

บทที่ 2

ทฤษฎีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1.1 หลักการเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าฟาราเดย์ได้สรุปผลจากการทดลองเป็นกฎของการเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ 2 ข้อ คือ

กฎข้อที่ 1 เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงต่อตัวนำย่อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้นในตัวนำนั้น หรือตัวนำตัดกับสนามแม่เหล็ก ก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำนั้นได้

กฎข้อที่ 2 ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนั้นย่อมเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก

จากกฎของฟาราเดย์ ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนลวดตัวนำ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก โดย (กัมปนาท รตเวสสนันท์, 2004)

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

e = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (v)

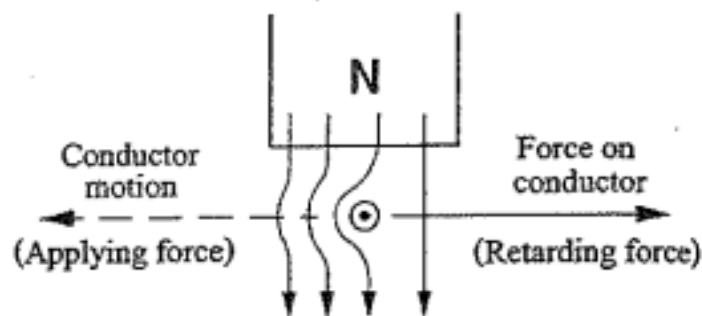
N = จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)

ϕ = เส้นแรงแม่เหล็ก (Wb)

t = เวลา (s)

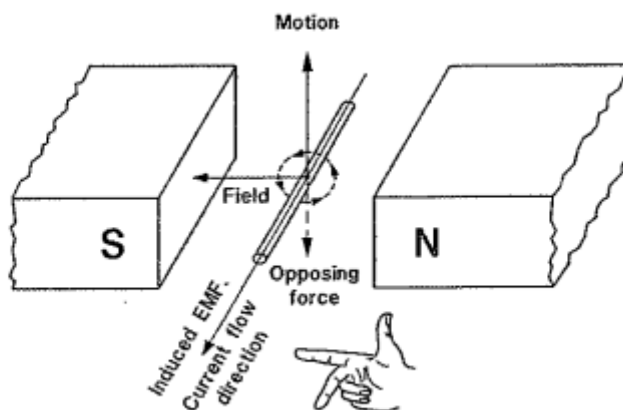
2.1.2 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Production of electromotive force)

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการคล้องของเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องลวดตัวนำ จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าบนลวดตัวนำขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงการคล้องของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังสมการ 2.1



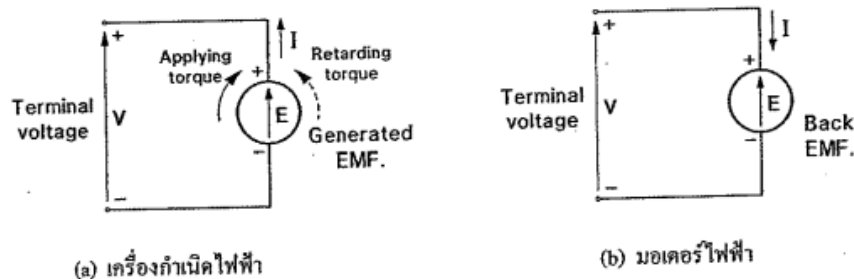
รูปที่ 2.1 หลักการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า(กัมปนาท รตเวสสันท์, 2004)

พิจารณารูปที่ 2.1 เป็นภาพแสดงภาคตัดขวางของขดลวดตัวนำที่เคลื่อนที่จากแรงภายนอก ตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือไปทางขั้วมือ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านลวดตัวนำ หากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำจะเกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงภายนอก ซึ่งทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีทิศทางพุ่งออกจากกระดาศ แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เรียกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าพลวัต



รูปที่ 2.2 ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามกฎมือขวาของเฟลมมิ่ง
(กัมปนาท รตเวสสันท์, 2004)

ทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทิศทางเคลื่อนที่ของลวดตัวนำ และทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำ สำหรับกรณีของแรงเคลื่อนไฟฟ้าพลวัตสามารถกำหนดได้โดยกฎมือขวาของเฟลมมิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.3 วงจรเปรียบเทียบอย่างง่ายของเครื่องกลไฟฟ้า (โดยอ้างอิงจาก กัปนาท รตเวสสนันท์, 2004)

การเคลื่อนที่ของลวดตัวนำด้วยแรงภายนอก (Applying force) ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากำเนิด (Generated EMF.) มีทิศทางพุ่งออกจากกระดาด และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำโดยการเชื่อมลวดตัวนำกับวงจรภายนอกให้ครบวงจร กระแสไฟฟ้านี้มีทิศทางเดียวกันกับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากำเนิด ดังรูปที่ 2.3 และทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic force) ขึ้น โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำ แรงแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะเรียกว่า “แรงหน่วง” (Retarding force) และทำให้เกิด “แรงบิดหน่วง” (Retarding torque) ขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยขนาดของแรงหน่วงหรือแรงบิดหน่วงจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดตัวนำ ดังนั้นในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายภาระเพิ่มขึ้น ส่วนที่หมุน (Rotor) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วลดลง และหากต้องการให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานด้วยความเร็วคงที่ (มีความถี่ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ) จึงต้องเพิ่มพลังงานกลให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายภาระเพิ่มขึ้น

2.2 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Efficiency of AC generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยกระบวนการเปลี่ยนพลังงานนี้ จะเกิดพลังงานสูญเสียขึ้นประกอบด้วย

1. พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานของตัวนำไฟฟ้า (ลวดทองแดงที่ใช้พัน) (Copper losses, P_{cu}) โดยพลังงานสูญเสียนี้มีค่าแปรตามกำลังสองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ ประกอบด้วยพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์ ($I_A^2 R_A$) และพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานของลวดสนาม ($I_F^2 R_F$ และ $I_S^2 R_S$) แต่เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่

สร้างขึ้นไม่ได้ใช้ขดลวดสนามในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก แต่ใช้แม่เหล็กถาวรแรงสูงแทน ดังนั้นผลจากพลังงานสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดสนามจึงไม่น่ามาคิด โดยจะคิดเฉพาะความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์เท่านั้น

2. พลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses, P_{core}) ประกอบด้วยพลังงานสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis losses) และพลังงานสูญเสียในแกนเหล็กขึ้นอยู่กับ ชนิดของแกนเหล็ก ขนาดกำลังจ่ายออก แรงดันไฟฟ้า และความถี่ไฟฟ้าหรือความเร็วของโรเตอร์ ค่าพลังงานสูญเสียในแกนเหล็กจะมีค่าแปรตามแรงดันไฟฟ้าและความเร็วของเครื่องต้นกำลัง แต่สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้น เพื่อการศึกษาเครื่องนี้ไม่ได้ใช้แกนเหล็กเป็นแกนของขดลวดตัวนำ ดังนั้นจะไม่นำผลของพลังงานสูญเสียในแกนเหล็กมาคิด

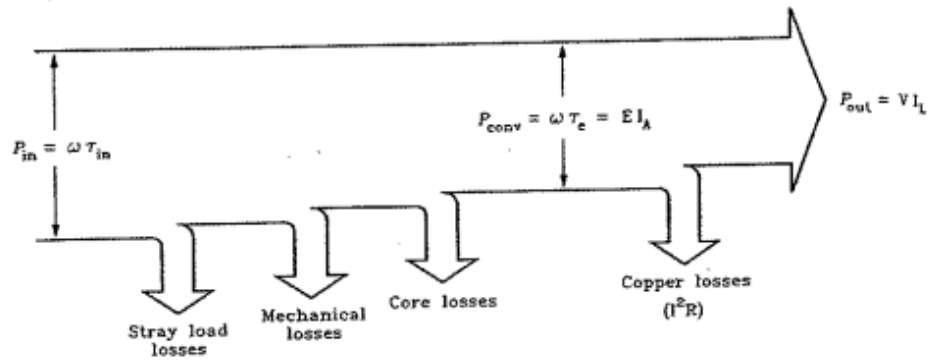
3. พลังงานสูญเสียทางกล (Mechanical losses, P_{mech}) ประกอบด้วยพลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction losses) และพลังงานสูญเสียเนื่องจากการหมุนด้านอากาศ (Windage losses) ซึ่งพลังงานสูญเสียทางกลจะมีค่าแปรตามความเร็วของเครื่องต้นกำลัง

4. พลังงานสูญเสียกระจัด (Stray load losses, P_{stray}) เป็นพลังงานสูญเสียเนื่องจากสาเหตุอื่นๆ ซึ่งพลังงานสูญเสียที่คิดคำนวณได้ยาก เช่น พลังงานสูญเสียเนื่องจากการบิดเบี้ยว (Distort) ของเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นต้น การคำนวณโดยทั่วไปมักจะไม่นำมาคิดคำนวณ โดยถือว่ามีย่าน้อยมาก

2.2.1 ผังการไหลของพลังงาน (power flow diagram)

เมื่อพิจารณาจากการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ จะพบว่าพลังงานสูญเสียต่างๆจะสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มๆ โดยระบุว่าพลังงานสูญเสียกลุ่มนั้นเกิดขึ้นก่อนกลุ่มอื่น ดังรูปที่ 4 การจัดกลุ่มพลังงานสูญเสียต่างๆ ในผังการไหลของพลังงาน ก็เพื่อให้การคำนวณประสิทธิภาพ โดยใช้ผังการไหลของพลังงาน มีความสอดคล้องกับวงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้า

ผังการไหลของพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.4 ผังการไหลของพลังงาน (power flow diagram)

(โดยอ้างอิงจาก กัมปนาท รตเวสสนันท์, 2004)

จากผังการไหลของพลังงานจะได้

$$\text{พลังงานขาเข้า } (P_{in,3\phi}) = \omega \tau_{in} \text{ (watt)} = 2\pi \frac{n}{60} \tau_{in} \text{ (watt)} \quad (2.2)$$

โดย τ_{in} เป็น ค่าแรงบิดของเครื่องต้นกำลัง มีหน่วยเป็น (N.m)

ω เป็น ความเร็วเชิงมุมของเครื่องต้นกำลัง มีหน่วยเป็น (rad/s)

n เป็น ความเร็วของเครื่องต้นกำลัง มีหน่วยเป็น (rpm)

พลังงานเปลี่ยนรูป (P_{conv}) คือ พลังงานสูญเสียจากความต้านทานของตัวนำไฟฟ้า (copper losses, $P_{c.u.}$) และพลังงานไฟฟ้าจ่ายออก (Electrical power output, P_{out}) จะได้ว่า

$$P_{conv,3\phi} = P_{out,3\phi} + P_{cu,3\phi} = 3VI \cos \theta + 3I^2 R \quad (2.3)$$

และ

$$P_{in,3\phi} = P_{conv,3\phi} + P_{mech,3\phi} + P_{core,3\phi}$$

$$P_{mech,3\phi} = P_{in,3\phi} - P_{conv,3\phi} - P_{core,3\phi} \quad (2.4)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่าเป็น (โดยอ้างอิงจาก กัมปนาท รตเวสสนันท์, 2547)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.5)$$

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.6)$$

$$\eta = \frac{3VI \cos \theta}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.7)$$

2.2.2 ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum efficiency)

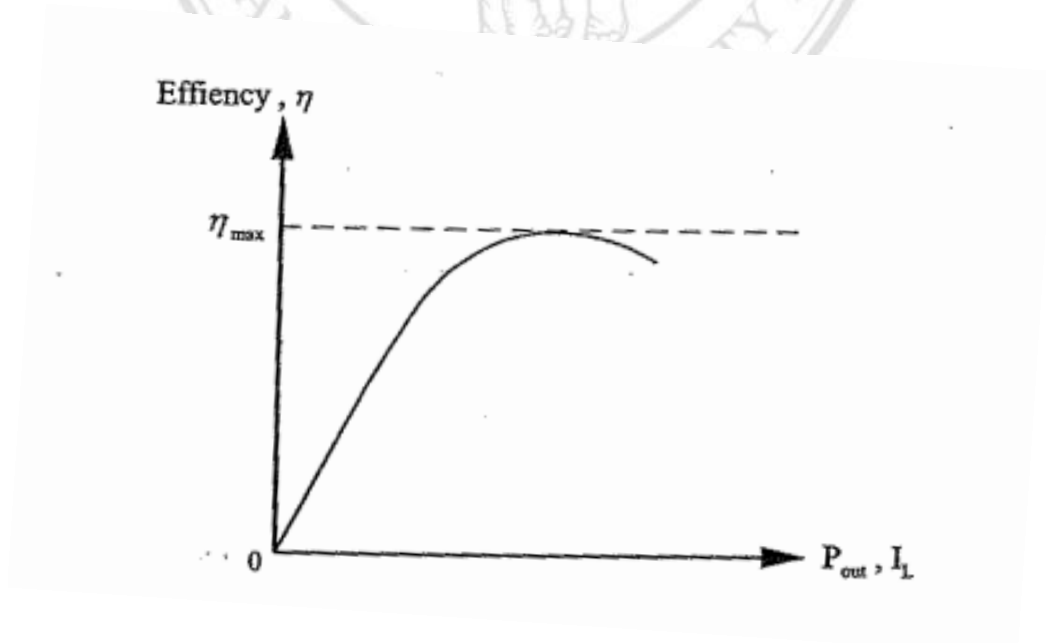
ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าพบว่าประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดในขณะที่ทำการจ่ายภาระค่าหนึ่ง หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะมีค่าลดลง พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในสถานะใช้งานหนึ่งๆ จะเป็นไปตามสมการ (กัมปนาท รตเวสสนันท์, 2004)

$$\text{Total losses} = aI^2 + bI + c \quad (2.8)$$

$$\text{Efficiency}(\eta) = \frac{\text{Output}}{\text{Output} + \text{losses}} \quad (2.9)$$

$$\text{Efficiency}(\eta) = \frac{VI \cos \theta}{VI \cos \theta + aI^2 + bI + c} \quad (2.10)$$

ประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดในกรณีที่ $\frac{d\eta}{dI} = 0$ จะได้ว่า $c = aI^2$ ดังนั้นประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นในกรณีที่พลังงานสูญเสียคงที่ (Fixed losses) มีค่าเท่ากับพลังงานสูญเสียที่แปรตามกำลังสองของกระแสไฟฟ้า (Copper losses)



รูปที่ 2.5 ประสิทธิภาพของเครื่องกลไฟฟ้า
(กัมปนาท รตเวสสนันท์, 2547)

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว ความถี่ และจำนวนขั้วแม่เหล็ก

มุมทางไฟฟ้า = มุมทางกล $\times$ จำนวนขั้วของขั้วแม่เหล็กทั้งหมด

$$e = m \times \frac{P}{2} \quad (2.11)$$

เมื่อ P เป็น จำนวนขั้วแม่เหล็กทั้งหมด

ถ้ารับความถี่ หรือ จำนวนคาบของรูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า และความเร็วของการหมุนของโรเตอร์ ดังนั้น

$$N = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (2.12)$$

เมื่อ N เป็น ความเร็วของโรเตอร์มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (rpm)

2.4 การออกแบบชุดขดลวดอาร์เมเจอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ (กัมปนาท รตเวสสันท์, 2004)

เมื่อพิจารณาจากลักษณะสำคัญของชุดขดลวดอาร์เมเจอร์ จะพบว่า

1. จำนวนองศาไฟฟ้าต่อสล็อต ($a = e/s$) จะมีค่าเป็น

$$\alpha = \frac{360^\circ \times P}{2S} \quad (2.13)$$

เมื่อ P เป็น จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole) ทั้งหมดของเครื่องกลไฟฟ้า

S เป็น จำนวนสล็อตทั้งหมดของเครื่องกลไฟฟ้า

2. จำนวนสล็อตต่อขั้วต่อเฟส จะมีค่าเป็น

$$q = \frac{S}{P \times m} \quad (2.14)$$

เมื่อ q เป็น จำนวนสล็อตต่อขั้วต่อเฟส

m เป็น จำนวนเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

3. เนื่องจากชุดขดลวดแบบชั้นเดียว ขดลวด 1 ขด จะใช้ 2 สล็อต ส่วนชุดขดลวดแบบสองชั้นขดลวด 1 ขด จะใช้ 1 สล็อต ดังนั้น

$$\text{การพันขดลวดแบบชั้นเดียว : จำนวนขดลวดต่อเฟส เท่ากับ } \frac{q \times P}{2} \quad (2.15)$$

$$\text{การพันขดลวดแบบสองชั้น : จำนวนขดลวดต่อเฟส เท่ากับ } q \times P \quad (2.16)$$

- 2.4.1 ชุดขดลวดแบบพิตช์เต็ม (Full pitch winding) ชุดขดลวดแบบนี้ช่วงกว้างขดลวด (Y_b) จะเท่ากับพิตช์ขั้วแม่เหล็ก ดังนั้น

$$\text{ช่วงกว้างขดลวด (Coil span, } Y_b) = S/P \quad (2.17)$$

- 2.4.2 ชุดขดลวดแบบเศษส่วนพิตช์ (Fractional pitch or chorded winding) ชุดขดลวดแบบนี้ช่วงกว้างขดลวด (Y_b) จะไม่เท่ากับพิตช์ขั้วแม่เหล็ก หรือไม่เท่ากับ 180° โดยแบ่งเป็นแบบพิตช์สั้นและพิตช์ยาว

2.5 ตัวประกอบชุดขดลวด (Winding factor, K_w)

ตัวประกอบชุดขดลวดประกอบด้วยตัวประกอบย่อย 2 ตัวคือ ตัวประกอบการกระจาย (Distribution factor, K_d) และตัวประกอบพิตช์ (Pitch factor, K_p) โดย

$$K_w = K_d \times K_p \quad (2.18)$$

ซึ่ง
$$K_d = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (2.19)$$

และ
$$K_p = \sin(x\pi/2) \quad (2.20)$$

2.6 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า (EMF equation)

ฟาราเดย์(Faraday) กล่าวว่า “เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กขึ้นในตัวนำจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในลวดตัวนำนั้น” โดยเป็นดังสมการ (กัมปนาท รัตเวสสนันท์, 2004)

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.21)$$

เมื่อ N เป็น จำนวนรอบของขดลวด

เนื่องจากตัวประกอบขดลวด (K_w) ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์มีค่าลดลง ดังนั้นค่า r.m.s. ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า จะมีค่าเป็น

$$E_{\text{phase}} = 4.44 f \phi_m N K_d K_p \quad (2.22)$$

โดยขดลวดอาร์เมเจอร์แบบพิทช์เต็ม (Full-pitch winding) จะมีค่า $K_p = 1$

2.7 ทฤษฎีเกี่ยวกับแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet)

2.7.1 ชนิดของแม่เหล็กถาวร แม่เหล็กถาวรในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 4 ชนิดดังนี้ (Magcraft, 2007)

- 1) Ceramic เป็นที่รู้จักในชื่อ เฟอไรต์ (Ferrite) ซึ่งประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) หรือ สตรอนเทียมคาร์บอเนต (SrCO_3) โดยมีค่าพลังงาน BH_{max} ประมาณ 3.5 MGOe ข้อดีคือ มีราคาถูก มีแรงผลักดันแม่เหล็กสูง ทนต่อการกัดกร่อน และอุณหภูมิสูง ส่วนข้อเสียคือ มีค่าพลังงานต่ำหรือค่า BH_{max} ต่ำ และความสามารถในการทนต่อแรงทางกลต่ำ
- 2) Alnico เป็นแม่เหล็กถาวรชนิดหนึ่งประกอบด้วย อะลูมิเนียม (Al) นิกเกิล (Ni) และ โคบอลต์ (Co) โดยมีค่า BH_{max} ประมาณ 5.5 MGOe ข้อดีของแม่เหล็กประเภทนี้คือ สามารถทนต่อการกัดกร่อน แรงทางกลสูง และอุณหภูมิสูงได้ ส่วนข้อเสียคือ มีราคาสูง มีค่าแรงผลักดันแม่เหล็ก (Coercive force) และมีค่าพลังงาน BH_{max} (energy product) ต่ำ
- 3) Rare Earth Magnet เป็นแม่เหล็กถาวรที่ประกอบด้วยกลุ่มธาตุหายาก คือ นีโอไดเมียม (Nd) และซามาเรียม (Sm) ในภาคส่วนเชิงพาณิชย์นั้นแม่เหล็กถาวรชนิด Rare Earth Magnet ที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายคือ Neodymium-Iron-Boron ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) และ Samarium Cobalt ($\text{SmCo}_5, \text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) ซึ่ง มีรายละเอียดดังนี้
 - 3.1) Samarium Cobalt เป็น Rare Earth Magnet ชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติทนต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน มีค่าพลังงานที่สูงกว่า Ceramic และ Alnico และสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ดีกว่า Neodymium ข้อดีของแม่เหล็กชนิดนี้คือ สามารถทนต่อการกัดกร่อน มีค่าพลังงานสูง

มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ข้อเสียคือ มีราคาแพง และทนต่อแรงทางกลได้น้อย

3.2) Neodymium Iron Boron เป็น Rare Earth Magnet ชนิดหนึ่ง มีสูตรทางเคมีคือ $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ซึ่งในปัจจุบันเป็นแม่เหล็กที่ได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เป็นแม่เหล็กที่มีค่าการให้พลังงานมากที่สุดถึง 52 MGOe และมีค่า Corrective force สูง มีความเสถียรทางความร้อนปานกลาง ในส่วนของข้อเสียคือความสามารถในการทนต่อแรงทางกล และการกัดกร่อนได้น้อย

4) Polymer Based Magnet เป็นแม่เหล็กอีกชนิดหนึ่ง โดยนำแม่เหล็กทั้งสามชนิดข้างต้นผสมกับสารพอลิเมอร์ ข้อดีคือ สามารถสร้างแม่เหล็กถาวรที่มีรูปแบบที่ซับซ้อน หรือมีรูปทรงต่างๆ ได้ แต่มีข้อเสียคือ มีค่าการให้พลังงานที่ค่อนข้างต่ำ

2.8 การคำนวณกำลังที่ได้รับจากลม

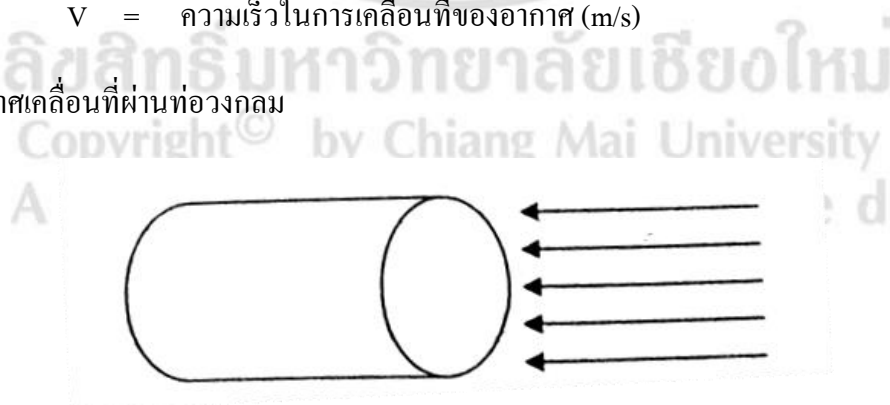
พลังงานลมอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ (Kinetic energy) (โดยอ้างอิงจาก กัปนาท รตเวสสนันท์, 2547)

$$\text{พลังงานจลน์} = \frac{1}{2} \times \text{มวลของอากาศ} \times \text{ความเร็วของอากาศ}^2 \quad (2.23)$$

โดย m = มวลของอากาศที่เคลื่อนที่ (kg)

V = ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศ (m/s)

สมมติอากาศเคลื่อนที่ผ่านท่อวงกลม



รูปที่ 2.6 มวลของอากาศเคลื่อนที่ผ่านท่อวงกลม

ซึ่งสามารถหามวลของอากาศเคลื่อนที่ผ่านท่อวงกลมในแต่ละวินาทีได้

$$\begin{aligned}\text{มวลของอากาศแต่ละวินาที} &= \text{ความหนาแน่นของอากาศ} \times \text{ปริมาตรของอากาศที่ผ่านแต่ละวินาที} \\ &= \text{ความหนาแน่นของอากาศ} \times \text{พื้นที่หน้าตัด} \times \text{ความยาวท่อที่อากาศผ่านในแต่ละวินาที} \\ &= \text{ความหนาแน่นของอากาศ} \times \text{พื้นที่หน้าตัด} \times \text{ความเร็วของอากาศ}\end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad m = \rho \times A \times V \quad (2.24)$$

จากสมการพลังงานจลน์จะได้

$$\text{Kinetic energy per second} = (\text{watt}) \quad (2.25)$$

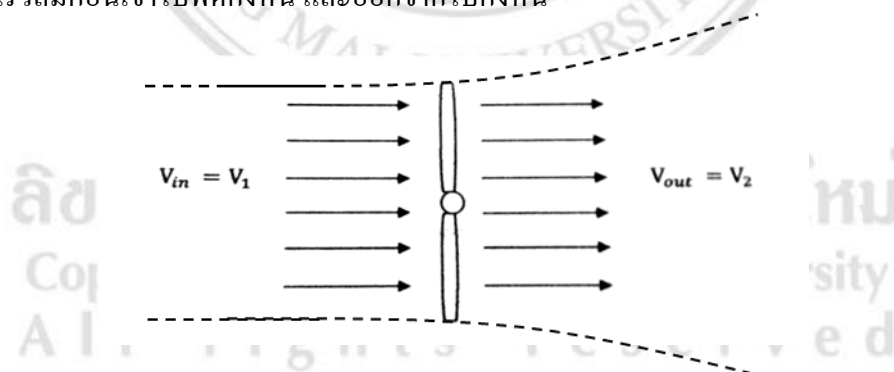
โดย : ความหนาแน่นของอากาศ (kg.m^3) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.225 kg.m^3 ที่ระดับน้ำทะเล เพราะฉะนั้นกำลังที่ได้จากลม

$$(P_w) = \frac{1}{2} \rho \times A \times V^3 \quad (\text{watt}) \quad (2.26)$$

2.9 การคำนวณกำลังที่ได้จากกังหัน (Turbine Power)

$$\text{จาก} \quad \text{พลังงานจลน์} = \frac{1}{2} \times \text{มวลของอากาศ} \times \text{ความเร็วของอากาศ}^2$$

และความเร็วลมก่อนเข้าใบพัดกังหัน และออกจากใบกังหัน



รูปที่ 2.7 ความเร็วลมก่อนเข้าใบพัดกังหัน และออกจากใบกังหัน

แทนความเร็วลม V_1 และ V_2 ลงในสมการพลังงานจลน์ จะได้

$$Pr = \frac{1}{2} \times m \times (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.27)$$

แรงที่กระทำบนใบพัด

$$F = m \times (V_1 - V_2) \quad (2.28)$$

เมื่อ m = มวลของอากาศ
 V_1 = ความเร็วลมด้านเข้าของกังหัน
 V_2 = ความเร็วลมที่ออกจากทางด้านหลังของใบพัดกังหัน

และจาก

$$Pr = F \times V_r \quad (2.29)$$

จะได้

$$Pr = \frac{1}{2} \times m \times (V_1^2 - V_2^2)$$

หรือ

$$\frac{1}{2} \times m \times (V_1^2 - V_2^2) = m \times (V_1 - V_2) \times V_T \quad (2.30)$$

$$\therefore V_T = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

จาก

$$\text{มวลของอากาศ (m)} = \rho \times A \times V$$

$$\therefore m = \rho \times A \times \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) \quad (2.31)$$

ดังนั้น กำลังที่ได้จากกังหัน (Turbine Power)

$$Pr = \frac{1}{2} \rho \times A \times (V_1^2 - V_2^2) \times \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)$$

หรือ

$$Pr = \frac{1}{2} \rho \times A \times V_1^3 \times \left(\frac{\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right) \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right)}{2} \right) \quad (2.32)$$

และ

$$\left(\frac{\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right) \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right)}{2} \right) = \text{coefficient of performance (C}_p\text{)} \quad (2.33)$$

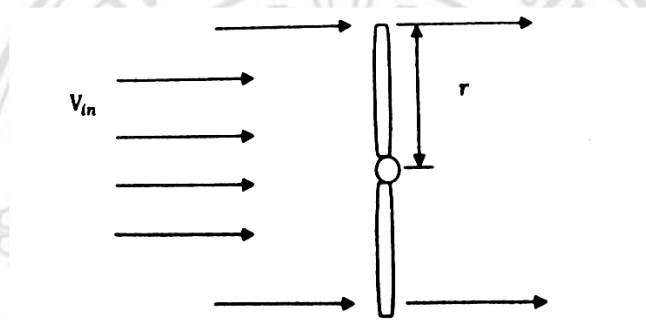
$$\therefore Pr = \frac{1}{2} \times \rho \times V_1^3 \times C_p \text{ (watt)} \quad (2.34)$$

$$\text{Maximum } C_p = 0.59$$

ในทางปฏิบัติการออกแบบ $C_{p, \text{Maximum}} = 0.5$ สำหรับความเร็วรอบสูง และเป็นแบบ 2 ใบพัด $C_p = 0.2-0.4$ สำหรับใบพัดที่มากกว่า 2 ใบ

2.10 การคำนวณความเร็วรอบของกังหันลม

จากอัตราส่วนความเร็ว ณ ปลายใบพัดเมื่อเทียบกับความเร็วลม (ลมที่พัดเข้ากังหัน): Tip speed ratio (TSR)



รูปที่ 2.8 อัตราส่วนความเร็ว ณ ปลายใบพัดเมื่อเทียบกับความเร็วลม

$$TSR = \frac{v_{Tip}}{v_{in}} = \frac{2\pi \frac{n}{60} r}{v_{in}} \quad (2.35)$$

โดย r คือ รัศมีระยะกวาดใบพัด (m)

n คือ ความเร็วรอบของกังหัน (รอบ/นาที) หรือ $n/60 =$ รอบต่อวินาที

v_{Tip} คือ ความเร็ว ณ ปลายใบพัด (m/s)

v_{in} คือ ความเร็วลมที่พัดเข้ากังหัน (m/s)

$$TSR = \frac{2\pi n r}{v_{in} \times 60}$$

$$\therefore n = \frac{v_{in} \times 60 \times TSR}{2\pi r} \quad (\text{รอบต่อวินาที}) \quad (2.36)$$

2.11 หลักการทำงานของกังหันลม

ในการทำงานของกังหันลมประเภทแกนตั้ง (VAWT) และแกนนอน (HAWT) ใช้หลักการแรงทางพลศาสตร์ ในการออกแบบสร้างใบพัดทำหน้าที่ดึงพลังงานลม แต่ทั้ง 2 แบบ อาศัยแรงในทิศทางต่างๆ กัน สำหรับกังหันลมแบบแกนนอนที่มีมุมบิดของใบพัดคงที่ (Fixed-pitch) สมมุติให้แกนของส่วนหมุนเป็นแนวเดียวกับทิศทางลมตลอดเวลา ให้ความเร็วลมและความเร็วในการหมุนคงที่ มุมปะทะที่ตำแหน่งบนใบพัดจะมีค่าคงที่ตลอดเวลาที่ใบพัดหมุนในแต่ละรอบ ในกังหันลมแบบแกนตั้ง ภายใต้สภาวะเดียวกัน มุมปะทะที่ตำแหน่งบนใบพัดจะมีค่าเปลี่ยนคงที่ตลอดเวลาที่ใบพัดหมุนในแต่ละรอบ

- 2.11.1 กังหันลมแกนนอน กังหันลมแกนนอนทำงานในลักษณะของแกนหมุนอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางลม ดังนั้นจึงเรียกว่า อุปกรณ์ไหลในแนวแกน (Axial flow device) แกนหมุนจะอยู่ในทิศทางของลม โดยการใช้อุปกรณ์ปรับมุมเอียง (Yawing mechanism) เพื่อให้ใบพัดของกังหันลมอยู่ในทิศทางลมตลอดเวลา สมรรถนะของใบพัดกังหันลมแบบแกนนอนขึ้นอยู่กับ จำนวนและรูปร่างของใบพัด ลักษณะพื้นที่หน้าตัดของใบพัด ได้แก่ ความยาว Chord มุมลมสัมพันธ์ มุมเอียงตลอดความยาวของใบ และลักษณะการบิดระหว่างที่จุดต้นใบกับปลายใบ
- 2.11.2 กังหันลมแกนตั้ง กังหันลมแกนตั้งสมัยใหม่จะต่างกับกังหันลมแบบแกนนอน กังหันลมแบบแกนตั้งเป็นอุปกรณ์ประเภทไหลตัดแนวแกน (Cross flow device) หมายความว่าทิศทางของลมที่ราบเรียบเข้าปะทะกังหันเป็นมุมตั้งฉากกับแนวแกนหมุนของแกน ดังนั้นอากาศจะเคลื่อนที่ตัดแกนในการหมุนของใบพัด การกวาดเป็นไปในลักษณะที่มีพื้นที่สัมผัสแบบสามด้าน ซึ่งต่างกับใบพัดของกังหันลมแบบแกนนอน ที่มีแนวในการกวาดแนวเดียว ในส่วนต่างของกังหันลมแกนตั้งสมัยใหม่ ใบพัดของกังหันลมสมัยใหม่พลังงานที่ดึงจากลมเกือบทั้งหมดที่ผ่านด้านหน้าและด้านหลัง (สัมพันธ์กับทิศทางลมในปริมาตรที่กวาด)

เมื่อใบพัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าลมมากๆ มุมปะทะที่สังเกตจากความเร็วมสัมพันธ์ถึงแม้ว่าจะมีค่าต่ำ แต่เพียงพอที่จะทำให้ใบพัดของกังหันรับแรงทางพลศาสตร์ไว้ได้ ซึ่งทำให้เกิดแรงขับในแนวเส้นสัมผัสรอบวง และเกิดแรงบิดที่ส่วนหมุน

กังหันลมแกนตั้งจะทำงานได้กับลมทุกทิศทาง แต่สมมุติว่าในตอนเริ่มแรกลมจะต้องเคลื่อนที่ผ่านในทิศใดทิศหนึ่งโดยเฉพาะ และต้องปรับมุมของใบพัด คือให้แนว chord อยู่ในแนวเส้นสัมผัสวง

ในการเคลื่อนที่ของใบพัด จากนั้นมุมของใบพัดที่กระทำต่อทิศทางลมจะเปลี่ยนจาก 0-360 องศาในแต่ละรอบการหมุน ถ้าให้มุมปะทะของลมที่กระทำต่อใบพัดจะเปลี่ยนแปลงตามมุมดังกล่าว ซึ่งเป็นการยากที่กังหันลมแบบแกนตั้งจะทำงานในลักษณะดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามลักษณะดังกล่าวสามารถทำให้เกิดขึ้นได้เมื่อใบของกังหันเคลื่อนที่ มุมลมสัมพัทธ์ที่ใบกังหันเป็นผลมาจากลมความเร็ว V_1 ที่ส่วนหมุนและความเร็วของใบพัด v ซึ่งมีเพียงพอที่จะทำให้ใบพัดเคลื่อนที่เร็วขึ้น โดยสัมพันธ์กับความเร็วม (ในทางปฏิบัติจะเท่ากับ 3 เท่าของอัตราส่วนความเร็วปลายใบ หรือมากกว่า) มุมปะทะของใบพัดจะกระทำกับความเร็วมสัมพัทธ์ จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

2.12 ความเร็วลมระดับต่างๆที่มีผลต่อกังหัน

ความเร็วลมจากธรรมชาติจะแรงหรืออ่อนเราใช้หน่วยวัดความเร็วลมหลายอย่าง เช่น วัดเป็นไมล์ต่อชั่วโมง (Miles/Hour) และสามารถคำนวณเป็น ฟุตต่อวินาที (Foot/Second) หรือวัดเป็นกิโลเมตรต่อชั่วโมง (Kilometer per Hour) และสามารถคำนวณลงมาเป็น เมตรต่อวินาที (Meter per Second) โดยการคำนวณนี้ ความเร็วลม กิโลเมตรต่อชั่วโมง คูณด้วย 1000 ให้กลายเป็นเมตรต่อชั่วโมง เมื่อหารด้วย 60 จะได้เป็นเมตรต่อวินาที และหารด้วย 60 อีกครั้งเพื่อให้เป็น เมตรต่อวินาที

ความเร็วลมระดับที่กังหันลมเริ่มหมุนออกตัวเรียกว่า ความเร็วลมเริ่มต้น (Starting Wind Speed) เนื่องจากระบบมีความฝืด (Friction) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรอาจมีแรงหนืด (Cogging Force) บางครั้งอาจทำให้เกิดระบบสตาร์ทได้ยากขึ้น (ความเร็วลมประมาณ 3-3.5 เมตรต่อวินาที)

ความเร็วลมระดับที่กังหันลมสามารถเริ่มต้นทำงานและผลิตไฟฟ้าได้เรียกว่า ความเร็วลมเข้าระบบ (Cut-in Wind Speed) แต่ในขณะนี้อาจมีกำลังน้อยหรือยังไม่ได้กำลังเลย (ความเร็วลมประมาณ 3.5-4 เมตรต่อวินาที)

ความเร็วลมระดับที่จ่ายกำลังได้เต็มพิกัดอย่างต่อเนื่องเรียกว่า ความเร็วลมเต็มพิกัด (Rated Wind Speed) นี่ก็จุดที่กังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ถูกออกแบบและทดสอบมา (ความเร็วลมประมาณ 10-12 เมตรต่อวินาที)

ความเร็วลมระดับสูงอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้จำเป็นต้องหยุดการทำงานเรียกว่า ความเร็วลมตัดออก (Cut-out Wind Speed) การทำเช่นนี้เพื่อความปลอดภัยของระบบ (ความเร็วลมประมาณ 15 เมตรต่อวินาที)

ความเร็วลมระดับสูงสุดเท่าที่กังหันลมสามารถทนอยู่ได้ เรียกว่า ความเร็วลมสูงสุด (Maximum Wind Speed) ที่ความเร็วลมระดับนี้ ใบพัดของกังหันลมต้องออกแบบให้หลบลม เพื่อป้องกันความเสียหาย (ความเร็วลมประมาณ 20 เมตรต่อวินาที)

2.13 ข้อเปรียบเทียบกังหันลมแบบแกนนอนและกังหันลมแบบแกนตั้ง

2.13.1 ข้อดีของกังหันลมแบบแกนนอน

- 1) แรงบิดที่ได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ
- 2) สามารถสร้างใบพัดให้ได้เปรียบทางกลศาสตร์ได้ง่าย
- 3) ใช้พลังงานลมต่ำ
- 4) ทำงานที่รอบต่ำ
- 5) ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูง
- 6) มีเสถียรภาพในการติดตั้งกังหันขนาดเล็กกว่ากังหันลมแบบตั้ง
- 7) สามารถขยายให้มีขนาดใหญ่เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตได้

2.13.2 ข้อเสียของกังหันลมแบบแกนนอน

- 1) ต้องตั้งเสาสูงและขึ้นอยู่กับสภาพลม ณ พื้นที่นั้นๆ
- 2) การควบคุมหรือการบำรุงรักษานั้นทำได้ยาก เนื่องจากการติดตั้งบนเสาสูง

2.13.3 ข้อดีของกังหันลมแบบแกนตั้ง

- 1) ใช้พลังงานลมต่ำ
- 2) ทำงานที่รอบต่ำ
- 3) ติดตั้งง่ายไม่ต้องตั้งเสาสูง สามารถติดตั้งกับพื้นดินทั่วไปก็ทำงานได้
- 4) สามารถรับลมได้ทุกทิศทางโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมให้หันเข้าหาลม
- 5) การควบคุมอุปกรณ์ต่างๆทำได้ง่ายและสามารถติดตั้งกับพื้นดินได้

2.13.4 ข้อเสียของกังหันลมแบบแกนตั้ง

- 1) ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานต่ำ
- 2) เสาที่ติดตั้งต้องมีขนาดใหญ่ (ใหญ่กว่าตัวกังหันประมาณ 1 เท่าตัวขึ้นไป)
- 3) มีข้อจำกัดในการขยายให้มีขนาดใหญ่ และการยกชุดใบพัดเพื่อรับลม

ดังนั้นกัณฑ์ลบบแบบแกนนั้การพัฒนาลงในวงจำกัด และมีความไม่ต่อเนื่อง ปัจจุบันมีการใช้งานกัณฑ์ลบบแบบแกนนั้ส่วนมาก ส่วนกัณฑ์ลบบแบบแกนนอน โดยเฉพาะชนิด 3 โปลได้รับการพัฒนาลงต่อเนื่อง และมีการใช้งานมากที่สุด

2.14 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่แบบ ตะกั่ว-น้ำกรด เก็บและคายพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง ตะกั่วและน้ำกรด แผ่นที่ให้ออกแรง ทำจากตะกั่วเพอร์ออกไซด์ (LEAD PEROXIDE) ส่วนแผ่นลบ ทำจากตะกั่วเนื้อพรุน เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำกรดได้มาก แลอยู่ในกรดกำมะถันเจือจาง (H_2SO_4) เมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้ให้ปล่อยกระแสไฟฟ้ากรดกำมะถันเจือจางก็จะแตกตัวเป็นไอออนทำปฏิกิริยากับ ตะกั่ว แผ่นตะกั่วจะกลายเป็นตะกั่วซัลเฟตทั้งด้านขั้วบวกและขั้วลบ ออกซิเจนจากตะกั่ว เพอร์ออกไซด์ของแผ่นบวกทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในกรดกำมะถัน ได้น้ำมาส่วนหนึ่ง ประกอบกับ SO_4 ในน้ำกรด ที่ไปจับกับแผ่นตะกั่วซัลเฟต ทำให้กรดกำมะถันเจือจางลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเหลือ แต่ส่วนที่เป็นน้ำ นั่นหมายความว่าแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าจนหมดแล้ว ตอนแบตเตอรี่ถูกอัดไฟ ปฏิกิริยาทางเคมีนี้จะกลับสู่ทิศทางเดิม หมายถึงแบตเตอรี่มีประจุไฟฟ้าเต็มที่แล้ว และความเข้มข้น ของน้ำกรดกำมะถันในแบตเตอรี่ จึงเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีว่าแบตเตอรี่มีประจุหรือพลังงานไฟฟ้ามากน้อย เพียงใด ความเข้มของน้ำกรดวัดได้โดยใช้ไฮโดรมิเตอร์แบบกลุ่ลอย วัดความถ่วงจำเพาะของน้ำกรด

2.14.1 การกำหนดความจุของแบตเตอรี่ใช้วิธีบอกความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้า แบบดั้งเดิม โดยใช้วิธีหาค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายให้ได้ 20 ชั่วโมงแล้วประจุไฟฟ้าหมดพอดี คือ เหลือแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อเซลล์เพียง 1.75 V เช่นแบตเตอรี่แบบ 12 V (16 เซลล์) ก็จะเหลือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพียง 10.5 V ยกตัวอย่าง ถ้าแบตเตอรี่ลูกหนึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 2 A ตลอด 20 ชั่วโมง แล้ว แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองเหลือ 10.5 V พอดี ก็จะเอากระแสไฟฟ้าคูณด้วย เวลาเป็นชั่วโมง คือ 2 คูณ 20 ได้ 40 แอมแปร์ชั่วโมง หรือ 40 Ah ซึ่งบ่งไว้ข้าง แบตเตอรี่ วิธีวัดมาตรฐานนี้ เป็นแบบจ่ายกระแสน้อยในเวลานานมาก

2.14.2 วิธีการชาร์ตแบตเตอรี่

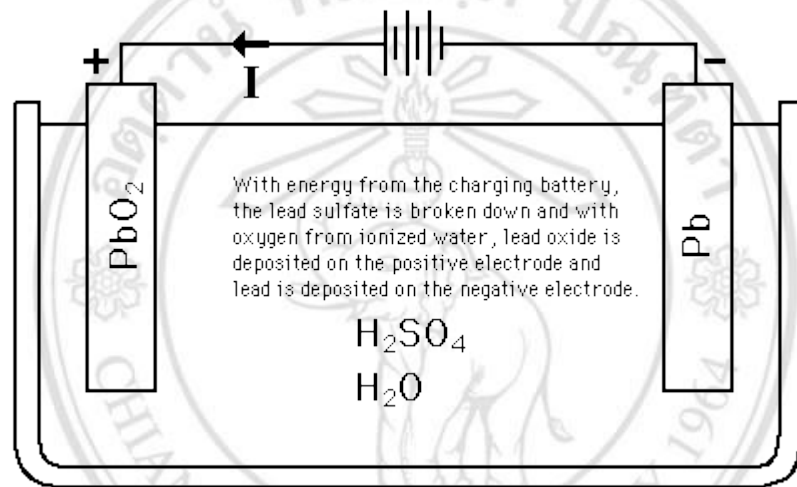
- 1) การประจุทีละน้อย (Trickle Recharge) ถ้ากระแสไฟฟ้าในวงจรถูกรักษาไว้ ที่อัตราเท่ากับ $C/10$ (10% ของความจุ) แล้ว เซลล์หมดประจุอย่างสมบูรณ์ สามารถประจุได้ภายใน 10 ชั่วโมง (ในความเป็นจริงจะใช้เวลามากกว่า 10 ชั่วโมง) การประจุทีละน้อยด้วยอัตราขนาดนี้สามารถประจุทิ้งไว้ค้างคืนได้

ประโยชน์อีกข้อหนึ่งของการประจุเซลล์ด้วยอัตราขนาดนี้คือ ถึงแม้ว่าเซลล์จะถูกประจุเต็มแล้วก็ตาม ก็ไม่จำเป็นต้องนำเซลล์ออก เนื่องจากถ้ายังประจุต่อไปก็จะไม่ทำความเสียหายให้แก่เซลล์ เนื่องจากก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่ขั้วบวกจะรวมตัวกับขั้วลบ จึงเป็นการประจุเซลล์โดยไม่มีข้อจำกัด ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่เซลล์ ยกตัวอย่างเช่น เซลล์มีขนาดความจุ 500 มิลลิแอมป์-ชั่วโมง ถ้าประจุด้วยอัตรา C/10 ก็เท่ากับ 10% ของความจุ คือ 50 มิลลิแอมป์-ชั่วโมง

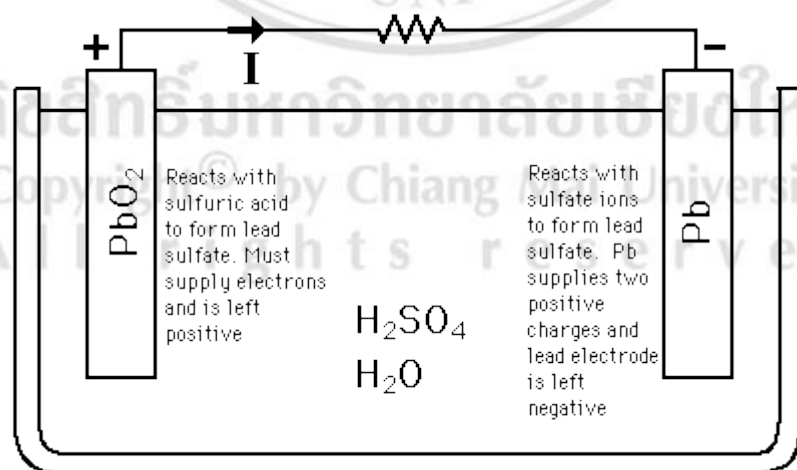
- 2) การประจุอย่างรวดเร็ว (Fast Recharge) เซลล์แบบนิแคดนี้สามารถประจุด้วยอัตราที่สูงกว่าได้ เช่นด้วยอัตรา C/3 (33% ของความจุ) ถึง C/5 (20% ของความจุ) โดยจะต้องเตรียมการตัดการประจุ เมื่อเซลล์ที่ได้รับการประจุจนเต็มแล้ว ซึ่งสามารถทำได้โดยอัตโนมัติ โดยใช้วงจรตรวจจับแรงดัน ซึ่งจะตัดกระแสที่ใช้ในการประจุออก เมื่อแรงดันของเซลล์เพิ่มขึ้นเกินกว่าค่าปัจจุบัน โดยวิธีการนี้จะสามารถใช้ได้เฉพาะ ถ้าสามารถวัดความดันได้อย่างเที่ยงตรงและว่องไว สามารถตัดกระแสที่ใช้ประจุออกก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้น ปัญหาในการใช้การประจุแบบนี้คือ ถ้ากระแสที่ใช้ในการประจุมีค่าสูงๆ ไม่ได้ถูกตัดออกอย่างทันที เมื่อเซลล์ได้รับการประจุจนเต็มแล้ว ก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นมากเกินไปจากขั้วลบในปริมาณที่เพียงพอ ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเซลล์จะระบายก๊าซออกซิเจนออกโดยที่รูระบายที่ปิดไว้จะเปิดออกและปล่อยก๊าซออกซิเจนกับอิเล็กโทรไลต์บางส่วนออกมา เนื่องจากเมื่ออิเล็กโทรไลต์สูญเสียออกมาจากเซลล์แล้ว เซลล์นั้นจะมีประจุน้อยลงตลอดไป

- 3) การประจุอย่างเร่งด่วน (Super-Fast Recharge) มีบางกรณีที่ใช้ต้องการที่จะประจุเซลล์ภายในเวลาเพียง 2-3 นาที ยกตัวอย่างเช่น เครื่องบินเล็กที่ใช้แบตเตอรี่เป็นตัวจ่ายกำลังจะต้องการประจุเซลล์ทั้งหมดประจุ เพื่อจะนำเครื่องบินนี้ บินขึ้นสู่อากาศอีกครั้ง โดยเร็วที่สุด ซึ่งสามารถทำได้ด้วยอัตราประจุ 4 เท่าของความจุ หรือมากกว่า โดยใช้วิธีการดังต่อไปนี้ คือวัดแรงดันของเซลล์และตัดกระแสที่ใช้ประจุออกเมื่อแรงดันของเซลล์ขึ้นสูงถึงค่าที่ตั้งไว้ อย่างไรก็ตามมีวิธีการที่ง่ายกว่าและเที่ยงตรงกว่า โดยจากหลักความเป็นจริงที่ว่าเซลล์ได้หมดประจุอย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะพยายามประจุใหม่ ให้ประจุไฟฟ้าเข้าโดยกำหนดค่า กระแสประจุคงที่ไว้ใช้เวลาในการ

ประจุตามความต้องการ เช่นหลังจากเซลล์หมดประจุแล้ว กระแสที่ใช้ในการประจุขนาด 3C (3 เท่าของความจุ) จะถูกป้อนเป็นเวลา 20 นาทีหรือใช้กระแสในการประจุเป็น 5C (5 เท่าของความจุ) ป้อนเข้าเป็นเวลา 12 นาทีเป็นต้น แม้ว่าวิธีการนี้จะเป็นการที่ดี เช่น สำหรับนักเรียนเครื่องบินจำลอง ที่มีเพียงแหล่งจ่ายไฟเป็นเพียงแบตเตอรี่รถยนต์ก็ตาม ก็เป็นสิ่งที่ควรระวังด้วย เนื่องจากการประจุมากเกินไปเพียง 2-3 นาที อาจทำให้เกิดการรั่วของเซลล์ได้ กล่าวย่อๆคือ เมื่อจะใช้วิธีการนี้เซลล์จะต้องหมดประจุอย่างเต็มที่ และใช้กระแสในการประจุที่เป็นระยะเวลาที่ถูกต้องประจุกลับเข้าใหม่



รูปที่ 2.9 การประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ (HyperPhysics, 2014)



รูปที่ 2.10 การจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดของแบตเตอรี่ (HyperPhysics, 2014)

การประจุเซลล์แบบตะกั่ว-น้ำกรดนั้น สามารถทำได้ง่ายๆ โดยการป้อนกระแสกลับทางเข้าไปในแบตเตอรี่ เพื่อบังคับให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดจากทางขวามือไปทางซ้ายมือ ซึ่งจะเปลี่ยนตะกั่ว

เซลล์ไฟฟ้าให้กลับเป็นตะกั่วกำมะถันตามเดิม วิธีการที่ง่ายที่สุดในการป้อนกระแสกลับทางก็โดยการต่อ ขั้วคาโทด (ขั้วบวก) และขั้วแอโนด (ขั้วลบ) เข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก แรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกนี้จะอยู่ในช่วง 1.1- 1.25 เท่าของแรงดันของเซลล์โดยปกติ ดังนั้น เซลล์แบบนี้เซลล์เดียว ซึ่งมีแรงดันปกติ 2 V สามารถที่จะประจุเข้าด้วยแรงดันระหว่าง 2.2 V- 2.5 V ตัวอย่างที่เห็นได้ง่ายๆคือ แบตเตอรี่รถยนต์ ซึ่งแรงดันปกติเท่ากับ 12 V เนื่องจากประกอบด้วย 6 เซลล์ ต่ออนุกรมกัน จะถูกประจุโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือไดนาโมและผ่านชุดรักษาระดับแรงดันให้เป็น ไฟตรงมีค่าแรงดันคงที่ที่ 14 V

กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปเมื่อประจุไฟใหม่นั้นขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนเข้าไป นอกจากนั้นยัง ขึ้นอยู่กับสถานะของเซลล์ว่าคายประจุหมดเต็มที่แล้วหรือไม่ ถ้าแรงดันป้อนเข้าประจุมีค่าสูงและคาย ประจุเต็มที่แล้ว จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าประจุเซลล์มีค่ามากตามไปด้วย หรือถ้าเซลล์ถูกใช้ แบบเป็นวงจร (cycle) คือจากสถานะประจุเต็มไปสู่สถานะประจุหมดเต็มที่แล้วจึงค่อยประจุใหม่อีก ครั้ง จะใช้กระแสไฟฟ้าในการประจุมากขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าเซลล์ถูกใช้งานพร้อมกับประจุเข้า ตลอดเวลา เช่นในแบตเตอรี่รถยนต์แล้ว กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุจะมีค่าต่ำ ซึ่งเป็นเหตุผลว่า ทำไมแบตเตอรี่รถยนต์ขนาด 12 V จึงใช้แรงดันในการประจุเพียง 14 V ซึ่งประมาณ 1.7 เท่าของ แรงดันปกติของแบตเตอรี่

2.14.3 สาเหตุที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมจากการประจุกระแสไฟฟ้ามากเกินไป ทำให้เกิดผลเสีย ดังนี้

- 1) ทำให้เกิดการสึกกร่อนของตะแกรงแผ่นบวกและเกิดแก๊สขึ้น เกิดการ สูญเสียที่เก็บประจุไฟ โดยเฉพาะในแผ่นขั้วบวก
- 2) อุณหภูมิของแบตเตอรี่สูง ในบางกรณีอุณหภูมิจะถึงจุดที่ร้อนเกินขนาด ซึ่ง ผลของอุณหภูมิที่สูงเกินขนาดจะทำลายแผ่นตะกั่วทั้งแผ่นขั้วบวกและขั้วลบ รวมไปถึงแผ่นกั้นด้วย
- 3) ในบางครั้งทำให้แผ่นตะกั่วเกิดการโค้งงอ น้ำยาอิเล็กโทรไลต์แปรสภาพ เป็นแก๊ส และสูญเสียระดับน้ำของน้ำยา อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง

2.14.4 การประจุกระแสไฟฟ้าน้อยเกินไป

การที่ทราบว่าแบตเตอรี่ที่ประจุไฟเพียงพอหรือไม่ มีหลักการสังเกตดังนี้

- 1) เมื่อใช้ไฮดรอมิเตอร์วัดความถ่วงจำเพาะของน้ำยา ปรากฏว่าค่า ถ.พ.ต่ำและสีของแผ่นตะกั่วอาจพลเสียที่เกิดขึ้นคือเกิดตะกอนขาวที่ส่วนล่างของหม้อแบตเตอรี่ ถ้ามีมากจะทำให้เกิดการลัดวงจรได้ง่าย แผ่นตะกั่วจะเกิดการโค้งงอ
- 2) การลัดวงจรภายในแบตเตอรี่ สาเหตุของการลัดวงจรอาจเกิดจากการแตกหักของแผ่นกั้นระหว่างแผ่นขั้วบวกกับแผ่นขั้วลบ หรืออาจเกิดตะกอนขาวที่อยู่ส่วนล่างของหม้อแบตเตอรี่ เมื่อมีมากเกินไปสามารถตรวจสอบว่าแบตเตอรี่มีการลัดวงจรหรือไม่ดังนี้
 - ใช้ไฮดรอมิเตอร์วัดความถ่วงจำเพาะ ของทุกๆช่องเซลล์ ว่ามีความถ่วงจำเพาะเท่ากันหรือไม่ ถ้าหากมีค่าความถ่วงจำเพาะของช่องใดช่องหนึ่งต่ำกว่าช่องอื่นอย่างผิดปกติ อาจเป็นไปได้ว่าเกิดการลัดวงจร
 - นำแบตเตอรี่ไปทำการประจุไฟให้เพียงพอ แล้วตรวจดูค่าความถ่วงจำเพาะใหม่ ถ้าหากยังมีค่าต่ำกว่าช่องอื่นอยู่ก็อาจเกิดการลัดวงจรในช่องนั้น
 - ถ้ามีการเกิดการลัดวงจรขึ้น จะเกิดการสูญเสียปริมาณไฟอย่างรวดเร็ว นำโวลต์มิเตอร์ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ ถ้าเกิดการลัดวงจร ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์นั้นจะต่ำกว่าช่องอื่น

2.14.5 ข้อควรระวังในการใช้งานและการบำรุงรักษาแบตเตอรี่

- 1) ไม่ควรทำการประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ ด้วยขนาดกระแสที่มากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นสูงในแบตเตอรี่ เป็นเหตุให้น้ำยาอิเล็กโทรไลต์กลายเป็นไอ และเกิดแก๊สไฮโดรเจนมาก เกิดปฏิกิริยาทางเคมีอย่างรุนแรง ทำให้แผ่นตะกั่วเกิดการบิดงอและสารที่เคลือบไว้หลุดหรือเปลือกของแบตเตอรี่อาจเกิดความเสียหาย
- 2) ไม่ควรปล่อยให้แบตเตอรี่คายประจุมาจนหมด เพราะจะเกิดเกลือกำมะถัน (คราบซัลเฟต) ไปจับที่แผ่นตะกั่ว ทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง และการแก้ไขให้คืนสู่สภาพปกติเป็นไปได้ยาก

- 3) ระวังรักษาขั้วแบตเตอรี่ให้สะอาดและแน่นอยู่เสมอ หากมีเกลือก่อกำมะถันจับอยู่ที่ขั้วให้ใช้น้ำร้อนทำความสะอาด และควรเคลื่อนขั้วแบตเตอรี่ไว้ด้วยจารบีเพื่อป้องกันการสึกกร่อน
- 4) ทำการตรวจสอบความถ่วงจำเพาะตามระยะเวลา (1 หรือ 2 สัปดาห์ต่อครั้ง) และรักษาระดับน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ อยู่เหนือแผ่นตะกั่ว 10-15 mm. เสมอ หากทิ้งไว้ให้แผ่นตะกั่วแห้งเป็นเวลานาน จะทำให้ประสิทธิภาพของแผ่นตะกั่วเสื่อมลง ทำให้ความจุของแบตเตอรี่จะลดลงด้วย หากน้ำยาพร่องให้เติมด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์
- 5) ไม่ควรปล่อยให้แบตเตอรี่มีการคายประจุ ด้วยกระแสไฟจำนวนมากเป็นเวลานานติดต่อกัน เช่น ทำการสตาร์ทเครื่องเป็นเวลานานเกิน 10 วินาที หากเครื่องยนต์ไม่ติดให้ทิ้งช่วงเวลาไว้ประมาณ 30 วินาที จึงทำการสตาร์ทใหม่อีกครั้ง ทั้งนี้เพื่อให้แบตเตอรี่มีเวลาปรับตัวคืนสภาพ
- 6) ไม่ควรให้เกิดประกายไฟ หรือนำเปลวไฟเข้ามาใกล้แบตเตอรี่ในขณะที่ทำการประจุกระแสไฟฟ้าเนื่องจากในขณะที่ทำการประจุ จะมีแก๊สไฮโดรเจนขึ้น แก๊สไฮโดรเจนนี้เป็นสารไวไฟหากมีประกายไฟจะทำให้เกิดการระเบิด
- 7) เมื่อไม่ได้ใช้งานแบตเตอรี่เป็นเวลานานๆ ให้ปลดขั้วแบตเตอรี่ออก และนำแบตเตอรี่ไปทำการประจุกระแสไฟฟ้าให้เต็มทุกๆ 2 สัปดาห์ เพื่อป้องกันไม่ให้แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพ
- 8) แบตเตอรี่ใหม่ที่ยังไม่มีการเติมน้ำยาอิเล็กโทรไลต์มา เมื่อจะทำการประจุกระแสไฟฟ้า ให้เติมน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ แล้วทิ้งไว้ประมาณ 3-5 ชั่วโมง เพื่อให้แผ่นตะกั่วได้อาบน้ำยาจนอิ่มตัว แล้วจึงทำการประจุกระแสไฟฟ้าประมาณ 3-5 แอมแปร์ (หรือ 1 ใน 10 ของความจุ) เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 8 ชั่วโมง

2.15 เครื่องควบคุมการประจุ (Charge controller)

เครื่องควบคุมการประจุ นั่นก็คือ ประจุกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมลงในแบตเตอรี่จนเต็มและควบคุมไม่ให้ประจุกระแสไฟฟ้ามากเกินไปด้วยการเบี่ยงเบนไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ เมื่อมีการประจุกระแสไฟฟ้าจนเต็ม ถ้าไม่มีเครื่องควบคุมการประจุเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมอาจประจุ

กระแสไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่มากเกินไป (Overcharge) จะทำให้แบตเตอรี่เกิดการสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความร้อนและเกิดความเสียหายได้

ปัจจุบันนี้การผลิตเครื่องควบคุมการประจุรวมฟังก์ชันพิเศษๆเข้าไว้มากมายเพื่อให้การใช้งานมีประสิทธิภาพที่สุดซึ่งเอื้อประโยชน์ต่อการใช้งานอย่างยิ่ง เช่น Low Voltage Disconnect (LVD) ช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับแบตเตอรี่และอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยจะปิดสวิตช์อุปกรณ์ไฟฟ้า กระแสไฟตรงที่ต่อเชื่อม หากแรงดันของแบตเตอรี่ต่ำลงในระดับที่เป็นอันตรายต่อแบตเตอรี่ Maximum Power Point Tracking (MPPT) เป็นกระบวนการที่ทำให้เครื่องควบคุมการประจุดึงพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมได้มากที่สุดเพื่อประจุลงแบตเตอรี่ โดยไม่คำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่รวมถึง Battery Temperature Compensation (BTC) จะปรับอัตราการประจุแบตเตอรี่ตามอุณหภูมิของแบตเตอรี่ ซึ่งเหมาะสมและจำเป็นอย่างยิ่งต่อประเทศที่สภาพอากาศหนาวเย็น

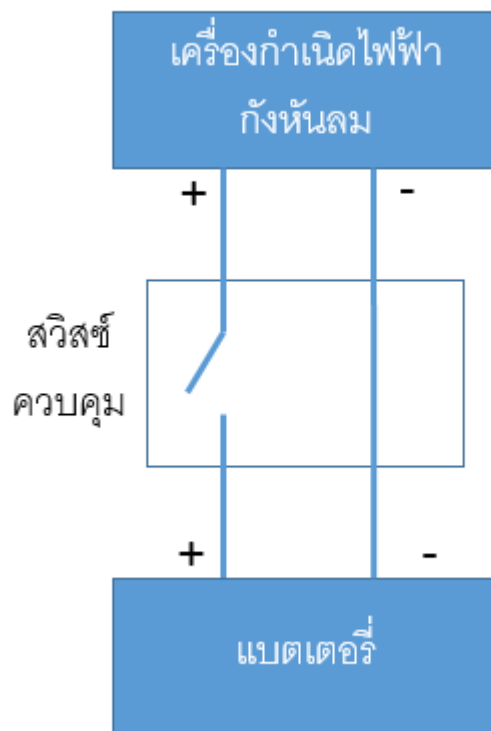
2.15.1 การทำงานของเครื่องควบคุมการประจุ

หลักการทำงานของเครื่องควบคุมการประจุคือมีวงจรสำหรับตรวจวัดแรงดันของแบตเตอรี่อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งทำงานเป็นสวิตช์เบี่ยงเบนไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เมื่อประจุกระแสไฟฟ้าจนเต็ม วิธีเบี่ยงเบนการไหลของไฟฟ้าที่ไปยังแบตเตอรี่ใช้การลัดวงจรหรือเปิดวงจร เครื่องควบคุมการประจุจะตรวจวัดแรงดันของแบตเตอรี่เพื่อกำหนดสถานะการประจุของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่มีประจุอยู่เต็ม แรงดันจะสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ 12 V เครื่องควบคุมการประจุจะตัดการประจุไฟฟ้าเมื่อแรงดันสูงถึง 14.4 V และการประจุไฟฟ้าใหม่อีกครั้งหนึ่งจากแรงดันลดลงเหลือ 13.4 V

2.15.2 ชนิดของเครื่องควบคุมการประจุเครื่องควบคุมการประจุจำแนกเป็น 2 ชนิดหลักๆ

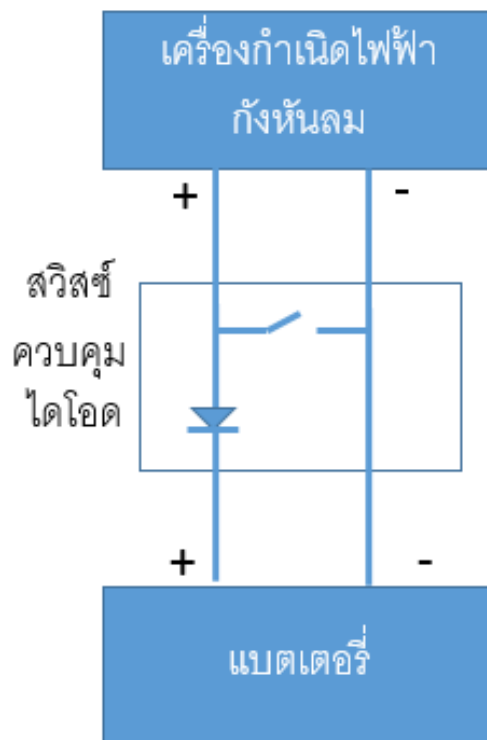
ดังนี้

เครื่องควบคุมการประจุแบบอนุกรม (Series charge controller) เป็นการต่อเครื่องการประจุกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมแบบอนุกรม ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดการไหลของไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมไปยังแบตเตอรี่เมื่อประจุกระแสไฟฟ้าเต็ม หรือเป็นการเปิดวงจรระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมกับแบตเตอรี่เมื่อประจุแบตเตอรี่เต็ม สวิตช์ควบคุมใช้สวิตช์แม่เหล็กที่เรียกว่า รีเลย์ (Relay) หรือสวิตซ์ทรานซิสเตอร์ (Switching transistor) ก็ได้



รูปที่ 2.11 เครื่องควบคุมประจุแบบอนุกรม

เครื่องควบคุมการประจุแบบชัณฑ์ (Shunt charge controller) เป็นการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากักเก็บพลังงานกับสายไฟขาออกแบบขนาน จะทำการเชื่อมวงจรกับสายไฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากักเก็บพลังงาน ทำให้ไม่มีไฟฟ้าไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากักเก็บพลังงานไปยัง แบตเตอรี่เมื่อประจุไฟฟ้าเต็ม แม้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากักเก็บพลังงานจะไม่ได้รับความเสียหายจากการลัดวงจร แต่แบตเตอรี่จะได้รับความเสียหาย จึงต้องมีไดโอด (Diode) ซึ่งเป็นวาล์วทางเดียวติดตั้งระหว่างเครื่องควบคุมการประจุกับแบตเตอรี่ เพื่อป้องกันการลัดวงจรทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากักเก็บพลังงานและแบตเตอรี่ สวิตช์ควบคุมใช้สวิตช์สารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.12 เครื่องควบคุมประจุแบบขั้นต้น

โดยเครื่องควบคุมการประจุทั้งสองชนิดนี้ มีการควบคุมสวิตช์ได้ 2 แบบด้วยกัน คือ แบบ On-Off ที่จะทำให้หน้าที่เป็นสวิตช์เปิดและปิดธรรมดาเท่านั้นและแบบ PWM (Pulse Width Modulation) ที่ช่วยให้การประจุแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพสูงและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งการควบคุมสวิตช์แบบ PWM มีข้อดีมากกว่าการควบคุมสวิตช์แบบ On-Off

การเลือกขนาดของเครื่องควบคุมการประจุนั้น จะถูกกำหนดด้วยแรงดันของระบบที่ถูกออกแบบขึ้นและกระแสสูงที่สามารถควบคุมได้ แรงดันของระบบทั่วไปเท่ากับ 12 V, 24 V หรือ 48 V ดังนั้นเครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมเข้าสู่แบตเตอรี่ และควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าให้มีปริมาณเหมาะสมกับแบตเตอรี่ เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ รวมถึงการจ่ายกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ด้วย ดังนั้น การทำงานของเครื่องควบคุมการประจุ คือ เมื่อประจุกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่จนเต็มแล้ว จะหยุดหรือลดการประจุกระแสไฟฟ้า (และมักจะมีคุณสมบัติในการตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า กรณีแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงด้วย) ระบบพลังงานลมจะใช้เครื่องมือควบคุมการประจุในกรณีที่มีการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่เท่านั้น