

บทที่ 2

อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไป

(General electric equipment)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา (Overview)

ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังในโรงงานอุตสาหกรรม และอาคาร จะประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันสูงซึ่งมาจากการไฟฟ้าเป็นแรงดันต่ำเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานภายในโรงงานอุตสาหกรรม และอาคาร ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงประกอบด้วย หลักการและวิธีการใช้งาน หม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวนำไฟฟ้าประเภทต่างๆ ตลอดจนอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า โดนเน้นเรื่องมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานค่อนข้างมาก และมีใช้ในทุกอาคาร และโรงงาน ซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล การควบคุมเพื่อให้สามารถปรับความเร็วรอบให้เหมาะสมตามต้องการ จะช่วยเรื่องการประหยัดพลังงาน โดยจะกล่าวถึงการควบคุมเฟส การควบคุมแรงดัน ด้วยวิธีตัดต่อ การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีควบคุมเฟส การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีควบคุมความถี่ การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีควบคุมเวกเตอร์ การคำนวณไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ตลอดจนประสิทธิภาพในการใช้งานแต่ละประเภท

วัตถุประสงค์ (Objective)

1. อธิบายหลักการและวิธีการใช้หม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. เลือกใช้ตัวนำไฟฟ้าประเภทต่างๆ
3. อธิบายหลักการของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า
4. อธิบายหลักการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีต่างๆ ได้
5. อธิบายการคำนวณเกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละประเภท

บทนำ (Introduction)

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไป คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า ตัวนำไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้า โดยเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าได้มีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีควบคุมเฟส วิธีควบคุมความถี่ วิธีควบคุมเวกเตอร์วิธีควบคุมแรงบิดโดยตรง ตลอดจนการพัฒนามอเตอร์ให้มีความสูญเสียลดลง เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานให้มากขึ้น

2.1 หลักการและวิธีการใช้หม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(Principles of electric transformer, motor, generator and how to operate)

2.1.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

(1) นิยามของหม้อแปลง

หมายถึง เครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ประกอบด้วยขดลวดตั้งแต่ 2 ขดขึ้นไป ใช้แปลงแรงดัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่เท่าเดิมจากระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันหรือกระแสสลับหนึ่งๆ ไปยังระบบไฟฟ้าอีกระบบหนึ่งซึ่งโดยทั่วไปจะมีแรงดันหรือกระแสต่างกัน โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

ตอนที่ 2 บทที่ 2 อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไป

(2) คุณสมบัติพื้นฐานของหม้อแปลง

กรณีของหม้อแปลง 1 เฟส 2 ขดลวด

- แรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) แรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดปฐมภูมิ E_1 [V] และขดลวดทุติยภูมิ E_2 [V] แสดงได้ด้วยสูตรดังต่อไปนี้

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad \text{และ} \quad E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (2.1)$$

ทั้งนี้ Φ_m คือ ค่าเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด [Wb]

f คือ ความถี่ [Hz]

N_1 และ N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

- กระแส ถ้าให้กระแสของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากับ I_1 [A] และ I_2 [A] แล้ว จะได้สูตรดังต่อไปนี้

$$I_1 = I_o + I'_1 \quad (2.2)$$

ทั้งนี้ I_o คือ กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

I'_1 คือ กระแสปฐมภูมิชดเชยแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจาก I_2

- อัตราส่วนจำนวนรอบ ถ้าให้อัตราส่วนจำนวนรอบเท่ากับ a แล้ว จะได้สูตรดังต่อไปนี้

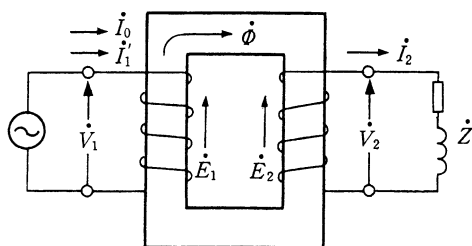
$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I'_1} \left(\approx \frac{I_2}{I_1} \right) \quad (2.3)$$

- พิกัดขนาด กำหนดจากพิกัดแรงดันทุติยภูมิ [V] และพิกัดกระแสทุติยภูมิ [A]

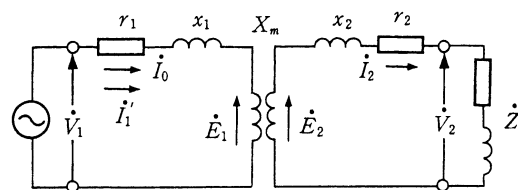
$$P_2 = V_2 \cdot I_2 \quad [V \cdot A] \quad (2.4)$$

[หมายเหตุ] พิกัดแรงดันปฐมภูมิที่ระบุไว้ที่แผ่นป้าย เป็นค่าที่ได้จากการนำพิกัดแรงดันทุติยภูมิมาคูณกับอัตราส่วนจำนวนรอบ a เท่านั้น ในสภาพที่มีโหลด (แล็กกิงเพาเวอร์แฟกเตอร์) นั้น แรงดันที่ต้องป้อนให้ขดลวดปฐมภูมิเพื่อให้ได้แรงดันทุติยภูมิตามพิกัดจะต้องสูงกว่าค่านี้เล็กน้อย

พิกัดกระแสปฐมภูมิเป็นค่าจากการนำพิกัดกระแสทุติยภูมิมาหารด้วยอัตราส่วนจำนวนรอบ กระแสปฐมภูมิในทางปฏิบัติจะต้องรวมกระแสสร้างสนามแม่เหล็กเข้ามามีด้วย

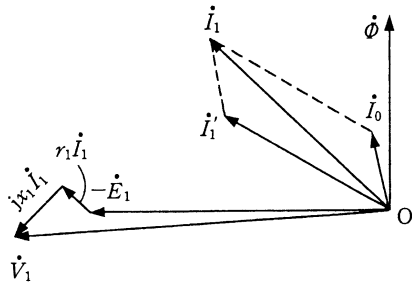


(a) รูปร่างง่ายของหม้อแปลงขณะที่มีโหลด

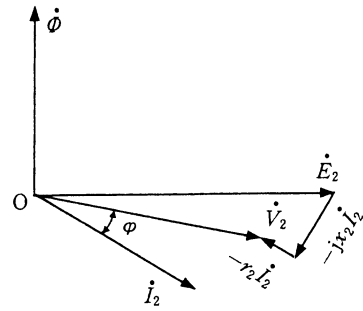


(b) ผังวงจร

รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของหม้อแปลงกับแรงดันขณะที่มีโหลด และรูปเวกเตอร์ของกระแส



(c) รูปเวกเตอร์ปฐมภูมิ



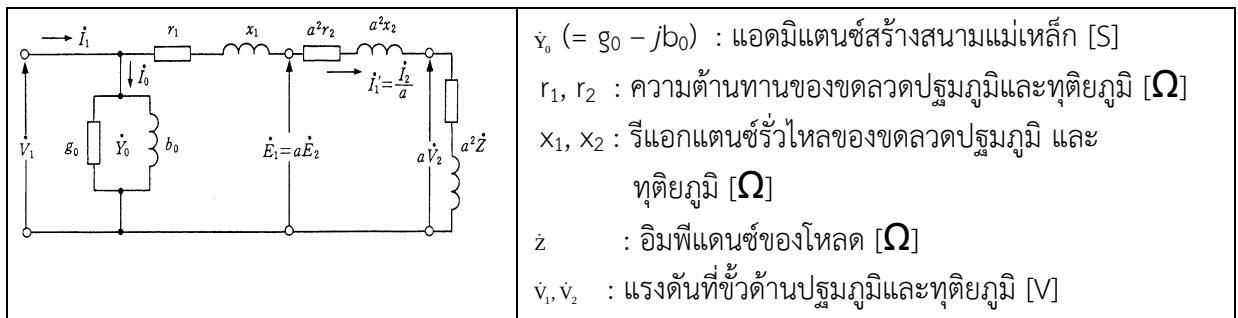
(d) รูปเวกเตอร์ทุติยภูมิ

รูปที่ 2.1 (ต่อ) หลักการทำงานของหม้อแปลงกับแรงดันขณะที่มีโหลด และรูปเวกเตอร์ของกระแส

2.1.2 วงจรสมมูล

(1) วงจรสมมูลอย่างง่าย

รูปที่ 2.2 เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายเมื่อมองจากด้านปฐมภูมิ โดยจะคำนวณหาคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ แรงดัน กระแส เพาเวอร์แฟกเตอร์ ฯลฯ วงจรสมมูลอย่างง่ายนี้เพียงพอต่อการใช้งานในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลอย่างง่าย (แปลงวงจรด้านทุติยภูมิเป็นด้านปฐมภูมิ)

(2) อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า

อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า $\mathcal{E}$ [%] แสดงได้ดังสูตรต่อไปนี้

$$\mathcal{E} = \frac{V_{20} - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100 \text{ [%]} \quad (2.5)$$

ทั้งนี้ V_{2n} คือ พิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิ

V_{20} คือ แรงดันระหว่างขั้วด้านทุติยภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อใช้พิกัดแรงดันด้านปฐมภูมิจ่ายกระแสเท่ากับพิกัดกระแสที่พิกัดเพาเวอร์แฟกเตอร์แล้วเปิดวงจรด้านทุติยภูมิ

เมื่อคำนวณหาอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจากวงจรสมมูลอย่างง่ายในรูปที่ 2.2 จะเป็นดังต่อไปนี้

$$V_{20} = |V_{2n} + I_{2n} r \cos \phi + I_{2n} x \sin \phi + j(I_{2n} x \cos \phi - I_{2n} r \sin \phi)|$$

$$\approx V_{2n} + I_{2n} r \cos \phi + I_{2n} x \sin \phi$$

ตอนที่ 2 บทที่ 2 อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไป

$$\varepsilon = \frac{V_{20} - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100 = \left(\frac{I_{2n}r}{V_{2n}} \cos \varphi + \frac{I_{2n}x}{V_{2n}} \sin \varphi \right) \times 100 = p \cos \varphi + q \sin \varphi \quad (2.6)$$

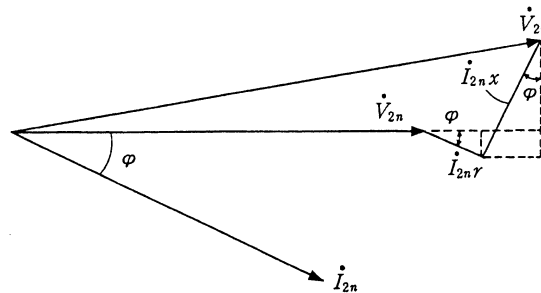
ทั้งนี้

$$r = r_1 / a^2 + r_2$$

$$x = x_1 / a^2 + x_2$$

$$p = \frac{I_{2n}r}{V_{2n}} \times 100: \text{เปอร์เซ็นต์ความต้านทาน}$$

$$q = \frac{I_{2n}x}{V_{2n}} \times 100 : \text{เปอร์เซ็นต์รีแอกแตนซ์}$$



รูปที่ 2.3 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า

2.1.3 การต่อวงจร 3 เฟส

การต่อวงจรขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง 3 เฟส หรือการต่อวงจรขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัวที่เทียบเท่ากัน มีข้อระวางที่แสดงในตารางต่อไปนี้

(1) แรงดันและกระแสของการต่อวงจร 3 เฟส

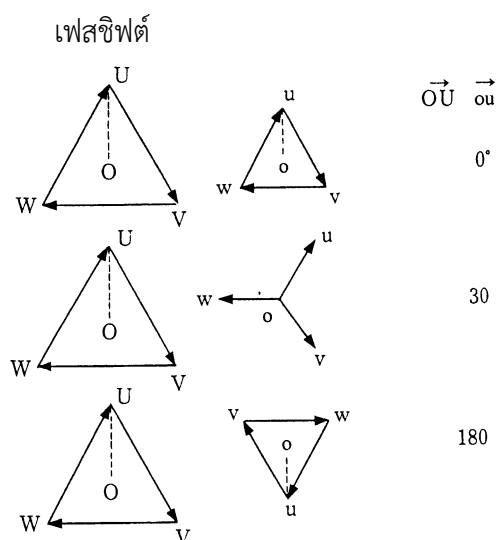
ตารางที่ 2.1 ขนาดแรงดันและกระแสของการต่อวงจร 3 เฟส

วงจร	แรงดันเฟส	กระแสเฟส
สตาร์	แรงดันระหว่างสาย / $\sqrt{3}$	กระแสในสาย
เดลต้า	แรงดันระหว่างสาย	กระแสในสาย / $\sqrt{3}$

(2) เฟสชิฟต์

ตารางที่ 2.2 การต่อวงจร 3 เฟสกับเฟสชิฟต์

การต่อวงจร	เฟสชิฟต์ด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิ	เฟสชิฟต์
สตาร์-สตาร์	เฟสเท่ากัน	0°
เดลต้า-เดลต้า	เฟสเท่ากัน	0°
เดลต้า-สตาร์	เฟสต่างกัน	±30°
สตาร์-เดลต้า	เฟสต่างกัน	±30°



รูปที่ 2.4 การต่อวงจร 3 เฟสกับเฟสชิฟต์

[หมายเหตุ] ถ้าทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ หรือด้านใดด้านหนึ่งเป็นวงจรเดลต้า ฮาร์โมนิกที่ 3 ในกระแสสร้างสนามแม่เหล็กจะกลายเป็นกระแสไหลวนในขดลวด ไม่ไหลออกมาข้างนอก เส้นแรงแม่เหล็กจึงไม่ผิดเพี้ยน แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเป็นรูปคลื่นที่สมบูรณ์

(3) เงื่อนไขการขนานหม้อแปลง

การขนานหม้อแปลงจะต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขต่อไปนี้เพื่อแบ่งกระแสไม่เกินพิกัดของหม้อแปลงแต่ละตัว

- (1) พิกัดแรงดันด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิต้องเท่ากัน ต่อขั้วให้ตรงกัน
- (2) อัตราส่วนจํานวนรอบต้องเท่ากัน
- (3) เปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์ลัดวงจรต้องเท่ากัน
- (4) ความต้านทานขดลวดและอัตราส่วนรีแอกแตนซ์รั่วไหลของหม้อแปลง แต่ละตัวต้องเท่ากัน
- (5) กรณีที่เป็น 3 เฟส ทิศทางของเฟสชิฟต์ และองศาของเฟสชิฟต์ต้องเท่ากัน

2.1.4 กำลังสูญเสียกับประสิทธิภาพ

(1) กำลังสูญเสีย

กำลังสูญเสียของหม้อแปลงประกอบด้วยกำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลด (กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก) P_i และกำลังสูญเสียจากโหลด (กำลังสูญเสียในลวดทองแดงและกำลังสูญเสียจากสเตรย์โหลด) P_c กำลังสูญเสียจากโหลดในกรณีของหม้อแปลงบรรจุน้ำมันจะใช้ค่าที่คำนวณโดยถือว่าอุณหภูมิมาตรฐานของขดลวดเท่ากับ 75°C

(2) ประสิทธิภาพ η

$$\eta = \frac{P_2 \cos \phi}{P_2 \cos \phi + P_i + P_c} \times 100 \quad [\%] \quad (2.7)$$

ทั้งนี้	P_2	คือ	กำลังขาออก (กำลังไฟฟ้าเสมือน) [VA]
	P_i	คือ	กำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลด [W]

ตอนที่ 2 บทที่ 2 อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไป

P_c คือ กำลังสูญเสียจากโหลดที่ P_2

$\cos \varphi$ คือ เพาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลด [%]

เงื่อนไขที่ทำให้ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุด คือ

$$\text{กำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลด} = \text{กำลังสูญเสียจากโหลด} \quad (2.8)$$

(3) ประสิทธิภาพตลอดวัน η_d

เนื่องจากโหลดของหม้อแปลงไม่ได้คงที่ตลอดเวลา หม้อแปลงสำหรับจ่ายไฟโดยทั่วไปโหลดตอนกลางวันกับโหลดตอนกลางคืนจะต่างกันหลายเท่า กำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดจะเกิดขึ้นทั้งวัน โดยไม่เกี่ยวกับโหลด แต่กำลังสูญเสียจากโหลดจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพการเปลี่ยนแปลงของโหลด จึงใช้ประสิทธิภาพตลอดวันเพื่อแสดงสภาพการใช้งานหม้อแปลง

$$\eta_d = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าขาออกต่อหนึ่งวัน}}{\text{พลังงานไฟฟ้าขาเข้าต่อหนึ่งวัน}} = \frac{W_t}{W_t + 24 P_i + \sum_{24} P_c t} \times 100 \quad [\%] \quad (2.9)$$

ทั้งนี้ W_t คือ กำลังขาออกสะสมต่อหนึ่งวัน [W·h]

P_i คือ กำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลด [W]

P_c คือ กำลังสูญเสียจากโหลด (เปลี่ยนแปลงไปตามโหลด) [W]

t คือ เวลา [h]

$$\text{เงื่อนไขที่ทำให้ประสิทธิภาพตลอดวันมีค่าสูงสุด: } 24 P_i = \sum_{24} P_c t \quad (2.10)$$

ตัวอย่าง 2.1 คำนวณคุณสมบัติต่างๆ ของหม้อแปลง 3 เฟส ที่มีพิกัดขนาด 200 kVA แรงดัน 6,000/210 V ความถี่ 50 Hz กำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลด 710 W กำลังสูญเสียจากโหลดเมื่อเดินเครื่องที่พิกัด 3,370 W อิมพีแดนซ์ลัดวงจร 3%

(1) ประสิทธิภาพที่โหลดใดๆ

เมื่อให้ขนาดของโหลดเท่ากับ 150 kVA และเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับ 0.9 แล้ว คำนวณประสิทธิภาพจากสูตร (2.7)

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{P_2 \cos \varphi}{P_2 \cos \varphi + P_i + P_c} = \frac{150 \times 0.9}{150 \times 0.9 + 0.71 + 3.37 \times \left(\frac{150}{200}\right)^2} = 0.9811 \quad (98.11\%)$$

(2) ประสิทธิภาพสูงสุดที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.9 จากสูตร (2.8)

ขณะที่มีประสิทธิภาพสูงสุด กำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลด = กำลังสูญเสียจากโหลด = 710W

ดังนั้น โหลด ณ จุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจะเท่ากับ

$$200 \times \sqrt{\frac{P_i}{P_c}} = 200 \times \sqrt{\frac{710}{3370}} = 200 \times 0.459 = 91.8 \text{ kVA}$$

$$\text{ประสิทธิภาพสูงสุด} = \frac{91.8 \times 0.9}{91.8 \times 0.9 + 0.71 + 0.71} = 0.9831 \quad (98.31\%)$$

(3) ประสิทธิภาพตลอดวัน

สมมติว่าในหนึ่งวันเดินเครื่องด้วยโหลด 40 kVA เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โหลด 120 kVA เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โหลด 180 kVA เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยเพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.9 เท่ากันหมด จากสูตร (2.9)

$$W_t = (40 \times 12 + 120 \times 8 + 180 \times 4) \times 0.9 = 1944 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

$$24P_i = 24 \times 0.71 = 17.04 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

$$\sum P_c t = 3.37 \left\{ \left(\frac{40}{200} \right)^2 \times 12 + \left(\frac{120}{200} \right)^2 \times 8 + \left(\frac{180}{200} \right)^2 \times 4 \right\} = 22.24 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

$$\text{ประสิทธิภาพตลอดวัน} = \frac{1944}{1944 + 17.04 + 22.24} = 0.9802 \text{ (98.02\%)}$$

(4) อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.9 จากสูตร (2.6)

$$p = \frac{I_{2N} \cdot r}{V_{2N}} = \frac{3I_{2N}^2 \cdot r}{3V_{2N} \cdot I_{2N}} = \frac{P_c}{P_2} = \frac{3.37}{200} = 0.01685 \text{ (1.685\%)}$$

$$q = \sqrt{(\%Z)^2 + p^2} = \sqrt{3^2 + 1.685^2} = 2.482\%$$

$$\varepsilon = p \cos \phi + q \sin \phi = 1.685 \times 0.9 + 2.482 \times \sqrt{1 - 0.9^2} = 2.589 \text{ (2.60\%)}$$

2.1.5 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานโดยทั่วไปมีอยู่ 2 ประเภท

1. หม้อแปลงเครื่องมือวัด
2. หม้อแปลงจำหน่าย แบบ 1 เฟส 3 เฟส

2.1.5.1 หม้อแปลงเครื่องมือวัด (Instrument Transformers)

การปฏิบัติงานของระบบไฟฟ้าทั้งแรงสูง และต่ำนั้นต่างก็จำเป็นต้องทราบปริมาณทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และตัวประกอบทางกำลังไฟฟ้า แต่ถ้าหากแรงดันเหล่านั้นยังคงมีปริมาณสูงอยู่ก็ยากในการทำการวัด จึงต้องจำเป็นลดระดับลงมาเพื่อประโยชน์ในการวัด และการป้องกันซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ลดระดับแรงดัน และกระแสให้ต่ำลงเรียกว่า หม้อแปลง เครื่องมือวัด (Instrument Transformers)

หม้อแปลงเครื่องมือวัด สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. หม้อแปลงกระแส (Current Transformer)
2. หม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer)

(1) หม้อแปลงกระแส (Current Transformer, CT.)

หม้อแปลงกระแสเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงกระแสค่าสูง ให้ลดต่ำลง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการวัดและ การป้องกันของระบบเป็นไปได้ดีขึ้น

หม้อแปลงกระแส

1. แปลงขนาดกระแสของระบบไฟฟ้าค่าสูงเป็นค่าต่ำเพื่อประโยชน์ในการวัดและการป้องกัน
2. แยกวงจร Secondary ออกจากวงจร Primary เพื่อให้เกิดความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน
3. ทำให้สามารถใช้วัดกระแสตามมาตรฐานทางด้าน Secondary (1A, 5A) ได้

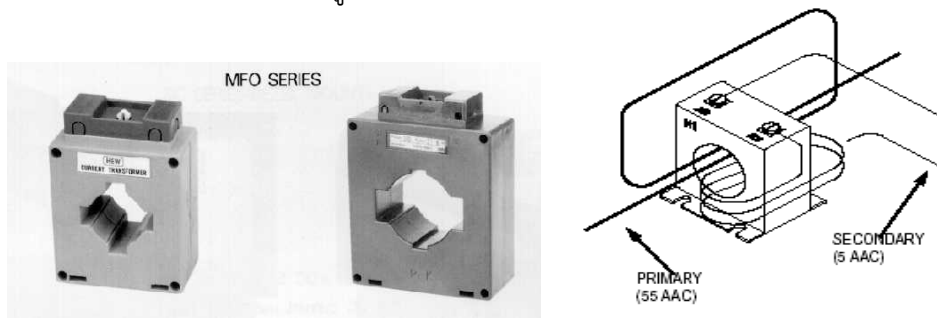
หม้อแปลงกระแสสามารถแบ่งออกตามการใช้งานเป็น 2 กลุ่มคือ

1. หม้อแปลงกระแสสำหรับการวัด (Measurement CT)
2. หม้อแปลงกระแสสำหรับการป้องกัน (Protection CT)

ตอนที่ 2 บทที่ 2 อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไป

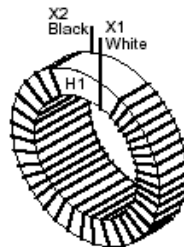
หม้อแปลงกระแสนี้ยังสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างเป็น 2 กลุ่มคือ

ก. แบบ Bar Primary คือทางด้าน Primary เป็นตัวนำของระบบไฟฟ้า และทาง Secondary มีขดลวดพันรอบแกนเหล็ก ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะหม้อแปลงกระแส

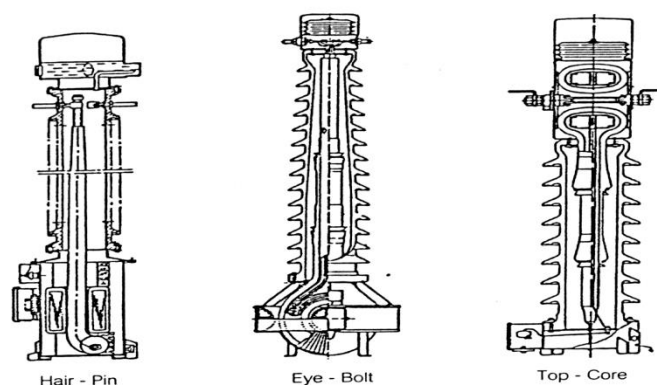
ข. แบบ Wound Primary คือทั้ง Primary และ Secondary เป็นแบบขดลวด แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างหม้อแปลงกระแส

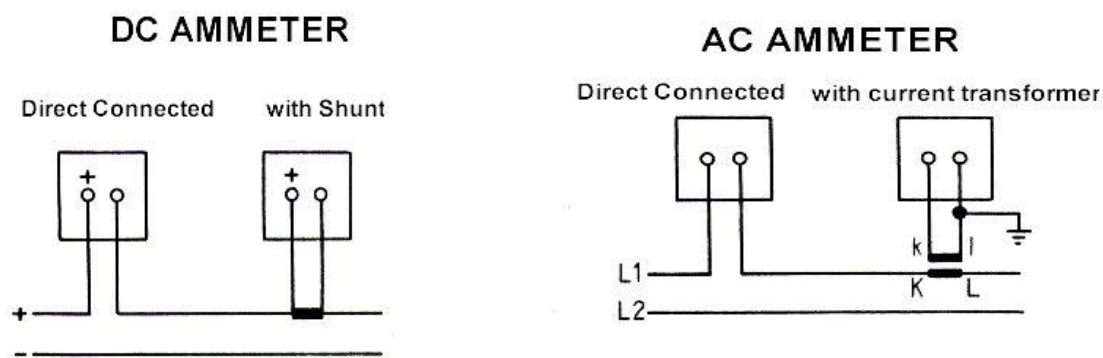
ในทางปฏิบัติหม้อแปลงกระแส สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 3 แบบ คือ

1. แบบ Hair-Pin Type
2. แบบ Eye-Bolt Type
3. แบบ Top-Core Type

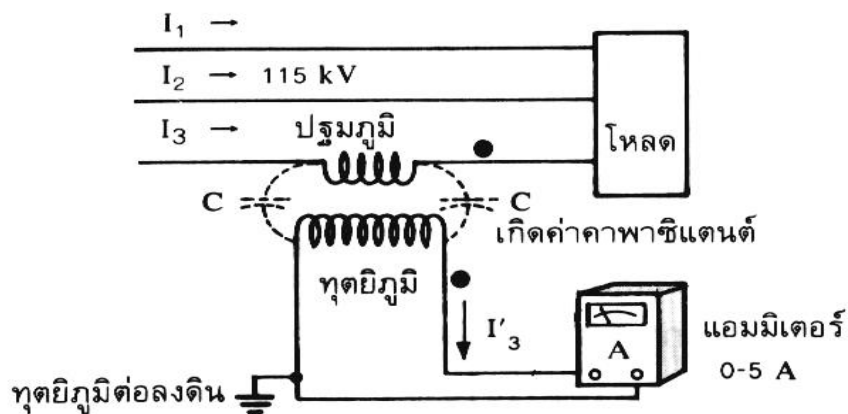


รูปที่ 2.7 หม้อแปลงกระแส

โครงสร้าง และการต่อใช้งานของหม้อแปลงกระแสแบบต่างๆ



รูปที่ 2.8 การต่อแอมป์มิเตอร์

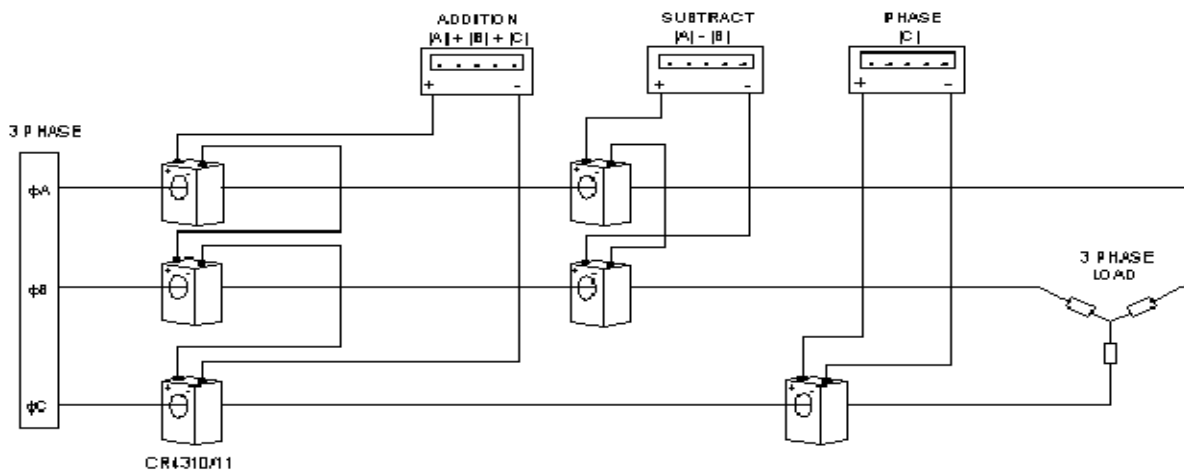


การต่อ CT ในระบบ 115 kV เพียงเฟสเดียว

รูปที่ 2.9 การต่อหม้อแปลงกระแสใช้งาน



รูปที่ 2.10 หม้อแปลงกระแสสามเฟส



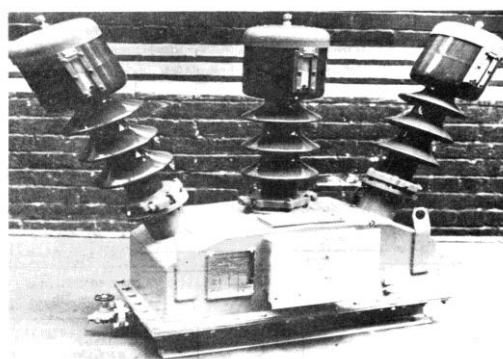
รูปที่ 2.11 การต่อใช้งานหม้อแปลงกระแสสามเฟส

(2) หม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer , VT.)

หม้อแปลงแรงดัน (VT) มีหน้าที่แปลงค่าแรงดันไฟฟ้าค่าสูงๆ ให้เหลือเป็นแรงดันไฟฟ้าค่าต่ำๆ ให้เหมาะสมกับการต่อใช้งานกับมิเตอร์เพื่อการวัด รีเลย์ หรืออุปกรณ์อื่นๆ หม้อแปลงแรงดันทำงาน ในสภาวะคล้ายไม่มีโหลด ขดลวด Primary เป็นแบบพันหลายชั้นพันด้วยขดลวดอบน้ำยาอย่างดี ปลายขดลวดต่อเข้ากับซิลด์ โลหะ และทำการฉนวนเป็นชั้นๆ ลดลั่นลงไป เพื่อให้การกระจายของแรงดันสม่ำเสมอ ขดลวด Primary ต่อตรงกับแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ส่วนทาง Secondary มีขดลวดสำหรับการวัดและ ขดลวดสำหรับการ Fault ลงดิน โดยจะต้องมีการแยกกันระหว่างในส่วนที่เป็นแรงดันสูงกับส่วนของแรงดันต่ำเพื่อความปลอดภัย โดยในการใช้งานภาระโหลด (Burden) ของหม้อแปลงแรงดันจะต้องมีค่าไม่เกินที่กำหนดไว้

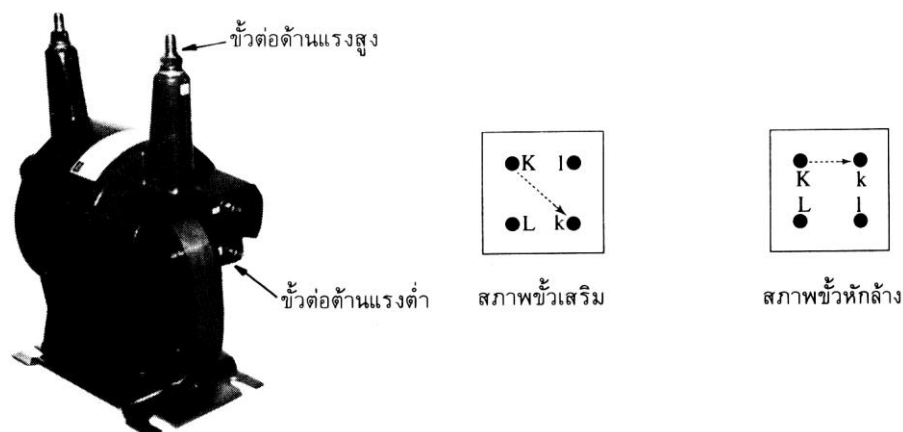
หม้อแปลงแรงดันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. Electromagnetic VT.
2. Coupling Capacitor VT.



PT ชนิดภายนอกอาคาร สำหรับแรงดัน 22 kV และ 33 kV เป็นแบบชุดเดียว 3 เฟส

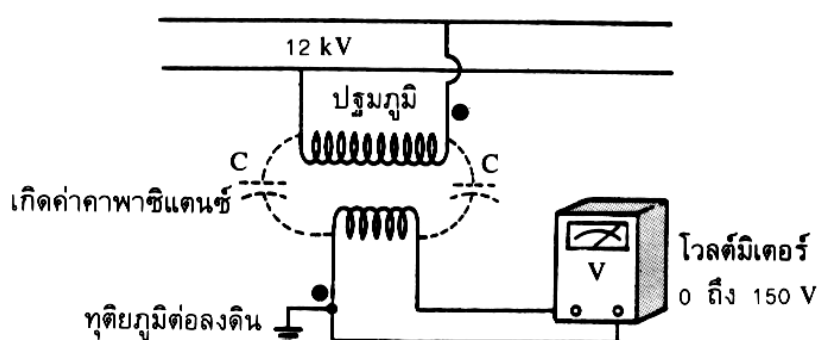
รูปที่ 2.12 หม้อแปลงแรงดัน



PT ชนิดภายในอาคาร ขนาด 12 kV/120 V 25 VA BIL 75 kV พร้อมทั้งแสดงสภาวะขั้วการต่อ

รูปที่ 2.13 หม้อแปลงแรงดัน

การต่อหม้อแปลงแรงดันใช้งาน



การต่อ PT ในระบบแรงดัน 12 kV

รูปที่ 2.14 ลักษณะการต่อหม้อแปลงแรงดันใช้งาน

2.1.5.2 หม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformer)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนระดับแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลงตามต้องการ ภายในประกอบด้วย ขดลวด 2 ชุดคือ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) และ ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) แต่สำหรับหม้อแปลงกำลัง (Power Transformer) ขนาดใหญ่บางตัวอาจมีขดลวดที่สามเพิ่มขึ้นคือขด Tertiary winding ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขด Primary และ Secondary และแรงดันที่แปลงออกมาจะมีค่าต่ำกว่าขด Secondary

เนื่องจากหม้อแปลงชนิดนี้มักอยู่ภายนอกอาคาร ดังนั้นต้องมีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม นอกจากนั้นหม้อแปลงจะต่ออยู่ที่ปลายทั้งสองด้านของระบบสายส่ง และใช้งานอยู่ตลอดเวลา ซึ่งอาจจะได้รับผลกระทบจากแรงดันเกินทรานเซียน (transient overvoltage) จากการเกิดฟ้าผ่าเหนี่ยวนำเข้าสายส่ง ส่งผลต่อฉนวนของหม้อแปลง อันอาจทำให้เกิดการเบรคดาวน์ และทำลายสภาพการเป็นฉนวนได้

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตัวใหญ่ๆ บางตัวสามารถแบ่งระดับการใช้งานออกเป็น 3 ระดับ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตัวหนึ่งมีพิกัด 18000/24000/32000 kVA ซึ่งการออกแบบพิกัดความสามารถในการใช้งานของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับวิธีการระบาย ความร้อนออกจากหม้อแปลงในขณะนั้นๆ โดย

1. ระบายความร้อน โดย อากาศที่หมุนวนตามธรรมชาติ (Natural circulation of air , OA) ใช้ งานสูงสุดที่ระดับพิกัด 18,000 kVA
2. ระบายความร้อน โดย ดูดอากาศระบายโดยรอบตัวถังด้วยพัดลม (Forced-air cooling with fans ; FA) ใช้งานสูงสุดที่ระดับแรงดันพิกัด 24,000 kVA
3. ระบายความร้อน โดย ป้อนหมื่นน้ำมันและประกอบกับดูดอากาศระบายโดยรอบตัวถังด้วยพัดลม (Forced circulation of oil accompanied by forced air cooling , FOA) ใช้งานได้สูงสุดที่ ระดับพิกัด 320,000 kVA

ดังนั้นชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่แบ่งออกตามคุณสมบัติการฉนวนและวิธีการระบายความร้อน สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้

AA	เป็นหม้อแปลงชนิด Dry – Type , Self - Cooled
AFA	เป็นหม้อแปลงชนิด Dry – Type , Forced – Air cooled
OA	เป็นหม้อแปลงชนิด Oil – Immersed , Self - Cooled
OA/FA	เป็นหม้อแปลงชนิด Oil – Immersed , Self – Cooled / Forced – Air cooled
OA/FA/FOA	เป็นหม้อแปลงชนิด Oil – Immersed , Self – Cooled / Forced – Air cooled / forced – air , Forced – Oil cooled



รูปที่ 2.15 หม้อแปลงจำหน่าย

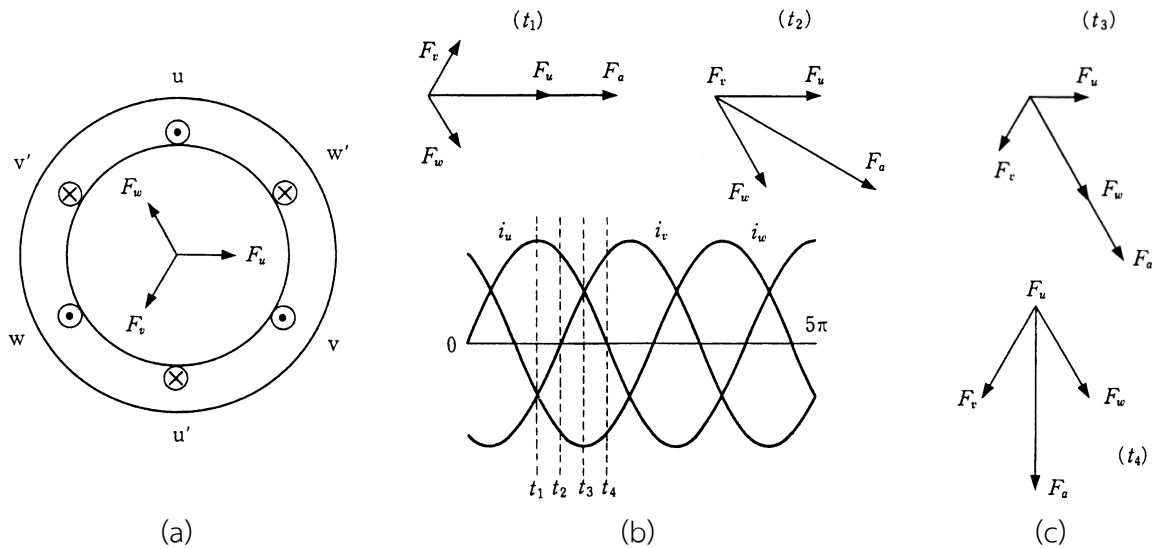
2.1.6 เครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1.6.1 พื้นฐานของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(1) คำจำกัดความของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับที่ประกอบด้วยสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งต่างมีขดลวดอาร์เมเจอร์ที่เป็นอิสระต่อกัน และทำงานด้วยการถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำ แม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ในสถานะที่มีเครื่องหมุนด้วยความเร็วคงที่ ความเร็วนี้จะไม่เท่ากับความเร็วซิงโครนัส ขดลวดที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับเรียกว่า ขดลวดปฐมภูมิ ส่วนขดลวดอีกขดหนึ่งเรียกว่า ขดลวดทุติยภูมิ

(2) หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 2.16 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน

(a) สนามแม่เหล็กหมุน

รูปที่ 2.16 (a) แสดงขดลวดที่เหมือนกัน 3 ขด ได้แก่ uu' , vv' และ ww' เรียงตัวโดยทำมุม $2\pi/3$ [rad] ซึ่งกันและกัน เมื่อลัดวงจรขั้ว u' , v' และ w' และจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสตามที่แสดงในรูปที่ 2.16 (b) ให้กับขั้ว u , v และ w แล้ว เมื่อเวลาเท่ากับ t_1 , t_2 , t_3 และ t_4 ในขดลวดแต่ละขดตามทิศทางแกนหมุนจะเกิดแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำตัดกัน F_u , F_v และ F_w ที่มีขนาดแปรผันตามกระแสตามรูป 2.16 (c) แรงลัพธ์ของแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ F_a จะมีขนาดคงที่ค่าหนึ่งตามรูป เป็นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega_0 = 2\pi f$ [rad/s] ทำให้ในบริเวณนั้นเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น

(b) การเกิดแรงบิด

เมื่อวางทรงวัตถุกระบอกที่นำไฟฟ้าไว้ในสนามแม่เหล็กหมุน เส้นแรงแม่เหล็กจะตัดผ่านวัตถุกระบอกที่นำไฟฟ้าทรงกระบอก ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในวัตถุกระบอกที่นำไฟฟ้า และมีกระแสไหลวนเกิดขึ้น แรงแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างกระแสนี้กับเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงบิดขึ้น ตามทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็ก และวัตถุกระบอกที่นำไฟฟ้าจะหมุนตามทิศทางการหมุนของ สนามแม่เหล็ก หรือแทนที่จะใช้วัตถุกระบอกที่นำไฟฟ้าจะใช้ขดลวด 3 เฟสที่ต่อลัดวงจรแล้วก็ได้ผลลัพธ์ เช่นเดียวกันนี้เป็นหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

(3) คุณสมบัติพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

- ความเร็วซิงโครนัส n_s

$$n_s = \frac{120 f_1}{p} [\text{min}^{-1}] \quad (2.11)$$

ในที่นี้ f_1 คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ
 p คือ จำนวนขั้ว

ตอนที่ 2 บทที่ 2 อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไป

- ความเร็วรอบ n

$$n = n_s(1 - s) [\text{min}^{-1}]$$

ทั้งนี้ $s = \text{สลิป} = \frac{n_s - n}{n_s}$ (2.12)

- ความถี่ทุติยภูมิ (ความถี่สลิป) f_2

$$f_2 = sf_1 \quad [\text{Hz}]$$

$$\therefore n_s - n = \frac{120f_2}{p} \quad (2.13)$$

- แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ : แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำปฐมภูมิ E_1 [V] และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทุติยภูมิ E_{2s} [V] เมื่อเดินเครื่องด้วยสลิปเท่ากับ s คำนวณได้ตามสูตรต่อไปนี้

$$E_1 = 4.44 f_1 \omega_1 k_{\omega 1} \Phi_1 \quad \text{และ} \quad E_{2s} = 4.44 f_2 \omega_2 k_{\omega 2} \Phi_1 \quad (2.14)$$

ทั้งนี้ Φ_1 คือ เส้นแรงแม่เหล็กของคลื่นมูลฐานของทุกขั้ว [Wb]

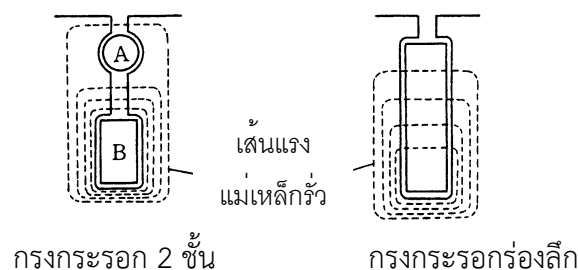
ω_1 และ ω_2 คือ จำนวนรอบของขดลวด 1 เฟสด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

f_1 และ f_2 คือ ความถี่ด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ [Hz]

$k_{\omega 1}$ และ $k_{\omega 2}$ คือ สัมประสิทธิ์ของขดลวดด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

ตารางที่ 2.3 จะสรุปความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการเดินเครื่อง สลิป ความถี่ทุติยภูมิและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทุติยภูมิ

ตารางที่ 2.3 สถานะการเดินเครื่อง สลิป ความถี่ทุติยภูมิ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทุติยภูมิ			
สถานะการเดินเครื่อง	สลิป (s)	ความถี่ทุติยภูมิ (f_2)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทุติยภูมิ (E_{2s})
หยุด	1	f_1	E_2
มอเตอร์	$0 < s < 1$	sf_1	sE_2
ความเร็วซิงโครนัส	0	0	0



รูปที่ 2.17 รูปร่างโรเตอร์ของมอเตอร์กรงกระรอกแบบพิเศษ

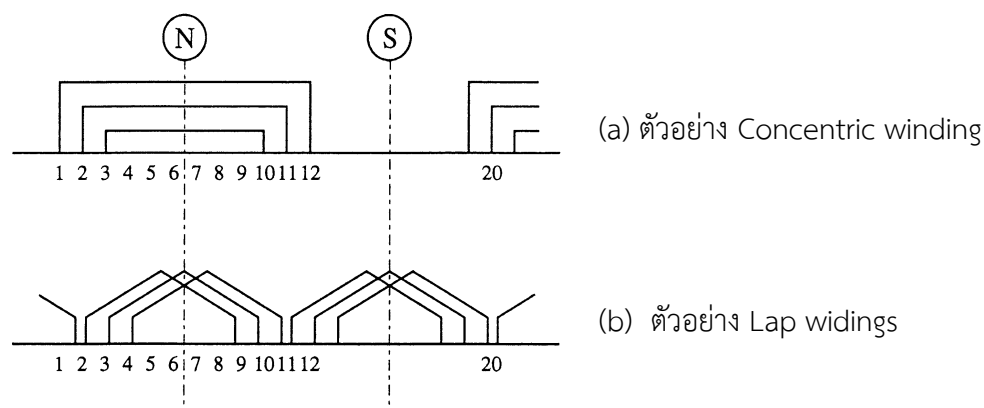
(4) ประเภทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

แบ่งประเภทตามโครงสร้างของโรเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

- มอเตอร์เหนี่ยวนำโรเตอร์แบบกรงกระรอกธรรมดา โครงสร้างของโรเตอร์ประกอบด้วยตัวนำ รูปแท่งจำนวนมากซึ่งมีขดลวดหุ้มด้วยฉนวนฝังอยู่ในสล๊อต กับวงแหวนลัดวงจรซึ่งทำหน้าที่ลัดวงจรขดลวดเหล่านี้
- มอเตอร์เหนี่ยวนำโรเตอร์แบบกรงกระรอกแบบพิเศษ โรเตอร์มีโครงสร้างขดลวดหุ้มด้วยฉนวนแบบพิเศษเพื่อควบคุมกระแสขณะเริ่มหมุน และเพิ่มแรงบิดขณะเริ่มหมุน แบ่งเป็นมอเตอร์กรงกระรอกสองชั้น กับมอเตอร์กรงกระรอกร่องลึก (รูปที่ 2.17)
- มอเตอร์เหนี่ยวนำโรเตอร์แบบรูปขดลวด โครงสร้างของโรเตอร์มีขดลวดหุ้มด้วยฉนวนเป็นขดลวดหลายเฟส และต่อขั้วสายขดลวดออกมาภายนอกโดยใช้สลีปริง

(5) ขดลวดสเตเตอร์

- Concentrated winding กับ Distributed winding : หากจำนวนสล๊อตของแต่ละขั้วและแต่ละเฟสเท่ากับ 1 ช่องจะเรียกว่า Concentrated winding หากมีจำนวนตั้งแต่ 2 ช่องขึ้นไปจะเรียกว่า Distributed windings แบบที่นิยมใช้กันในเกือบทุกกรณีได้แก่ Distributed windings เนื่องจากจะมีอัตราการใช้งานแกนเหล็กของสเตเตอร์สูงกว่า
- Full pitch windings กับ Fractional pitch winding: หากความกว้างของขดลวดเท่ากับระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กจะเรียกว่า Full pitch windings หากสั้นกว่าระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กจะเรียกว่า Fractional pitch winding โดยทั่วไปจะใช้ Fractional pitch winding เพื่อลดคลื่นฮาร์โมนิก
- Lap windings กับ Concentric winding: Lap windings จะมีคลื่นฮาร์โมนิกของเส้นแรงแม่เหล็กน้อยกว่าแต่ Concentric winding จะพันขดลวดด้วยเครื่องจักรได้ง่ายกว่า



รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบขดลวดได้ศูนย์กับขดลวดซ้อน (ต่อ 1 เฟส)

2.1.6.2 คุณสมบัติ

(1) วงจรของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

- กระแสทุติยภูมิ กำหนดให้กระแสทุติยภูมิ I_2 [A] ของมอเตอร์ที่เดินเครื่องด้วยสลิป s คำนวณได้ตามสูตรต่อไปนี้

$$\dot{I}_2 = \frac{s\dot{E}_2}{r_2 + jsx_2} \quad (2.15)$$

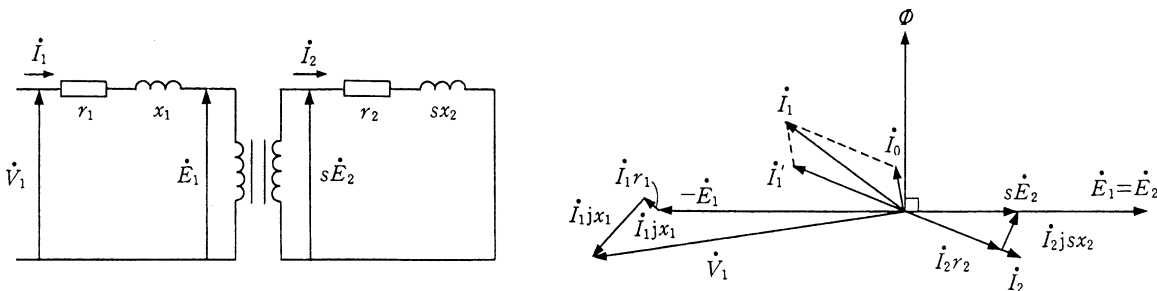
ทั้งนี้ E_2 คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อหยุดนิ่ง [V]

r_2 คือ ความต้านทานทุติยภูมิ [Ω]

x_2 คือ รีแอกแตนซ์รั่วด้านทุติยภูมิ (ที่ความถี่ปฐมภูมิ) [Ω]

โดยทุกค่าต้องแปลงเทียบเป็นด้านปฐมภูมิ

- วงจรกับเวกเตอร์ ถ้าให้แรงดันเฟสแบบสตาร์ด้านปฐมภูมิเท่ากับ V_1 [V] กระแสด้านปฐมภูมิ เท่ากับ I_1 [A] ความต้านทานด้านปฐมภูมิเท่ากับ r_1 [Ω] รีแอกแตนซ์รั่วด้านปฐมภูมิเท่ากับ x_1 [Ω] และ กระแสสร้างสนามแม่เหล็กเท่ากับ I_0 [A] แล้ว โดยใช้วิธีประมาณแบบเดียวกับหม้อแปลงจะได้วงจรต่อ 1 เฟส และเวกเตอร์เมื่อต่อวงจรแบบสตาร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสตามที่แสดงในรูปที่ 2.19 (a) และ (b)



(a) ผังวงจรของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (ต่อ 1 เฟส)

(b) ผังเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (ต่อ 1 เฟส)

รูปที่ 2.19 วงจรแบบสตาร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

(2) วงจรสมมูล

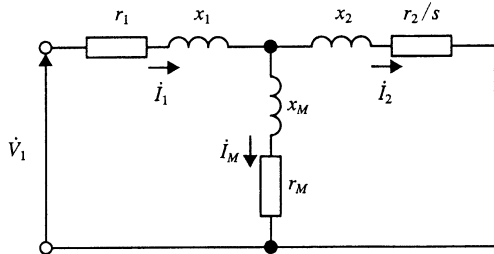
เมื่อนำสูตร (2.15) ด้านขวามาทหารทั้งเศษและส่วนด้วย s แล้ว

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2} \quad (2.16)$$

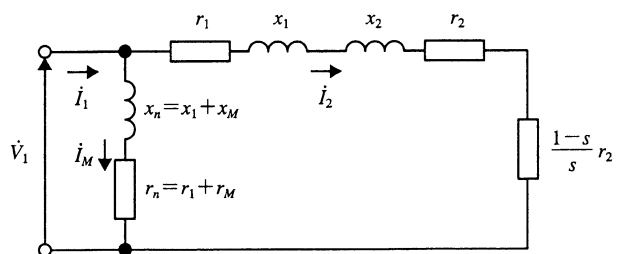
ดังนั้น เมื่อนำผลต่างศักย์ไฟฟ้า sE_2 และอิมพีแดนซ์ $r_2 + jsx_2$ ในรูปที่ 2.19 (a) มาหารด้วย s แล้ว แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทุติยภูมิ E_2 ที่แปลงเทียบเป็นด้านปฐมภูมิ จะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำปฐมภูมิ E_1 เราจึงสามารถต่อวงจรด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิในรูปที่ 2.19 (a) ได้โดยตรง ได้เป็นวงจรสมมูลรูปตัว T ตามรูปที่ 2.20 (a) ทั้งนี้ วงจรของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก I_0 จะแสดงด้วยความต้านทาน Iron loss กับรีแอกแตนซ์สร้างสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.20 (b) แสดงวงจรสมมูลรูปตัว L ซึ่งย้ายวงจรสร้างสนามแม่เหล็กไปไว้ด้าน แหล่งจ่ายไฟ เนื่องจากในเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีแอร์เก็บในเส้นทางสนามแม่เหล็ก จึงต้องระมัดระวังว่าอัตราส่วนของ กระแสสร้างสนามแม่เหล็กต่อกระแสเข้าจะสูงกว่ากรณีของหม้อแปลง

รูปที่ 2.20 (c) แสดงวงจรสมมูลรูปตัว T-II เป็นวงจรสมมูลที่ได้รับการยอมรับโดย JEC2137-2000 “เครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ” (สมาคมวิชาการไฟฟ้า ข้อกำหนดมาตรฐานของคณะกรรมการสำรวจมาตรฐาน ทางไฟฟ้า) ให้ใช้ในการคำนวณคุณลักษณะได้ วงจรสมมูลนี้มีความถูกต้องเกือบๆ เท่ากับรูปที่ 2.19 (a)



(a) วงจรสมมูลรูปตัว T

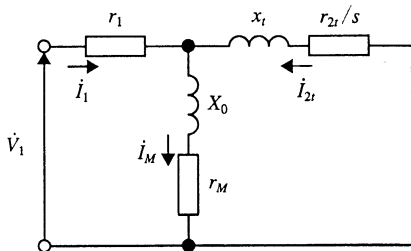


(b) วงจรสมมูลรูปตัว L

: แรงดันวงจรแบบสตาร์ปฐมภูมิ $\dot{V}_1$
: กระแสปฐมภูมิ I_1
: กระแสทุติยภูมิ (แปลงเทียบเป็นด้านปฐมภูมิ)
: กระแสสร้างสนามแม่เหล็กขณะ I_n ที่ไม่มีโหลด

I_M : กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก
s: สลิป
 r_1 : ความต้านทานปฐมภูมิ
 r_2 : ความต้านทานทุติยภูมิ (แปลงเทียบเป็นด้านปฐมภูมิ)

x_1 : รีแอกแตนซ์รั่วปฐมภูมิ
 x_2 : รีแอกแตนซ์รั่วทุติยภูมิ
 r_M : ความต้านทาน Iron loss
 x_M : รีแอกแตนซ์สร้างสนามแม่เหล็ก



(c) วงจรสมมูลรูปตัว T-II

$$\begin{aligned} r_{2t} &= a^2 r_2 \\ x_t &= a^2 (x^2 + x_M) - a x_M \approx x_1 + x_2 \\ x_0 &= a x_M = x_M + x_1 \\ \text{ทั้งนี้} \quad a &= \frac{x_M + x_1}{x_M} \end{aligned}$$

รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

(3) การคำนวณคุณลักษณะ

การคำนวณคุณลักษณะของเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะนิยมใช้วิธีผังวงกลมกันมาก แต่เมื่อมีการปรับปรุงมาตรฐาน JEC “เครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ” ก็มีการเปลี่ยนไปใช้วิธีไหลตรงหรือวิธีวงจรสมมูล อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการใช้วงจรสมมูลรูปตัว T-II ซึ่งกำหนดโดย JEC นั้น การคำนวณค่อนข้างจะซับซ้อน ในที่นี้จึงจะอธิบายการคำนวณคุณลักษณะโดยใช้วงจรสมมูลรูปตัว L ตามรูป 2.20 (b)

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{V}_1}{r_n + jx_n} \quad [\text{A}] \quad (2.17)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{V}_1}{(r_n + r_2/s) + j(x_1 + x_2)} \quad [\text{A}] \quad (2.18)$$

$$\text{กระแสปฐมภูมิ} \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_n + \dot{I}_2 \quad [\text{A}] \quad (2.19)$$

ตอนที่ 2 บทที่ 2 อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไป

เมื่อให้ $\dot{I}_1 = \dot{V}_1 / (R + jX)$ แล้ว

$$\text{เพาเวอร์แฟกเตอร์: } \cos \varphi = R / \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.20)$$

$$\text{กำลังขาเข้าปฏุมภูมิ: } P_1 = m_1 V_1 I_1 \cos \varphi \text{ [W]} \quad (2.21)$$

$$(m_1 \text{ คือ จำนวนเฟสปฏุมภูมิ และ } I_1 = |\dot{I}_1|)$$

$$\text{กำลังขาเข้าทุติยภูมิ: } P_2 = m_1 I_2^2 \cdot \frac{r_2}{s} \text{ [W]} \quad (2.22)$$

$$\text{Copper loss ทุติยภูมิ: } P_{r2} = m_1 I_2^2 r_2 = s P_2 \text{ [W]} \quad (2.23)$$

$$\text{กำลังขับที่เกิดขึ้น: } P_0 = P_2 - P_{r2} = P_2(1-s) = m_1 I_2^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) r_2 = \frac{m_1 V_1^2 (1-s) \frac{r_2}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2} \text{ [W]} \quad (2.24)$$

$$\text{ประสิทธิภาพ: } \eta = \frac{P_0}{P_1} \times 100 \% \quad (2.25)$$

$$\text{แรงบิด: } T = \frac{\text{กำลังขับที่เกิดขึ้น}}{\text{ความเร็วเชิงมุม}} = \frac{P_0}{\omega} = \frac{P_2(1-s)}{\omega_0(1-s)} = \frac{P_2}{\omega_0} = \frac{\text{กำลังขาเข้าทุติยภูมิ}}{\text{ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส}} \quad (2.26)$$

$$T = \frac{m_1 I_2^2 \frac{r_2}{s}}{\omega_0} = \frac{m_1 V_1^2 \frac{r_2}{s}}{\omega_0 \left\{ \left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2 \right\}} \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (2.27)$$

$$\text{แรงบิดสูงสุด: } T_m = \frac{m_1 V_1^2}{2\omega_0 \{ r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2} \}} \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (2.28)$$

$$(\text{ที่สลิป } s_t = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2}})$$

$$\text{กำลังขาออกสูงสุด: } P_m = \frac{m_1 V_1^2}{2\{ (r_1 + r_2) + \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} \}} \text{ [W]} \quad (2.29)$$

$$(\text{ที่สลิป } s_p = \frac{r_2}{r_2 + \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}})$$

หมายเหตุ: การคำนวณประสิทธิภาพและแรงบิด แต่เดิมใช้วิธีคำนวณเทียบกับกำลังขับที่เกิดขึ้น แต่ในมาตรฐาน JEC ฉบับปรับปรุงได้กำหนดให้คำนวณเทียบกับกำลังขาออกที่เพลลาของมอเตอร์ซึ่งได้จากกำลังขับที่เกิดขึ้นลบกำลังสูญเสียทางกล และกำลังสูญเสียจากสเตรย์โหลด

(4) การคำนวณคุณสมบัติพื้นฐานเพื่อคำนวณคุณลักษณะตามวงจรสมมูล

(ก) ความต้านทานขดลวดปฏุมภูมิ คำนวณค่าความต้านทานขดลวดปฏุมภูมิ r_1 [Ω] จากค่าเฉลี่ย R_1 ของความต้านทานขดลวดปฏุมภูมิที่วัดได้ระหว่างทั้ง 3 ขั้วได้ดังต่อไปนี้

$$r_1 = \frac{R_1}{2} \cdot \frac{235 + T}{235 + t} \quad (2.30)$$

ทั้งนี้	T	คือ	อุณหภูมิมาตรฐานของขดลวด [°C]
	t	คือ	อุณหภูมิของขดลวดขณะที่วัด [°C]

(ข) คุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบโดยไม่มีโหลด จากพิกัดแรงดัน V_1 กระแสขณะไม่มีโหลด I_0 และกำลังขาเข้า 3 เฟส P_{10} จะคำนวณ $r_n (= r_1 + r_M)$ [Ω] และ $x_n (= x_1 + x_M)$ [Ω] ดังต่อไปนี้

$$r_n = \frac{P_{10}}{3I_0^2} \quad r_n^2 + x_n^2 = \left(\frac{V_1}{I_0}\right)^2 \quad x_n = \sqrt{\left(\frac{V_1}{I_0}\right)^2 - \left(\frac{P_{10}}{3I_0^2}\right)^2} \quad (2.31)$$

หมายเหตุ มาตรฐาน JEC ฉบับปรับปรุงได้กำหนดให้หกกำลังสูญเสียทางกลจากกำลังขาเข้า 3 เฟส และคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์เมื่อไม่มีโหลดโดยไม่คิดกำลังสูญเสียทางกล

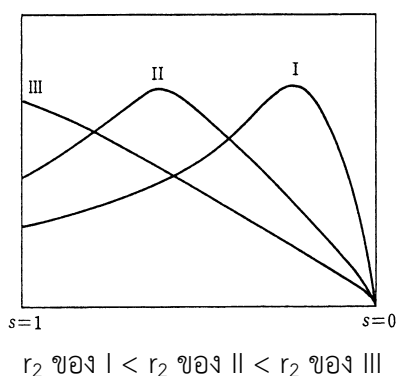
(ค) คุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบโดยตรึงอยู่กับที่ จากแรงดันปฐมภูมิ V_{1s} กระแสปฐมภูมิ I_{1s} และกำลังขาเข้า 3 เฟส P_{1s} จะคำนวณอิมพีแดนซ์สมมูล Z_s (ความต้านทาน R_s และรีแอ็กแตนซ์ X_s) [Ω] ดังต่อไปนี้

$$Z_s = \frac{V_{1s}}{I_{1s}} \quad R_s = \frac{P_{1s}}{3I_{1s}^2} \quad X_s = \sqrt{\left(\frac{V_{1s}}{I_{1s}}\right)^2 - \left(\frac{P_{1s}}{3I_{1s}^2}\right)^2} \quad (2.32)$$

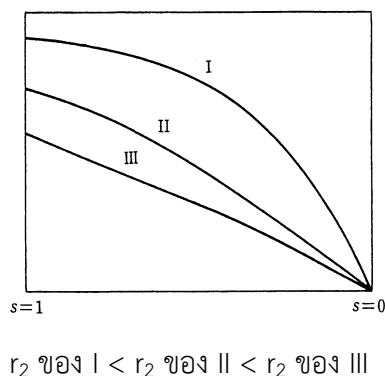
ในวงจรสมมูลรูปตัว L จะคำนวณค่าคงที่ของวงจรสมมูลโดยให้ $R_s = r_1 + r_2$ และ $X_s = x_1 + x_2$
 หมายเหตุ: กรณีที่จะคำนวณค่าคงที่ของวงจรสมมูลจากอิมพีแดนซ์ขณะที่ทำการทดสอบโดยตรึงอยู่กับที่ แต่เดิมในการทดสอบโดยตรึงอยู่กับที่ จะคำนวณโดยถือว่า $I_{0s} \ll I_{1s}$ และไม่คำนึงถึงวงจรสร้างสนามแม่เหล็ก แต่มาตรฐาน JEC ฉบับปรับปรุงได้กำหนดให้คำนวณค่าคงที่โดยต้องคำนึงถึงวงจรสร้างสนามแม่เหล็กด้วย

(5) คุณลักษณะแรงบิด

- Proportional shifting คุณสมบัติใดๆ ที่ขึ้นอยู่กับความต้านทานทุติยภูมิ และสลิปในรูป r_2/s เพียงพจน์เดียวนั้น หาก r_2/s มีค่าคงที่ คุณสมบัตินั้นก็จะมีค่าคงที่ด้วย กล่าวคือ เมื่อแรงบิดหรือกระแสมีค่าคงที่ สลิปของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงแปรผันตามความต้านทานของวงจรทุติยภูมิ คุณลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Proportional shifting

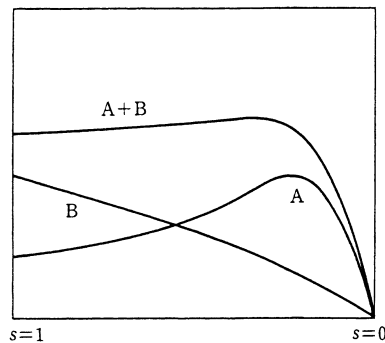


รูปที่ 2.21 Proportional shifting ของแรงบิด

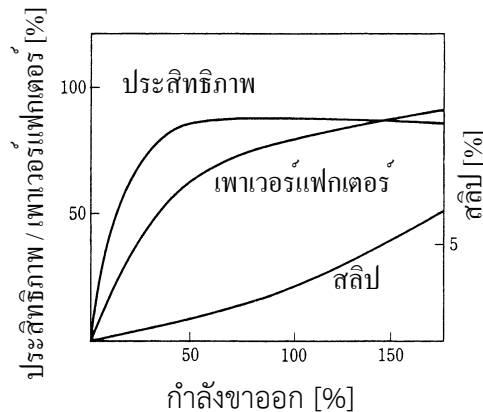


รูปที่ 2.22 Proportional shifting ของกระแสปฐมภูมิ

- คุณลักษณะแรงบิดของมอเตอร์กรงกระรอกสองชั้น: ขณะเริ่มหมุนมอเตอร์จะมีความถี่สลิปสูง และอิมพีแดนซ์ของตัวนำภายในจะมีค่าสูงกว่าตัวนำภายนอก กระแสส่วนใหญ่จึงไหลผ่านตัวนำภายนอก มอเตอร์จึงเริ่มหมุนโดยมีความต้านทาน ทดถุยมสูง ทำให้คุณลักษณะขณะเริ่มหมุนดีขึ้น แต่ขณะที่กำลังเดินเครื่องมอเตอร์จะมีความถี่สลิปต่ำ กระแสส่วนใหญ่จึงไหลผ่านตัวนำภายในซึ่งมีความต้านทานต่ำ จึงช่วยป้องกันไม่ให้อำนาจสูญเสียมาก
- คุณลักษณะกำลังขาออก รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างหนึ่งของประสิทธิภาพ เพาเวอร์แฟกเตอร์ และสลิปเทียบกับกำลังขาออก



รูปที่ 2.23 คุณลักษณะแรงบิดของกรงกระรอกสองชั้น



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างประสิทธิภาพ เพาเวอร์แฟกเตอร์ และสลิป

2.1.6.3 การเดินเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

(1) การสตาร์ท

(ก) มอเตอร์เหนี่ยวนำกรงกระรอก (กรงกระรอกธรรมดาและกรงกระรอกแบบพิเศษ)

- การสตาร์ทด้วยแรงดันเต็มที่ใช้กับมอเตอร์ที่มีขนาดเล็ก แรงบิดขณะเริ่มหมุนจะเท่ากับ 100-200% ของพิกัด กระแสเริ่มหมุนจะเท่ากับ 500-700% ของพิกัด กรณีที่แหล่งจ่ายไฟมีกำลังมากอาจใช้กับมอเตอร์ที่มีขนาดปานกลางด้วยก็ได้

- การสตาร์ทแบบสตาร์ท-เดลต้า แรงดันของขดลวดจะเท่ากับ $1/\sqrt{3}$ ทั้งกระแสเริ่มหมุนกับแรงบิดเริ่มหมุนจะเท่ากับ $1/3$

- การสตาร์ทด้วยรีแอกเตอร์ เลือกให้ปตามแรงบิดของโหลด หากกระแสเป็น $1/a$ แรงบิดจะเป็น $1/a^2$

- การสตาร์ทด้วยเครื่องชดเชย ใช้หม้อแปลงขดลวดเดียว เมื่อลดแรงดันเป็น $1/a$ แรงบิดจะเป็น $1/a^2$ กระแสจะเป็น $1/a^2$

(ข) มอเตอร์เหนี่ยวนำรูปขดลวดใช้ตัวต้านทานสตาร์ท

(2) การควบคุมความเร็ว

(ก) มอเตอร์เหนี่ยวนำรูปขดลวด

- การควบคุมความต้านทานทดถุยม ใช้คุณลักษณะ Proportional shifting ของแรงบิด เพิ่มหรือลดความต้านทานทดถุยมเพื่อควบคุมความเร็ว มีข้อเสียคือกำลังสูญเสียจากโหลดจะเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพจะลดลง

- การควบคุมการสร้างสนามแม่เหล็กทุติยภูมิ ปรับแรงดันของความถี่สลิปที่จ่ายให้ วงจรทุติยภูมิรับ และจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างแหล่งจ่ายไฟทุติยภูมิไปพร้อมๆ กับควบคุมความเร็วอย่างมีประสิทธิภาพ มีทั้งวิธีเครเมอร์ซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าทุติยภูมิของมอเตอร์เป็นกำลังขับทางกล และแบบ Scherbius ซึ่งนำกลับมาใช้เป็นกำลังไฟฟ้า

(ข) มอเตอร์เหนี่ยวนำกรงกระรอก

- การควบคุมความถี่ปฐมภูมิ ความเร็วเชิงโรตัสจะแปรผันตามความถี่ และปรับแรงดันให้แปรผันตามความถี่ด้วยเพื่อรักษาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กให้คงที่ (ควบคุม V/f ให้คงที่)
- การควบคุมแรงดันปฐมภูมิ ควบคุมความเร็วโดยใช้ประโยชน์จากการที่เส้นกราฟ แรงบิด-ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงแปรผันตามกำลังสองของแรงดัน
- การแปลงจำนวนขั้ว มีโครงสร้างซับซ้อน และการปรับความเร็วจะทำได้เป็นขั้นๆ

(3) การเบรก

- Regenerative braking ใช้เพื่อกหรือการแปลงจำนวนขั้วทำให้มอเตอร์ทำงานเหมือนกับเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยความเร็วเท่ากับหรือสูงกว่าความเร็วเชิงโรตัส และกำเนิดไฟฟ้า
- Dynamic braking ตัดวงจรปฐมภูมิจากแหล่งจ่ายไฟ ให้สนามแม่เหล็กกระแสตรงเพื่อให้ด้านปฐมภูมิกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ และเปลี่ยนเป็นความร้อน
- Counter current braking (Plugging) สลับการต่อวงจร 2 เฟสจาก 3 เฟส เพื่อให้สนามแม่เหล็กหมุนกลับทิศ
- Single phase braking: รวมสาย 2 เส้นของขดลวดด้านปฐมภูมิเข้าด้วยกัน แล้วจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับระหว่างสองเส้นนั้นกับอีก 1 เส้นที่เหลือ ส่วนด้านทุติยภูมิให้ต่อกับตัวต้านทานเพื่อให้เกิดแรงเบรก (จากการกลับเฟส)

ตัวอย่าง 2.2 มีมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงกระรอก 3 เฟส กำลังขาออก 7.5 kW ความถี่ 50 Hz พิกัดแรงดัน 200V จากวงจรสมมูลรูปตัว L ในรูปที่ 2.20 (b) ถ้า $r_1 = 0.169\Omega$ $r_2 = 0.151\Omega$ $x_1 = 0.383\Omega$ $x_2 = 0.383\Omega$ $r_n = 0.929\Omega$, $x_n = 9.74\Omega$ จงคำนวณคุณสมบัติต่างๆ เมื่อ สลิปเท่ากับ 2%

(1) กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก: จากสูตร (2.17)

$$\begin{aligned}\dot{I}_n &= \frac{\dot{V}}{r_n + jx_n} = \frac{\dot{V}}{r_n^2 + x_n^2} (r_n - jx_n) = \frac{200/\sqrt{3}}{0.929^2 + 9.74^2} (0.929 - j9.74) \\ &= 1.206 (0.929 - j9.74) = 1.121 - j11.748 \text{ A}\end{aligned}$$

(2) กระแสทุติยภูมิ: จากสูตร (2.18)

$$\begin{aligned}\dot{I}_2 &= \frac{\dot{V}}{(r_1 + r_2/s) + j(x_1 + x_2)} = \frac{200/\sqrt{3}}{(0.169 + 0.151/0.02) + j(0.383 + 0.383)} \\ &= \frac{200/\sqrt{3}}{7.719^2 + 0.766^2} (7.719 - j0.766) \\ &= 1.9191 \times (7.719 - j0.766) = 14.81 - j1.47 \text{ A} \\ |\dot{I}_2| &= \sqrt{14.81^2 + 1.47^2} = 14.88 \text{ A}\end{aligned}$$

ตอนที่ 2 บทที่ 2 อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไป

(3) กระแสปฐมภูมิ: จากสูตร (2.19)

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_n + \dot{I}_2 = (1.121 - j11.75) + (14.81 - j1.47) = 15.93 - j13.22 \text{ A}$$

$$|\dot{I}_1| = \sqrt{15.93^2 + 13.22^2} = 20.70 \text{ A}$$

(4) เพาเวอร์แฟกเตอร์: จากสูตร (2.20)

$$\cos j = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{15.93}{\sqrt{15.93^2 + 13.22^2}} = 0.7695$$

(5) กำลังขาเข้าปฐมภูมิ: จากสูตร (2.21)

$$P_1 = m_1 V_1 I_1 \cos j = 3 \times \frac{200}{\sqrt{3}} \times 20.70 \times 0.7695 = 5520 \text{ W}$$

(6) กำลังขาเข้าทุติยภูมิ: จากสูตร (2.22)

$$P_2 = m_1 I_2^2 \frac{r_2}{s} = 3 \times 14.89^2 \times \frac{0.151}{0.02} = 5019 \text{ W}$$

(7) กำลังขับที่เกิดขึ้น: จากสูตร (2.24)

$$P_0 = P_2 (1 - s) = 5019 (1 - 0.02) = 4919 \text{ W}$$

(8) ประสิทธิภาพ: จากสูตร (2.25)

$$h = \frac{P_0}{P_1} \times 100 = \frac{4919}{5520} \times 100 = 89.11\%$$

(9) แรงบิด: จากสูตร (2.26)

$$T = \frac{P_0}{w} = \frac{P_2 (1 - s)}{w_0 (1 - s)} = \frac{5019}{1500 \times \frac{2P}{60}} = 32.0 \text{ N-m}$$

(10) ความเร็วรอบ: อ้างอิงจากสูตร (2.11) และ (2.12)

$$N = \frac{120 f (1 - s)}{P} = \frac{120 \times 50 (1 - 0.02)}{4} = 1470 \text{ rpm}$$

2.1.7 เครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัส

2.1.7.1 พื้นฐานของเครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัส

(1) คำจำกัดความของเครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัส

หมายถึงเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำงานด้วยการหมุน และขณะที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ จะมีความเร็วรอบเท่ากับความเร็วซิงโครนัสซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วและความถี่กระแสสลับ

(2) หลักการของเครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัส

รูปที่ 2.26 (a) แสดงให้เห็นว่ามีขดลวดเหมือนกัน 3 ขดเรียงตัวทำมุม $2\pi/3$ rad ซึ่งกันและกัน ด้านในมีขั้วแม่เหล็กที่หมุนได้วางอยู่

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำทำให้ขั้วแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วคงที่ เส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดกับขดลวด จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวงรอบ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่มีความถี่คงที่ขึ้น เท่ากับทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

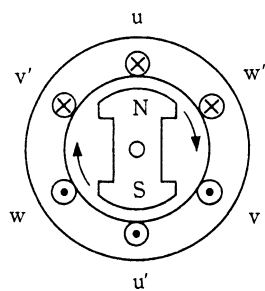
ถ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้ขั้วของขดลวด จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กหมุนขึ้น รูป 2.26 (b) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเครื่องนี้หมุนโดยที่แกนเส้นแรงแม่เหล็กและแกนขั้วแม่เหล็กทำมุมกันคงที่ค่าหนึ่ง จะเกิดแรงบิดขึ้น เท่ากับทำหน้าที่เป็นมอเตอร์

(3) คุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัส

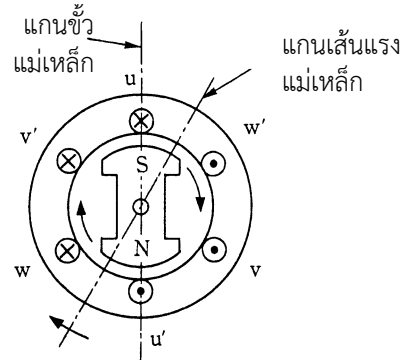
- ความเร็วซิงโครนัส n : แสดงได้ด้วยสูตรดังต่อไปนี้

$$n_s = \frac{120 f_1}{p} \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (2.33)$$

ในที่นี้ f_1 คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ
 p คือ จำนวนขั้ว



(a) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



(b) มอเตอร์

รูปที่ 2.26 หลักการทำงานของเครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส

(4) ประเภทของเครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัสมีทั้งแบบ Revolving field ซึ่งขั้วแม่เหล็กหมุนและแบบ Revolving armature ซึ่งขดลวดอาร์เมเจอร์หมุนแต่เครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัสส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Revolving field

เครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบ Revolving field ยังแบ่งออกได้เป็นแบบ Salient pole และแบบ Non-salient pole แบบแรกมักจะใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันน้ำ แบบหลังจะใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์ไบน์

2.1.7.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เฟสของกระแสไหลดที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำต้านกลับของขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งเกิดจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์เปลี่ยนตำแหน่งสัมพันธ์กับขั้วแม่เหล็ก ดังนั้น แรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำต้านกลับจึงมีอิทธิพลโดยตรงกับขนาด และการกระจายเส้นแรงแม่เหล็กในแก๊ป นอกจากนี้ กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ยังสร้างเส้นแรงแม่เหล็กรั่วจากขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งจะตัดกับขดลวดอาร์เมเจอร์เท่านั้น

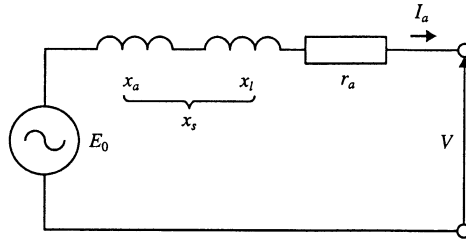
เมื่อแตกเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ออกเป็น 2 ส่วนรีแอกแตนซ์ที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่มีผลโดยตรงต่อเส้นแรงแม่เหล็กในแก๊ป เรียกว่า รีแอกแตนซ์ต้านกลับของขดลวดอาร์เมเจอร์ x_a และรีแอกแตนซ์ที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว เรียกว่า รีแอกแตนซ์รั่วของขดลวด

ตอนที่ 2 บทที่ 2 อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไป

อาร์เมเจอร์ x_λ นอกจากนี้ เมื่อให้ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์เป็น r_a แล้ว วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสจะแสดงได้ตามรูปที่ 2.27 โดยวงจรสมมูลนี้มีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$x_s = x_a + x_l \quad [\Omega] \quad \text{ทั้งนี้ } x_s: \text{ ซึ่งโครนัสรีแอ็กแตนซ์} \quad (2.34)$$

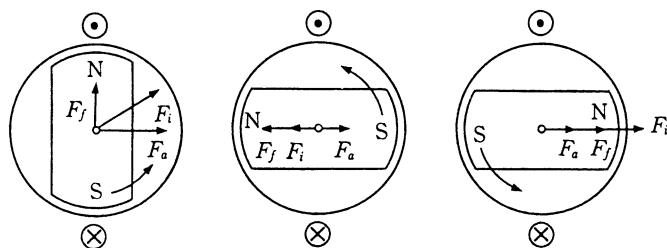
$$Z_s = \sqrt{r_a^2 + x_s^2} \quad [\Omega] \quad \text{ทั้งนี้ } Z_s: \text{ ซึ่งโครนัสอิมพีแดนซ์} \quad (2.35)$$



รูปที่ 2.27 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส

รูปที่ 2.28 แสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำด้านกลับ ที่เกิดจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์กับสนามแม่เหล็ก จากรูป เมื่อขดลวดอาร์เมเจอร์มีตำแหน่งตรงกันกับแกนขั้วแม่เหล็ก N และ S จะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุด

หากกระแสไหลดมีเฟสตรงกันแล้ว แรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำด้านกลับที่เกิดจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์กับสนามแม่เหล็ก F_a จะเป็นสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก F_f โดยมีเฟสต่างกัน $\pi/2$ ตามรูปที่ 2.28 (a) ทำให้มีผลสร้างสนามแม่เหล็กตัดกับระนาบขั้วแม่เหล็ก กรณีที่กระแสไหลดล้าหลังเท่ากับ $\pi/2$ แล้ว F_a จะมีทิศทางตรงข้ามกับ F_f ทำให้มีผลลดสนามแม่เหล็กตามรูปที่ 2.28 (b) และกรณีที่กระแสไหลดนำหน้าเท่ากับ $\pi/2$ แล้ว F_a จะมีทิศทางเดียวกับ F_f ทำให้มีผลเพิ่มสนามแม่เหล็ก



(a) กระแสอินเฟส (b) กระแสเล็ก (c) กระแสลีด

รูปที่ 2.28 การต้านกลับของขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส

ตารางที่ 2.4 แรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำด้านกลับของขดลวดอาร์เมเจอร์

กระแส	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	มอเตอร์
กระแสเล็ก	ลดสนามแม่เหล็ก	เพิ่มสนามแม่เหล็ก
กระแสอินเฟส	สนามแม่เหล็กตัดกัน	สนามแม่เหล็กตัดกัน
กระแสลีด	เพิ่มสนามแม่เหล็ก	ลดสนามแม่เหล็ก

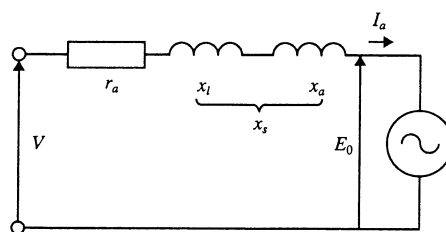
ในกรณีของกระแสไหลดทั่วไป กำลังไฟฟ้าจริงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กตัดกัน และกระแสจะล้าหลังหรือกระแสนำหน้าซึ่งสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะเพิ่มหรือลดสนามแม่เหล็ก

คำอธิบายข้างต้นใช้ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ในกรณีของมอเตอร์ก็เกิดแรงกระทำในทำนองเดียวกัน ตามที่แสดงในตารางที่ 2.4

2.1.7.3 มอเตอร์ซิงโครนัส

(1) วงจรสมมูลของมอเตอร์

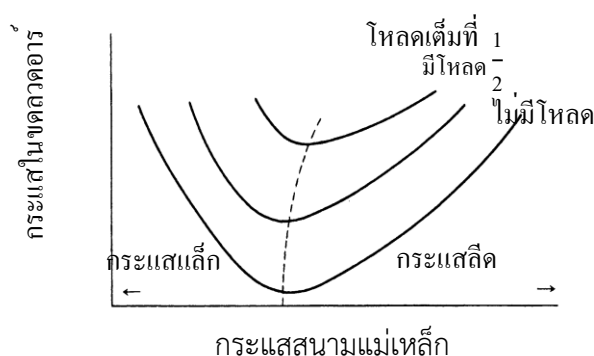
วงจรสมมูลของมอเตอร์จะเหมือนกับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กล่าวคือถ้าให้รีแอกแตนซ์ต้านกลับของขดลวดอาร์เมเจอร์เท่ากับ x_a ให้รีแอกแตนซ์รั่วของขดลวดอาร์เมเจอร์เท่ากับ x_l จะได้วงจรดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส

(4) เส้นกราฟคุณลักษณะเฟส (เส้นกราฟ V)

เมื่อรักษาแรงดันที่ขั้ว V ของมอเตอร์ซิงโครนัสให้คงที่ และปรับกระแสสนามแม่เหล็ก I_f โดยที่ให้กำลังขาออก P_0 คงที่แล้ว แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_0 จะเปลี่ยนแปลงไป ผลคือทำให้ขนาด และเฟสของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ I_a เปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_f กับ I_a จะได้ ดังรูปที่ 2.30 เรียกว่า เส้นกราฟคุณลักษณะเฟส (เส้นกราฟ V) ของมอเตอร์ซิงโครนัส



รูปที่ 2.30 เส้นกราฟคุณลักษณะเฟส (เส้นกราฟ V)

(5) วิธีสตาร์ทเครื่อง

แรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัส จะเกิดขึ้นเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น ดังนั้นในการสตาร์ทจึงต้องวิธีการต่อไปนี้ในการเร่งความเร็วของโรเตอร์ให้ใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัสก่อน แล้วจึงป้อนสนามแม่เหล็กเพื่อปรับความเร็วให้ได้ความเร็วซิงโครนัส

- วิธีสตาร์ทด้วยตัวเอง สตาร์ทโดยใช้ขดลวดควบคุมการเคลื่อนที่ซึ่งติดตั้งไว้ที่ผิวหน้าขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์

- วิธีสตาร์ทด้วยมอเตอร์สำหรับสตาร์ท ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำหรือมอเตอร์กระแสตรงเป็นมอเตอร์สำหรับสตาร์ท

2.1.8 เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

2.1.8.1 พื้นฐานของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

(1) หลักการทำงานของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.31 เมื่อตัวนำความยาวด้านตั้งฉาก l [m] เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v [m/s] ผ่านสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B [T] จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า E [V] ขึ้นในตัวนำตามกฎมือขวาของเฟลมมิ่ง

$$E = B l v \text{ [V]} \quad (2.36)$$

และเมื่อมีกระแส I [A] ไหลในตัวนำความยาว l [m] ตัวนำจะได้รับแรงทางกลตามกฎมือขวาของเฟลมมิ่งดังต่อไปนี้

$$F = B l I \text{ [N]} \quad (2.37)$$

ตัวนำหมุนไปแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำจะกลับขั้วเกิดเป็นกระแสสลับ จึงต้องใช้คอมมิวเตเตอร์ และแปรงถ่านเพื่อกรองให้เป็นกระแสตรง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ประโยชน์จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่แสดงในสูตร (2.36) ส่วนมอเตอร์กระแสตรงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ประโยชน์จากแรงทางกลที่แสดงในสูตร (2.37) หากจ่ายกระแสให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก็เกิดแรงทางกลตามที่แสดงในสูตร (2.37) เช่นกันเพื่อกำเนิดกำลังไฟฟ้า

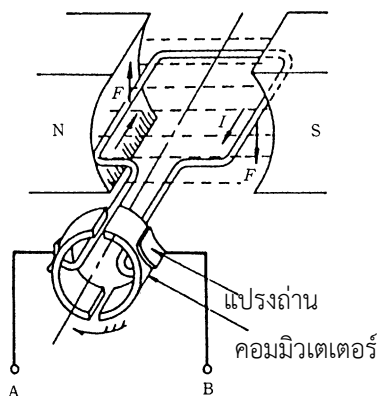
$$P_1 = E I \text{ กำลังขับที่ต้องป้อนให้กับเพล}$$

$$P_2 = F \cdot v = (B l I) \cdot v = (B l v) \cdot I = E \cdot I = P_1 \text{ [W]} \quad (2.38)$$

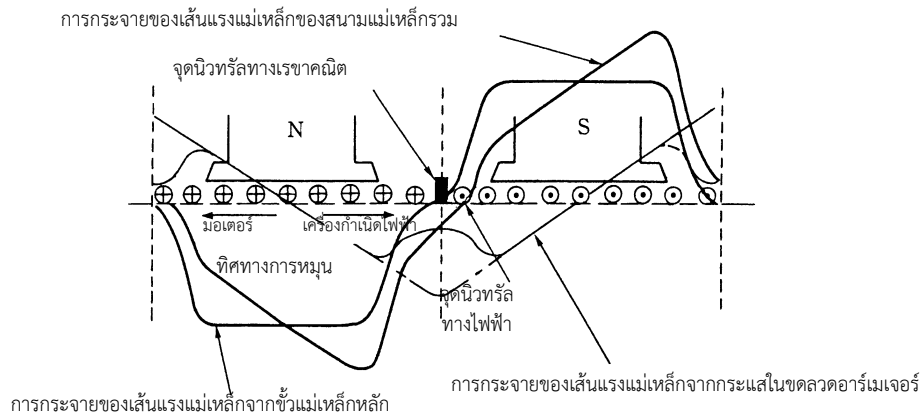
ซึ่งเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(2) การต้านกลับของขดลวดอาร์เมเจอร์

การต้านกลับที่แรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ทำต่อเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสถิต เรียกว่า การต้านกลับของขดลวดอาร์เมเจอร์ เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ การกระจายเส้นแรงแม่เหล็กในแกนจะไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.32 ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาต่างๆ เช่น กรองเป็นกระแสตรงไม่สะดวก ลดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เกิดฟลักโอเวอร์ระหว่างแปรงถ่านขั้วบวก-ลบ ฯลฯ เพื่อป้องกันปัญหาเหล่านี้จึงต้องติดตั้งอินเตอร์โพลหรือ Compensating winding



รูปที่ 2.31 การเกิดแรงดันกระแสตรง



รูปที่ 2.32 การต้านกลับของขดลวดอาร์เมเจอร์

(3) คุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

- แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ: แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_a ของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง แสดงได้ด้วยสูตรต่อไปนี้

$$E_a = \frac{pZ}{60a} n \Phi \quad [\text{V}] \quad (2.39)$$

ทั้งนี้	p	คือ	จำนวนขั้ว
	n	คือ	ความเร็วรอบ [r/min]
	Z	คือ	จำนวนตัวนำทั้งหมด
	Φ	คือ	เส้นแรงแม่เหล็กต่อ 1 ขั้ว [Wb]
	$2a$	คือ	จำนวนวงจรภายใน (Lap winding $2a = p$, Wave winding $2a = 2$)

- แรงบิด แรงบิดของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง T แสดงได้ด้วยสูตรต่อไปนี้

$$T = \frac{pZ}{2\pi a} I_a \Phi \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (2.40)$$

ทั้งนี้ I_a คือกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ [A]

- กำลังขาออก กำลังขาออกของมอเตอร์หมายถึงกำลังขับทางกล กำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายถึงกำลังไฟฟ้ากระแสตรง กำลังขาออกทางกล P_o เท่ากับผลคูณของแรงบิด T กับความเร็วเชิงมุม ω [rad/s]

$$P_o = \omega T \quad (2.41)$$

เมื่อแปลงสูตรจะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$P_o = \omega T = \left(2\pi \frac{n}{60} \right) \left(\frac{pZ}{2\pi a} I_a \Phi \right) = \left(\frac{pZ}{60a} n \Phi \right) I_a = E_a I_a \quad [\text{W}] \quad (2.42)$$

สูตรนี้แสดงว่าหากไม่คิดกำลังสูญเสียแล้ว กำลังขับทางกลจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าขาออก

- ความเร็วรอบ ความเร็วรอบ n ของมอเตอร์กระแสตรงได้จากการแปลงสูตรแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังต่อไปนี้

$$n = \frac{E_a}{k \Phi} \quad [r/min] \quad (2.43)$$

$$\text{ทั้งนี้} \quad k = \frac{pZ}{60a} = \text{ค่าคงที่}$$

- อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน $\mathcal{E}$ แสดงระดับการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากโหลดของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้าให้ความเร็วรอบและกระแสสนามแม่เหล็กคงที่แล้วจะคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\mathcal{E} = \frac{V_0 - V_n}{V_n} \times 100 [\%] \quad (2.44)$$

ทั้งนี้ V_0 คือ แรงดันที่ขั้วเมื่อไม่มีโหลด [V]
 V_n คือ พิกัดแรงดันที่ขั้ว [V]

- อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ν แสดงระดับการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์เนื่องจากโหลด ถ้าให้แรงดันที่ขั้วและกระแสสนามแม่เหล็กคงที่แล้วจะคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\nu = \frac{n_0 - n_n}{n_n} \times 100 [\%] \quad (2.45)$$

ทั้งนี้ n_0 คือ ความเร็วรอบเมื่อไม่มีโหลด
 n_n คือ พิกัดความเร็วรอบ

2.1.8.2 ประเภทและคุณลักษณะของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 2.5 เป็นการสรุปรวบรวมประเภทของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง และคุณลักษณะของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1.8.3 การควบคุมความเร็ว การสตาร์ท การหยุด

(1) การควบคุมความเร็ว

มอเตอร์กระแสตรงสามารถควบคุมความเร็วได้ในช่วงกว้างอย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการควบคุมความเร็วมีดังต่อไปนี้

- การควบคุมสนามแม่เหล็ก ปรับตัวต้านทานสนามแม่เหล็กเพื่อเปลี่ยนความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กของสนามแม่เหล็ก และควบคุมความเร็ว เนื่องจากกระแสที่ควบคุมมีค่าต่ำจึงมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำไปด้วย เป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไป

- การควบคุมความต้านทาน ต่อตัวต้านทานอนุกรมกับวงจรขดลวดอาร์เมเจอร์ และควบคุมด้วยการลดความเร็ว มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะที่ควบคุมสูง รวมทั้งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วสูง ใช้กับซีรึมอเตอร์เป็นหลัก

- การควบคุมแรงดัน ปรับแรงดันที่ป้อนให้ขดลวดอาร์เมเจอร์เพื่อควบคุมความเร็วใช้กับ Separately excited motor เป็นหลัก วิธีป้อนแรงดันปรับได้จากแหล่งจ่ายไฟตรงเฉพาะให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ของ Separately excited motor เรียกว่าวิธีเลียวนาร์ด ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วอย่างละเอียดในช่วงกว้างทั้งหมดได้ และกลับ และสามารถทำ Regenerative braking ได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.5 (a) ประเภทและคุณลักษณะของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

ประเภท	Separately excited motor	ขั้วต่อมอเตอร์
ผังวงจรของมอเตอร์		
สูตรคุณลักษณะของมอเตอร์	$E_a = V_t - (I_a r_a + 2v_b)$ $I_L = I_a$ $\eta = \frac{E_a}{k_1 \Phi}$ $T = k_2 \Phi I_a = k_2 k_s I_a^2$	$E_a = V_t - (I_a r_a + 2v_b)$ $I_L = I_a + I_f$ $\eta = \frac{E_a}{k_1 \Phi}$ $T = k_2 \Phi I_a$
สูตรคุณลักษณะของมอเตอร์	E_a : แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [V] Φ : เส้นแรงแม่เหล็ก [Wb] V_t : แรงดันที่ขั้ว [V] n : ความเร็วรอบ [min^{-1}] v_b : แรงดันตกที่แปรงถ่าน [V] T : แรงบิด [N·m] r_a : ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ [Ω]	I_a : กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ [A] I_f : กระแสสนามแม่เหล็ก [A] I_L : กระแสขาเข้า [A]
คุณลักษณะของมอเตอร์	เส้นกราฟ คุณลักษณะความเร็ว T n เส้นกราฟคุณลักษณะแรงบิด	
คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	เส้นกราฟอิมตัวเมื่อไม่มีโหลด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E เมื่อ I_f เพิ่มขึ้น เมื่อ I_f ลดลง แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็กตกค้าง 0 กระแสสนามแม่เหล็ก I_f	เส้นกราฟคุณลักษณะภายนอก แรงดันตกจากการต้านกลับของอาร์เมเจอร์และจากแปรงถ่าน แรงดันตกจากความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ แรงดันตกจากกระแสสนามแม่เหล็กตก 0 กระแสโหลด I

ตารางที่ 2.5 (b) ประเภทและคุณลักษณะของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง (ต่อ)

ประเภท	ซีรืส์มอเตอร์	คอมพาวด์มอเตอร์
ผังวงจรของมอเตอร์		
สูตรคุณลักษณะของมอเตอร์	$E_a = V_t - \{I_a(r_a + r_s) + 2v_b\} \quad I_L = I_a$ $n = \frac{E_a}{k_1 \Phi} = \frac{E_a}{k_1 k_s I_a} \rightarrow \frac{V_t}{k_1 k_s I_a} \quad (\text{เมื่อ } I_a \text{ มีค่าน้อย})$ $T = k_2 \Phi I_a = k_2 k_s I_a^2$	$E_a = V_t - \{I_a(r_a + r_s) + 2v_b\} \quad I_L = I_a + I_f$ $n = \frac{E_a}{k_1 \Phi} = \frac{E_a}{k_1 (\Phi_0 + k_s I_a)}$ $T = k_2 \Phi I_a = k_2 (\Phi_0 I_a + k_s I_a^2)$
	E_a : แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [V] Φ : เส้นแรงแม่เหล็ก [Wb] V_t : แรงดันที่ขั้ว [V] Φ_0 : เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อไม่มีโหลด [Wb] v_b : แรงดันตกที่แปรงถ่าน [V] n : ความเร็วรอบ [min^{-1}] I_a : กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ [A] T : แรงบิด [N.m]	I_f : กระแสสนามแม่เหล็ก [A] I_L : กระแสขาเข้า [A] r_a : ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ [Ω] r_s : ความต้านทานสนามแม่เหล็กซีรืส์ [Ω]
คุณลักษณะของมอเตอร์		
คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า		

(2) การสตาร์ทและเบรก

- การสตาร์ท มีทั้งการสตาร์ทด้วยตัวต้านทาน และสตาร์ทด้วยการลดแรงดัน เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการสตาร์ท การลดโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์จะเป็นวิธีที่ได้ผลในการอนุรักษ์พลังงานอีกด้วย
- การเบรก (การเบรกด้วยไฟฟ้า) วิธี Dynamic braking เป็นวิธีเบรกโดยแปลงพลังงานกลของโรเตอร์เป็นพลังงานไฟฟ้า แล้วจ่ายให้ตัวต้านทานซึ่งต่ออยู่กับวงจรขดลวดอาร์เมเจอร์เพื่อให้สูญเสียไปเป็นความร้อน ส่วนวิธี Regenerative braking จะนำพลังงานไฟฟ้าที่แปลงมานั้นจ่ายคืนให้กับแหล่งจ่ายไฟ

2.1.8.4 วิธีควบคุมความเร็ว

(1) หลักการในการควบคุมความเร็ว

เนื่องจากคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์มีเพียงรูปแบบเดียว จุดสมดุลเสถียรที่เกิดขึ้นจึงมีเพียงจุดเดียวเท่านั้น มอเตอร์จึงเดินเครื่องด้วยความเร็วคงที่ ω_e หากสามารถเปลี่ยนเงื่อนไขของแหล่งจ่ายไฟ (แรงดันไฟฟ้า ความถี่ ฯลฯ) หรือเงื่อนไขของมอเตอร์ (เงื่อนไขของวงจรอาร์เมเจอร์ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็ก ที่ขั้ว ฯลฯ) ข้อใดข้อหนึ่ง ทำให้คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนไปได้แล้ว น่าจะสามารถเปลี่ยนความเร็วเชิงมุม ω ที่ทำให้เกิดจุดสมดุลเสถียรได้

หากใช้เครื่องแปลงกำลังไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์กำลัง จะสามารถเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และความถี่กระแสสลับได้โดยสะดวก จึงสามารถควบคุมความเร็วได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูง

(2) การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง

ความเร็วรอบ N และแรงบิด T ของมอเตอร์กระแสตรงสามารถแสดงได้ด้วยสูตรต่อไปนี้

$$N = K_1 \frac{V - R_a I_a}{\Phi} \quad , \quad T = K_2 \Phi I_a \quad (2.46)$$

ทั้งนี้	Φ	คือ	เส้นแรงแม่เหล็ก
	V	คือ	แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง
	I_a	คือ	กระแสอาร์เมเจอร์
	R_a	คือ	ความต้านทานของวงจรอาร์เมเจอร์
	K_1, K_2	คือ	ค่าคงที่ของการแปรผัน

จากสูตรนี้จะเห็นว่า การเปลี่ยน N ทำได้ 3 วิธี คือ การควบคุมสนามแม่เหล็ก (เปลี่ยน Φ : มอเตอร์ขนาน มอเตอร์แบบฟิลด์แยก) การควบคุมความต้านทาน (เปลี่ยน R_a มอเตอร์ขนาน มอเตอร์อนุกรม) วิธีควบคุมแรงดันไฟฟ้า

1) การควบคุมสนามแม่เหล็ก การควบคุมทำได้ง่ายเนื่องจากการเป็นการปรับกระแสกำเนิดสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าไม่มาก แต่ขีดจำกัดของความเร็วจะถูกจำกัดด้วยการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อลดความเข้มของสนามแม่เหล็กลงแล้วเพิ่มความเร็วจะทำให้ทำ Commutation ได้ยาก ช่วงที่สามารถปรับความเร็วได้ในกรณีของมอเตอร์ที่มี Interpole จะเท่ากับ 1 : 3-4 และแม้แต่ในกรณีของมอเตอร์ที่มีขดลวดชดเชยก็ยังเท่ากับปริมาณ 1 : 5 เท่านั้น คุณลักษณะของมอเตอร์จะมีรูปแบบเป็นคุณลักษณะกำลังขาออกคงที่ที่ $N \propto 1/\Phi$ และ $T \propto \Phi$

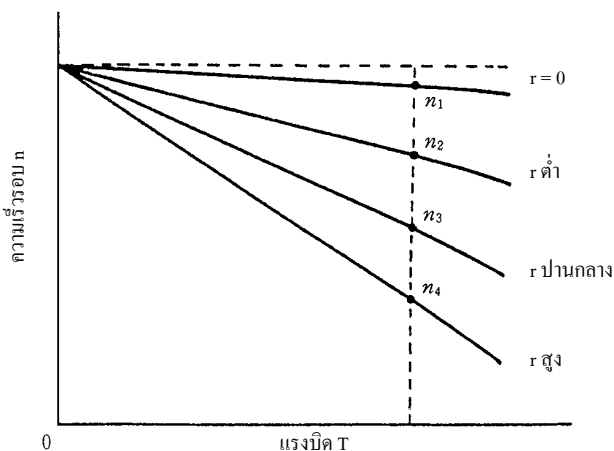
(3) การควบคุมความต้านทาน เป็นวิธีควบคุมโดยใส่ตัวต้านทาน r ลงไปเฉพาะในวงจรอาร์เมเจอร์เพื่อควบคุมความเร็วด้วยการลดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้อาร์เมเจอร์ซึ่งจะลดลงเท่ากับ rI_a ถ้าให้ $R = r +$

R_a นำไปวาดคุณลักษณะ n - T เทียบกับ r แทน R_a แล้วจะได้รูปที่ 2.33 ดังนั้นจึงมีจุดอ่อนว่า ยิ่ง r มีค่าเพิ่มขึ้น เสถียรภาพจะลดลงทำให้เกิดความสูญเสียเพิ่มขึ้น และถ้ามีการดำเนินการควบคุมจะไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น จึงไม่ค่อยนำมาใช้ในมอเตอร์ขนาดเล็กยกเว้นในมอเตอร์อนุกรม

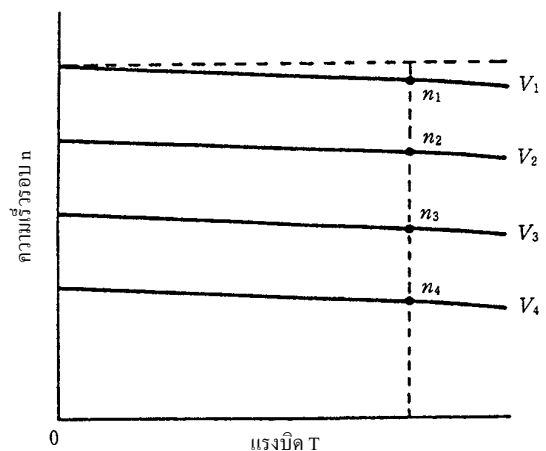
(4) การควบคุมแรงดันไฟฟ้า (มอเตอร์แบบฟีดแบ็ก) ถ้าควบคุม Φ และ R_a ให้คงที่แล้วปรับค่า V จะได้คุณลักษณะ n - T ดังรูปที่ 2.34 ความชันของคุณลักษณะความเร็วจะเกือบคงที่เป็นแนวระดับโดยไม่ขึ้นกับค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนั้น ไม่ว่าที่แรงดันใดๆ ก็ตามการเดินเครื่องจะมีเสถียรภาพดี และเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าคงที่ จึงไม่ทำให้เงื่อนไขการ Commutation แย่ลงเหมือนกับกรณีของการลดความเข้มสนามแม่เหล็ก

การจ่ายไฟให้อาร์เมเจอร์จากแหล่งจ่ายไฟแรงดันไฟฟ้าแปรผันต่างหากจากวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็ก เรียกว่า ระบบควบคุมแรงดันแปรผัน หรือระบบ Leonard system โดยระบบที่ใช้มอเตอร์-เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแปรผัน เรียกว่า ระบบ Ward Leonard system ส่วนระบบที่ใช้เครื่องแปลงกำลังไฟฟ้าไม่เคลื่อนไหว เรียกว่า ระบบ Static Ward Leonard ปัจจุบันโดยทั่วไปจะใช้แบบหลังรูปที่ 2.35 เป็นตัวอย่างของระบบ Static Ward Leonard system ในกรณีที่ต่อวงจรแบบ Cross connection โดยใช้ไทรสเตอร์ ซึ่งจะควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้า E_s ที่จ่ายให้อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์แบบฟีดแบ็กด้วยการควบคุมเฟสของไทรสเตอร์

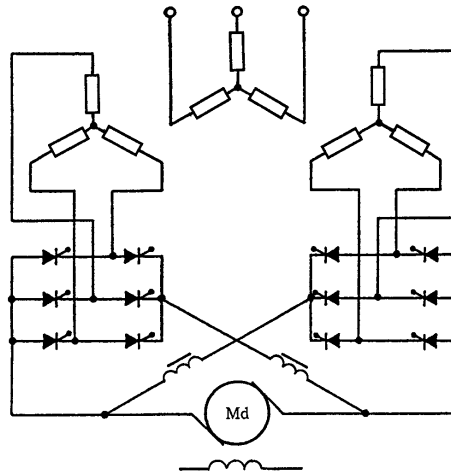
รูปที่ 2.36 แสดงคุณลักษณะ n - T ของระบบ Leonard ที่วาดขึ้นโดยใช้แรงดันคำสั่ง E_s เป็นพารามิเตอร์ โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากกระแสการของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแปรผันด้วย จุด A ในรูปหมายถึงจุดสมดุลของแรงบิดที่แรงดันคำสั่ง E_{s1} ซึ่งจะเดินเครื่องด้วยความเร็ว n_1 กรณีที่ต้องการเร่งความเร็ว จะเพิ่มแรงดันเป็น E_{s0} ทำให้เกิดแรงบิด T_{m0} ซึ่งเทียบเท่ากับจุด B ดังนั้น มอเตอร์จึงถูกเร่งความเร็วด้วย $T_{m0} - T_f = T_a$ ตามเส้นกราฟ BD เข้าสู่สมดุลใหม่ที่จุด D (ความเร็ว n_0) กรณีของการลดท่วงความเร็วเมื่อลดแรงดันเป็น E_{s2} แล้ว จะเกิดแรงบิดเบรก T_b จากจุด A ไปที่จุด C มอเตอร์จะได้รับแรงบิดท่วงความเร็ว ($T_b + T_f$) ทำให้ลดความเร็วตามเส้นกราฟ CE ทำให้ไปสมดุลที่จุด E (ความเร็ว n_2) ด้วยการเลือก E_s ที่เหมาะสม จะสามารถปรับระดับแรงบิดเร่งความเร็ว-ท่วงความเร็วเป็นเท่าใดก็ได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของระบบควบคุมความเร็ว และระหว่างที่ท่วงความเร็วซึ่งเกิดแรงบิด T_b ขึ้นจะเกิดการเบรกแบบ Regenerative braking



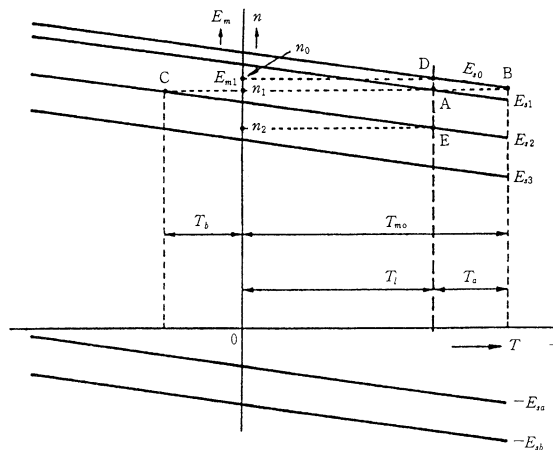
รูปที่ 2.33 การควบคุมความต้านทานของมอเตอร์
ขนานกระแสตรง



รูปที่ 2.34 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของ
มอเตอร์กระแสตรงแบบฟีดแบ็ก



รูปที่ 2.35 Static Ward Leonard



รูปที่ 2.36 การควบคุมความเร็วด้วยระบบ Ward Leonard

2.1.9 การใช้งานกับฟัดของมอเตอร์

(1) ประเภทของการใช้งาน

การใช้งานสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ การใช้งานต่อเนื่อง (Continuous duty) การใช้งานเป็นเวลาสั้น (Short time duty) และการใช้งานเป็นคาบ (Periodic duty) การใช้งานต่อเนื่อง หมายถึง การใช้งานโดยเดินเครื่องต่อเนื่องด้วยภาระที่ถือได้ว่าคงที่เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่าระยะเวลาที่มอเตอร์จะเข้าสู่สมดุลความร้อน การใช้งานเป็นเวลาสั้น หมายถึง การเดินเครื่องต่อเนื่องด้วยภาระที่ถือได้ว่าคงที่เป็นระยะเวลาที่กำหนดแต่ยังไม่ทำให้มอเตอร์เข้าสู่สมดุลความร้อนแล้วหยุดเครื่อง และก่อนที่จะสตาร์ทมอเตอร์อีกครั้งนั้น อุณหภูมิของมอเตอร์กับอุณหภูมิระบายอากาศมีผลต่างไม่เกิน 2°C

การใช้งานเป็นคาบ หมายถึง การใช้โดยระยะเวลา 1 คาบประกอบด้วยช่วงเวลาเดินเครื่องด้วยภาระที่ถือได้ว่าคงที่กับช่วงเวลาหยุดเครื่องซึ่งจะไม่มีภาระจ่ายแรงดันไฟฟ้าและการทำงาน 1 คาบนี้ซ้ำๆ กัน ในกรณีนี้จะถือว่าทั้งช่วงเวลาเดินเครื่อง และช่วงเวลาหยุดเครื่องมีระยะเวลายาวกว่าระยะเวลาทำให้มอเตอร์เข้าสู่สมดุลความร้อน และผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิสูงขึ้นจากเงื่อนไขการสตาร์ทและเบรกมอเตอร์มีน้อยมากจนตัดทิ้งได้ การใช้งานด้วยเงื่อนไขเดียวกับแบบนี้ แต่ช่วงเวลาหยุดเครื่องกลายเป็นช่วงเวลาเดินเครื่องแบบไม่มีภาระ

เรียกว่า การใช้งานต่อเนื่องแบบมีภาระเป็นคาบ (Periodic load continuous duty) ความสัมพันธ์ระหว่างภาระ ความสูญเสีย และอุณหภูมิกับเวลาของการใช้งานเหล่านี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.38

(2) ประเภทของพิกัด

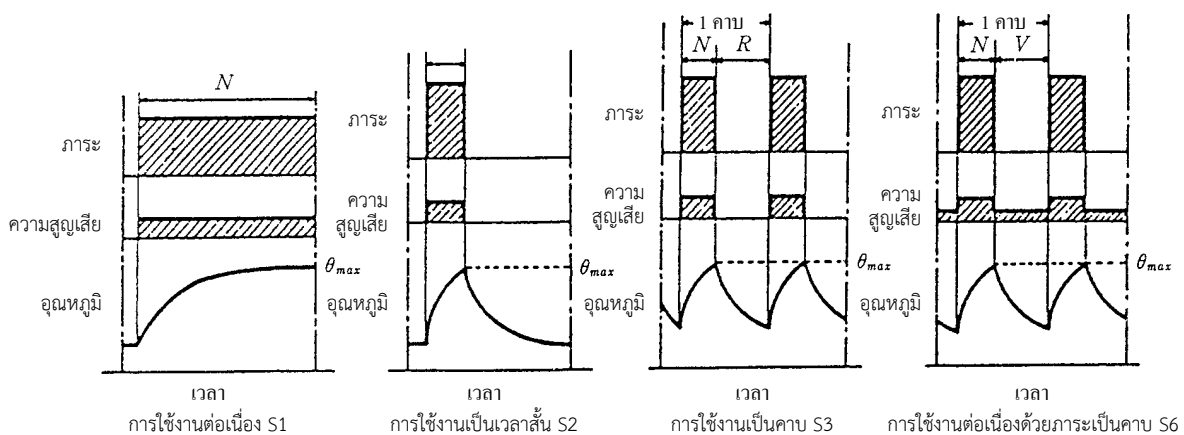
พิกัดแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามประเภทของการใช้งาน ได้แก่ พิกัดต่อเนื่อง พิกัดเป็นเวลานาน พิกัดเป็นคาบ และพิกัดสมมูล ซึ่งแต่ละประเภทหมายถึงพิกัดที่เมื่อนำมอเตอร์ไปใช้งานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดแต่ละประเภทแล้ว อุณหภูมิของมอเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดจำเพาะสำหรับมอเตอร์นั้น รวมทั้งไม่ทำให้เกิดข้อจำกัดอื่นๆ อีกด้วย

พิกัดสมมูล หมายถึง พิกัดที่แปลงการใช้งานที่ซับซ้อนเป็นพิกัดต่อเนื่องหรือพิกัดเป็นเวลานานที่สมมูลกันในเชิงความร้อน ซึ่งในแต่ละกรณีจะเรียกว่า พิกัดต่อเนื่องสมมูลหรือพิกัดเป็นเวลานาน

(3) พิกัดกำลังขาออก

พิกัดหมายถึงขีดจำกัดการใช้งานที่รับประกันของมอเตอร์ ขีดจำกัดการใช้งานของกำลังขาออกเรียกว่า พิกัดกำลังขาออก ซึ่งเงื่อนไขที่กำหนดในกรณีนี้จะประกอบด้วยพิกัดแรงดันไฟฟ้า พิกัดความเร็วรอบ พิกัดความถี่ เป็นต้น ในมอเตอร์เครื่องหนึ่งๆ ยิ่งเพิ่มกำลังขาออกให้สูงขึ้นจะยิ่งเกิดความสูญเสียมากขึ้น ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้น ขีดจำกัดของกำลังขาออกที่ไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงเกินกว่าที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดจำเพาะจะเท่ากับพิกัดกำลังขาออกนั่นเอง

ในกรณีของการใช้งานเป็นคาบ (S3) ในช่วงเวลาภาระ t_1 กับช่วงเวลาหยุดเครื่อง t_2 แต่ละครั้ง อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น และลดลงสลับกัน ดังนั้น พิกัดกำลังขาออกเป็นคาบจึงมีค่าสูงกว่าพิกัดกำลังต่อเนื่อง ซึ่งค่านั้นจะขึ้นอยู่กับ $\alpha \equiv t_1 / (t_1 + t_2)$ โดยทั่วไปค่า $\alpha \times 100\%$ จะเรียกว่า Duty factor หรือ %ED



รูปที่ 2.38 การใช้งานประเภทต่างๆ

(N : เวลาเดินเครื่องด้วยภาระคงที่ θ_{max} = อุณหภูมิสูงสุดระหว่างเดินเครื่อง)

2.1.10 ประเภทของมอเตอร์และสมรรถนะที่ต้องการ

ตารางที่ 2.6 แสดงประเภท คุณสมบัติ และวัตถุประสงค์การใช้งานหลักของมอเตอร์ มอเตอร์อาจแบ่งคร่าวๆ ได้เป็นมอเตอร์กระแสสลับกับมอเตอร์กระแสตรง มอเตอร์กระแสสลับแบ่งออกได้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำกับมอเตอร์ซิงโครนัส มอเตอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วรอบได้อย่างสะดวกโดยเปลี่ยนความถี่ รวมทั้งหากเลือกใช้วัสดุและโครงสร้างที่เหมาะสม จะมีการสูญเสียพลังงานต่ำ นอกจากนี้ ในกรณีของลิฟต์โดยสารความเร็วสูง (ความเร็วตั้งแต่ 120 [m/นาที] ขึ้นไป)

หากใช้มอเตอร์ของถ่านเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก็สามารถเพิ่มแรงหยุด (เบรก) ได้ (Regenerative control) อนึ่ง มอเตอร์ที่ใช้ในลิฟต์โดยสารถความเร็วสูงในระยะหลัง บางครั้งก็ใช้มอเตอร์ ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรทำจากธาตุ Rare earth เพื่อลดพลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก

กำลังขาออกใช้งาน (Rated output) ของมอเตอร์ที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดจะมีเฉพาะบางค่าเท่านั้น ดังนั้น งานที่ภาระการใช้งานต้องการจริงๆ นั้น จะน้อยกว่ากำลังขาออกใช้งานของมอเตอร์ที่ติดตั้งไว้ เราต้องระวังว่า ค่า [kW] ของกำลังขาออกใช้งานนั้นหมายถึงกำลังขาออกเชิงกล ไม่ใช่กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้การแปลงเป็นกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้นั้น ต้องนำกำลังขาออกมาหารด้วยประสิทธิภาพของมอเตอร์ การทำให้มอเตอร์แสดงสมรรถนะได้เต็มที่ จำเป็นต้องคัดเลือกกลไกควบคุมความเร็ว และแรงบิดให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของภาระการใช้งานที่ต้องการ คุณลักษณะของภาระของมอเตอร์ที่ควรให้ความสนใจมีดังต่อไปนี้ อันดับแรกเราต้องตรวจสอบว่าเราเลือกใช้มอเตอร์ที่เหมาะสมกับคุณลักษณะแล้วหรือไม่

- (1) เงื่อนไขการใช้งาน (เดินเครื่องต่อเนื่อง เดินเครื่องเป็นระยะ เดินเครื่องสั้นๆ เปิดปิดบ่อยหรือไม่)
- (2) คุณลักษณะความเร็ว (ความเร็วคงที่ ความเร็วไม่คงที่)
- (3) คุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (ต่อเนื่อง คุณลักษณะการเร่ง-การหน่วง การใช้ความเร็วต่ำ การเดินเครื่องเดินหน้า-ถอยหลัง)
- (4) คุณลักษณะพลังงาน (ประสิทธิภาพใช้งาน (Rated efficiency) ประสิทธิภาพการเปลี่ยนความเร็ว)
- (5) คุณลักษณะแรงบิด (แรงบิดเมื่อเริ่มหมุน แรงบิดใช้งาน (Rated torque))
- (6) ความเหมาะสมกับภาระการใช้งาน (ความจุ (Capacity) ที่เหมาะสม ความเหมาะสมของความถี่ของ Load ratio กับคุณลักษณะประสิทธิภาพ)
- (7) ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม (ทนทานภูมิอากาศ การกันน้ำ คุณลักษณะเสียงรบกวน เงื่อนไขอุณหภูมิรอบข้าง)

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติและวัตถุประสงค์การใช้งานหลักๆ ของมอเตอร์แต่ละชนิด

ประเภทของมอเตอร์		ข้อดี	ข้อเสีย	วัตถุประสงค์การใช้งานหลัก
มอเตอร์กระแสสลับ	มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส			
	- แบบกรงกระรอกธรรมดา	โครงสร้างไม่ซับซ้อน บังคับควบคุมสะดวก ราคาถูกที่สุด เป็นมอเตอร์ที่มีความเร็วคงที่ (คุณลักษณะของซิงค์)	กระแสที่ทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนมีค่า 6-8 เท่าของกระแสปกติ แรงบิดเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนไม่ค่อยเพียงพอ	ปั๊มขนาดเล็ก พัดลม เครื่องอัดอากาศขนาดเล็ก เครื่องกลึง และการใช้งานทั่วไปอื่นๆ
	- แบบกรงกระรอกพิเศษ	เหมือนข้างบน	กระแสที่ทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนมีค่า 5-6 เท่า แรงบิดเมื่อเริ่มหมุนมีค่ามากกว่าแบบกรงกระรอกธรรมดา แต่บางครั้งก็ยังไม่เพียงพอ	ปั๊ม พัดลม เครื่องอัดอากาศ สายพาน
	- แบบโรเตอร์ขดลวด (มี Short-circuit device)	ความต้านทานขณะเริ่มหมุน ทดดิยุมิจะช่วยลดกระแสที่ทำให้มอเตอร์เริ่มหมุน สามารถเปลี่ยนค่าแรงบิดเมื่อเริ่มหมุนได้ เป็นมอเตอร์ความเร็วคงที่	มีความซับซ้อนมากกว่าแบบกรงกระรอกธรรมดา เนื่องจากต้องมีสลิปริงด้วย	ปั๊ม พัดลม เครื่องอัดอากาศ
	- แบบโรเตอร์ขดลวด	การเริ่มหมุนเหมือนกับข้างบน ควบคุมความเร็วได้ จนถึง 50% ด้วยความต้านทานทุดิยุมิ	เหมือนข้างบน หากความต้านทานทุดิยุมิมีค่าสูง ความเร็วจะแกว่งได้มาก	ปั่นจั่น กว้าน ปั๊ม พัดลม เครื่องรีดเหล็ก เครื่องเจียคลิน (Kiln)
มอเตอร์กระแสตรง	มอเตอร์ซิงโครนัสสามเฟส			
	- แบบ Salient pole	ความเร็วคงที่ สามารถเพิ่มเพาเวอร์แฟกเตอร์ได้	คุณลักษณะขณะเริ่มหมุนไม่ดี โครงสร้างค่อนข้างซับซ้อน	ปั๊ม เครื่องอัดอากาศ เครื่องรีดเหล็ก
	- ซิงโครนัสเหนี่ยวนำ	เหมือนข้างบน	โครงสร้างซับซ้อน	
มอเตอร์กระแสตรง	มอเตอร์คอมมิวเตเตอร์สามเฟส	ควบคุมความเร็วได้จนถึงประมาณ 1:3	โครงสร้างซับซ้อน ใช้งานและบำรุงรักษายุ่งยาก ค่อนข้างแพง	เครื่องกรอ คัดเตอร์ คลิน
	ซิงค์มอเตอร์ (Separately excited motor)	ควบคุมความเร็วได้ง่าย เป็นมอเตอร์ความเร็วคงที่	โครงสร้างซับซ้อนเนื่องจากมีคอมมิวเตเตอร์ บำรุงรักษายุ่งยาก	กว้าน เครื่องรีดเหล็ก เครื่องรีดกระดาษ เครื่องกลึง
มอเตอร์กระแสตรง	ซีรีย์มอเตอร์	แรงบิดเมื่อเริ่มหมุนสูง เมื่อมีภาระเพิ่มขึ้นความเร็วจะลดลง เป็นมอเตอร์ที่มีความเร็วไม่คงที่	เหมือนข้างบน นอกจากนั้นในสภาพที่ไม่มีภาระ ความเร็วจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีการจำกัดจึงมีอันตราย	รถไฟ ปั่นจั่น

ประเภทของมอเตอร์		ข้อดี	ข้อเสีย	วัตถุประสงค์การใช้งานหลัก
	คอมพาวด์มอเตอร์	มีคุณลักษณะอยู่ระหว่าง ซิงค์มอเตอร์กับซีรี่ย์มอเตอร์ เป็นมอเตอร์ที่มีความเร็ว เกือบคงที่	เหมือนซิงค์มอเตอร์	ปั๊มสำหรับเรือ ฯลฯ
พิเศษ	ไอร์ซิสเตอร์ มอเตอร์ (มอเตอร์ที่ไม่มี คอมมิวเตเตอร์)	ควบคุมความเร็วและ บำรุงรักษาสะดวก	โครงสร้างซับซ้อน ราคา ค่อนข้างแพง	เครื่องรีดเหล็ก เครื่องรีด กระดาษ ปั๊ม พัดลม

2.1.11 แนวทางการอนุรักษ์พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า

2.1.11.1 แนวทางการอนุรักษ์พลังงานโดยทั่วไป

(1) ทฤษฎีทั่วไป

ในการอนุรักษ์พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า สิ่งที่สำคัญคือต้องลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากตัวเครื่องไฟฟ้าเอง และเลือกขนาดเครื่องไฟฟ้า จำนวน และวิธีเดินเครื่องให้เหมาะสมที่สุดกับขนาด และคุณลักษณะของโหลด กล่าวคือต้องพิจารณาทั้งตัวเครื่องไฟฟ้าแต่ละเครื่อง และระบบโดยรวม กำลังสูญเสียของเครื่องไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็นกำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลด และกำลังสูญเสียจากโหลด กำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดจะคงที่โดยไม่ขึ้นกับขนาดของโหลด กำลังสูญเสียจากโหลดจะเพิ่ม และลดแปรผันตามกำลังสองของกระแสโหลด โหลดที่ทำให้กำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดเท่ากับกำลังสูญเสียจากโหลดจะเป็นจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

โดยทั่วไปมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสจะออกแบบไว้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่โหลดใกล้เคียงกับพิกัด หากเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยโหลดต่ำกว่าพิกัดมากๆ แล้ว จะทำให้ประสิทธิภาพ และเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ เนื่องจากกำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลด และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของโหลด ในทำนองเดียวกัน หม้อแปลงกำลังจะออกแบบไว้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่โหลดไม่เต็มพิกัด ดังนั้น หากมีหม้อแปลงที่มีพิกัด และคุณลักษณะเหมือนกันทุกประการ 2 ตัว แม้ว่าหม้อแปลง 1 ตัวจะสามารถรองรับขนาดของโหลดได้ แต่บางครั้งหากขนานหม้อแปลง 2 ตัวใช้ร่วมกันอาจจะทำให้ กำลังสูญเสียรวมน้อยกว่าก็ได้

หากเลือกใช้เครื่องไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงหรือกำลังสูญเสียต่ำ ไม่เพียงแต่จะช่วยอนุรักษ์พลังงานเท่านั้น แต่ยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในระยะยาวอีกด้วย

(2) ความรู้ทั่วไปในการอนุรักษ์พลังงาน

สิ่งที่สำคัญในการอนุรักษ์พลังงานได้แก่ การลดกำลังสูญเสีย หรืออีกนัยหนึ่งคือการเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งจำเป็นต้องมีความรู้ทั่วไปดังต่อไปนี้

1) เลือกขนาดของเครื่องไฟฟ้าให้เหมาะสมกับขนาดของโหลด และเลือกวิธีเดินเครื่องที่ เหมาะสมกับคุณลักษณะของโหลด

2) เครื่องไฟฟ้าทั่วไปจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่กำลังขาออกใกล้เคียงกับพิกัด ทั้งนี้ ยกเว้นหม้อแปลง ซึ่งมักมีประสิทธิภาพสูงสุดที่โหลดไม่เต็มพิกัด

3) อุปกรณ์ที่ใช้งานทั้งวันแต่มีโหลดไม่สม่ำเสมอ เช่น หม้อแปลง ควรหาวิธีเฉลี่ยโหลดให้มีประสิทธิภาพตลอดวันสูงขึ้น

4) โดยทั่วไปอุปกรณ์ไฟฟ้ายังมีกำลังขาออกเพิ่มขึ้น จะยังมีประสิทธิภาพสูงขึ้นที่โหลดเต็มพิกัด และการเลือกใช้เครื่องไฟฟ้าแบบอนุรักษ์พลังงานเป็นวิธีที่ประสิทธิผล

5) ในการควบคุมเครื่องไฟฟ้า หากใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ไทริสเตอร์ มักจะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ทั้งนี้ในการใช้เครื่องแปลงกำลังไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำจะเป็นต้องคำนึงถึงวิธีป้องกันฮาร์โมนิกด้วย

(3) ข้อควรระวังในการเดินเครื่องอย่างอนุรักษ์พลังงาน

ในการเดินเครื่องนอกจากความรู้ข้างต้นแล้ว เรายังจำเป็นต้องระมัดระวังในเรื่องต่อไปนี้อีกด้วย

1) พยายามหลีกเลี่ยงการเดินเครื่องด้วยโหลดต่ำๆ หรือไม่มีโหลด การเดินเครื่องเช่นนั้น จะทำให้ประสิทธิภาพ และเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำลง

2) การมีโหลดขาดช่วง พยายามอย่าเดินเครื่องเปล่าๆ ควรใช้วิธีควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์

3) เอาใจใส่ให้เดินเครื่องด้วยแรงดันและความถี่ที่พิกัด หากแรงดันที่จ่าย และความถี่ต่ำลงแล้วกำลังขาออกจะต่ำลง ทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงด้วย

4) หลีกเลี่ยงการใช้งานที่โอเวอร์โหลดหรือแรงดันที่จ่ายให้สูงเกินไป การใช้งานในสถานะ เช่นนั้นจะทำให้เครื่องไฟฟ้ามีประสิทธิภาพต่ำหรืออาจไหม้เสียหายได้

5) พยายามเพิ่มเพาเวอร์แฟกเตอร์ หากเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำจะทำให้ต้องติดตั้งแหล่งจ่ายไฟขนาดใหญ่ มีกำลังสูญเสียมากขึ้น และแรงดันที่หัวของโหลดจะต่ำลง

6) หลีกเลี่ยงการเดินเครื่องด้วยแรงดันไม่สมดุล การเดินเครื่องด้วยแรงดันไม่สมดุลไม่เพียงแต่ทำให้มีกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดความร้อนสูงผิดปกติ เสียกรบววน และการสั่นสะเทือนมากขึ้นอีกด้วย

7) การเดินเครื่องด้วยระบบอัตโนมัติ และการตั้งโปรแกรมเดินเครื่องโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีประสิทธิผลในการอนุรักษ์พลังงาน

8) ซ่อมบำรุงเครื่องไฟฟ้าให้ดี เดินเครื่องอย่างปลอดภัย หลีกเลี่ยงการต้องหยุดเครื่องโดยไม่ได้วางแผน

2.1.11.2 แนวทางการอนุรักษ์พลังงานของหม้อแปลง

(1) การเดินเครื่องให้มีประสิทธิภาพสูง

หม้อแปลงมาตรฐานที่มีมาแต่เดิม จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่กำลังขาออกประมาณ 60% ของพิกัด แต่หม้อแปลงกำลังสูญเสียต่ำในปัจจุบัน เนื่องจากมีกำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดลดลงมาก ทำให้จุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจะค่อนข้างมาทางโหลดต่ำๆ มากยิ่งขึ้น การเดินเครื่องให้มีประสิทธิภาพสูงจึงต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

1) การเดินเครื่องโดยขนานหม้อแปลงให้ปรับจำนวนหม้อแปลงตามโหลด

2) กรณีที่มีเครื่องระบายความร้อน หากมีโหลดไม่เต็มที่ให้ตรวจสอบการเพิ่มของอุณหภูมิ และปิดเครื่องช่วยเครื่องระบายความร้อนบางส่วนหรือทั้งหมด

3) กรณีของโหลดไม่สมดุล 3 เฟส หากอัตราการใช้งานของเฟสใดเฟสหนึ่งต่ำลงจะทำให้ประสิทธิภาพต่ำลง ดังนั้น จึงต้องพยายามบาลานซ์โหลดให้สมดุล

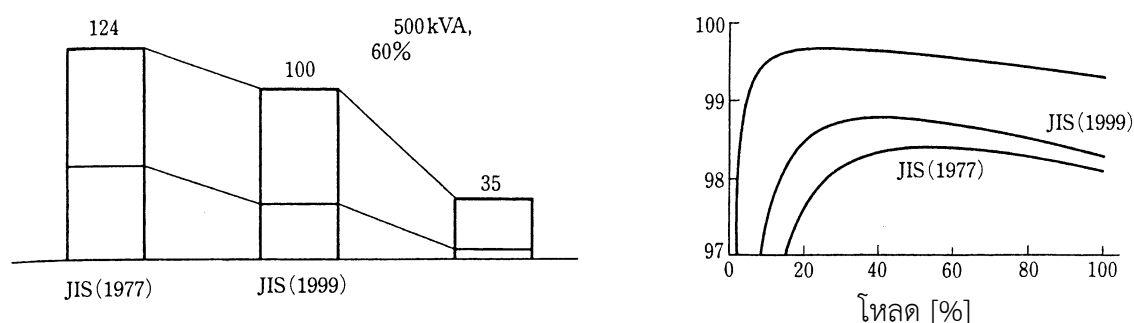
4) การควบคุมโดยปรับจำนวนหม้อแปลงเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ให้ใช้วิธีควบคุมให้มีกำลังสูญเสียรวมน้อยที่สุด

(2) ผลของการใช้หม้อแปลงกำลังสูญเสียต่ำ

รูปที่ 2.39 เป็นการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียที่อัตราโหลดเฉลี่ยต่อปี 60% ระหว่างหม้อแปลงน้ำมันแบบมาตรฐานตามมาตรฐาน JIS C 4304 (มาตรฐานปี 2520 และมาตรฐานปี 2542) กับหม้อแปลงน้ำมันอะมอร์ฟัสซึ่งเริ่มมีวางจำหน่ายในท้องตลาดเมื่อไม่นานมานี้ เมื่อเปรียบเทียบหม้อแปลงมาตรฐาน JIS (ปี 2520) กับหม้อแปลงมาตรฐาน JIS (ปี 2542) พบว่ากำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดลดลงเหลือประมาณ 60% แต่กำลังสูญเสียจากโหลดไม่แตกต่างกันมาก เมื่อเปรียบเทียบหม้อแปลงอะมอร์ฟัสกับหม้อแปลงมาตรฐาน JIS (ปี 2542) พบว่ากำลังสูญเสียจากโหลดลดลงเหลือประมาณครึ่งหนึ่ง และกำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดลดลงเหลือต่ำกว่า 20%

ในการอนุรักษ์พลังงานของเครื่องไฟฟ้าที่ต้องอยู่ในสภาวะใช้งานตลอดเวลา เช่น หม้อแปลงนั้น การลดกำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดจะมีประสิทธิภาพมาก ผลจากการที่กำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดลดลงมาก ทำให้จุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจะค่อนข้างมาทางโหลดต่ำๆ มากยิ่งขึ้นดังรูป 2.40

ราคาในท้องตลาดของหม้อแปลงอะมอร์ฟัสในระยะหลังจะเป็น 2-2.5 เท่าของหม้อแปลงแบบกำลังสูญเสียต่ำแต่ผลลัพธ์จากลดกำลังสูญเสียได้มากทำให้มีตัวอย่างการคำนวณที่พบว่าจะคืนทุนส่วนที่เกินภายใน 3-5 ปี



รูปที่ 2.39 เปรียบเทียบกำลังสูญเสียของหม้อแปลงน้ำมัน รูปที่ 2.40 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อแปลงน้ำมัน

2.1.11.3 แนวทางการอนุรักษ์พลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

(1) การเดินเครื่องด้วยประสิทธิภาพสูง

การเดินเครื่องด้วยประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

- 1) เพิ่มเพาเวอร์แฟกเตอร์ให้สูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ (ต่อคาปาซิเตอร์ขนาดเท่ากับขั้วปฐมภูมิเพื่อเพิ่มเพาเวอร์แฟกเตอร์ ทั้งนี้ ยกเว้นกรณีที่ใช้มอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์)
- 2) หากต้องเดินเครื่องโดยไม่มีโหลดเป็นเวลานาน ให้หยุดมอเตอร์เสียเลย
- 3) กรณีที่ต้องเดินเครื่องมอเตอร์กรงกระรอกด้วยความเร็วต่ำ หากควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ จะสามารถเดินเครื่องได้ด้วยแรงดันและความถี่ที่เหมาะสมทั้งขณะสตาร์ทเครื่อง และขณะใช้ความเร็วต่ำจึงสามารถเดินเครื่องได้ด้วยกำลังสูญเสียในระดับเดียวกับขณะใช้ความเร็วสูง
- 4) การควบคุมความเร็วของซิริสมอเตอร์ หากควบคุมการสร้างสนามแม่เหล็กทุติยภูมิ จะมี ประสิทธิภาพดีกว่าควบคุมความต้านทานทุติยภูมิ การควบคุมมีทั้งแบบเครเมอร์และแบบ Scherbius
- 5) หลีกเลี่ยงการเดินเครื่องด้วยแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล อัตราไม่สมดุล 3.5% จะทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นถึง 20%

สนามแม่เหล็กเฟสลบจะมีทิศทางตรงข้ามกับเฟสบวก เฟสลบจะลดแรงบิดของเฟสบวกเพิ่ม Copper loss และทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงมากขึ้น มีกำลังสูญเสียมาก

(2) ผลของการใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ทางผู้ผลิตมอเตอร์ได้วิจัยและพัฒนาเพื่อผลิตมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงออกสู่ตลาด โดยพยายามให้มีราคาสูงขึ้นไม่มาก มอเตอร์รุ่นใหม่มีส่วนประกอบ และลักษณะการทำงานเหมือนมอเตอร์แบบเดิม แต่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า เนื่องจากเปลี่ยนแปลงรายละเอียดในการออกแบบ ใช้วัสดุที่ดีขึ้น และพิถีพิถันในขบวนการผลิตมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงขึ้นประมาณ 2-4 % หรือสามารถลดการสูญเสียพลังงานได้ประมาณ 25-30 % นอกจากประหยัดพลังงานแล้วมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงยังมีข้อดีอื่นๆ อีกคือ เกิดความร้อนจากการทำงานน้อยกว่า อายุการใช้งานของฉนวน และลูกปืนยาวนานขึ้น การสั่นสะเทือนน้อยกว่า มีเสียงรบกวนน้อย และค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ดีขึ้น

(3) มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงได้อย่างไร

นับตั้งแต่วิกฤตการณ์พลังงานในทศวรรษที่ 70 บรรดาผู้ผลิตมอเตอร์ได้เพิ่มค่าประสิทธิภาพเข้าไปเป็นจุดขายเพิ่มเติมจากโครงสร้างที่แข็งแรง และอายุการใช้งานที่ยาวนานซึ่งเกิดจากการปรับปรุงจากจุดต่างๆดังนี้

1. ปรับปรุงคุณภาพของแกนเหล็กมอเตอร์ทุกๆ ไปใช้เหล็กแผ่นที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนต่ำ (Low-carbon Laminated Steel) สำหรับทำตัวแกนเหล็กที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ ซึ่งแกนเหล็กดังกล่าวมีการสูญเสียทางไฟฟ้าเทียบกับน้ำหนักระมาณ 6.6 วัตต์ต่อเหล็ก 1 กิโลกรัม ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง จะใช้แผ่นเหล็กซิลิกอนคุณภาพสูง (High Grade Silicon Steel) ซึ่งจะมีการสูญเสียทางไฟฟ้าลดลงถึงครึ่งหนึ่งคือเหลือเพียง ประมาณ 3.3 วัตต์ต่อเหล็ก 1 กิโลกรัม

2. แผ่นเหล็กที่บางขึ้น การลดความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กทั้งในสเตเตอร์และโรเตอร์ จะช่วยลดการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน ซึ่งเมื่อรวมกับการปรับปรุงฉนวนระหว่างแผ่นเหล็กแล้วจะช่วยลดค่าการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนได้มากยิ่งขึ้น

3. เพิ่มปริมาณของตัวนำ มอเตอร์รุ่นเก่า ๆ จะใช้ลวดทองแดง หรือลวดอะลูมิเนียมที่มีขนาดพอดีกับกระแสสูงสุดที่เกิดจากโหลดของมอเตอร์ แต่มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงจะใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อลดค่าความต้านทานในขดลวด โดยขนาดของตัวนำจะใหญ่กว่าประมาณ 35 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์

4. ปรับปรุงการออกแบบร่องสล็อต เพื่อที่จะรองรับกับขนาดขดลวดที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ต้องมีการปรับปรุง และออกแบบร่องสล็อตใหม่ รวมทั้งเพิ่มความยาวของแกนเหล็กที่สเตเตอร์ ซึ่งแกนเหล็กที่ยาวขึ้น จะเป็นผลต่อค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ ที่ดีขึ้นด้วย

5. ลดช่องว่างระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ การลดช่องว่างที่เป็นทางเดินของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสเตเตอร์ที่วิ่งผ่านไปยังโรเตอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นมอเตอร์จะกินพลังงานไฟฟ้าลดลงเพื่อที่จะผลิตแรงบิดเท่าเดิม นอกจากนี้การเพิ่มความยาวของแกนเหล็กยังเป็นการเพิ่มปริมาณสนามแม่เหล็ก ที่จะเป็ผลทำให้เกิดผลแบบเดียวกันกับการลดช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์

6. ปรับปรุงฉนวนที่โรเตอร์ ในมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงร่องสล็อตที่โรเตอร์ จะได้รับการตรวจสอบเป็นอย่างดี และเคลือบด้วยฉนวนที่สามารถทนความร้อนได้สูง ซึ่งจะลดค่าการสูญเสียจากตัวนำที่ไม่เรียบร้อยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตขณะที่ฝังตัวนำเข้าไปในโรเตอร์ ซึ่งโดยปกติแล้ว ตัวนำที่อยู่ที่โรเตอร์จะถูกออกแบบไว้ในลักษณะเฉียงกับแนวแกนของโรเตอร์ เพื่อที่จะลดเสียงรบกวน และแรงบิดที่ไม่สม่ำเสมอในมอเตอร์ขนาดเล็ก

7. ออกแบบพัฒนาใหม่ เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงมีอุณหภูมิในขณะทำงานต่ำกว่ามอเตอร์ธรรมดา เป็นผลให้พัฒนาที่ใช้ระบายความร้อนมีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการลดการสูญเสียจากแรงลมรวมถึงระดับเสียงของพัดลมในขณะทำงานด้วย

(4) เพราะเหตุใดมาตรฐานของค่าประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญ

ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ จะแปรเปลี่ยนไปตามมาตรฐานสากลที่ต่างกัน ดังนี้
มาตรฐาน CSA (แคนาดา) : รวม Stray Load Losses และเป็นการวัดค่าทางอ้อม โดยใช้วิธีของ IEEE 112
มาตรฐาน NEMA (สหรัฐอเมริกา) : ใช้วิธีการตามมาตรฐาน IEEE 112 ซึ่งคำนวณ Stray Load Losses โดยกระบวนการทางอ้อม

มาตรฐาน IEC (ยุโรป) : สมมติให้ค่า Stray Load Losses มีค่าคงที่ที่ 0.5% ของกำลังที่ใส่เข้าไป และยอมให้มีความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพได้บ้าง

มาตรฐาน JEC (ญี่ปุ่น) : สมมติว่าไม่มี Stray Load Losses เลย

(5) การทำความเข้าใจกับค่าประสิทธิภาพที่ระบุไว้โดยผู้ผลิตมอเตอร์

เมื่อท่านซื้อมอเตอร์ตัวใหม่ ท่านควรสอบถามให้แน่ใจว่าค่าประสิทธิภาพที่ระบุไว้โดยผู้ผลิตนั้น เป็นค่าเฉลี่ยมาตรฐาน (Nominal) หรือค่ารับประกันต่ำสุด (Guaranteed Minimum)

ค่าประสิทธิภาพมาตรฐาน เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากมอเตอร์แบบเดียวกันจำนวนมากจากผู้ผลิตมอเตอร์แต่ละตัวอาจมีค่าประสิทธิภาพที่ต่างจากค่าเฉลี่ยนี้มาก

ค่าประสิทธิภาพรับประกันต่ำสุด เป็นค่าที่ผู้ผลิตรับประกันว่ามอเตอร์ขนาดนั้นๆ จะมีค่าไม่น้อยกว่านั้นมาตรฐานระดับชาติส่วนใหญ่จะมีขีดกำหนดความแตกต่าง ระหว่างค่าเฉลี่ย และค่ารับประกันต่ำสุดเอาไว้

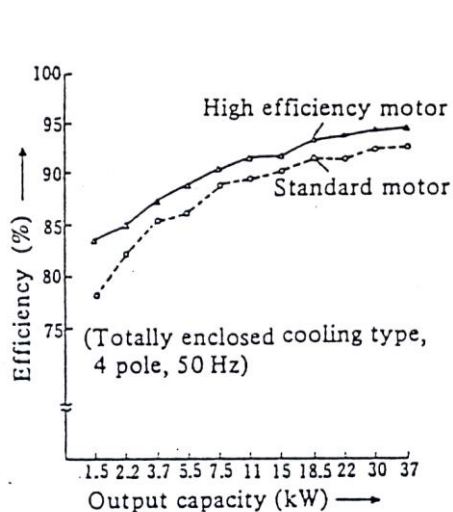
ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพมอเตอร์มาตรฐานกับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ขนาดฟักัด (แรงม้า)	2 ขั้ว (3,000 รอบ/นาที)		4 ขั้ว (1,500 รอบ/นาที)	
	มอเตอร์ มาตรฐาน	มอเตอร์ ประสิทธิภาพสูง	มอเตอร์ มาตรฐาน	มอเตอร์ ประสิทธิภาพสูง
3	80.0	84.0	81.5	86.5
5	82.5	86.5	82.5	86.5
7.5	82.5	87.5	85.5	88.5
10	85.5	88.5	85.5	88.5
15	85.5	89.5	86.5	90.2
20	86.5	89.5	88.5	90.2
25	87.5	90.2	89.5	91.7
30	87.5	90.2	89.5	91.7
40	88.5	91.0	90.2	92.4
50	88.5	91.7	91.0	92.4
60	90.2	92.4	91.7	93.0
75	91.0	92.4	91.7	93.6
100	91.7	93.0	92.4	94.1
125	91.7	94.1	92.4	94.1

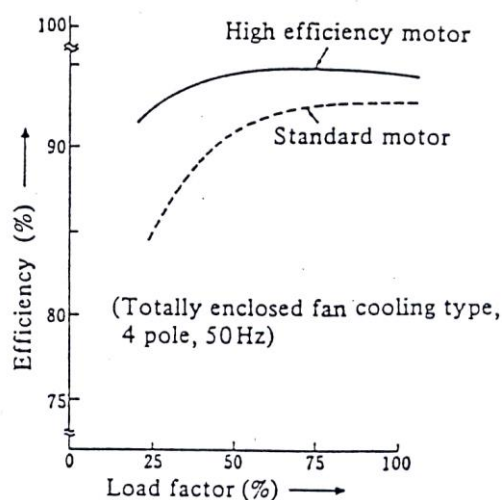
150	91.7	94.1	93.0	94.5
200	93.0	94.5	93.6	94.5
250	93.5	95.0	93.8	95.0
300	93.5	95.0	93.8	95.0
400	93.5	95.0	93.8	95.0
500	93.5	95.0	94.0	95.4

ที่มา : “ กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงาน ” ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย

(6) กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงและมอเตอร์มาตรฐาน



รูปที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ พิกัดมอเตอร์ของมอเตอร์อินดักชัน ชนิด 3 เฟส แบบกรงกระรอก



รูปที่ 2.42 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ เปอร์เซนต์การใช้งานมอเตอร์ของมอเตอร์อินดักชัน ชนิด 3 เฟส แบบกรงกระรอก

ที่มา : Energy Conservation of Electrical Equipment

(7) ความแตกต่างในเรื่องค่าพลังงาน

ในปัจจุบันมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงจะมีราคาสูงกว่ามอเตอร์มาตรฐานประมาณ 20% ราคาที่เพิ่มขึ้นนี้จะกลับคืนมาในรูปของการประหยัดค่าพลังงาน จากการที่ประสิทธิภาพ ของมอเตอร์นั้นสูงขึ้น การประหยัดค่าพลังงานสามารถคำนวณได้ดังนี้ :-

$$\text{ค่าพลังงานที่ประหยัดได้} = \text{ค่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ย} \times \text{กิโลวัตต์ชั่วโมงที่ประหยัดได้}$$

เมื่อ:

$$\text{กิโลวัตต์ที่ลดลง} = \text{ภาระกิโลวัตต์} \times \left(\frac{100}{\text{ประสิทธิภาพ มอเตอร์มาตรฐาน}} - \frac{100}{\text{ประสิทธิภาพ มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง}} \right)$$

$$\text{กิโลวัตต์ชั่วโมงที่ประหยัด} = \text{กิโลวัตต์ที่ลดลง} \times \text{ชั่วโมงการทำงานตลอดปี}$$

การคำนวณความเป็นไปได้ในการลงทุนใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง โดยทั่วไปจะใช้วิธีที่เรียกว่า “ระยะคืนทุนแบบเชิงเดียว” (Simple payback)

หากเป็นการซื้อมอเตอร์ใหม่ ระยะคืนทุนแบบเชิงเดียว คือ อัตราส่วนระหว่างราคาที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงกับค่าพลังงานที่ประหยัดได้

ระยะคืนทุนแบบเชิงเดียว

$$= \frac{\text{ราคาที่เพิ่มขึ้น*}}{\text{ค่าพลังงานที่ประหยัดได้}}$$

$$= \frac{\text{ราคาของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง} - \text{ราคามอเตอร์มาตรฐาน}}{\text{ค่าพลังงานที่ประหยัดได้}}$$

* ใช้เมื่อซื้อมอเตอร์ใหม่เท่านั้น

ตัวอย่างที่ 2.4 เราจะประหยัดค่าพลังงานได้เท่าไร? และระยะคืนทุนแบบเชิงเดียวจะมีค่าเท่าใด? หากเราซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงเครื่องใหม่มาใช้แทนมอเตอร์มาตรฐาน ถ้าหากขนาดของมอเตอร์ที่ต้องใช้นั้นเท่ากับ 45 กิโลวัตต์

ข้อมูล :

ขนาดมอเตอร์	= 45 กิโลวัตต์
ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์มาตรฐาน	= 91.5% (ที่ 75% ของภาระเต็มกำลัง)
ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง	= 93.9% (ที่ 75% ของภาระเต็มกำลัง)
ราคาที่สูงกว่าของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง	= 10,000 บาท
ชั่วโมงการใช้งาน	= 2,000 ชั่วโมงต่อปี
ค่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ย	= 2.75 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง

การคำนวณ :

กิโลวัตต์ที่ลดลง	= 45 กิโลวัตต์ × (100/91.5 - 100/93.9) × 0.75
	= 0.95 กิโลวัตต์
กิโลวัตต์ที่ประหยัดได้	= 0.95 กิโลวัตต์ × 2000 ชั่วโมง
	= 1,900 กิโลวัตต์ชั่วโมง
ค่าพลังงานที่ประหยัดได้	= 1,900 กิโลวัตต์ชั่วโมง × 2.75 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง
	= 5,225 บาท
ค่าพลังงานที่ประหยัดได้ตลอดอายุการใช้งาน	= 41,800 บาทในเวลา 20 ปี
ระยะเวลาคืนทุนแบบเชิงเดียว	= $\frac{10,000 \text{ บาท}}{5,225 \text{ บาท}}$
	= 1.91 ปี

ต้นทุนจากการบำรุงรักษาโดยทั่วไปแล้วความเสียหายของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมมีสาเหตุมาจากตลับลูกปืน แม้ว่าในปัจจุบันนี้จะมีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบวิเคราะห์ และทำนายสภาพของตลับลูกปืนเพื่อที่จะได้ทำการบำรุงรักษาก่อนที่จะเกิดความเสียหายที่รุนแรงขึ้น แต่การใช้อุปกรณ์เหล่านั้นไม่ใช่การแก้ปัญหาที่ต้นเหตุของความเสียหาย

สาเหตุของความเสียหายของตลับลูกปืนไม่ได้เกิดจากการขาดการบำรุงรักษาเท่านั้น อุณหภูมิของมอเตอร์ในขณะที่ทำงานก็เป็นองค์ประกอบอีกอันหนึ่ง ที่ทำให้อายุการใช้งานของตลับลูกปืนลดลง อุณหภูมิของมอเตอร์ในขณะที่ทำงานเป็นผลมาจากอุณหภูมิภายนอก และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในตัวมอเตอร์เอง ซึ่งโดยปกติแล้วเราจะไม่ค่อยควบคุมอุณหภูมิภายนอกของมอเตอร์กันเท่าไรนัก แต่เราสามารถเลือกใช้มอเตอร์ที่มีอุณหภูมิขณะทำงานต่ำได้

มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงเองมีอุณหภูมิของมอเตอร์ในขณะที่ต่ำเมื่อเทียบกับมอเตอร์ธรรมดาทั่วไปในการรับโหลดขนาดต่างๆ กัน และมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงยังใช้ตลับลูกปืนที่มีคุณภาพสูงอีกด้วย ดังนั้นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงโดยทั่วไปจะมีค่าใช้จ่ายจากการบำรุงรักษาที่ต่ำ เนื่องจากอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่ามอเตอร์ประสิทธิภาพสูงอายุการใช้งานก็นานกว่า

เทคโนโลยีใหม่ของมอเตอร์นี้ทำให้ได้มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเดิมโดยผู้ผลิตรายหนึ่งยืนยันว่ามอเตอร์ที่เสียหายในช่วงระยะเวลาการรับประกันลดลง เนื่องจากค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าที่ลดลง ทำให้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงสามารถทนความร้อนได้ดีกว่ามอเตอร์ธรรมดา

มีการรายงานผลการตรวจสอบการใช้มอเตอร์ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตลับลูกปืนของมอเตอร์เหนียวน้ำมันแบบกรงกระรอก ชนิดระบายความร้อนด้วยตัวเอง (Total Enclosed Fan Cool Motor) จะเพิ่มขึ้นประมาณ 50 % ถึง 75 % ของอุณหภูมิที่ขดลวดและการออกแบบของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง จะเพิ่มอายุการใช้งานของสารหล่อลื่นในตลับลูกปืนขึ้นอีก 200% เทียบกับมอเตอร์ธรรมดาทั่วไป อายุการใช้งานของสารหล่อลื่นที่ยาวนานขึ้นจะเป็น ผลให้ความทนทานของตลับลูกปืน และมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากข้อมูลดังกล่าวมา สรุปได้ว่าอุณหภูมิของขดลวด เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับอายุการใช้งานของตลับลูกปืน การลดอุณหภูมิของขดลวดเท่ากับเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของตลับลูกปืน และมอเตอร์

แม้ว่าตลับลูกปืนจะเป็นสาเหตุหลักของความเสียหายของมอเตอร์ แต่องค์ประกอบอื่น ๆ เช่น ความเสียหายทางกล (Mechanical Damage) สภาพแวดล้อมที่มอเตอร์ติดตั้งอยู่ และการติดตั้ง (Alignment) ยังคงเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้มอเตอร์เสียหายได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงอายุการใช้งานของมอเตอร์จะต้องนำเอาตัวแปรอื่นๆ มาวิเคราะห์ด้วย

มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง ถึงแม้ว่าจะมีราคาที่สูงกว่ามอเตอร์ธรรมดา แต่อย่างไรก็ดีก็มีค่ายืนยันว่าการใช้จ่ายในการดำเนินงานเมื่อใช้มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงจะต่ำกว่าเมื่อใช้มอเตอร์ทั่วไป เพื่อให้ผู้อ่านมองเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะยกตัวอย่างให้เห็นเป็นข้อพิจารณาดังนี้

(8) การพิจารณาเลือกซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

การเลือกซื้อหรือเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ให้เป็นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ควรพิจารณาเมื่อเครื่องที่ใช้อยู่เดิมชำรุด ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้

- 1) หากมอเตอร์ที่มีอาการเสียที่มีขนาดต่ำกว่า 10 kW ให้เปลี่ยนได้เลย
- 2) หากมอเตอร์ที่มีอาการเสียที่มีขนาดมากกว่า 10 kW สามารถไปพันขดลวดได้ใหม่ประมาณ 1 – 2 ครั้งเพราะหากเกินกว่านี้ราคาค่าซ่อมจะสูงกว่าการซื้อเครื่องใหม่
- 3) ให้เลือกเปลี่ยนจากมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กและมีชั่วโมงการทำงานสูง
- 4) มอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานเกินกว่า 15 ปี ให้เปลี่ยนได้ทันที

(9) เมื่อไรจึงจะใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ควรพิจารณาการใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงในสถานการณ์ดังต่อไปนี้ :

1) การซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับโรงงานใหม่

1.1) เมื่อมีการซื้อมอเตอร์ใหม่ มักจะมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น (ซึ่งเรียกว่า Price Premium): ราคามอเตอร์ประสิทธิภาพสูง - ราคามอเตอร์มาตรฐาน ถึงแม้ว่าจะมีค่าใช้จ่ายดังกล่าวเพิ่มเติม แต่การใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงยังคงเป็นที่น่าสนใจในการลงทุน

2) การซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงแทนการนำมอเตอร์มาตรฐานมาพันขดลวดใหม่

2.1) มอเตอร์ที่นำมาพันขดลวดใหม่ (ส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่กว่า 10 กิโลวัตต์) ประสิทธิภาพจะลดลงถึง 2%

2.2) ในกรณีนี้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นทั้งหมดจะเท่ากับผลรวมของประสิทธิภาพที่ลดลง เนื่องจากการพันขดลวดใหม่ (มากถึง 2%) กับ ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นจากประสิทธิภาพของมอเตอร์มาตรฐาน

2.3) สำหรับกรณีนี้ราคาที่สูงขึ้นคือราคาของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงลบด้วยค่าพันขดลวดใหม่

3) การซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง เพื่อนำมาใช้เป็นมอเตอร์สำรอง

3.1) เมื่อจำเป็นต้องซื้อมอเตอร์สำหรับเป็นมอเตอร์สำรองเพื่อใช้แทนมอเตอร์ที่ไหม้ จะเป็นโอกาสที่เหมาะสม และเป็นการคุ้มค่าที่จะเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงแทนมอเตอร์มาตรฐาน

ในแต่ละกรณีที่กล่าวมาข้างต้น ควรมีการคำนวณระยะคืนทุนเชิงเดียว เพื่อช่วยในการตัดสินใจว่าสมควรติดตั้งมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงหรือไม่

(10) แนวทางการอนุรักษ์พลังงาน

1) เลือกขนาดของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าบริเวณนั้นมีค่าต่ำ

2) เลือกประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาวะการดำเนินงาน ซึ่งควรอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์การลงทุน โดยพิจารณาถึงราคาซื้อ, ชั่วโมงการทำงาน, ประสิทธิภาพของมอเตอร์ และค่าไฟฟ้า

3) ปิดมอเตอร์ทุกครั้งเมื่อไม่มีการใช้ เนื่องจากการเดินเครื่องทิ้งไว้โดยไม่มีการะงาน จะใช้พลังงานประมาณ 10 -20% ของพลังงานที่ใช้ขณะที่มอเตอร์ทำงานเต็มกำลัง (Rated Load)

4) ควรมีการตรวจสอบการใช้งานมอเตอร์เพื่อพิจารณาใช้ตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์

5) ควรมีการตรวจสอบควมมีอุณหภูมิที่สูงผิดปกติของทั้งมอเตอร์และระบบจ่ายไฟฟ้าหรือไม่ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจะแสดงถึงการสูญเสียกำลังของมอเตอร์ และทำให้ประสิทธิภาพที่ลดลง

6) ควรใช้การขับเคลื่อนโดยตรงเมื่อมีโอกาส เนื่องจากการขับเคลื่อนทางอ้อม (เช่น ขับเคลื่อนด้วยสายพาน) จะเกิดการสูญเสียพลังงานเป็นจำนวนมาก

ถ้าความต่างศักย์ (Voltage) ของสายแต่ละเส้นของมอเตอร์ 3 เฟสไม่สมดุล อาจมีการสูญเสียพลังงานจำนวนมากได้ จึงควรมีการตรวจสอบความสมดุลของความต่างศักย์อยู่เป็นประจำ

2.2 ตัวนำไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ (Type of electric conductors)

สายไฟฟ้า คือ ตัวนำกำลังไฟฟ้าจากแหล่งไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังจุดใช้ไฟฟ้าลักษณะที่สำคัญของสายไฟฟ้าจะดูจาก ประสิทธิภาพของสายที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลสูงสุดที่แอมป์ แรงดันไฟฟ้าที่สายทนได้ขณะใช้งานวัสดุตัวนำไฟฟ้าที่ใช้สาย ในปัจจุบันนี้ คือ ทองแดง ทั้งนี้จะผลิตสายขึ้นมาตามลักษณะของงานที่ต้องใช้

2.2.1 ประเภทของสายไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

1. สายไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นตัวนำที่เกี่ยวมีขนาดใหญ่ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สายเปลือย และสายหุ้มฉนวน

- สายเปลือย
 - สายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (AAC)
 - สายอลูมิเนียมผสม (AAAC)
 - สายอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR)
- สายหุ้มฉนวน
 - สาย Partial Insulated Cable (PIC)
 - สาย Space Aerial Cable (SAC)
 - สาย Preassembly Aerial Cable
 - สาย Cross-linked Polyethylene (XLPE)

2. สายไฟฟ้าแรงดันต่ำ เป็นสายไฟฟ้าที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 750 V เป็นสายหุ้มฉนวน ทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียม โดยทั่วไปเป็นสายทองแดงสายขนาดเล็กจะเป็นตัวนำเดี่ยว แต่สายขนาดใหญ่เป็นตัวนำตีเกลียว วัสดุฉนวนที่ใช้กับสายแรงดันต่ำคือ Polyvinyl Chloride (PVC) และ Cross-linked Polyethylene (XLPE)

- 2.1 วีเอเอฟ (VAF)
- 2.2 ทีเอดับเบิลยู (THW)
- 2.3 เอ็นวายวาย (NYY)
- 2.4 วีซีที (VCT)

2.2.2 การเลือกใช้สายไฟฟ้า

1. ใช้เฉพาะสายไฟฟ้าที่ได้มาตรฐานจากสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มีเครื่องหมาย มอก.) เท่านั้น

2. สายไฟฟ้าชนิดที่ใช้เดินภายในอาคารหำนำไปใช้เดินนอกอาคาร เพราะแสงแดดจะทำให้ฉนวนแตกกรอบ ขำรุด สายไฟชนิดที่ใช้เดินนอกอาคาร มักจะมีการเติมสารป้องกันแสงแดดไว้ในเปลือก หรือฉนวนของสาย สารป้องกันแสงแดดส่วนใหญที่ใช้กันมากนั้นจะเป็นสีดำ แต่อาจจะเป็นอย่างอื่นก็ได้ การเดินสายในท่อที่มีส่วนช่วยป้องกันฉนวนของสายจากแสงแดดได้ในระดับหนึ่ง

3. เลือกใช้ชนิดของสายไฟให้เหมาะสม กับสภาพการติดตั้งใช้งาน เช่น สายไฟชนิดอ่อนหำนำไปใช้เดินยึดติดกับผนังหรือลากผ่านบริเวณที่มีการกดทับสาย เนื่องจากฉนวนของสาย ไม่สามารถรับแรงกดกระแทกจากอุปกรณ์จับยึดสายได้การเดินสายใต้ดินก็ต้องใช้ชนิดที่เป็นสายใต้ดินแกนสายชนิด NYY พร้อมทั้งมีการเดินร้อยในท่อเพื่อป้องกันสายใต้ดินไม่ให้เสียหาย เป็นต้น

4. ขนาดของสายไฟฟ้าต้องเลือกให้เหมาะสมกับแรงดันไฟฟ้า และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้งาน และสอดคล้องกับขนาดของฟิวส์หรือสวิตช์อัตโนมัติ (เบรกเกอร์) ที่ใช้ สำหรับขนาดสายเมน และสายต่อหลักดินนั้นก็ต้อสอดคล้องกับ ขนาดของเมนสวิตช์และขนาดของเครื่องวัด ฯ ด้วย ตามตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ขนาดสายไฟฟ้าตามขนาดของเมนสวิตช์

ขนาดของเครื่องวัด ๓(แอมแปร์)	เฟส	ขนาดสูงสุดของ เมนสวิตช์ (แอมแปร์)	ขนาดต่ำสุดของสายเมน และสายต่อหลักดิน (ตร.มม.)		แรงดันไฟฟ้า ของสาย เมน (โวลต์)
			สายเมนใน อากาศ	สายเมนในท่อ	
5(15)	1	16	4(10)	4 , 10 ° (10)	300
15(45)	1	50	10(10)	16(10)	300
30(100)	1	100	25(10)	50(16)	300
50(150)	1	125	35(10)	70(25)	300
15(45)	3	50	10(10)	16(10)	750
30(100)	3	100	25(10)	50(16)	750
50(150)	3	125	35(10)	70(25)	750
200	3	250	95(25)	150(35)	750
400	3	500	240(50)	350(70)	750

หมายเหตุ สายต่อหลักดินขนาด 10 ตร.มม. ให้เดินในท่อ ส่วนสายเมนที่ใหญ่กว่า 500 ตร.มม.

ให้ใช้สายต่อหลักดิน ขนาด 95 ตร.มม. เป็นอย่างน้อย

°° สายเมนที่ใช้ในท่อฝังดินต้องไม่เล็กกว่า 10 ตร.มม.

5. ขนาดต่ำสุดของสายดิน ที่เดินไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือ เตารับให้มีขนาดเป็นไปตามขนาดปรับตั้งของเครื่องป้องกันกระแสเกินตามตารางที่ 2.9

6. การเลือกใช้ขนาดสายไฟฟ้าให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานต่างๆ ให้เป็นไปตาม ตารางที่ 2.10 แสดงพิกัดกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 2.9 ขนาดต่ำสุดของสายดินของเครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้า

พิกัดหรือขนาดปรับตั้งของเครื่องป้องกัน กระแสเกิน (แอมแปร์)	ขนาดต่ำสุดของสายดินตัวนำทองแดง (ตร.มม.)
6 – 16	1.5
20 – 25	4
30 – 63	6
80 - 100	10
125 - 200	16
225 - 400	25
500	35
600 - 800	50
1,000	70
1,200 - 1,250	95
1,600 - 2,000	120
2,500	185
3,000 - 4,000	240
5,000 - 6,000	420

หมายเหตุ เครื่องป้องกันกระแสเกิน อาจจะเป็นฟิวส์หรือเบรกเกอร์ (สวิตช์ตัดตอนอัตโนมัติ)

ตัวอย่างขนาดสายไฟฟ้าชนิดที่มีสายดินตาม มอก. 11-2531

ขนาดสายไฟพร้อมสายดิน (ตร.มม.)		สายดินใช้สายเดี่ยว (THW) ฉนวนสีเขียว (ตร.มม.)
สายไฟ	สายดิน	ขนาดสายดิน
2.5	1.5	2.5
4.0	2.5	2.5
6.0	4.0	4.0
10.0	4.0	4.0
16.0	6.0	6.0
25.0	6.0	6.0
35.0	10.0	10.0

หมายเหตุ ในกรณีที่สายดินเดินด้วยสายเดี่ยว สำหรับสายไฟตั้งแต่ขนาด 2.5 ตร.มม. ลงไป

ตารางที่ 2.10 การเลือกใช้ขนาดสายไฟฟ้าให้เหมาะสมกับพิกัดกระแสไฟฟ้า

ขนาดสาย (ตร.มม.)	ขนาดกระแส (แอมแปร์)						
	วิธีการเดินสาย (ดูหมายเหตุ)						
	ก	ข	ค		ง		จ
0.5	9	8	8	7	10	9	-
1	14	11	11	10	15	13	21
1.5	17	15	14	13	18	16	26
2.5	23	20	18	17	24	21	34
4	31	27	24	23	32	28	45
6	42	35	31	30	42	36	56
10	60	50	43	2	58	50	75
16	81	66	56	54	77	65	97
25	111	89	77	74	103	87	125
35	137	110	95	91	126	105	150
50	169	-	119	114	156	129	17
70	217	-	148	141	195	160	216
95	271	-	187	180	242	200	259
120	316	-	214	205	279	228	294
150	364	-	251	236	322	259	330
185	424	-	287	269	370	296	372
240	509	-	344	329	440	352	431
300	592	-	400	373	508	400	487
400	696	-	474	416	599	455	552
500	818	-	541	469	684	516	623

หมายเหตุ

1. วิธีการเดินสาย

แบบ ก หมายถึง สายแกนเดี่ยวหุ้มฉนวนเดินในอากาศ

แบบ ข หมายถึง แบบหุ้มฉนวนมีเปลือกเดินเกาะผนัง

แบบ ค หมายถึง สายแกนเดี่ยวหุ้มฉนวนไม่เกิน 3 แกน (ไม่ต้องนับสายดิน) เดินในท่อในอากาศ ในท่อ
กงในผนังปูนฉาบหรือในท่อในฝ้าเพดาน

แบบ ง หมายถึง สายแกนเดี่ยวหุ้มฉนวนไม่เกิน 3 แกน หรือสายหุ้มฉนวน มีเปลือกไม่เกิน 3 แกน
(ไม่ต้องนับสายดิน)เดินในท่อฝังดิน

แบบ จ หมายถึง สายแกนเดี่ยวหุ้มฉนวนมีเปลือกไม่เกิน 3 แกน หรือสายหุ้มฉนวนมีเปลือกไม่เกิน
3 แกน (ไม่ต้องนับสายดิน) ฝังดินโดยตรง

2. วิธีนับจำนวนสายในท่อ (แบบ ค ถึง แบบ จ)

2.1 ไม่ต้องนับสายเส้นศูนย์ของระบบ 3 เฟส ที่ออกแบบให้ใช้ ไฟสมดูลทั้ง 3 เฟส ยกเว้นหมายเหตุข้อ 2.2

2.2 ถ้าการใช้ไฟมากกว่า 50% มาจากอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกในสายเส้นศูนย์ เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ เครื่องคอมพิวเตอร์ให้นับรวมสายเส้นศูนย์ด้วย

2.3 การนับจำนวนสายไฟฟ้าในท่อที่มีมากกว่า 3 เส้นให้ใช้ตัวคูณเพื่อลดขนาดของกระแสในสายไฟฟ้า ดังนี้

2.4 การเดินสายในท่อหรือรางเคเบิลควรเว้นที่ว่างไว้ โดยพื้นที่หน้าตัดรวมของสายไฟทุกเส้นรวมทั้งฉนวนและเปลือกไม่ควรเกิน 40 % ของพื้นที่หน้าตัดภายในของท่อหรือรางเคเบิลนั้น

2.3 อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของสังคมสมัยใหม่ การพัฒนาประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการพัฒนาอุตสาหกรรมมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าปริมาณมาก ในการปฏิบัติการของระบบไฟฟ้าเพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดต่างๆ นั้น บางครั้งอาจจะเกิดความผิดพลาด (Fault) ขึ้น Fault ที่เกิดขึ้นนั้นมีสาเหตุหลายประการ เช่น การที่ฉนวนไฟฟ้าบางส่วนเกิดเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนสูงหรือจากอุบัติเหตุทางกล ซึ่งเมื่อฉนวนเสียหายจะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้ ความผิดพลาดจะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบการผลิตทางอุตสาหกรรม และอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบไฟฟ้าใหญ่ขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลขณะลัดวงจรจะสูงมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เช่น เกิดความร้อนสูง (Overheating) เกิดแรงดันตกและแรงดันเกิน (Overvoltage and Undervoltage) เกิดความถี่ต่ำ (Under Frequency) และการสูญเสียซิงโครนิซึม (Loss of Synchronism) เป็นต้น ดังนั้นระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องมีระบบป้องกันในไฟฟ้าแรงดันสูงจะใช้ระบบ Relay ป้องกัน (Protective Relay System) เป็นหลัก

2.3.1 อุปกรณ์ป้องกัน (Protective Equipment)

คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปิดเปิด Circuit Breaker เมื่อระบบเกิดการผิดพลาดขึ้น การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันจะทำให้โครงสร้างของระบบเปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไปเวลาในการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันจะเร็วกว่าอุปกรณ์ควบคุม เพื่อที่จะป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์อื่นๆ ได้อย่างทันท่วงที อุปกรณ์ ป้องกันสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ 1. อุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าแรงดันสูง 2. อุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าแรงดันต่ำ

2.3.1.1 ฟิวส์ (Fuse)

ฟิวส์ (Fuse) ทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือระบบจากภาวะกระแสเกินพิกัด (Over current) หรือลัดวงจร (Short circuit) มีทั้งฟิวส์แรงสูงติดตั้งทางด้าน Primary และฟิวส์แรงต่ำติดตั้งทางด้าน Secondary



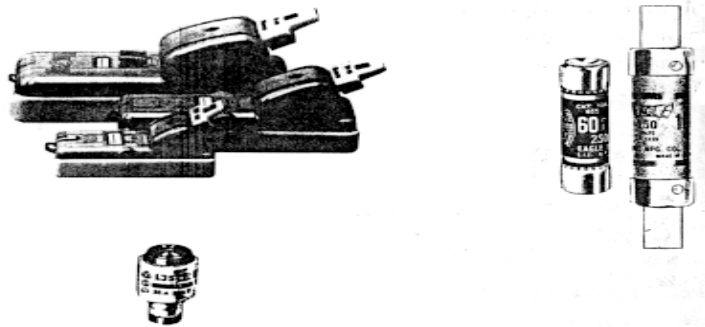
รูปที่ 2.43 ฟิวส์แรงสูง (Dropout Fuse)



รูปที่ 2.44 ฟิวส์แรงต่ำ

ฟิวส์แรงสูง (High Voltage Fuse) ที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่จัดอยู่ในระบบแรงดันตั้งแต่ 600 V ขึ้นไป

ฟิวส์แรงต่ำ (Low Voltage Fuse), (fuse) ทำหน้าที่เป็นตัวตัดวงจรไฟฟ้าในบ้านเรือนผู้อยู่อาศัย เมื่อเกิดการลัดวงจรหรือมีกระแสไฟฟ้าไหลมากผิดปกติในวงจร ซึ่งมีการใช้งานหลายชนิดได้แก่ ฟิวส์ลวดตะกั่ว ฟิวส์กระบอก ฟิวส์ใบมีด ดังแสดงในรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.45 ฟิวส์ลวดตะกั่ว ฟิวส์กระบอก ฟิวส์ใบมีด

ฟิวส์เป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ป้องกันวงจรหรือระบบมิให้เกิดความเสียหายได้เนื่องจากการลัดวงจรหรือมีกระแสไหลผ่านวงจรมากเกินไป ฟิวส์มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่เมื่อทำงานแล้วจะตัดวงจรแยกออกจากกัน และความเร็วในการตัดวงจรขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฟิวส์นั้นๆ

ฟิวส์ที่พบบ่อยๆ อาจแยกออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. แบบคาร์ทริดจ์ (Cartridge type)
2. แบบลูกถ้วย (House type)

2.3.1.2 Circuit Breaker

Circuit breaker หมายถึง อุปกรณ์ที่ทำงาน เปิดและปิดวงจรไฟฟ้าแบบไม่อัตโนมัติแต่สามารถเปิดวงจรได้อัตโนมัติ ถ้ามีกระแสไหลผ่าน เกินกว่าค่าที่กำหนด โดยไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น Circuit Breaker แรงดันต่ำใช้กับแรงดันน้อยกว่า 1,000 Volt แบ่งออกได้หลายชนิด ได้แก่

1) Mold case circuit breaker

หมายถึง Breaker ที่ถูกห่อหุ้มมิดชิดโดย mold 2 ส่วนมักทำด้วย phenolic ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าสามารถทนแรงดันใช้งานได้ Breaker แบบนี้ มีหน้าที่หลัก 2 ประการคือทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิดด้วยมือ และเปิดวงจรโดยอัตโนมัติ เมื่อมีกระแสไหลเกิน หรือเกิดลัดวงจร โดย Breaker จะอยู่ในภาวะ Trip ซึ่งอยู่กึ่งกลางระหว่างตำแหน่ง ON และ OFF เราสามารถ Reset ใหม่ได้โดย กดคันโยกให้อยู่ ในตำแหน่ง OFF เสียก่อน แล้วค่อยโยกไปตำแหน่ง ON การทำงานแบบนี้เรียกว่า Quick make , quick break ลักษณะของ Breaker แบบนี้ที่พบบ่อยโดยทั่วไปคือ Molded case circuit breaker ที่พบบ่อยในท้องตลาดมี 2 ประเภทคือ Thermal magnetic CB. และ Solid state trip CB.

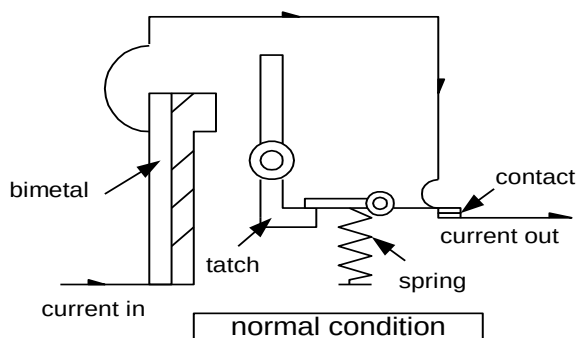


รูปที่ 2.46 Mold case circuit breaker

2) Thermal magnetic molded case circuit breaker

Breaker แบบนี้มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ

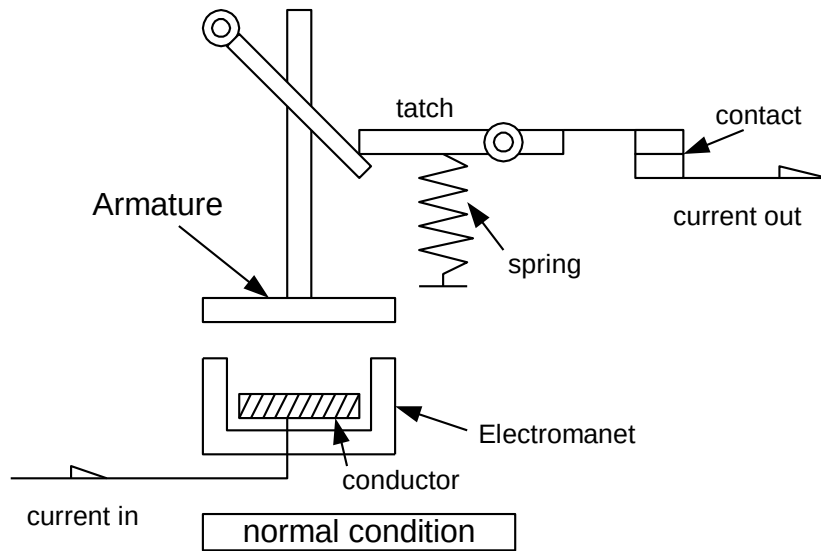
ก. Thermal unit ใช้สำหรับปลดวงจรเมื่อมีกระแสไหลเกินอันเนื่องมาจากการใช้โหลดมากเกินไป ลักษณะการทำงานดูได้จากรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 Thermal unit

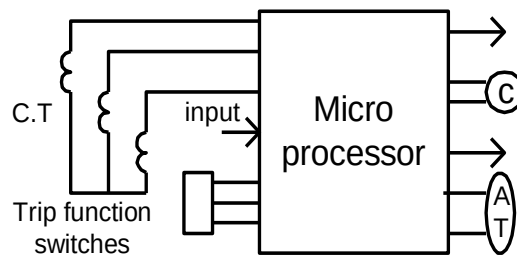
เมื่อมีกระแสเกินไหลผ่านโลหะ Bimetal (เป็นโลหะ 2 ชนิด ที่มีสัมประสิทธิ์ทางความร้อน ไม่เท่ากัน) จะทำให้ Bimetal โค้งตัว ไปปลดอุปกรณ์ทางกล และทำให้ CB. ตัดวงจร เรียกว่าเกิดการ Trip การปลดวงจรแบบนี้ ต้องอาศัย เวลาพอสมควร ขึ้นอยู่กับ กระแสขณะนั้น และความร้อน ที่เกิดขึ้นจนทำให้ Bimetal โค้งตัว

ข. Magnetic unit ใช้สำหรับปลดวงจรเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรหรือมีกระแสค่าสูงๆ ประมาณ 8-10 เท่าขึ้นไป ไหลผ่าน กระแสจำนวนมากจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กความเข้มสูง ดึงให้อุปกรณ์ การปลดวงจรทำงานได้ การตัดวงจรแบบนี้เร็วกว่าแบบแรกมาก โอกาสที่ Breaker จะชำรุดจากการตัดวงจรจึง มีน้อยกว่า



รูปที่ 2.48 Magnetic unit

ค. Solid state trip or Electronic trip molded case circuit breaker เป็น Breaker ชนิดหนึ่งที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่วิเคราะห์กระแสเพื่อสั่งปลดวงจร



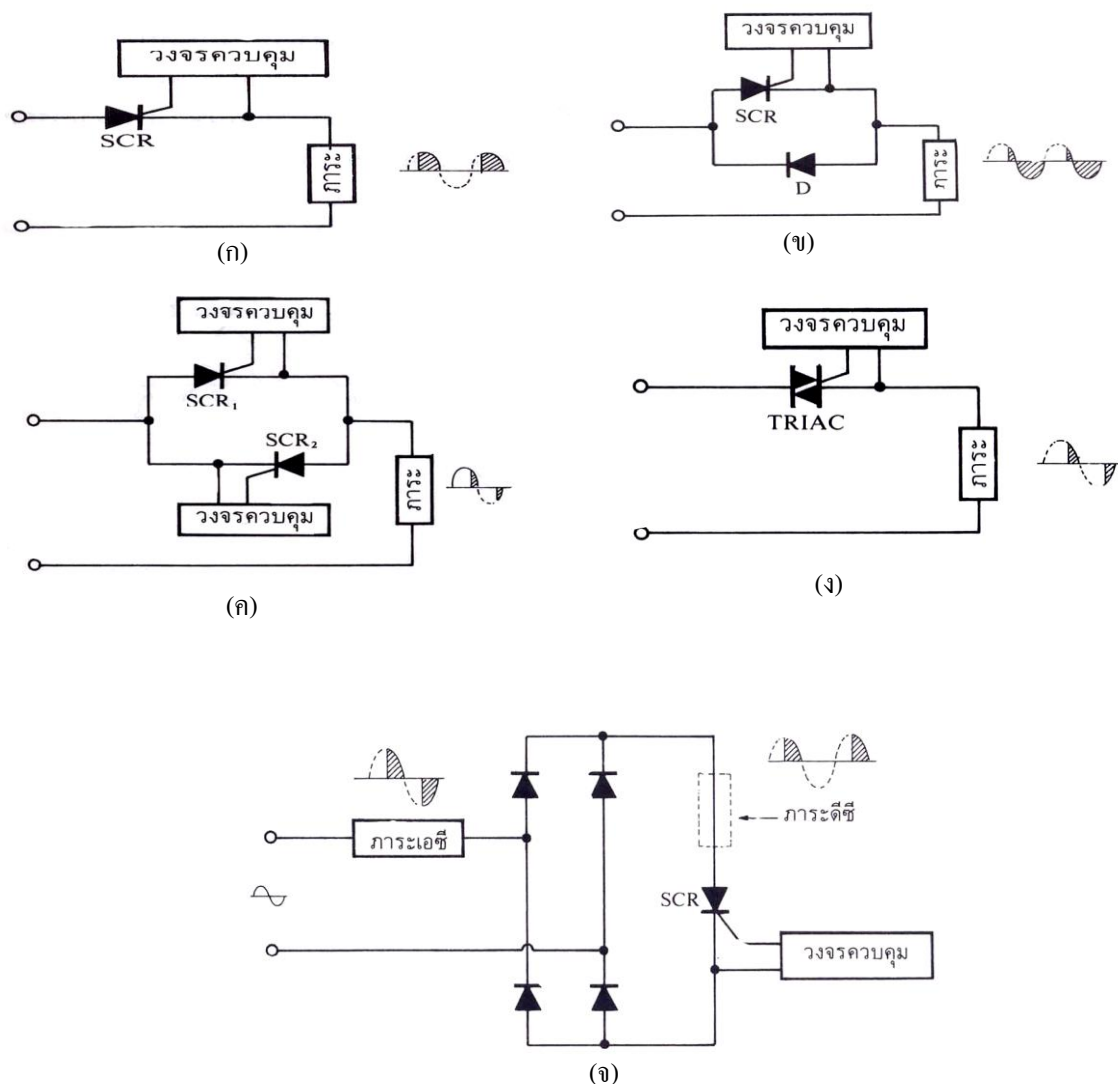
รูปที่ 2.49 Solid state trip or Electronic trip molded case circuit breaker

จาก Diagram จะเห็นว่ามี CT อยู่ภายในตัว Breaker ทำหน้าที่ แปลงกระแส ให้ต่ำลง ตาม อัตราส่วนของ CT และมี Microprocessor คอยวิเคราะห์กระแส หากมีค่าเกินกว่าที่กำหนด จะสั่งให้ Tripping coil ซึ่งหมายถึง Soliniod coil ดึงอุปกรณ์ทางกลให้ CB. ปลดวงจร

ที่ด้านหน้าของ Breaker ชนิดนี้จะมีปุ่มปรับค่ากระแสปลดวงจร , เวลาปลดวงจร และอื่นๆ นอกจากนี้ยังสามารถติดตั้ง อุปกรณ์เสริมที่เรียกว่า Amp meter & fault indicator ซึ่งสามารถแสดงสาเหตุ การ Fault ของวงจรและค่ากระแสได้ ทำให้ทราบสาเหตุของการปลดวงจรได้

2.4 การควบคุมเฟส (Phase Control)

การควบคุมเฟส เป็นวิธีการที่ทำให้มีการเรียงกระแสในช่วงมุมต่างๆของวัฏจักรกำลัง (Power cycle) หรือเป็นกระบวนการที่ปิดเปิดไฟฟ้าเอซีเลี้ยงวงจรไปสู่ภาระด้วยกระแสที่แปรค่าตามแต่จะต้องการโดยบังคับให้ มีการนำกระแสเพียงส่วนหนึ่งของวัฏจักร วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมกำลังเฉลี่ย ป้อนเข้าสู่ภาระ เช่น หลอดไฟฟ้า มอเตอร์ ขดลวดความร้อน ฯลฯ การควบคุมจะทำได้โดยการควบคุมมุมเฟส ของคลื่นเอซีที่ไทรสเตอร์เปิดกระแสให้ไหลผ่านในช่วงที่เหลือยู่ของวัฏจักร และอาจปิดกระแสเมื่อครึ่งวัฏจักร ลับได้มาถึงซึ่งเป็นวิธีการหยุดไหลตามธรรมชาติที่เรียกว่า “การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยเฟส ”



รูปที่ 2.50 วงจรเบื้องต้น ของการควบคุมเฟสเอซี

- (ก) การควบคุมในช่วงครึ่งคลื่น
- (ข) การควบคุมในช่วงครึ่งคลื่นผสมกับครึ่งคลื่นคงที่
- (ค) ควบคุมเต็มคลื่นโดยใช้เอสซีอาร์
- (ง) ควบคุมเต็มคลื่นโดยใช้ไตรแอ็ค
- (จ) ควบคุมเต็มคลื่นสำหรับภาระเอซีหรือภาระระดัชี่

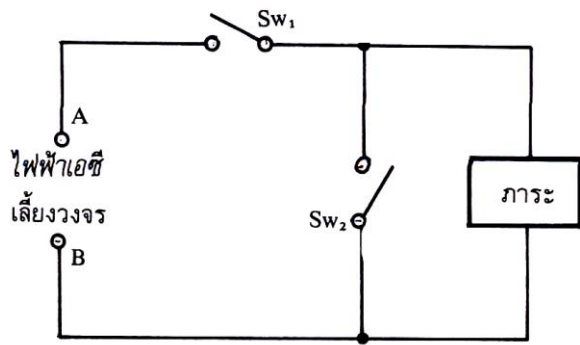
โดยใช้ไทรสเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ จึงมีการควบคุมเฟสเบื้องต้นหลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.50 ซึ่งมี ภาระเป็นความต้านทานหรือตัวเหนี่ยวนำที่มีฟลักซ์ลิงไดโอดต่อคร่อม โดยมีการควบคุมการรีว กระแสขึ้นอยู่กัช่วงคลื่น คือ

1. ควบคุมในช่วงครึ่งคลื่น (Controlled half-wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.50 (ก)
2. ควบคุมในช่วงครึ่งคลื่นผสมกับครึ่งคลื่นคงที่ (Controlled half-wave plus fixed half-wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.50 (ข)
3. ควบคุมเต็มคลื่น (Controlled full wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.50 (ค) โดยใช้เอสซีอาร์สองตัวต่อ ขนานแต่กลับขั้วกัน และรูปที่ 2.50 (ง) โดยใช้ไตรแอ็ค

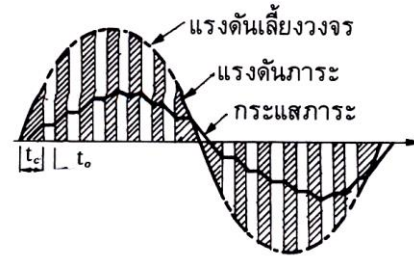
4. ควบคุมเต็มคลื่นสำหรับภาระเอชหรือภาระดีซี (Controlled full wave for ac or dc load)
ดังแสดงในรูปที่ 2.50 (จ)

2.5 การควบคุมแรงดันด้วยวิธีตัดต่อ (Voltage control)

การควบคุมแรงดัน (Voltage control) ด้วยวิธีตัดต่อโดยใช้วงจรสับไฟฟ้าเอชซึ่งทำหน้าที่สับรูปคลื่นซายน์ของแรงดันเอชออกเป็นส่วนย่อยดังวงจร และรูปคลื่นดังรูปที่ 2.51 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งจะทำหน้าที่ปรับค่าแรงดันเอชได้ดีกว่าวิธีการควบคุมเฟส (Phase control)



(ก)



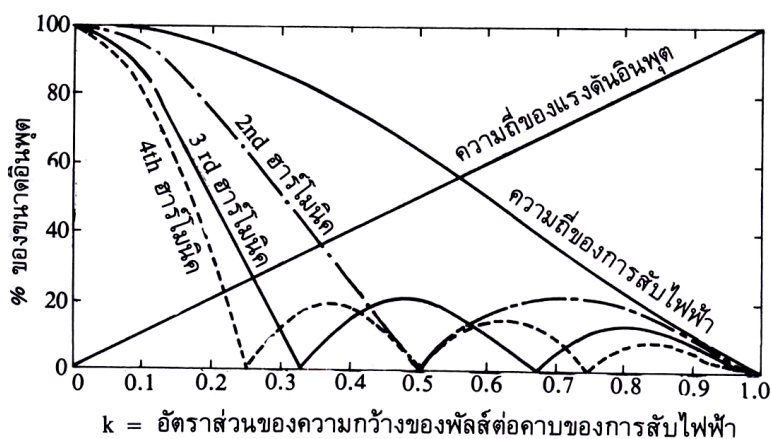
(ข)

รูปที่ 2.51 (ก) วงจรสับไฟฟ้าเอชเบื้องต้น

(ข) รูปคลื่นของแรงดันสับไฟฟ้าของ (ก)

กระแสไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ภาระโดยมีขนาดของแรงดันภาระมีค่าเท่ากับขนาดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเอช (สมมุติว่าไม่มีคัตยกต์กร้อม Sw_1) สำหรับกรณีภาระเชิงนำเราจะสามารถปิดสวิตช์ Sw_2 ได้ต่อเมื่อ Sw_1 เปิดออกแล้ว สมมุติว่ากระแสภาระไหลวนอิสระ (Freewheel) ผ่าน Sw_2 และแรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่าต่ำทั้งคู่และสมมุติว่า Sw_1 เปิดขึ้นเป็นช่วงเวลา t_o ทำให้เกิดรูปคลื่นแสดงในรูปที่ 2.51 (ข) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าแรงดันภาระได้ด้วยการปรับเปลี่ยนคาบเวลา $t_c / (t_c + t_o)$

ซึ่งผลของแรงดันเอาท์พุททำให้เขียนเส้นโค้งแสดงค่าเปรียบเทียบของฮาร์โมนิคต่างๆ ที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.52



รูปที่ 2.52 ค่าเปรียบเทียบฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นของวงจรสับไฟฟ้าเอช

วิธีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอชี่ด้วยวิธีการใช้วงจรสับไฟฟ้าเอชี่จะให้ผลดีกว่าการใช้วิธีการควบคุมเฟสอยู่ 2 ประการ คือ

1. ผลตอบสนองมีความเร็วสูงกว่า เนื่องจากวงจรสับไฟฟ้าสามารถเปิดปิดหลายครั้งในวัฏจักรหนึ่งของแรงดันเอชี่เพียงวงจรขณะที่ในวิธีการควบคุมเฟสนั้นไทรสเตอร์จะปิดกระแสครั้งหนึ่งเมื่อแรงดันเอชี่วงจรกลับทิศของศักย์

2. มีฮาร์โมนิคปะปนน้อยกว่า ดังแสดงเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 2.52 ดังนั้น รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของวงจรสับไฟฟ้าเอชี่จะมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์มากและเป็นการง่ายที่จะใช้วงจรกรองคลื่นให้แรงดันเอาต์พุตเป็นรูปคลื่นไซน์

วงจรสับไฟฟ้าเอชี่มีข้อเสียเปรียบ คือ

1. มีราคาลงทุนค่อนข้างสูงเนื่องจากวงจรส่วนที่ทำให้กำลังและส่วนควบคุมค่อนข้างยุ่งยาก
2. มีสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุค่อนข้างสูงทั้งนี้เนื่องจากความถี่ของการสับไฟฟ้าค่อนข้างสูง

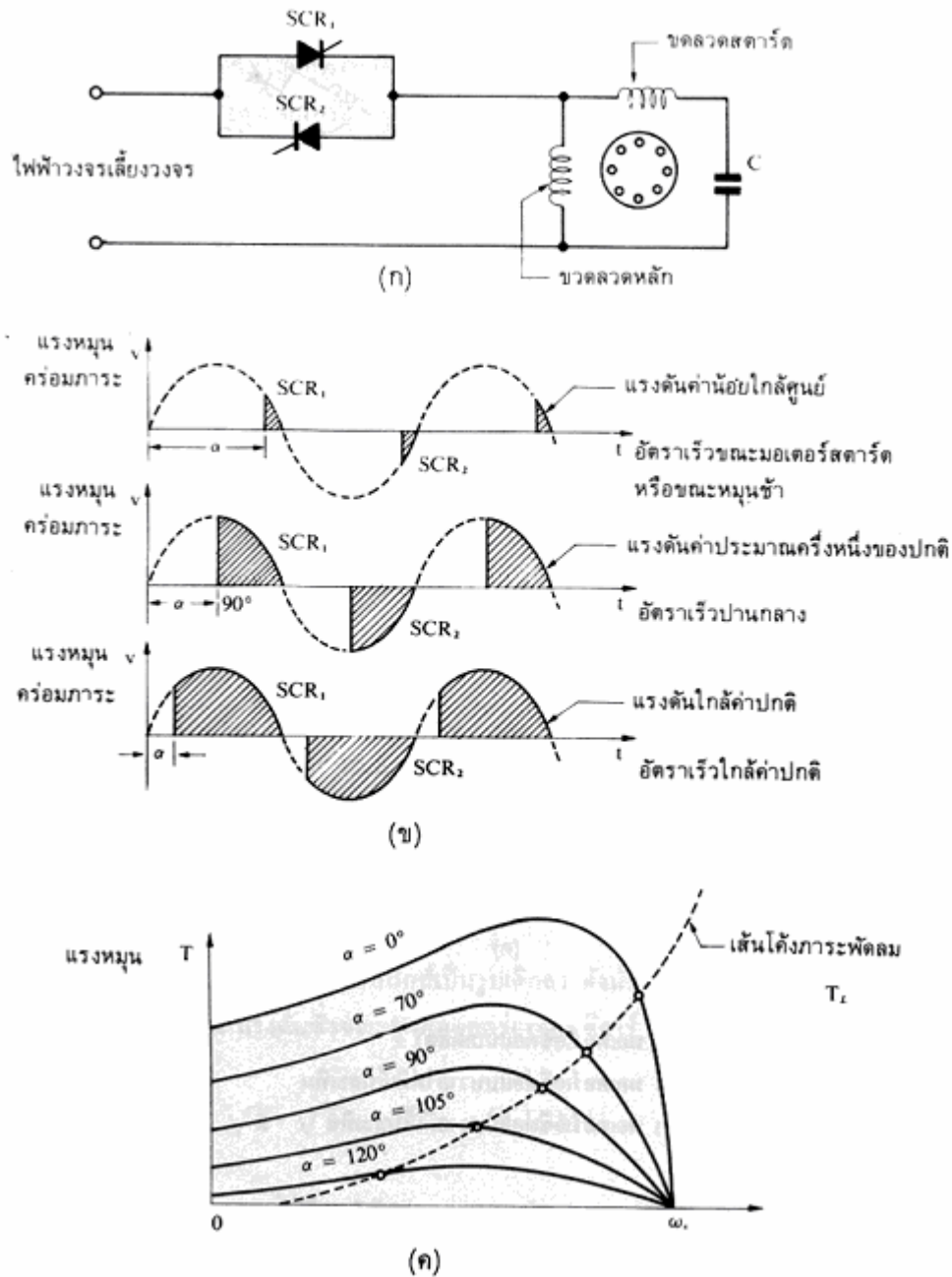
2.6 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีควบคุมเฟส (Phase control of induction motor)

โดยการใช้สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์เอชี่ และอาศัยวิธีการควบคุมเฟสสามารถควบคุมมอเตอร์ เอชี่สตาร์ทปรับเปลี่ยนความเร็ว และหมุนกลับทางได้ตามต้องการ

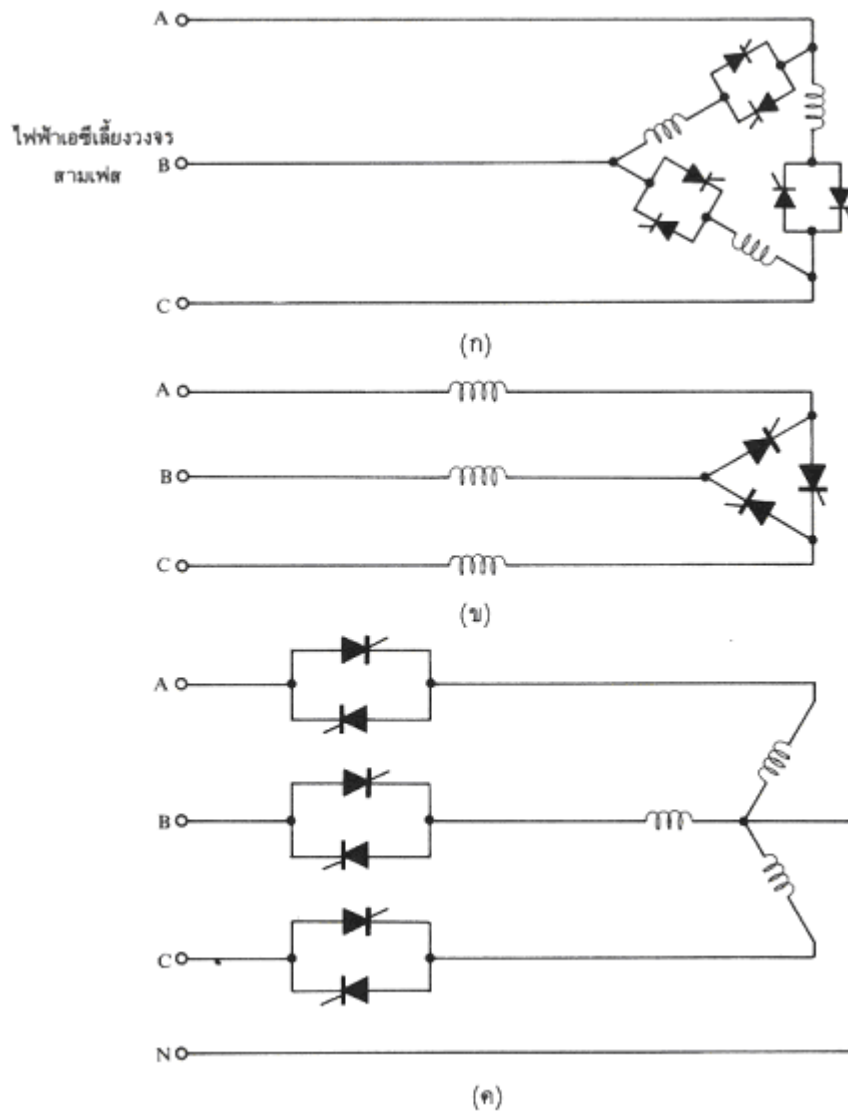
รูปที่ 2.53 (ก) แสดงวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกสองเฟสซึ่งใช้ไฟฟ้าเอชี่เฟสเดียวเพียงวงจรโดยใช้เอสซีอาร์สองตัวต่อขนานแต่กลับขั้วกันเป็นตัวควบคุมด้วยการจุดชนวนด้วยวิธีควบคุมเฟสดังรูปคลื่นลักษณะสมมุติแสดงในรูปที่ 2.53 (ข) ถ้ามอเตอร์นี้เป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่เกินกว่ากระแสตอนสตาร์ทสูงสามารถควบคุมให้มอเตอร์เกินกระแสเล็กน้อยลงโดยการจุดชนวนด้วยมุมเฟสใหญ่หรือ α มีค่า

ใกล้เคียง 180° มุมเปิดกระแสมีค่าน้อยและกระแสจะไหลได้น้อยต่อเมื่อมอเตอร์หมุนเร็วขึ้นและมีแรงเคลื่อนได้กลับสูงขึ้นก็ให้จุดชนวนด้วยมุม α ที่มีค่าเล็กลงตามต้องการซึ่งจะให้เส้นโค้งลักษณะสมบัติดังแสดงในรูปที่ 2.53 (ค)

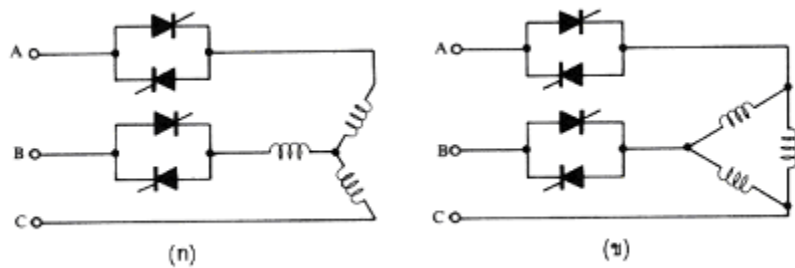
สำหรับมอเตอร์สามเฟสอาจนำสวิตซ์เอชี่มาใช้ได้ ถ้ามอเตอร์เอชี่เป็นระบบไฟฟ้าสามเฟส-สามเส้นซึ่งมอเตอร์อาจต่อเป็นเดลต้า (Δ) หรือวาย (Y) อาจใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 2.54 (ก) และ (ข) ถ้ามอเตอร์ต่อแบบวายมีเส้นสะเทิน (Neutral line) ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟส-สี่เส้น เพียงแต่ต่อเส้นสะเทินเพิ่มขึ้นโดยไม่ต้องเพิ่มจำนวนของเอสซีอาร์ดังแสดงในรูปที่ 2.54 (ค)



รูปที่ 2.53 (ก) วงจรควบคุมมอเตอร์เอซีเฟสเดียวโดยวิธีควบคุมเฟส
 (ข) รูปคลื่นแรงดันคร่อมมอเตอร์เอซีที่มุมจุดชนวนและอัตราเร็วต่างๆ
 (ค) เส้นโค้งลักษณะสมบัติระหว่างแรงหมุนกับอัตราเร็วที่มุมจุดชนวนต่างๆ



รูปที่ 2.54 (ก) มอเตอร์เอซีต่อแบบเดลต้า
(ข) มอเตอร์เอซีต่อแบบวายไม่มีเส้นสะเทิน
(ค) มอเตอร์เอซีต่อแบบวายมีเส้นสะเทิน

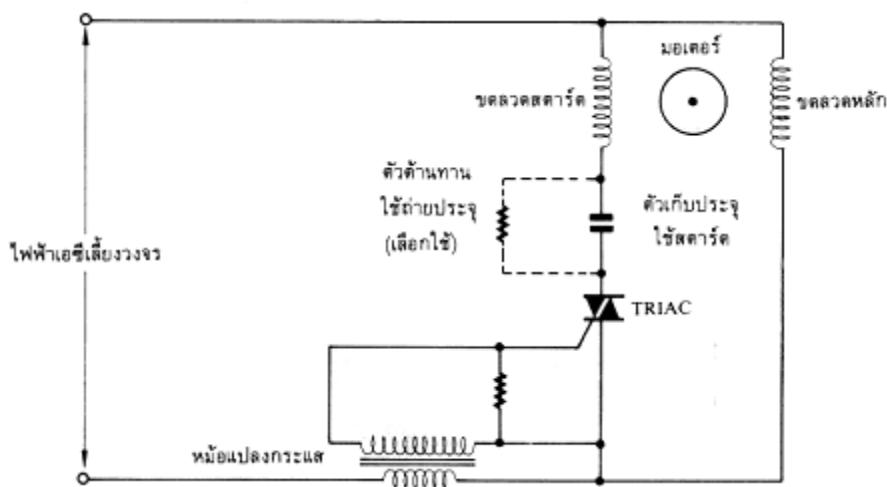


รูปที่ 2.55 การต่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แบบไม่สมดุลสำหรับควบคุมมอเตอร์เอซี
(ก) ต่อแบบวาย
(ข) ต่อแบบเดลต้า

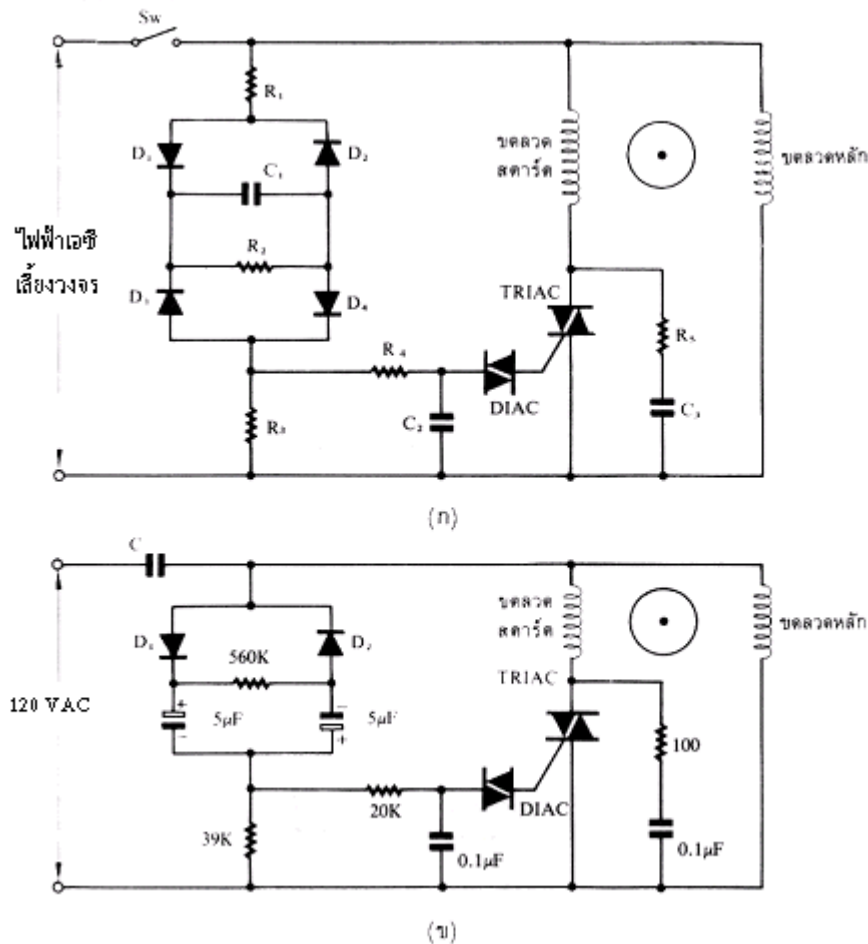
ในกรณีที่ต้องการประหยัดเอสซีอาร์อาจใช้ไดโอดแทนเอสซีอาร์ตัวหนึ่งในคู่หนึ่งๆ ของชุดต่อขนาน หรืออาจไม่ใช้เอสซีอาร์คู่หนึ่งคงใช้เพียงสองคู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.55 ซึ่งเป็นกรณีระบบไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล (Unbalanced three-phase system) โดยการวิเคราะห์แบบองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical components) สามารถแตกแรงดันสามเฟสไม่สมดุลออกเป็นแรงดันสามเฟสสมดุล 3 ชุด คือ ระบบแรงดันอันดับบวก อันดับลบ และอันดับศูนย์ (Positive, negative และ zero-sequence systems) โดยชุดแรงดันอันดับลบจะทำให้เกิดกระแสอันดับลบ ซึ่งทำให้เกิดแรงหมุนในทิศสวนทางกับทิศการหมุนปกติของมอเตอร์จึงเป็นผลทำให้มอเตอร์หมุนช้ากว่าวิธีการควบคุมมอเตอร์ด้วยการต่อวงจรแบบสมดุลกระแสอันดับบวก อันดับลบ และอันดับศูนย์ (ถ้ามี) จะทำให้มอเตอร์ร้อนขึ้น และมอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำลง เนื่องจากการใช้โรตอร์เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ป้อนแรงดันเข้ามอเตอร์เอชซีซึ่งจะต่อเป็นแบบสมดุลหรือไม่สมดุลก็ตามจะเป็นเหตุให้มีรูปคลื่นแรงดัน และกระแสผลลัพธ์ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ทำให้มีกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นเนื่องจากฮาร์โมนิก ซึ่งเป็นผลให้มอเตอร์ร้อนขึ้น และมีประสิทธิภาพต่ำลง เมื่อควบคุมให้มอเตอร์ทำงานที่อัตราเร็วต่ำโดยการจุดชนวนด้วยใหญ่ (หรือปิดกระแสด้วยมุมเล็ก) รูปคลื่นแรงดัน และกระแสผลลัพธ์จะผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์มากมาย เป็นผลทำให้มอเตอร์ร้อนขึ้นมาก และมีประสิทธิภาพต่ำลงมาก และยิ่งต้องจรมอเตอร์เอชซีแบบไม่สมดุล มอเตอร์เอชซีจะยิ่งร้อนมากขึ้น และประสิทธิภาพยิ่งต่ำลงมากที่อัตราต่ำเพื่อที่จะไม่ให้มอเตอร์ร้อนมากเกินไปจำเป็นต้องลดอัตราการทำงานให้น้อยลงกว่าปกติ

2.6.1 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยการจุดชนวนควบคุมเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่สตาร์ทด้วยวิธีแยกเฟสหรืออาศัยตัวเก็บประจุ (Split-phase หรือ Capacitor start induction motor) เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กที่นิยมใช้กันมาก ซึ่งสามารถควบคุมการสตาร์ทและอัตราเร็วได้หลายวิธี รูปที่ 2.56 เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดโดยใช้หม้อแปลงกระแส (Current transformer) เข้าจุดชนวนไตรแอ็ค ซึ่งขณะสตาร์ทมอเตอร์จะกินกระแสค่อนข้างมากเนื่องจากการเหนี่ยวนำจะมีกระแสไหลอยู่ในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสใหญ่มากพอที่จะจุดชนวนไตรแอ็คให้เปิดกระแสได้ขดลวดสตาร์ทของมอเตอร์จะทำงานแล้วบังคับให้มอเตอร์หมุน ซึ่งเมื่อมอเตอร์หมุนเข้าอัตราเร็วปกติแล้วกระแสจะลดลงมากเป็นผลทำให้กระแสในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสลดค่าลงมากจนกระทั่งไม่เพียงพอที่จะจุดชนวนไตรแอ็คจึงปิดกระแสเป็นผลให้ขดลวดสตาร์ทหยุดทำงานแต่มอเตอร์ยังคงหมุน ต่อไปด้วยขดลวดหลัก



รูปที่ 2.56 วงจรสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสโดยไตรแอ็ค



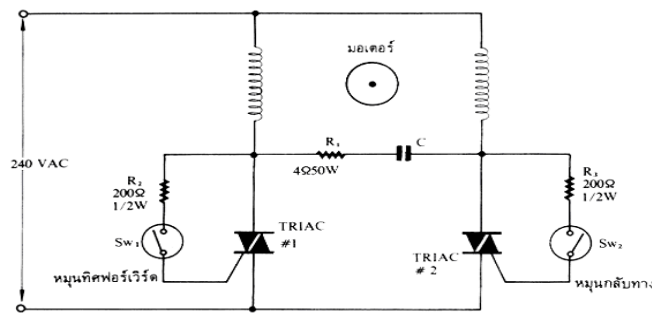
รูปที่ 2.57 (ก) วงจรสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสประวิงเวลา
(ข) วงจรสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กดัดแปลงจากรูป (ก)

รูปที่ 2.57 (ก) แสดงวงจรสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสโดยอาศัยการจุดชนวนประวิงเวลาเพื่อควบคุมขดลวดสตาร์ทของมอเตอร์การประวิงเวลาเกิดขึ้นเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ เริ่มสับสวิตช์ Sw ลง กระแสจะไหลเข้าประจุ C_1 โดยผ่าน R_1 , R_2 และ R_3 แรงดันคร่อม R_3 จะเข้าประจุ C_2 ซึ่งเป็นการประวิงเวลาให้ช้าลงอีกเมื่อแรงดันคร่อม C_2 มีค่าสูงพอเพียงก็จะจุดชนวนไดแอ็คและจุดชนวนไตรแอ็คอีกต่อหนึ่งในการเก็บประจุ C_1 เมื่อได้ถึงมุมจุดชนวน 90° แล้วก็จะไม่มีการจุดชนวนเกิดขึ้นอีกและขดลวดสตาร์ทจะหยุดทำงาน ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าขดลวดสตาร์ทหยุดทำงานได้จริงจะต้องเลือกค่า R_1 , R_2 และ R_3 เพื่อให้แรงดันยอดสูงสุดตกคร่อม R_3 มีค่าน้อยกว่าแรงดันจุดชนวนต่ำสุดของไดแอ็คในการสตาร์ทใหม่ต้องรอเวลาอยู่ชั่วขณะหนึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับตัวคงที่เวลา R_2C_1 โดยที่จะต้องรอให้ C_1 ถ่ายประจุออกโดยผ่าน R_2 ซึ่งต้องการเวลารอคอยประมาณ 1 หรือ 2 วินาที จึงจะสตาร์ทได้ใหม่อีก และด้วยเวลาขนาดนี้ไม่ต้องการระบายความร้อนเพิ่มเติมอีกเนื่องจากสิ่งห่อหุ้มของตัวไตรแอ็คมีค่าความจุความร้อนที่มีค่าใหญ่พอเพียงที่จะดูดเอาความร้อนที่เกิดขึ้นให้กระจายหายไปด้วยวิธีการนำ และการพาโดยผ่านความร้อนเข้าสายไฟฟ้าที่เข้าต่อติดกับไตรแอ็คให้กระจายความร้อนออกไปนอกจากนี้ R_5 และ C_3 เป็นวงจรสแน็บเบอร์เพื่อลดผลเนื่องจากแรงดันเปลี่ยนแปลงชั่วครู่ dv/dt

รูปที่ 2.57 (ข) แสดงวงจร ซึ่งตัวเก็บประจุสองตัวสำหรับประวิงเวลาโดยต้องประจุให้มีศักย์ตรงข้ามกันสำหรับแต่ละครึ่งวัฏจักรบวก และลบวิธีการนี้ต้องการเวลาในการประจุค่อนข้างช้าเนื่องจากมีเวลาถ่ายประจุออกผ่าน R เพียงครึ่งวัฏจักรในแต่ละวัฏจักร และวิธีการนี้ต้องการเวลาในการในการสตาร์ทใหม่ช้าซึ่งเหมาะสมกับการประยุกต์บางอย่าง

รูปที่ 2.58 แสดงวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสใช้ตัวเก็บประจุซึ่งอาจบังคับให้หมุนกลับทางได้โดยใช้ไตรแอ็คการบังคับให้มอเตอร์หมุนกลับทางอาจทำได้ด้วยมือหรือใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีหลักการทำงาน ดังนี้เมื่อไตรแอ็คตัวที่ 1 ปิดกระแส มอเตอร์จะหมุนในทิศทางที่ถูกควบคุมด้วยไตรแอ็คตัวที่ 2 และเมื่อไตรแอ็คตัวที่ 1 เปิดกระแสก็จะบังคับให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตรงกันข้าม พร้อมกันนั้น C จะเข้าบีบบังคับให้ไตรแอ็คตัวที่ 2 ปิด

ตัวต้านทาน R1 ทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ถ่ายออกจาก C ให้มีขนาดอยู่ในค่าปลอดภัยในขณะที่ไตรแอ็คทั้งสองเปิดกระแสขึ้นพร้อมกัน เช่น เมื่อไตรแอ็คตัวที่ 1 เปิดกระแสขณะที่ไตรแอ็คได้เปิดกระแสอยู่ก่อนจะทำให้กระแสถ่ายประจุออกจาก C ผ่านไตรแอ็คทั้งสองและเป็นผลให้ไตรแอ็คอาจชำรุดเสียหาย นอกจากนี้ ค่าเหนี่ยวนำของขดลวดมอเตอร์เข้าเรโซแนนซ์กับ C ทำให้ C มีค่าแรงดันสูงกว่าแรงดันของสายไฟฟ้า เพราะฉะนั้นขณะที่ทำให้ไตรแอ็คปิดกระแสไตรแอ็คจะต้องรับแรงดันที่มีค่าสูงกว่าแรงดันของสายไฟฟ้าเข้าต่อคร่อมจึงจำเป็นที่เราจะต้องแน่ใจว่าไตรแอ็คสามารถทนทานต่อแรงดันนี้ได้ โดยมีกฎง่ายๆ ในการเลือกใช้ไตรแอ็คสำหรับวงจรนี้ คือให้เลือกใช้ไตรแอ็คที่มีอัตราแรงดันปกติสูงกว่า 1.5 เท่าของอัตราแรงดันปกติของตัวเก็บประจุ C

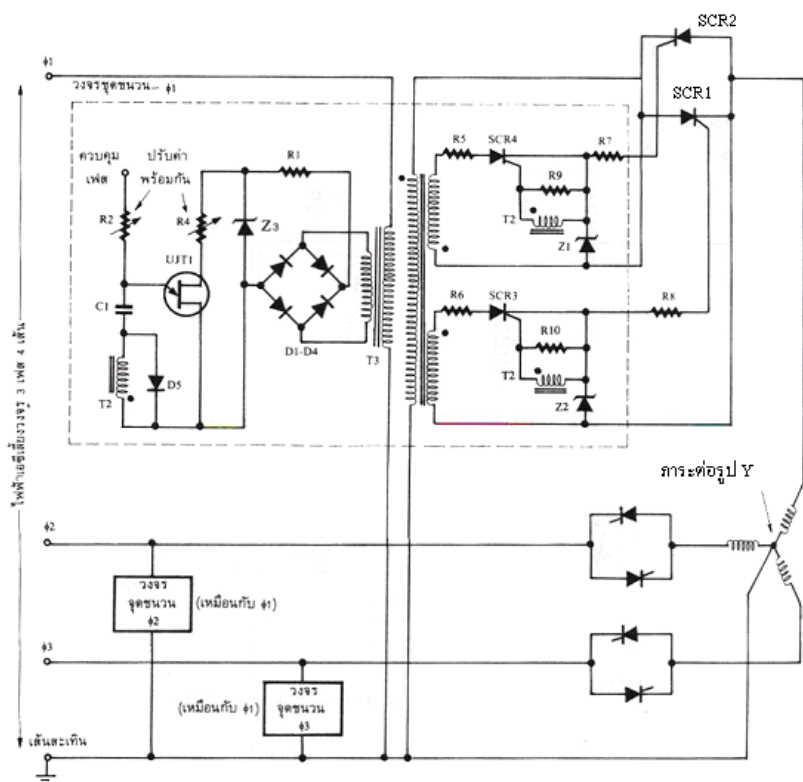


รูปที่ 2.58 วงจรควบคุมการหมุนกลับทางของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟสใช้ตัวเก็บประจุ

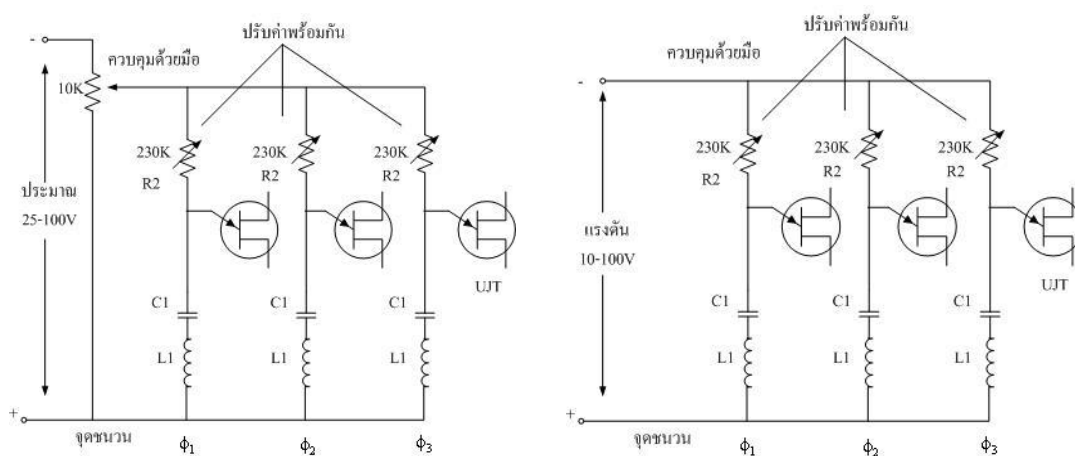
2.6.2 วงจรจุดชนวนแบบควบคุมเฟสสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในรูปที่ 2.54 และ 2.55 ด้วยวิธีการจุดชนวนแบบควบคุมเฟสนั้นอาจปรับปรุงวงจรจุดชนวนมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ที่กล่าวนี้ได้ อาจใช้วงจรต่างๆ ดังที่จะได้อธิบายต่อไป

รูปที่ 2.59 แสดงวงจรจุดชนวนที่ใช้ยูเจทีจุดชนวนเอสซีอาร์ตัวเล็กๆ เพื่อจุดชนวน เอสซีอาร์ขนาดใหญ่อีกตัวหนึ่งโดยเอสซีอาร์ขนาดใหญ่มีหน้าที่ควบคุมระบบไฟฟ้าเอสซีสามเฟสสี่เส้นซึ่งมีโหลดต่อเป็นรูปวาย (Y) และสามารถควบคุมเฟสได้พร้อมๆ กันทั้งสามเฟสด้วยการปรับสัญญาณไฟฟ้าเพียงค่าเดียวรวมกันดังแสดงในรูปที่ 2.59 หม้อแปลง T3 ทำหน้าที่แยกวงจรยูเจทีออกจากระบบไฟฟ้ากำลังเป็นผลให้สามารถต่อวงจรยูเจทีทั้งสามวงจรติดกันได้ทั้งจุดเหมาะสมจุดใดจุดหนึ่งการใช้วงจรของรูปที่ 2.59 ต้องระมัดระวังในการออกแบบ โดยจะต้องคำนึงถึงกระแสที่มีอยู่ในเส้นสะเทินด้วยและวงจรนี้จะไม่สามารถควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ถ้าไม่มีเส้นสะเทิน ดังนั้นวงจรนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้กับโหลดต่อแบบเดลตา (Δ) หรือแบบวาย (Y) ที่ไม่มีเส้นสะเทิน เนื่องจากจะมีแรงดันขาดตอนหรือไฟฟ้ากระพริบขณะที่เปลี่ยนสัญญาณควบคุม



รูปที่ 2.59 วงจรจุดชนวนแบบควบคุมเฟสสำหรับระบบไฟฟ้าเอซีสามเฟสสี่เส้น



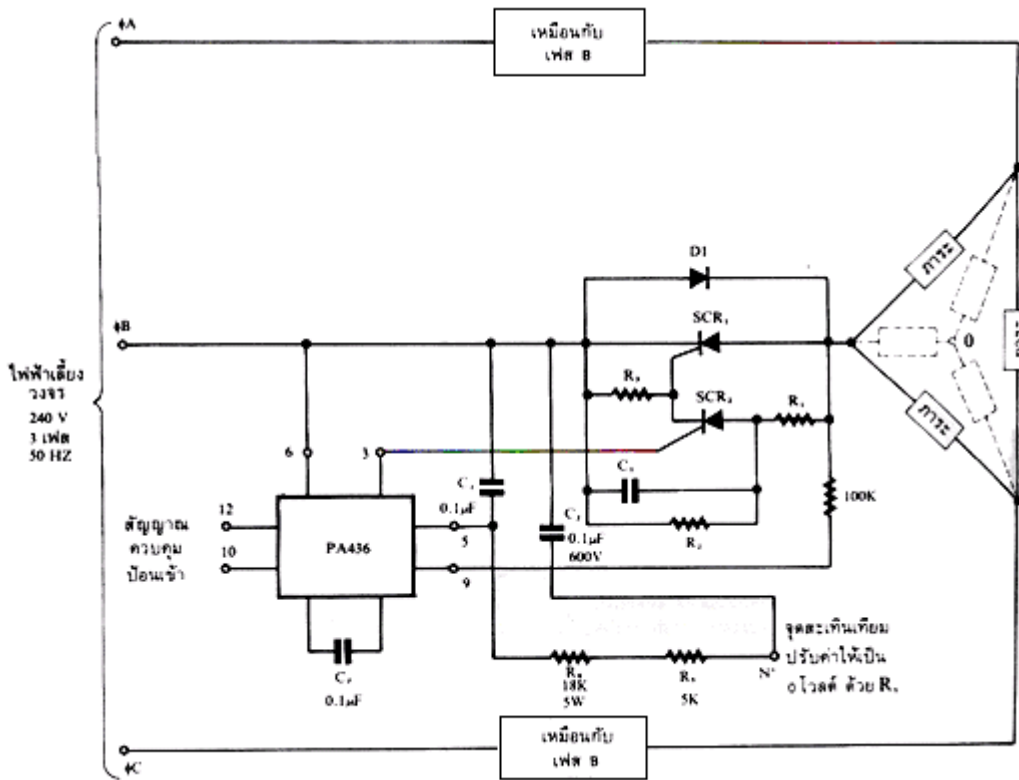
รูปที่ 2.60 วิธีการควบคุมเฟสในการจุดชนวนสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส

(ก) ควบคุมด้วยมือ

(ข) ควบคุมด้วยแรงดันกระแสตรง

รูปที่ 2.60 แสดงวิธีการควบคุมเฟส ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ วิธีการควบคุมด้วยมือ และวิธีการควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์โดยต้องปรับค่าในแต่ละวงจรของยูเจทีเพื่อให้มีการจุดชนวนสมมาตรกันระหว่างเฟสต่างๆ ซึ่งต้องปรับค่า R4 ในแต่ละวงจรให้มีการจุดชนวนยูเจทีทั้งสามที่แรงดันอิมิตอร์ค่าเดียวกัน (ซึ่งเป็นค่าแรงดันคร่อม C1 และขดลวดปฐมภูมิของ T2) แล้วปรับค่า R2 เพื่อให้มีการจุดชนวนของเฟสทั้งสามตามต้องการด้วยสัญญาณควบคุมอันเดียวกัน เช่น วงจรควบคุมด้วยมือ

เพื่อที่สามารถจุดชนวนแบบควบคุมเฟสเข้ากับระบบไฟฟ้าเอชีสามเฟสแบบสามเส้นหรือสี่เส้นก็ได้ ซึ่งอาจทำได้ด้วยการนำเอาไอซีเบอร์ PA 436 โดยสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 25°C สามารถควบคุมการจุดชนวนด้วยมุมที่ผิดพลาดน้อยกว่า 5 องศาไฟฟ้า และมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปบ้างเล็กน้อยเนื่องจากความไม่สมมาตรระหว่างมุมจุดชนวนลบและมุมจุดชนวนบวก ดังนั้นในการควบคุมภาระเชิงเหนี่ยวนำต้องใช้สัญญาณจุดชนวนที่มีศักย์เหมือนกันเข้าจุดชนวน



รูปที่ 2.61 วงจรจุดชนวนแบบควบคุมเฟสของระบบไฟฟ้าเอชีสามเฟส

รูปที่ 2.61 แสดงการใช้ไอซีเบอร์ PA 436 ในระบบไฟฟ้าเอชีสามเฟสที่ต่อภาระเป็นแบบเดลต้า หรือ วายซึ่งจะสามารถทำการควบคุมได้เรียบร้อยดีเมื่อใช้ชุดของเอสซีอาร์-ไดโอดต่อขนานแต่กลับขั้วเข้าใช้แทนชุดของเอสซีอาร์กับเอสซีอาร์ต่อขนานแต่กลับขั้ว ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ชุดของเอสซีอาร์กับเอสซีอาร์สำหรับระบบไฟฟ้าเอชีสามเฟสสามเส้นจะต้องการสัญญาณพัลส์จุดชนวนที่มีช่วงเวลาค่อนข้างยาวนานหรือจุดชนวนด้วยพัลส์สองพัลส์เรียงกัน และต้องการจุดสะเทินเทียม N' เพื่อใช้เป็นจุดร่วมของวงจรจุดชนวนทั้งสามเฟส ซึ่งสามารถรับค่าแรงดันของ N' ให้เท่ากับ 0 โวลต์ได้ด้วยการปรับค่า R_5 ถ้าระบบไฟฟ้าเอชีสามเฟสเป็นชนิดสี่เส้น ต้องต่อเส้นสะเทินเข้ากับจุด “0” และต้องใช้ชุดเอสซีอาร์กับเอสซีอาร์ในการควบคุม

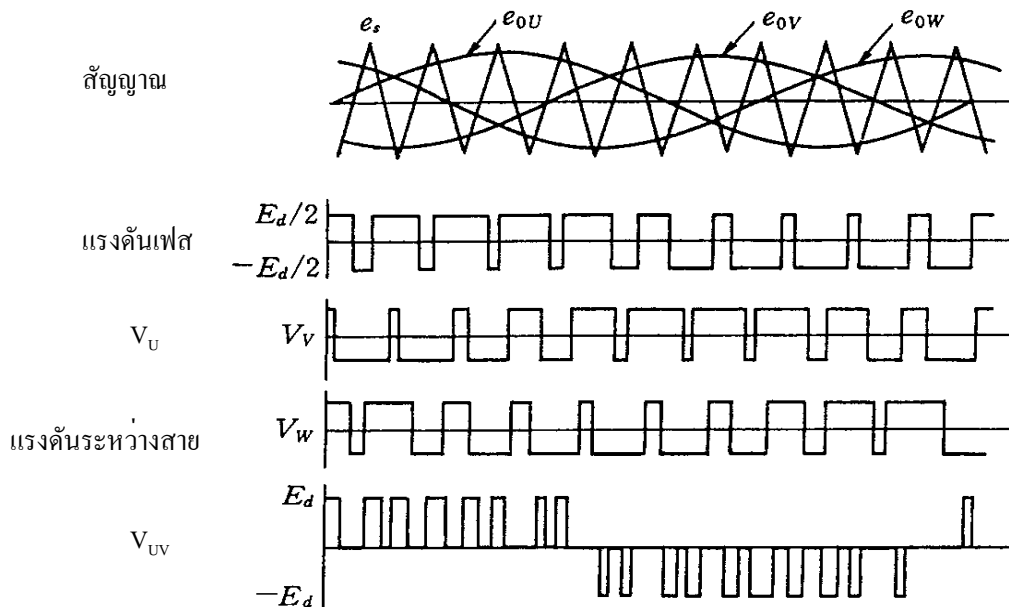
2.7 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีควบคุมความถี่ (Frequency control of induction motor)

ถ้าให้ความเร็วเชิงโคโรนัสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเท่ากับ $N_0 [\text{min}^{-1}]$ ให้จำนวนขั้วเท่ากับ P ให้สลิปเท่ากับ s และให้ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟเท่ากับ f_0 แล้ว ความเร็วรอบ N จะเท่ากับ

$$N_r = \frac{120 f (1 - s)}{P} \quad [\text{rpm}]$$

ซึ่งทำให้พิจารณาวิธีที่สามารถใช้ควบคุมความเร็วได้ด้วยการควบคุมความถี่แปรผัน (เปลี่ยน f_0 เพื่อเปลี่ยนความเร็วเชิงโรตัส)

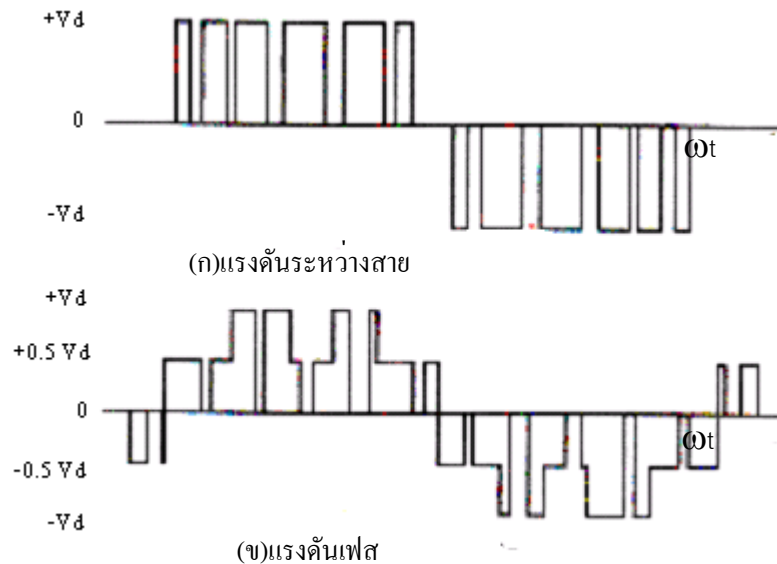
ในกรณีที่แรงดันไฟตรงมีค่าคงที่ เพื่อให้ได้อัตราส่วนระหว่างแรงดัน และความถี่มีค่าคงที่โดยการใช้สัญญาณรูปคลื่นไซน์มอดูเลตกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมซึ่งเรียกว่าสัญญาณพาหะ (Carrier signal) วิธีการที่ใช้ในการมอดูเลตจะใช้วิธีเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณพาหะดังรูปที่ 2.62



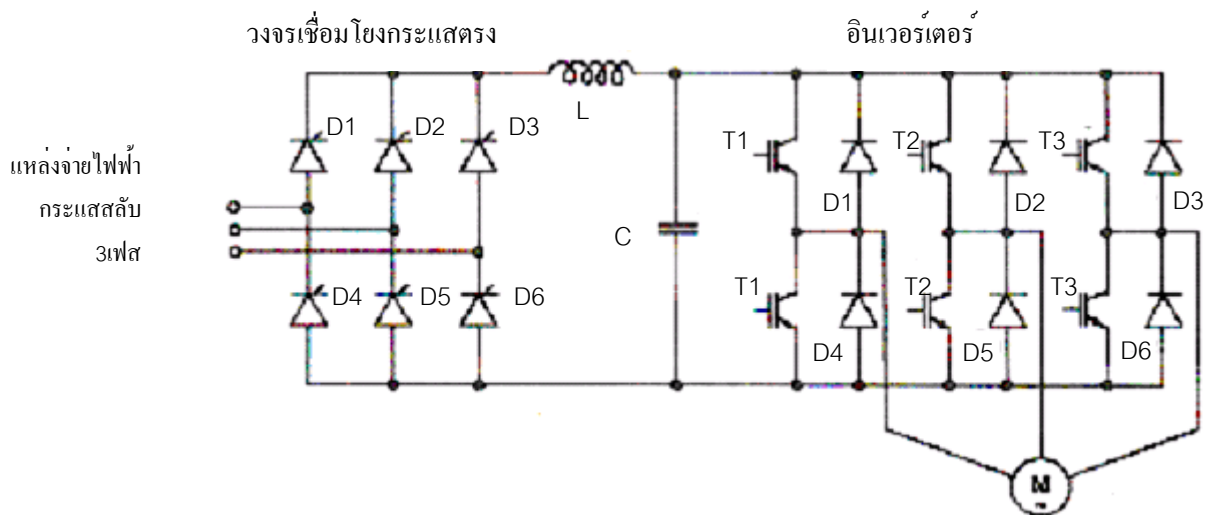
รูปที่ 2.62 หลักการสร้างสัญญาณ PWM

จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณ PWM ได้มาจากการที่เอาสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่เท่ากับความถี่ที่เราต้องการมอดูเลตกับคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมซึ่งมีความถี่สูงกว่าคลื่นรูปไซน์หลายเท่า สัญญาณ PWM ที่ได้เกิดจากการเปรียบเทียบจุดตัดของสัญญาณทั้งสอง จะเห็นได้ว่าจุดตัดนี้จะเป็นตัวกำหนด การเปิด-ปิดของอุปกรณ์กำลังที่ภาคอินเวอร์เตอร์ทำให้อุปกรณ์กำลังแต่ละชุดของแต่ละเฟสที่ภาคอินเวอร์เตอร์ต้องทำงานแบบสวิตซ์ซึ่งตามรูปสัญญาณนี้ และจะทำให้เกิดแรงดันระหว่างสาย (Line voltage) และแรงดันแต่ละเฟส (Phase voltage) ดังรูปที่ 2.63 โดยลักษณะของวงจรในภาคกำลังดังรูปที่ 2.64 ซึ่งเราจะต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถเปิด-ปิดที่ความถี่สูงได้ เช่น Transister หรือ IGBT เป็นต้น

จากรูปที่ 2.63 เรียกความกว้างระหว่างพัลส์ว่า ความกว้างพัลส์ (Pulse width) และเรียกช่องว่างระหว่างพัลส์ว่า ความกว้างนอตช์ (Notch width) นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนความถี่ และแรงดัน rms ของรูปคลื่น PWM นี้ได้ด้วยการเปลี่ยนความถี่และขนาดของรูปคลื่นไซน์หรือสัญญาณมอดูเลต การเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์จะทำให้ความถี่มูลฐานของรูปคลื่น PWM เปลี่ยนแต่การเปลี่ยนขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณรูปคลื่นไซน์จะทำให้ค่าแรงดัน rms ของ PWM เปลี่ยน ซึ่งถ้าควบคุมอย่างเป็นสัดส่วนกันผลก็คือทำให้อัตราส่วน V/f คงที่



รูปที่ 2.63 แรงดันระหว่างสายและแรงดันเฟสของอินเวอร์เตอร์แบบ PWM



รูปที่ 2.64 วงจรไฟฟ้ากำลังซึ่งใช้ Transister หรือ IGBT ในภาคอินเวอร์เตอร์

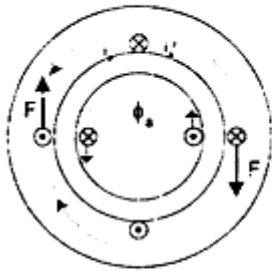
2.8 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีควบคุมเวกเตอร์ (Vector control of induction motor)

2.8.1 หลักการระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์

การเกิดขึ้นของทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ ทำให้มุมมองของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเปลี่ยนไปจากเดิมมาก เพราะพื้นฐานแล้วการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถทำได้ทางเดียวคือการควบคุมผ่านทางปริมาณไฟฟ้า 3 เฟสที่นิยมให้กับขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งโดยปกติก็จะหมายถึงแรงดันหรือกระแสที่ขดลวดสเตเตอร์ ถ้ามองในเชิงปริมาณ 3 เฟสอย่างในอดีต ก็จะหนีไม่พ้นการควบคุมแบบสเกลาร์

การควบคุมแบบเวกเตอร์ได้นำเสนอมุมมองใหม่ของปริมาณไฟฟ้า 3 เฟส ดังกล่าวไปเป็นเวกเตอร์ในระบบ 2 แกน ซึ่งพฤติกรรมทำนองเดียวกันกับปริมาณไฟฟ้าที่ป้อนกลับให้กับมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separated exciting DC motor) ปริมาณไฟฟ้าแกนหนึ่งคือ ปริมาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดสนาม (Field winding) และอีกแกนหนึ่งคือ ปริมาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature winding) เป็นกระแสสำหรับการสร้างสนามแม่เหล็ก และกระแสสำหรับกำหนดแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรง ตามลำดับ

แรงกระทำบนแกนอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง



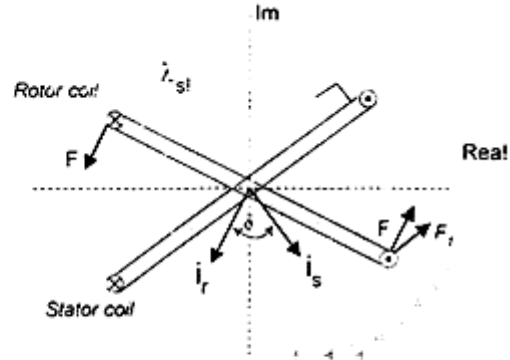
$$T_e = \frac{PC}{2\pi m} \Phi_a i_a = K_a \Phi_a i_a$$

i_a = current in external armature circuit

C_a = total number of conductors in armature winding

m = number of parallel paths through winding

แรงกระทำบนแกนโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



$$T_e = F_l \sin \delta = \lambda_{sr} i_r \sin \delta$$

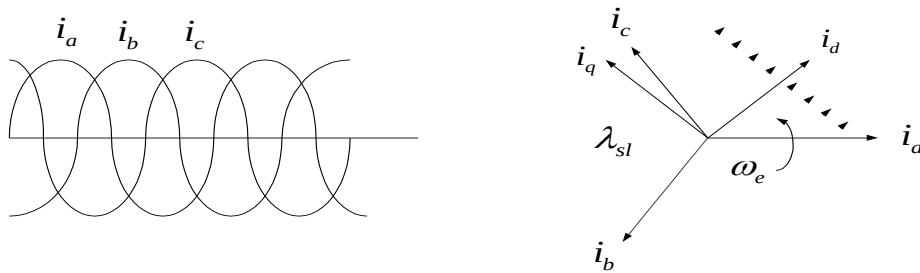
λ_{sr} = the stator flux linkage

i_r = rotor current

รูปที่ 2.65 แรงกระทำที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์เหนี่ยวนำ

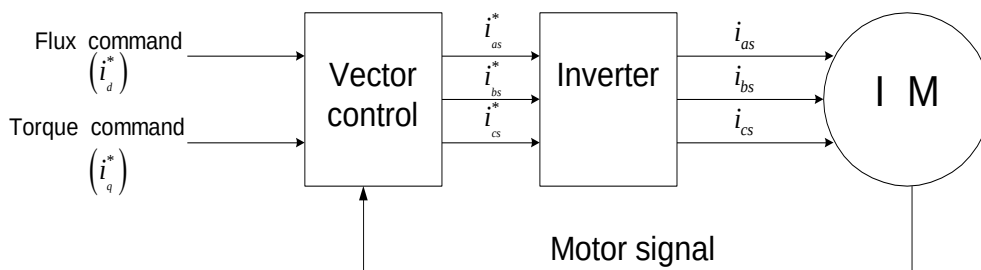
กระแสสนาม (Field current) คือกระแสที่ป้อนให้กับขดลวดสนาม ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์ และกระแสอาร์เมเจอร์ (Armature current) คือกระแสที่ป้อนให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ มีทิศตั้งฉากกับขั้วของสนามแม่เหล็กตลอดเวลา นั่นหมายถึงแรงกระทำที่เกิดขึ้นทั้งหมดบนแกนอาร์เมเจอร์เป็นแรงที่ผลักดันให้แกนอาร์เมเจอร์หมุนไป (แรงบิด) โดยไม่มีการสูญเสียไปเป็นแรงแนวอื่น นอกจากนี้โครงสร้างทางกายภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้การควบคุมกระแสทั้งสองสามารถกระทำได้อย่างอิสระต่อกัน (Decoupling control) หมายถึงสามารถกำหนดปริมาณสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมได้จากการควบคุมกระแสสนาม และในขณะเดียวกันก็สามารถเลือกขนาดของแรงบิดที่พอเหมาะกับโหลดได้จากการควบคุมกระแสอาร์เมเจอร์ ตามสมการที่ปรากฏในภาพที่ 2.65 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจึงเป็นแบบที่สามารถเลือกจุดทำงานที่ดีที่สุด ในขณะที่นั้นมอเตอร์ได้ (Optimum control) และเนื่องจากเป็นการควบคุมแรงบิดโดยตรงจากกระแสอาร์เมเจอร์ การควบคุมแรงบิดจึงให้ผลตอบแทนที่ดีทั้งช่วงการทำงานชั่วคราวและช่วงการทำงานคงตัว และให้สมรรถนะที่ดีแม้ในช่วงความเร็วต่ำ

มุมมองของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบการกระตุ้นแยกเป็นต้นแบบของแนวคิดการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ เวกเตอร์กระแส 3 เฟสที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ (a,b,c) ถูกเปลี่ยนให้เป็นเวกเตอร์กระแสในระบบ 2 แกน ซึ่งตั้งฉากกันตลอดเวลา (d,q) โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เวกเตอร์กระแสแกนหนึ่งมีทิศทางไปทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลา เรียกว่า Magnetizing current component (i_d) และเวกเตอร์กระแสอีกแกนหนึ่งมีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลาเรียกว่า Torque current component (i_q) ดังแสดงในรูปที่ 2.66 เวกเตอร์กระแสทั้งสององค์ประกอบมีความสำคัญในลักษณะเดียวกับกระแสสนาม และกระแสอาร์เมเจอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก



รูปที่ 2.66 มุมมองระหว่างกระแส i_a, i_b, i_c กับกระแส i_d, i_q

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการควบคุมแบบเวกเตอร์จะทำให้มุมมองของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นไปในลักษณะเดียวกับการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง แต่ความซับซ้อนของระบบควบคุมนั้นมีความแตกต่างกันเนื่องจากโครงสร้างของคอมมิวเตเตอร์ และแปรงถ่านของมอเตอร์กระแสตรงทำให้มุมของสนามแม่เหล็กและกระแสอาร์เมเจอร์คงที่อยู่ตลอดเวลา แต่สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำมุมของสนามแม่เหล็กจะหมุนด้วยความเร็วหนึ่ง ซึ่งแปรผันกับโหลดอยู่ตลอดเวลา ในการที่ต้องคำนวณและควบคุมขนาดพร้อม ทิศทางของเวกเตอร์กระแส (หรือแรงดัน) อยู่ตลอดเวลาตัวเอง จึงเป็นที่มาของคำว่าควบคุมแบบเวกเตอร์



รูปที่ 2.67 หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์

รูปที่ 2.67 แสดงโครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์จะรับคำสั่ง (Input command) สองประการ คือ คำสั่งสนามแม่เหล็ก (Flux command) และคำสั่งแรงบิด (Torque command) ซึ่งจะผ่านมาทางปริมาณกระแสคำสั่ง i_d^* และ i_q^* ตามลำดับ(ปริมาณที่มีสัญลักษณ์ * หมายถึง ปริมาณคำสั่ง) แล้วจึงทำการประมวลผลเพื่อทำการควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิดดังกล่าว โดยมีสัญญาณที่ป้อนกลับจากมอเตอร์ (Motor feedback signal) ซึ่งอาจจะเป็น แรงดัน กระแส และ/หรือความเร็วรอบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบว่าจะอ้างอิงอยู่กับปัจจัยใดบ้าง

สนามแม่เหล็กที่อ้างอิงถึงเพื่อเป็นสนามแม่เหล็กอ้างอิงเพื่อเป็นสนามแม่เหล็กอ้างอิงอาจจะหมายถึง สนามแม่เหล็กในโรเตอร์ (Rotor flux) สนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ (Stator flux) หรือสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ (Airgap flux) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ทำการพัฒนาระบบว่าจะจัดรูปสมการให้อ้างอิงอยู่บนแกนสนามแม่เหล็กใดโดยทั้ง 3 สนามมีความสัมพันธ์กัน การอ้างอิงสนามใดสนามหนึ่งสามารถสัมพันธ์ไปยังแรงบิดที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมโดยเลือกแกนอ้างอิงเป็นสนามโรเตอร์ สนามสเตเตอร์ หรือสนามในช่องว่างอากาศด้วยวิธีตรงหรือวิธีอ้อมวงรอบการควบคุมแบบกระแสหรือแรงดันก็ตามทั้งหมดเพื่อต้องการบรรลุวัตถุประสงค์สองประการตามหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ คือ

- 1) เพื่อควบคุมสนามแม่เหล็ก และแรงบิดให้เป็นไปตามคำสั่ง
- 2) เป็นลักษณะการควบคุมแรงบิดโดยตรง

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์จึงสามารถเลือกจุดทำงานที่ดีที่สุดในขณะที่นั้นของมอเตอร์ได้โดยให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าทั้งในช่วงทำงานชั่วคราว และช่วงการทำงานคงตัว สมรรถนะที่ดี ในช่วงความเร็วต่ำในขณะที่การเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุดในขณะนั้นอาจจะหมายถึงการประหยัดพลังงานด้วย

สรุป

การหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์

$$(\text{การวัดจริง}) \text{ ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังขาออก}}{\text{กำลังขาเข้า}} \times 100 [\%]$$

$$(\text{เชิงพาณิชย์}) \text{ ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังขาออก}}{\text{กำลังขาออก} + \text{กำลังสูญเสีย}} \times 100\% =$$

$$\frac{\text{กำลังขาเข้า} - \text{กำลังสูญเสีย}}{\text{กำลังขาเข้า}} \times 100\%$$

การอนุรักษ์พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า

ในการอนุรักษ์พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า สิ่งที่สำคัญคือต้องลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากตัวเครื่องไฟฟ้าเอง และเลือกขนาดเครื่องไฟฟ้า จำนวน และวิธีเดินเครื่องให้เหมาะสมที่สุดกับขนาดและคุณลักษณะของโหลด กล่าวคือต้องพิจารณาทั้งตัวเครื่องไฟฟ้าแต่ละเครื่องและระบบโดยรวม กำลังสูญเสียของเครื่องไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็นกำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลด และกำลังสูญเสียจากโหลด กำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดจะคงที่โดยไม่ขึ้นกับขนาดของโหลด กำลังสูญเสียจากโหลดจะเพิ่ม และลดแปรผันตามกำลังสองของกระแสโหลด โหลดที่ทำให้กำลังสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดเท่ากับกำลังสูญเสียจากโหลดจะเป็นจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

ตัวนำไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ (Type of electric conductors)

สายไฟฟ้า คือ ตัวนำกำลังไฟฟ้าจากแหล่งไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังจุดใช้ไฟฟ้า ลักษณะที่สำคัญของสายไฟฟ้าจะดูจาก ประสิทธิภาพของสายที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลสูงสุดที่แอมป์ แรง-ดันไฟฟ้าที่สายทนได้ขณะใช้งาน วัสดุตัวนำไฟฟ้าที่ใช้สายในปัจจุบันนี้ คือ ทองแดง ทั้งนี้จะผลิตสายขึ้นมาตามลักษณะของงานที่ต้องใช้

อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปิดเปิดเมื่อระบบเกิดการผิดพลาดขึ้นการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันจะทำให้โครงสร้างของระบบเปลี่ยนแปลงไปโดยทั่วไปเวลาในการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันจะเร็วกว่าอุปกรณ์ควบคุมเพื่อที่จะป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์อื่นๆ ได้อย่างทันท่วงที อุปกรณ์ป้องกันสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ 1. อุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าแรงดันสูง 2. อุปกรณ์ป้องกัน ไฟฟ้าแรงดันต่ำ

การควบคุมเฟส (Phase Control)

การควบคุมเฟส เป็นวิธีการที่ทำให้มีการเรียงกระแสในช่วงมุมต่างๆ ของวัฏจักรกำลัง (Power cycle) หรือเป็นกระบวนการที่ปิดเปิดไฟฟ้าเอซีเลี้ยววงจรไปสู่ภาระด้วยกระแสที่แปรค่าตามแต่จะต้องการโดยบังคับให้มีการนำกระแสเพียงส่วนหนึ่งของวัฏจักร วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมกำลังเฉลี่ย

ป้อนเข้าสู่ภาระ เช่น หลอดไฟฟ้า มอเตอร์ ขดลวดความร้อน ฯลฯ การควบคุมจะทำได้โดยการควบคุมมุมเฟสของคลื่นเอชทีไทรสเตอร์เปิดกระแสให้ไหลผ่านในช่วงที่เหลือนอยู่ของวัฏจักร และอาจปิดกระแสเมื่อครึ่งวัฏจักรลบได้มาถึงซึ่งเป็นวิธีการหยุดไหลตามธรรมชาติที่เรียกว่า “การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยเฟส ”

การควบคุมแรงดันด้วยวิธีตัดต่อ (Voltage control)

วิธีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอชทีด้วยวิธีการใช้วงจรสับไฟฟ้าเอชทีจะให้ผลดีกว่าการใช้วิธีการควบคุมเฟสอยู่ 2 ประการ คือ

1. ผลตอบสนองมีความเร็วสูงกว่า
2. มีฮาร์โมนิกปะปนน้อยกว่า

วงจรสับไฟฟ้าเอชทีมีข้อเสียเปรียบ คือ มีราคาลงทุนค่อนข้างสูงและมีสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุค่อนข้างสูง

ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

หมายถึงอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง มีหน่วยเป็นวัตต์ ต่อกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ มีหน่วยเป็นโวลต์-แอมป์ ซึ่งอยู่ในรูปของ $\cos \Phi$

2.9 กิจกรรม (Activity)

1. จากข้อมูลต่อไปนี้ จงคำนวณค่าใช้จ่ายในการใช้งานมอเตอร์ตลอดอายุการใช้งาน
ขนาดมอเตอร์ = 22.4 กิโลวัตต์
(ประสิทธิภาพ 92% โหลดเฉลี่ย 80% ของค่าพิกัด)

ราคามอเตอร์ = 30,000 บาท

ชั่วโมงการใช้งาน = 5,000 ชั่วโมง

ค่าพลังงานไฟฟ้า = 2.75 บาท/kWh

อัตราค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า = 305 บาทต่อกิโลวัตต์/เดือน

จงคำนวณหาค่าต่อไปนี้

ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี =

ค่าไฟฟ้ารวม =

2. บอกวิธีการประหยัดพลังงานของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. บอกหลักการวิธีการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีเวกเตอร์

4. จงหาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) ถ้ากำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้คือ 1400 kW และค่ากำลังไฟฟ้าต้านกับมีค่าเท่ากับ 1650 kVAR

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช . การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง . กรุงเทพมหานคร ; หจก. เม็ดทรายพริ้นติ้ง , 2538 .
- [2] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ . การป้องกันระบบไฟฟ้า . กรุงเทพมหานคร ; บริษัท ส.เอเชียเพรส(1989) , 2545 .
- [3] มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงและการปรับความเร็วมอเตอร์,กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน,สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ
- [4] มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง(HEM's)และตัวปรับความเร็วมอเตอร์(VSD's)ในโรงงาน แผนงานการอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทย,คู่มือประกอบการฝึกอบรม”ผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน” สำหรับในโรงงานควบคุม (F7),กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน,กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
- [5] ศุภชัย สุรินทร์วงศ์ . เครื่องกลไฟฟ้า 1 ตอน 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง. กรุงเทพมหานคร ; สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) , 2538 .
- [6] ศุภชัย สุรินทร์วงศ์ . เครื่องกลไฟฟ้า 4 เล่ม 1 อินดักชันมอเตอร์ระบบไฟ 3 เฟส. กรุงเทพมหานคร ; สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) , 2544 .
- [7] ศุภชัย สุรินทร์วงศ์ . เครื่องกลไฟฟ้า 1 ตอน 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง. กรุงเทพมหานคร ; สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) , 2538 .
- [8] มงคล ทองสงคราม . อิเล็กทรอนิกส์กำลัง .กรุงเทพมหานคร ; หจก. วี. เจ. พริ้นติ้ง , 2544 .
- [9] วิชัย คังขจันทรานนท์ . ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ . กรุงเทพมหานคร ; สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) , 2543 .
- [10] การใช้ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างประหยัด. เอกสารเผยแพร่ คู่มือการใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพ หมายเลข 9 ,กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [11] เอกสารการอนุรักษ์พลังงานของญี่ปุ่น โครงการไจก้า (JICA)