

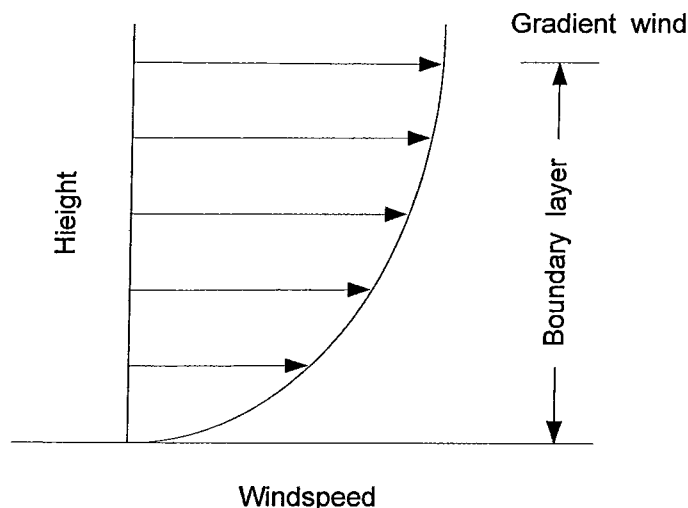
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กังหันลมส่วนใหญ่แล้วจะใช้ในการผลิตไฟฟ้า และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่ต้องซื้อหา พลังงานทดแทนจึงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจ ลมจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือก ปัญหาในการผลิตไฟฟ้าจากลมยังมีข้อจำกัดอยู่ จึงทำให้การผลิตไฟฟ้าไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เนื่องจากลมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และระบบที่ใช้แปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า จะต้องสามารถสกัดพลังงานจากลมให้ได้สูงสุด ในโครงการนี้จะกล่าวถึงการควบคุมแบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) โดยกังหันลมขนาด 1 kW

2.1 หลักการของพลังงานลม

ลมที่นำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตกำลังไฟฟ้า ได้จากส่วนที่อยู่ใกล้ผิวโลก หรือที่เรียกว่าลมพื้นผิว ซึ่งหมายถึงลมที่อยู่บริเวณภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน เป็นบริเวณที่มีการผสมผสานของอากาศและอนุภาคอื่นๆ และมีแรงเสียดทานในระดับสูง เมื่อความสูงมากกว่า 10 เมตรขึ้นไป แรงเสียดทานจะลดลงไป ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.1 จนกระทั่งระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตร เกือบจะไม่มีแรงเสียดทานเลย ความเร็วลมจะขึ้นอยู่กับระดับความสูงและสภาพภูมิประเทศ เช่นเดียวกับทิศทางของลม จนการศึกษาและการค้นคว้าเพิ่มเติมจะพบว่ากังหันลมทำงานได้ดีหรือไม่นั้น จะขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งสองนี้ ที่ทิศทางลมเดียวกัน แต่ความเร็วลมต่างกัน จะทำให้กังหันลมทำงานได้ไม่มีประสิทธิภาพ ความเร็วของกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้กำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ปัจจัยเบื้องต้นที่เป็นตัวกำหนดในการใช้พลังงานลมในการผลิตไฟฟ้า คือความเร็วและทิศทางของลมนั่นเอง โดยในโครงการเล่มนี้จะกล่าวถึงความเร็วของลม



ภาพที่ 2.1 แสดงลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ

โดยที่ความเร็วลมต่ำในช่วง 1-3 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะยังไม่มีการทำงานจึงยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ ที่ความเร็วระหว่าง 2.5-5 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะเริ่มทำงาน เรียกช่วงนี้ว่าช่วง เริ่มความเร็วลม (Cut in wind speed) และความเร็วลมช่วงประมาณ 12-15 เมตรต่อวินาที เป็นช่วงที่เรียกว่า ช่วงความเร็วลม (Nominal or Rate wind speed) ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตัวเอง ในช่วงความเร็วได้ระดับไปสู่ช่วงความเร็วลม เป็นการทำงานของกังหันลมด้วยประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum) ดังที่แสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราการกระตุ่นความเร็ว (Tip speed ratio) และในช่วงความเร็วลมสูงกว่า 25 เมตรต่อวินาที (Cut out- wind speed) กังหันลมจะหยุดทำงานเนื่องจากความเร็วลมสูงเกินไป ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลมได้พลังงานลม (E_{wind}) ซึ่งเป็นพลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศ

$$E_{wind} = (1/2)mv^2 \quad \dots\dots(2.1)$$

$$E_{wind} = \text{พลังงานจลน์}$$

$$M = \text{มวลอากาศ}$$

$$V = \text{ความเร็วลม(m/s)}$$

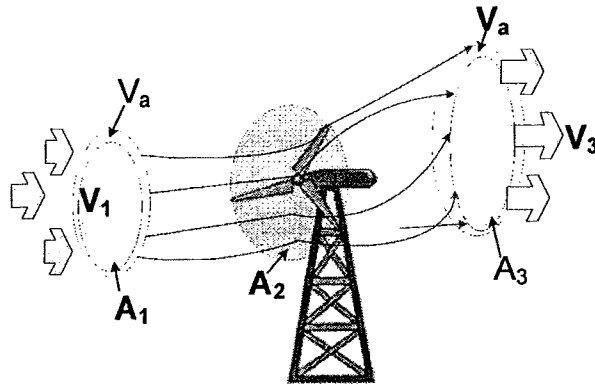
ถ้าลมเคลื่อนที่ผ่านพิกัด A เราสามารถเขียนอัตราการไหลของอากาศเชิงมวลต่อเวลา

$$M = \rho AV \quad \dots\dots (2.2)$$

แทนสมการ 2.2 ลงใน 2.1 จะได้พลังงานจลน์หน่วยเวลา คือ สมการของกำลังลม (P_{wind})
 นั่นเอง ($A=A_{turb}$)

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho A_{\text{turb}} V^3 \quad \text{..... (2.3)}$$

P = ความหนาแน่นของอากาศ (~1.26 kg/m³ ที่ อุณหภูมิ 20 °c)



ภาพที่ 2.2 ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม

จากภาพที่ 2.2 สามารถเขียนสมการพลังงานลมที่กังหันลมสามารถสกัดได้ดังนี้

$$W_w = V_a \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_3^2) \quad \text{..... (2.4)}$$

W_w = พลังงานลมที่กังหันลมสกัดได้

V_a = ปริมาตรของอากาศ

V_1 = ความเร็วลมของพื้นที่หน้าตัด A_1

V_3 = ความเร็วลมของพื้นที่หน้าตัด A_3

จะได้สมการของพลังงานลมที่กังหันสามารถสกัดได้ต่อหน่วยเวลา

$$P_w = \frac{dW_w}{dt} = \frac{dV_a \frac{\rho}{2} (V_1^2 - V_3^2)}{dt} \quad \text{..... (2.5)}$$

ปริมาตรการไหลของอากาศในพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม ($A_2 = A_{\text{turb}}$)

$$\frac{dV_a}{dt} = A_{\text{turb}} V_2 \quad \text{..... (2.6)}$$

จะนั่นจะได้

$$P_w = A_{\text{turb}} \frac{\rho}{2} (V_1^2 - V_3^2) V_2 \quad \text{..... (2.7)}$$

ปริมาณกำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม A_{turb} ความเร็วลมและลักษณะของใบพัดของกังหันลม ตามทฤษฎีของเบทซ์ (Betz) กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่กังหันลมสกัดได้คือ

$$P_w^{\text{max}} = \frac{16}{27} A_{\text{turb}} \frac{\rho}{2} V_1^3 \quad \text{..... (2.8)}$$

โดยมีความสัมพันธ์ความเร็วลม

$$V_2 = \frac{2}{3} V_1 \quad \text{และ} \quad V_3 = \frac{1}{3} V_1 \quad \text{..... (2.9)}$$

C_p เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลัง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงส่วนของกำลังงานที่กังหันลม สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยได้จากภาพที่ 2.7 คุณลักษณะ C_p, C_T โดยเป็นคุณสมบัติเฉพาะของใบพัดนั้นๆ

$$P_w = P_{\text{wind}} \times C_p \quad \text{..... (2.10)}$$

หรือ

$$P_w = \frac{\rho}{2} A_{\text{turb}} V_1^3 \times C_p \quad \text{..... (2.11)}$$

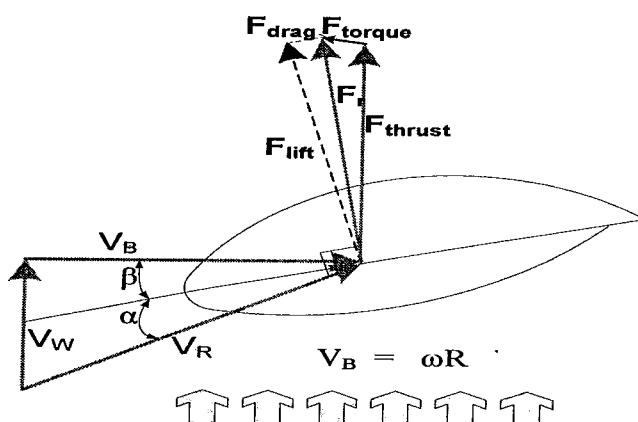
จากสมการ 2.3 ซึ่งจะได้กำลังผ่านกังหันลม แต่กำลังที่สกัดได้จริงนั้นจะแปรผันตาม C_p ด้วย เพราะฉะนั้นจึงสมมุติให้กังหันลมมีพื้นที่หน้าตัดที่รับลมเป็นวงกลม ($A_{\text{turb}} = \pi R^2$) สมการกำลังอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Power, P_a)

$$P_w = \frac{\rho}{2} \pi R^2 V_1^3 \times C_p \quad \text{..... (2.12)}$$

2.2 กังหันลม

2.2.1 ประเภทของกังหันลม กังหันลมโดยทั่วไปจะมีรูปแบบพื้นฐานหลักๆ คล้ายๆกัน แต่อาจแตกต่างกันบ้างในส่วนของการรายละเอียด ดังนั้นการแบ่งประเภทของกังหันลมมักจะยึดเอาลักษณะการวางตัวของแกนเพลลาของกังหันลมเป็นหลัก ซึ่งประเภทหลักๆของกังหันลมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอนและกังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวตั้ง

2.2.2 ประเภทของการจำกัดพลังงาน , กังหันลม 3 ใบพัด



ภาพที่ 2.3 กระบวนการเกิดทอร์กอากาศพลศาสตร์

V_W = ความเร็วลมที่กระทำต่อใบพัดด้านหน้า (ทวนเข็มนาฬิกา)

V_B = ความเร็วลมตรงข้ามกับการหมุน

V_R = เวกเตอร์ความเร็วลมลัพธ์ (Resulting Wind Speed)

$$V_R = V_W + V_B \quad \text{..... (2.13)}$$

โดยขนาดของแรงยก (Lifting Force, F_{lift}) และแรงฉุด (Drag Force, F_{drag}) จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของใบพัด และขนาดของ V_R

F_{lift} = แรงยก (Lifting Force) กระทำกับใบพัดในทิศทางตั้งฉากกับ V_R

F_{drag} = แรงฉุด (Drag Force) กระทำกับใบพัดในทิศทางเดียวกับ V_R

$$F_r = F_{lift} + F_{drag} \quad \text{..... (2.14)}$$

แรงสร้างทอร์ก (Tangential or Torque Force , F_{torque})กระทำต่อใบพัดทิศทางเดียวกับการหมุน

$$F_{\text{torque}} = F_r + F_{\text{thrust}} \quad \text{..... (2.15)}$$

F_{thrust} = แรงผลัก (Thrust Force) กระทำต่อใบพัดในทิศทางเดียวกับความเร็วลม มีผลโดยตรงกับเสาของกังหันลม (Tower)

ขนาดของทอร์กที่กระทำต่อใบพัด สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยการควบคุมเวกเตอร์ V_R จะสามารถควบคุมได้โดยมุม β, α

β คือมุมที่ V_B กระทำต่อแนวแกนใบพัด เรียกว่ามุมพิช (Pitch Angle) สามารถปรับมุมได้โดยการเบี่ยงองศาของใบพัด

α คือมุมที่ V_R กระทำต่อแนวแกนใบพัด เรียกว่ามุมปะทะ (Attack angle) เราสามารถทำได้ 2 วิธี โดยวิธีแรกปรับมุม เช่นเดียวกับ β โดยการปรับองศาของใบพัด วิธีที่สองปรับเวกเตอร์ V_R โดยประกอบด้วย V_w และ V_B แต่เนื่องจาก V_w ไม่สามารถปรับใบพัดในทิศทางตั้งฉากได้จึงไม่สามารถควบคุมขนาดและทิศทางได้ส่วน V_B จะสามารถควบคุมความเร็วของลมที่ใบพัดเมื่อเกิดการหมุน โดยการปรับความเร็วระบบของกังหันลม ซึ่งส่งผลต่อเวกเตอร์ V_R โดยตรง

จำกัดพลังงานโดยบังคับให้เกิดปรากฏการณ์สตอล

สตอลเป็นปรากฏการณ์ทางอากาศพลศาสตร์อย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นกับวัตถุ ที่วางอยู่ในแนวการไหลของอากาศ เช่น ปีกเครื่องบิน หรือใบพัดกังหัน ซึ่งจะทำให้อากาศที่ไหลผ่านวัตถุทั้งทางด้านบนและด้านล่าง เกิดการแยกตัวออกจากกัน ส่งผลให้แรงยกลดลง ถ้าปีกของเครื่องบินเกิดการสตอลเครื่องบินก็จะตก แต่สำหรับกังหันลมเมื่อเกิดการสตอลจะทำให้จำกัดพลังงานได้คือ จะไม่สามารถผลิตพลังงานไปมากกว่านี้ได้ ซึ่งปรากฏการณ์สตอลนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมุมกระทบ α มีค่าเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง การบังคับให้เกิดการสตอลจึงทำได้โดยการปรับมุม α นั้นเอง โดยสามารถควบคุมได้ 2 วิธี โดยการปรับมุมปะทะ โดยเวกเตอร์ V_R

ก) การควบคุมมุมใบพัดโดยวิธีทางกล

ข) การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ ทำให้ V_B มีขนาด ซึ่งส่งผลโดยตรงกับเวกเตอร์ V_R

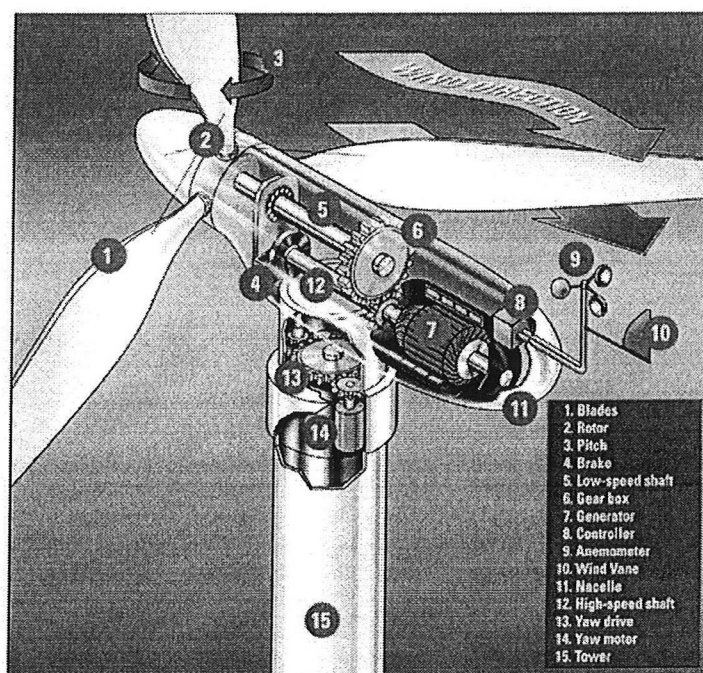
2.2.3 ส่วนประกอบของกังหันลม

กังหันลมโดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ คือ ใบพัด ระบบถ่ายทอดกำลังจากใบพัด ชุดควบคุมการบังคับทิศทางของใบพัดและเสาหรือหอคอย อย่างไรก็ตามในส่วนรายละเอียดของส่วนประกอบของกังหันลมจะขึ้นอยู่กับ วัตถุประสงค์การใช้งานของกังหันลมนั้น

เช่น ถ้าเป็นกังหันลมที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการผลิตไฟฟ้าก็จะมีส่วนประกอบ รายละเอียด และ เทคโนโลยีที่ซับซ้อนกว่ากังหันลมที่ใช้สำหรับการสูบน้ำ อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดความเข้าใจในความแตกต่างของส่วนประกอบของกังหันลมแต่ละชนิด ในที่นี้จึงขอแยกกล่าวถึงส่วนประกอบของกังหันลมตามวัตถุประสงค์การใช้งานเป็น 2 กรณีคือ

ส่วนประกอบของกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า จากการได้รับประโยชน์อย่างชัดเจนในการใช้กังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า ทำให้เทคโนโลยีของกังหันลมประเภทนี้ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงทำให้ส่วนประกอบต่างๆ ของกังหันลมประเภทนี้มีค่อนข้างมากและมีความซับซ้อน ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งส่วนประกอบแต่ละส่วนมีหน้าที่สรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ใบพัด (blade) เป็นตัวรับพลังงานลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกลในการขับเคลื่อนเพลากลมหุน (rotor) ของใบพัด โดยใบพัดสามารถปรับทิศทางการรับลมได้



ภาพที่ 2.4 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบของกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า

2. ระบบเบรก (brake) เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการหยุดหมุนของใบพัดและเพลากลมหุนของกังหันลม

3. คั่นบังคับเพลาแกนหมุน (low speed shaft และ high speed shaft) เป็นส่วนที่คอยควบคุมความเร็วของเพลาแกนหมุนให้หมุนช้าหรือเร็วของใบพัด และส่งผ่านระบบส่งกำลัง

4. ห้องส่งกำลัง (gear box) เป็นระบบที่คอยปรับเปลี่ยนและควบคุมความสัมพันธ์ของความเร็วในการหมุนระหว่างเพลาแกนหมุนกับเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

5. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลที่ถูกส่งมาจากเพลาแกนหมุนของใบพัดเป็นพลังงานไฟฟ้า

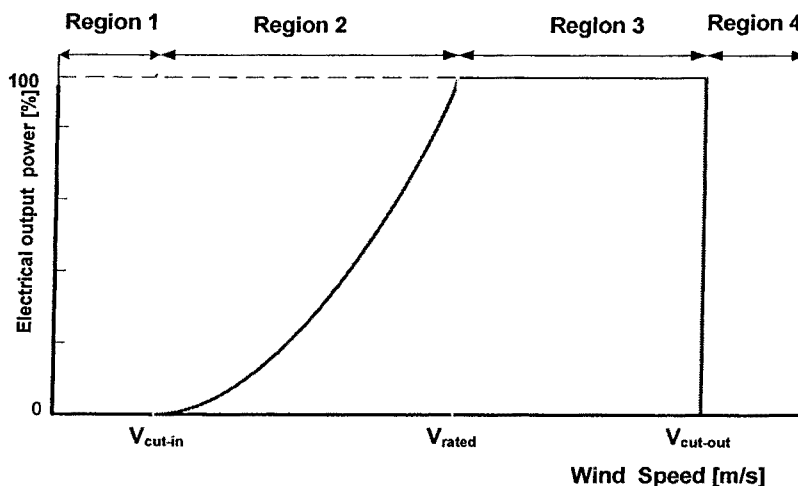
6. ตัวควบคุม (controller) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องวัดความเร็วลม

7. ห้องเครื่อง (nacelle) เป็นห้องควบคุมขนาดใหญ่ อยู่ส่วนหลังของใบพัด ใช้บรรจุระบบต่างๆ เช่น ระบบเกียร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบเบรก และระบบควบคุม

8. แกนคอหมุนรับทิศทางลม (yaw drive) เป็นตัวควบคุมการหมุนของห้องเครื่องเพื่อให้ใบพัดปรับรับทิศทางลม โดยมีมอเตอร์ (yaw motor) เป็นตัวช่วยในการปรับทิศทาง

9. เสาหรือหอคอย (tower) เป็นส่วนที่แบกรับอุปกรณ์ทั้งหมดที่อยู่ข้างบน

นอกจากนี้ยังต้องมีระบบไฮดรอลิก (hydraulic system) ที่จะช่วยในการชะลอการหมุนและการหยุดหมุนของใบพัด ระบบระบายความร้อน (cooling system) มีไว้สำหรับการระบายความร้อนจากการทำงานของระบบซึ่งเกิดความร้อนจากการทำงานอย่างต่อเนื่องและมีชุดเครื่องมือสำหรับการวัดความเร็วลม (anemometer) เพื่อวัดและเก็บข้อมูลความเร็วลมซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่กับชุดแผงหาง (vane)



ภาพที่ 2.5 กราฟการทำงานของกังหันลม

2.2.4 ช่วงการทำงานของกังหันลมและควบคุมการทำงานในช่วงความเร็วลม

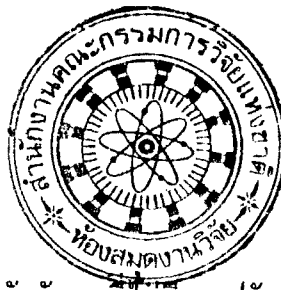
จากภาพที่ 2.5 จะเห็นว่าในช่วงที่ 1 ความเร็วลมมีค่าน้อยกว่า $V_{\text{cut-in}}$ ดังนั้นกังหันจะไม่ทำงาน เช่นเดียวกันกับช่วงที่ 4 ความเร็วลมมีค่าสูงเกินไป ซึ่งอาจทำให้กังหันเกิดความเสียหายได้กังหันจะถูกสั่งให้หยุดทำงานทันที กังหันจะทำงานเมื่อ $V_{\text{cut-out}}$ ลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 โดยที่ พลังงานที่สกัดได้ ที่ 100 % คือค่าที่คำนวณไว้แล้วว่าเมื่อลมมีความเร็วเท่ากับค่าดังกล่าว กำลังที่สกัดได้จะมีค่าเท่ากับพิกัดกำลังพอดี

เมื่อลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่ 2 จะเรียกช่วงนี้ว่าความเร็วลมต่ำกว่าพิกัด ซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะแปรผันกับความเร็วลมกำลังสาม จะเรียกช่วงนี้ว่าความเร็วลมสูงกว่าพิกัด ซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะต้องถูกจำกัดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าพิกัดกำลัง โดยใช้วิธีจำกัดพลังงานทางอากาศพลศาสตร์ แบบใดแบบหนึ่ง ระหว่างแบบควบคุมให้เกิดปรากฏการณ์การสตอล กับวิธีการปรับมุมพิช สำหรับบทความนี้จะสนใจเฉพาะกังหันแบบปรับความเร็วได้ ซึ่งใช้วิธีพลังงานสตอล

กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของกังหัน กับพลังงานที่สกัดได้จากลมดังภาพที่ 2.5 สามารถใช้กราฟนี้เพื่อเลือกความเร็วรอบที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการควบคุมกังหันที่ความเร็วลมต่างๆ

โดยกังหันที่มีขนาดและลักษณะของใบพัดต่างกัน ก็จะมีกราฟคุณลักษณะต่างกันด้วย ดังนั้นจึงแสดงสมการกำลังที่กังหันสกัดได้จากลมดังสมการที่

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^3 v^3 C_p (v, \omega, \beta) \quad \dots\dots (2.16)$$



ในที่นี้พิจารณาเฉพาะกังหันลมที่ไม่มีการปรับมุมพิช ดังนั้นที่มุมพิชคงที่ค่าหนึ่ง C_p จะขึ้นอยู่กับค่าของ v และ ω เท่านั้น ถ้ากำหนดให้ λ คือ อัตราส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วลม (Tip Speed Ratio) ซึ่งนิยามตามสมการที่ 2-17

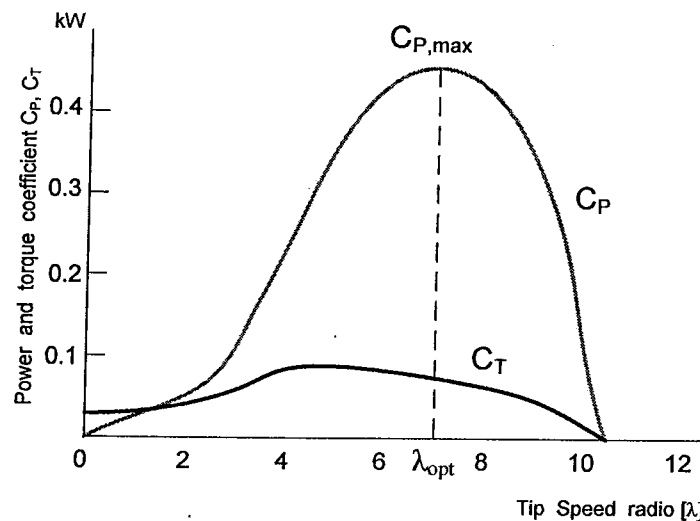
$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad \dots\dots (2.17)$$

จะได้

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^3 v^3 C_p(\lambda) \quad \dots\dots (2.18)$$

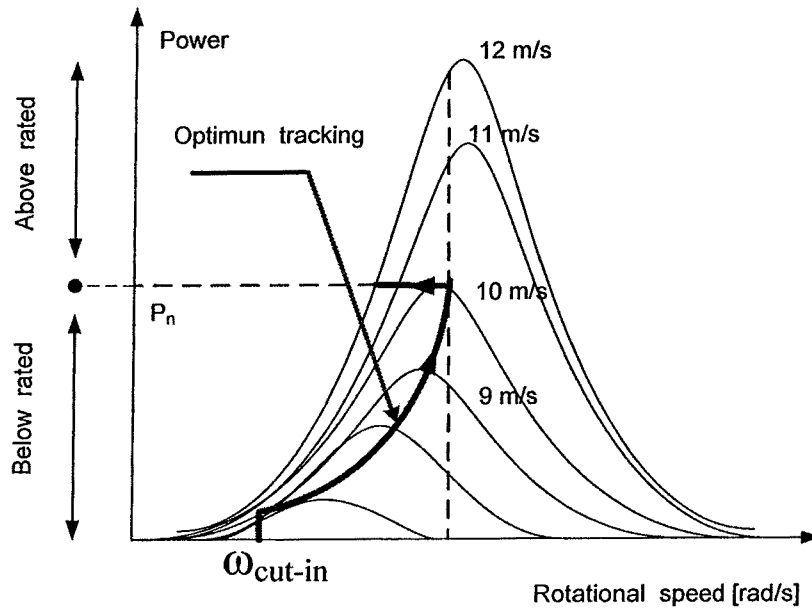
โดยของกังหันลมจริงที่ใช้ในการทดลองนี้ขนาด 400 W มีลักษณะเป็นกราฟ ดัง ภาพที่ 2.7

จากสมการที่ 2.18 และกราฟของ C_p จึงสามารถหากราฟคุณลักษณะของกังหันที่ใช้ในการทดลองได้ดัง ภาพที่ 2.6 ถ้าทราบความเร็วลมที่กระทำต่อกังหัน ก็จะสามารถเลือกทำงานที่ความเร็วรอบ อันจะทำให้เกิดการสกัดกำลังตามที่ต้องการได้ แต่ในทางปฏิบัติพบว่าการวัดค่าความเร็วลมมีปัญหาหลายประการและอาจได้ค่าที่ไม่แม่นยำ งานวิจัยนี้จะใช้วิธีที่ไม่ต้องวัดความเร็วลม ดังจะอธิบายต่อไป



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง สัมประสิทธิ์แรงบิด กับ แลมด้า

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	31 มิ.ย. 2554
เลขทะเบียน.....	237113
เลขเรียกหนังสือ.....	



ภาพที่ 2.7 เส้นทางการควบคุมกังหันลม ณ ความเร็วลมต่างๆ

2.2.5 การควบคุมกังหันลมในช่วงความเร็วต่ำกว่าพิกัด

เนื่องจากกำลังสูงสุดที่สามารถสกัดได้จากความเร็วลมในช่วงนี้ วัตถุประสงค์ของการควบคุมในช่วงนี้คือสกัดพลังงานจากลมให้ได้สูงสุด จากภาพที่ 2.7 คือที่ $v = 10 \text{ m/s}$ มีค่าไม่เกินพิกัด (ในการทดลองนี้คือ 400 W) ดังนั้นการควบคุมกังหันในช่วงนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อทำให้กังหันสกัดกำลังจากลมให้ได้มากที่สุดตลอดเวลา ไม่ว่าความเร็วลมจะเปลี่ยนแปลงเช่นไร หลักการคือต้องควบคุมให้กังหันมีความเร็วอื่นทำให้ เกิดสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด ที่ λ_{opt} อยู่เสมอ ฉะนั้น สมการควบคุมจะมีสมการเป็น

$$P_a = P_{a' \max} = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p^{\max} \quad \dots\dots (2.19)$$

$$\lambda = \lambda_{opt} = \frac{\omega_{opt} R}{v} \quad \dots\dots (2.20)$$

ดังนั้น

$$V^3 = \frac{\omega_{opt}^3 R^3}{\lambda_{opt}^3} \quad \dots\dots (2.21)$$

แทนค่า จะได้

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 \frac{\omega_{opt}^3 R^3}{\lambda_{opt}^3} C_p^{\max} = K_{opt} \omega_{opt}^3 \quad \dots\dots (2.22)$$

โดยที่

$$K_{opt} = \frac{\rho}{2} \pi R^5 C_p^{max} \frac{1}{\lambda_{opt}^3} \quad \dots\dots (2.23)$$

$$P_a = \omega T_a \quad \dots\dots (2.24)$$

สมการที่ใช้สร้างคำสั่งจึงเป็น

$$T_{a'opt} = K_{opt} \omega_{opt}^2 \quad \dots\dots (2.25)$$

$$\omega_{ref} = \sqrt{\frac{T_a}{K_{opt}}} \quad \dots\dots (2.26)$$

2.2.6 การควบคุมกังหันลมในช่วงความเร็วลมสูงกว่าพิกัด

เนื่องจากกำลังที่สกัดได้ ดังนั้นจะต้องใช้วิธีทางอากาศพลศาสตร์เพื่อจำกัดกำลังที่สกัดได้ ให้คงที่อยู่ที่ค่าซึ่งทำให้เครื่องกำเนิดผลิตกำลังออกมาที่พิกัดพอดี พิจารณาจากภาพที่ 2.7 การควบคุมสามารถทำได้โดย ควบคุมให้กังหันลดความเร็วลงไปยังจุดที่ทำให้เกิดปรากฏการสตอล ซึ่งเมื่อเกิดขึ้น กำลังส่วนหนึ่งที่กังหันได้รับจะถูกกำจัดออกไปทำให้ผลลัพธ์ของกำลังที่สกัดได้ มีค่าลดลงตามไปด้วย จากสมการที่ 2.20 จะได้

$$\omega = \frac{P_a}{T_a} \quad \dots\dots (2.27)$$

ดังนั้นถ้าต้องการให้กำลังที่สกัดได้จากลมมีค่า ต้องสร้างคำสั่งความเร็วรอบเป็น

$$\omega_{ref} = \frac{P_{max}}{T_a} \quad \dots\dots (2.28)$$

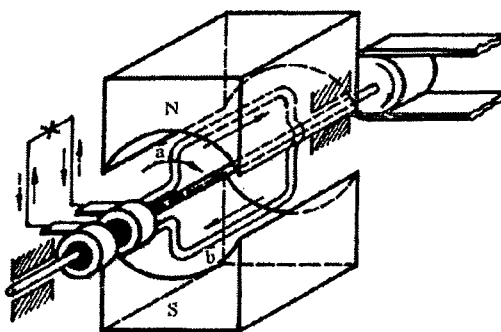
จากสมการที่ 2.26 และ 2.28 จะเห็นว่าการควบคุมในกรณีไม่ทราบความเร็วลมสามารถทำได้ถ้าทราบค่าทอร์กอากาศพลศาสตร์ที่กังหันได้รับ แต่เนื่องจากทอร์กดังกล่าวไม่สามารถใช้ทราบคิวเซอร์ทอร์กวัดได้ ต้องใช้ตัวประเมิน T_a แทน

2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลมาเป็น พลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กตามหลักการของไมเคิลฟาราเดย์ คือ การเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำผ่านสนามแม่เหล็กหรือการเคลื่อนที่สนามแม่เหล็กผ่านขดลวดตัวนำ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดตัวนำนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามี 2 ชนิด คือ ชนิดกระแสตรง เรียกว่า ไดนาโม (Dynamo) และชนิดกระแสสลับเรียกว่า อัลเตอร์เนเตอร์ (Alternator) แต่สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในงานในเชิงอุตสาหกรรมนั้น โดยมากจะเป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดกระแสสลับซึ่งมีทั้ง 1 เฟส และ 3 เฟส โดยเฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดใหญ่ที่ใช้ตามโรงไฟฟ้าจะเป็นเครื่องกำเนิดแบบ 3 เฟสทั้งหมด เนื่องจากสามารถผลิตและ จ่ายกำลังไฟฟ้าได้เป็น 3 เท่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 1 เฟส โดยทั่วไปแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือส่วนที่เรียกว่า โรเตอร์ (Rotor) ซึ่งจะมีขดลวดตัวนำฝังอยู่ในร่องรอบแกนโรเตอร์ที่ทำจากแผ่นเหล็กซิลิกอน (Silicon Steel Sheet) ขนาดความหนาประมาณ 0.35-0.5 มิลลิเมตรนำมาอัดแน่น โดยระหว่างแผ่นเหล็กซิลิกอนจะมีฉนวนเคลือบทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) ภายในแกนเหล็กของโรเตอร์จะได้รับ ไฟฟ้ากระแสตรงจากเอ็กไซเตอร์ (Excitor) เพื่อทำหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอีกส่วนหนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ ส่วนที่อยู่กับที่ เรียกว่า สเตเตอร์ (Stator) และภายในร่องแกน สเตเตอร์ ซึ่งทำจากแผ่นเหล็กอัดแน่น เช่นเดียวกับโรเตอร์มีขดลวดฝังอยู่อาศัยหลักการของ การเคลื่อนที่ของแม่เหล็กผ่านลวดตัวนำ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์และ นำแรงดันไฟฟ้านี้ไปใช้ต่อไปอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดใหญ่ คือ เอ็กไซเตอร์อยู่แกนเดียวกับโรเตอร์ทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้แก่ โรเตอร์ (DC Exciting Current) เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นบนโรเตอร์ ชนิดของเอ็กไซเตอร์จะเป็น แบบไฟฟ้ากระแสตรง หรืออาจจะใช้แบบกระแสสลับ แล้วผ่านวงจรแปลงไฟฟ้าให้เป็นกระแสตรงก่อนป้อนเข้าสู่โรเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ มักจะใช้เอ็กไซเตอร์ชนิดหลังเป็นส่วนมากการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถกระทำได้โดยการปรับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์สร้างขึ้นด้วยการปรับกระแสไฟฟ้าตรงที่ป้อนให้กับโรเตอร์ ส่วนความถี่ของไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่าง คือ ความเร็วรอบที่โรเตอร์หมุน ยิ่งหมุนรอบมาก ความถี่ไฟฟ้าก็จะยิ่งสูงและจำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นบนโรเตอร์ยังมีขั้วมากเท่าไร ความถี่ไฟฟ้าก็จะมากขึ้นตาม

2.3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

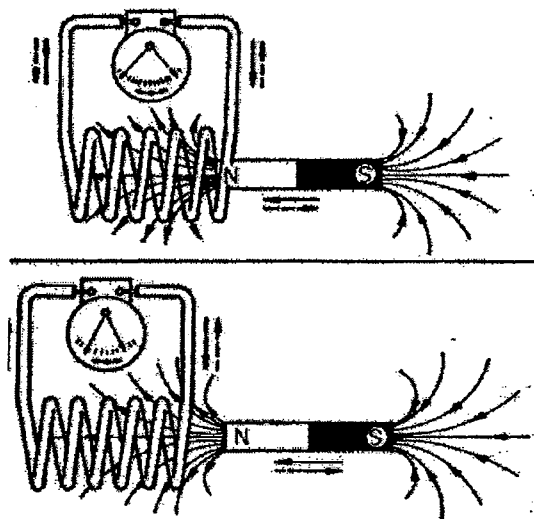
มีลักษณะเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ต่างกันตรงที่ปลายสายทั้งสองของขดลวดต่อเข้ากับแหวนทองแดงหรือสลิปริง (Slip Ring) จึงนำกระแสสลับที่ให้งานเกิดบน ตัวนำไปใช้โดยตรงด้วยการต่อผ่านสลิปริง



ภาพที่ 2.8 หลักการเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

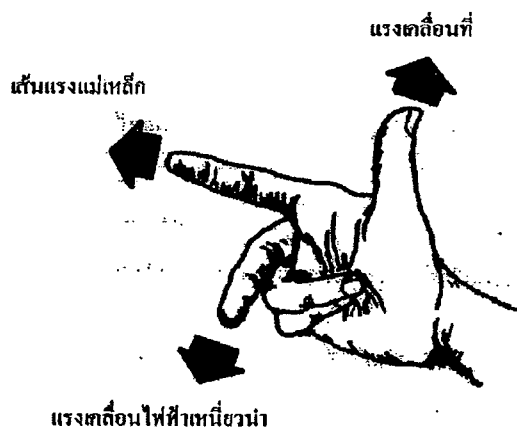
2.3.1.1 สนามแม่เหล็กหมุนในขดลวด

ให้ขดลวดอยู่กับที่ต่อปลายทั้งสองเข้ากับขั้วของกัลวานอมิเตอร์เมื่อทำให้ขั้วแม่เหล็กกลับไปกลับมาภายในขดลวด จะพบว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์แกว่งกลับไปกลับมา เช่นเดียวกันแสดงว่ามีกระแสสลับเกิดขึ้นแล้วบนขดลวด การเหนี่ยวนำแม่เหล็กด้วยวิธีนี้ตรงข้ามกับวิธีแรก (ขดลวดหมุน) คือ ขดลวดอยู่กับที่ให้สนามแม่เหล็กเป็นตัวหมุนตัดขดลวด แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดขึ้นบนขดลวดซึ่งอยู่กับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าลักษณะนี้เป็นหลักการเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternator) ขนาดใหญ่ที่ให้งานเกิดแรงดันและกำลังไฟฟ้าสูง

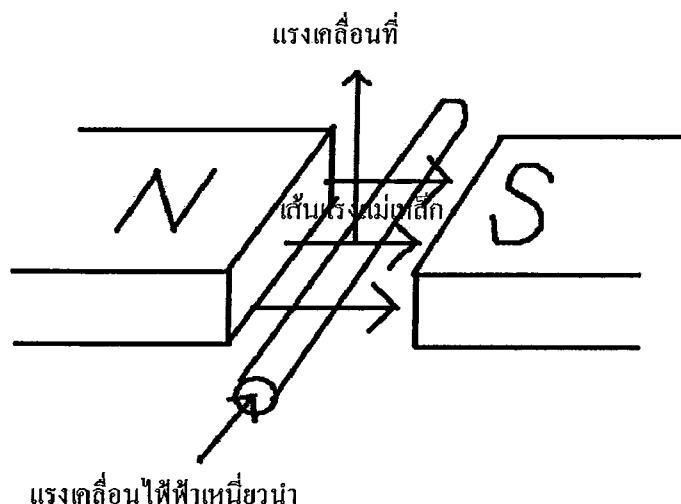


ภาพที่ 2.9 สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปมาภายในขดลวดจะทำให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ

2.3.1.2 ทิศทางการเคลื่อนที่และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทิศทางสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ และทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำที่มีความสัมพันธ์กันสามารถหาได้โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง (Fleming's Right Hand Rule) ยกมือขวาขึ้นทางนิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้และนิ้วกลางให้ตั้งฉากกัน ให้นิ้วชี้แทนทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็ก นิ้วหัวแม่มือแทนทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำ และนิ้วกลางแทนทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังภาพที่ 2.10 และภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.10 กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง



ภาพที่ 2.11 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

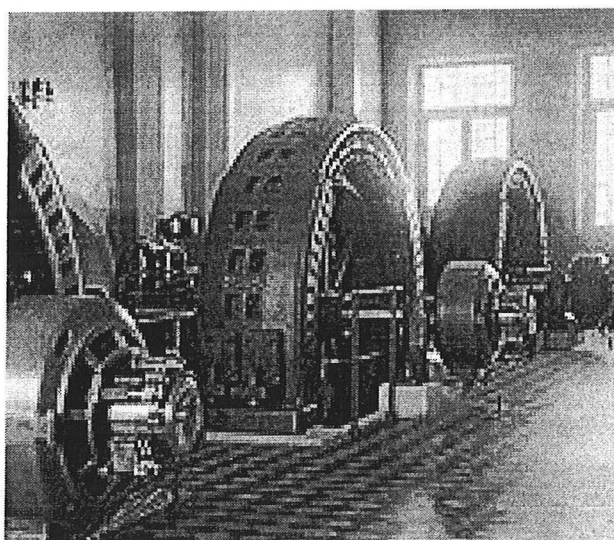
2.3.2 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงต่างทำหน้าที่เหมือนกันคือผลิตแรงดันไฟฟ้า แต่มีข้อแตกต่างกันคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขดลวดอาเมเจอร์เป็นส่วนหมุนและขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ อาจจะใช้ขดลวดอาเมเจอร์เป็นส่วนหมุน หรือส่วนที่อยู่กับที่ก็ได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับส่วนใหญ่เป็นแบบขั้วแม่เหล็กหมุนเพราะว่า

1. กระแสที่นำไปใช้กับโหลดไม่ต้องผ่านสลิปริงจึงช่วยลดปัญหาเรื่อง ของ ฉนวนไฟฟ้า
2. ผลิตแรงดันได้สูงถึง 30 kV
3. ขนาดของส่วนหมุนลดลงขนาดพื้นที่หน้าตัดขดลวดอาเมเจอร์น้อยกว่าขดลวดสนามแม่เหล็ก จึงใช้กระแสฟลักซ์น้อยประมาณ 100 ถึง 250 โวลต์

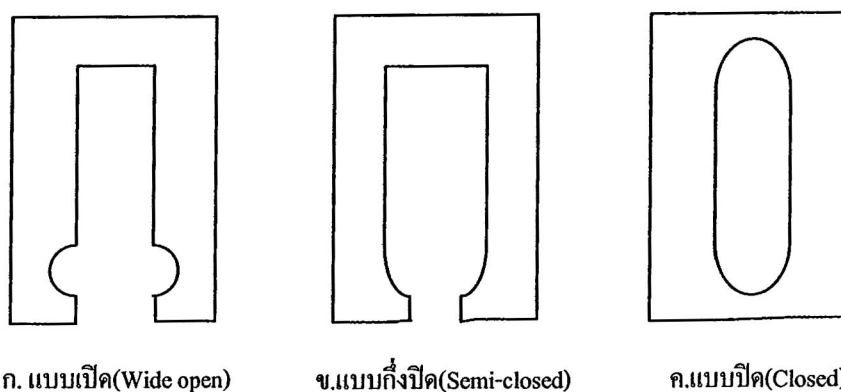
2.3.2.1 ส่วนประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กหมุน

1. โครงเครื่อง (Stator Frame) เป็นส่วนรองรับส่วนประกอบอื่น ๆ ของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำด้วยเหล็กหล่อ ในเครื่องที่มีการหมุนดำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตและมี ช่องระบายความร้อน ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 โครงเครื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.3.2.2 แกนเหล็กอะเมเจอร์ (Stator Core) เป็นส่วนที่ใช้พันขดลวดอะเมเจอร์ทำด้วยเหล็กแผ่นบางๆ (Laminated Sheet Steel) ปั้นเป็นร่อง (Slot) สำหรับพันขดลวดเพื่อลดการสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy Current) ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่แกนเหล็กอะเมเจอร์มีช่องสำหรับให้อากาศผ่านเพื่อช่วยระบายความร้อนร่องแบบต่างๆ ของแกนอะเมเจอร์ ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ร่องแบบต่างๆ ของแกนอะเมเจอร์สำหรับที่ใช้พันขดลวด

1. ร่องแบบเปิด (Wide-Open Type Slot) ร่องแบบเปิดเป็นร่องที่นิยมใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อดี คือ ง่ายต่อการบรรจุขดลวด และง่ายต่อการซ่อมแต่ข้อเสียคือ

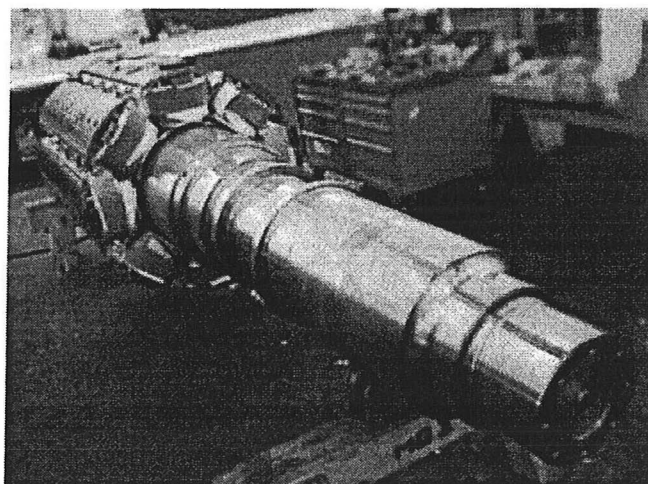
เส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่าง (Air-gap flux) ทำให้รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดการกระเพื่อม (Ripple)

2. ร่องแบบกึ่งปิด (Semi-Closed Type Slot) เป็นร่องที่ดีกว่าร่องแบบเปิดจะพันขดลวดจากแบบแล้วจึงบรรจุลงในร่อง

3. ร่องแบบปิด (Closed Type Slot) เป็นร่องที่เจาะเป็นอุโมงค์และทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ลดลง

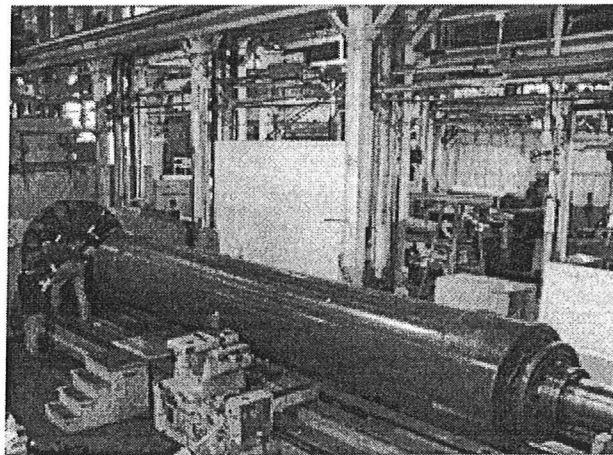
2.3.2.3 ส่วนที่หมุนหรือขั้วแม่เหล็กหมุน (Rotating field)

1. แบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient Pole Type) เป็นขั้วแม่เหล็กเหมาะสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยความเร็วปานกลางถึงความเร็ว โดยประกอบด้วยขั้วแม่เหล็กมากกว่า 4 ขั้วขึ้นไป โครงสร้างทำด้วยแผ่นเหล็กบางๆ (Laminated Sheet Steel) อัดเป็นแท่งยึดด้วยสลักเกลียวเพื่อลดความร้อนจากกระแสไหลวน (Eddy Current) ลักษณะของส่วนที่หมุน (Rotor) แบบนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโต ดังภาพที่ 2.14

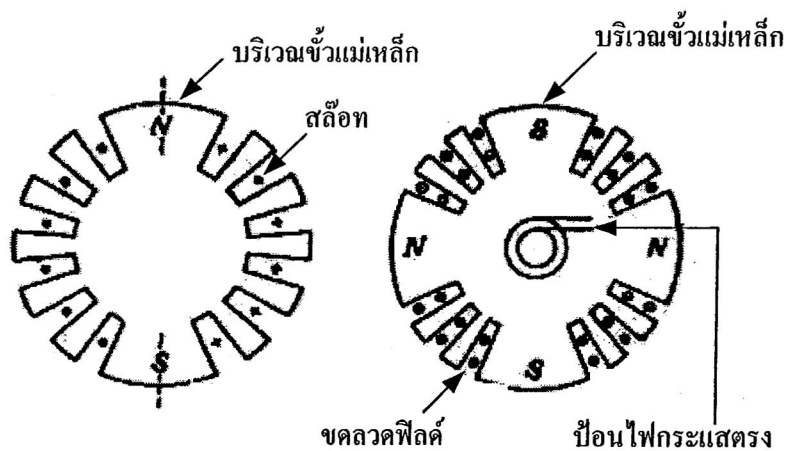


ภาพที่ 2.14 ส่วนที่หมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กยื่น

2. แบบขั้วแม่เหล็กเรียบรูปทรงกระบอก (Cylindrical Rotor) เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงประมาณ 3000 รอบ/นาที จะมีขั้วแม่เหล็ก 2-4 ขั้ว โครงสร้างเป็นรูปทรงกระบอกมีผิวเรียบ ขั้วแม่เหล็กอยู่ที่ร่องบนตัวหมุน เนื่องจากหมุนด้วยความเร็วสูงและลดแรงหนีศูนย์กลางได้ ดังภาพที่ 2.15

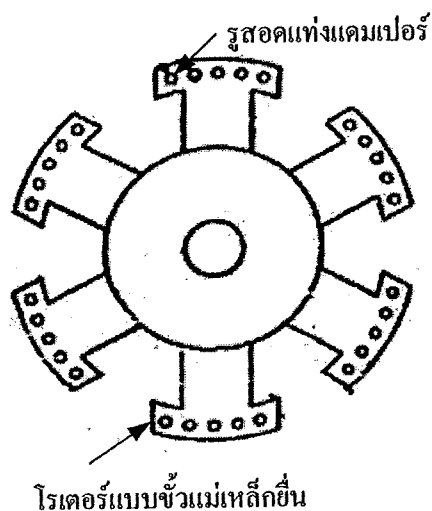


ภาพที่ 2.15 ตัวหมุนแบบขั้วแม่เหล็กรูปทรงกระบอก



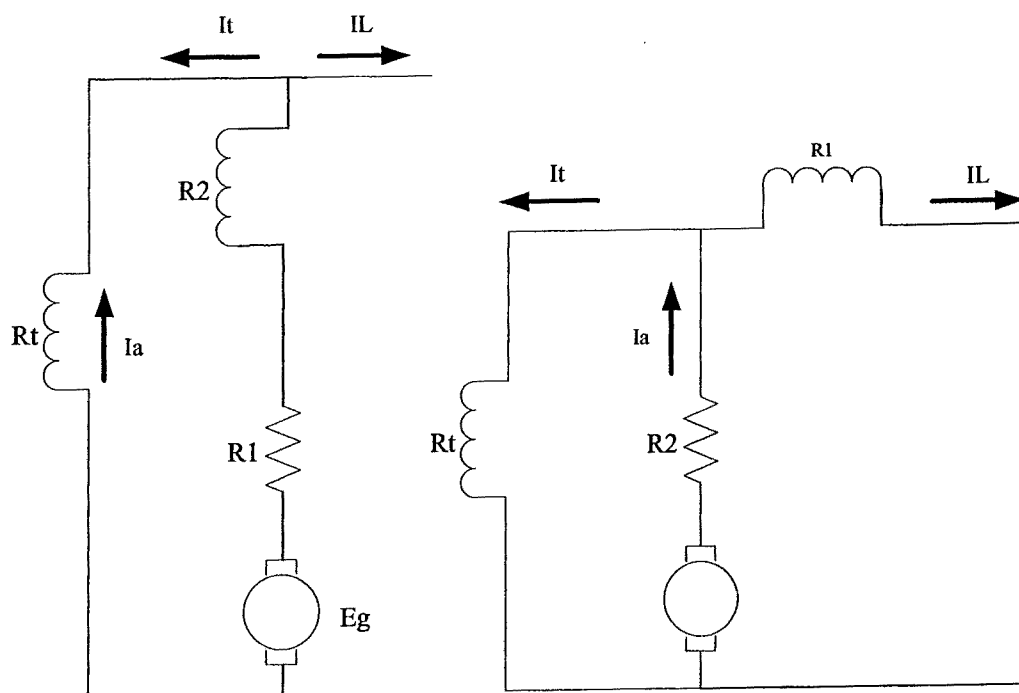
ภาพที่ 2.16 ขั้วแม่เหล็กรูปทรงกระบอกแบบ 2 ขั้ว และแบบ 4 ขั้ว

3. ขดลวดแดมเปอร์ (Damper Winding) ที่ขั้วแม่เหล็กของส่วนที่หมุนจะมีร่องสำหรับฝังแท่งทองแดงและปลายแท่งจะทำการลัดวงจรด้วยทองทองแดงมีลักษณะเหมือนกับกรงกระรอก (Squirrel-Cage Winding) ขดลวดแดมเปอร์นี้ช่วยในการลดการแกว่งหรือสั่นขณะมีการเริ่มทำงาน ด้วยความเร็วไม่สม่ำเสมอโดยขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กออกมาต้านกับสนามแม่เหล็กหมุนทำให้การสั่นหรือการแกว่งหยุดได้เร็วขึ้น ลักษณะการติดตั้งขดลวดแดมเปอร์ในส่วนหมุน ดังภาพที่ 2.17



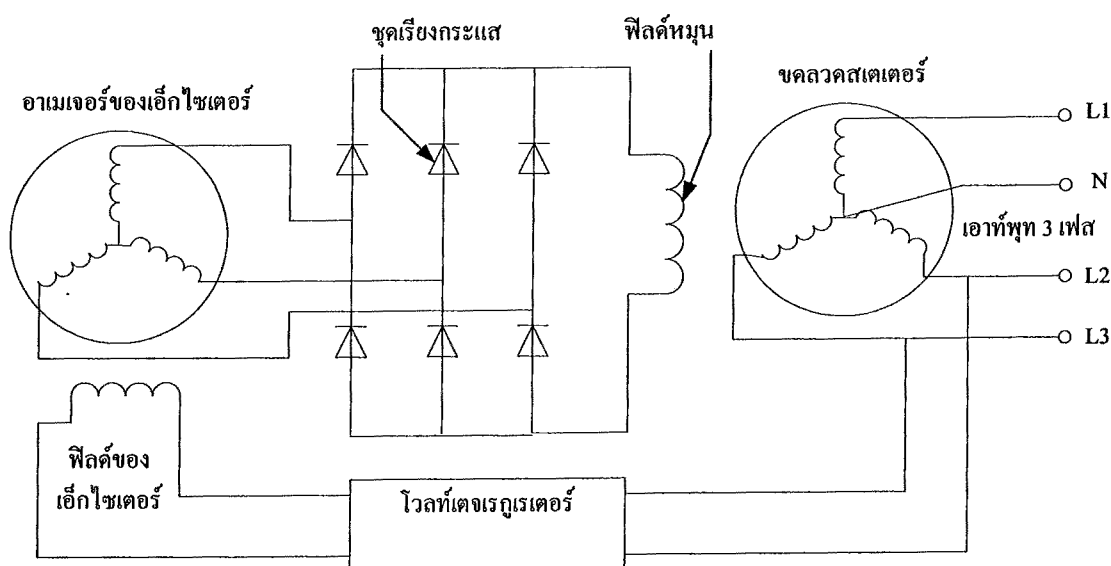
ภาพที่ 2.17 การติดตั้งขดลวดแคมเปอร์ในส่วนหมุน

2.3.2.4 เอ็กไซเตอร์ (Exciter) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ต้องการแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับป้อนกระแสให้กับขดลวดสนามแม่เหล็ก แหล่งกำเนิดไฟฟ้าตรงที่นิยมใช้กันคือ แบบเฟลต คอมปาวด์-เวด (Flat Compound-Wound D.C. Generator) ซึ่งมีคุณสมบัติคือ แรงดันที่ผลิตและความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 เอ็กไซเตอร์แบบ Flat Compound-Wound DC Generator

และเอ็กไซเตอร์อีกชนิดหนึ่งเป็นแบบไม่ต้องมีแปรงถ่าน (Brushless Generator) หลักการทำงานโดยอาศัยแรงดันที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับขนาดเล็ก แรงดันที่ได้จะผ่านชุดเรียงกระแสและชุดกรองความถี่ แรงดันที่ออกมาจะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจะป้อนเข้าไปยังชุดควบคุมสนามแม่เหล็กหมุนโดยตรง เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่เริ่มทำงานผลิตแรงดันออกมา โดยแรงดันที่ได้เป็นระบบสามเฟส ซึ่งแรงดันส่วนหนึ่ง 1 เฟส จะป้อนกลับให้ชุดควบคุมแม่เหล็กหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กโดยผ่านวงจรโวลต์เตจเรกูเรเตอร์



ภาพที่ 2.19 เอ็กไซเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Generator)

2.3.2.5 ความเร็วรอบและความถี่

ถ้าขดลวดตัวนำหมุนตัดสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้วจำนวน 1 รอบจะเกิดรูปคลื่น Sine ขึ้น 1 Cycle เป็นมุม 360 องศาไฟฟ้า หรือ 2π เรเดียนในกรณีนี้

เมื่อ

$$\theta_e = \theta_m$$

θ_e = องศาไฟฟ้าที่ได้จากรูปคลื่น Sine

θ_m = องศาทางกลที่ขดลวดตัวนำหมุนตัดสนามแม่เหล็ก
ใน 1 รอบ

ถ้าเพิ่มขั้วแม่เหล็กอีก 2 ขั้วเป็น 4 ขั้วจะเกิดรูปคลื่นไซน์ 2 ลูก นั่นคือ ϕ_m จะเพิ่มขึ้น 2 เท่าเป็น $2 \times 360 = 720$ องศาไฟฟ้า

นั่นคือ ถ้า P ยังเพิ่มขึ้น ϕ_e จะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของจำนวนขั้วของขั้วแม่เหล็ก ($P/2$) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

องศาไฟฟ้า = องศาทางกล x จำนวนขั้วของขั้วแม่เหล็ก

$$\phi_e = \phi_m \times (P/2)$$

เมื่อ

$$\phi_e = \text{องศาทางไฟฟ้า}$$

$$\phi_m = \text{องศาทางกล (ที่ขดลวดหมุน 1 รอบ)}$$

$$P = \text{จำนวนขั้วแม่เหล็ก}$$

$$\text{ดังนั้นจำนวนไซเคิล/รอบการหมุน (Cycle/Revolution) = } P/2$$

$$\text{และรอบการหมุน/วินาที (Revolution/Second) = } N/60$$

ดังนั้นความถี่

$$f = (P/2) \times (N/60)$$

$$= PN/120 \text{ Hz}$$

หรือ

$$f = PN/120 \text{ Hz} \quad \dots\dots(2.29)$$

เมื่อ

$$f = \text{ความถี่เป็นไซเคิล/วินาที หรือ Hz}$$

$$P = \text{จำนวนขั้วแม่เหล็ก}$$

$$N = \text{ความเร็วรอบของโรเตอร์เป็น รอบ/นาที (r.p.m)}$$

N คือ ความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed) เพราะว่าความเร็วรอบ (Speed) ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับหมุนนั้น จะต้องหมุนที่ความเร็วรอบเดียวกับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของความถี่ที่ต้องการที่แท้จริงแล้วความถี่นั้นถูกกำหนดขึ้นด้วยจำนวนขั้วแม่เหล็กเมื่อความเร็วรอบคงที่ดังตัวอย่างสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz จะมีความเร็วรอบดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงความเร็วรอบและจำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดความถี่ 50 Hz

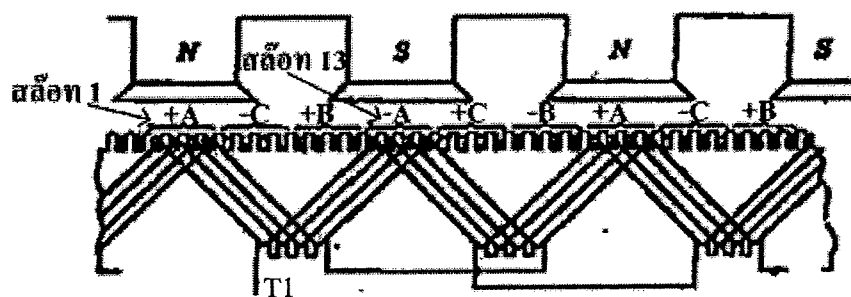
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	2	4	6	12	24	36
ความเร็วรอบ(รอบ/นาท)	3000	1500	1000	500	250	166
จากสมการข้างบนนั้นจะได้ $P = 120f/N$						

2.3.3 การพันขดลวดอาเมเจอร์

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สร้างแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึง คือ การพันขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับมีการพันขดลวดอาเมเจอร์แตกต่างกัน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมีการพันลักษณะวงจรปิด แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเป็นทั้งแบบวงจรเปิด (สตาร์) และวงจรปิด (เดลต้า)

2.3.3.1 ขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิด 3 เฟส (Three Phase Winding)

ขดลวดอาเมเจอร์แบบสามเฟส คือขดลวดอาเมเจอร์แบบหนึ่งเฟส 3 ชุดอยู่ในร่องภายใต้ขั้วแม่เหล็ก 1 ขั้ว ดังภาพที่ 2.20 ขดลวดแต่ละชุดจะพันเรียงห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า แต่ละ coil-group ประกอบด้วยขดลวด 4 ขดต่ออนุกรมหรือมีจำนวนคอยล์ 4 coil-group



ภาพที่ 2.20 ขดลวดอาเมเจอร์แบบ 3 เฟสพัน 2 ชั้นแบบเส้น มีคอยล์พิชเต็ม มี 4 ร่อง/ขั้ว/เฟส

ขดลวด 4 ขดต่ออนุกรมกันหรือมีจำนวนคอยล์ 4 coil-group ในภาพที่ 2.20 เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มี 48 ร่อง 4 ขั้วแม่เหล็กดังนั้นให้

$$\begin{aligned}
 n &= \text{จำนวนร่องต่อขั้วแม่เหล็ก (Slot / pole)} && \text{..... (2.30)} \\
 &= 48 / 4 \\
 &= 12 \text{ ร่อง (กรณีออกแบบ 3 เฟสและ 1 เฟส)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m &= \text{จำนวนร่อนต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส} && \dots\dots (2.31) \\
 &= (\text{slot})/(\text{pole} \times \text{phase}) \\
 &= 48/(4 \times 3) \\
 &= 4 \text{ coil-group (กรณีออกแบบ 3 เฟส)}
 \end{aligned}$$

ในกรณีออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส 48 ร่อน 12 ขั้วแม่เหล็ก

$$\begin{aligned}
 n &= \text{จำนวนร่อนต่อขั้วแม่เหล็ก (Slot / pole)} \\
 &= 48 / 12 \\
 &= 4 \text{ ร่อน} \\
 m &= \text{จำนวนร่อนต่อขั้วแม่เหล็กต่อเฟส} \\
 &= (\text{slot})/(\text{pole} \times \text{phase}) \\
 &= 48/(12 \times 1) \\
 &= 4 \text{ coil-group}
 \end{aligned}$$

จำนวน coil-group ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 1 เฟสและ 3 เฟสต้องไม่เกิน 4 coil-group

ตามปกติระยะห่างระหว่างกึ่งกลางขั้ว N วัดไปยังกึ่งกลางขั้ว S ที่อยู่ประชิดกันเรียกว่า 1 โพลพิช (pole-pitch) = 180 องศาไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
 \text{ให้ } \beta &= \text{มุมระหว่างร่อน 2 ร่อนที่อยู่ประชิดกัน} \\
 &= 180^\circ / (\text{slot/pole}) && \dots\dots (2.32) \\
 &= 180^\circ / (48/4) \\
 &= 15 \text{ องศาไฟฟ้า}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นร่อนแต่ละร่อนจะห่างกัน 15 องศาไฟฟ้า ซึ่งถ้าพิจารณาขดลวดคู่สาย (coil-side) ด้านซ้ายมือของขดลวดเฟส A สมมติว่าพันลงในร่อนที่ 1 ซึ่งอยู่กึ่งกลางขั้ว N คู่สายไซด์ด้านขวามือของขดลวดเดียวกันจะพันลงในร่อนที่ 13 ซึ่งอยู่กึ่งกลางขั้ว S ขดลวดชนิดนี้พันคลุม 12 ซี่ (teeth) ซึ่งมีระยะห่าง (coil-pitch or coil-span) เท่ากับ 12×15 องศาไฟฟ้า เท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า เรียกว่าระยะห่างของขดลวดและระยะพิชแบบนี้ว่าแบบพิชเต็ม (full-pitch) ข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่ง

ของขดลวดแบบพืชมเต็มก็คือ ขดลวดที่พันอยู่ทั้งด้านล่างและด้านบน (การพันแบบสองชั้น) ของร่องเดียวกันจะต้องเป็นขดลวดเฟสเดียวกัน

ขดลวดสามเฟสแบบพืชมเศษส่วน หมายถึง ระยะห่างระหว่างต้นปลายของขดลวดเดียวกัน ที่พันในร่องของอาเมเจอร์มีค่าน้อยกว่า 1 โพลพิช หรือ 180 องศาไฟฟ้า ถ้าขดอาเมเจอร์ที่มีคอล์ยพืชมแบบพืชมเศษส่วน คือต้นและปลายของขดลวดเดียวกันพันกลุ่ม 10 ซี่ (teeth) จะมีคอล์ยพืชมเท่ากับ $10 \times 15 = 150$ องศาไฟฟ้า คอล์ยพืชมเศษส่วนอาจหาได้จาก

$$\frac{(\text{short-pitch})}{(\text{full-pitch})} = \frac{10}{12}$$

เนื่องจากพืชมเต็ม (full pitch) มีระยะห่างหรือคอล์ยพืชมเป็น 180 องศาไฟฟ้านั้น

$$\begin{aligned} \text{short - pitch} &= \frac{10}{12} \times 180^\circ \\ &= 150 \text{ องศาไฟฟ้า} \end{aligned}$$

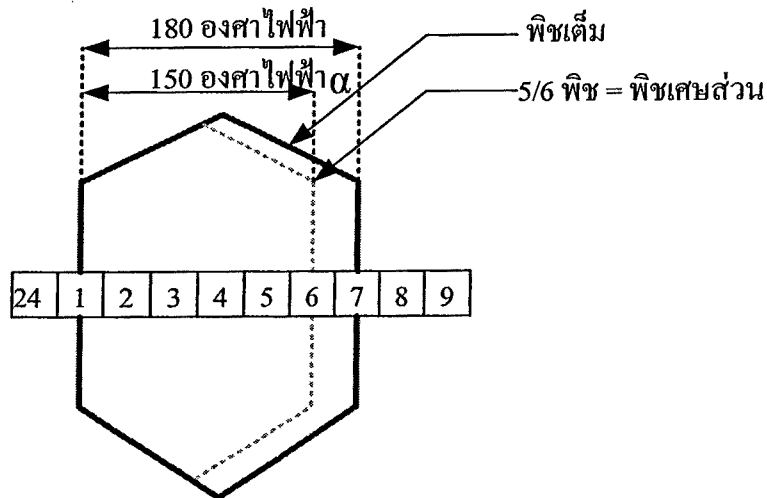
2.3.3.2 สรุปความหมายของคำที่เกี่ยวข้องกับการพันขดลวดอาเมเจอร์

1. โพลพิช (pole-pitch) คือ ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของ N และ S ที่อยู่ประชิดกันมีค่าเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า

2. พืชมเต็ม (full-pitch) คือ ระยะห่างระหว่างคอล์ยไซด์ทั้งสองของขดลวด (coil-pitch) มีระยะห่างเท่ากับ 1 โพลพิชหรือเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า ซึ่งการพันพืชมเต็มใช้ได้ทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟสและ 3 เฟส

3. พืชมเศษส่วน (short pitch หรือ fractional pitch) คือ ระยะห่างระหว่างคอล์ยไซด์ทั้งสองของขดลวดที่มีระยะห่างน้อยกว่า 1 โพลพิชหรือน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้าซึ่งการพันพืชมเศษส่วนส่วนใหญ่ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส

2.3.3.3 พืชมแฟคเตอร์, K_p (pitch factor or coil span factor) เป็นแฟคเตอร์ที่ใช้คูณเข้าไปในสมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้า เนื่องจากการพันขดลวดเป็นแบบ พืชมเศษส่วน (pitch factor or coil span factor)



ภาพที่ 2.21 แสดงการวางขดลวดแบบพิกซ์เต็มและพิกซ์เศษส่วน

จากภาพที่ 2.20 ด้านทั้งสองของขดลวดอยู่ในร่อง 1-7 พันคลุม 6 ซี่ (teeth) เรียกว่า พิกซ์เต็ม (full-pitch) เพราะว่ามีระยะห่างเท่ากับ 1 โพลพิช (180 องศาไฟฟ้า) ถ้าด้านทั้งสองของขดลวดอยู่ในร่อง 1-6 (พันคลุม 5 ซี่) เรียกว่า พิกซ์เศษส่วน (short-pitch หรือ fractional-pitch) .

$$\frac{\text{พิกซ์เศษส่วน}}{\text{พิกซ์เต็ม}} = \frac{5}{6}$$

เนื่องจากพิกซ์เต็มมีระยะห่างของขดลวด 180 องศาไฟฟ้า

หรือ พิกซ์เศษส่วน (short-pitch) = $\frac{5}{6}$ โพลพิช

ดังนั้น พิกซ์เศษส่วน จะมีระยะห่างน้อยกว่า พิกซ์เต็ม

$$= 1 - \frac{5}{6}$$

$$= \frac{1}{6} \text{ โพลพิช}$$

$$= \frac{180^\circ}{6}$$

$$= 30 \text{ องศาไฟฟ้า}$$

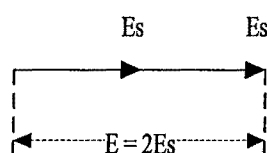
ข้อดีของการพันอาร์เมเจอร์แบบ พิกซ์เศษส่วน (short-pitch)

1. ประหยัดหลอดทองแดงที่ใช้พัน
2. เป็นการแก้ไขหรือปรับปรุงรูปคลื่น (Wave Form) ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีรูปคลื่นที่ดีขึ้น หรือให้มีค่าประมาณเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) และรูปคลื่นรบกวนสามารถทำให้ลดลงได้

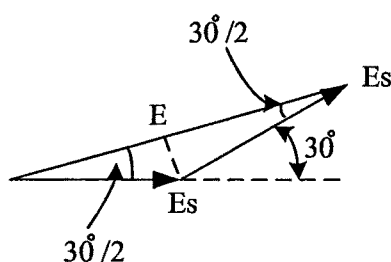
3. เป็นการกำจัดรูปคลื่นรบกวนความถี่สูง การสูญเสียจากกระแสไหลวน และการสูญเสียจากฮิสเตอรีซิสให้มีค่าน้อยลง ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

ข้อเสียของการพันขดลวดแบบไม่เต็มระยะคือ แรงดันไฟฟ้าทั้งหมดที่ขดลวดนั้นค่อนข้างลดลงเพราะว่าแรงดันไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำใน 2 ด้านของขดลวดที่มีการพันแบบไม่เต็มระยะนั้น จะต่างเฟสกันเล็กน้อย ทำให้ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าทางเวกเตอร์มีค่าน้อยกว่าการรวมกันทางคณิตศาสตร์หรือทางเลขคณิต

2.3.3.4 ถ้าวางขดลวดแบบพิชเต็ม



ภาพที่ 2.22 การรวมแรงเคลื่อนแม่เหล็กโดยวิธีเลขคณิต



ภาพที่ 2.23 การรวมแรงเคลื่อนแม่เหล็กโดยวิธีเวกเตอร์

จากภาพที่ 2.23 แสดงแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแต่ละข้าง (coil-side) ของขดลวดจะเกิดขึ้นพร้อมกันและมีทิศทางตามกัน จึงสามารถนำมารวมกันได้โดยวิธีเลขคณิตจะได้

$$E = 2E_s$$

เมื่อ

E_s = แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแต่ละข้างของขดลวด

2.3.3.5 ถ้าวางขดลวดแบบพิเศษส่วน

จากภาพที่ 2.23 แสดงแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแต่ละข้าง(coil-side) ของขดลวดก็จะพันห่างกัน 150 องศาไฟฟ้า $[180 \times (5/6) = 150^\circ]$ ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะเกิดขึ้นไม่พร้อมกันแรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อวางขดลวดแบบพิเศษเต็มและต้องรวมกันทางเวกเตอร์คือ

$$E = 2E_s \cos (30^\circ/2)$$

ถ้าเอาผลทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของพิเศษส่วนหารด้วยผลบวกทางเลขคณิตของพิเศษเต็มผลลัพธ์ที่เรียกว่า พิชแฟกเตอร์ (Pitch Factor) หรือ K_p

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad K_p &= \frac{2E_s \cos (30^\circ/2)}{2E_s} \\ &= \cos 30^\circ/2 \\ &= 0.966 \end{aligned}$$

ดังนั้นสูตรทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณหาพิชแฟกเตอร์ (pitch-factor) คือ

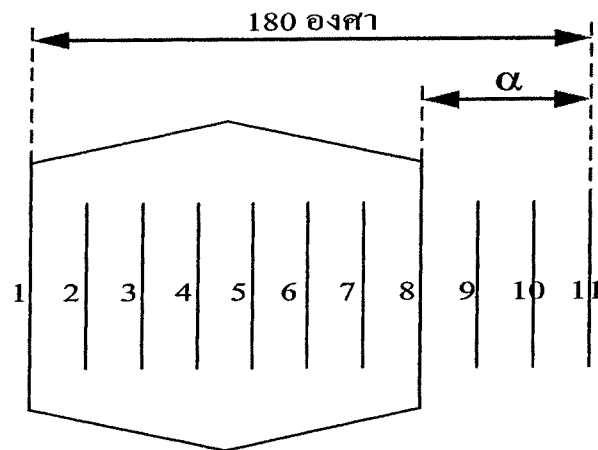
$$K_p = \cos \alpha/2 \quad \dots\dots(2.33)$$

ถ้าการวางขดลวดเป็นแบบพิเศษเต็ม ค่า $K_p = 1$

ตัวอย่างที่ 1 จงคำนวณค่าพิชแฟกเตอร์ของขดลวดตามข้อกำหนดดังนี้

1. อามเจอร์ 36 ร่อง 4 ขั้วแม่เหล็ก ระยะห่างของขดลวด 1-8
2. อามเจอร์ 72 ร่อง 6 ขั้วแม่เหล็ก ระยะห่างของขดลวด 1-10
3. อามเจอร์ 96 ร่อง 6 ขั้วแม่เหล็ก ระยะห่างของขดลวด 1-12

จงเขียนแผนภาพการวางขดลวดทั้ง 3 ข้อด้วย



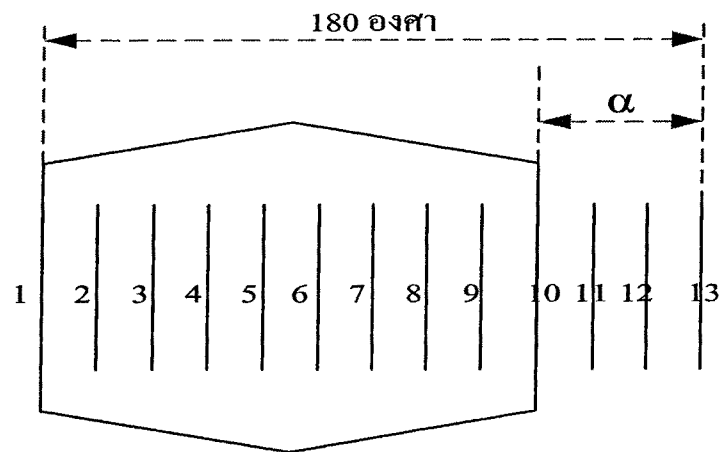
ภาพที่ 2.24 อามะเจอร์ 36 ร่อง 4 ขั้วแม่เหล็ก ระยะห่างของขดลวด 1-8

$$\begin{aligned} \text{จำนวนร่องต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็ก} &= \frac{36}{4} \\ &= 9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวนร่องของระยะพิชเต็ม} &= 1-10 \text{ (พันคลุม 9 ร่อง)} \\ \text{มุมของระยะพิชเศษส่วนที่น้อยกว่าระยะพิชเต็ม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{2}{9} \times 180^\circ \\ &= 40^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_p &= \cos \alpha / 2 \\ &= \cos 40^\circ / 2 \\ &= 0.940 \end{aligned}$$



ภาพที่ 2.25 อามเมเจอร์ 72 ร่อง 6 ขั้วแม่เหล็ก ระยะห่างของขดลวด 1-10

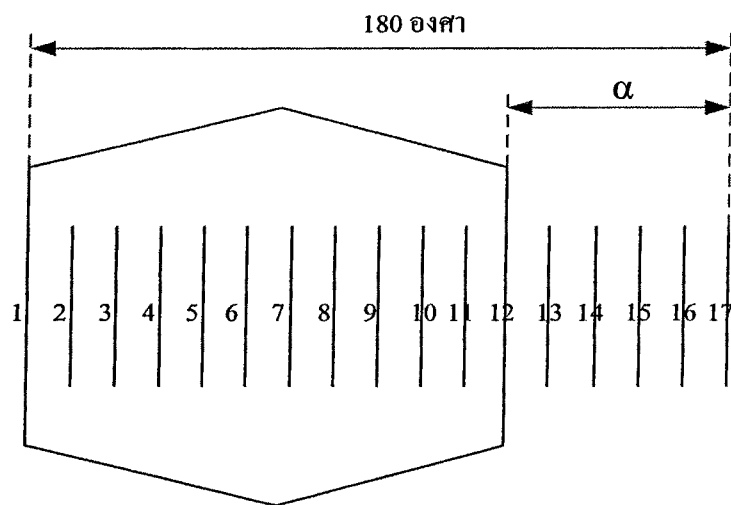
$$\begin{aligned} \text{จำนวนร่องต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็ก} &= \frac{72}{6} \\ &= 12 \end{aligned}$$

$$\text{จำนวนร่องของระยะพิชเต็ม} = 1-13 \text{ (พื้นที่กลุ่ม 7 ร่อง)}$$

ต้องการพื้นที่ให้มีระยะพิชของขดลวด 1-10

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{3}{12} \times 180^\circ \\ &= 45^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_p &= \cos \alpha / 2 \\ &= \cos 45^\circ / 2 \\ &= 0.924 \end{aligned}$$



ภาพที่ 2.26 อามเจอร์ 96 ร่อง 6 ขั้วแม่เหล็ก ระยะห่างของขดลวด 1-12

$$\begin{aligned}\text{จำนวนร่องต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็ก} &= \frac{96}{6} \\ &= 16\end{aligned}$$

$$\text{จำนวนร่องของระยะพิชเต็ม} = 1-17 \text{ (พันคลุม 16 ร่อง)}$$

ต้องการพันให้มีระยะพิชเต็มของขดลวด 1-12

$$\begin{aligned}&= \frac{3}{12} \times 180^\circ \\ &= 56.25^\circ\end{aligned}$$

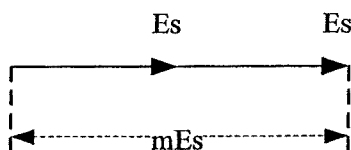
$$\begin{aligned}K_p &= \cos \alpha/2 \\ &= \cos 56.25^\circ/2 \\ &= 0.882\end{aligned}$$

2.3.3.6 ตัวประกอบการกระจาย (Distribution Factor) K_d

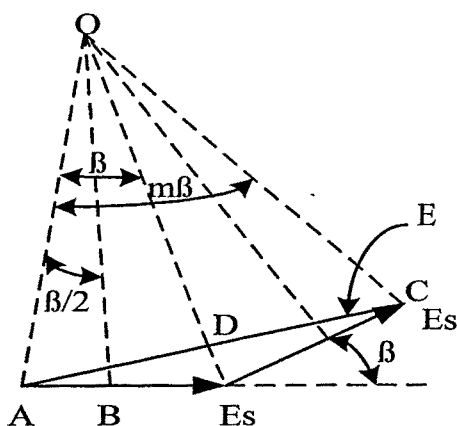
คืออัตราส่วนของผลบวกทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่กระจายอยู่ในร่องต่างกัน (Distribution Winding) ต่อผลบวกทางเลขคณิตของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในขดลวดที่อยู่ในร่องเดียวกัน (Concentrated Winding)

ถ้าอวลัยไซค์ของขดลวดกลุ่มเดียวกัน (coil-group) อยู่ร่องเดียวกันผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเท่ากับ mE_s

$$K_d = \frac{\text{ผลบวกทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในขดลวด}}{\text{ผลบวกทางเลขคณิตของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในขดลวด}}$$



ภาพที่ 2.27 ผลบวกทางเลขคณิตของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในขดลวด

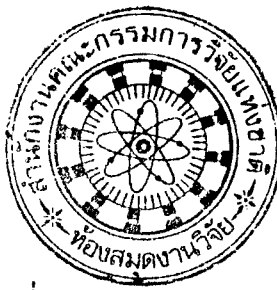


ภาพที่ 2.28 ผลบวกทางเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในขดลวด

ถ้าคอยล์ไซด์ของขดลวดกลุ่มเดียวกัน ถูกพันกระจายอยู่ในร่องแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแต่ละร่อง จะต่างเฟสกันเป็นมุม β ดังนั้นผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในขดลวดแต่ละร่องจะต้องพันรวมกันทางเวกเตอร์

$$K_d = \frac{\sin (m\beta/2)}{m \sin \beta/2} \quad \dots\dots (2.34)$$

การพันขดลวดของแต่ละกลุ่มให้กระจายไปหลายร่อง (Distribution Winding) ดีกว่าการพันรวมอยู่ในร่องเดียว (Concentrated Winding) เพราะว่า ทำให้รูปคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ (sine wave) มากขึ้นและลดอุณหภูมิที่สูงขึ้นตรงกึ่งกลางร่อง



2.3.3.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (กรณีออกแบบ 1 เฟส)

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \times N_c \times f \times \phi_{\max} \times \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (V) \quad \dots\dots (2.35)$$

เมื่อ

N_c = จำนวนรอบของขดลวด

N_s = จำนวนขดลวด

N_{ph} = จำนวนเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(กรณี 3 เฟส $N_{ph} = 3$)

(กรณี 1 เฟส $N_{ph} = 1$)

$\phi_{\max}$ = คี้อค่า fundamental flux จากแม่เหล็ก

ความถี่ไฟฟ้า

$$f = \frac{N_p}{120} \times N \quad (Hz)$$

เมื่อ

N_p = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

N = ความเร็วรอบ (rpm)

$$\phi_{\max} = A_{\text{magn}} B_{\max} \quad (Wb) \quad \dots\dots (2.36)$$

เมื่อ A_{magn} = พื้นที่หน้าตัดแม่เหล็กแต่ละแท่ง = ความกว้าง x ความยาว

$$A_{\text{magn}} = l \times w \quad \dots\dots (2.37)$$

เมื่อ $B_{\max}$ = ค่าความหนาแน่นสูงสุดของสนามแม่เหล็ก ผ่าน Air gap

$$B_{\max} = B_r \frac{\delta}{A_{\text{gap}} + \delta} \quad \dots\dots (2.38)$$

เมื่อ

A_{gap} = คี้อช่องว่างระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์

δ = คี้อความหนาแท่งแม่เหล็ก

B_r = คี้อความหนาแน่นสนามแม่เหล็กบริเวณผิว

2.3.3.8 การหาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad \text{.....(2.39)}$$

เมื่อ

$$P_{in} = \text{กำลังขับ} \quad (W)$$

$$P_{out} = \text{กำลังจ่ายออก} \quad (W)$$

$$\eta = \text{ประสิทธิภาพ} \quad (\%)$$

$$P_{in} = T_{shaft} \times 2\pi \times \frac{N}{60} \quad (W) \quad \text{.....(2.40)}$$

เมื่อ

$$T_{shaft} = \text{แรงบิด} \quad (N.m)$$

$$N = \text{ความเร็วรอบ} \quad (rpm)$$

$$P_{out} = V \times I \cos \theta \quad (W) \quad \text{..... (2.41)}$$

เมื่อ

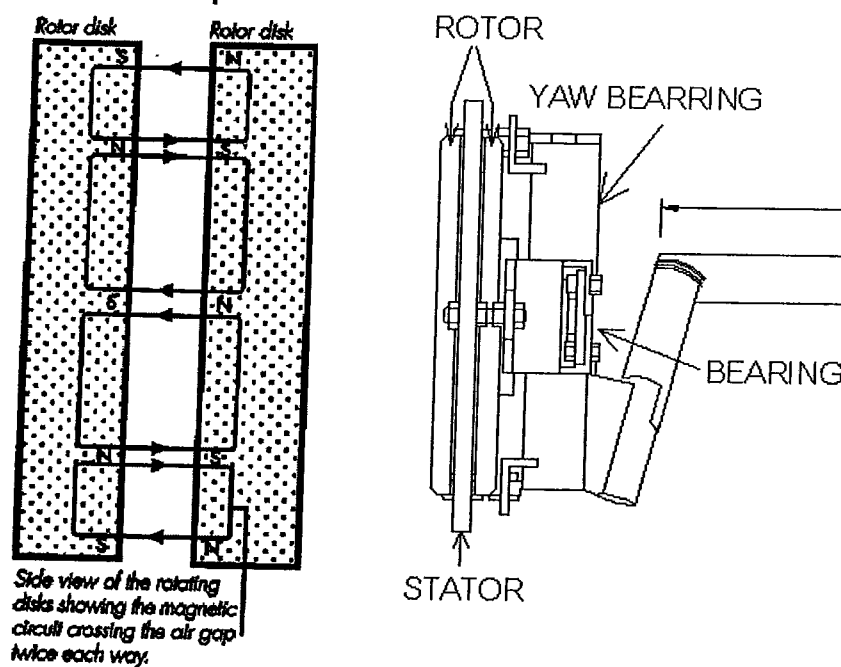
$$V = \text{แรงดันจ่ายออก} \quad (V)$$

$$I = \text{กระแส} \quad (A)$$

$$\cos \theta = \text{เพาเวอร์แฟคเตอร์ (p.f) ของโหลด}$$

2.3.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Generator / PMG)

โครงการนี้จะสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรซึ่งเหมาะกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กเพราะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานด้วยความเร็วรอบต่ำไม่ต้องป้อนกระแสไฟฟ้าให้ตัวโรเตอร์สามารถใช้งานและติดตั้งได้สะดวก การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไฟฟ้านั้นจะต้องทราบค่าความเร็วลมโดยเฉลี่ยบริเวณที่ต้องการติดตั้งกังหันลมและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับกังหันลมนี้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรออกแบบให้มีพิกัดแรงดัน 24 โวลต์ กระแส 30 แอมป์ กำลังการผลิต 750 วัตต์ ลักษณะโรเตอร์เป็นแผ่นเหล็กติดแม่เหล็กถาวร (NdFeB) จำนวน 12 ขั้ว 2 แผ่น จะส่งสนามแม่เหล็กระหว่างแผ่นโรเตอร์โดยมีแผ่นสเตเตอร์ชั้นระหว่างกลาง สเตเตอร์ ดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 สนามแม่เหล็กจากแผ่นโรเตอร์

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม } P = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi}{4} D^2 V^3 C_p \quad \dots\dots (2.42)$$

เมื่อ

$$P = \text{กำลังจากกังหัน (W)}$$

$$V = \text{ความเร็วลม (m/s)}$$

$$\rho = \text{ความหนาแน่นมวลอากาศ } (\approx 1.2 \text{ kg/m}^3)$$

$$D = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางใบกังหัน (3 m)}$$

$$C_p = \text{สัมประสิทธิ์พลังงานจากกังหันลม (0.15)}$$

$$\text{ความเร็วรอบของกังหัน } N = \frac{60 \times V \times \lambda}{\pi D} \text{ rpm} \quad \dots\dots (2.43)$$

เมื่อ

λ คืออัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหัน

ความถี่ไฟฟ้า $f = \frac{N_p}{120} \times N$ (Hz) (2.44)

เมื่อ N_p คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก (12 pole)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำค่ายอดแต่ละเฟส

$$E_{ph,max} = 2\pi \times N_c \times f \times \phi_{max} \times \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (V) \quad \dots\dots (2.45)$$

เมื่อ

N_c = จำนวนรอบของขดลวด (150 รอบ)

N_s = จำนวนขดลวด (5 ขด)

N_{ph} = จำนวนเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (5 เฟส)

ϕ_{max} = ค่า fundamental flux จากแม่เหล็กหาได้จาก

$$\phi_{max} = A_{magn} B_{max} \quad \dots\dots (2.46)$$

เมื่อ A_{magn} คือ พื้นที่หน้าตัดแม่เหล็กแต่ละแท่ง = ความกว้าง x ความยาว

$$A_{magn} = l \times w \quad \dots\dots (2.47)$$

$$= 50\text{mm} \times 25\text{mm} = 1.25 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

เมื่อ B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นสูงสุดของสนามแม่เหล็ก ผ่าน Air gap

$$B_{max} = B_r \frac{\delta}{A_{gap} + \delta} \quad \dots\dots (2.48)$$

$$= 0.675\text{T} \times 0.75 = 0.506\text{T}$$

เมื่อ A_{gap} คือ ช่องว่างระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ (6 mm.)

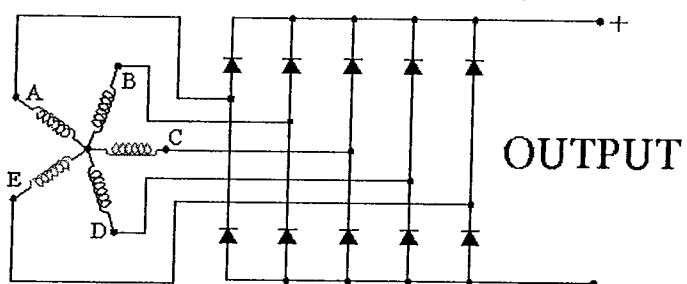
δ คือ ความหนาแท่งแม่เหล็ก (12.5 mm.)

B_r คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กบริเวณผิวแท่งแม่เหล็ก (1 T)

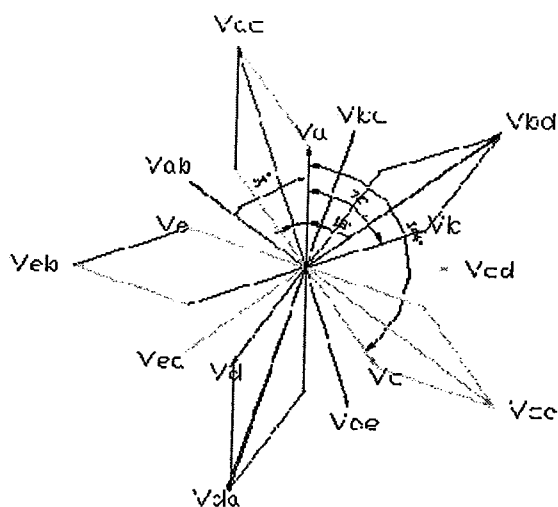
$$\phi_{max} = 1.25 \times 10^{-3} \times 0.506 = 6.32 \times 10^{-4} \text{wb}$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้า rms แต่ละเฟส $E_{ph,rms} = \frac{E_{ph,max}}{\sqrt{2}} \quad \dots\dots (2.49)$

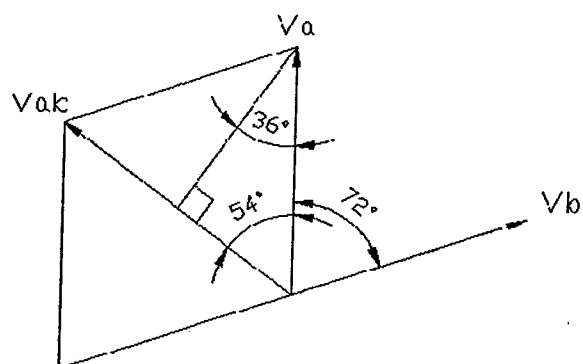
แรงเคลื่อนไฟฟ้า rms ระหว่างเฟส $E_{L-L,rms} = \frac{E_{L-L,max}}{\sqrt{2}}$ (2.50)



ภาพที่ 2.30 แสดงการต่อขดลวดแบบสตาร์ (Star) ผ่านวงจรแปลงผัน AC-DC



ภาพที่ 2.31 เฟสเซอร์ไดอะแกรมไฟฟ้ากระแสสลับ 5 เฟส



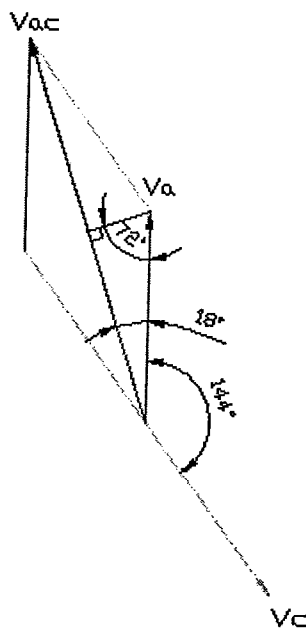
ภาพที่ 2.32 เฟสเซอร์ไดอะแกรม V_{ab}

จากภาพที่ 2.32 สามารถคำนวณหาแรงดัน V_{ab} ดังนี้

$$\sin 36 = \frac{1}{2} \frac{V_{ab}}{V_a}$$

$$\begin{aligned} V_{ab} &= 2V_a \times \sin 36 \\ &= 1.18V_a \end{aligned}$$

..... (2.51)



ภาพที่ 2.33 เฟสเซอร์ไดอะแกรม V_{ac}

จากภาพที่ 2.33 สามารถคำนวณค่าแรงดัน V_{ac} ได้ดังนี้

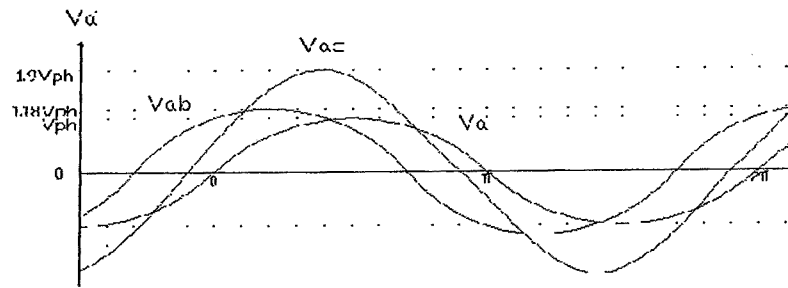
$$\sin 72 = \frac{1}{2} \frac{V_{ac}}{V_a}$$

$$\begin{aligned} V_{ac} &= 2V_a \sin 72 \\ &= 1.905V_a \end{aligned}$$

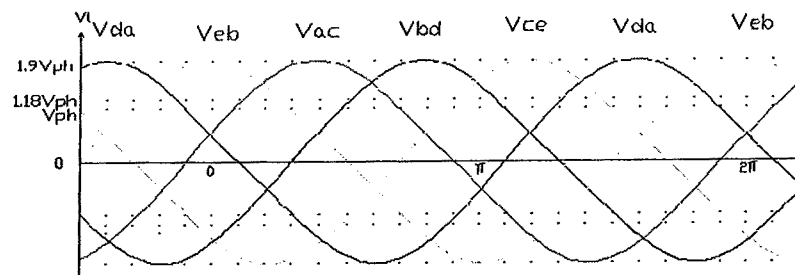
ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าค่าขอยระหว่างเฟส

$$V_{L-L,max} = 1.905E_{ph,max}$$

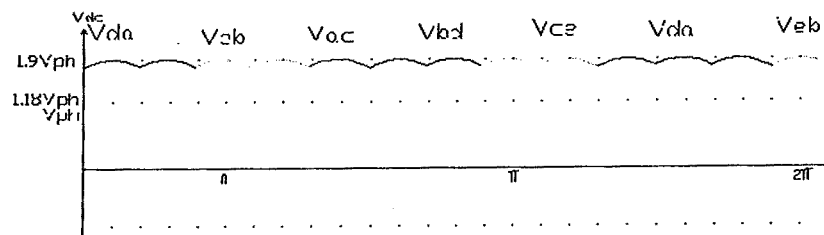
..... (2.52)



ก.) รูปคลื่น V_a, V_{ab}, V_{ac}

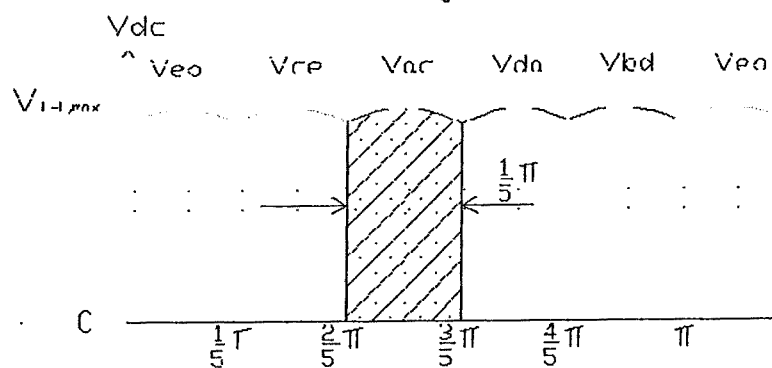


ข.) รูปคลื่นแรงดัน (V_{L-L}) ไฟฟ้ากระแสลับ 5 เฟส



ค.) รูปคลื่นแรงดันผ่านวงจรแปลงผัน (AC-DC) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ภาพที่ 2.34 ลักษณะรูปคลื่นต่างๆ



ภาพที่ 2.35 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากภาพที่ 2.35 สามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้จากสมการ 2.33

$$\text{แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง} \quad V_{dc} = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} V_p \sin \theta d\theta}{\theta_2 - \theta_1} \quad \dots\dots (2.53)$$

เมื่อ $\theta_1 = \frac{2}{5}\pi$ และ $\theta_2 = \frac{3}{5}\pi$ แทนในสมการที่ 2.53

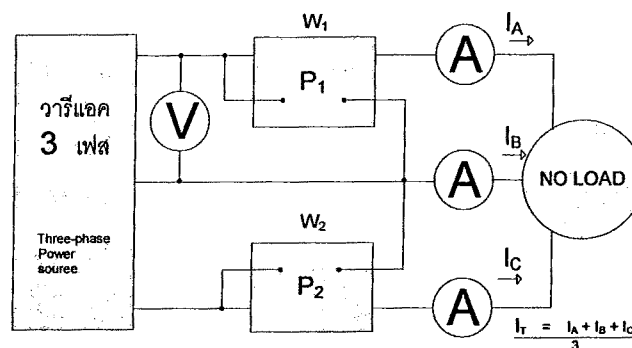
$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= V_{L-Lmax} \int_{\frac{2}{5}\pi}^{\frac{3}{5}\pi} \frac{\sin\theta d\theta}{\left(\frac{3}{5}\pi - \frac{2}{5}\pi\right)} \\
 &= \frac{5}{\pi} V_{L-Lmax} \int_{\frac{2}{5}\pi}^{\frac{3}{5}\pi} \sin\theta d\theta \\
 &= \frac{5}{\pi} V_{L-Lmax} \left(-\cos\frac{3}{5}\pi + \cos\frac{2}{5}\pi \right) \\
 V_{dc} &= 0.9836 V_{L-Lmax} \quad \text{..... (2.54)}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 2.51 จะได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= 0.9836 \times (\sqrt{2} \times V_{L-L,rms}) \\
 V_{dc} &= 1.39 V_{L-L,rms} \quad \text{..... (2.55)}
 \end{aligned}$$

2.4 การทดสอบ เครื่องกำเนิดขณะไม่มีโหลด (No-load Test)

ขณะมอเตอร์ทำงานโดยไม่มีโหลด จะมีความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัสมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติจะสมมติว่ามอเตอร์มีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสการทดสอบขณะไม่มีโหลดทำได้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันป้อนให้สูงและต่ำกว่าแรงดันป้อนเต็มพิกัด แล้ววัดค่ากำลังไฟฟ้า P_0 ด้วยวัตต์มิเตอร์ วัดกระแสขณะไม่มีโหลด I_0 ด้วยแอมมิเตอร์ วัดแรงดันป้อนเต็มพิกัด V ด้วยโวลต์มิเตอร์ ดังภาพที่ 2.36



ภาพที่ 2.36 วงจรทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลดและลัดโรเตอร์

ขณะมอเตอร์ทำงานโดยไม่มีโหลด ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์จะต่ำกว่า 0.5 ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์ P_0 จะมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์ W_1 และ W_2 ดังภาพที่ 2.36

$$P_0 = \sqrt{3}VI_0\cos\phi_0$$

กำลังอินพุทของมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด P_0 นี้ ประกอบด้วย

- ก. การสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (stator Cu loss $= 3I_0^2R_1$)
- ข. การสูญเสียในแกนเหล็กสเตเตอร์ (stator core loss)
- ค. การสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลม(friction and windage losses)

การสูญเสียในข้อ ก. อาจจะละทิ้งได้ ถ้าถือว่ากระแสขณะไม่มีโหลด I_0 มีค่าน้อยมาก ส่วนการสูญเสียในข้อ ข. และ ค. คือการสูญเสียคงที่(fixed losses) ถึงแม้ว่าโหลดของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ค่าการสูญเสียคงที่นี้จะไม่เปลี่ยนแปลง

การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะจับ โรเตอร์หยุดนิ่ง (Blocked rotor test)

การทดสอบนี้อาจจะเรียกว่า lock rotor test หรือ short circuit test ก็ได้โดยการจับโรเตอร์ให้หยุดนิ่ง ถ้าเป็นมอเตอร์แบบวาวด์-โรเตอร์จะต้องลัดวงจรขดลวดโรเตอร์ที่สลีปลิงเสียก่อนก่อน เช่นเดียวกับการทดสอบขณะลัดวงจรของหม้อแปลง ก็จะต้องลดแรงดันป้อนลงเหลือประมาณ 15 – 20 % ของแรงดันป้อนเต็มพิกัด จนกระทั่งได้กระแสสเตเตอร์หรือกระแสลัดวงจร I_s เท่ากับกระแสเต็มพิกัด (rated current) วัดค่ากำลังไฟฟ้าขณะลัดวงจร P_s และแรงดันขณะลัดวงจร V_s

1. ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าขณะลัดวงจร

ให้ V = แรงดันป้อนเต็มพิกัด

V_s = แรงดันป้อนขณะลัดวงจร (ประมาณ 15 – 20 % ของ V)

หากระแสลัดวงจรเมื่อป้อนแรงดันเต็มพิกัด หรือกระแสสตาร์ทได้จากความสัมพันธ์

ดังนี้

$$I_{sn} = I_s \times \frac{V}{V_s}$$

เมื่อ

I_{sn} = กระแสลัดวงจรเมื่อป้อนแรงดันเต็มพิกัด V

I_s = กระแสลัดวงจรเมื่อป้อนแรงดัน V_s

2. เพาเวอร์แฟกเตอร์ขณะลัดวงจร หาได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$P_s = \sqrt{3}V_s I_s \cos\phi_s$$

$$\cos\phi_s = P_s / \sqrt{3}V_s I_s$$

เมื่อ

$$P_s = \text{กำลังอินพุทขณะลัดวงจร}$$

$$\cos\phi_s = \text{เพาเวอร์แฟกเตอร์ขณะลัดวงจร}$$

3. กำลังอินพุทขณะลัดวงจร ประกอบด้วย

ก. การสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ (total Cu losses)

ข. การสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) มีค่าน้อยมาก เพราะว่าขณะลัดวงจรต้องป้อนแรงดันด้วยขนาดต่ำกว่าปกติมาก จึงอาจจะละทิ้งได้

2.5 ชุดควบคุมแรงดัน

ชุดควบคุมแรงดันประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์ วงจรทระดับแรงดันอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ตัวควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม การกระทำการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

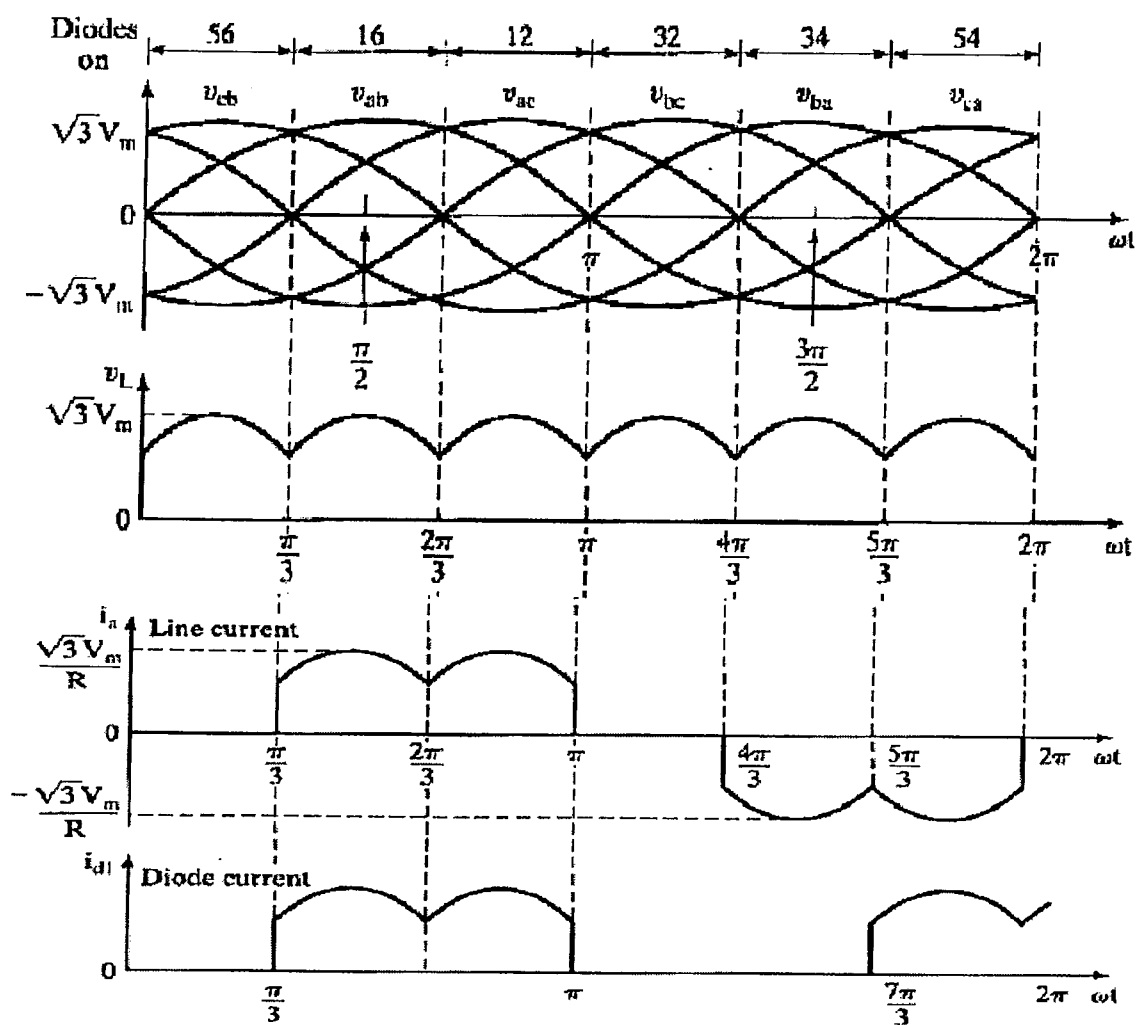
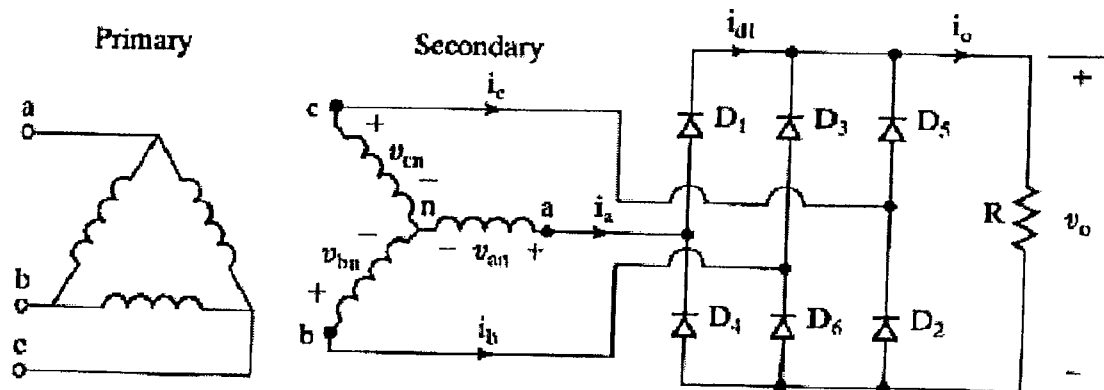
2.5.1 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์จะใช้กับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงๆ และจะให้รูปคลื่นที่เรียกว่าเป็นฟูลเวป โดยจะขดคลื่น 6 ขอดลูกคลื่นต่อหนึ่งคาบเวลา ซึ่งจะทำให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีริบเบิลน้อยมาก สามารถหาค่าคาปาซิเตอร์ที่มีค่าไม่สูงนักทำหน้าที่ฟิลเตอร์ก็จะได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีริบเบิล

$$V_{an} = V_m \sin(\omega t)$$

$$V_{bn} = V_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$V_{cn} = V_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$



ภาพที่ 2.37 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส

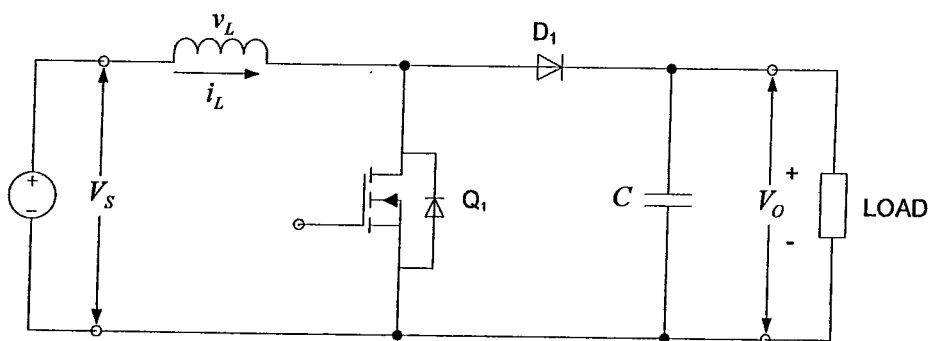
การนำกระแสของไดโอดแต่ละตัวจะมีเวลาในการนำกระแส 120° และการนำกระแสของไดโอดแต่ละครั้งจะนำกระแสกันเป็นคู่แต่ละคู่จะนำกระแส 60° ซึ่งหากใช้สัญญาณลูกคลื่น V_{ab} เป็นสัญญาณอ้างอิงก็จะเห็นว่า ไดโอด D1 และ D2 นำกระแสพร้อมกันที่มุม $0 - \frac{\pi}{3}$ ไดโอด D3 และ D2 นำกระแสพร้อมกันที่มุม $\frac{\pi}{3} - \frac{2\pi}{3}$ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคู่ของไดโอดที่นำกระแส และมุมนำกระแสของไดโอด

คู่ของไดโอดที่นำกระแส	มุมนำกระแสของไดโอด
D1 - D2	$0 - \frac{\pi}{3}$
D3 - D2	$\frac{\pi}{3} - \frac{2\pi}{3}$
D3 - D4	$\frac{2\pi}{3} - \pi$
D5 - D4	$\pi - \frac{4\pi}{3}$
D5 - D6	$\frac{4\pi}{3} - \frac{5\pi}{3}$
D1 - D6	$\frac{5\pi}{3} - 2\pi$

2.5.2 วงจรทบทระดับแรงดัน

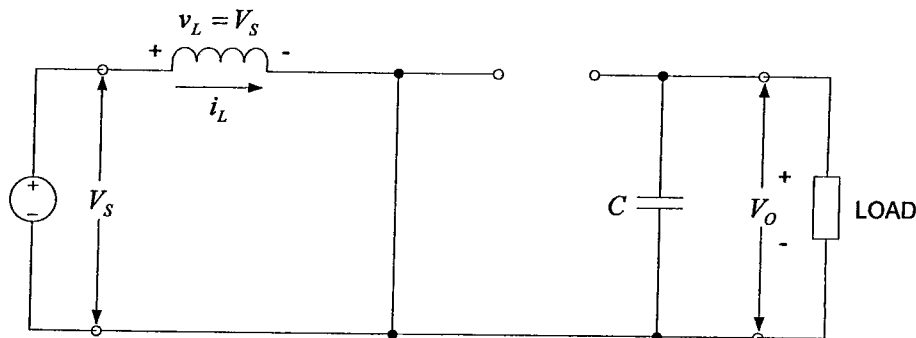
ตัวแปลงผันแบบทบทระดับเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง (DC-DC Converter) ชนิดหนึ่งที่จะทำให้แรงดัน ทางด้านเอาต์พุตมีค่ามากกว่าแรงดันทางด้านอินพุตดังวงจรในภาพที่ 2.38 การทำงานจะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบกระแสต่อเนื่องและแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องที่ใช้ในโครงการ



ภาพที่ 2.38 วงจรแปลงผันแบบทบทระดับแรงดัน

หลักการการทำงานของวงจรทระดับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามต้องการ จะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์และ สามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัวดังนี้

ขณะสวิตช์นำกระแส จากภาพที่ 2.38 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 2.39 จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าดังนี้



ภาพที่ 2.39 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

$$-V_s + v_L = 0 \quad \text{..... (2.56)}$$

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{..... (2.57)}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad \text{..... (2.58)}$$

เมื่อ

V_s คือแรงดันแหล่งจ่าย

v_L คือแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

L คือตัวเหนี่ยวนำ

i_L คือกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ

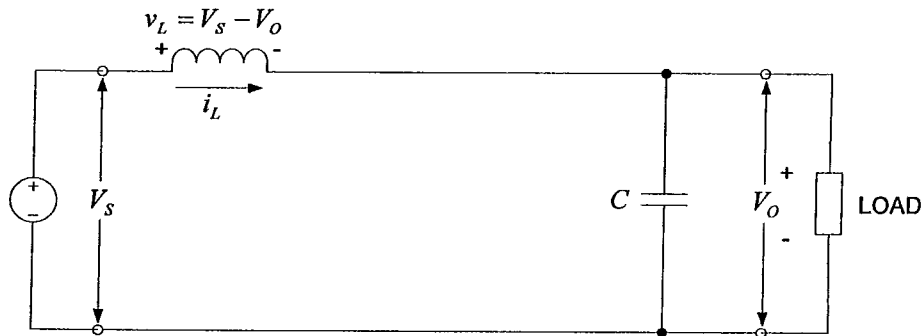
ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่
อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad \text{..... (2.59)}$$

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_s DT}{L} \quad \text{..... (2.60)}$$

$\Delta i_{L,on}$ หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะนำกระแส

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



ภาพที่ 2.40 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมุติแรงดันไฟฟ้าที่ด้านออกมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$-V_s + v_L + V_o = 0 \quad \text{..... (2.61)}$$

$$v_L = V_s - V_o \quad \text{..... (2.62)}$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{.....}$$

(2.63)

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad \text{..... (2.64)}$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส $dt = (1-D)T$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่และอาจจะถือว่าการลดลงของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) (1-D)T \quad \text{..... (2.65)}$$

ที่สภาวะคงตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad \text{..... (2.66)}$$

$$\left(\frac{V_s}{L}\right)DT + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad \text{..... (2.67)}$$

$$V_s D + (V_s - V_o)(1-D) = 0$$

$$V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0$$

$$V_s - V_o(1-D) = 0$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad \text{..... (2.68)}$$

2.5.2.1 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรทบทระดับแรงดัน

สมมุติการสูญเสียภายในวงจรทบทระดับแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ กำลังไฟฟ้าที่ออกจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับโดยให้ โหลดเป็นตัวต้านทาน จะได้

$$P_s = P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad \text{..... (2.69)}$$

$$P_s = V_s I_s = V_s I_L \quad \text{..... (2.70)}$$

$$V_s I_L = \frac{V_o^2}{R} \quad \text{..... (2.71)}$$

จาก $V_o = \frac{V_s}{1-D}$ และ $V_s I_L = \frac{\left(\frac{V_s}{1-D}\right)^2}{R}$

ดังนั้นจะได้ว่า $I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} \quad \text{..... (2.72)}$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุด หาได้จากค่าเฉลี่ย และการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส และจะหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุด คือ

$$I_{L,max} = i_L + \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$I_{L,max} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right) \quad \text{..... (2.73)}$$

$$I_{L,min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right) \quad \text{..... (2.74)}$$

สมมติให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและมีค่าเป็นบวก ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่ทำให้วงจรทระดับแรงดันทำงานได้ในขอบเขตระหว่างโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ได้จากการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ดังสมการ (2.75)

$$I_{L,\min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right) = 0 \quad \dots\dots (2.75)$$

$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right)$$

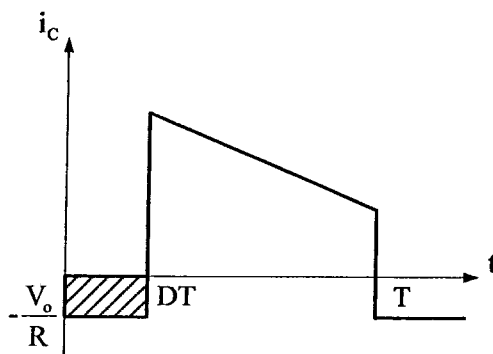
$$I_{L,\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad \dots\dots (2.76)$$

การปรับค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด จากสมการ (2.76) สามารถทำได้ โดยการปรับค่า D หรือค่าความต้านทานโหลด R หรือค่าความถี่สวิตช์

2.5.2.2 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก

การที่มีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะสามารถรักษาให้รักษาให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มาๆ ได้เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสมและค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

การคำนวณหาระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากขอดถึงขอดสามารถหาได้จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังภาพที่ 2.41



ภาพที่ 2.41 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

$$| \Delta Q | = C \Delta V_o = I_o \Delta t_{on} \quad \dots\dots (2.77)$$

จาก $I_o = \frac{V_o}{R}$ และ $\Delta t_{on} = DT$

ดังนั้นจะได้

$$\Delta V_o = \frac{I_o \Delta t_{on}}{C} = \frac{V_o DT}{RC}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT}{RC} \quad \dots\dots (2.78)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad \dots\dots (2.79)$$

เมื่อต้องการจะลดอัตราะลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะทำได้โดยการลดค่า D ให้เข้าใกล้ศูนย์ หรือการเพิ่มค่าโหลด หรือเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุ หรือเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตช์ให้สูงขึ้น

2.5.3 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งโครงสร้าง และรูปคลื่นสัญญาณของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแสดงอยู่ในภาพที่ 2.42(ก)

เทคนิค PWM สามารถใช้ได้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ไม่ว่าจะเป็นเทคนิคไซน์ตัดสามเหลี่ยม หรือเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกต่ำ หรือการควบคุมรูปคลื่นของกระแส

ภาพที่ 2.42(ข) แสดงหลักการของเทคนิคไซน์ตัดสามเหลี่ยม เรามีรูปสามเหลี่ยม V_T ซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ และมีสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ 3 สัญญาณได้แก่คือ V_{rA} , V_{rB} และ V_{rC} ซึ่งมีมุมเฟสต่างกัน 120° โดยมีจุดตัดระหว่าง V_T กับ V_{rA} (V_{rB} และ V_{rC}) เป็นตัวกำหนดการตัดต่อวงจรของสวิตช์ (Q_1 , Q_4 , Q_3 , Q_6 และ Q_5 , Q_2 ตามลำดับ) รูปคลื่นของแรงดัน V_{AG} , V_{BG} (G คือสายลบของแหล่งแรงดันไฟตรง) และ V_{AB} แสดงอยู่ในรูปที่ 2.42(ค) สังเกตได้ว่าองค์ประกอบหลักมูลของ V_{AG} หรือ V_{AG1} มีแอมพลิจูดเท่ากับค่าที่แสดงในสมการที่(2.80) V_{AG} ต่างกับ V_{AO} เพียงค่าแรงดันไฟตรง $V_s/2$

$$V_{AG1} = m_a V_s \quad ; m_a = 0.5 \quad \dots\dots (2.80)$$

แรงดันสาย V_{AB} มีองค์ประกอบหลักมูลเท่ากับ V_{AB1} แอมพลิจูดของ V_{AB1} เท่ากับ $\sqrt{3}$ ของแอมพลิจูดของ V_{AG1} เนื่องจาก V_{AG} และ V_{BG} มีเฟสต่างกัน 120° และ V_{AB1} มีเฟสล่าหลัง V_{AG1} อยู่ 30° (แสดงในภาพที่ 2.42(ค)) ดังนั้น

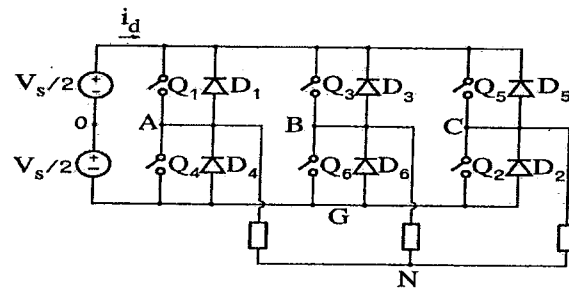
$$V_{AB1} = \sqrt{3} m_a V_s \quad ; m_a = 0.5 \quad \dots\dots (2.81)$$

ในการออกแบบระบบ โดยทั่วไปนิยมเลือกอัตราการมอดูเลตความถี่ m_f เป็นเลขคู่และเป็นพหุคูณของ 3 และให้ความลาดชันของ V_r และ V_r ณ จุดที่แรงดันทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์มี

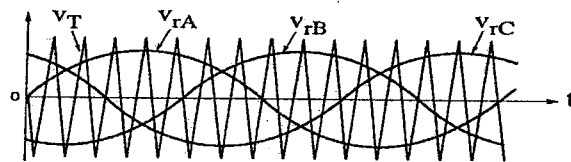
เครื่องหมายตรงกันข้ามกัน(แสดงในภาพที่ 2.42(ข)) ในกรณีนี้ถ้า $m_s \approx 0.5$ สเปกตรัมของ V_{AB} จะเป็นดังแสดงในภาพที่ 2.42(ง) นอกจากนี้สังเกตได้ว่าฮาร์มอนิกต่ำสุดเกิดขึ้นที่ความถี่ $(m_r \pm 2k)f_s$ ตารางที่ 2.2 แสดงฮาร์มอนิกของแรงดันสายของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เราอาจจะออกแบบให้วงจรทำงานถึงในย่านการมอดูเลตเกิน เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าสูงขึ้น ส่วนข้อเสียที่เนื่องมาแต่ฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้นมักจะพอยอมรับได้

ถ้าโหลดมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำโดยมีค่าคงตัวเวลาที่เป็นไปตามเงื่อนไข กระแสโหลดจะเป็นรูปใกล้เคียงไซน์โดย ทิศทางของกระแสโหลดเป็นตัวกำหนดการนำกระแสของไดโอด เช่น กรณีที่เฟสของโหลดเท่ากับ 30° (ตามลำหลัง) โดยสังเกตได้ว่าในช่วงเวลาที่ $i_c > 0$ และ $V_{CG} = 0$ (Q_2 หรือ D_2 นำกระแส) แต่ทิศทางของ i_c แสดงว่า D_2 นำกระแส (แสดงในภาพที่ 2.42(ก))

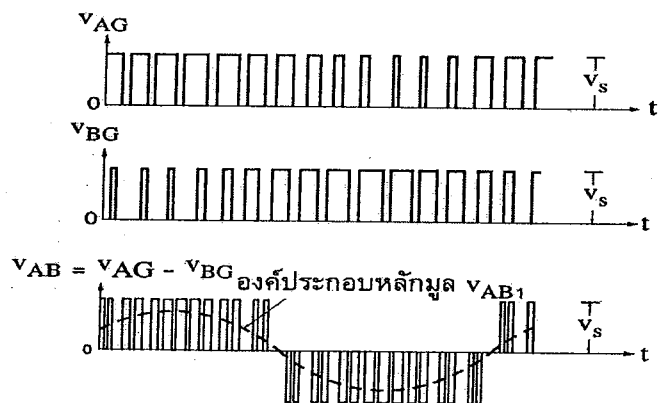
เมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณในภาพที่ 2.42 จะพบว่า ในบางช่วงเวลาดังแสดงในรูปล่าง สวิตช์จะตอกลงทั้งสามของโหลดเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่าย V_s (เช่น เมื่อ Q_4, Q_6, Q_2 นำกระแส) และบางช่วงเวลาสวิตช์จะตอกลงทั้งสามของโหลดเข้ากับขั้วบวกของแหล่ง V_s (เช่น เมื่อ Q_1, Q_3, Q_6 นำกระแส) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว กระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์ (i_c ในภาพที่ 2.42 (ก)) มีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่ากำลังงานไม่ไหลจากแหล่งจ่ายสู่โหลด ซึ่งระยะเวลาของการควบคุมช่วงเวลาดังกล่าวเป็นการควบคุมกำลังงานที่จ่ายให้แก่โหลด หรือควบคุมค่าองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันเอาต์พุตนั่นเอง



(ก) วงจร

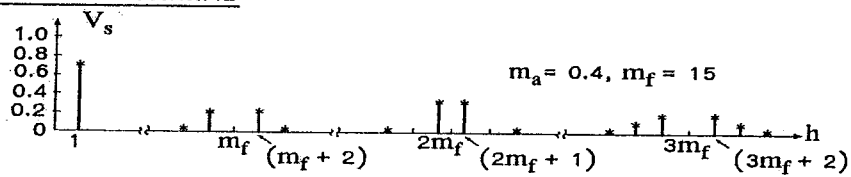


(ข) ไชน์ตัดสามเหลี่ยม



(ค) รูปคลื่น

ฮาร์มอนิกของแรงดันสาย



(ง) สเปกตรัม

ภาพที่ 2.42 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM

2.5.4 ตัวควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม

ตัวควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณทางออก (Output) ของระบบกับสัญญาณทางเข้า (Input) หรือค่าที่ต้องการควบคุมหรือค่าอ้างอิง (Reference) ที่มีค่าคงที่ของระบบ ผลของการเปรียบเทียบที่ได้คือค่าเบี่ยงเบนหรือค่าผิดพลาด (Error) หลังจากนั้นตัวควบคุมอัตโนมัติจะนำค่าเบี่ยงเบนไปสร้างเป็นสัญญาณขึ้นมาใหม่เพื่อควบคุมให้ระบบลดการเบี่ยงเบนหรือ ลดค่าผิดพลาดลงให้เป็นศูนย์หรือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ลักษณะการทำงานของตัวควบคุมอัตโนมัติที่สร้างสัญญาณขึ้นมาควบคุมระบบดังกล่าวนี้ เรียกว่า “การทำงานควบคุม” ซึ่งสามารถแบ่งตัวควบคุมอัตโนมัติออกเป็นแบบต่างๆ ได้ดังนี้

- 1) ตัวควบคุมแบบ ปิด-เปิด หรือ แบบสองตำแหน่ง
- 2) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller หรือ P Controller)
- 3) ตัวควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย (Integral Controller หรือ I Controller)
- 4) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย (PI Controller)
- 5) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบอนุพันธ์ (PD Controller)
- 6) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย ร่วมกับแบบอนุพันธ์ (Proportional plus Integral plus Derivative Controller หรือ PID Controller)

ตัวควบคุมอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ จะใช้ในระบบควบคุมความดันของของไหล เช่น น้ำมัน หรือ อากาศ การเลือกใช้ตัวควบคุมอัตโนมัติต้องดูความเหมาะสมของโรงงานและสถานะการทำงาน อาจรวมไปถึงความปลอดภัย ความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ขนาดและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ซึ่งในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะในส่วน of ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย (PI Controller) เพียงอย่างเดียว

2.5.5 การกระทำการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย

(Proportional plus Integral Control Action)

การกระทำการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วยหรือการควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) นี้ค่าของสัญญาณทางออกของตัวควบคุมกำหนดได้ดังสมการที่ (2.82)

$$M(t) = K_p E(t) + \left(\frac{K_p}{T_i} \right) \int_0^t E(t) dt \quad \dots\dots (2.82)$$

เมื่อ

$M(t)$ คือ สัญญาณทางออกของตัวควบคุม

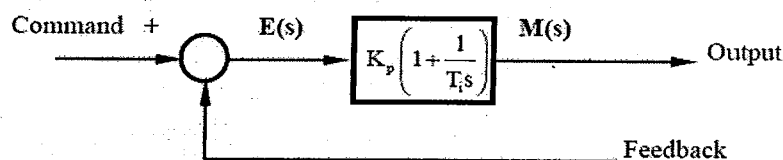
$E(t)$ คือ สัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้น

หรือเขียนในรูปของฟังก์ชัน โอนย้าย (Transfer Function) ได้คือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{..... (2.83)}$$

เมื่อ K_p คือ ความไวของสัดส่วนหรืออัตราขยาย
 T_i คือ เวลาบูรณาการรวมหน่วย

ค่าของ K_p และ T_i สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าได้ ซึ่งการปรับค่าจะมีผลต่อการกระทำ การควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย แต่ถ้าปรับค่าความไวของสัดส่วน K_p จะส่งผลให้ทั้งการกระทำ การควบคุมแบบสัดส่วนและการกระทำแบบบูรณาการรวมหน่วย ส่วนกลับของ T_i เรียกว่า “อัตราส่วนจัดใหม่” เป็นจำนวนครั้งต่อวินาที การควบคุมแบบสัดส่วนเริ่มต้นใหม่ จากสมการที่(2.83) เขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ได้ดังภาพที่ 2.44



ภาพที่ 2.44 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย

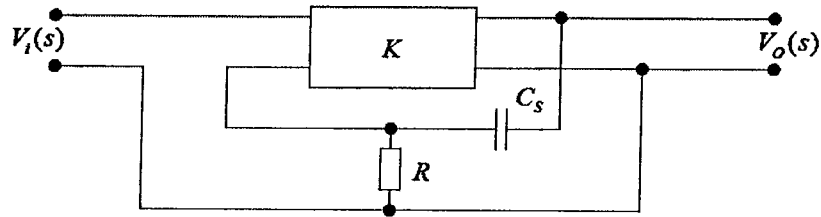
สมมติให้สัญญาณผิดพลาด $E(t)$ เป็นฟังก์ชันยูนิตสเตป (unit step) ดังภาพที่ 2.45

(ก) สัญญาณทางขาออกของตัวควบคุม $M(s)$ จะได้ดังภาพที่ 2.45(ข)



ภาพที่ 2.45 สัญญาณผิดพลาดเป็นยูนิตสเตปกับสัญญาณทางออกของตัวควบคุมพีไอ

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วยแสดงได้ดังภาพที่ 2.46



ภาพที่ 2.46 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย

จากภาพที่ 2.46 เขียนฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer Function) ได้ดังสมการ (2.84)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{K}{1 + K \left(\frac{R}{R + \left(1 + \frac{1}{sC_s} \right)} \right)} \quad \dots\dots (2.84)$$

กำหนดให้

$$K \left(\frac{R}{R + \left(1 + \frac{1}{sC_s} \right)} \right) \quad \dots\dots (2.85)$$

ดังนั้น

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{K}{\frac{KR}{R + \frac{1}{sC_s}}} = \frac{K \left(R + \frac{1}{sC_s} \right)}{KR} \quad \dots\dots (2.86)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R + \frac{1}{sC_s}}{R} \quad \dots\dots (2.87)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = 1 + \frac{1}{RC_s s} \quad \dots\dots (2.88)$$

กำหนดให้ $\tau = RC_s$ โดย τ คือ ค่าเวลากงตัวของกระบวนการรวมหน่วย

ดังนั้น

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = 1 + \frac{1}{\tau s} \quad \dots\dots (2.89)$$

การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย (PI Control) มีผลต่อระบบคือ

- 1) ทำให้ระบบมีการตอบสนองเร็วเหมือนการควบคุมแบบสัดส่วน
- 2) ทำให้ระบบมีความแม่นยำเหมือนการควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย

ดังนั้นการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย จะมีผลทำให้ระบบมีความ ผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด ที่สภาวะคงตัว (Steady State) และมีผลต่อการตอบสนองที่รวดเร็ว

2.5.6 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

การพัฒนาด้านการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ที่มีความเร็วสูง ทำให้มีการคิดค้นประดิษฐ์ตัวประมวลผลที่ใช้สำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่าตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล หรือที่เรียกว่า ดีเอสพี (DSP) โดยตัวประมวลผลดังกล่าวจะเน้นที่ความเร็วของคำสั่งทางคณิตศาสตร์ ในปัจจุบันที่บริษัทผู้ผลิตชิปดีเอสพีอยู่หลายบริษัทและชิปของแต่ละบริษัทยังแบ่งตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างการไป ในโครงการนี้ได้เลือกใช้ชิปของบริษัท Analog Device เบอร์ ADMCF326 โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังที่จะกล่าวต่อไป

คุณลักษณะของ ADMCF326BST

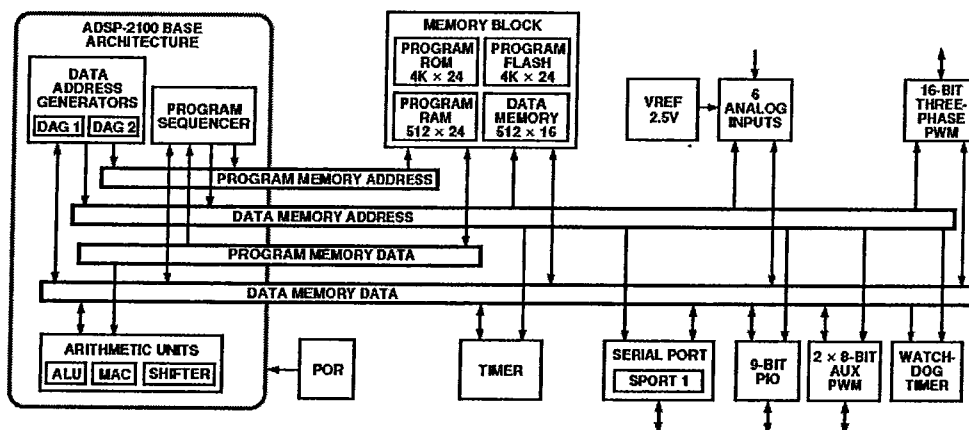
ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST ของบริษัท Analog Device มีโครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นแบบจุดทศนิยมคงที่ขนาด 16 บิต (16 bit fixed-point digital signal processing) โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- เป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขนาด 16 บิต ใช้แรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์
- ความเร็วในการประมวลผล 20 MIPS (ล้านคำสั่งในหนึ่งวินาที) ต่อ 1 แมกซีนไซเคิล
- ฮาร์ดแวร์การคูณแบบขนานขนาด 16 บิต มีผลลัพธ์เป็น 32 บิต
- มี Accumulator ขนาด 32 บิต และ Arithmetic logic unit ขนาด 32 บิต
- มีพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตขนาด 24 บิต
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบแรม ขนาด 512 x 24 บิต แบบบรอม ขนาด 4k x 24 บิต
- หน่วยความจำข้อมูลแบบแรม ขนาด 512 x 16 บิต
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ขนาด 4k x 24 บิต
- ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 12 บิต จำนวน 7 ช่อง รับค่าอนาล็อกได้ 4 ช่องในเวลาเดียวกัน
- ตัวสร้างสัญญาณพัลส์บวลิเอ็ม (Pluse width modulation, PWM) ขนาด 16 บิต
- มีตัวโปรแกรมการประวิงเวลา (Dead time) และตัวยกเลิกพัลส์ที่แคบ (Narrow Pluse

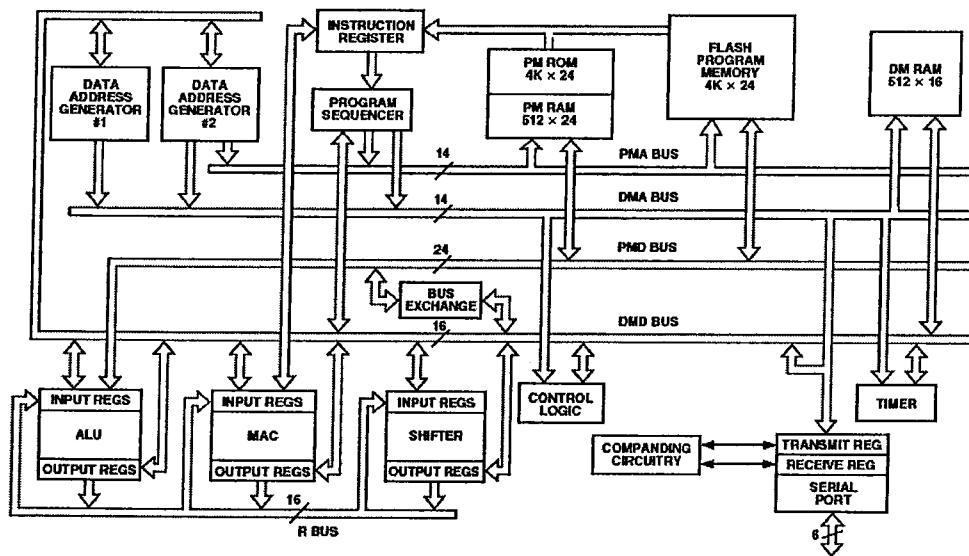
Deletion)

- มีขาหนีบของพีคดับบลิวเอ็มจากภายนอก (External PWM Trip)
- มีย่านอุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส
- มีโปรแกรมฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์
- ติดต่อกับดีบั๊กเกอร์ (Debugger) ผ่านทางพอร์ตอนุกรมด้วยบอด (Baud) แบบอัตโนมัติ

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST จะประกอบไปด้วยระบบประมวลผลอิสระ 3 ชุดคือ ส่วนประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (Arithmetic and Logic Unit : ALU) ฮาร์ดแวร์การคูณ และฮาร์ดแวร์การบวก (Multiplier/Accumulator : MAC) และฮาร์ดแวร์การชิฟท์ (Shift) โดยกระบวนการประมวลผลจะเป็นแบบ 16 บิต โดยมีหน่วยความจำทั้งแบบรอม แบบแรม และแบบแฟลคติดต่อกับดีบั๊กเกอร์ (Debugger) ผ่านพอร์ตอนุกรม



ภาพที่ 2.47 โครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST



ภาพที่ 2.48 สถาปัตยกรรมของตัวประมวลผลหลักของ ADMCF326BST

2.6 ผลกระทบจากการใช้กังหันลม

ปัจจุบันมีการใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้ากันอยู่ในหลายประเทศ ซึ่งได้รับการยอมรับจากประชาชนในพื้นที่เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามกังหันลมยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือผลกระทบข้างเคียงอื่นๆดังต่อไปนี้ (นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานุวัฒน์. 2547 : 71-72)

2.6.1 ด้านพื้นที่

กังหันลมจะต้องติดตั้งอยู่ห่างกันห้าถึงสิบเท่าของความสูงกังหัน เพื่อที่กระแสลมจะได้ลดความปั่นป่วนหลังจากที่ผ่านกังหันลมตัวอื่นมา อย่างไรก็ตามพื้นที่ที่ติดตั้งจริงของกังหันลมจะใช้เพียง 1 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งจะเป็นส่วนของเสาและฐานรากและ เส้นทางสำหรับการเข้าไปติดตั้งและดูแลรักษา กังหันลมขนาดใหญ่ซึ่งมีความสูงของเสากังหันมาก จะต้องติดตั้งอยู่ห่างกันเป็นระยะทางไกล ตัวอย่างเช่น กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดระดับเมกะวัตต์ ต้องการระยะห่างระหว่างกันถึง 0.5 – 1 กิโลเมตร ดังนั้นเมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้วจะพบว่าการติดตั้งกังหันลมจะไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ต่างๆ อาทิเช่นพื้นที่ทางการเกษตร พื้นที่อุตสาหกรรม หรือแม้แต่พื้นที่ป่าธรรมชาติ ประชาชนในพื้นที่ดังกล่าวยังคงสามารถใช้ประโยชน์จากที่ดินได้อย่างปกติ

2.6.2 ด้านทัศนวิสัย

สำหรับผลกระทบทางด้านสายตาหรือการมองเห็นของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้น ยังไม่ได้มีการประเมินผลออกมาอย่างชัดเจน กังหันลมขนาดใหญ่จะมีความสูงมากกว่า 50 เมตร

ขึ้นไป ทำให้สามารถมองเห็นได้จากระยะไกล กังหันลมที่ติดตั้งอยู่ตามทุ่งหญ้า สร้างความสวยงาม สร้างจินตนาการ และความคิดต่างๆ ให้กับผู้พบเห็น กังหันลมสามารถใช้เป็นสื่อการเรียนรู้หลักการทางอากาศพลศาสตร์ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญต่อเทคโนโลยีการบินหรืออากาศยานได้

2.6.3 ด้านเสียง

เสียงของกังหันลมเกิดจากการหมุนของปลายใบพัดตัดกับอากาศ จากการที่ใบพัดหมุนผ่านเสากังหัน จากความปั่นป่วนของลมบริเวณใบกังหันลม และจากตัวเครื่องจักรกลภายในตัวกังหันลม โดยเฉพาะส่วนของเกียร์ เสียงดังของกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นตัวแปรที่สำคัญประการหนึ่งที่แสดงถึงประสิทธิภาพของกังหันลม ดังนั้นทางบริษัทผู้ผลิตกังหันลมจึงพยายามพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อลดผลกระทบจากเสียงของกังหันลมในช่วงห้าปีที่ผ่านมา ระดับของเสียงในบริเวณอาคาร บ้านเรือนหรือที่พักอาศัยที่จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์อยู่ที่ไม่เกิน 40 เดซิเบลที่ระยะห่างไม่เกิน 250 เมตร ดังนั้นการติดตั้งกังหันลมหากต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว

2.6.4 นก

มีผลการศึกษาจากหลายแห่งที่ขัดแย้งกัน สำหรับสาเหตุการตายของนกจากการบินชนกังหันลมที่กำลังหมุนอยู่แต่หากพิจารณาแล้วความถี่ของเหตุการณ์ดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้ใกล้เคียงหรือน้อยกว่า การที่นกบินชนรถ หน้าต่างของอาคาร หรือ สายไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นอยู่เสมอๆ ยกเว้นในบางกรณีจำนวนการตายของนกในพื้นที่ติดตั้งกังหันลมอาจสูง อันเนื่องมาจากมีฝูงนกที่อพยพย้ายถิ่นฐานในบางฤดูกาลผ่านพื้นที่ดังกล่าวในเวลากลางวันหรือพื้นที่นั้นเป็นแหล่งหาอาหารของนกนกล่าบางชนิด นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาของผู้เชี่ยวชาญ บางคนพบว่าในบริเวณพื้นที่ติดตั้งกังหันลม กลับมีอัตราการผสมพันธุ์ของเกสรดอกไม้ที่สูงมาก เนื่องจากการปั่นป่วนของกระแสลมในบริเวณนั้น

2.6.5 คลื่นสนามแม่เหล็ก

สัญญาณโทรทัศน์ คลื่นวิทยุ และเรดาร์ อาจถูกรบกวนได้จากการหมุนของกังหันลมซึ่งอาจสร้างคลื่นรบกวนสัญญาณเหล่านี้ โดยเฉพาะเรดาร์ซึ่งมีความสำคัญต่อทางการทหารในปัจจุบันยังไม่พบว่ามีรายงานการถูกรบกวนจากกังหันลม ในทางตรงข้ามกังหันลมยังได้รับการยอมรับจากทางการทหารและมีพื้นที่ทางการทหารหลายแห่งโดยเฉพาะสนามบินบางแห่ง มีกังหันลมติดตั้งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงแต่ก็ไม่พบว่ามีผลผิดปกติใดๆ กับระบบเรดาร์

2.6.6 ความยั่งยืน

ปัจจุบันกระแสในเรื่องความยั่งยืน (sustainable) และเทคโนโลยีที่ปล่อยมลพิษ (zero-emission technology) กำลังเป็นที่สนใจของนักวิทยาศาสตร์ นักวิจัย หรือแม้แต่ผู้นำการเมือง การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าไม่ก่อให้เกิดมลพิษ สามารถใช้เป็นเทคโนโลยีหนึ่งเพื่อการผลิต

ไฟฟ้าทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ และนิวเคลียร์ ดังนั้นเทคโนโลยีกักเก็บลมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการพัฒนาอย่างยั่งยืน

2.7 มาตรฐาน

แรงดันต่ำเกิน คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าอาร์เอ็มเอส(Root Mean Square: RMS)ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงนั้นไม่เกิน 1 นาที โดยมีสาเหตุส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดแรงดันต่ำเกินคือการเกิดสถานะการผิดปกติในระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ประเภทที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสหลายชนิด (Sensitive Load) ทำงานผิดปกติ เช่น อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Adjustable Speed Drive: ASD)การควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ (Programmable Logic Controller: PLC) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในบ้าน (Consumer Electronics) และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ในบางครั้งปัญหาแรงดันต่ำเกินอาจรุนแรงถึงขั้นที่อุปกรณ์หยุดการทำงานส่งผลให้เกิดความเสียหายในกระบวนการผลิตไม่ว่าจะเป็นความเสียหายที่ตัวอุปกรณ์ ในบางครั้งถึงกับต้องเริ่มต้นของกระบวนการผลิตใหม่ทั้งหมด ซึ่งทำให้ต้องเสียเวลาและต้นทุนเป็นต้น

2.7.1 มาตรฐานแรงดันต่ำเกิน

สำหรับการให้คำจำกัดความของปัญหาแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นยังคงมีความไม่ชัดเจนหลายๆ ประเด็น ทั้งในส่วนระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ และขนาดที่ใช้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความรุนแรงของปัญหาแรงดันต่ำเกิน ซึ่งพบว่าหลายๆ มาตรฐานมีการกำหนดค่านิยามแรงดันต่ำเกินที่แตกต่างกันสำหรับกลุ่มมาตรฐานแรงดันต่ำเกินแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. มาตรฐานสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าประกอบด้วย

- มาตรฐาน IEEE 1159 (Institute of Electrical and Electronic Engineers)
- มาตรฐาน IEC (International Electrotechnical Commission) หมายเลข 1000-4-X จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับการตรวจวัดและกระบวนการทดสอบอุปกรณ์เพื่อแน่ใจว่าอุปกรณ์นั้นจะผ่านเกณฑ์ต่างๆ ตามมาตรฐาน
- มาตรฐาน EN 50160-1999 (European Standard 50160-1999)

2. มาตรฐานสำหรับผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า

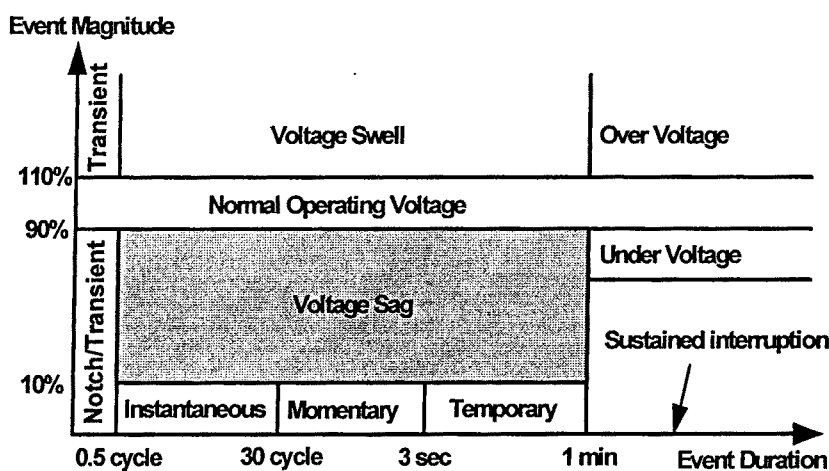
- มาตรฐาน IEC หมายเลข 1000-2-X กล่าวถึงคุณลักษณะและเงื่อนไขโดยทั่วไปที่อุปกรณ์ยังคงสามารถทำงานได้ปกติ
- มาตรฐาน (CBEMA (The Computer Business Equipment Manufacturers Association)
- มาตรฐาน ITIC (The Information Technology Industry Council)

- มาตรฐาน SEMI (The Semiconductor Equipment and Material International Group)

2.7.1.1 มาตรฐาน IEEE

มาตรฐานนี้ได้กำหนดให้ปัญหาแรงดันเกินจัดอยู่ในประเภทของแรงดันที่มีขนาดในช่วงตั้งแต่ 90 เปอร์เซ็นต์ ลงไปจนถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันปกติ ดังแสดงในภาพที่ 2.49 โดยขนาดของแรงดันที่ลดลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นนานตั้งแต่ ครึ่งไซเคิล จนถึง 1 นาที หากเกิดขึ้นนานกว่านี้ถือว่าเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าประเภทอื่น ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE นี้สามารถแบ่งช่วงการเกิดแรงดันต่ำออกได้ 3 ช่วงมีดังนี้

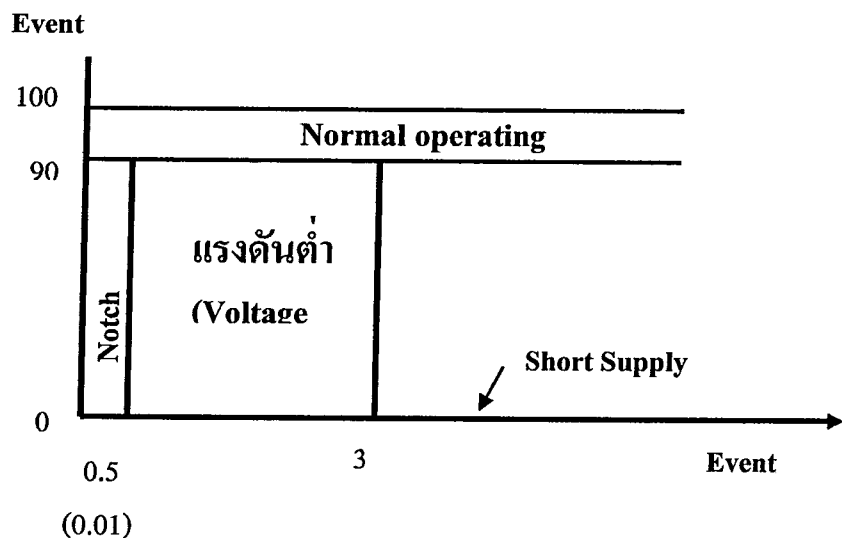
1. ทันทีทันใด (Instantaneous) เป็นช่วงเวลาที่เกิดนานระหว่าง 10 มิลลิวินาที ถึง 30 ไซเคิล
2. ชั่วขณะ (Momentary) เป็นช่วงเวลาที่เกิดนาน 30 ไซเคิล ถึง 3 วินาที
3. ชั่วครู่ (Temporary) เป็นช่วงเวลาที่เกิดนาน 3 วินาที ถึง 1 นาที



ภาพที่ 2.49 การแบ่งขอบเขตการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐานแรงดันต่ำเกินตาม IEEE 1159 ปี 1995

2.7.1.2 มาตรฐาน IEC

ได้กำหนดให้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่จัดอยู่ในประเภทของแรงดันมีขนาดแรงดันลดลงจากระดับปกติอย่างทันทีทันใด ในช่วงตั้งแต่ 90 เปอร์เซ็นต์ ลดลงจนถึง 0 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันปกติ โดยขนาดแรงดัน ที่ลดลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นนานตั้งแต่ 10 มิลลิวินาที จนถึง 3 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 2.50



ภาพที่ 2.50 การแบ่งขอบเขตการแปรเปลี่ยนแรงดันตามมาตรฐานแรงดันต่ำเกินตาม IEC 61000-2-8

2.8 วงจรพหุ-พูลคอนเวอร์เตอร์

วงจรพหุ-พูลคอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในภาพที่ 2.51 จะคล้ายกับกรณีวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ที่ตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กจะไม่ใช้ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้าจะกำหนดให้เป็นแบบอุดมคติเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ สวิตช์ s_{w1} จะนำกระแสในขณะ s_{w2} จะไม่นำ

2.8.1 กรณีสวิตช์ s_{w1} นำกระแสและสวิตช์ s_{w2} ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ s_{w1} นำกระแสจะเป็นผลทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ

(P_1) เท่ากับ

$$V_{p1} = V_s \quad \text{..... (2.90)}$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ (P_1) จะถ่ายเทไปยังขดลวดอีก 3 ชุด ที่เหลือ

ดังนี้

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad \text{..... (2.91)}$$

$$V_{s2} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad \text{..... (2.92)}$$

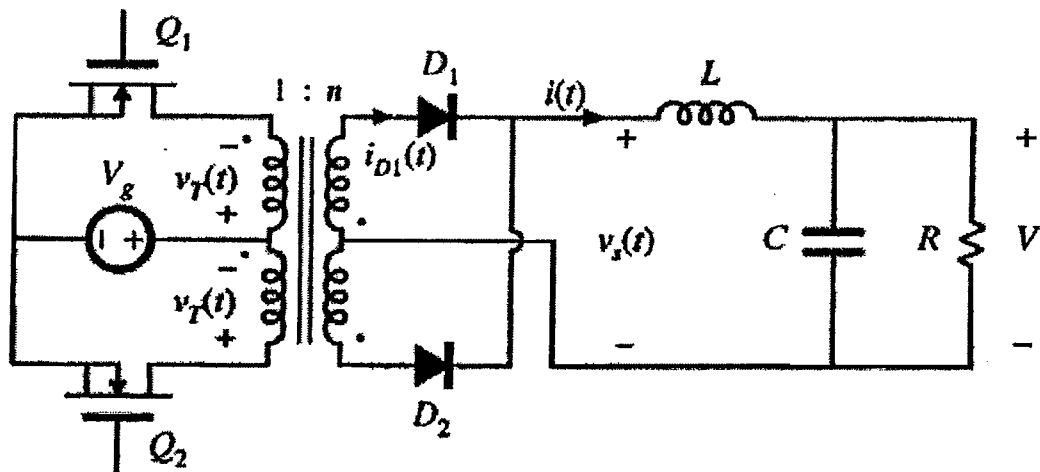
$$V_{P2} = V_s \quad \text{..... (2.93)}$$

$$V_{Sw2} = 2V_s$$

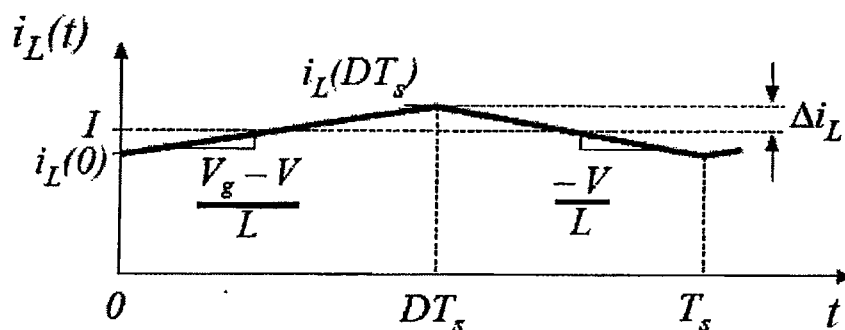
ไดโอด D_1 ได้รับไบอัสตรงขณะที่ไดโอด D_2 ได้รับไบอัสกลับ

$$V_x = V_{S2} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad \text{..... (2.94)}$$

$$V_{LX} = V_x - V_0 = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0 \quad \text{..... (2.95)}$$



ภาพที่ 2.51 วงจรพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์



ภาพที่ 2.52 กระแสไหลผ่าน

ถ้าสมมุติให้แรงดันไฟฟ้าด้านออก V_0 และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L_x มีค่าคงที่ ช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสจะเป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x มีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x ในช่วงเวลาที่สวิตช์ S_{w1} นำกระแสจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\Delta i_{Lx}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lx}}{DT} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0}{L_x} \quad \text{..... (2.96)}$$

$$\left(\Delta i_{Lx} \right)_{\text{closed}} = DT \left[\frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0}{L_x} \right] \quad \text{..... (2.97)}$$

2.8.2 กรณีสวิตช์ S_{w1} ไม่นำกระแสและสวิตช์ S_{w2} นำกระแสจะเป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ V_{p2} เท่ากับ

$$V_{p2} = -V_s \quad \text{..... (2.98)}$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ จะถ่ายเทไปยังขดลวดอีก 3 ชุดที่เหลือ ดังนี้

$$V_{p1} = -V_s \quad \text{..... (2.99)}$$

$$V_{s1} = -V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad \text{..... (2.100)}$$

$$V_{s2} = -V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad \text{..... (2.101)}$$

$$V_{Sw1} = 2V_s \quad \text{..... (2.102)}$$

เมื่อไดโอด D_2 ได้รับไบอัสไปหน้าขณะที่ไดโอด D_1 ได้รับไบอัสกลับ

$$V_x = -V_{s2} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad \text{..... (2.103)}$$

$$V_{Lx} = V_x - V_0 = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0 \quad \text{..... (2.104)}$$

โดยที่แรงดันไฟฟ้า V_{Lx} จะเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีค่าเป็นบวก โดยค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อสวิตช์ S_{w2} นำกระแส และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x สามารถหาได้โดยให้สมการที่ (2.104)

2.8.3 กรณีสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} ไม่นำกระแส

ในกรณีที่ทั้งสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิ P_1 และ P_2 จะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x จะยังคงไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้ไดโอด D_1 และ D_2 ยังคงได้รับไบอัสตรง แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดทุติยภูมิแต่ละขดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L_x มีค่าเท่ากับ

$$V_x = 0 \quad \text{..... (2.105)}$$

$$V_{Lx} = V_x - V_0 = -V_0 \quad \text{..... (2.106)}$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L_x มีค่าเท่ากับ $-V_0$ เป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x จะมีค่าลดลงด้วยการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ

$$\frac{\Delta i_{Lx}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lx}}{\left(\frac{T}{2} - DT\right)} = -\frac{V_0}{L_x} \quad \text{..... (2.107)}$$

แก้สมการหาค่า Δi_{Lx} จะได้

$$(\Delta i_{Lx})_{open} = -\left(\frac{V_0}{L_x}\right)\left(\frac{1}{2} - D\right)T \quad \text{..... (2.108)}$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสุทธิของกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่สภาวะอยู่ตัว ในหนึ่งคาบเวลาจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\begin{aligned} (\Delta i_{Lx})_{closed} + (\Delta i_{Lx})_{open} &= 0 \\ \left(\frac{V_s(N_s/N_p) - V_0}{L_x}\right)(DT) + \left(\frac{V_0}{L_x}\right)\left(\frac{1}{2} - D\right)T &= 0 \quad \text{..... (2.109)} \end{aligned}$$

แก้สมการหาค่า V_0 จะได้

$$V_0 = 2V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right)D \quad \text{..... (2.110)}$$

โดยที่ D ในที่นี้จะหมายถึง คิวดีไซเคิลของสวิตช์แต่ละตัว

พิจารณาสมการที่ (2.111) จะเห็นได้ว่าสมการดังกล่าวจะคล้ายกับกรณีวงจรบั๊ก ดังนั้นค่าแรงดันคลื่นของแรงดันก็จะสามารถหาได้คล้ายกับกรณีวงจรบั๊กเช่นกัน จะได้

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1-2D}{32L_x C_f^2} \quad \dots\dots (2.111)$$

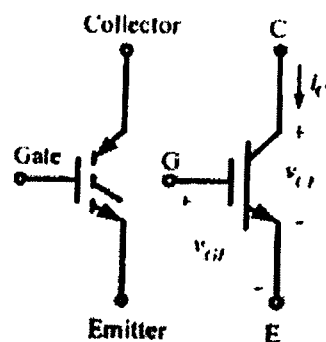
การวิเคราะห์ที่ได้กระทำก่อนหน้านี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของตัวเหนี่ยวนำ L_m ของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยถ้าทำการเพิ่มผลของตัวเหนี่ยวนำ L_m ในวงจรสมมูล จะได้ว่า ค่ากระแส i_{Lm} จะเพิ่มขึ้นเมื่อสวิตช์ S_{w1} นำกระแส จากนั้นจะไหลวนอยู่ในหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} ไม่นำกระแส และกระแสไฟฟ้า i_{Lm} จะมีค่าลดลงเมื่อสวิตช์ S_{w2} นำกระแส เนื่องจากช่วงเวลาในการนำกระแสของทั้งสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} จะเท่ากัน เป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงสุทธิของกระแส i_{Lm} มีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือในทางอุดมคติ แกนแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกรีเซ็ทภายในแต่ละคาบเวลาของการสวิต

2.9 ไอจีบีที (Insulated Gate Biopolar Transistors : IGBT)

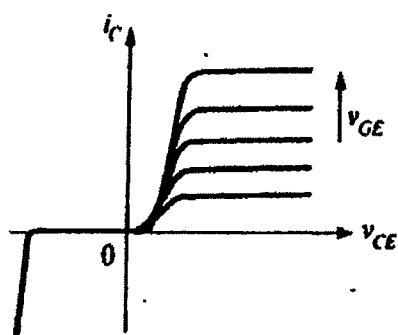
ไอจีบีที จัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่สามารถควบคุมให้นำกระแสและควบคุมให้หยุดนำกระแสได้ โดยการควบคุมจากแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต ไอจีบีทีมีสัญลักษณ์ และคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ ดังแสดงในภาพที่ 2.53 (ก) - (ค) ตามลำดับ

ไอจีบีทีได้รวมข้อดีของมอสเฟตกำลัง ทรานซิสเตอร์กำลัง (บีเจที) และจีทีโอไครริสเตอร์มารวมอยู่ด้วยกัน กล่าวคือไอจีบีทีจะมีค่าของอิมพีแดนซ์ขาเกตที่มีค่าสูงคล้ายมอสเฟตกำลัง ซึ่งต้องการพลังงานน้อยมากในการควบคุมการสวิตช์ ควบคุมการนำและหยุดนำกระแสด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต รวมทั้งสามารถใช้งานการสวิตช์ซึ่งมีความถี่สูง

ไอจีบีทีจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ขณะนำกระแสต่ำคล้ายทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งมีค่า 2-3 โวลต์ สำหรับพิกัดแรงดันไฟฟ้า 1,000 โวลต์ นอกจากนั้น ไอจีบีทีจะออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้าด้านลบได้คล้ายกับจีทีโอไครริสเตอร์

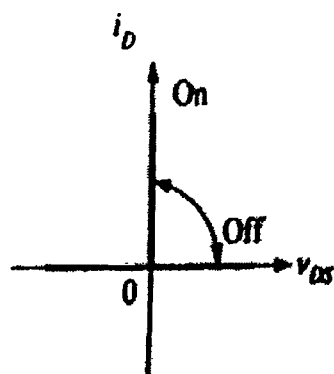


(ก)



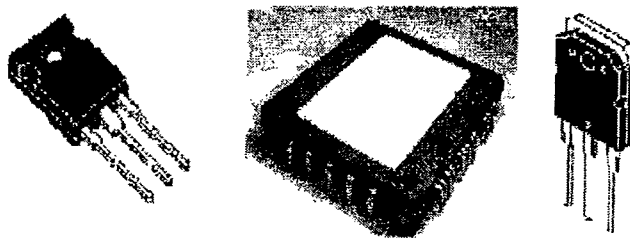
(ข)

แรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 2.53 ไอจีบีที (ก) สัญลักษณ์พื้นฐานจากมอสเฟต และพื้นฐานจากบีเจที (ข) คุณลักษณะของ กระแสและ (ค) คุณลักษณะในอุดมคติ

ไอจีบีที จะมีช่วงเวลานำกระแสและหยุดนำกระแสมีค่าประมาณ 1 ไมโครวินาที มีขนาด พิกัดกระแสไฟฟ้าถึง 2,000 แอมแปร์ และพิกัดแรงดันไฟฟ้าถึง 5,000 โวลต์ สำหรับรูปร่างทั่วไป ของไอจีบีที ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.54



ภาพที่ 2.54 รูปร่างทั่วไปของไอจีบีที