระแสใน armature , interpoles และ compensating winding ตามที่แสดงในรูปที่ 11-3



รูปที่ 11-3 Reversing the direction of rotation of a compound motor

by reversing the current in the armature , interpoles and compensating winding

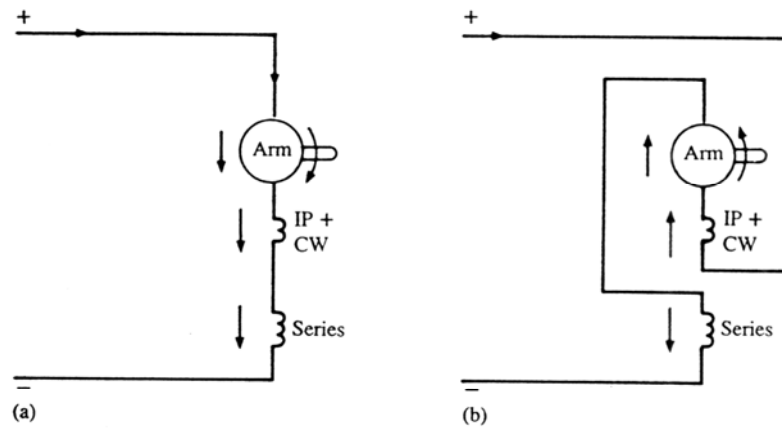
จากรูปที่ 11-3 ถ้ากลับทิศทางของกระแสใน armature เพียงอย่างเดียว โดยไม่กลับทิศทางของกระแสใน interpole และ compensating winding จะทำให้เกิดประกายไฟ arcing ที่บริเวณผิวหน้าของ commutator และแปรงถ่าน หรือกลับทิศทางของกระแสใน series field และ shunt field ทั้ง 2 ขดพร้อมกัน ถ้ากลับทิศทางของกระแสใน series-field หรือ shunt field เพียงขดเดียว จะเป็นผลทำให้เกิด differential connection

### 11-4 Series Motor

Series motor จะมีขดลวด series field ขนาดใหญ่ต่ออนุกรมกับ armature แต่ไม่มีขดลวด shunt field ที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ด้วยเหตุนี้จะทำให้ series motor เร่งไปจนถึงความเร็วที่ได้รับความปลอดภัยได้ ถ้า load ที่เพลาถูกปลดออก การปลด load ออกจาก series motor จะทำให้ developed torque ( $T_D$ ) มีค่ามากกว่า load torque ( $T_{load}$ ) =  $T_D > T_{load}$  ผลก็คือทำให้ความเร็วของ motor เพิ่มขึ้น ขณะที่ cemf เพิ่มขึ้น จะทำให้กระแสใน armature ( $I_a$ ) ลดลง เนื่องจากขดลวด series field ต่ออนุกรมกับ armature เมื่อกระแส  $I_a$  ลดลง จะทำให้กระแสที่ series field ลดลงด้วย ผลก็คือสนามแม่เหล็กของ series field ลดลงด้วย

Series motor จะต่อโดยตรงกับ load โดยใช้ solid coupling หรือ gear และจะต่อกับ load ที่มีค่าต่ำ เพื่อจำกัดความเร็วให้ motor หมุนได้อย่างปลอดภัย จึงไม่นิยมใช้กับ load ประเภทสายพาน

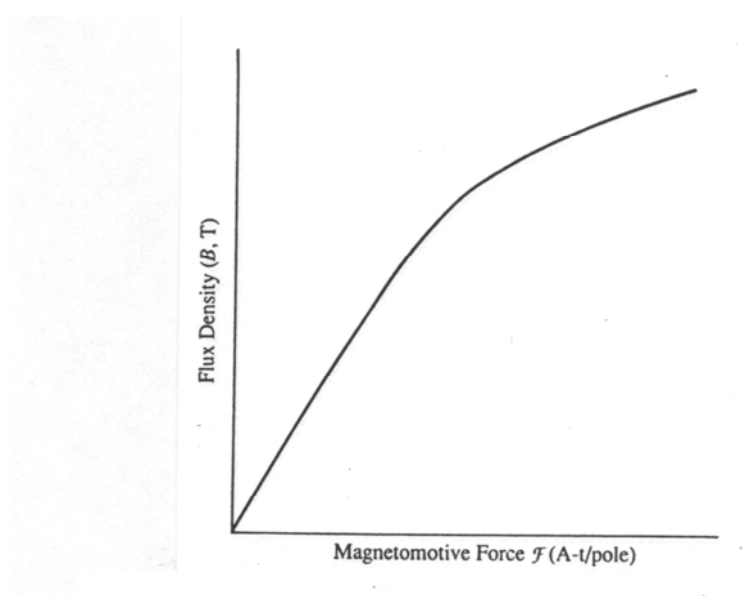
การกลับทิศทางการหมุนของ series motor ทำได้โดยการกลับกระแสใน armature , interpoles และ compensating winding เช่นเดียวกับแบบ compound motor ตามที่แสดงในรูปที่ 11-4 (b) หรือกลับทิศทางการของกระแสในขดลวด series field



รูปที่ 11-4 Reversing the direction of rotation of a series motor by reversing the current in the armature , interpoles and compensating winding

### 11-5 ผลกระทบต่อการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กบน DC Motor

ผลกระทบต่อการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (magnetic saturation) เส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้ว (pole flux) จะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ applied mmf การคำนวณความถูกต้องของแรงบิดและความเร็วมอเตอร์สำหรับการทำงานตามที่ต้องการ จะต้องใช้ Magnetization curve ตามที่แสดงในรูปที่ 11-5



รูปที่ 11-5 Typical magnetization curve for a DC motor

ผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf หาได้จาก pole flux ซึ่งจะประกอบด้วยขดลวด shunt field, series field และการเกิด armature reaction ขณะทำงาน นั่นคือ

$$F_{net} = F_f + F_s - F_d \quad 11.1$$

- เมื่อ :
- $F_{net}$  = net mmf (A-t/pole)
  - $F_f$  =  $N_f I_f$  = shunt field mmf (A-t/pole)
  - $F_s$  =  $N_s I_a$  = series field mmf (A-t/pole)
  - $F_d$  = equivalent demagnetizing mmf due to armature reaction (A-t/pole)

$F_d$  : สมมติว่าเป็นสัดส่วนกับกระแส armature current ( $I_a$ ) แต่ถ้าใช้ขดลวด compensating winding แล้วค่า  $F_d = 0$

จากการศึกษาในบทที่ 10 ค่า developed torque และความเร็วยของ DC motor หาได้จากสมการ

$$T_D = B_p I_a k_M$$

และ 
$$n = (V_T - I_a R_{acir}) / \Phi_p k_G$$

และ 
$$R_{acir} = R_a + R_{IP} + R_{CW} + R_S$$

- เมื่อ :
- $R_{acir}$  = resistance of armature circuit ( $\Omega$ )
  - $R_a$  = resistance of armature winding ( $\Omega$ )
  - $R_{IP}$  = resistance of interpole winding ( $\Omega$ )
  - $R_{CW}$  = resistance of compensating winding ( $\Omega$ )
  - $R_S$  = resistance of series field winding ( $\Omega$ )
  - $B_p$  = air-gap flux density (Tesla : T)
  - $\Phi_p$  = pole flux (Wb)

ค่าคงที่  $k_M$  และ  $k_G$  ขึ้นอยู่กับการออกแบบของเครื่องจักรกล , ชนิดของ armature winding และหน่วยที่ใช้



การแสดง pole flux ( $\Phi_p$ ) และ flux density ( $B_p$ ) ใน terms ของ reluctance ( $R$ ) และค่า net mmf ( $F_{net}$ ) ที่กระทำไปตามแกนของขั้ว

$$\Phi_p = F_{net} / R \quad \text{_____ 11.2}$$

และ

$$B_p = \Phi_p / A = F_{net} / A \quad \text{_____ 11.3}$$

เมื่อ :  $R$  = reluctance of magnetic circuit ( $A - t / Wb$ )

**Example 11-1** A 240 V , 40 hp , 1150 r/min stabilized-shunt motor operating at rated condition , has a efficiency at rated load of 90.2 percent. The motor parameters are :

	Armature	Interpole	Series	Shunt
Resistance ( $\Omega$ )	0.0680	0.0198	0.00911	99.5
Turns/pole	-	-	1/2	1231

The circuit diagram and magnetization curve for the motor are show in Figure 11-6 Determine :

- the armature current when operating at rated condition;
- the resistance and power rating of an external resistance required in series with the shunt field circuit in order to operate at 125 percent rated speed. Assume the shaft load is adjusted to a value the limits the armature current to 115 percent of rated current

**Solution** a) the armature current when operating at rated condition ( $I_a$ )

เมื่อทำงานที่ rated load

$$\text{จากสมการ } \eta = P_{out} / P_{in} \Rightarrow P_{in} = P_{out} / \eta$$

$$P_{in} = (40 \text{ hp} \times 746\text{W}) / (90.2 / 100) = 33082 \text{ W}$$

$$\text{จากสมการ } P_{in} = V_T I_T \Rightarrow I_T = P_{in} / V_T = 33082 / 240 = 137.84 \text{ A}$$

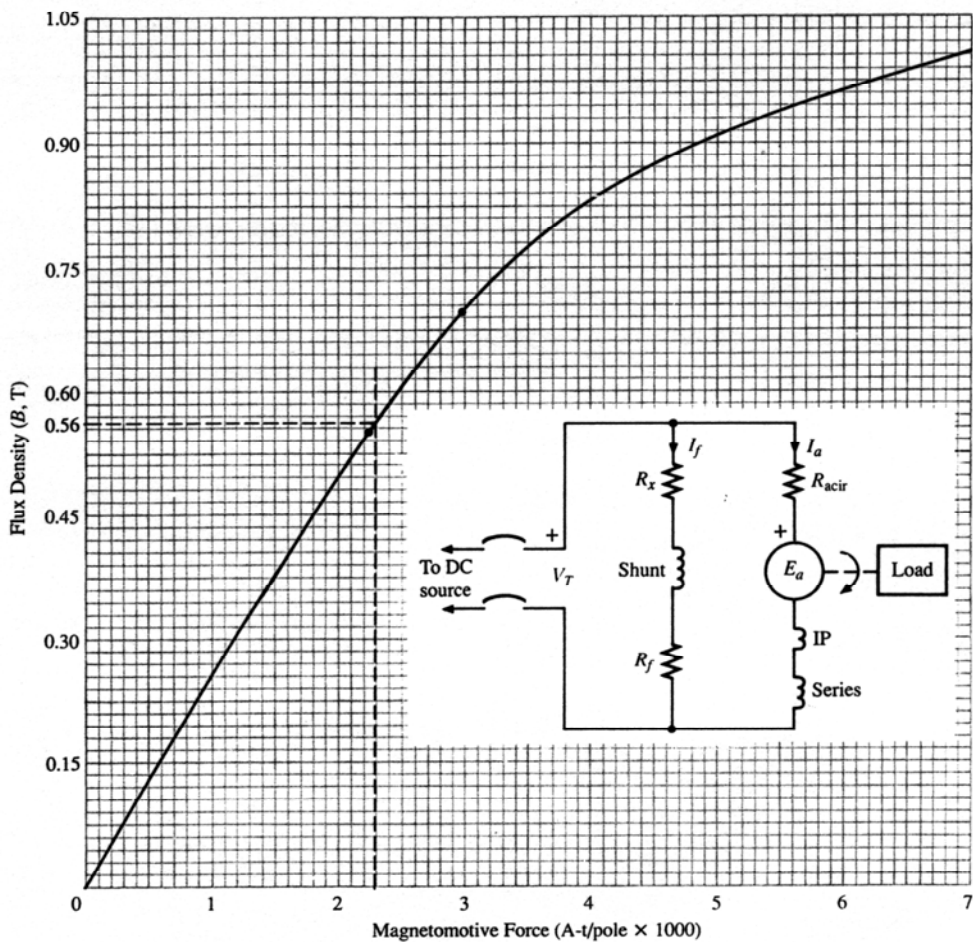
$$\text{และ } I_f = V_T / R_f = 240 / 99.5 = 2.412 \text{ A}$$

$$\text{ดังนั้น } I_a = I_T - I_f = 137.84 - 2.412 = 135.43 \text{ A} \quad \text{_____ **Ans**}$$

b) หาค่า resistance and power rating ของ external resistance ( $R_x$  และ  $R_{RX}$ ) เมื่อนำมาต่ออนุกรมกับวงจร shunt field และทำงาน 125% จาก speed

แรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf ในขด series field ของ stabilized-shunt motor จะออกแบบให้มีค่าประมาณเท่ากับและตรงข้ามกับ equivalent demagnetizing mmf ของ armature reaction ดังนั้นผลรวมของ flux ใน stabilized-shunt motor คือ ค่า mmf ของ shunt field นั่นคือ

$$F_{net} = F_f = N_f I_f = (1231)(2.412) = 2969.2 \text{ A-t/pole}$$



จากรูป magnetization curve เมื่อนำค่า  $F_{net} = 2969 \text{ A-T/pole}$  ไปเทียบในกราฟจะได้ flux density (B) = 0.70 T

นั่นคือ  $B_p = B_{p1} = 0.70 \text{ T}$

จากโจทย์กำหนดให้เมื่อนำ resistance  $R_x$  มาต่ออนุกรมกับวงจร shunt field และทำงานที่ 125% ของ rated speed นั่นคือ

$$n_2 = 125\% n_1 = 1.25 (1150) = 1437.5 \text{ r/min}$$

และสมมติให้ shaft load ปรับค่าของกระแส armature current ( $I_a$ ) = 115% ของ rated current นั่นคือ

$$I_{a2} = 115\% I_{a1} = 1.15 (135.43) = 155.74 \text{ A}$$

จากสมการ  $n = (V_T - I_a R_{acir}) / B_p$  เมื่อความเร็ว rated speed และค่ากระแส  $I_a$  เปลี่ยนแปลง จะทำให้ ค่า Flux density ( $B_p$ ) เปลี่ยนแปลงไปด้วย นั่นคือ

$$n_1 = 1150 \text{ r/min} \quad I_{a1} = 135.43 \text{ A} \quad B_{p1} = 0.70 \text{ T}$$

$$n_2 = 125\% (1150) = 1437.5 \text{ r/min} \quad I_{a2} = 115\% (135.43) = 155.74 \text{ A} \quad B_{p2} = ?$$

$$\text{ดังนั้น} \quad n_1 / n_2 = [(V_T - I_a R_{acir}) / B_p]_1 / [(V_T - I_a R_{acir}) / B_p]_2$$

$$B_{p2} = B_{p1} (n_1 / n_2) [(V_T - I_a R_{acir})_2 / [(V_T - I_a R_{acir})_1]$$

เมื่อวงจรของ armature circuit ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น  $R_{acir} = R_{acir1} = R_{acir2}$

$$R_{acir1} = R_{acir2} = R_a + R_{IP} + R_s = 0.0680 + 0.0198 + 0.00911 = 0.0969 \Omega$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad B_{p2} &= 0.70 (1150 / 1437.5) [240 - (155.74 \times 0.0969)] / [240 - (135.43 \times 0.0969)] \\ &= 0.56 \text{ T} \end{aligned}$$

จากรูป magnetization curve เมื่อนำค่า Flux density  $B_{p2} = 0.56 \text{ T}$  ไปเทียบในกราฟเพื่อหาค่า Magnetomotive fore. ( $F_f$ ) จะได้  $2.3 \times 100 = 2300 \text{ A-t/pole}$

$$\text{หาค่า External resistance } (R_x) \text{ จากสมการ } F_f = N_f I_f \Rightarrow I_f = F_f / N_f$$

$$I_f = 2300 / 1231 = 1.87 \text{ A}$$

$$\text{จากกฎของ ohm'law} \quad V_T = I_f (R_f + R_x) \Rightarrow R_x = (V_T / I_f) - R_f$$

$$R_x = (240 / 1.87) - 99.5 = 28.8 \Omega \quad \text{----- Ans}$$

หาค่า Power rating ของ external resistance ( $P_{Rx}$ )

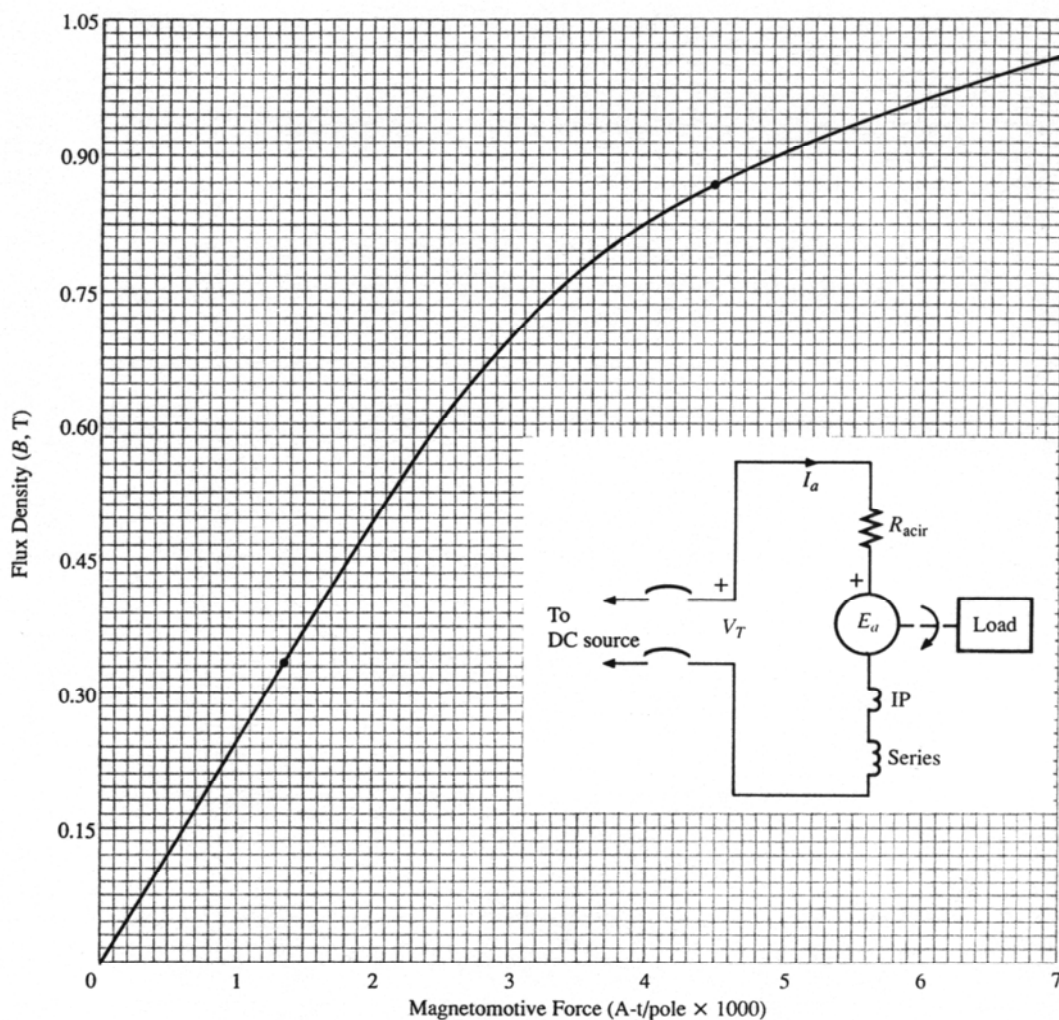
$$P_{Rx} = I_f^2 R_x = (1.87)^2 (28.8) = 100.7 \text{ W} \quad \text{----- Ans}$$

-----

**Example 11-2** A 100 hp , 650 r/min , 240 V series motor has an efficiency of 89.6 percent when operated at rated conditions. The series field has 14 turns/pole and the equivalent demagnetizing mmf due to armature reaction is approximately 8.0 percent of the series field mmf. The motor parameters are :

	Armature	Interpole	series.
Resistance ( $\Omega$ )	0.0202	0.00588	0.00272

The circuit diagram and magnetization curve for the motor are shown in Figure 11-7. Determine the speed if the load is reduced to a value that causes the armature current to be 30 percent rated current.



รูปที่ 11-7 Magnetization curve and circuit diagram for Example 11-2

**Solution** จากสมการ  $\eta = P_{out} / P_{in} \Rightarrow P_{in} = P_{out} / \eta$

$$P_{in} = (100 \text{ hp} \times 746 \text{ W}) / (89.6 / 100) = 83258.93 \text{ W}$$

จากสมการ  $P_{in} = V_T I_T \Rightarrow I_T = P_{in} / V_T = 83258.93 / 240 = 346.91 \text{ A}$

มอเตอร์เป็นแบบ series motor ดังนั้น  $I_T = I_a = 346.91 \text{ A}$

จาก  $R_{acir} = R_a + R_{IP} + R_{CW} + R_s = 0.0202 + 0.00588 + 0 + 0.00272 = 0.0288 \Omega$

และ  $F_{net 1} = F_s - F_d = N_s I_a (1 - 0.080)$   
 $= 14 \times 346.91 (1 - 0.080) = 4468.2 \text{ A-t/pole}$

จากรูป Magnetization curve เมื่อนำค่า Magnetomotive force ( $F_{net 1}$ ) = 4468.2 A-t/pole ไปเทียบในกราฟจะได้ค่า Flux density (B) = 0.87 T

นั่นคือ  $B_p = B_{p1} = 0.87 \text{ T}$

โจทย์กำหนดให้หาค่า speed ของมอเตอร์ เมื่อกระแส armature จ่ายให้ load ลดลง 30% จาก rated current ซึ่งจะเป็นผลทำให้ magnetomotive force ( $F_{net 2}$ ) ลดลงด้วย นั่นคือ

$$I_{a2} = 30\% I_{a1} = 0.30 (346.91) = 104.07 \text{ A}$$

และ  $F_{net 2} = 30\% F_{net 1} = 0.30 (4468.2) = 1340.5 \text{ A-t/pole}$

เมื่อนำค่า magnetomotive force ( $F_{net 2}$ ) = 1340.5 A-t/pole ไปเทียบในกราฟจะได้ค่า flux density (B) = 0.34 T นั่นคือ  $B_p = B_{p2} = 0.34 \text{ T}$

จากสมการ  $n_1 / n_2 = [(V_T - I_a R_{acir}) / B_p]_1 / [(V_T - I_a R_{acir}) / B_p]_2$

$$\begin{aligned} n_2 &= n_1 [B_{p1} / (V_T - I_{a1} R_{acir1})] \times [(V_T - I_{a2} R_{acir2}) / B_{p2}] \\ &= 650 [0.87 / [240 - (346.91 \times 0.0288)]] \times [240 - (104.70 \times 0.0288) / 0.34] \\ &= 1713.64 \approx 1714 \text{ r/min} \end{aligned}$$

Ans

### 11-6 Linear Approximation

ถ้าไม่ได้กำหนดกราฟ magnetization curve มาให้ เพื่อใช้ในการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก การหาค่าสามารถกระทำได้โดยการประมาณอย่างหยาบ ๆ ด้วยการตัดค่าผลกระทบจากการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กทิ้งไป อย่างไรก็ตามขด series field ของ compound motor มีขนาดใหญ่ สามารถขับสนามแม่เหล็กให้เข้าสู่การอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายในเงื่อนไข locked-rotor และ overload ดังนั้นการคำนวณหาค่า Torque และ speed กรณี locked-rotor และ overload จะมีค่าผิดพลาดมาก ถ้าไม่นำผลกระทบจากการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กมาคิด

สมการของ Linear approximation ของ Torque และ speed โดยสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในรูปของ net mmf ( $F_{net}$ ) สามารถหาได้ดังนี้

จากบทที่ 10 ค่า Developed torque หาได้จากสมการ

$$T_D = B_p I_a K_M \quad \text{—————} \quad 11.4$$

แทนค่า  $B_p = F_{net} / A_R$  จากสมการที่ 11.3 ลงในสมการที่ 11.4 จะได้

$$T_D = (F_{net} / A_R) I_a K_M \quad \text{—————} \quad 11.5$$

และจากบทที่ 10 ค่า speed ( $n$ ) หาได้จากสมการ

$$n = (V_T - I_a R_{acir}) / \Phi_p K_G \quad \text{—————} \quad 11.6$$

และจากสมการที่ 11.2 ค่า  $\Phi_p = F_{net} / R$  เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 11.6 จะได้

$$n = (V_T - I_a R_{acir}) / (F_{net} / R) K_G \quad \text{—————} \quad 11.7$$

เมื่อตัดค่าผลกระทบจากการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กทิ้งไป จะทำให้ค่า reluctance ( $R$ ) ของสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ 11.5 จะได้ค่า developed torque คือ

$T_D \propto F_{net} \times I_a$	lb-ft	————— 11.8
----------------------------------	-------	------------

และจากสมการที่ 11.7 จะได้ค่า speed คือ

$n \propto (V_T - I_a R_{acir}) / F_{net} \quad \left  \Phi_p \neq 0 \right.$	————— 11.9
---	------------

● **Series Motor**

ถ้าการทำงานของ series motor อยู่ในขอบเขตที่ไม่มีผลกระทบจากการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก และผลกระทบจาก armature reaction ดังนั้น developed torque จากสมการที่ 11.8 จะได้

$$\begin{aligned} T_{D,series} &= F_{net} \times I_a \\ &= F_s \times I_a \\ &= (N_s I_a) \times I_a \end{aligned}$$

$T_{D,series} \propto I_a^2$	<hr style="width: 100px; margin-left: auto; margin-right: 0;"/> 11.10
------------------------------	---

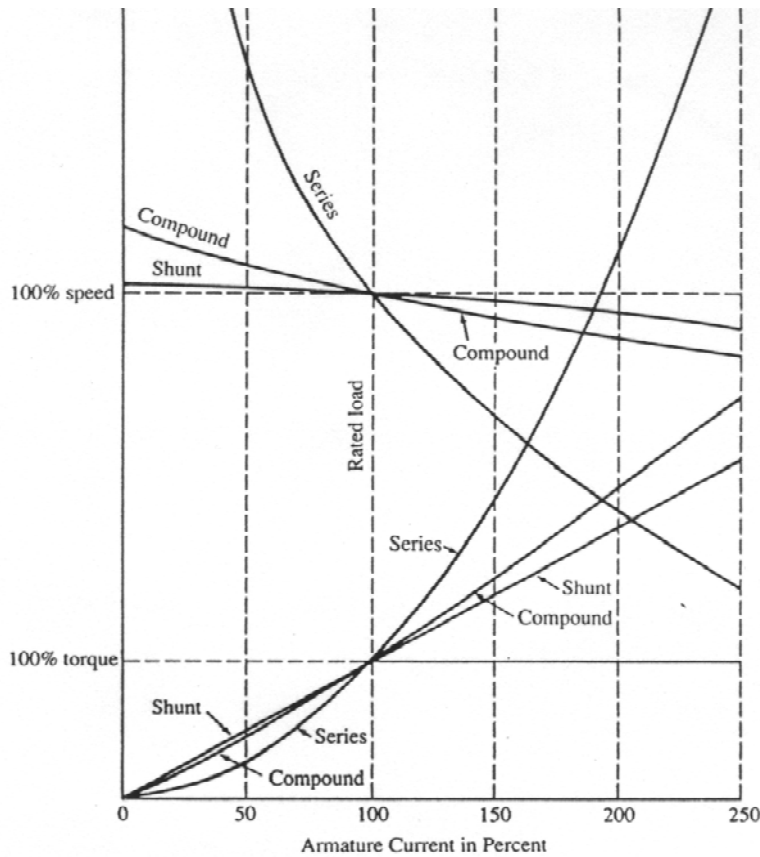
เมื่อ :  $F_{net} = F_s = N_s I_a$

จากสมการที่ 11.10 จะเห็นว่า developed torque ของ series motor จะเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสใน armature ( $I_a$ ) ยกกำลังสอง

**11-7 Comparison of Steady-state Operating Characteristics of DC Motor**

ตามปกติแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของ Dc motor จะมีค่าคงที่ ดังนั้นคุณสมบัติการทำงานที่ steady-state ของ shunt motor , compound motor และ series motor จะต้องวิเคราะห์จากกระแสอาร์เมเจอร์ ( $I_a$ ) , ความเร็วรอบ (n) และ Torque ( $T_D$ ) ซึ่งสามารถที่จะแยกคุณลักษณะการใช้งานของ Dc motor ได้ 3 แบบ คือ

1. คุณลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (n) กับกระแสอาร์เมเจอร์ ( $I_a$ )
2. คุณลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง Torque ( $T_D$ ) กับกระแสอาร์เมเจอร์ ( $I_a$ )
3. คุณลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง Torque ( $T_D$ ) กับความเร็วรอบ (n)



รูปที่ 11-8 Steady-state speed and torque characteristics of typical shunt , series and compound motor

### ☐ Shunt Motor

คุณสมบัติการทำงานของ shunt motor คือ มีความเร็วคงที่จากตอน no load ไปสู่ rated load โดย speed regulation จะมีค่าประมาณ 5%

Developed torque จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและกระแส armature ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กคงที่ จะทำให้ developed torque เปลี่ยนแปลงเกือบจะ Linear กับกระแส armature ดังนั้น shunt motor จะใช้งานกับ load ที่ต้องการความเร็วคงที่ และไม่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นสูง จึงนิยมใช้กับ centrifugal pump fan , winding reels , conveyors และ machine tools เป็นต้น

### ☐ Compound Motor

แรงบิดของ compound motor สร้างมาจากกระแส armature ถ้าค่ากระแสใน armature มีค่ามาก จะทำให้ Torque มีค่ามากขึ้นด้วย ดังนั้น compound motor จึงมีแรงบิดเริ่มต้นสูงโดย speed regulation ของ compound motor จะมีค่าประมาณ 15 – 25 %

Compound motor จะใช้งานกับ load ที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นสูง หรือ load ที่ทำงานเป็นจังหวะ เช่น เครื่องขุดไฟฟ้า (electric shovels) , เครื่องปั๊มโลหะ (metal-stamping machines) และ compressors เป็นต้น



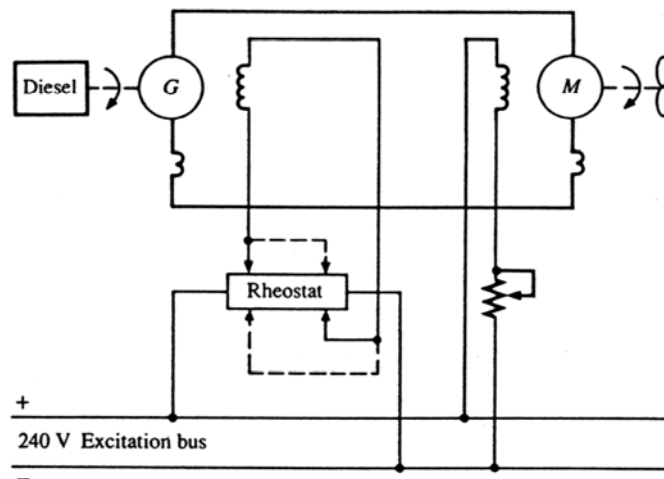
## Series Motor

อัตราความเร็วของ load ขณะ no load ไปสู่ rated load จะมีค่าสูงควมกันกับแรงบิดเริ่มต้นสูง จึงทำให้ series motor ปรับตัวได้ดีต่อการขับเคลื่อนของเกี่ยว (hoists) , รถไฟฟ้า (electric locomotives)

ข้อเสียของ series motor คือ ถ้าปโหลด load ออกทั้งหมด จะทำให้มัน “run away” จนเกิด over speed ได้ ดังนั้น series motor จึงจำเป็นต้องต่อกับ load โดยผ่าน gears หรือ coupling

## 11-8 Adjustable-voltage Drive Systems

การปรับ voltage ที่จะไปใช้ขับระบบให้เร่งความเร็วขึ้น หรือลดความเร็วลง และควบคุมความเร็วของ shunt motor และ stabilized shunt motor ทำได้ โดยการปรับ voltage ที่ armature ขณะที่ยังจ่าย voltage ให้ shunt field คงที่เหมือนเดิม



รูปที่ 11-9 Elementary circuit diagram of a simple adjustable-voltage drive system

จากรูปที่ 11-9 แสดงวงจรพื้นฐานของการปรับแต่ง voltage แบบง่าย ๆ ในการใช้ขับระบบ เรียกว่า “Ward-Leonard system”

Prime mover ที่ใช้ขับ generator อาจจะเป็นเครื่องยนต์ดีเซล หรือ turbine หรือเครื่องยนต์อื่น ๆ ที่มีความเร็วคงที่ และมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเล็ก ๆ ที่จ่ายให้กับ excitation bus และจ่ายให้กับ Rheostat โดย Rheostat จะเป็นตัวควบคุมความเร็วจากความเร็วเริ่มต้นหมุนไปจนถึงความเร็ว base ของ motor และการกลับทิศทางการหมุนของ motor สามารถกลับได้ โดยการกลับขั้วของแหล่งกำเนิดที่จ่ายให้กับ excitation bus

เส้นไขว้ปลาที่ Rheostat เป็นการแสดง sliding contact ที่เลื่อนได้ 2 อัน ในทิศทางที่ตรงข้ามกัน สำหรับกลับทิศทางการหมุนที่ตรงข้ามกัน ถ้า sliding contact อยู่ในตำแหน่งตรงกลางทั้ง 2 อัน แสดงว่ากระแสใน armature จะลดลงเป็นศูนย์ (zero)

**Example 11-3** The adjustable-voltage Dc drive system , shown in Figure 11-9 , has an armature rated at 750 V , 1600 hp , 955 r/min. The armature current and field current at rated load are 1675 A and 5.20A respectively. The motor has a compensating winding and the separately excited shunt field is fed through a rheostat from the 240 V excitation bus. The motor parameters are :

	Armature	IP + CW	Shunt
Resistance ( $\Omega$ )	0.00540	0.00420	14.70

The power required by the propeller load varies as the cube of the speed. Determine:

- torque developed when operating at rated speed.
- developed torque required at half rated-speed
- armature voltage required for half rated-speed , assuming rated field current.

**Solution** a) torque developed when operating at rated speed ( $T_D$ )

$$R_{acir} = R_a + R_{IP+CW} = 0.00540 + 0.00420 = 0.00960 \Omega$$

จากสมการ  $V_T = E_a + I_a R_{acir} \Rightarrow E_a = V_T - I_a R_{acir}$

$$E_a = 750 - (1675 \times 0.00960) = 733.92 \text{ V}$$

จากสมการ  $P_{mech} = E_a I_a = (733.92)(1675) \text{ W} = 1229316 / 746 = 1647.88 \text{ hp}$

จากสมการ  $P_{mech} = T_D n / 5252 \Rightarrow T_D = (P_{mech} \times 5252) / n$

$$T_D = (1647.88)(5252) / 955 = 9062.5 \text{ lb-ft} \quad \text{—————} \quad \text{Ans}$$

b) developed torque required at half rated – speed

$$n_2 = 50 \% n_1 = 0.50 n_1$$

โจทย์กำหนดค่า Power จะ varies ตาม speed ยกกำลัง 3 นั่นคือ  $P \propto n^3$

แต่  $P = T n \therefore T \times n \propto n^3 \Rightarrow T \propto n^3 / n$  ดังนั้น

$$T \propto n^2$$

นั่นคือ  $T_1 / T_2 = (n_1 / n_2)^2 \Rightarrow T_2 = T_1 (n_2 / n_1)^2$

$$T_2 = 9062.5 [(0.5 \times 955) / 955]^2 = 2265.6 \text{ lb-ft} \quad \text{—————} \quad \text{Ans}$$

c) armature voltage required for half rated-speed ( $V_{T2}$ )

โจทย์สมมติให้ rated field current คงที่ ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส field current จะคงที่  
ด้วย นั่นคือ  $\Phi_{p1} = \Phi_{p2}$  และ  $B_{p1} = B_{p2}$

$$\text{จากสมการ } T_1/T_2 = [B_p I_a]_1 / [B_p I_a]_2 \Rightarrow I_{a2} = (T_2/T_1)(B_{p1} I_{a1}) / B_{p2}$$

$$I_{a2} = (2265.6/9062.5)(1675) = 418.75 \text{ A}$$

โจทย์กำหนดให้ speed ลดลง 50% นั่นคือ  $n_2 = 50\% n_1 = 0.50 n_1$

$$\text{จากสมการ } n_1/n_2 = [(V_T - I_a R_{acir}) / \Phi]_1 \times [\Phi / (V_T - I_a R_{acir})]_2$$

$$\begin{aligned} V_{T2} &= (n_2/n_1) (\Phi_2/\Phi_1) (V_{T1} - I_{a1} R_{acir1}) + I_{a2} R_{acir2} \\ &= (0.5 n_1/n_1) [750 - (1675 \times 0.0096)] + (418.75 \times 0.0096) \\ &= 371 \text{ V} \end{aligned}$$

----- **Ans**

## 11-9 Dynamic Braking , Plugging and Jogging

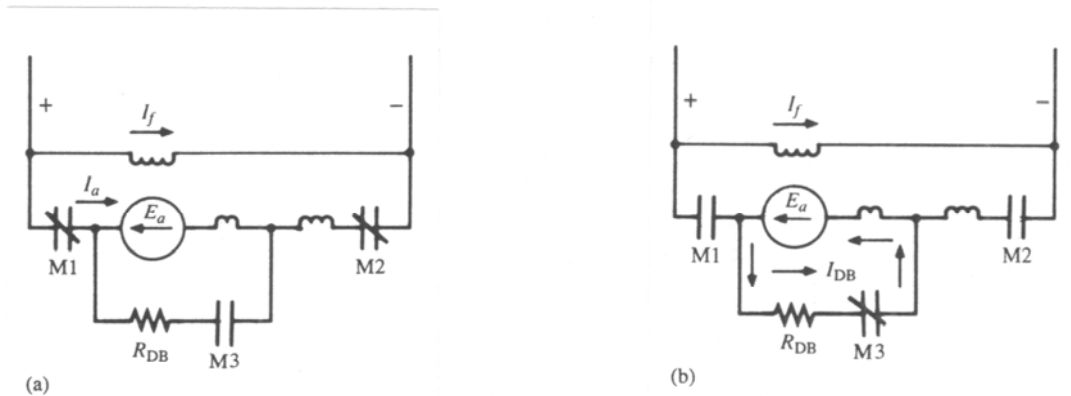
เมื่อต้องการจะให้มอเตอร์หยุดหมุนโดยฉับพลัน เราจะต้องเบรกมอเตอร์ให้หยุด ซึ่งการเบรกจะใช้วิธีการเบรกด้วยไฟฟ้า คือ

1. ไคนามิกเบรกกิ้ง (Dynamic Braking)
2. รีเจนเนอเรทีฟเบรกกิ้ง ( Regenerative Braking )
3. ปลั๊กกิ้ง ( Plugging )
4. จ็อกกิ้ง ( Jogging )

### Dynamic Braking

ขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนด้วยความเร็วรอบอยู่นั้น ถ้าเราแยก Switch ออก มอเตอร์จะหยุดหมุนเนื่องจากความฝืดของลูกปืน แต่การหยุดนี้จะใช้เวลานาน ถ้าเราอยากเบรกมอเตอร์ให้มันหยุดหมุนทันที เราจะต้องตัดไฟออกจากวงจร armature อย่างเดียว โดยที่สนามแม่เหล็กยังมีไฟไปเลี้ยงอยู่ก็จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นบน armature เพราะ armature ยังหมุนด้วยความเฉื่อยไปตัดกับสนามแม่เหล็ก ถ้าเรานำตัวความต้านทาน (Resistance Dynamic braking :  $R_{DB}$ ) มาต่อคร่อม armature จะทำให้มอเตอร์จะหยุดเร็วขึ้น เพราะความเฉื่อยหรือพลังงานจลน์ถูกนำออกมาใช้ในรูปพลังงานไฟฟ้าจ่ายไปในตัวความต้านทานที่คร่อม

armature ในรูปความร้อน เมื่อหมดพลังงานจลน์ มอเตอร์จึงหยุด เราเรียกการเบรกมอเตอร์แบบนี้ว่า “Dynamic braking” หรือ “Rheostatic braking”



รูปที่ 11-10 Compound motor with a dynamic-braking loop :

(a) normal motor operation; (b) dynamic-braking loop:

รูปที่ 11-10 ( a ) แสดงการทำงานของมอเตอร์ตามปกติ โดย contact  $M_1$  และ  $M_2$  ถูก closed และ contact  $M_3$  จะ open

รูปที่ 11-10 ( b ) เมื่อเกิด Dynamic braking ตัว contact  $M_1$  และ  $M_2$  จะ open และ contact  $M_3$  จะ closed.

จะสังเกตเห็นว่าขด series field จะไม่รวมอยู่ใน dynamic-braking loop ถ้าขด series field รวมอยู่ใน dynamic-braking loop จะทำให้กระแสใน series field สร้าง mmf ต้านกับ mmf ของ shunt field เป็นผลทำให้แรงเคลื่อน  $E_a$  ลดลง และจะมีผลทำให้การ brake ช้าลง

### Regenerative Braking

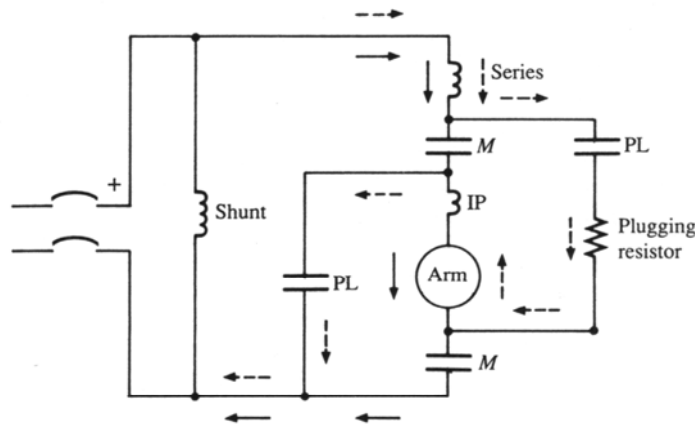
Regenerative braking คือ การให้มอเตอร์ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วป้อนไฟย้อนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟ ขณะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเกิดแรงบิดไปต้านการหมุนของมอเตอร์ ทำให้หมุนช้าลงเป็น Regenerative braking เป็นการเบรกอีกแบบหนึ่ง การจะทำให้มอเตอร์จ่ายไฟออกมา เราต้องสร้างให้แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (cemf) ที่มอเตอร์ผลิตขึ้นมามีค่าสูงกว่าแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

1. เพิ่มกระแสขั้ววงจรสนามแม่เหล็กให้มากขึ้น
2. เพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์มากขึ้นกว่าปกติ เพราะถูก load จุดให้หมุนเร็วขึ้น

Regenerative braking จะใช้กว้างขวางใน รถไฟฟ้า , ลิฟต์ และ regenerative braking ไม่สามารถใช่กับ series motor ได้ เพราะว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น กระแสจะลดลง ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดซึ่งต่ออนุกรมกับ armature ลดลงด้วย ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ cemf จึงไม่มีทางมากกว่าแหล่งจ่ายไฟได้

## Plugging

Plugging คือ การใส่กำลังเข้าไปในมอเตอร์ในทิศทางที่จะทำให้มอเตอร์หมุนกลับทาง วิธีการคือกลับขั้วของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใส่เข้า armature ตอนทำการเบรกแบบ plugging นั้น แรงดันไฟฟ้าคร่อม armature จะมีค่าเป็น 2 เท่า เพราะมีแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ  $\text{cemf}$  เข้าไปรวมด้วย และกระแสที่ไหลจะมีค่ามาก เพราะค่าความต้านทานของ armature จะมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีค่าความต้านทานภายนอกเข้ามาต่ออนุกรมตอน Plugging เพื่อจำกัดค่ากระแส armature ให้มีค่าที่เหมาะสม จึงจะเห็นได้ว่าการเบรกแบบ Plugging จะไม่ค่อยนิยมใช้ เพราะกระแสไฟฟ้าสูงเกินไปนั่นเอง



รูปที่ 11-11 Simplified circuit for plugging operations

จากรูปที่ 11-11 เป็นการแสดงการทำงานของ Plugging เมื่อมอเตอร์หมุนทำงานตามปกติ contact M จะปิด และ contact PL จะเปิด ดังนั้นเส้นทางของกระแสจะแสดงด้วยลูกศรเส้นทึบ

เมื่อทำงานแบบ Plugging หน้า contact M จะเปิด และ contact PL จะปิด ดังนั้นกระแสจะไหลผ่าน Plugging resistor ตามที่แสดงด้วยลูกศรเส้นปะ

## Jogging

Jogging คือ การใช้กำลังงานของมอเตอร์อย่างสั้น เพื่อให้เกิดการหมุนของ rotor ทีละน้อย โดยได้ค่าความต้านทานอนุกรมกับ armature เพื่อจำกัดกระแสเมื่อเกิด Jogging การเบรกแบบ Jogging จะใช้กับตำแหน่งของลิฟท์ และการปรับแต่งเพลลาของงานที่แตกต่างกัน

**Example 11-4** A 240 V , compensated shunt-motor driving a 910 lb-ft torque load is running at 1150 r/min. The efficiency of the motor at this load is 94.0 percent. The combined armature , compensating winding and interpole resistance is 0.00707  $\Omega$  and resistance of the shunt field is 52.6  $\Omega$  Determine: the resistance of a dynamic-braking resistor that will be capable of developing 500 lb-ft of braking torque at a speed of 1000 r/min. Assume windage and friction at 1000 r/min are essentially the same as at 1150 r/min.

**Solution** จากรูป dynamic braking circuit ในรูปที่ 11-10 (b) เมื่อทำงานที่ rated load

$$\text{จากสมการ } P_{\text{shaft}} = T n / 5252 = (910)(1150) / 5252 = 199.257 \text{ hp}$$

$$\text{จากสมการ } P_{\text{in}} = P_{\text{out}} / \eta = P_{\text{shaft}} / \eta = (199.257 \text{ hp} \times 746 \text{ W}) / (94/100)$$

$$P_{\text{in}} = 158,134 \text{ W}$$

$$\text{ดังนั้นกระแสของวงจร } (I_T) \quad I_T = P_{\text{in}} / V_T = 158,134 / 240 = 658.89 \text{ A}$$

$$\text{กระแสของ shunt field } (I_f) \quad I_f = V_T / R_f = 240 / 52.6 = 4.56 \text{ A}$$

$$\text{และกระแสที่ไหลใน armature } (I_a) \quad I_a = I_T - I_f = 658.89 - 4.56 = 654.33 \text{ A}$$

$$\text{จากสมการ } V_T = E_{a1} + I_{a1} R_{\text{acir}} \Rightarrow E_{a1} = V_T - I_{a1} R_{\text{acir}}$$

$$E_{a1} = 240 - (654.33 \times 0.00707) = 235.37 \text{ V}$$

โจทย์กำหนดให้หา  $R_{\text{DB}}$  เมื่อ developing of braking torque = 500 lb-ft ที่ speed 1000 r/min

$$\text{ดังนั้น } T_1 / T_2 = [B_p I_a]_1 / [B_p I_a]_2 \Rightarrow I_{a2} = (T_2 / T_1) (B_{p1} I_{a1}) / B_{p2}$$

เมื่อ :  $T_1 = 910 \text{ lb-ft}$  ,  $T_2 = 500 \text{ lb-ft}$  ,  $I_{a1} = 654.33 \text{ A}$  และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่

ค้างอยู่มีค่าคงที่ ( $B_{p1} = B_{p2}$ )

$$\text{ดังนั้น } I_{a2} = (T_2 / T_1) (I_{a1}) = (500 / 910) (654.33) = 359.52 \text{ A}$$

$$\text{และจากสมการ } E_{a1} / E_{a2} = (n \Phi k_G)_1 / (n \Phi k_G)_2$$

$$E_{a2} = (n_2 / n_1) E_{a1} = (1000 / 1150) \times 235.37 = 204.67 \text{ V}$$

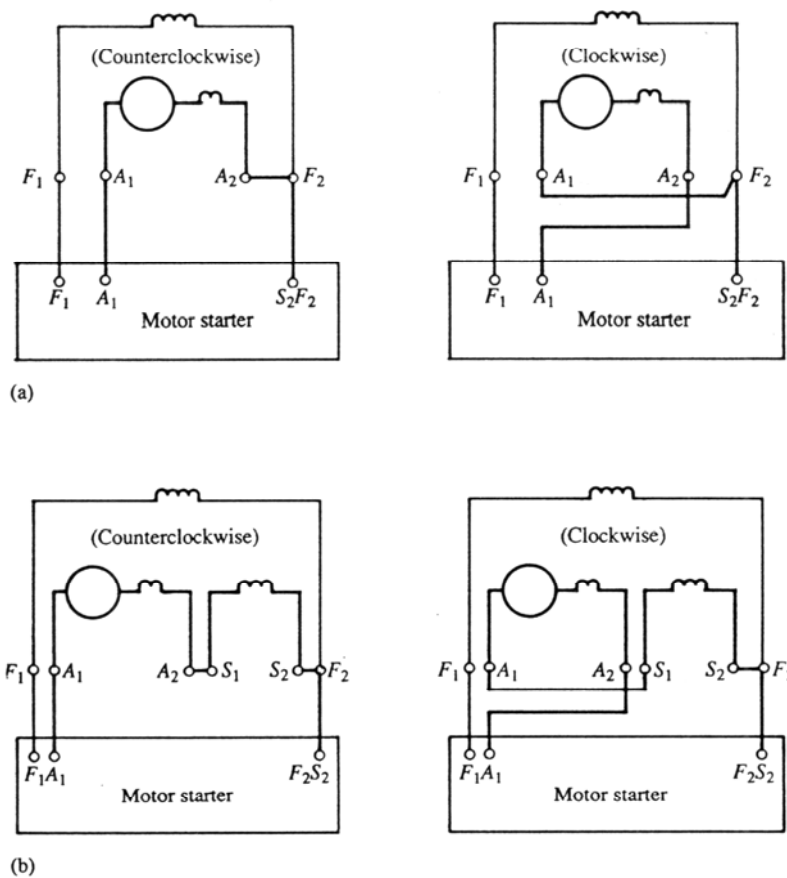
จากวงจร dynamic-braking loop ในรูป 11- 10 (b) จะได้

$$E_{a2} = I_{a2} (R_{\text{acir}} + R_{\text{DB}}) \Rightarrow R_{\text{DB}} = (E_{a2} - I_{a2} R_{\text{acir}}) / I_{a2}$$

$$R_{\text{DB}} = [204.67 - (359.52 \times 0.00707)] / 359.52 = 0.562 \Omega \quad \text{Ans}$$

### 11-10 Standard Terminal Markings and Connection of DC Motor

มาตรฐานเครื่องหมายที่ปลายขั้วของ DC motor คือ ขดลวด shunt field จะกำหนดเป็นตัวอักษร F โดยต้นขดลวดเป็นตัวอักษร  $F_1$  และปลายขดลวดใช้ตัวอักษร  $F_2$  สำหรับขดลวด series field ที่ต่ออนุกรมกับ armature จะใช้ตัวอักษร A โดยต้นขดลวดใช้อักษร  $A_1$  และปลายขดลวดใช้อักษร  $A_2$  ตามที่แสดงในรูปที่ 11-12



รูปที่ 11-12 NEMA standard terminal marking for DC motor and proper connection for different direction of rotation: (a) shunt motor ; (b) compound motor

จากรูปที่ 11-12 (a) แสดงเครื่องหมายที่ปลายขั้วของ shunt motor และการต่อขั้วที่ถูกต้องสำหรับการหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แต่ถ้าต่อขั้วของ armature ไม่ถูกต้อง โดยการสลับสายจะทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 11-12 (b) แสดงเครื่องหมายปลายขั้วของ compound motor เมื่อต่อขั้วถูกต้องมอเตอร์จะหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และเมื่อสลับสายเข้า armature จะทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

## SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING

$$F_{\text{net}} = F_f + F_s - F_d$$

$$T_D = B_p I_a K_M$$

$$\eta = (V_T - I_a R_{\text{acir}}) / \Phi_p K_G$$

$$R_{\text{acir}} = R_a + R_{\text{IP}} + R_{\text{CW}} + R_S$$

$$\Phi_p = F_{\text{net}} / R$$

$$B_p = \Phi_p / A = F_{\text{net}} / AR$$

$$F_{\text{net}} = N_f I_f$$

$$T_D \propto F_{\text{net}} \times I_a$$

$$\eta \propto (V_T - I_a R_{\text{acir}}) / F_{\text{net}} \quad \left| \Phi_p \neq 0 \right.$$

$$T_{D,\text{series}} \propto I_a^2$$

-----



## บทที่ 12

### คุณลักษณะเฉพาะและการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

#### 12-1 บทนำ

DC generator แบบ shunt generator ชนิด self-excited จะถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากตัวเอง ซึ่งได้จากอำนาจแม่เหล็กตกค้าง และเมื่อ armature หมุน อำนาจแม่เหล็กตกค้างจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสะสม

(buildup) ซึ่งจะเป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้า emf เพิ่มมากขึ้น

DC generator แบบ compound generator จะประกอบด้วยขดลวด series field และขดลวด shunt field โดยขดลวด shunt field จะต่อแบบ short shunt หรือ long shunt ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

การต่อขานานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของ DC generator จะต้องทำการตรวจสอบขั้วให้ถูกต้องก่อนทำการต่อขานาน เพราะถ้าต่อขั้วสลับกัน จะทำให้เกิด short circuit ใน generator ซึ่งจะเป็ผลทำให้แปรงถ่าน และ commutator ได้รับความเสียหาย

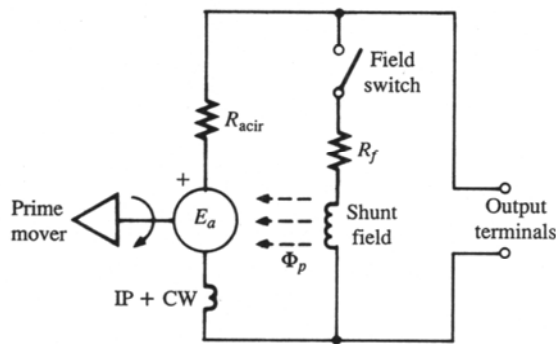
#### 12-2 Self - Excited Shunt Generator

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Shunt generator ชนิดกระตุ้นตัวเอง จะถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากตัวมันเอง ซึ่งได้จากอำนาจแม่เหล็กตกค้าง (Residual Magnetism) และจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อแกน armature หมุนจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นเล็กน้อย และจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นเล็กน้อยด้วย กระแสไฟฟ้านี้บางส่วนจะไหลผ่านขด field ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นไปเสริมกับสนามแม่เหล็กที่ตกค้างขั้วแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า emf มากขึ้น

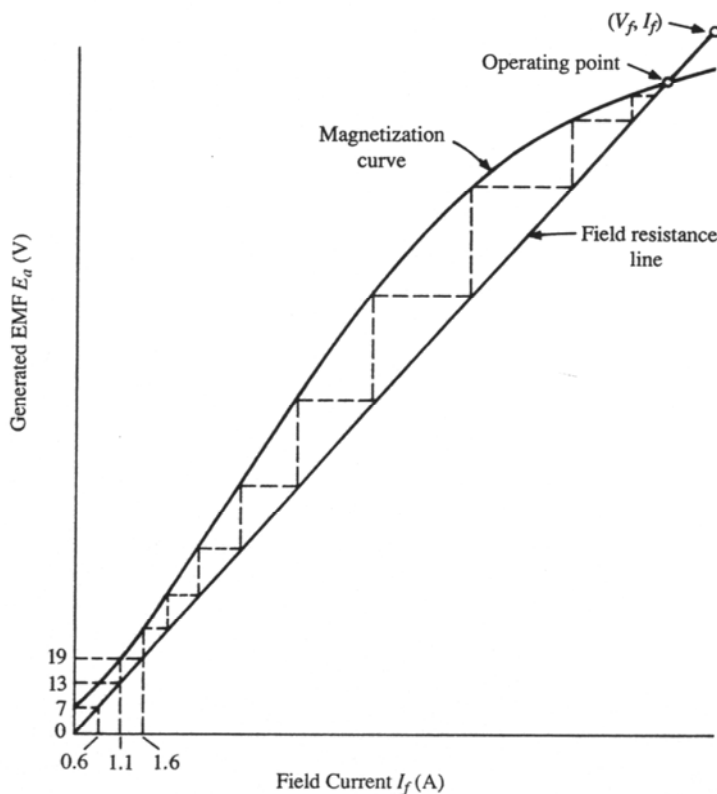
จากรูปที่ 12-1 (a) แสดงวงจรสมมูลของ shunt generator แบบ self-excited โดยในตอนแรกแรงดันไฟฟ้า emf ( $E_a$ ) จะเกิดจากอำนาจแม่เหล็กตกค้างในขั้วแม่เหล็ก เมื่อสวิตช์ของ field switch ปิดวงจร จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวด shunt field ไปเสริมกับอำนาจแม่เหล็กตกค้างในขั้วแม่เหล็ก ทำให้แรงดันไฟฟ้า emf เพิ่มมากขึ้น

จากรูปที่ 12-1 (b) แสดง Magnetization curve และ field-resistance line สำหรับ self-excited generator เส้น field-resistance line หาได้จากกฎของ Ohm's Law โดย plot จาก voltage และกระแสในขดลวด shunt field จุดเริ่มต้นของ field-resistance line จะเริ่มจากศูนย์จนถึงจุด rated voltage ( $V_f$ ) และค่ากระแสที่วัดได้จากขดลวด shunt field ( $I_f$ )

กราฟ Magnetization curve ได้จากการเดินเครื่องที่ rated speed ขณะที่ไม่มี load ต่ออยู่ที่ out put การ plot ค่า induced emf กับ shunt field current ขณะที่ field current จะเปลี่ยนค่าจากศูนย์ไปที่ประมาณ 125 % ของ rated voltage ถ้าหากไม่คิด hysteresis loop ค่า field current จะไม่ลดลงทุก ๆ จุดระหว่างทำการ test



(a)



รูป (b)

generator:  
generator

(b)

จากรูป 12-1 (a) สมมุติว่า field switch อยู่ในตำแหน่งเปิดวงจร และ armature หมุนที่ rated speed อำนาจแม่เหล็กตกค้างจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสะสมประมาณ 7 V ตามที่แสดงในกราฟ magnetization curve รูป 12-1 (b) เมื่อทำการปิดวงจร field switch จะทำให้แรงดันไฟฟ้าสะสม 7 V ตกคร่อมที่ขดลวด field winding ทำให้เกิดกระแส field current = 0.6 A ตามที่แสดงบนเส้น field-resistance line เมื่อ

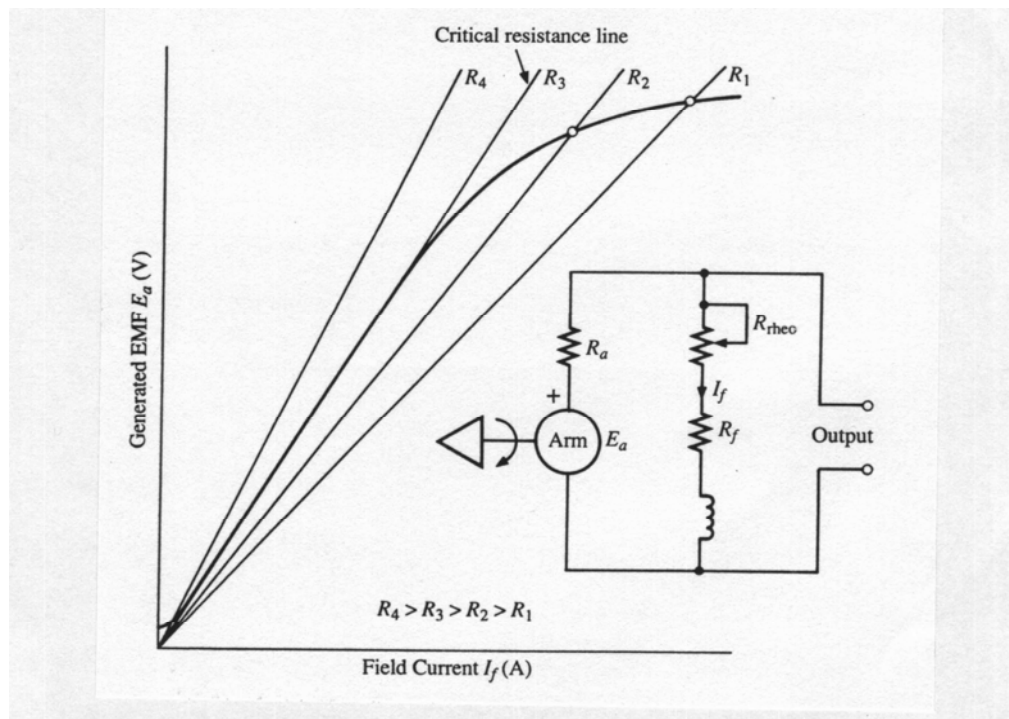
ลากเส้นของกระแส field current = 0.6 A ไปตัดกับ magnetization curve จะทำให้ voltage สะสมเพิ่มขึ้นเป็น 13 V และเมื่อลากเส้น voltage สะสมที่เพิ่มขึ้น 13 V ไปตัดกับเส้น field-resistance line ทำให้เกิดกระแส field current = 1.1 A เมื่อทำต่อไปเรื่อย ๆ จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าสะสมจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งการเพิ่มของแรงดันไฟฟ้าสะสมจะไม่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีกต่อไป ซึ่งก็คือจุดตัดของ magnetization curve กับ field-resistance field เราเรียกจุดนี้ว่า “operating point”

- **Adjusting the No- load voltage**

การปรับค่า voltage ขณะ No-load บางทีเรียกว่า “open circuit voltage” คือการเปลี่ยน slop ของ field resistance line

การนำค่า rheostat resistance ไปต่ออนุกรมกับขดลวด shunt field จะทำให้ slop ของ field-resistance line เปลี่ยนแปลง ดังนั้นทำให้จุดตัดและ operating point เกิดขึ้นที่ low voltage ตามที่แสดงในรูป 12-2 การตั้งค่าของ rheostat resistance จะทำให้เกิดความแตกต่างของค่า resistance ใน shunt field คือ

$$R = R_f + R_{rheo}$$



จากรูป 12-2 operating point คือ graphical solution ของสองสมการที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน คือ  $R_1$  และ  $R_2$  ดังนั้น magnetization curve จะแสดงด้วยสมการ

$$E_a = n \Phi_p k_G$$

แต่  $\Phi_p = (N_f I_f) / R$  ดังนั้น

12.1 

$$E_a = n [(N_f I_f) / R] k_G$$

และ field-resistance line จะแสดงด้วยสมการ

12.2 

$$E_a = I_f (R_f + R_{rheo})$$

■ ถ้า rheostat resistance ถูกปรับไปที่ค่าที่ทำให้ field-resistance line อยู่ทางด้านซ้ายของ magnetization curve คือ  $R_4$  ค่าแรงดันไฟฟ้าสะสมจะสูงกว่าค่าที่ได้จากอำนาจแม่เหล็กตกค้าง

■ ถ้า field-resistance line อยู่ในแนวเส้นตรงทับกับ magnetization curve คือ  $R_3$  ค่า voltage จะ unstable และค่าความต้านทานของวงจร field circuit ที่ถูกทับเรียกว่า “ **critical resistance** ”

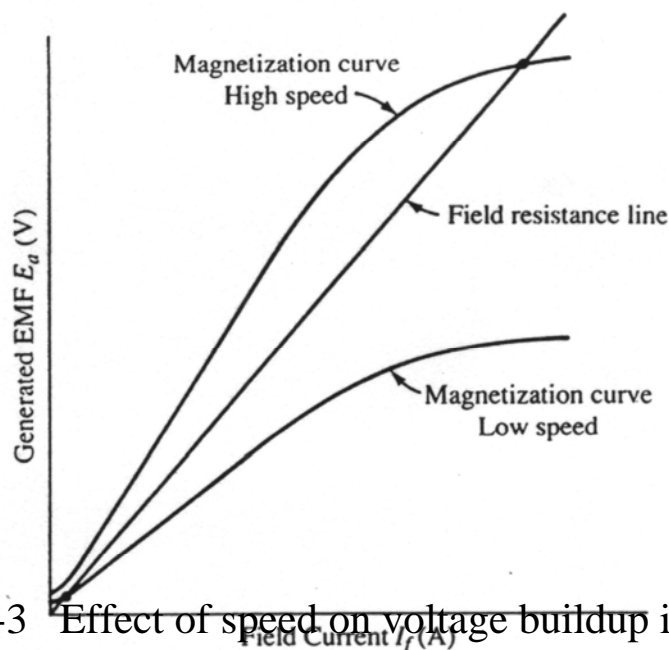
- **Basic Design**

Self-excited generator โดยปกติจะออกแบบ voltage ไว้ประมาณ 125% ของ rated voltage โดยการปรับค่า rheostat จากค่าความต้านทานศูนย์ และไม่มี load ต่อที่ out put

Field rheostat จะถูกออกแบบให้มีค่า rheostat resistance สูงสุด และจะจำกัด voltage ตอน no-load ประมาณ 50% ของ rated voltage

## 12-3 Effect of Speed on Voltage Buildup of a Self-excited Generator

ค่า critical resistance ของ self-excited generator จะมีค่าใกล้เคียงกับ rated speed ของเครื่อง ถ้าเครื่องเดินด้วยความเร็วรอบที่ต่ำจะไม่สร้างแรงดันไฟฟ้าสะสม เหมือนกับเครื่องที่เดินด้วยความเร็วรอบที่สูง ขณะที่ field-circuit resistance เท่ากัน เนื่องจากเหตุนี้ ดังนั้น critical resistance จึงแตกต่างกันที่ความเร็วรอบของเครื่อง ตามที่แสดง ในรูปที่ 12-3



รูปที่ 12-3 Effect of speed on voltage buildup in a self-excited generator

จากรูปที่ 12-3 สำหรับ field-resistance line ที่แสดงจุดตัดของ magnetization curve สำหรับเครื่องที่มีความเร็วรอบสูงจะทำให้เกิด voltage มาก และ จุดตัดของ magnetization curve สำหรับเครื่องที่มีความเร็วรอบต่ำ ค่าของ voltage จะสูงกว่าค่าของอำนาจแม่เหล็กตกค้างเพียงเล็กน้อย

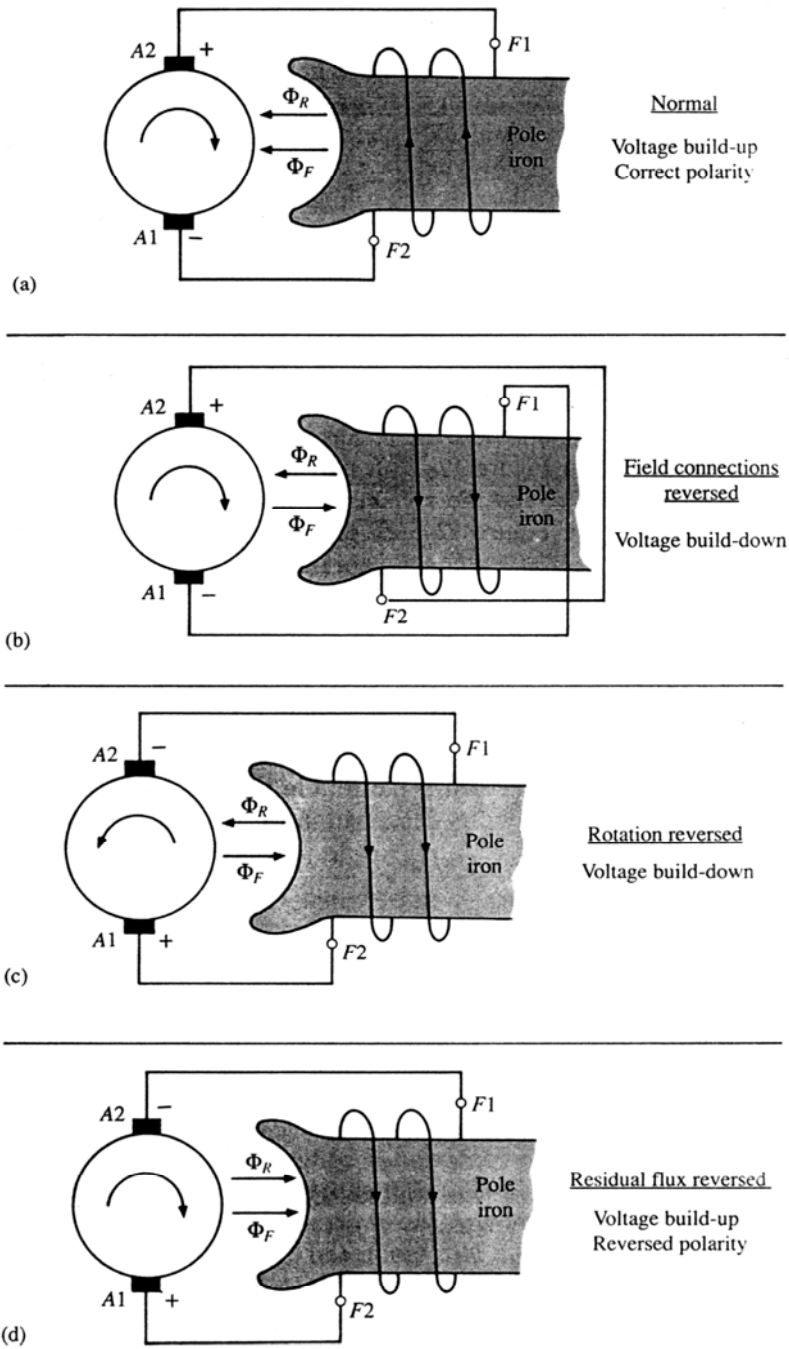
## 12-4 Other Factors Effecting Voltage Buildup

Factor อื่น ๆ นอกเหนือจากค่าความต้านทานของ field-circuit สูงเกินไป หรือ ความเร็วรอบต่ำซึ่งมีผลกระทบต่อ การสะสม voltage ใน self-excited generator คือ

การต่อกลับทิศทางของ shunt field จะทำให้กลับทิศทางการหมุน และการกลับทิศทางของอำนาจแม่เหล็กตกค้าง ตามที่แสดงในรูปที่ 12-4

$\Phi_R$  = flux เนื่องจากอำนาจแม่เหล็กตกค้าง

$\Phi_F$  = flux เนื่องจากกระแส field current



excited

nature ใน  
จาก field

ทิศทางดา:

coil จะมีทิศทางไปทางเดียวกัน

รูปที่ 12-4 (b) เมื่อทำการกลับทิศทางการต่อของขั้ว field circuit จะทำให้สนามแม่เหล็กจาก field coil ( $\Phi_F$ ) ด้านกับอำนาจแม่เหล็กตกค้าง ( $\Phi_R$ ) เพราะว่ามีทิศทางตรงข้ามกัน ดังนั้นจะทำให้ค่า voltage buildup ลดลง

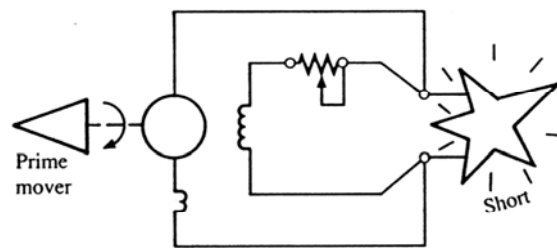
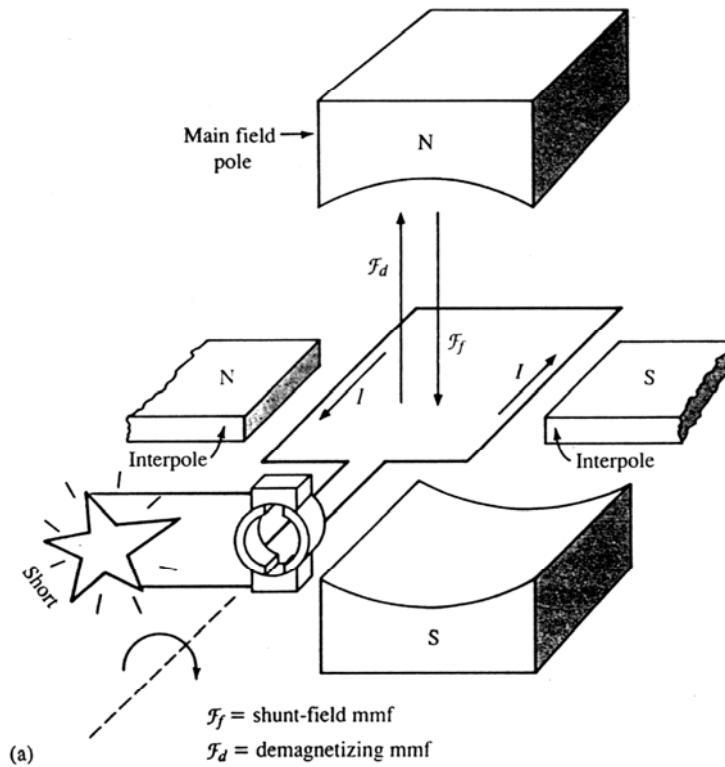
รูปที่ 12-4 (c) เมื่อทำการกลับทิศทางการหมุนของ armature ให้หมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW) จะทำให้ armature voltage กลับทิศทาง ทำให้สนามแม่เหล็กจาก field coil ( $\Phi_F$ ) มีทิศทางตรงข้ามกับอำนาจแม่เหล็กตกค้าง ( $\Phi_R$ ) ทำให้ค่า voltage buildup ลดลง

รูปที่ 12-4 (d) การกลับทิศทางของอำนาจแม่เหล็กตกค้าง โดยการกลับขั้วของ armature และทิศทางการหมุนของ armature หมุนตามเข็มนาฬิกา จะทำให้ armature voltage กลับทิศทาง และกระแส field current จะกลับทิศทางด้วย ดังนั้นอำนาจแม่เหล็กตกค้าง ( $\Phi_R$ ) และสนามแม่เหล็กจาก field coil ( $\Phi_F$ ) จะถูกกลับทิศทางทั้งคู่ ผลลัพธ์ก็คือ voltage buildup ถูกสร้างขึ้นในทิศทางที่ถูกกลับทาง ดังนั้น generator จะทำงานที่ rated voltage ด้วยขั้วที่สลับกัน

## 12-5 Effect of a Short Circuit on the Polarity of a Self-excited Shunt Generator

เมื่อ self-excited shunt generator เกิด short circuit จะทำให้กระแสใน armature สูงมาก ผลของกระแสใน armature ที่สูง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในขดลวด โดยจะสร้าง demagnetizing mmf ( $F_d$ ) มากขึ้น ตามที่แสดงในรูป 12-5 (a) และทิศทางของกระแสที่เปลี่ยนแปลงในขดลวด หาได้จากทิศทางการหมุนและขั้วของ main field pole

จากรูป 12-5 (b) แสดงวงจรการเกิด short circuiting ของ generator การเกิด short circuit ที่ shunt field winding ด้วย จะเป็นผลทำให้กระแสใน shunt field ( $I_f$ ) มีค่าต่ำมาก และค่า shunt field mmf ก็จะอ่อนลง ผลรวมของ shunt field mmf ที่อ่อนตัวลง และเมื่อเทียบกับค่า mmf ที่ผลจาก commutated coil ที่สูง และมีทิศทางตรงข้าม จะกลับอำนาจแม่เหล็กตกค้างในแท่งเหล็กของ main-pole ดังนั้นหลังจาก circuit breaker trip จะทำให้ generator สร้าง voltage build up ในทิศทางกลับกัน



รูปที่ 12-

compone

(b)

circuit the shunt field circuit

-excited

also short

## 12-6 Load-voltage Characteristics of Self-excited Shunt Generator

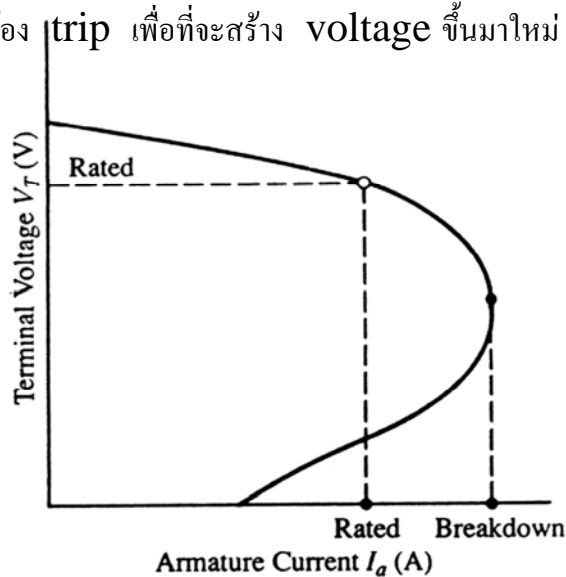
คุณลักษณะของ self-excited shunt generator ภายใต้อัตรา load ต่าง ๆ จะซับซ้อนกว่า separately excited machines เพราะกระแส field current ของ self-excited machines จะขึ้นอยู่กับ output voltage ของ generator การเพิ่มของ load



ใน self-excited generator จะทำให้เกิด voltage drop ( $V = IR$ ) ใน armature circuit และ demagnetization mmf เนื่องจากการเกิด armature reaction ซึ่งทั้งสองอย่างนี้จะทำให้ output voltage มีค่าต่ำลง โดย output voltage ที่ต่ำลงจะลด shunt field current ลงด้วย

- **Voltage Breakdown**

Output voltage ที่ลดลงจากการลดของ field current จะทำให้เกิด overload อย่างมาก และถ้า voltage ลดลงไปมากกว่านี้จะทำให้เกิดการ breakdown อย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเกือบศูนย์volt ตามที่แสดงในรูปที่ 12-6 ถ้าเป็นเช่นนั้น circuit breaker ของ generator จะต้อง trip เพื่อที่จะสร้าง voltage ขึ้นมาใหม่



รูปที่ 12-6 Load-voltage characteristic of a shunt generator that is loaded past the breakdown point

### 12-7 Graphical Approximation of the No-load Voltage

Voltage regulation ของ DC generator คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกับ load จากตอน no-load ไปสู่ rated load ต่อ rated load นั่นคือ

$$\% \text{ VR} = \frac{(V_{nl} - V_{\text{rated}}) / V_{\text{rated}}}{12.3} \times 100$$

เมื่อ: VR = voltage regulation (V)

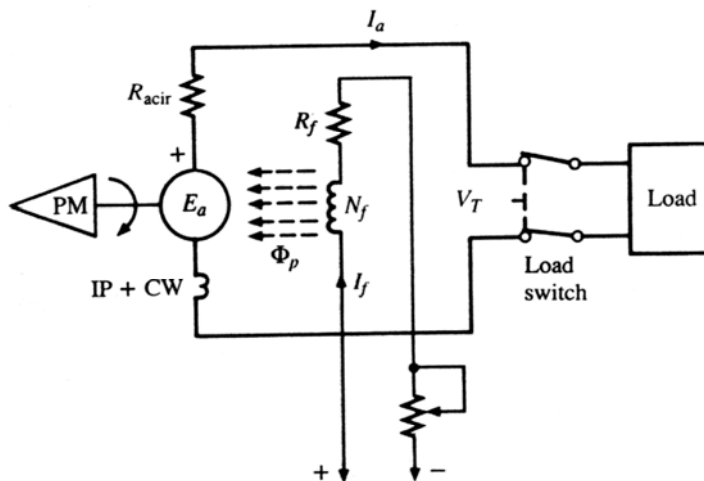
$V_{nl}$  = no-load (open-circuit) voltage (V)

$V_{\text{rated}}$  = voltage indicated on nameplate of machine  
(V)

No-load voltage อาจได้จากการทำงานของเครื่องที่มีอยู่บน nameplate เมื่อปลด load ออกและตรวจสอบค่า voltage เมื่อ no-load ถึงแม้ว่าจะเป็นวิธีที่ถูกต้อง แต่วิธีนี้จะไม่ นิยมใช้กับเครื่องที่มีขนาดใหญ่

การวิเคราะห์หาค่า voltage ตอน no-load ที่ดี หาได้จากค่า parameters ของเครื่อง และจาก magnetization curve ที่เกี่ยวข้อง โดย magnetization curve จะใช้อ้าง ถึงการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก และผลกระทบของอำนาจแม่เหล็กจาก armature reaction และ ผลกระทบของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf ในขดลวด series field (กรณีเป็น compound generator)

• **Separately Excited Shunt generator with a compensating windings.**



รูปที่ 12-7 Separately excited shunt generator equipped with interpoles and a compensating winding

จากรูปที่ 12-7 แสดงรูป shunt generator แบบกระตุ้นจากภายนอก (separately excited) โดยในวงจร armature circuit จะประกอบด้วยขดลวด interpole และขดลวด compensating winding และเครื่องจะจ่าย rated load ที่ rated conditions ที่ กำหนดอยู่บน nameplate ของ generator

เมื่อใช้กฎของ Kirchoff's voltage Law กับวงจร armature circuit จะได้

12.4 
$$E_a = V_T + I_a R_{acir}$$

โดยค่าความต้านทานในวงจร armature circuit คือ

$$R_{acir} = R_a + R_{IP} + R_{cw}$$

เมื่อ:  $E_a$  = voltage induced in the armature (V)

$V_T$  = voltage at output terminal, load switch closed (V)

$R_a$  = resistance of armature winding ( $\Omega$ )

$R_{IP}$  = resistance of interpole winding ( $\Omega$ )

$R_{cw}$  = resistance of compensating winding ( $\Omega$ )

เนื่องจาก shunt generator แบบ separately excited มีขดลวด compensating winding ดังนั้นการเกิด

ปฏิกิริยา armature reaction จะถูกกำจัดออกไป นั่นคือค่า  $E_a$  จะเป็นค่า voltage ที่ปรากฏคร่อมที่ output terminal เมื่อ load switch ที่ปรากฏอยู่ในรูป open. ดังนั้น shunt generator แบบ separately excited ที่มีขดลวด compensating winding ค่า no-load voltage ก็คือค่า voltage induced in the armature นั่นคือ  $V_{nl} = E_a$

### • Separately Excited Shunt generator Without a compensating windings

Shunt generator แบบ separately excited ที่ไม่มีขดลวด compensating windings เมื่อใช้กฎของ kirchhoff's voltage Law กับวงจร armature circuit จะได้

$$E_a = V_T + I_a R_{acir}$$

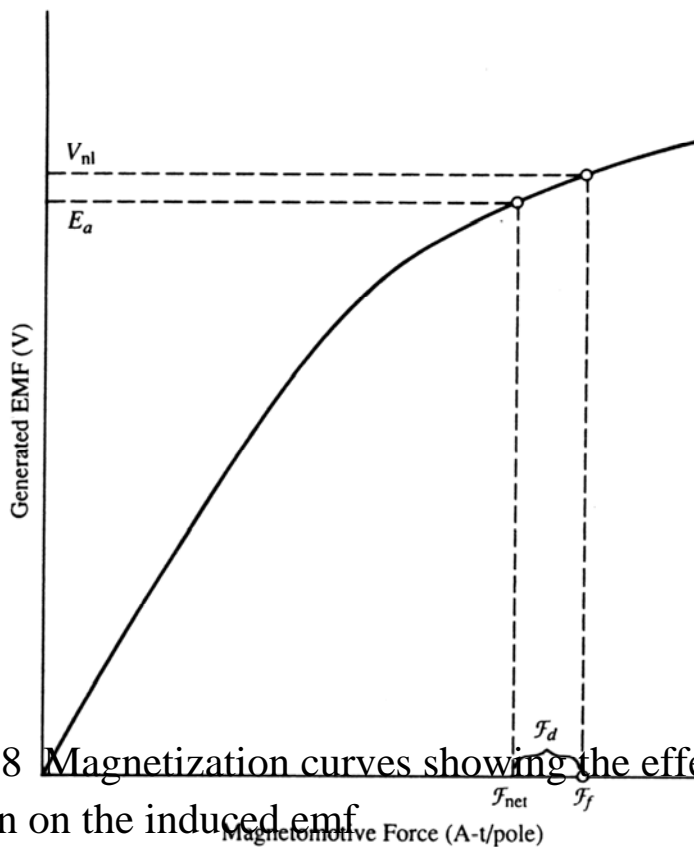
แต่ค่าความต้านทานในวงจร armature circuit เมื่อไม่มีขดลวด compensating windings คือ

$$R_{acir} = R_a + R_{IP}$$

ดังนั้นจะได้

$$12.5 \quad E_a = V_T + I_a (R_a + R_{IP})$$

จากสมการที่ 12.5 เมื่อไม่มีขดลวด compensating winding จะเกิดผลกระทบจากการอิ่มตัวของแม่เหล็ก ดังนั้นผลกระทบของ armature reaction ที่เกิดขึ้นบน induced emf. ได้แสดงบน magnetization curve. ในรูปที่ 12-8



รูปที่ 12-8 Magnetization curves showing the effect of armature reaction on the induced emf

จากรูปวงจรของ separately excited shunt generator เมื่อ load switch เปิดวงจร ทำให้กระแส armature current เท่ากับศูนย์ (Zero) และ No-load voltage จะขึ้นอยู่กับค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf จาก shunt field ( $F_f$ )

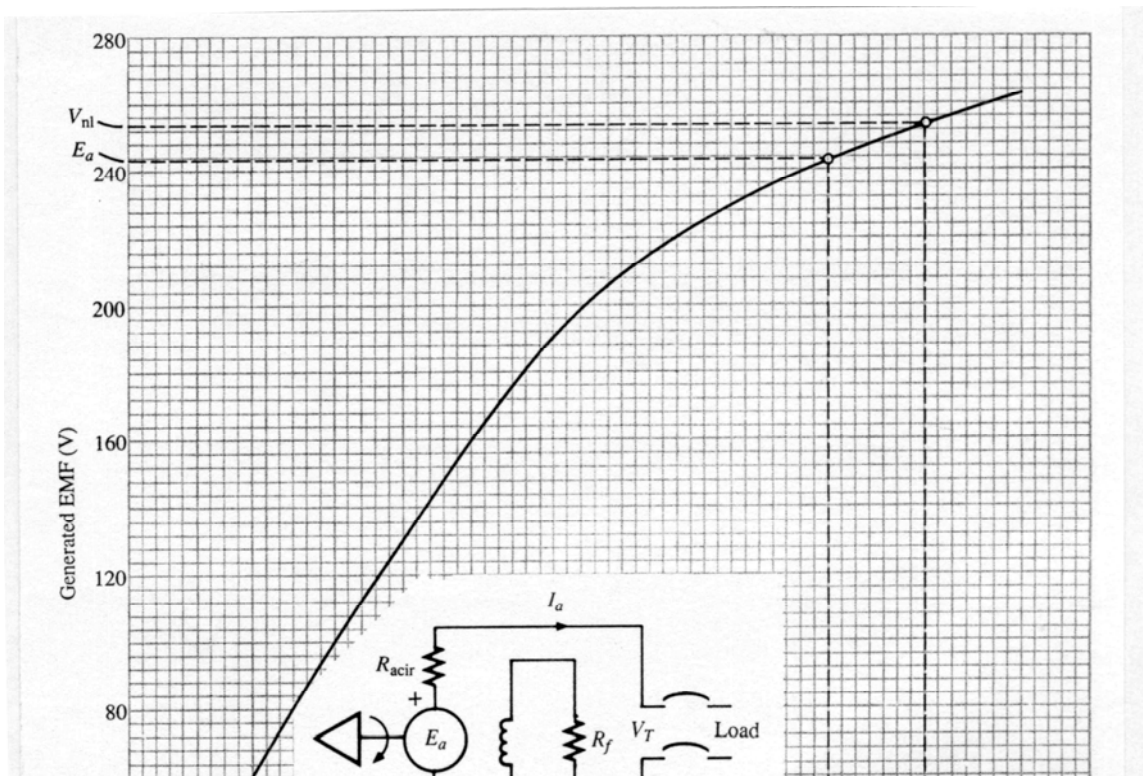
และเมื่อ load switch ปิดวงจร ผลกระทบจาก demagnetizing ของการเกิด armature reaction คือ demagnetizing mmf ( $F_d$ ) ที่แสดงในกราฟรูปที่ 12-8 ทำให้ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $F_{net}$ ) ลดลง นั่นคือ

$$12.6 \quad F_{net} = F_f - F_d$$

จากผลของเส้นแรงแม่เหล็กลดลงทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวม ( $F_{net}$ ) ลดลง จึงทำให้ค่า induced emf voltage ( $E_a$ ) ลดลงจาก no-load voltage

**Example 12-1** A 300 kW , 240 V , 900 r/min , separately excited , noncompensated shunt generator has the following parameters :  $R_a = 0.00234 \Omega$  ,  $R_{IP} = 0.0008 \Omega$  and  $R_f = 18.1 \Omega$ . The shunt field has 1020 turns/pole and is separately excited from a 120 V source through a rheostat. The circuit diagram and magnetizing curve for the generator are shown in Figure 12-9. The equivalent demagnetizing ampere-tuns caused by armature reaction , when supplying rated load at rated voltage and rated temperature is assumed equal to 12.1 percent of the shunt field mmf. Determine:

- no load voltage.
- voltage regulation.
- resistance setting of rheostat necessary to obtain rated voltage at rated conditions.



รูปที่ 12-9 Magnetization curve and circuit diagram for Example 12-1

**Solution** a) no-load voltage ( $V_{nl}$ )

$$\text{จากสมการ } P = V_T I_a \Rightarrow I_a = P / V_T = (300 \times 10^3) / 240 = 1250 \text{ A}$$

$$\text{และสมการ } E_a = V_T + I_a (R_a + R_{IP}) = 240 + 1250 (0.00234 + 0.0008)$$

$$E_a = 243.9 \text{ V.}$$

จาก magnetization curve ในรูปที่ 12-9 เมื่อนำค่า  $E_a = 243.9 \text{ V}$  ไปหาค่า magneto motive force (net mmf) จะได้ค่า  $F_{net} = 5100 \text{ A-t/pole}$  และจากโจทย์กำหนดให้ demagnetizing ampere-turn ของ armature reaction ( $F_d$ ) มีค่าเท่ากับ 12.1% ของ shunt field mmf ( $F_f$ ) นั่นคือ

$$F_d = 12.1 \% F_f = 0.121 F_f$$

$$\text{ดังนั้นจากสมการ } F_{net} = F_f - F_d = F_f - 0.121$$

$F_f$

$$F_f = F_{net} / (1 - 0.121) = 5100 / (1 - 0.121) = 5802 \text{ A-t/pole}$$

จาก magnetization curve ในรูปที่ 12-9 เมื่อนำค่า  $F_f = 5802 \text{ A-t/pole}$  ไปหาค่า no-load voltage

โดยลากเส้นตัดกับ magnetization curve จะได้ค่า  $V_{nl} = 255 \text{ V}$  ดังนั้น

$$V_{nl} \approx \underline{\underline{255 \text{ V}}}$$

**Ans**

b) voltage regulation (VR)

จากสมการ

$$\%VR = [(V_{nl} - V_{rated}) / V_{rated}] \times 100$$
$$= [(255 - 240) / 240] \times 100$$

$$= 6.25 \%$$

**Ans**

c) resistance setting of rheostat ( $R_{rheo}$ )

จากสมการ  $F_f = N_f I_f \Rightarrow I_f = F_f / N_f = 5802 / 1020 = 5.69 \text{ A.}$

เมื่อใช้กฎ ohm's Law กับวงจรของ shunt field circuit จะได้

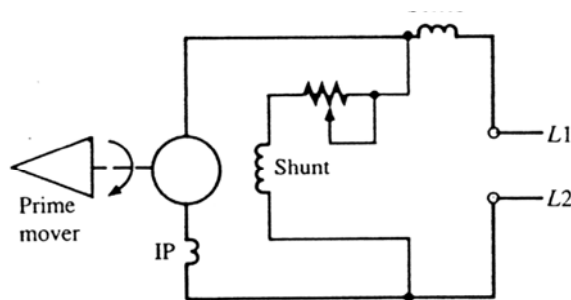
$$V_f = I_f (R_f + R_{rheo}) \Rightarrow R_{rheo} = (V_f / I_f) - R_f$$

$$R_{rheo} = (120 / 5.69) - 18.1 = 3 \text{ } \Omega$$

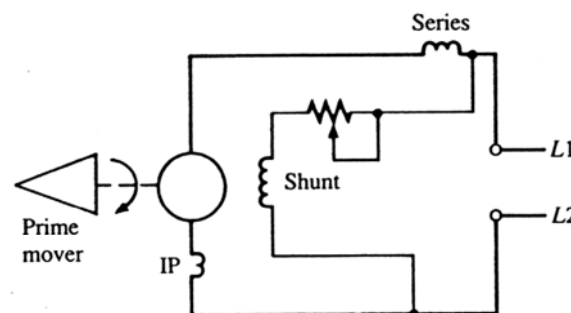
**Ans**

## 12-8 Compound Generator

โครงสร้างของ Compound generator จะเหมือนกับ Compound motor คือ ประกอบด้วยขดลวด series field และขดลวด shunt field โดยขดลวด shunt field ของ compound generator จะต่อแบบ short shunt ตามที่แสดงในรูป 12-10 (a) หรือจะต่อแบบ long shunt ตามที่แสดงในรูป 12-10 (b)



(a)



(b)

รูปที่ 12-10 Compound generator connections: (a) short shunt; (b) long shunt.

จากรูป 12-10 (a) compound generator ที่ต่อแบบ short shunt เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิด voltage drop ที่ตกคร่อมขดลวด series field ซึ่งการต่อแบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากใน compound generator

จากรูป 12-10 (b) compound generator ต่อแบบ long shunt จะทำให้เกิด voltage drop ตกคร่อมขด series field ก่อน จึงทำให้ voltage ในขด shunt field ลดลง

ขดลวด series field ของ compound generator อาจจะต่อแบบ cumulatively หรือ differentially ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน ดังนั้นจากสมการที่ 12.1 ค่า  $E_a = n [(N_f I_f) / R] k_G$  เมื่อรวมค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กในขดลวด series field ( $F_s$ ) และ demagnetizing mmf ของ armature reaction ( $F_d$ ) จะได้ว่า

$$12.7 \quad E_a = n [(F_f + F_s + F_d) / R] k_G$$

เมื่อ :  $F_f =$  shunt field mmf ( $N_f I_f$ ) (A-t/pole)

$F_s =$  series field mmf ( $N_s I_a$ ) (A-t/pole)

$F_d =$  equivalent demagnetizing mmf due to armature reaction (A-t/pole)

ถึงแม้ว่าค่า  $F_d$  จะไม่แน่นอน โดยค่า  $F_d$  จะขึ้นอยู่กับ armature current ( $I_a$ ) แต่ถ้าในวงจร armature circuit มีขดลวด compensating winding ต่อในวงจร จะทำให้เกิดการหักล้างอำนาจแม่เหล็กจากการเกิด armature reaction ดังนั้นค่า  $F_d = 0$

ดังนั้นจากสมการที่ 12.7 ถ้าให้กระแสใน armature เพิ่มขึ้นใน induced emf ( $E_a$ ) โดยขดลวด series field จะขึ้นอยู่กับขนาดของ compounding ถ้าจำนวนรอบของขดลวด series field มาก จะสร้าง emf มากด้วย แม้ว่าจะมี load current เท่ากัน

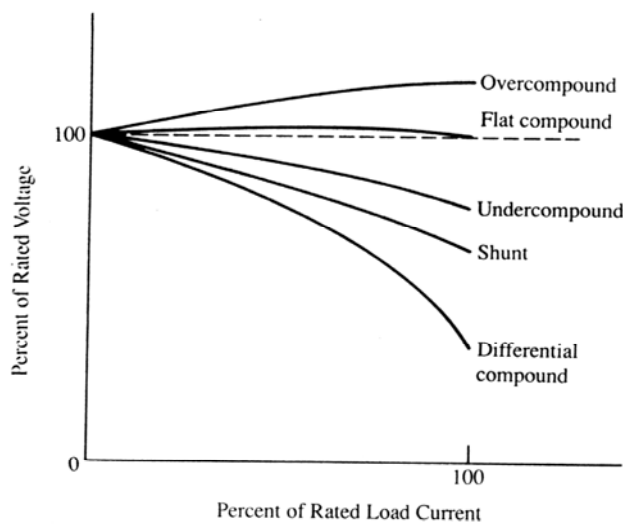


■ ถ้าจำนวนรอบของขด series field ที่เพิ่มเข้าไป มีจำนวนเพียงพอที่จะทดแทน voltage ที่ตกลง (voltage drop) อันเนื่องมาจาก armature-circuit resistance และ armature reaction จนทำให้ terminal voltage มีค่า voltage ตอน no-load เหมือนกับตอน full load เครื่องจะถูกเรียกว่า “**flat compound**”

■ ถ้าจำนวนรอบของขด series field มีจำนวนรอบมากกว่าค่าต่ำสุดที่ต้องการของเครื่องแบบ flat compounded จะทำให้ terminal voltage มีค่าสูงขึ้นด้วยการเพิ่มของ load current เครื่องจะถูกเรียกว่า “**over compound**”

■ ถ้าจำนวนรอบของขด series field มีจำนวนรอบน้อยมาก เครื่องจะถูกเรียกว่า “**under compound**”

■ ถ้าขดลวด series field ต่อแบบ differentially ค่า mmf จะมีค่าเป็นลบ และการเพิ่มกระแสใน armature จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กใน shunt field ลดลง ผลที่ตามมาก็คือค่า emf ของ generator จะลดลง



รูปที่ 1

different degrees of compounding.

จากรูปที่ 12-11 เป็นกราฟแสดงค่า voltage ที่เปลี่ยนแปลงจากตอน no-load ไปสู่ full load ของเครื่อง compound ชนิดต่าง ๆ

0. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด over compound จะใช้เมื่อ DC power ถูกส่งไปในระยะทางไกล ๆ เพราะการเพิ่มของ terminal voltage และการเกิด voltage drop ในสายส่ง (transmission line) จะทำให้เกิดการสมดุลที่ load

0. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด flat compound จะใช้เมื่อ DC power มีระยะทางส่งที่สั้น ๆ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ voltage

0. สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ shunt และ under compound จะทำงานสมดุลเมื่อนำเครื่องมาต่อขนานกันมากกว่าแบบ flat compound และ over compound

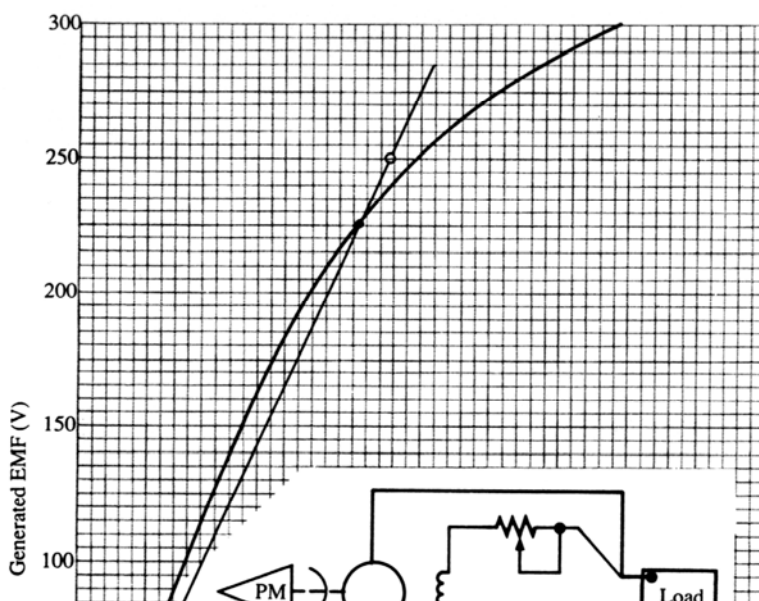
0. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ differential compound จะใช้เมื่อการป้องกันการ overload ซึ่งมีความต้องการมากกว่าการทำให้ voltage มีค่าคงที่ ตัวอย่างการใช้งานของ differential compound generator คือจ่ายไฟให้กับ electric winches และ dredges เมื่อเกิด overload หรือ short-circuit จะทำให้เกิด voltage drop เพียงพอที่จะจำกัดกระแสไว้ได้อย่างปลอดภัย

**Example 12-2** A 250 V, 320 kW , 1150 r/min , self-excited , cumulative-compound , long shunt generator is operating at rated conditions with the shunt field rheostat set for 7.70  $\Omega$  the shunt field has 502 turns /pole , the series field has 1 turn /pole , and the generator parameters , expressed in ohms , are:

Armature	IP+CW	series	shunt
0.00817	0.00238	0.00109	20.2

The circuit diagram and magnetization curve are shown in Figure 12-12 Determine:

- a) induced emf at rated load
- b) no-load voltage
- c) voltage regulation of compounding ?
- d) what is the type of compounding ?



รูปที่ 12-12 Magnetization curve and circuit diagram for Example 12-2

**Solution** (a) induced emf at rated load ( $E_a$ )

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad P_{\text{load}} &= V_T I_{\text{load}} \quad \Rightarrow \quad I_{\text{load}} \\ &= P_{\text{load}} / V_T \\ I_{\text{load}} &= (320 \times 10^3) / 250 = \\ &1280 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ} \quad I_f &= V_T / (R_f + R_{\text{rheo}}) = 250 / (20.2 \\ &+ 7.70) = 8.96 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_a &= I_{\text{load}} + I_f = 280 + 8.96 = \\ &1288.96 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{\text{acir}} &= R_a + R_{\text{IP+CW}} + R_s = 0.00817 + \\ &0.00238 + 0.00109 = 0.01164 \ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad E_a &= V_T + I_a R_{\text{acir}} = 250 + \text{---} \\ (1288.96 \times 0.00164) &= 265 \text{ V} \end{aligned}$$

**Ans**

b) no-load voltage ( $V_{nl}$ )

เมื่อ no-load ค่า mmf ของขดลวด series field = 0 และ induced emf หาได้จากเส้นตัดของ field-resistance line กับ magnetization curve ตามที่แสดงในกราฟรูป 12-12

ค่า voltage rated = 250 V. จะนำมาใช้ในการหาเส้น field-resistance line

$$\begin{aligned} \text{และจากสมการ} \quad F_f &= N_f I_f = (502)(8.96) = 4498 \\ &\text{A-t/pole} \end{aligned}$$

จากกราฟ magnetization curve เมื่อลากเส้น field-resistance line จากแกน 0 ไปยัง rated คือ 250 V และ 4498 A-t /pole จะได้จุดตัดระหว่างเส้น field-resistance line กับ magnetization curve เมื่อลากเส้นจากจุดตัดไปยัง generated emf จะได้ค่า no-load voltage ประมาณ 225 V นั่นคือ

$$V_{nl} \approx 225 \text{ V.}$$

**Ans**

c) voltage regulation (VR)

จากสมการ

$$\begin{aligned} \% \text{ VR} &= [(V_{nl} - V_{\text{rated}}) / V_{\text{rated}}] \times 100. \\ &= [(225 - 250) / 250] \times 100. \\ &= -10 \% \end{aligned}$$

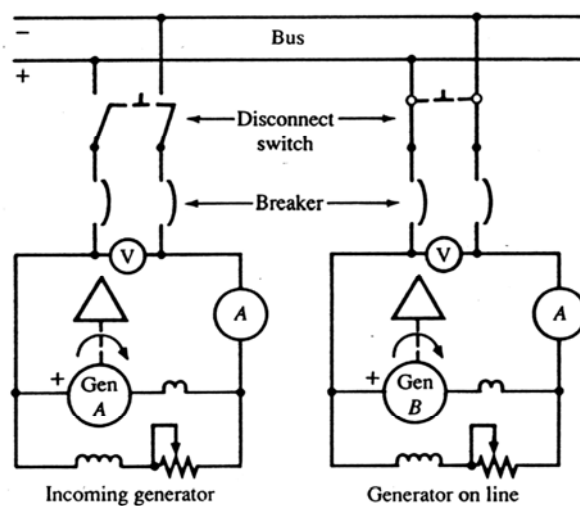
**Ans**

d) what is the type of compounding\_?

The machine is over compounded \_\_\_\_\_ **Ans**

### 12-9 การต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อ load ที่นำมาต่อกับระบบจ่ายไฟฟ้ามีค่ามากกว่า generator ที่จะจ่ายไฟฟ้าได้อย่างปลอดภัย จึงจำเป็นต้องนำ generator อีกตัวมาต่อขนานเพิ่ม เพื่อที่รองรับ load ได้



รูปที่

on for parallel

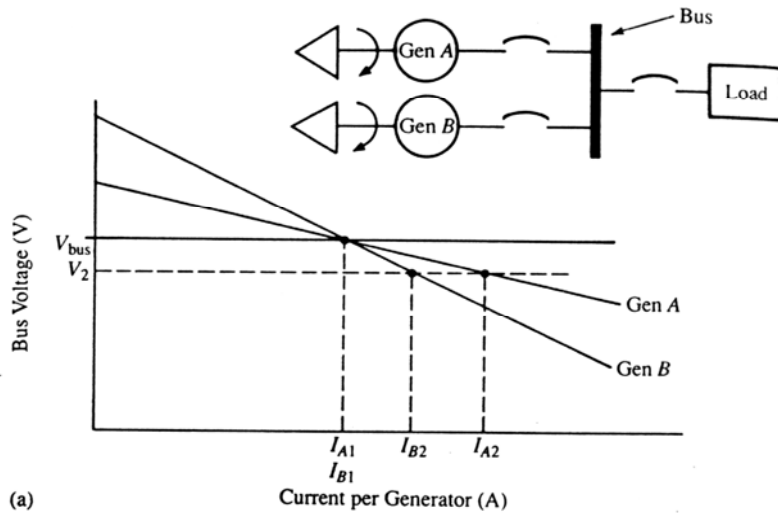
operation of DC generator

จากรูป 12-13 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า generator B ต่อเข้ากับระบบ bus และ generator A นำมาต่อขนานกับ generator B

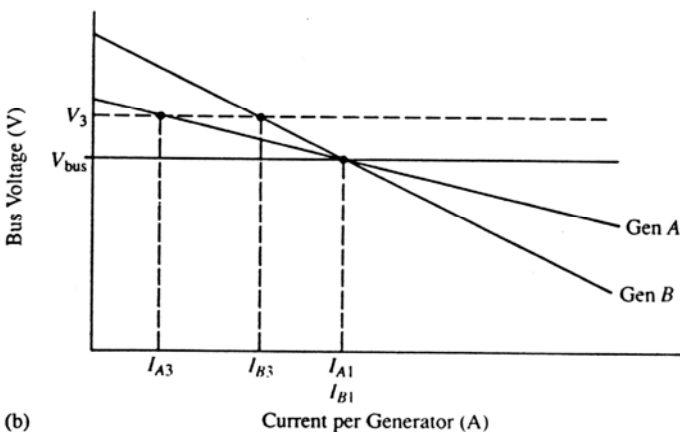
- **Procedure for Paralleling** (ขั้นตอนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)
  1. ปิด disconnect switch ของ generator A ที่นำมาต่อขนาน
  2. Start เครื่อง prime mover และปรับแต่งความเร็วให้ได้ตาม rated speed.
  3. ปรับแต่ง voltage ของ generator A ที่นำมาต่อขนาน ให้มี voltage สูงกว่า voltage ของ bus เล็กน้อย ประมาณ 2-3 V.
  4. ปิด breaker ของ generator A. เพื่อให้ต่อวงจร
  5. ปรับแต่ง rheostat ที่ shunt field ของเครื่องที่นำมาต่อขนานในทิศทางเพิ่ม voltage และเครื่องที่ต่ออยู่ที่ bus ให้ลด voltage ลง จนกระทั่งการกระจาย load ได้ตามที่ต้องการ โดยการกระจายของ load จะปรากฏแสดงบน ammeter
- ก่อนที่จะทำการขนานเครื่องต้องตรวจสอบขั้วเพื่อให้แน่ใจว่าขั้วถูกต้อง โดยขั้วบวก (+) ของเครื่องที่จะนำมาต่อขนานจะต้องต่อกับขั้วบวก (+) ของ bus วิธีการตรวจสอบขั้วจะใช้เครื่องมือวัด DC-voltmeter
- การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยขั้วที่สลับกัน จะทำให้เกิด short-circuit ใน generator ซึ่งจะเป็นผลทำให้แปรงถ่าน , commutator ได้รับความเสียหาย และจะทำให้ generator ปลดออกจาก bus เนื่องจากเกิด fault current ( short-circuit) ดังนั้นก่อนที่จะทำการสับ breaker ต้องตรวจสอบขั้วต่อให้แน่ใจว่าต่อขั้วถูกต้อง

## 12-10 การแบ่ง Bus-load ระหว่างการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การแบ่ง load ที่มาจาก bus load ระหว่าง DC generator 2 เครื่อง ที่นำมาต่อขนานกัน หาได้จาก voltage droop (การเลื่อนขึ้น - ลงของ voltage) ตามที่แสดงในรูป 12-14



(a)



(b)

or, with

operating in parallel: (a) increasing bus load ; (b) decreasing bus load.

จากรูป 12-14 (a) เมื่อ generator A และ generator B มี voltage droop ที่แตกต่างกันมาขนานกัน และจ่าย total load current เท่ากัน ( $I_{A1}$  และ  $I_{B1}$ ) คุณสมบัติของ droop คือ การแสดงให้เห็นถึงการเลื่อนขึ้น-ลง ของ voltage เมื่อ load ที่ bus เพิ่มขึ้นหรือลดลง การเพิ่มขึ้น load ที่ bus จะทำให้ voltage droop ภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และลด voltage ใน bus ตามที่แสดงด้วยเส้นปะ  $V_2$  โดย Gen B มี voltage droop มาก จะได้รับส่วนแบ่งจาก load น้อย คือ  $I_{B2}$  ส่วน Gen A มี voltage droop น้อย จะได้รับส่วนแบ่งจาก load มาก คือ  $I_{A2}$

จากรูป 12-14 (b) เมื่อ load ที่ bus ลดลง จะทำให้ voltage droop ภายใน generator ลดลงด้วย ดังนั้น bus voltage จะเพิ่มขึ้น ตามที่แสดงด้วยเส้นปะ  $V_3$  โดย

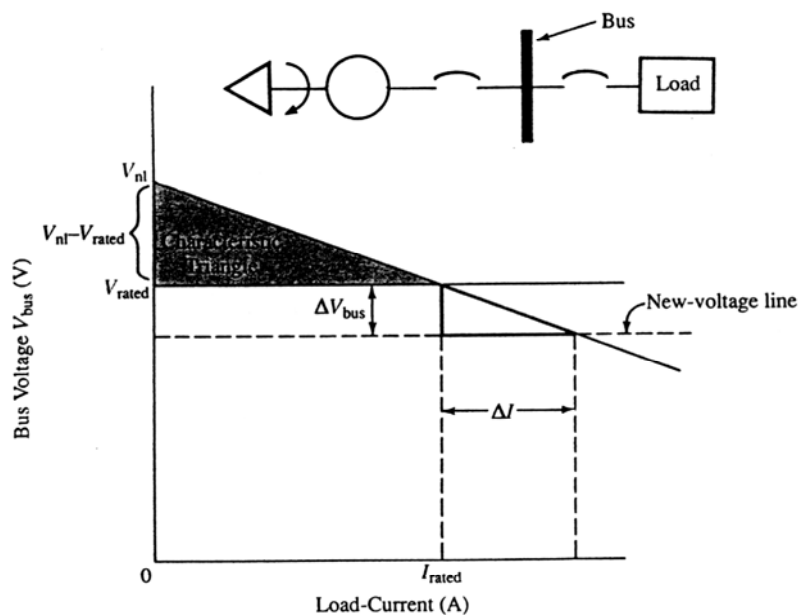
Gen A มี voltage droop น้อย จะได้รับส่วนแบ่งจาก load มาก คือ  $I_{A3}$  ซึ่ง  $I_{A3}$  จะมีค่าน้อยกว่า total load current  $I_{A1}$  เนื่องจากการเพิ่มของ bus voltage จะทำให้กระแสลดลง ( $P = IV$ )

การนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่อง มาต่อขนานกัน จะต้องมีการ voltage regulation เหมือนกัน และทำงานสมดุลกัน โดย voltage regulation จะมีค่าประมาณ 3-8 % ด้วยการปรับแต่ง governor และ/หรือ การออกแบบทางไฟฟ้า ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มี power rating ต่างกัน แต่ voltage regulation เหมือนกัน การแบ่ง load ของ bus load จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ power rating ของแต่ละเครื่อง

### 12-11 การใช้คุณลักษณะของ Triangle แก้ปัญหาระหว่างการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การแก้ปัญหาเกี่ยวกับ load distribution ระหว่าง DC generator 2 เครื่อง ที่นำมาต่อขนานกัน อาจจะทำได้โดยหาจากคุณสมบัติของ triangle ของแต่ละเครื่อง และใช้ Triangle ที่เหมือนกันในการแก้ปัญหา

เพื่อหาคำตอบ



รูปที่ 12-15 Ch

generator

จากรูปที่ 12-15 แสดงคุณลักษณะของ triangle ที่คงที่จากค่า voltage droop และไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ใน field rheostat setting และ bus voltage คือ terminal voltage ของ generator ซึ่งเราเรียกว่า “output voltage”

การเพิ่ม load ใน bus load จะทำให้ bus voltage ลดลง ตามที่แสดงด้วยเส้นปะ (new voltage line)

ดังนั้นจุดตัดของเส้นปะ new voltage line กับจุดตัดของ load voltage ( $V_{rated}$ ) จะทำให้เกิด new triangle ที่

มีลักษณะคล้ายกับ characteristic triangle ด้านบน

ดังนั้นจากรูปที่ 12-15 characteristic triangle จะได้  $(V_{nl} - V_{rated}) / I_{rated}$

และ new triangle จะได้  $\Delta V_{bus} / \Delta I$

จากทฤษฎีของ triangle ที่มีลักษณะเหมือนกันหรือคล้ายกัน ดังนั้นจะได้ characteristic triangle เท่า

กับ new triangle นั่นคือ

$$12.8 \quad \boxed{\Delta V_{bus} / \Delta I = (V_{nl} - V_{rated}) / I_{rated}}$$

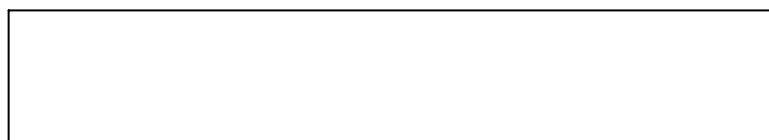
จากสมการของ voltage regulation

$$\% VR = [(V_{nl} - V_{rated}) / V_{rated}] \times 100$$

ดังนั้น

$$\boxed{V_{nl} - V_{rated} = (VR / 100) \times V_{rated}} \quad \text{—————} \quad 12.9$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 12.9 ลงในสมการที่ 12.8 จะได้







รูปที่ 12-16 Illustrations for Example 12-3 : (a) one-line diagram ; (b) characteristic triangle ;  
(c) load-voltage characteristic.

**Solution** (a) new bus voltage ( $V_{bus}$ )

$$\begin{aligned} \text{Gen A : } I_{A, \text{ rated}} &= P / V = (300 \text{ kW}) / (250\text{V}) \\ &= (300 \times 10^3) / 250 = 1200 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gen B : } I_{B, \text{ rated}} &= P / V = (400 \text{ kW}) / (250\text{V}) \\ &= (400 \times 10^3) / 250 = 1600 \text{ A} \end{aligned}$$

จากรูป 12-16 (b) เมื่อนำข้อมูลจาก characteristic triangle ไปแทนในสมการ  
จะได้

$$\begin{aligned} \text{Gen A : } \Delta V_{bus} / \Delta I_A &= [(VR / 100) \times V_{\text{rated}}] / \\ I_{A, \text{ rated}} &= [(3 / 100) \times 250] / 1200 \\ &= 0.00625 \end{aligned}$$

$$\Delta I_A = \Delta V_{bus} / 0.00625 = 160 \Delta V_{bus}$$

$$\begin{aligned} \text{Gen B : } \Delta V_{bus} / \Delta I_B &= [(VR / 100) \times V_{\text{rated}}] / \\ I_{B, \text{ rated}} &= [(5 / 100) \times 250] / 1600 \\ &= 0.0078125 \end{aligned}$$

$$\Delta I_B = \Delta V_{bus} / 0.0078125 = 128 \Delta V_{bus}$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแส bus คือ

$$\Delta I_A + \Delta I_B = 160 \Delta V_{bus} + 128 \Delta V_{bus} = 288 \Delta V_{bus} \quad (1)$$

โจทย์กำหนดเมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาต่อขนานกันและส่วนแบ่งของ bus load คือ 350 kW , 250 V นั่นคือ

$$\text{bus current (I}_{\text{rated}}) = P / V = (350 \times 10^3) / 250 = 1400 \text{ A}$$

และเมื่อกระแสของ bus load เพิ่มขึ้นเป็น 2500 A นั่นคือ

$$\Delta I_A + \Delta I_B = 2500 - 1400 = 1100 \text{ A} \quad (2)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (1) กับสมการ (2) จะได้

$$288 \Delta V_{\text{bus}} = 1100$$

$$\Delta V_{\text{bus}} = 1100 / 288 = 3.82 \text{ V}$$

จากรูป 12-16 (c) เมื่อกระแสของ bus load เพิ่มขึ้น จะทำให้ bus voltage ลดลง นั่นคือ

$$V_{\text{bus}} = V_{\text{rated}} - \Delta V_{\text{bus}} = 250 - 3.82 = 246.18 \text{ V}$$

**Ans**

b) current supplied by each generator ( $I_A$  และ  $I_B$ )

จากรูป 12-16 (c) จะได้

$$I_A = 700 + \Delta I_A = 700 + (160 \Delta V_{\text{bus}}) = 700 + (160 \times 3.82)$$

$$I_A = 1311 \text{ A}$$

**Ans**

$$I_B = 700 + \Delta I_B = 700 + (128 \Delta V_{\text{bus}}) = 700 + (128 \times 3.82)$$

$$I_B = 1189 \text{ A}$$

**Ans**

☛ จะเห็นว่ากระแส  $I_A = 1311 \text{ A}$  ซึ่งเกินกว่า rated current ของ Gen A ( $I_{A, \text{rated}} = 1200 \text{ A}$ )

ดังนั้น Gen A จะ overload และเมื่อเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ จะได้

$$[(1311 - 1200) / 1200] \times 100\% = 9.2\%$$


---

**Example 12-4** A 100 kW , 250 V machine A is in parallel with a 300 kW , 250 V machine B. The voltage regulation of both machine is 4.0 percent. Machine A is carrying 200 A and machine B is carrying 500 A. Determine:

- (a) the increment increase in load on each machine if an additional 400 A load is connected to the bus
- (b) current carried by each machine

**Solution** (a) the increment increase in load on each machine if an additional 400 A load is connected to the bus ( $\Delta I_A$  ,  $\Delta I_B$ )

**Machine A :**  $I_{A, \text{rated}} = P / V = (100 \times 10^3) / 250 = 400 \text{ A}$

จากสมการ  $\Delta V_{\text{bus}} / \Delta I_A = [(VR / 100) \times V_{\text{rated}}] / I_{A, \text{rated}}$

$$= [(4 / 100) \times 250] / 400$$

$$= 0.025$$

$$\Delta I_A = \Delta V_{\text{bus}} / 0.025 = 40 \Delta V_{\text{bus}}$$

**Machine B :**  $I_{B, \text{rated}} = P / V = (300 \times 10^3) / 250 = 1200 \text{ A}$

จากสมการ  $\Delta V_{\text{bus}} / \Delta I_B = [(VR / 100) \times V_{\text{rated}}] / I_{B, \text{rated}}$

$$= [(4 / 100) \times 250] / 1200$$

$$= 0.00833$$

$$\Delta I_B = \Delta V_{bus} / 0.00833 =$$

$$120 \Delta V_{bus}$$

โจทย์กำหนดเมื่อมี load มาต่อเพิ่ม จะทำให้กระแสที่ bus เพิ่มขึ้นเป็น 400 A นั่นคือ

$$\Delta I_A + \Delta I_B = 400 \text{ A}$$

ดังนั้น

$$40 \Delta V_{bus} + 120 \Delta V_{bus} = 400$$

$$\Delta V_{bus} = 400 / (40 + 120) = 2.5 \text{ V}$$

นั่นคือ  $\Delta I_A = 40 \Delta V_{bus} = 40 (2.5) = \underline{100 \text{ A}}$

Ans

$$\Delta I_B = 120 \Delta V_{bus} = 120 (2.5) = \underline{300 \text{ A}}$$

Ans

(b) current carried by each machine ( $I_A$  และ  $I_B$ )

โจทย์กำหนดให้ machine A is carrying 200 A และ machine B is carrying 500 A นั่นคือ

$$\Delta I_A = 200 + \Delta I_A = 200 + \underline{100} = 300 \text{ A}$$

Ans

$$\Delta I_B = 500 + \Delta I_B = 500 + \underline{300} = 800 \text{ A}$$

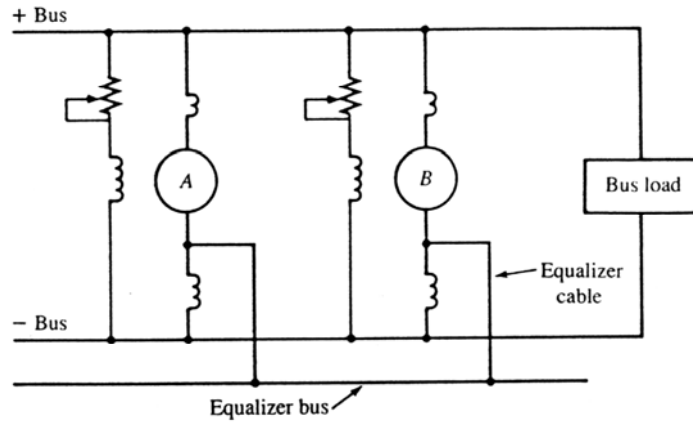
Ans

-----

## 12-12 การต่อขนาน Compound Generator

การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด compound generator อย่างสมบูรณ์  
จำเป็นต้องขนานขดลวด

series field ด้วย โดยการต่อเข้ากับ equalizer bus ตามที่แสดงในรูป 12-17



รูปที่ 12-17

Equalizer bus

Equalizer

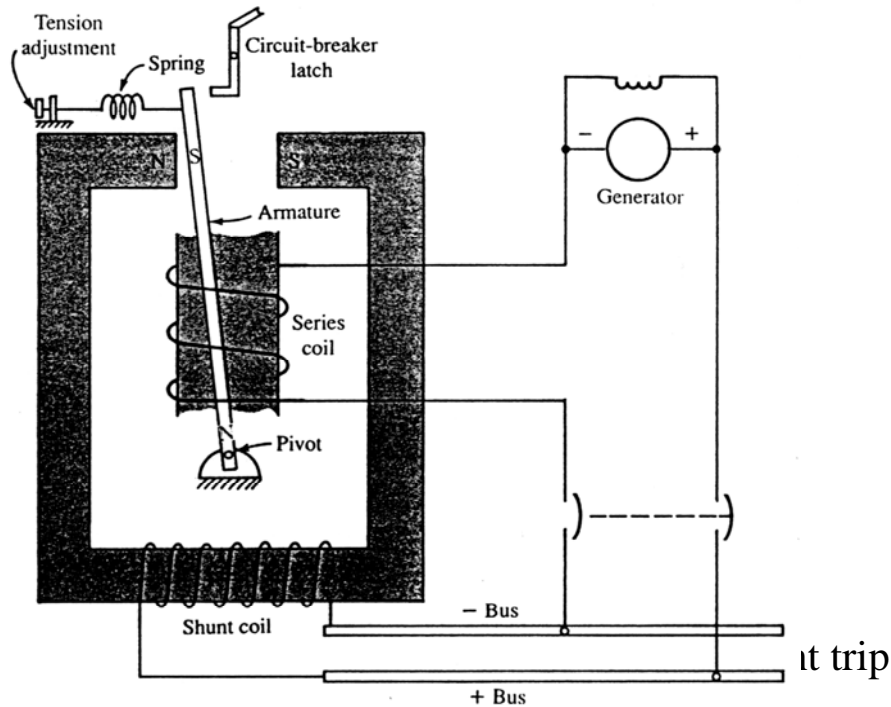
ถ้า นำ compound generator 2 เครื่อง มาต่อขนานกัน โดยไม่มี equalizer และการแบ่ง bus load ของเครื่องทั้ง 2 เครื่อง ต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพราะการที่จะจ่าย load จากเครื่องหนึ่งไปยังอีกเครื่องหนึ่งโดยการปรับที่ field rheostat จะเป็นผลทำให้เครื่องที่มี excitation สูงกว่า แย่งเอา load ไปทั้งหมด และจะขับตัวอื่นให้ทำงานเป็น motor

นอกจากนี้การที่ generator ถูกขับตัวอื่นให้ทำงานเป็น motor โดยไม่มี equalizer จะเป็นผลทำให้กระแสในขดลวด series field กลับทิศทาง ทำให้มันแสดงเหมือนว่า differential compound motor ถ้า generator ที่แสดงการทำงานเป็น motor ไม่เกิดการ tripped off ออกจาก bus โดยทันที และแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf ในขดลวด series field มากกว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf ในขด shunt field จะทำให้ขั้วของอำนาจแม่เหล็กที่ติดค้างอยู่จะกลับทิศทาง และเมื่อเครื่องถูก starting ใหม่ จะสร้าง build up voltage ในทิศทางตรงข้าม แต่ถ้าเราใช้ equalizer เมื่อเกิดอุบัติเหตุหรือ compound generator ทำงานกลายเป็น motor จะไม่สามารถกลับทิศทางของขั้วได้

ค่าความต้านทานของ equalizer cable แต่ละตัวจะมีค่าไม่เกิน 20% ของค่าความต้านทานของขดลวด series field

## 12-13 Reverse-current Trip

Reverse-current trip เป็นอุปกรณ์ในการป้องกันที่ generator ที่จะทำงานเป็น motor รูปแบบและการต่อของ reverse-current trip ตามที่แสดงในรูปที่ 12-18



จากรูปที่ 12-18 จะมีขดลวด series coil พันอยู่รอบ ๆ แท่งเหล็กเรียกว่า “armature” และต่ออนุกรมกับ armature ของ generator โดยแท่งเหล็กจะถูกยึดด้วยหมุด (pivot) ที่ส่วนล่าง และเคลื่อนตัวเป็นอิสระภายใน coil เมื่อมีกระแสไหลผ่านขด series coil จะทำให้แท่งเหล็กมีอำนาจแม่เหล็กในทิศทางตั้งตรง ขดลวด shunt coil จะต่อคร่อมกับ bus และสร้างเส้นแรงแม่เหล็กให้กับเกือกม้าขั้ว N และ S เมื่อขดลวดทั้งสองต่อวงจรร่วมกันกระแสของ generator จะอยู่ในทิศทางที่สอดคล้องกันช่วยยึดแท่งเหล็กให้อยู่ในตำแหน่งไม่ให้ trip

ถ้า generator voltage มีค่าต่ำกว่า voltage ที่ bus กระแสใน generator จะกลับทิศทาง ทำให้ขั้วแม่เหล็กของแท่งเหล็กกลับทิศทางด้วย โดยเปลี่ยนจากขั้ว N เป็น S และขั้ว S เป็น N ดังนั้นแท่งเหล็กที่อยู่ระหว่างเกือกม้าก็จะเปลี่ยนเป็นขั้ว N ทำการผลักออกจากขั้ว N ของเกือกม้า และดูดเข้ากับขั้ว S ของเกือกม้า ทำให้แท่งเหล็กเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับ circuit-breaker latch ดังนั้นเครื่องก็จะ tripped off ออกจาก line

SUMMARY OF EQUATIONS FOR PROBLEM SOLVING

$$E_a = n [(N_f I_f) / \mathcal{R}] k_G$$

$$(R_f + R_{rheo})$$

$$E_a = I_f$$

$$\% VR = (V_{nl} - V_{rated}) / V_{rated} \times 100$$

$$V_T + I_a R_{acir}$$

$$E_a =$$

$$R_{acir} = R_a + R_{IP} + R_{cw}$$

$$V_T + I_a (R_a + R_{IP})$$

$$E_a =$$

$$F_{net} = F_f - F_d$$

$$f + F_s + F_d) / \mathcal{R}] k_G$$

$$E_a = n [(F$$

$$\Delta V_{bus} / \Delta I = (V_{nl} - V_{rated}) / I_{rated}$$

$$(VR / 100) \times V_{rated}$$

$$V_{nl} - V_{rated} =$$

$$\Delta V_{bus} / \Delta I = [(VR / 100) \times V_{rated}] / I_{rated}$$

-----



## บทที่ 13

### การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า

#### 13-1 บทนำ

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าใช้วิธีการควบคุมโดย **Magnetic, Solid-state** และ **Programmable controllers**

การควบคุมโดย **Magnetic** เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง สำหรับการควบคุมด้วย **Solid-state** จะใช้ในส่วนของวงจร **Power circuit** และ **Firing circuit** เท่านั้น ส่วน **Programmable controllers** เป็น

รูปแบบการควบคุมของ **Digital electronic** ซึ่งใน **Programmable memory** จะเป็นตัวเก็บคำสั่งเพื่อใช้ทำหน้าที่สำคัญ เช่น **Logic, Sequencing, Timing, Counting** และ **Arithmetic** เพื่อควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า

#### 13-2 ส่วนประกอบของ Controller

**Magnetic controllers** จะใช้อำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมการทำงานของ **Relays** และ **Contactors** เพื่อทำการ **Start** และ **Stop** มอเตอร์ไฟฟ้า และผ่านอุปกรณ์ควบคุมเพื่อจำกัดกระแส (**Limit current**) จำกัดแรงบิด (**Limit torque**) จำกัดความเร็ว (**Limit speed**) การเปลี่ยนความเร็วและการกลับทิศทางการหมุนเพื่อให้มอเตอร์

เร่งได้อย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงเวลาการทำงาน และมี **Dynamic braking** ป้องกันความเสียหายจากการเกิด **Overload** การควบคุมมอเตอร์อาจทำได้โดยอัตโนมัติด้วยระบบ **Programming** โดยใช้อุปกรณ์ตั้งเวลาทางไฟฟ้า, **Sequence interlocks** และ **Pilot switches**

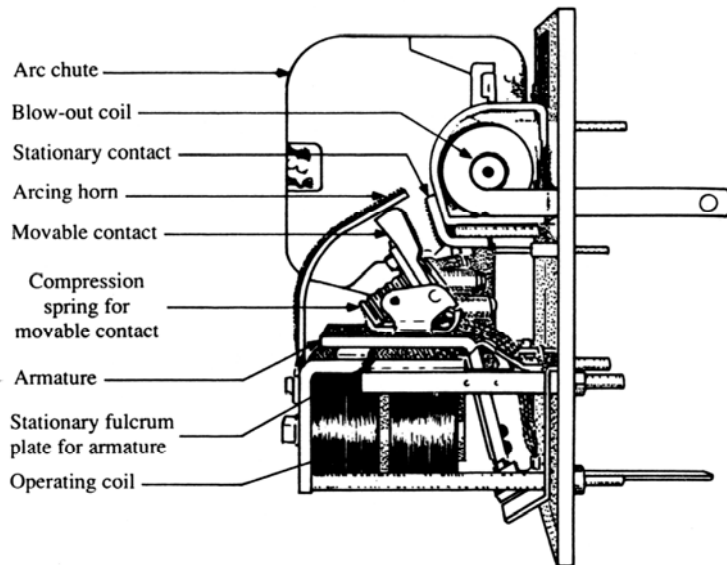
- **Magnetic Contactors**

**Magnetic Contactors** คือ กลไกที่ใช้แรงดึงดูดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการทำงาน โดยจะเป็นตัวทำให้ **Contact** ปิดหรือเปิดวงจรไฟฟ้า

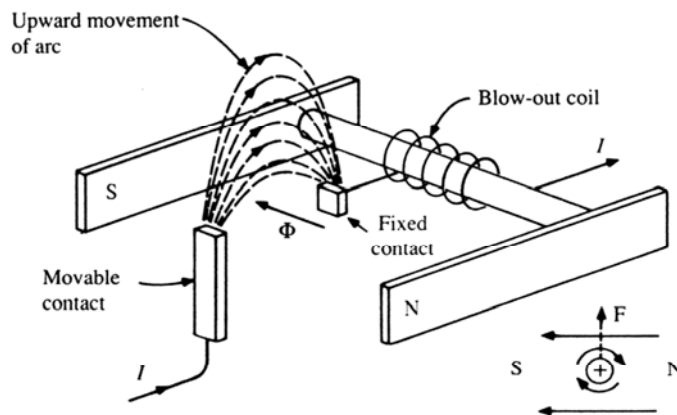
**Contact** จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ **Contact** ชนิดที่โดยปกติเปิดอยู่ เรียกว่า “**Normally Open Contact**” และ “**Normally Closed Contact**”

จากรูปที่ 13-1 (a) แสดงรูปตัดของ **DC magnetic contactor** ที่อาศัยการทำงานด้วยความร้อน กล่าวคือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด (**coil**) จะดึงให้ **armature** ทำงาน ทำให้ **contact** ปิดวงจร และ **blow-cut coil** จะต่ออนุกรมกับ **stationary contact** สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก **blow** เป็นเส้นโค้งรูปราง (chute) โดยการขยายตัวออก และเมื่อเริ่มเย็นตัวลง **contact** จะเปิดออก โดย **contact** ที่อยู่กับที่ (**stationary contact**) และ **contact** ที่เคลื่อนที่

(movable contact) จะถูกกดให้ต่ำลง ซึ่งจะทำให้ไหม้โดยการเผาไหม้ blow-out coil จะเลื่อนส่วนโค้งไปที่ arcing horn และไปที่ส่วนโค้งตอนบนของ stationary contact ทำให้การเผาไหม้ดับลง



(a)



(b)

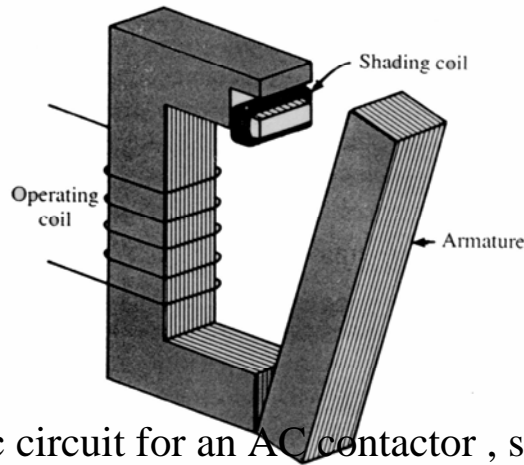
รูปที่ 13-

contactor ;  
ow-out

จากรูปที่ 13-1 (b) แสดงลักษณะของ magnetic blow-out โดยกระแสในขดลวดจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางของขั้ว N และ S เมื่อ contact แยกออกจาก arc จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็ก ผลลัพธ์ก็คือ จะผลัก arc ขึ้นไปด้านบน

Alternating-current contactor และ Relay จะประกอบด้วย arcing horn และ blow-out coil ถ้าเป็นแบบ magnetic core แกนเหล็กจะต้อง laminated เพื่อลด

eddy current และ pole shader จะใช้ป้องกันเส้นแรงแม่เหล็กไม่ให้ลดลงไปที่ศูนย์ (zero) เมื่อกระแสในขดลวดลดลงมาในตำแหน่งแกนศูนย์



รูปที่ 13-2 Magnetic circuit for an AC contactor , showing the shading coil

จากรูปที่ 13-2 ประกอบด้วยขดลวดพันอยู่บนแกนซึ่งทำด้วยวัสดุแม่เหล็ก และมีแกนเหล็ก (armature) แบบเคลื่อนที่ได้ ถ้าไม่มีกระแสไหลในขดลวด แกนเหล็ก armature จะอยู่ในตำแหน่งเปิดวงจร และเมื่อมีกระแสไหลในขดลวดแกนเหล็กจะกลายเป็นแม่เหล็ก และถ้ามีกระแสสูงมากจะทำให้แกนเหล็ก armature ปิดวงจรกับ shading coil

Shading coil จะพันขดลวดจำนวน 1 รอบ ลัดวงจรบนผิวหน้าของแกนเหล็ก ซึ่งจะเหมือนกับการลัด

วงจรของขด secondary ของ transformer Shading coil จะช่วยลดการสั่นของแกนเหล็กเนื่องจากความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ กล่าวคือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับ จะเป็นรูป plus และมีค่าเป็นศูนย์ 2 ครั้ง ใน 1 cycle แรงดึงที่เกิดจากอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงเป็นศูนย์ 2 ครั้ง ใน 1 cycle เช่นกัน ซึ่งจะเกิดผลทำให้เกิดการสั่นของแกนเหล็กที่เคลื่อนที่ เมื่อติดตั้ง Shading coil จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นช้ากว่าเส้นแรงแม่เหล็กบนแกนเหล็กประมาณ 90 องศาไฟฟ้า ไม่ว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่แกนทั้งสองจะมีทิศทางใด (เป็นบวกหรือลบ) ก็ตาม แรงดึงที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียว โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแกนของตน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแรงดึงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจากค่าเฉลี่ย และจะไม่มีค่าเป็นศูนย์เลย แม้ว่าที่ขดลวดจะมีค่าเป็นศูนย์ถึง 2 ครั้ง ใน 1 cycle ก็ตาม

- **Contactor**

**Contactor** หมายถึง สวิตซ์ที่ทำงานโดยอาศัยอำนาจแม่เหล็กช่วยให้เกิดการตัด-ต่อวงจรกำลัง (power circuit) ที่ใช้กระแสค่อนข้างสูง (ประมาณ 30 – 300 A) Contactor มีส่วนประกอบและโครงสร้างเหมือนกับ relay แต่มีขนาดใหญ่กว่า และอาจจะมีอุปกรณ์ช่วยดับ arc ที่ contact เพิ่มขึ้น

- **Relay**

Relay คือ สวิตซ์ที่ทำงานโดยอาศัยอำนาจแม่เหล็กช่วยในการตัด-ต่อวงจรควบคุม (control circuit) เช่น coil ของ contactor การทำงานของ relay จะอาศัยหลักการทำงานในรูปของกระแสไฟฟ้า (current) , แรงดันไฟฟ้า (voltage) , ความร้อน (heat) หรือแรงดัน (pressure) ขึ้นอยู่กับชนิดของ relay

Relay จะต้องมีความไวต่อการควบคุมในการป้องกันการเกิด overload , undervoltage , excessive speed และ excessive torque

- **Auxiliary Relay**

Auxiliary relay (รีเลย์ช่วย) บางทีเรียกว่า รีเลย์ควบคุม (control relay) ซึ่งมีลักษณะการทำงานเหมือนกับ contactor ทั่ว ๆ ไป แต่จะแตกต่างกันที่ contact ของ Auxiliary relay จะทนกระแสได้ต่ำ

- **Time Relay**

Time relay (รีเลย์ตั้งเวลา) เป็น relay ที่ช่วยในการควบคุมอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถตั้งเวลาการทำงานของ contact ได้ คือจะให้ต่อหรือตัดวงจรภายในเวลาเท่าใด ภายหลังที่กดสวิตซ์ให้ตัวมันทำงาน ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น ทำงานตั้งเวลาด้วยสนามแม่เหล็ก , ด้วยแม่คานิก และด้วยความร้อน

- **Interlock**

Interlock หมายถึง การที่ contact ของวงจรส่วนหนึ่งอาจจะไปเป็น switch หรือ contactor ก็ได้ ขณะทำงานแล้วไปทำให้วงจรส่วนอื่น ๆ ไม่สามารถทำงานได้

### 13-3 อุปกรณ์ป้องกันการเกิด Overload

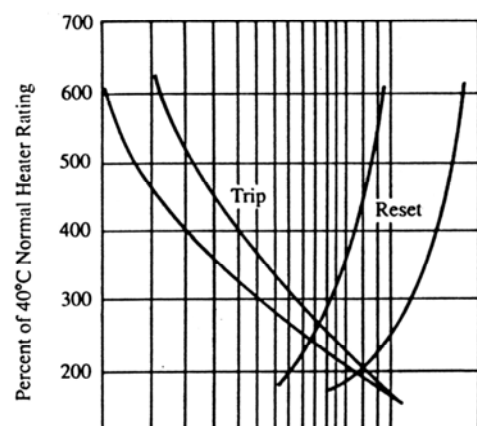
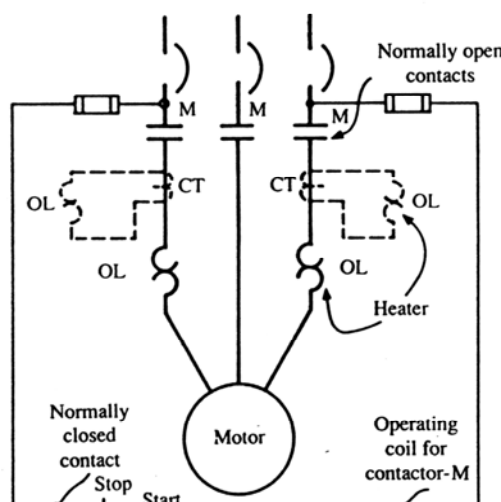
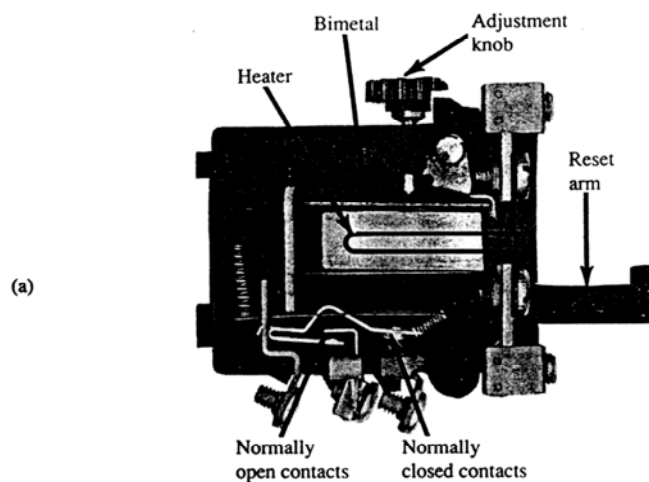
เมื่อเกิด Overload จะทำให้มอเตอร์ดึงกระแสมากเกินไป ถ้าปล่อยทิ้งไว้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง จะมีผลทำให้เกิดความร้อนที่มอเตอร์และชุดควบคุมอาจจะได้รับความเสียหายได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันจึงจำเป็นต้องติดตั้ง relay เพื่อควบคุมการเกิด overload ในมอเตอร์ ซึ่ง relay ที่ติดตั้งจะต้องมีคุณสมบัติแบบ time-current และสามารถกำหนดเวลาให้สั้นลง ทำให้มีกระแส lock-rotor สูงที่จำเป็นต่อการ starting มอเตอร์ และยังป้องกันการเกิด overheating

เนื่องจาก rotor หยุดกะทันหัน (stalled rotor) , low voltage , low frequency , unbalanced voltage และ motor faults ถึงแม้ว่าการเกิด over-current นั้นจะมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับ การเกิด short circuit แต่มันจะเป็นผลทำให้อายุของฉนวนในมอเตอร์สั้นลง

Motor-overload relay เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันการเกิด over-current เท่านั้น จะไม่ป้องกันการเกิดการลัดวงจร short circuit หรือ ground การป้องกันการเกิด short circuit หรือ ground ส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์ประเภท fuse หรือ circuit breaker ในการป้องกัน

### • Thermal Overload Relay

ทั่ว ๆ ไปแล้ว Thermal-overload Relay นิยมทำเป็นแบบ bimetal โดยใช้กระแสที่ไหลผ่าน load เป็นตัวควบคุมอีกทีหนึ่ง การตัดวงจรจะอาศัยการงอของ bimetal ขณะร้อน เนื่องจากกระแสไหลผ่านมาก และจะกลับมาต่อวงจรอีกครั้งเมื่อ bimetal เย็นตัวลง



รูปที่ 13-3 Thermal-overload relay : (a) cutaway view; (b) circuit diagram; (c) current-time characteristics for tripping and resetting.

จากรูปที่ 13-3 (a) แสดง Thermal-overload relay ที่ประกอบด้วยโลหะต่างชนิด 2 ชนิด (bimetallic element) , ขดลวดให้ความร้อน (heater element) , contact ปิดวงจร (normally closed contact) , contact เปิดวงจร (normally open contact) และปุ่ม reset (reset button)

**Bimetallic element** จะประกอบด้วยโลหะต่างชนิด 2 ชนิด เชื่อมติดกัน เมื่อโลหะได้รับความร้อนจะโค้งตัว เนื่องจากการขยายตัวของแผ่นโลหะทั้งสองไม่เท่ากัน

**Heater element** จะต่ออนุกรมกับมอเตอร์ และจะขึ้นอยู่กับค่ากำลังสูญเสียในรูปของความร้อน ( $I^2R$ ) ของขดลวดในมอเตอร์

เมื่อเกิด **Overload** ในมอเตอร์จะทำให้เกิดความร้อนและอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าปกติ ดังนั้น **Bimetallic element** จะขยายตัวเปิดวงจร **normally closed contact** และปิดวงจร **normally open contact** ส่งกำลังงานให้กับวงจร **alarm circuit** เพื่อตัดมอเตอร์ออกจากวงจร และเมื่อ **Bimetallic element** เย็นตัวลง จะต้องกดปุ่ม **reset arm** ด้วยมือ เพื่อให้มอเตอร์ทำงานอีกครั้ง

จากรูปที่ 13-3 (b) แสดงขดลวด **heater** และความสัมพันธ์ของ **normally closed contact** ที่ต่อภายในวงจร **controller circuit** วงจร **controller** สำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่ จะใช้ **Current Transformer (CTs)** ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสต่ำและเป็นปฏิภาคกับอัตราความร้อนต่ำตามที่แสดงด้วยเส้นปะ เมื่อเกิด **Overload** จะทำให้ **normally closed contact OL** เปิดวงจร ไม่มีกระแสไหลผ่านขดลวด **M** จึงทำให้ **normally open contact** ทั้ง 3 ตัว อยู่ในตำแหน่งเปิดวงจรของมอเตอร์

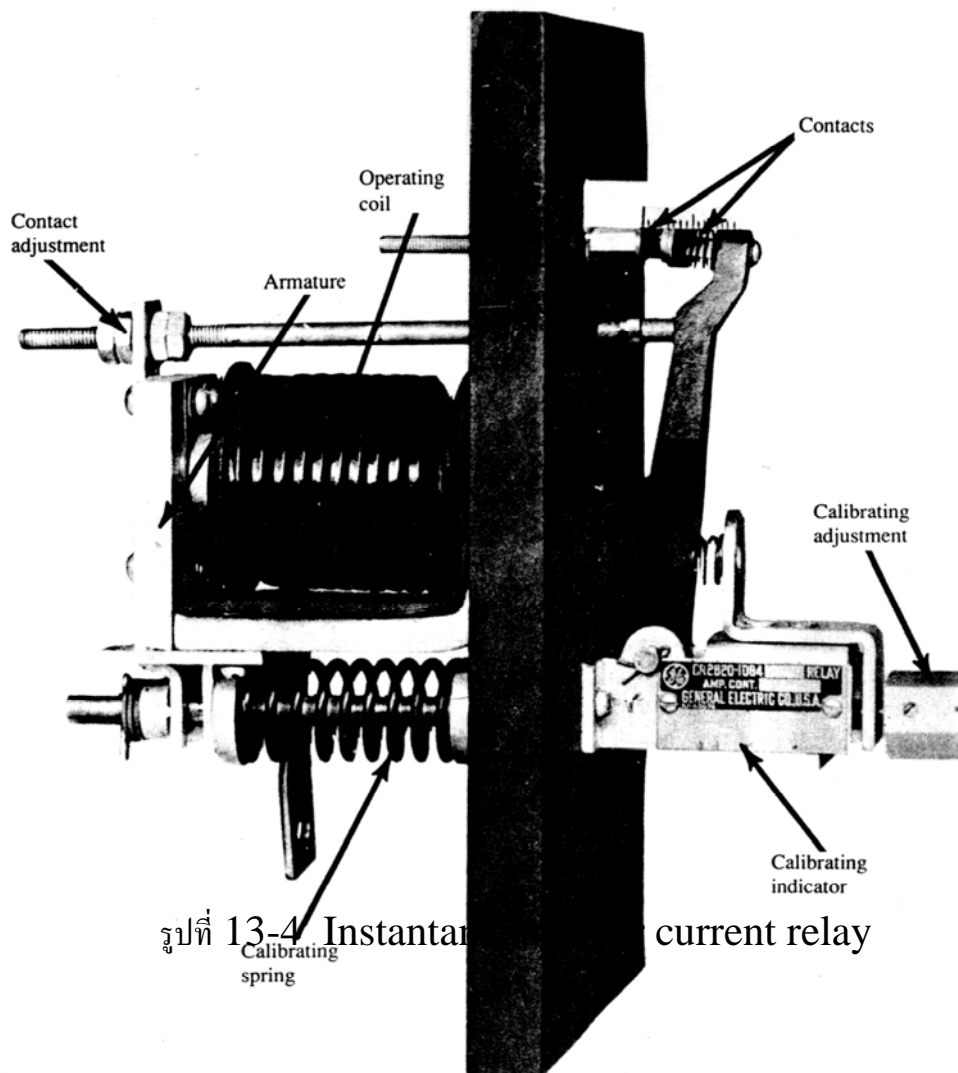
จากรูปที่ 13-3 (c) แสดงคุณลักษณะของกราฟระหว่างกระแสกับเวลาสำหรับ **Tripping** และ **Resetting**

คือ เมื่อมีกระแสเพิ่มขึ้นจะใช้เวลาในการ **trip** ตัดวงจรน้อยลง และระยะเวลาที่ใช้ในการ **reset** จะมากขึ้นตามค่ากระแสที่เพิ่มขึ้น

จากกราฟในรูปที่ 13-3 (c) ถ้าเกิด Overload ที่ 400 % rated heater current จะใช้ระยะเวลาในการ trip ประมาณ 20 - 30 วินาที และระยะเวลาในการ reset relay จะอยู่ระหว่าง 75 - 140 วินาที

- **Overload Relay หรือ Protective Motor Relay**

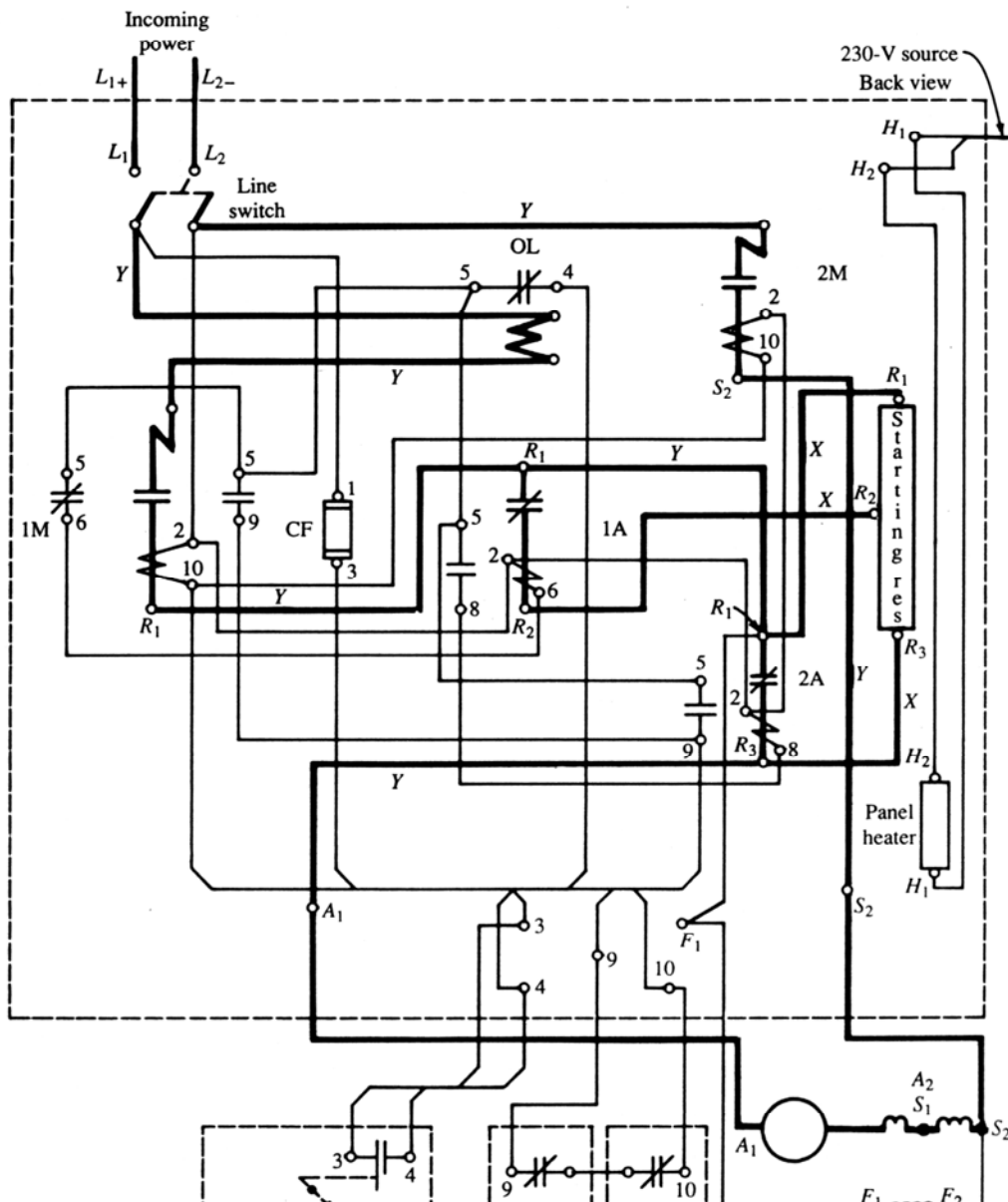
Overload relay หรือ Protective motor relay แบ่งโดยทั่วไปได้ 2 แบบ คือ แบบธรรมดา คือ เมื่อองไปแล้วจะกลับมาสู่ตำแหน่งเดิมเมื่อเย็นตัวลงเหมือนในเตารีด และแบบที่มีปุ่ม reset คือ เมื่อตัดวงจรไปแล้ว contact จะถูก locked ไว้ ถ้าต้องการให้วงจรทำงานอีกครั้งจะต้อง กดปุ่ม reset ให้ contact กลับมาต่อวงจรเหมือนเดิม



จากรูปที่ 13-4 เป็น Magnetic-overload Relay ชนิดหนึ่ง โดยใช้ขดลวดทองแดงขนาดใหญ่พันลงบน แกนแม่เหล็กของ relay เรียกว่า “Operating coil” หรือ “Copper jacket” และขดลวดจะต่ออนุกรมกับมอเตอร์ ขณะที่กระแสไหลตามปกติจะไม่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ในการ trip relay แต่ถ้าเกิด Overload เมื่อใด กระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะมีค่าสูงกว่าปกติ จึงสร้างเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อที่จะดึงดูด armature ให้ออกจาก pole face ทำให้ normally closed contact เปิดวงจร

### 13-4 Controller Diagram

Controller diagram แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ connection diagram และ elementary diagram





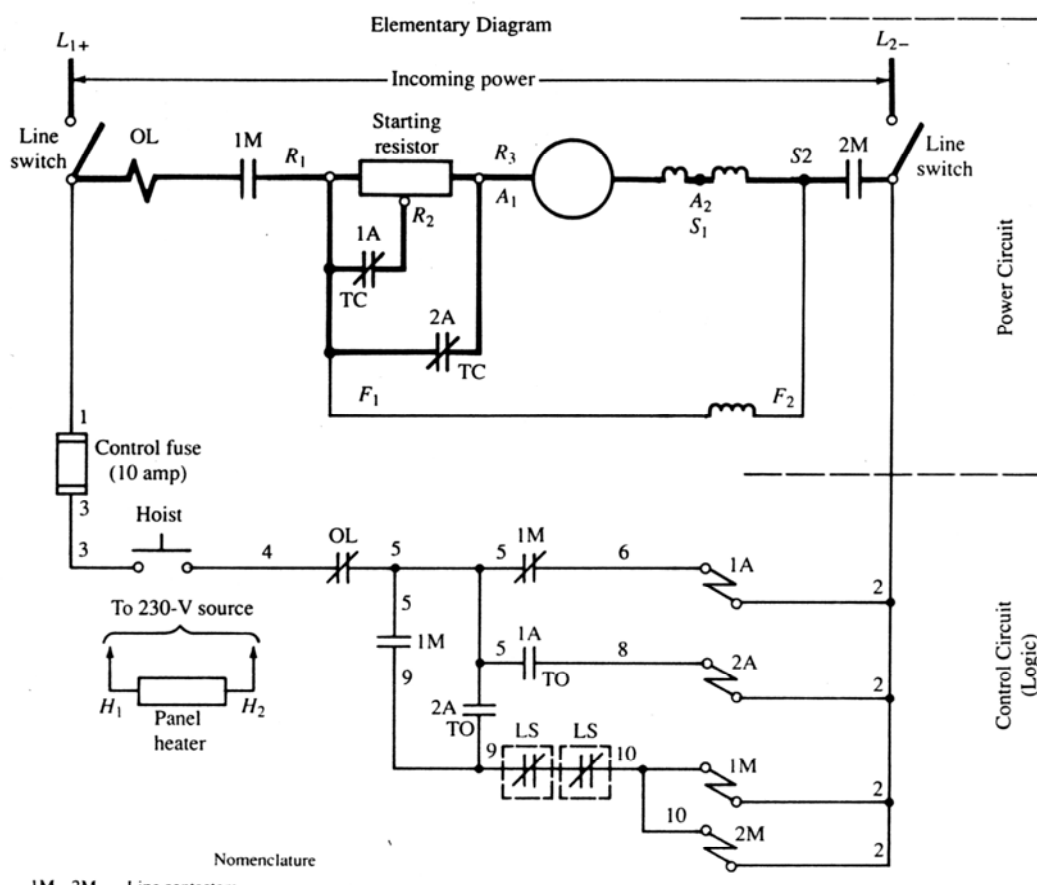
รูปที่ 13-5 Typical connection diagram for a motor controller

รูปที่ 13-5 แสดงรูปพื้นฐานส่วนประกอบของ controller สำหรับควบคุมมอเตอร์ ที่ประกอบด้วยตำแหน่งที่ตั้งและเส้นทางของการต่อวงจรของแต่ละขดลวด controller diagram จะแสดงตำแหน่งที่ติดตั้งของอุปกรณ์เพื่อสะดวกในการซ่อมทำ การเปลี่ยน และการปรับแต่งอุปกรณ์ จากรูปจะสังเกตเห็นว่าวงจร

power circuit ของมอเตอร์ จะเขียนด้วยเส้นหนาทึบเพื่อแสดง cross-section ขนาดใหญ่ ส่วนวงจร control

circuit จะเขียนด้วยเส้นเบาธรรมดา

สำหรับแผง Panel heater จะใช้กับบริเวณที่มีความชื้น เพื่อป้องกันการกลั่นตัวเป็นไอน้ำ



- Nomenclature**
- 1M, 2M — Line contactors  
Drop out at approximately 15% volts
  - OL — Instantaneous overload relay—gravity reset trip at approximately 250% full-load current
  - 1A, 2A — Accelerating contactors  
Set 1A approximately 2 sec and 2A approximately 1 1/2 sec drop out
  - LS — Limit switch
  - TO — Time-delay opening contacts
  - TC — Time-delay closing contacts
  - CF — Control fuse
- Note: Connections shown are for CCW rotation of motor shaft, facing commutator end
- ⊕ normally open
  - ⊖ normally closed
  - ⊕ or ⊖ operating coil

รูปที่ 13-6 แสดง elementary diagram ซึ่งเป็นการเขียนแบบง่าย ๆ ที่แสดงถึงระบบการทำงานของมอเตอร์ elementary diagram บางครั้งเรียกว่า “ladder diagram” เนื่องจากเส้นในแนวนอนจะเหมือนกับ rungs และเส้น power line ในแนวตั้งทั้งสองเส้นจะเหมือนกับ rail

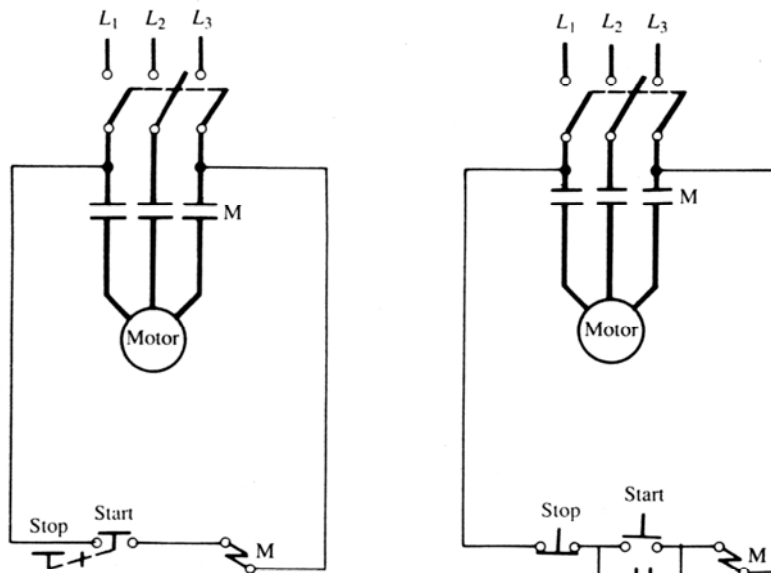
Elementary diagram จะประกอบด้วย 2 วงจร คือ วงจร power circuit และ วงจร control circuit

วงจร power circuit จะรวมส่วนประกอบของมอเตอร์ , starting resistor และ power contact เข้าด้วยกัน และจะเขียนแสดงด้วยเส้นหนาที่บ่งชี้ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 13-6

วงจร control circuit บางทีเรียกว่า “Logic circuit” จะประกอบด้วยอุปกรณ์ push button , operating coil , overload contact , relay contact และ limit contact เพื่อสร้าง logic และคำสั่งสำหรับการทำงานของมอเตอร์

### 13-5 Automatic Shutdown on Power Failure

วงจรควบคุมมอเตอร์จะต้องทำงาน shutdown มอเตอร์อัตโนมัติเมื่อเกิด power failure และจะต้องเริ่ม starting ใหม่โดยอัตโนมัติ เมื่อ power ถูกส่งกลับมาตามปกติ (undervoltage release) หรืออาจจะอยู่ในตำแหน่ง OFF จนกระทั่งเริ่มต้น starting ใหม่ ด้วยวิธี manual (undervoltage protection)



รูปที่ 13-7 Circuit for automatic shutdown on power failure:

(a)

(b)

(a) undervoltage release ; (b)

undervoltage protection

- **Undervoltage Release**

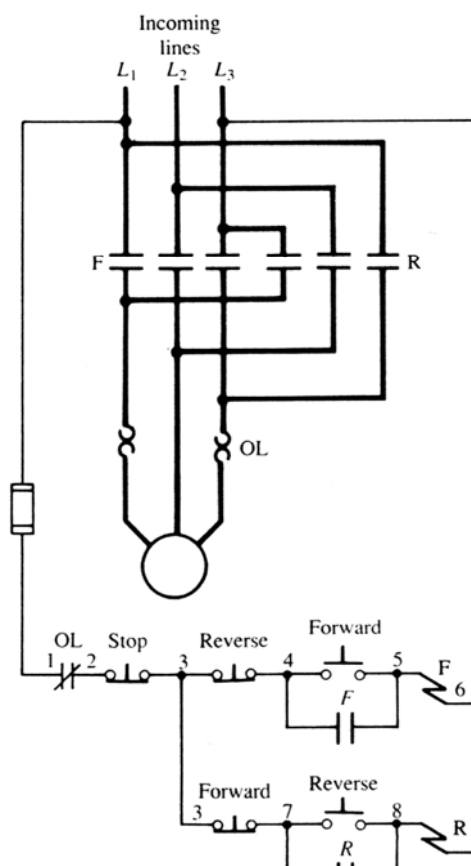
วงจร control circuit ที่แสดงในรูปที่ 13-7 (a) เป็นวงจรสำหรับการปลดมอเตอร์โดยอัตโนมัติออกจาก line เมื่อเกิด voltage loss โดย contact M จะเปิดวงจร และจะ starting ใหม่อัตโนมัติเมื่อ voltage ถูกจ่ายกลับมาสู่ค่าปกติ โดย contact M จะต่อวงจร การควบคุมชนิดนี้จำเป็นที่สุดสำหรับเครื่องจักรกลประเภท sump pump หรือ fire pump

- **Undervoltage Protection**

จากรูปที่ 13-7 (b) แสดงวงจรควบคุมพื้นฐานที่ถูกออกแบบเพื่อป้องกัน voltage loss การควบคุมชนิดนี้จะปลดมอเตอร์ออกจาก line เมื่อเกิด voltage loss และจะป้องกันการ starting มอเตอร์ใหม่เมื่อ voltage กลับเข้าสู่ค่าปกติ โดยปุ่ม push button start และ push button stop จะเป็นแบบ spring-return type ที่ป้องกันการต่อโดยอัตโนมัติ ดังนั้นถ้าต้องการ starting มอเตอร์ใหม่ต้องกดปุ่ม push button start เพื่อให้ coil M ต่อวงจรกับ line และ contact M ปิดวงจรจ่ายกระแสไปยังมอเตอร์ สำหรับ auxiliary contact M ที่ต่อคร่อมกับปุ่ม push button start เรียกว่า “sealing contact” ทำหน้าที่กั้นวงจร starting โดย short-circuit ปุ่ม push button start

### 13-6 Reversing Starters for AC Motor

วงจรควบคุมการกลับทิศทางการหมุนของ AC motor จะต่ออุปกรณ์ป้องกันการเกิด overload (OL) และ voltage loss คร่อมไว้กับ line ขณะ starting ตามที่แสดงในรูปที่ 13-8

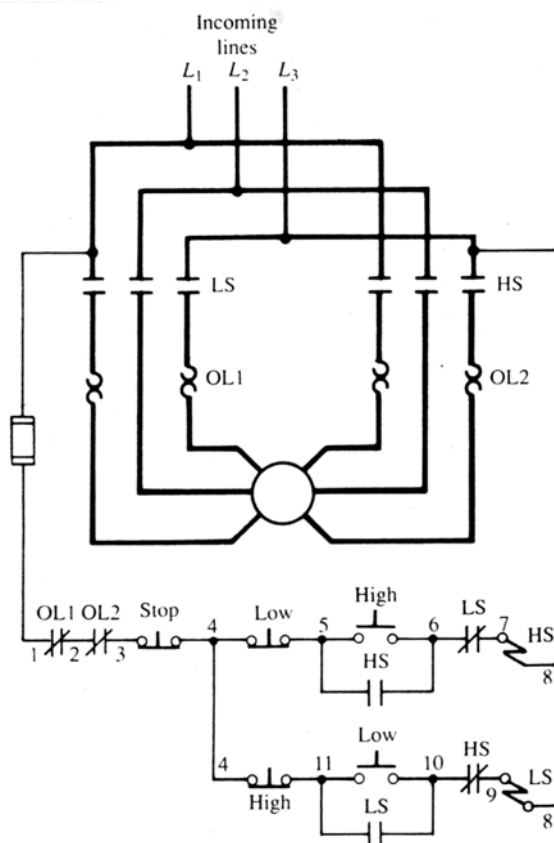


### รูปที่ 13-8 Reversing controller for a 3-phase induction motor

จากรูปที่ 13-8 จะประกอบด้วยปุ่ม Forward จำนวน 2 ปุ่ม และปุ่ม Reverse จำนวน 2 ปุ่ม ซึ่งจะ interlock ทางกลซึ่งกันและกัน เมื่อทำการกดปุ่ม Forward จะทำให้ contact F ต่่วงจร (closed) ทำให้มอเตอร์หมุน ขณะที่มอเตอร์กำลังหมุน contact R จะต้องเปิดวงจร (open) ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางทันทีโดยกดปุ่ม Reverse ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากมี interlock ป้องกันอยู่ ดังนั้นเมื่อต้องการกลับทิศทางของมอเตอร์จะต้องกดปุ่ม Stop ก่อน เพื่อให้มอเตอร์หยุดหมุน แล้วจึงทำการกดปุ่ม Reverse เพื่อให้ contact R ต่่วงจร (closed) จะทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทาง ขณะที่ contact R ต่่วงจร contact F จะต้องเปิดวงจรโดยอัตโนมัติด้วย interlock ทางกล

### 13-7 Two-speed Starter for AC Motor

วงจร Magnetic-starter สำหรับ 3-phase induction motor ชนิด two speed , 2-winding ตามที่แสดงในรูปที่ 13-9 โดยแต่ละขดจะมีอุปกรณ์ป้องกันการเกิด overload ของตัวมันเอง (OL 1 และ OL 2)



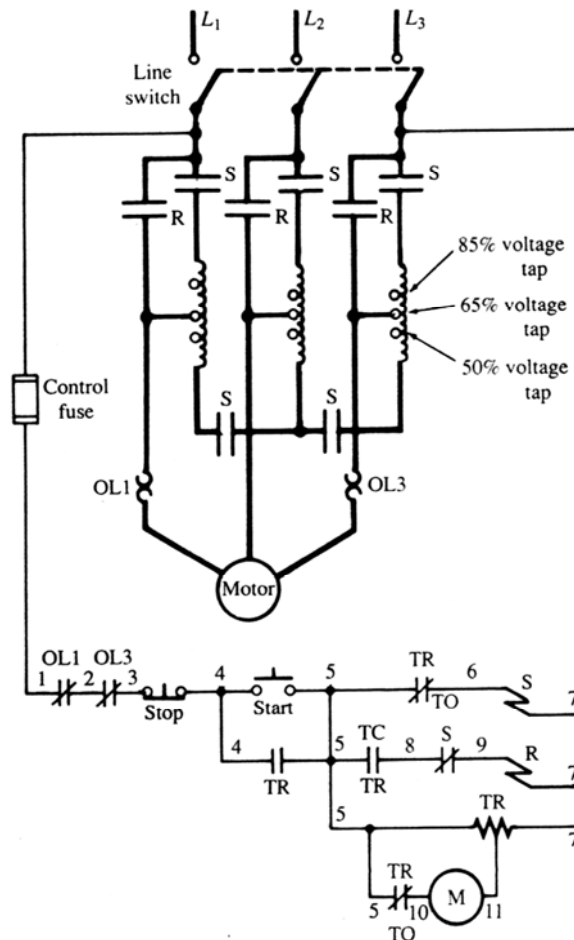
### รูปที่ 13-9 Controller for a 3 phase , two speed , 2-winding induction motor

จากรูปที่ 13-9 แสดงวงจรควบคุมมอเตอร์ 2 speed คือ ความเร็วต่ำและความเร็วสูง โดยใช้ค่า power และ current ที่แตกต่างกัน และจะมี interlock ทางไฟฟ้าที่เพิ่มเข้ามาคือ LS และ HS เรียกว่า “sequence interlock”

เมื่อเรากดปุ่ม push button “Low” จะทำให้ contact LS ทำงานต่อวงจร (closed) มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็วต่ำก่อน ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วสูงให้กดปุ่ม push button “High” ทำให้ contact HS ต่อวงจร มอเตอร์จะเปลี่ยนเป็นความเร็วสูง แต่ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วสูงเปลี่ยนมาเป็นความเร็วต่ำ จะต้องกดปุ่ม Stop ก่อน เพื่อชะลอความเร็ว แล้วจึงกดปุ่ม push button “Low” ให้ contact LS ต่อวงจร

### 13-8 Reduce-voltage Starter for AC Motor

การ starting สำหรับ 3-phase AC motor ด้วยวิธีการลด voltage ขณะstart จะใช้ auto-transformer ที่มี tap 50 % , 65 % และ 85 % ในการลด voltage ตามที่แสดงในรูปที่ 13-10



## รูปที่ 13-10 Controller for reduce voltage starting of a 3-phase induction motor

จากรูปที่ 13-10 จะติดตั้ง Time Relay (TR) ซึ่งสามารถตั้งเวลาการทำงานของ contact ได้ คือ จะให้ตัดหรือต่อวงจรภายในเวลาเท่าใดหลังจากกดสวิทช์ให้ตัวมันทำงาน เมื่อทำการกดปุ่ม “Start” จะทำให้ time relay ที่ต่ออยู่ในวงจร Start (S) ปิดวงจร (closed) และ time relay ที่ต่ออยู่ในวงจร Run (R) เปิดวงจร (open) เมื่อ contact S ต่อวงจร และกระแสในวงจรควบคุมจะไหลผ่าน auto-transformer ที่ตั้ง tap ไว้ที่ 50 % หรือ 60 % หรือ 85 % เพื่อลด voltage ขณะ starting มอเตอร์ หลังจาก time relay หน่วงเวลาประมาณ 1-10 sec ตามที่ได้ปรับแต่งไว้ จะทำให้ time relay ในวงจร Run (R) ปิดวงจร ทำให้ contact R ต่อวงจร และ time relay ในวงจร Start (S) เปิดวงจร ดังนั้นมอเตอร์จะรับ voltage จาก line โดยตรง และหมุนด้วยความเร็วปกติ

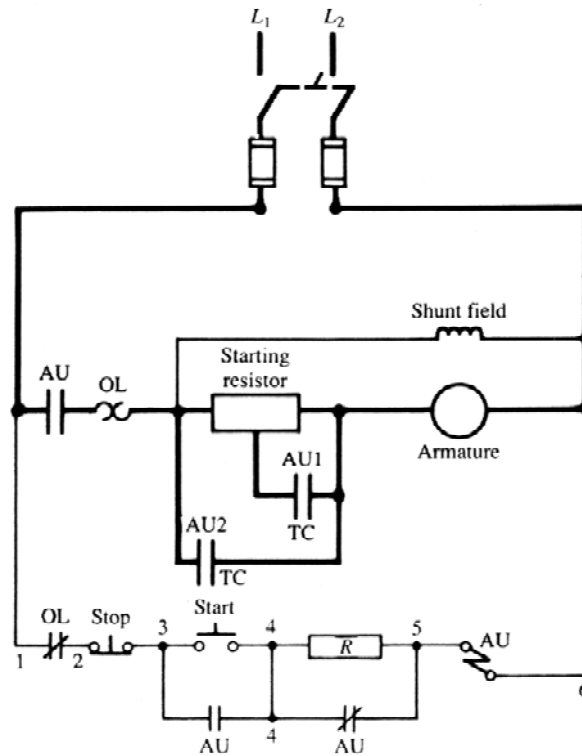
### 13-9 Controller for DC Motor

DC motor ที่มีขนาดตั้งแต่  $\frac{3}{4}$  แรงม้า ขึ้นไป จะถูก start ด้วยวิธี reduced voltage ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ definite-time starter และ load sensitive starter

Definite-time starter จะใช้วิธีการปลดค่าความต้านทานออกจากวงจร armature circuit หลังจากที่ได้ตั้งเวลาไว้ เมื่อทำการ starting มอเตอร์ โดยไม่คำนึงถึง load ที่ต่อกับเพลา และ armature จะต่อคร่อมกับ full voltage เมื่อสิ้นสุดการหน่วงเวลา

Load sensitive starter จะใช้วิธีการปรับอัตราความแรงของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับ load ถ้ามี load มาก จะใช้ระยะเวลาในการ starting นาน และถ้ามี load น้อย ก็จะใช้เวลาในการ starting สั้น ถ้ามอเตอร์ไม่ start ค่า starting resistance จะไม่ถูกตัดออกจากวงจร

### 13-10 Definite-time Starter for DC Motor



รูปที่ 13-11 E

DC motor

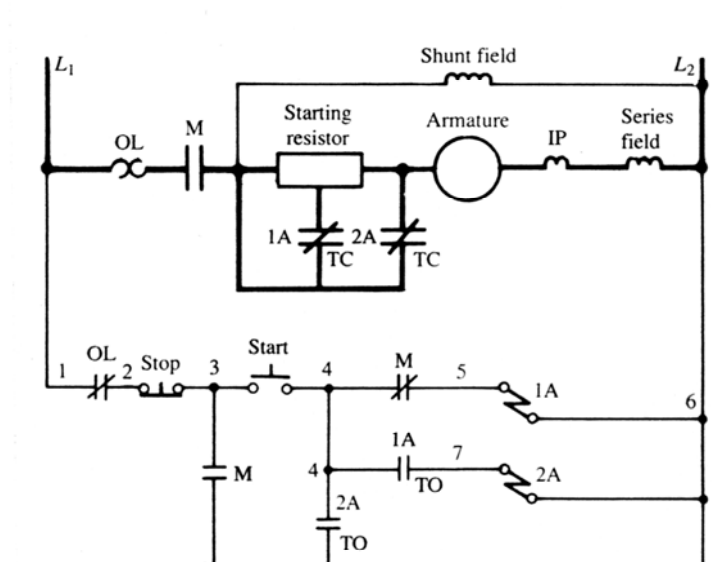
g unit to start a

จากรูปที่ 13-11 แสดง Definite-time starter ที่ใช้ accelerating unit (AU) ในการ starting เมื่อกดปุ่ม Start จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด AU ดังนั้น contact AU จะปิดวงจรของ motor circuit และ normally closed contact ที่ต่อคร่อมกับค่าความต้านทานระหว่างจุดที่ 4 กับ 5 จะเปิดวงจร ทำให้ลดกระแสไฟฟ้าในขดลวด AU เมื่อ contact AU ในวงจร motor circuit ปิดวงจร มอเตอร์จะ starting ด้วยค่าความต้านทานที่จำกัดกระแสใน armature circuit หลังจากการสิ้นสุดการหน่วงเวลา (time relay) ค่าความต้านทานจะถูกตัดออกจากวงจร armature circuit และรับไฟจาก line โดยตรง

- Flux-decay , Time-delay Contactor

วงจรควบคุมแบบ Flux-decay , Time-delay Contactor จะใช้ time relay ที่ทำมาจากทองแดงรูปทรงกระบอก (copper cylinder) พันรอบแกนเหล็ก ที่เรียกว่า “copper jacket” โดยปกติ time relay contactor จะปิดวงจรอยู่ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด time relay contactor จะเปิดวงจรทันที

ถ้าไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด time relay contactor ดังนั้น copper jacket จะหน่วงเวลาเพื่อลดเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้สนามแม่เหล็กไม่ลดลงมาสู่ศูนย์ แต่จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า emf ใน copper jacket ซึ่งตกกฎของ Lenz's law แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้า emf และผลรวมของกระแสใน copper jacket จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการลดของเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้เกิดการหน่วงเวลาก่อนที่ contact จะปิดวงจร



รูปที่ 13-12 Definite-time starter that uses flux-decay , time-relay contactor to accelerate a DC motor

จากรูปที่ 13-12 เมื่อกดปุ่ม Start จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด 1A ทำให้ auxiliary contact 1A (TO) ปิดวงจร และ auxiliary contact 1A (TC) ที่ต่อลัดวงจรกับ resistor เปิดวงจร เมื่อ auxiliary contact 1A (TO) ปิดวงจรทำให้มีกระแสไหลผ่านขดลวด 2A ทำให้ auxiliary contact 2A (TO) ปิดวงจรปล่อยกระแสเข้าขดลวด M ทำให้ contact M จะปิดวงจรต่อเข้ากับมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์จะ starting ด้วยค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับวงจร armature circuit เพื่อลดกระแสไฟฟ้า ขณะที่มอเตอร์ start วงจร auxiliary contact 2A (TC) จะเปิดวงจร

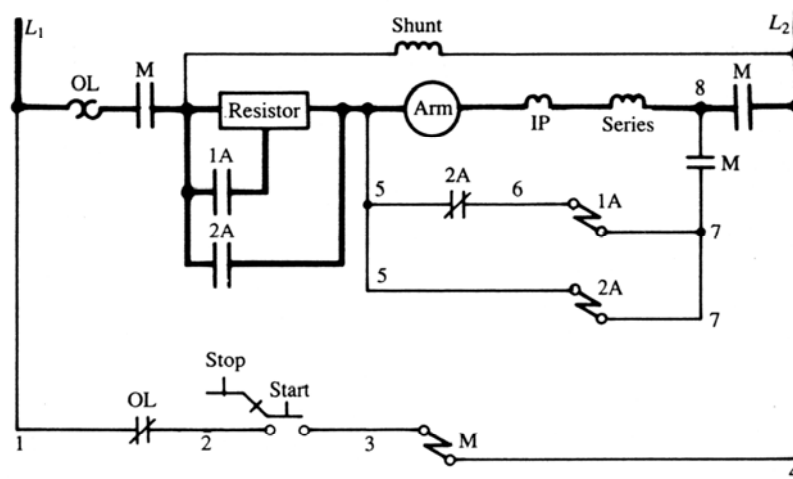
เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนได้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง auxiliary contact M ที่ต่อระหว่างจุด 3 และ 8 จะปิดวงจร และ auxiliary contact M ที่ต่อระหว่างจุด 4 และ 5 จะเปิดวงจร ทำให้ไม่มี



กระแสไหลผ่านขดลวด 1A หลังจากนั้น time relay จะสั่งให้ auxiliary contact 1 A (TC) ที่ต่อลัดวงจรกับ resistor ปิดวงจร เพิ่มความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ และ auxiliary contact 1 A (TO) จะเปิดวงจร ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านขดลวด 2A หลังจากหน่วงเวลาระยะหนึ่ง auxiliary contact 2A (TC) จะปิดวงจร ทำให้ออเตอร์รับไฟจาก line โดยตรง

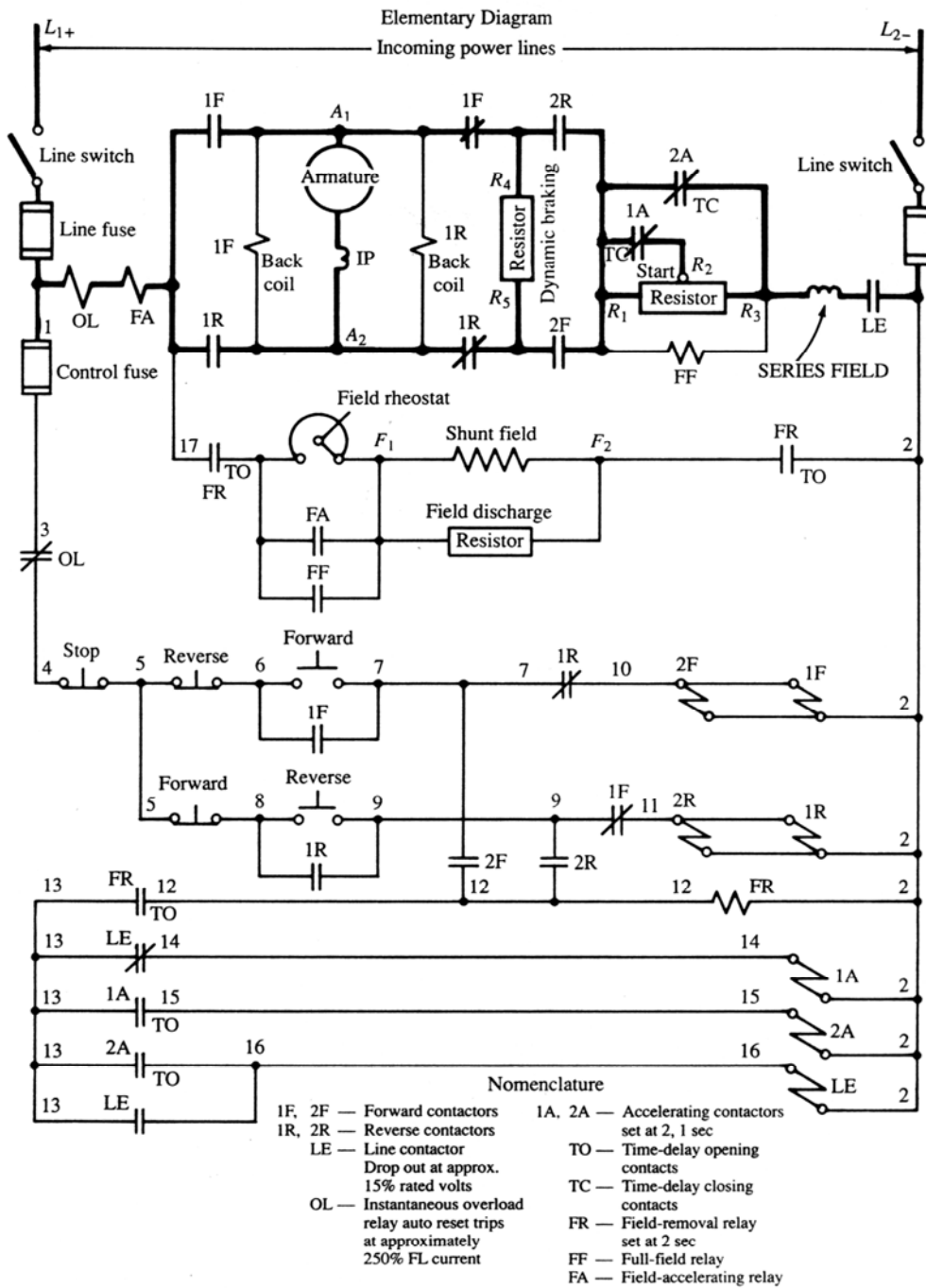
### 13-11 Counter-emf Starter for DC Motor

วงจรสำหรับการใช้แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (counter-emf : cemf) ในการ starting มอเตอร์ ตามที่แสดงในรูปที่ 13-13



จากรูปที่ 13-13 ขดลวด 1A และ 2A จะต่อคร่อมกับ armature เพื่อให้อำนาจแม่เหล็กเป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (cemf) เมื่อกดปุ่ม Start จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด coil M ทำให้ power contact M ปิดวงจร เริ่มเดินมอเตอร์และ auxiliary contact M ที่ต่ออนุกรมกับขดลวด 1A และ 2A จะปิดวงจรด้วย ขณะมอเตอร์หมุน armature จะเร่งขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (cemf) เพิ่มขึ้น เมื่อมี voltage ตกคร่อมมากพอ จะทำให้ contact 1A ปิดวงจร ตัดออกจาก starting resistor และเมื่อ armature เร่งขึ้นไปเรื่อย ๆ ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้า cemf เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อแรงดันไฟฟ้า cemf สูงมากพอที่จะทำให้ contact 2 A ปิดวงจรต่อ armature เข้ากับ line โดยตรง

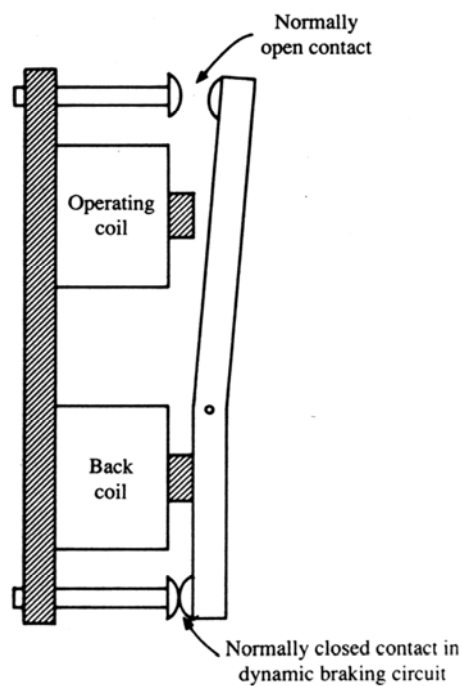
# 13-12 Reversing Starter with Dynamic Braking and Shunt field Control for DC Motor



ด้วย

dynamic braking เติบระยะเวลาดำเนินการ start ที่เตงที่ copper-jacket running relay

1 A และ 2 A ซึ่งจะ set ไว้ที่เวลาประมาณ 1-2 วินาที และการกลับทิศทางการหมุนด้วย contact 1R , 2 R , 1F และ 2 F ในวงจร armature circuit (contact 1 F และ 2 F คือ Forward contactor ส่วน 1 R และ 2 R คือ Reverse contactor) โดย back coil 1 F และ 1 R คือ armature interlock ที่ต่อคร่อมกับ armature และการทำงานจะอาศัยแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (cemf) ของ armature ซึ่งจะป้องกันการกลับทิศทางการหมุนจนกว่ามอเตอร์จะลดความเร็วลง การกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์จะต้องให้มอเตอร์หยุดหมุนก่อนที่เรียกว่า “Plugging” สำหรับรูปแบบพื้นฐานของ operating coil และ back coil แสดงไว้ในรูปที่ 13-15



รูปที่ 13-15 Magnet

id operating coil

in Figure 13-14

ถ้ามอเตอร์หมุนในทิศทาง Forward แล้วกดปุ่ม Reverse ให้กลับทิศทางการหมุน Forward contact 1 F และ 2 F จะตกลง แต่ operating coil 1 R จะไม่ปิด contact จนกระทั่ง back coil 1 R ปลดวงจร ในลักษณะกลับกันถ้ามอเตอร์หมุนในทิศทาง Reverse แล้วกดปุ่ม Forward ให้กลับทิศทางการหมุน hold-back coil ที่ยึด normally contact 1 F และ 1 R ให้อยู่ในตำแหน่งปิดวงจรระหว่าง dynamic braking ส่วน Field-removal relay FR คือ relay ที่ทำงานด้วยการหน่วงเวลา (ประมาณ 2 วินาที) จะยอมให้ shunt field ยังคงทำงานต่อไปสักระยะหนึ่งหลังจากกดปุ่ม Stop แล้วก็จะยอมให้ dynamic

braking ลดความเร็วของมอเตอร์อย่างรวดเร็ว ซึ่ง dynamic-braking loop จะประกอบด้วย dynamic-braking resistor และ armature

เมื่อเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ด้วย high starting torque แล้ว shunt field rheostat จะถูกตัดออกจากวงจรด้วย full field relay FF โดย contact FF จะทำงานปิดวงจรด้วยค่า voltage ที่ตกคร่อมในส่วนของ starting resistor และเมื่อ starting resistor ถูกตัดออกจากวงจร ก็จะทำให้ contact FF เปิดวงจร

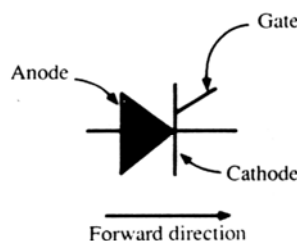
The shunt field rheostat จะถูกตัดออกจากวงจรเมื่อ field-accelerating relay FA ได้รับพลังงานเพียงพอให้ทำงาน โดย operating coil สำหรับ relay จะต่ออนุกรมกับ line ดังนั้นเมื่อ armature มีค่ากระแสสูงสุดจะตัด shunt field rheostat ออกจากวงจรอย่างอัตโนมัติ การเปลี่ยนทิศทางของ field rheostat อย่างรวดเร็วเพื่อเพิ่มความเร็วจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กอ่อนลงและเป็นเหตุทำให้กระแสใน armature เพิ่มขึ้นไปกระตุ้น relay FA ให้ทำงาน และ contact FA ปิดวงจร และเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสใน armature ลดลง ทำให้ contact FA เปิดวงจรอีกครั้ง

### 13-13 Solid-state Controllers

Solid-state controllers จะใช้ Diodes , Transistor , Thyristor (SCRs) , Triacs และ อุปกรณ์ solid-state อื่น ๆ ในรูปแบบต่าง ๆ การเริ่ม Start , Stop , การกลับทิศทาง การหมุน และการ brake มอเตอร์ สามารถทำได้อย่างนุ่มนวลและยังสามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้อีกด้วย เนื่องจาก solid-state ไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ ดังนั้นการบำรุงรักษาจึงน้อยกว่าอุปกรณ์ส่วนที่เป็นแม่เหล็ก นอกจากนี้ solid-state ไม่มีส่วนที่จะทำให้เกิดประกายไฟจึงไม่ทำให้เกิดการระเบิด ด้วยเหตุนี้ solid-state จึงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการควบคุมเครื่องจักรกลที่มีขนาดตั้งแต่ 1/2 แรงม้า ไปจนถึงขนาด 10,000 แรงม้า

### 13-14 Thyristor Control of Motor

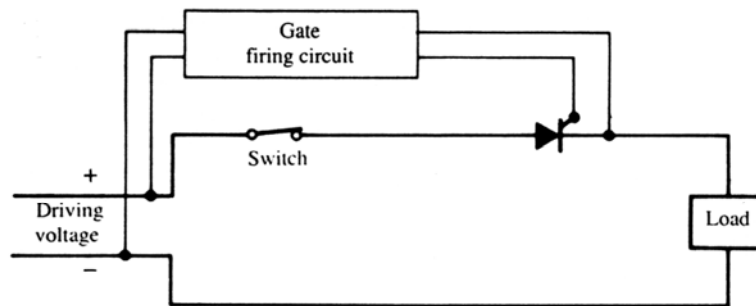
Thyristor เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่ง และมีใช้กันอย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง Thyristor มีหลักการทำงานเหมือนกับ switch 2 สถานะ คือ นำกระแส และไม่ นำกระแส โดย Thyristor จะมี 3 ขั้วต่อ คือ Anode , Cathode และ Gate เมื่อ Anode และ Cathode ได้รับไบแอสอย่างถูกต้อง และมีกระแสไหลผ่านขั้ว Gate เพียงเล็กน้อย Thyristor จะทำงานได้ กล่าวคือ จะมีการนำกระแสจากขั้ว Anode ไปยัง Cathode



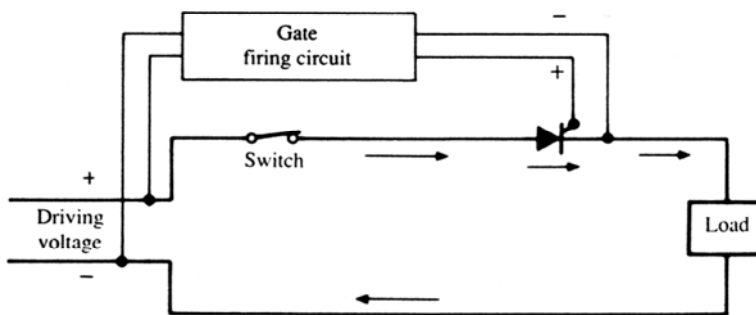
รูปที่ 13-16 Thyristor (SCR)

Thyristor ที่แสดงในรูปที่ 13-16 เป็นแบบ Silicon Controlled Rectifier (SCR) ประกอบกันเป็น switch และ diode ซึ่ง SCR จะมี 2 สถานะ คือ สถานะ ON และ OFF เมื่ออยู่ในสถานะ OFF จะไม่มีกระแสไหลผ่านจึงทำหน้าที่เป็น switch และเมื่ออยู่ในสถานะ ON ตัว SCR จะทำหน้าที่เป็น diode กระแสจะไหลผ่านทิศทางเดียวจาก anode ไปยัง cathode

ขณะที่ SCR อยู่ในสถานะ OFF จะถูกเรียกว่า “blocking state” จนกระทั่ง anode และ gate มีค่าเป็นบวกทั้งคู่เมื่อเทียบกับ cathode เมื่ออยู่ในสถานะนี้ SCR จะทำหน้าที่เป็น fires และจะเริ่มเกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้น



(a)



conducting state

รูปที่ 13.

(b)

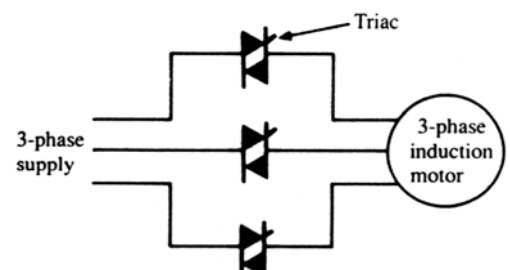
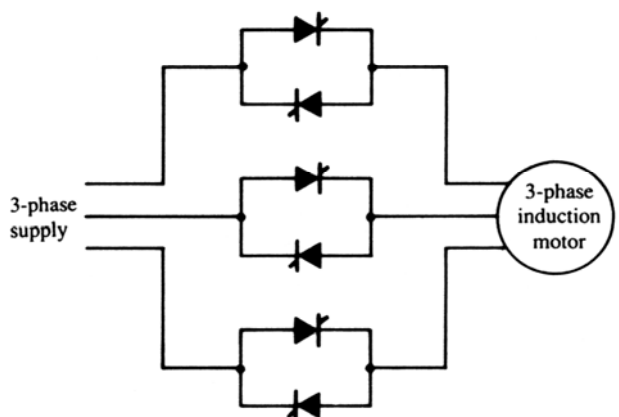
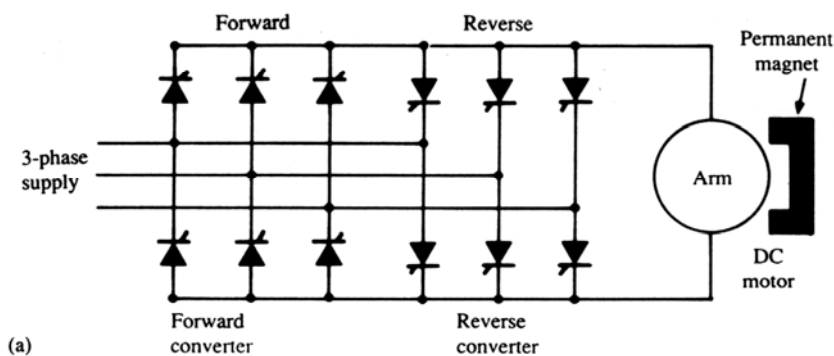
จากรูปที่ 13-17 (a) แสดงวงจรพื้นฐานของ SCR โดยวงจร firing circuit จะเรียกว่า “Triggering circuit” จะประกอบด้วย complex circuitry เมื่อวงจร gate firing circuit ไปกระตุ้น SCR จะทำให้ switch อยู่ในสถานะ ON ตามที่แสดงในรูปที่ 13-17 (b) เมื่อ SCR อยู่ในสถานะ switch ON จะใช้จังหวะ pulse เพียงเล็กน้อย หลังจาก gate เปิด

วงจร กระแสที่จ่ายให้กับ load จะอยู่ในสถานะ ON ด้วย ซึ่ง SCR จะมีคุณสมบัติเหมือน latching contactor หรือ latching relay เพื่อให้ gate circuit ใช้ในการควบคุม และ จะไม่มีกระแสใน anode ดังนั้นถ้าต้องการให้ switch ในวงจร anode ทำงานจะต้องจ่ายแหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC driving voltage) ให้กับวงจร anode หรือใช้ reverse-voltage impulse ซึ่งกระบวนการที่ทำให้ Thyistor อยู่ในสถานะ Turning off เรียกว่า “commutation” การสับเปลี่ยนแบบธรรมชาติ (natural commutation) เมื่อวงจร anode ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ AC และ SCR จะอยู่ในสถานะ OFF เมื่อ anode กลายเป็น negative

### 13-15 Solid-state Adjustable-speed Drives

การใช้ solid-state ในการควบคุมความเร็วจะทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูง วงจร trigger จะถูก

ควบคุมโดย microprocessor ซึ่งสวิตช์ของ SCRs จะอยู่ในสถานะ ON และ OFF ตาม ขั้นตอนของโปรแกรม

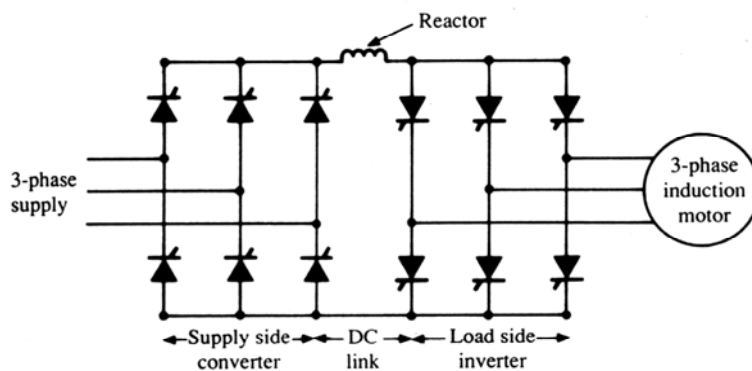


รูปที่ 13-18 Thyristor power circuits : (a) adjustable-speed reversible drive system for a permanent-magnet DC motor ; (b) soft-start motor controller with back-to-back SCRs for a 3-phase induction motor ; (c) soft-start motor controller with triacs of a 3-phase induction motor ;

รูปที่ 13-18 (a) แสดงวงจร power circuit สำหรับการปรับความเร็ว การกลับทิศทางการหมุนของ DC motor โดยใช้แหล่งจ่ายไฟ AC 3-phase ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กได้มาจากแม่เหล็กถาวร (permanent magnet) ตามที่แสดงในรูป หรือได้จากการกระตุ้นจากภายนอกโดยผ่านวงจร rectifier ของ firing circuit ซึ่งวงจร firing circuit จะควบคุมการกลับทิศทางการหมุนโดย Forward converter และ Reverse converter ส่วนการควบคุมความเร็วจะควบคุม voltage ที่จ่ายให้กับ armature

รูปที่ 13-18 (b) แสดงวงจร power circuit ของการสตาร์ท 3-phase induction motor แบบ soft start โดยการควบคุม firing ของ back-to-back SCRs เพื่อจำกัดกระแสในการ starting และการเร่งความเร็วของมอเตอร์

รูปที่ 13-18 (c) แสดงวงจร Thyristor ชนิด 2 ทิศทาง ที่เรียกว่า “Triac” หรือ “bidirectional thyristor” ซึ่งจะมีลักษณะคุณสมบัติเหมือนกับ back-to-back SCRs



รูปที่ 1:

ase induction motor

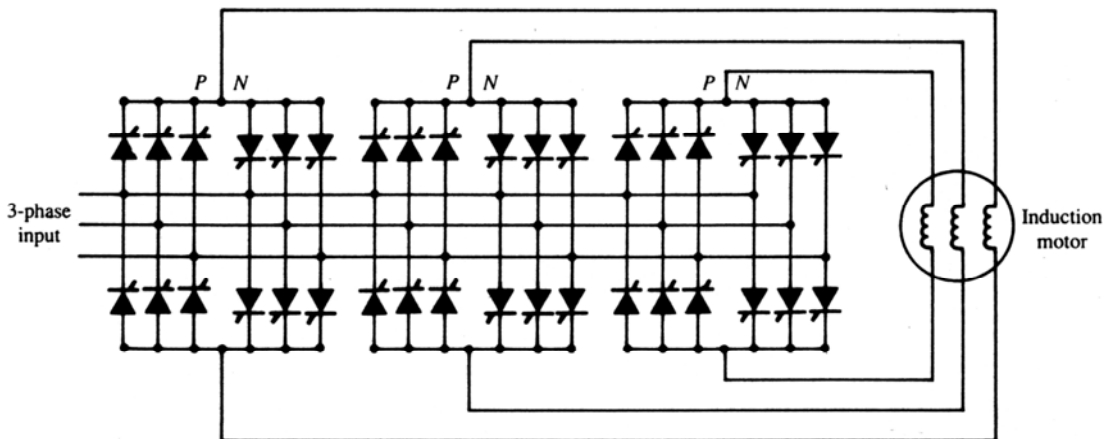
รูปที่ 13-19 แสดงรูปแบบวงจรชนิดหนึ่งสำหรับการปรับแต่งความถี่ของระบบเพื่อใช้ขับ 3-phase induction motor โดยการ converter ความถี่และ voltage ที่คงที่จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ input 3-phase

ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และ inverter จากไฟฟ้า DC ให้กลับไปเป็น AC 3-phase อีกครั้งเพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งความถี่จะถูกควบคุมโดย inverter firing circuit ส่วนค่า reactor ใน DC link จะต่ออยู่ระหว่าง

converter stage กับ inverter stage เพื่อลด harmonic current ด้วยกระบวนการ rectification การควบคุมการ converter ระดับ voltage ของ DC ในวงจร firing circuit โดยการควบคุม phase angle ที่จุดของ firing และการควบคุมความถี่ของ 3-phase output ในวงจร firing circuit โดยควบคุมระยะเวลาการทำงานของ SCR แต่ละตัว วงจร Logic ที่ควบคุม firing circuit จะรักษาระดับของอัตราส่วนระหว่าง Volt /Hz ให้คงที่ ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการทำงานของ induction motor และ synchronous motor

### 13-16 Cycloconverter Drives

Cycloconverter เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับวงจรให้มีความถี่ต่ำลง โดยมีหลักการทำงานคือ จะเรียงกระแสเป็นช่วง ๆ เป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ของรูปคลื่นของแหล่งจ่ายไฟ แล้วควบคุมการเรียงกระแสของชิ้นส่วนเหล่านี้มาประกอบกันเป็นรูปคลื่น sine out put ที่มีความถี่ต่ำลง



จากรูปที่ 13-20 แสดงวงจรพื้นฐานของ cycloconverter drive โดยใช้ cycloconverter จำนวน 3 ชุด เพื่อเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ 3-phase input ให้มีความถี่ต่ำลงซึ่งจะอยู่ในรูปของ sinusoidal waveform โดยแต่ละ phase ของมอเตอร์จะมี converter ต่ออยู่ เมื่อกระแสอยู่ใน 1/2 cycle บวก จะถูก converter จ่ายทางด้าน P และกระแสอยู่ใน 1/2 cycle ลบ จะถูก converter จ่ายทางด้าน N

ความถี่ทางด้าน output ของ cycloconverter จะถูกปรับให้เรียบจาก 1/2 cycle ของความถี่ input ด้วย positive phase sequence ไปจนถึงศูนย์ และจะกลับไปอีก 1/2 cycle



ด้วย negative phase sequence นั่นคือ ถ้าความถี่ทางด้าน input จากแหล่งจ่ายไฟมีค่า 60 Hz ความถี่ทางด้าน output จะถูกปรับให้เรียบจาก 30 Hz ไป 0 Hz และกลับไปที่ 30 Hz

Induction motor หรือ Synchronous motor ที่ขับด้วย cycloconverter สามารถที่จะกลับทิศทางการหมุนและปรับแต่งความเร็วได้ด้วย regenerative braking การควบคุม firing angle ของ converter แต่ละตัวหาได้จาก voltage และ frequency ที่จ่ายให้แต่ละ phase ของมอเตอร์

Cycloconverter สามารถออกแบบให้รับ load ได้เกือบทุกขนาด ตัวอย่างเช่น การใช้งานของ high power converter ที่ใช้ขับระบบ QE 2 cruise ship ซึ่ง cycloconverter สามารถใช้ควบคุม synchronous motor 3-phase ขนาด 59,000 แรงม้า ให้สามารถปรับความเร็วและกลับทิศทางการหมุนได้

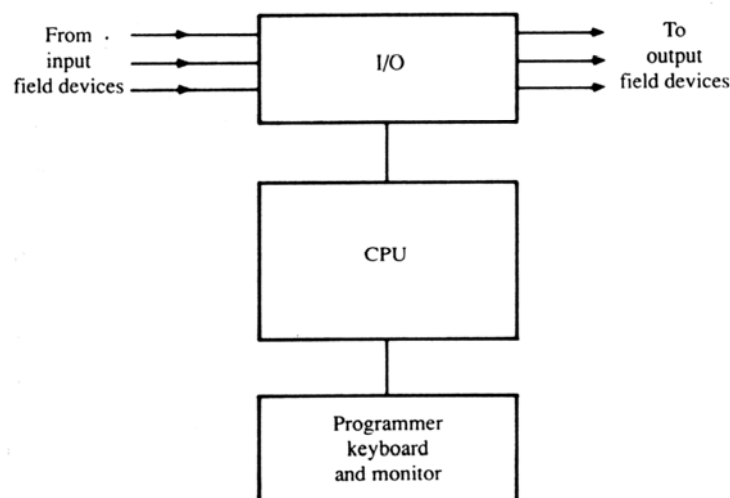
### 13-17 Programmable Controllers

Programmable Controllers หรือบางทีเรียกว่า Programmable Logic Controllers หรือ PC หรือ PLC ตามมาตรฐาน NEMA ได้ให้คำนิยามไว้ว่า “รูปแบบการทำงานของ digital electronic จะใช้หน่วยความจำของ programmable สำหรับเก็บคำสั่งภายในที่สำคัญ เช่น Logic , sequencing , timing , counting , arithmetic เพื่อควบคุมเครื่องจักรกล

Programmable Controllers จะถูกออกแบบให้ทนต่ออุณหภูมิ , ความชื้น , ความสั่นสะเทือน และการรบกวนทางไฟฟ้า ขนาดของ Programmable controllers จะมีตั้งแต่ขนาดเล็ก 50 – 150 relays ไปจนถึงขนาดใหญ่ 500 – 3,000 relays

- **The Basic PC**

ส่วนประกอบพื้นฐานของ Programmable Controllers ตามที่แสดงใน block diagram รูปที่ 13-21



## รูปที่ 13-21 Basic component of a programmable controllers

The Central Processing Unit (CPU) ประกอบด้วย Logic memory , storage memory , power supply และ processor โดย CPU จะรับข้อมูลจาก input devices แล้วนำไปประมวลผลตัดสินใจบน stored program และส่งผลไปยัง output devices ให้ทำหน้าที่ตามที่ต้องการ

The solid-state input/output (I/O) ที่ต่อระหว่าง input และ output จะแยก input voltage และ output voltage ของ field-devices จาก CPU เพื่อช่วยลดการรบกวนทางไฟฟ้า โดย input field-devices จะประกอบด้วยปุ่ม Start และ Stop , limit switches , sensors และอุปกรณ์คำสั่งอื่น ๆ ส่วน output field-devices จะประกอบด้วย items as motor , magnetic contactor , electric heater , light และ electrically operated valves

The programmer keyboard and monitor จะใช้สำหรับการเข้าไปสู่ relay logic ที่ต้องการโดยผ่านทาง keyboard และแสดงผลทาง monitor

### ● Programming a PC

โปรแกรมของ PC จะถูกออกแบบโดยวิศวกร เพื่อใช้ควบคุมระบบ ladder diagram ซึ่งจะถูกบรรจุไว้ใน CPU และป้อนข้อมูลผ่านทาง keyboard

รูปแบบและจำนวนของ contact relay ที่ต้องการ เช่น normally open , normally closed หรือการต่อ contact แบบ series หรือ parallel จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำของ computer ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงข้อมูล computer logic สามารถเปลี่ยนได้จากการป้อนข้อมูลผ่านทาง keyboard เช่น ต้องการเพิ่มหรือลดจำนวน contact เป็นต้น โดย contact ที่เปลี่ยนแปลงจะต้องสัมพันธ์กับ relay coil

เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงาน PC จะ scans ไปหาโปรแกรม logic โดยเริ่มจากด้านซ้ายบนสุดของ ladder diagram และไปสิ้นสุดที่ด้านขวาของ button rung เมื่อ scans ไปสิ้นสุดที่ line ก็จะทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จากเวลาที่สวิทช์ของ PC “ON” ไปจนถึงเวลาที่สวิทช์ของ PC “OFF”

---

