

บทที่ 2

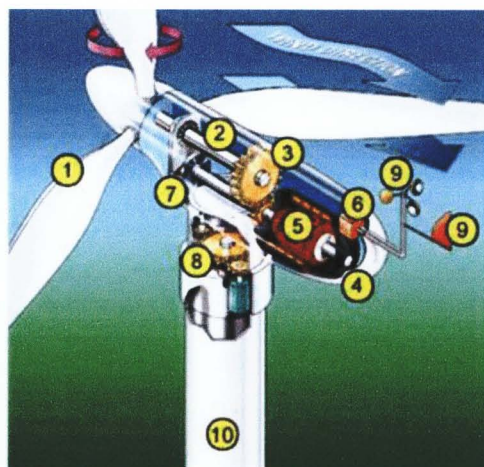
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิด ปรับเปลี่ยนความเร็วได้

ในบทนี้จะนำเสนอหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดปรับเปลี่ยนความเร็วได้

2.1 ภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ส่วนประกอบสำคัญๆ ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 อาจแบ่งได้ดังนี้

1. **ใบพัด** เป็นตัวรับพลังลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกล ซึ่งยึดติดกับชุดแกนหมุนและส่งแรงจากแกนหมุนไปยังเพลาแกนหมุน
2. **เพลาแกนหมุน** จะรับแรงจากแกนหมุนใบพัด และส่งผ่านระบบกำลัง เพื่อหมุนและปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. **ห้องส่งกำลัง** เป็นระบบปรับเปลี่ยนและควบคุมความเร็วในการหมุน ระหว่างเพลาแกนหมุนกับเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
4. **ห้องเครื่อง** ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีความสำคัญต่อกังหันลม ใช้บรรจุระบบต่างๆ ของกังหันลม เช่น ระบบเกียร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เบรก และระบบควบคุม
5. **เครื่องกำเนิดไฟฟ้า** ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า
6. **ระบบควบคุมไฟฟ้า** เป็นตัวควบคุมการทำงาน และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ
7. **ระบบเบรก** เป็นระบบกลไกเพื่อใช้ควบคุมการหยุดหมุนของใบพัดและเพลาแกนหมุนของกังหัน เมื่อได้รับความเร็วลม เกินความสามารถของกังหัน ที่จะรับได้ และในระหว่างการซ่อมบำรุงรักษา
8. **แกนคอกหมุนรับทิศทางการลม** เป็นตัวควบคุมการหมุนห้องเครื่อง เพื่อให้ใบพัดรับทิศทางการลมโดยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่เชื่อมต่อให้มีความสัมพันธ์ กับทางเลี้ยวรับทิศทางการลมที่อยู่ด้านบนของเครื่อง
9. **เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางการลม** เพื่อเป็นตัวชี้ขนาดของความเร็วและทิศทางของลม เพื่อที่คอมพิวเตอร์จะได้ควบคุมกลไกอื่นๆ ได้ถูกต้อง
10. **เสากังหันลม** เป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นตัวเครื่องที่อยู่ข้างบน



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดปรับเปลี่ยนความเร็วได้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิยมใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในปัจจุบัน คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางชนิดสามารถปรับความเร็วได้ (Variable Speed Induction Generator; VS-DFIG) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดพันที่มีคอนเวอร์เตอร์สองตัวต่อเชื่อมแบบหันหลังชนกัน (back-to-back) ผ่านวงจรไฟตรง ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวเชื่อมระหว่างขดลวดโรเตอร์และระบบไฟฟ้า

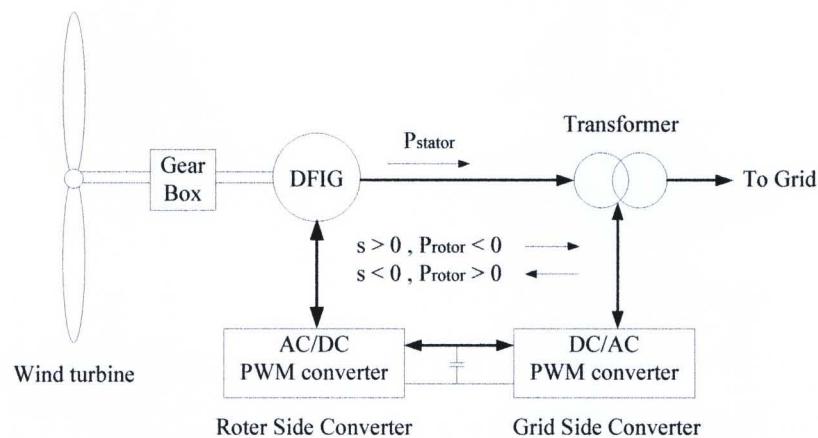
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางนี้จะทำงานใน 2 สถานะ คือ การทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส เรียกว่า ซุปเปอร์ซิงโครนัส (Super-synchronous) ซึ่งที่สถานะนี้ ค่าสลิปจะมีค่าเป็นลบ ($s < 0$) และการทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส หรือเรียกว่า ซับซิงโครนัส (Sub-synchronous) ซึ่งที่สถานะนี้ ค่าสลิปจะมีค่าเป็นบวก ($s > 0$) โดยค่าสลิปดังกล่าวสามารถนิยามได้ดังนี้ [2]

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.1)$$

โดยที่

- s คือ ค่าสลิป (slip)
- ω_s คือ ค่าความเร็วซิงโครนัส
- ω_r คือ ค่าความเร็วโรเตอร์

การทำงานทั้งในช่วงซับซิงโครนัสและซูปเปอร์ซิงโครนัสนั้น คอนเวอร์เตอร์ที่ต่อเชื่อมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องสามารถทำงานกับการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ทั้งสองทิศทาง กล่าวคือเมื่อละเลยค่ากำลังสูญเสียในขดลวดโรเตอร์และสเตเตอร์ หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ซูปเปอร์ซิงโครนัส กำลังไฟฟ้าจริงจากขดลวดโรเตอร์จะไหลไปสู่ระบบไฟฟ้า ในทางกลับกัน ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ซับซิงโครนัส กำลังไฟฟ้าจริงจะไหลจากระบบไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดโรเตอร์ โดยทั้งสองโหมดการทำงาน กำลังไฟฟ้าจริงจากขดลวดสเตเตอร์จะไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า [2] การทำงานดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทำงานในโหมดซับซิงโครนัสและซูปเปอร์ซิงโครนัส

กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ สามารถนิยามได้ดังนี้

$$P_r \cong -sP_s \quad (2.2)$$

$$P_s \cong \frac{P_{grid}}{(1-s)} \quad (2.3)$$

โดยที่

P_s คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากขดลวดสเตเตอร์

P_r คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าหรือออกจากขดลวดโรเตอร์

P_{grid} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

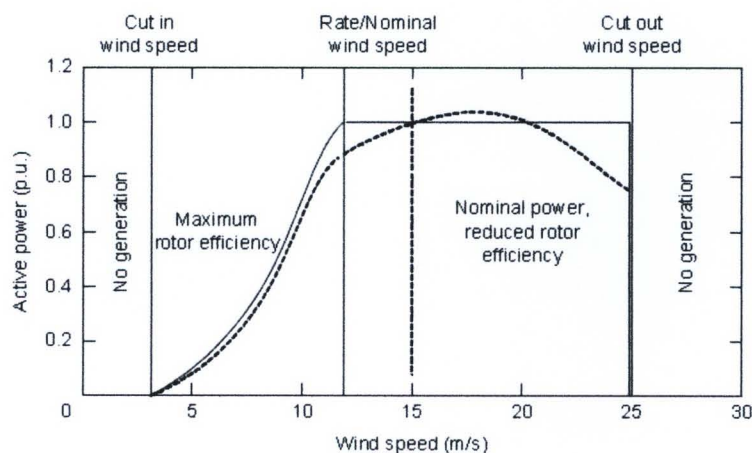
โดยปกติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานอยู่ในช่วงประมาณ $\pm 30\%$ ของความเร็วซิงโครนัส ดังนั้นค่าสลิปจะมีค่าประมาณอยู่ระหว่าง -0.3 ถึง 0.3 ซึ่งจะส่งผลให้คอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวที่ต่อเชื่อมอยู่มีขนาดกำลังพิกัดเพียงร้อยละ 25-30 ของกำลังพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะเห็น

ว่าการต่อคอนเวอร์เตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ สามารถลดขนาดของคอนเวอร์เตอร์ได้ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ได้

2.3 ลักษณะกลศาสตร์การเคลื่อนไหวของอากาศ

กังหันลมจะใช้ประโยชน์จากลมที่อยู่ใกล้ผิวโลกหรือที่เรียกว่าลมผิวพื้นซึ่งหมายถึงลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน ระดับความเร็วลมกับกังหันลม [3] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

1. ความเร็วลมระดับที่กังหันลมสามารถเริ่มต้นทำงานและผลิตไฟฟ้าได้เรียกว่า ความเร็วลมเข้าระบบ (Cut-in Wind Speed) มีความเร็วประมาณ 2.5-4 เมตรต่อวินาที ที่ความเร็วระดับนี้อาจได้กำลังน้อยหรืออาจไม่ได้เลย ถ้าความเร็วลมต่ำกว่านี้ กังหันลมจะไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้
2. ความเร็วลมที่มากกว่าความเร็วลมเข้าระบบแต่มีค่าน้อยกว่าความเร็วลมเต็มพิกัด จะเป็นความเร็วลมที่ทำให้กังหันลมทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum rotor efficiency) โดยกำลังที่ผลิตได้จะมีค่าขึ้นอยู่กับมุมพิชและอัตราส่วนความเร็วอด
3. ความเร็วลมระดับที่จ่ายกำลังได้เต็มพิกัดอย่างต่อเนื่องเรียกว่า ความเร็วลมเต็มพิกัด (Nominal or Rated Wind Speed) มีความเร็วประมาณ 12-15 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตัวเอง
4. ความเร็วลมระดับสูงที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายได้จำเป็นต้องหยุดการทำงานเพื่อความปลอดภัยของระบบเรียกว่า ความเร็วลมตัดออก (Cut-out Wind Speed) มีความเร็วประมาณ 25 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 2.3 ระดับความเร็วลมกับกังหันลม

2.4 แบบจำลองกังหันลม

เมื่อลมผ่านเข้ากังหันลมแล้ว กังหันลมจะเปลี่ยนจากกำลังงานจลน์จากความเร็วลมให้เป็นกำลังงานกล ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.4) โดยกำลังลมนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากความไม่แน่นอนของความเร็วลม [4-5]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 v_w^3 \quad (2.4)$$

โดยที่

P_w	คือ กำลังลมที่ผ่านกังหันลมแล้ว (MW)
ρ	คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
C_p	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลัง
R	คือ รัศมีของใบพัดของกังหัน (m)
v_w	คือ ความเร็วลม (m/s)

จากกฎพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของของไหลของเบทซ์ (Betz's law) จะพบว่ากังหันลมไม่สามารถแปลงกำลังทั้งหมดที่ผลิตได้เป็นกำลังกล ซึ่งค่าที่บ่งบอกว่ากังหันลมสามารถแปลงกำลังจลน์เป็นกำลังกลได้มากน้อยเพียงใด คือค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p (Power Coefficient) โดยปกติค่านี้จะมีค่าสูงสุดได้ไม่เกิน 59.3%

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังนี้เป็นตัวแปรไม่เชิงเส้น มีค่าขึ้นกับมุมพิชของใบพัด (Blade pitch angle; β) และอัตราส่วนความเร็วยอด (Tip Speed Ratio; λ) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์กำลัง, C_p สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.5)

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (2.5)$$

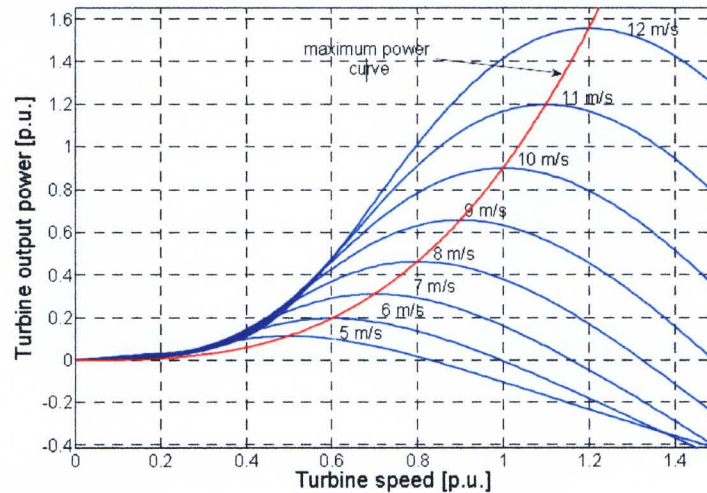
โดยที่

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}$$

และ

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w}$$

เนื่องจากกราฟกำลังกลขาออกของกังหันลมที่ได้จากผู้ผลิตแต่ละรายมีลักษณะคล้ายกัน ดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นค่า C_p จึงสามารถประมาณได้จากสมการข้างต้น โดยค่าสัมประสิทธิ์ $c_1 - c_6$ จะมีค่าดังนี้ $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$, $c_6 = 0.0068$ [6]



รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของกังหันลมที่ความเร็วลมค่าต่างๆ ที่มุมพิช 0 องศา

2.5 แบบจำลองความเร็วลม

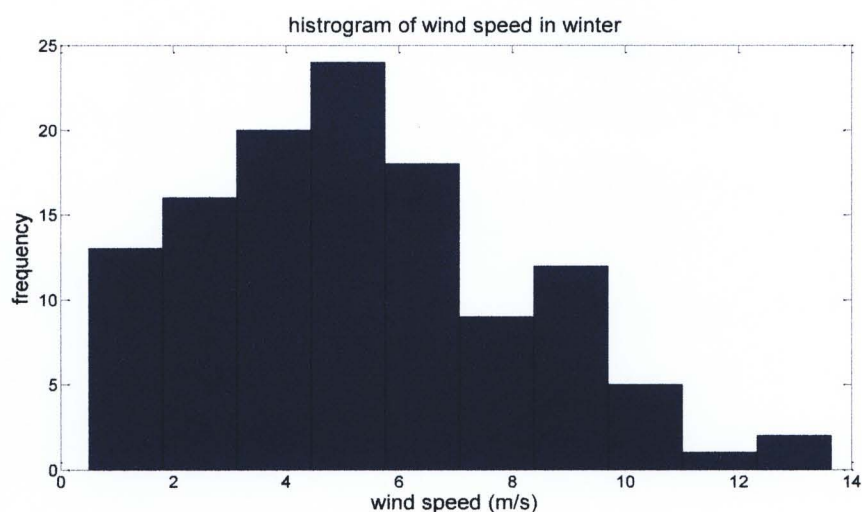
ความเร็วลมจะมีค่าขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและพื้นที่ ในวิทยานิพนธ์นี้ จะจำลองความเร็วลม ($v_{w,t}$) ออกเป็น 2 ส่วน คือ ความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมง ($v_{trend,t}$) จะแทนการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมตามฤดูกาล และเวลา ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ช้า จึงถือว่าความเร็วส่วนนี้มีค่าคงที่ได้ และในส่วนของความไม่แน่นอนของความเร็วลม ($v_{noise,t}$) จะแทนการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในช่วงเวลาสั้นๆ รอบค่าความเร็วลมเฉลี่ยในส่วนแรก [7] ดังสมการที่ (2.6)

$$v_{w,t} = v_{trend,t} + v_{noise,t} \quad (2.6)$$

โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้ $v_{trend,t}$ มีค่าคงที่ในแต่ละชั่วโมงที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ส่วนค่า $v_{noise,t}$ จะเป็นค่าที่สุ่มจากกระบวนการเชิงสุ่ม (Stochastic Process)

ถ้านำความเร็วลมในแต่ละชั่วโมงของทุกวันมาสร้างกราฟแจกแจงความถี่ดังรูปที่ 2.5 จะพบว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นกราฟที่มีการกระจายแบบล็อกนอร์มอล (lognormal distribution)

โดยจะสามารถใช้ทฤษฎี Ito's Lemma ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันในกระบวนการเชิงสุ่มกับสมการ (2.6) เพื่อหาค่าความเร็วลมของช่วงเวลาที่น่าสนใจได้



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการกระจายของความเร็วลมในชั่วโมงที่ 4 ในฤดูหนาว

Ito's Lemma เป็นทฤษฎีที่ใช้เกี่ยวกับแคลคูลัสของกระบวนการเชิงสุ่ม (Stochastic Calculus) โดยหากกำหนดให้กระบวนการเชิงสุ่มของตัวแปรที่เราสนใจ S มีค่าขึ้นกับเวลาและค่าความไม่แน่นอนที่อธิบายได้ด้วยกระบวนการวีเนอร์ (W_t) ดังสมการที่ (2.7)

$$dS = a(S, t)dt + b(S, t)dW_t \quad (2.7)$$

เมื่อใช้ Ito's Lemma แล้ว จะสามารถแสดงอนุพันธ์ของฟังก์ชันที่ขึ้นกับตัวแปร S และ t หรือ $f(S, t)$ ได้ดังนี้

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial t} + a \frac{\partial f}{\partial S} + \frac{1}{2} b^2 \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} \right) dt + b \frac{\partial f}{\partial S} dW \quad (2.8)$$

โดยที่

f คือ ฟังก์ชันที่มีค่าขึ้นกับตัวแปร x และ t

W_t คือ กระบวนการสุ่มแบบวีเนอร์ (Wiener Process) ที่มีการกระจายแบบปกติ และมีความแปรปรวนแปรตามเวลา $W_t \sim N(0, t)$

เราสามารถนำทฤษฎีดังกล่าวข้างต้นมาปรับใช้กับสมการที่ (2.6) เพื่อสร้างสมการแบบจำลองความเร็วลมได้ โดยในขั้นตอนแรก เพื่อลดรูปในการเขียนสมการ จะกำหนดให้ $a = v_{trend,t}$ และ $v = v_{noise,t}$ ซึ่งจากสมการที่ (2.6) เราจะหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน ได้ดังสมการ

$$dv_{w,t} = da + dv \quad (2.9)$$

ซึ่ง da จะมีค่าเป็น 0 เนื่องจาก $v_{trend,t}$ เป็นค่าคงที่ ส่วน dv จะมีค่าตามกระบวนการเชิงสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีค่าความแปรปรวนขึ้นกับความเร็วลมและเปลี่ยนแปลงตามเวลา นั่นคือ $dv \sim N(0, \sigma^2 \cdot v_w^2 dt)$ เมื่อแทนค่าดังกล่าวในสมการที่ (2.9) จะพบว่า

$$dv_{w,t} = dv = \sigma(a + v)dW \quad (2.10)$$

โดยที่

dW คือ $Z \cdot \sqrt{dt}$ และ Z คือ ค่าที่ได้จากการสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติ

สมการที่ (2.10) สามารถพิจารณาได้เป็นกระบวนการเชิงสุ่ม ที่ไม่ขึ้นกับเวลาดังนี้

$$dv = 0 dt + \sigma(a + v)dW \quad (2.11)$$

จาก Ito's Lemma ในสมการที่ (2.8) เราจะสามารถหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันใดๆซึ่งที่มีค่าขึ้นอยู่กับเวลา t และความไม่แน่นอนของความเร็วลม v ตามกระบวนการใน (2.11) ได้ดังสมการ

$$df(v, t) = \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{1}{2} \sigma^2 (a + v)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial v^2} dt + \frac{\partial f}{\partial v} \sigma(a + v) dW \quad (2.12)$$

หากกำหนดให้ $f(v, t) = \ln(a + v)$ จะได้ว่า

$$\frac{\partial f}{\partial v} = \frac{1}{(a + v)} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial v^2} = \frac{-1}{(a + v)^2} \quad (2.14)$$



เมื่อแทนสมการ (2.13) - (2.14) ลงในสมการ (2.12) แล้วจะได้ว่า

$$d\ln(a + v) = -\frac{1}{2}\sigma^2 dt + \sigma dW \quad (2.15)$$

จากนั้น เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (2.15) ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น จนถึงเวลาที่สนใจ จะได้ว่า

$$\int_{v_0}^{v_t} d\ln(a + v) = \int_0^t \left(-\frac{1}{2}\sigma^2 dt + \sigma dW\right) \quad (2.16)$$

$$\frac{a + v_t}{a + v_0} = \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma^2 t + \sigma W_t\right) \quad (2.17)$$

เมื่อแทนค่า a และ v กลับมา ก็จะได้สมการแบบจำลองความเร็วลมที่แต่ละช่วงเวลา ดังสมการ (2.18) ซึ่งจะเห็นว่าความเร็วลมแต่ละชั่วโมงตามสมการดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบล็อกนอร์มอลนั่นเอง

$$v_{w,t} = v_{trend,t-1} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma^2 t + \sigma Z\sqrt{t}\right) \quad (2.18)$$

โดยที่

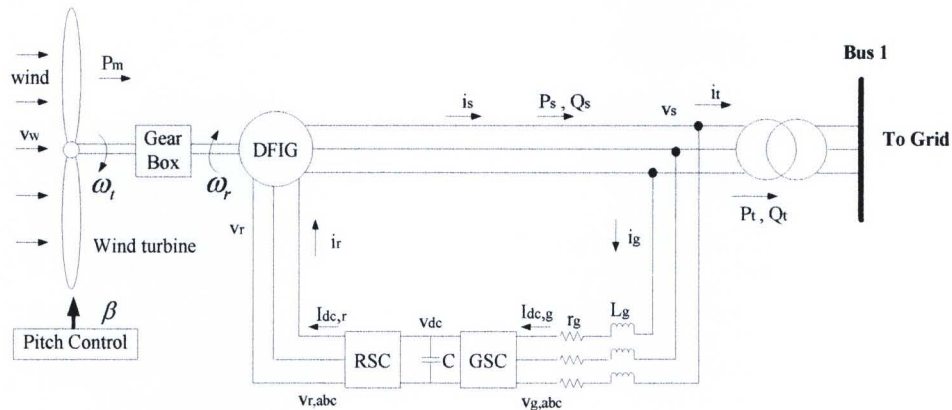
- v_0 คือ ความไม่แน่นอนของความเร็วลมที่เวลาเริ่มต้น ซึ่งกำหนดให้มีค่าเป็น 0
- v_t คือ ความไม่แน่นอนของความเร็วลมที่เวลาที่สนใจ
- $v_{trend,t-1}$ คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วลมของชั่วโมงก่อนหน้าจากข้อมูลความเร็วลมจริงเฉลี่ยในแต่ละเดือน ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าความเร็วเริ่มต้นของชั่วโมงที่สนใจ (เท่ากับ $a + v_0$)
- σ คือ ค่าความแปรปรวนของความเร็วลม โดยค่า σ ที่เหมาะสม จะประมาณได้จากวิธีความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด (Least square error)
- t คือ จุดเวลาที่ต้องการพิจารณา

2.6 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG)

โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 จากรูปจะพบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะถูกป้อนกระแสเข้าทั้ง 2 ทาง คือ ทั้งทางด้านขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ โดยฝั่งสเตเตอร์จะต่อโดยตรงกับระบบไฟฟ้า แต่ทางด้านโรเตอร์จะต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัว (Rotor-side converter และ grid-side converter) ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ทั้ง



สองตัวจะต่อกันผ่านวงจรไฟตรง (DC-Link) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้สามารถควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลเข้าหรือออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ดังนั้น จึงสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าที่แรงดันค่อนข้างคงที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้าเมื่อความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์มีค่าไม่คงที่ได้ [8-9]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง

2.6.1 แบบจำลองส่วนกลไฟฟ้า

แบบจำลองส่วนนี้จะแสดงถึงสถานะของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ โดยส่วนทางกลนี้จะทำหน้าที่แปลงแรงบิดจากกำลังลมเป็นแรงบิดทางกลไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาโครงสร้างทางกลนี้เป็นแบบจำลองแบบมวลก้อนเดียว [8] ดังนั้น สมการพลวัตทางกลไฟฟ้า (Electromechanical dynamic) ของระบบส่วนนี้สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.19)

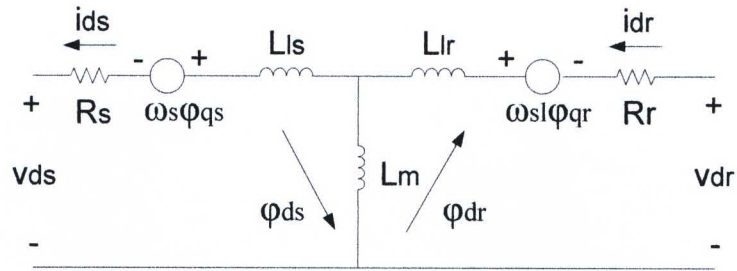
$$2H_m \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \quad (2.19)$$

โดยที่

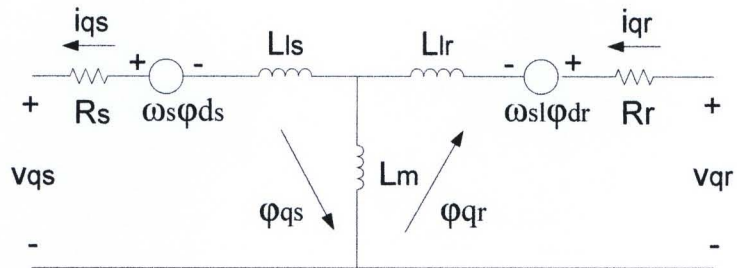
- T_m คือ แรงบิดทางกลที่ได้จากกำลังลมที่ผ่านกังหันลมเข้ามา
- T_e คือ แรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- H_m คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง

แบบจำลองที่ใช้นี้จะละเลยผลของสภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้าในสเตเตอร์ และจะสามารถแสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง [10] ได้ดังรูปที่ 2.7



a) แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางในแกน d



b) แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางในแกน q

รูปที่ 2.7 แบบจำลองสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทางในแกน $d - q$

จากรูปที่ 2.7 เราสามารถแสดงสมการของแรงดันและฟลักซ์คัลล์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองทาง [10-12] ในแกน $d - q$ ได้ดังนี้

สมการแรงดันของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ :

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \quad (2.20)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \quad (2.21)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{1}{\omega_{base}} \rho \phi_{dr} - \omega_{sl} \phi_{qr} \quad (2.22)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{1}{\omega_{base}} \rho \phi_{qr} + \omega_{sl} \phi_{dr} \quad (2.23)$$

สมการฟลักซ์คัลล์ :

$$\phi_{ds} = -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.24)$$

$$\phi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2.25)$$

$$\varphi_{dr} = L_r i_{dr} - L_m i_{ds} \quad (2.26)$$

$$\varphi_{qr} = L_r i_{qr} - L_m i_{qs} \quad (2.27)$$

โดยที่

v_{ds}, v_{qs}	คือ	แรงดันของขดลวดสเตเตอร์ ในแกน d, q ตามลำดับ
v_{dr}, v_{qr}	คือ	แรงดันของขดลวดโรเตอร์ ในแกน d, q ตามลำดับ
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	คือ	ฟลักซ์ของขดลวดสเตเตอร์ ในแกน d, q ตามลำดับ
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	คือ	ฟลักซ์ของขดลวดโรเตอร์ ในแกน d, q ตามลำดับ
i_{ds}, i_{qs}	คือ	กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ ในแกน d, q ตามลำดับ
i_{dr}, i_{qr}	คือ	กระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ ในแกน d, q ตามลำดับ
R_s, R_r	คือ	ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ และโรเตอร์ ตามลำดับ
L_s, L_r	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ และโรเตอร์ ตามลำดับ
L_m	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดระหว่างสเตเตอร์ และโรเตอร์
ω_{sl}	คือ	ค่าความเร็วสลิป คำนวณได้จาก $\omega_s - \omega_r$
ω_{base}	คือ	ค่าความเร็วฐานของความเร็วโรเตอร์
ρ	คือ	ตัวดำเนินการอนุพันธ์เทียบกับเวลา $\frac{d}{dt}$

เมื่อทราบค่าแรงดันและกระแสของสเตเตอร์และโรเตอร์จากสมการข้างต้นแล้ว เราจะสามารถคำนวณค่าแรงบิดทางไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ไหลออกจากฝั่งสเตเตอร์ (P_s, Q_s) และกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ไหลเข้าสู่โรเตอร์ (P_r, Q_r) ได้จาก

$$T_e = \varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds} \quad (2.28)$$

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (2.29)$$

$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (2.30)$$

$$P_r = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \quad (2.31)$$

$$Q_r = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \quad (2.32)$$

2.6.3 แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์

แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยกระแส (Current-controlled voltage source) ดังรูปที่ 2.8 คอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลง

พลังงานไฟฟ้าสลับที่ความถี่หนึ่งไปเป็นอีกความถี่หนึ่ง โดยผ่านการเชื่อมโยงทางไฟตรง สมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองของวงจรไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ดังนี้ [8-9]

$$I_{dc} = I_{dc,g} - I_{dc,r} = C\rho V_{dc} \quad (2.33)$$

โดยที่

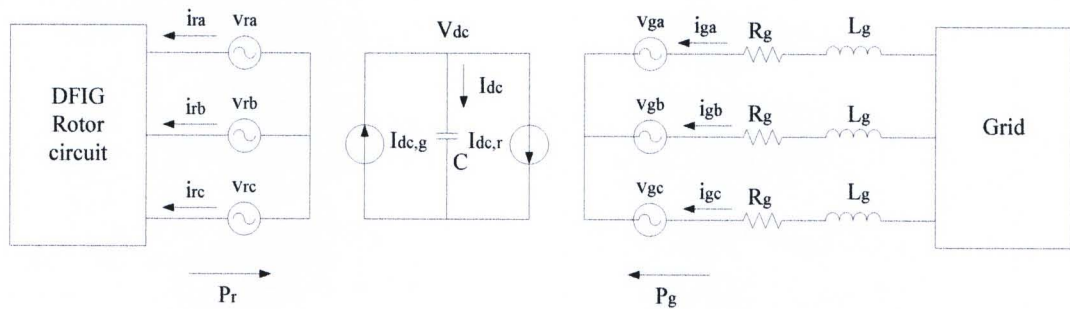
$I_{dc,g}$ คือ กระแสที่ไหลในวงจรไฟตรงฝั่งระบบไฟฟ้า

$I_{dc,r}$ คือ กระแสที่ไหลในวงจรไฟตรงฝั่งขดลวดโรเตอร์

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจรไฟตรง

ρ คือ ตัวดำเนินการอนุพันธ์เทียบกับเวลา $\frac{d}{dt}$

V_{dc} คือ แรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.8 แบบจำลองคอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยกระแส

ในสภาวะอยู่ตัว $I_{dc,g} = I_{dc,r}$ ดังนั้นแรงดันที่วงจรไฟตรง (V_{dc}) จะมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อเกิดการรบกวน $I_{dc} \neq 0$ จะทำให้ V_{dc} มีค่าเปลี่ยนแปลงหรือแกว่งได้

ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านวงจรกรอง [13] จะสามารถแสดงเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ (2.34) - (2.35)

$$v_{ds} = R_g i_{dg} + \frac{1}{\omega_{base}} \cdot L_g \rho i_{dg} - \omega_s L_g i_{qg} + v_{dg} \quad (2.34)$$

$$v_{qs} = R_g i_{qg} + \frac{1}{\omega_{base}} \cdot L_g \rho i_{qg} - \omega_s L_g i_{dg} + v_{qg} \quad (2.35)$$

โดยที่

v_{dg}, v_{qg} คือ แรงดันของคอนเวอร์เตอร์ที่ฝั่งระบบไฟฟ้าในแกน $d - q$

i_{dg}, i_{qg}	คือ	กระแสที่ไหลในวงจรกรองที่ระบบไฟฟ้าในแกน $d - q$
R_g	คือ	ความต้านทานในวงจรกรองที่ระบบไฟฟ้า
L_g	คือ	ความเหนี่ยวนำในวงจรกรองที่ระบบไฟฟ้า

จากสมการต่างๆ ข้างต้น จะทำให้สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่วงจรกรองได้ดังสมการ (2.36) - (2.39)

$$P_c = v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg} \quad (2.36)$$

$$Q_c = v_{qg}i_{dg} - v_{dg}i_{qg} \quad (2.37)$$

$$P_g = v_{ds}i_{dg} + v_{qs}i_{qg} \quad (2.38)$$

$$Q_g = v_{qs}i_{dg} - v_{ds}i_{qg} \quad (2.39)$$

โดยที่

P_c, Q_c คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ร่แอกทีฟที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้า

P_g, Q_g คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ร่แอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองที่ระบบไฟฟ้า

ส่วนการควบคุมแรงดันขาออกของคอนเวอร์เตอร์ จะใช้ดัชนีการมอดูเลต (Modulation index) ในการควบคุม [13] ดังสมการ (2.40)

$$v_{AC} = \frac{mV_{dc}}{2} \sin(\omega t) \quad (2.40)$$

โดยที่

v_{AC} คือ แรงดันไฟสลับขาออกจากคอนเวอร์เตอร์

m คือ ดัชนีการมอดูเลต

ω คือ ความถี่ไฟฟ้าขาออกจากคอนเวอร์เตอร์

2.6.4 แบบจำลองของดังควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำสองทาง

การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชนิดเหนี่ยวนำสองทาง ประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก คือ การควบคุมทางกล และการควบคุมทางไฟฟ้า

2.6.4.1 แบบจำลองของตัวควบคุมทางกล

การควบคุมทางกลจะควบคุมผ่านมุมพิชของใบพัดของกังหันลม โดยเมื่อความเร็วลมค่าสูงผ่านเข้ากังหันลม อาจทำให้กังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหายได้ จึงต้องมีการควบคุมดังกล่าว ซึ่งกระทำโดยการปรับมุมพิช (β) ให้กังหันลมรับพลังงานน้อยลงเมื่อความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงเกินกำหนด การควบคุมมุมพิชของกังหันลมสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.41) ซึ่งจะควบคุมด้วยอัตราการขยายที่แสดงในภาคผนวก ข. และจะมีการจำกัดค่ามุมพิชไม่ให้เกินค่ามุมพิชสูงสุด [6]

$$\beta = K_\beta(\omega_r - \omega_{r,\max}) \quad (2.41)$$

2.6.4.2 แบบจำลองของตัวควบคุมทางไฟฟ้า

การควบคุมทางไฟฟ้าจะอาศัยการควบคุมแบบเวกเตอร์ โดยแยกออกเป็นารควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากสเตเตอร์ผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งโรเตอร์ (Rotor-side Converter: RSC) และการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้า (Grid-side Converter: GSC)

2.6.4.2.1 การควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งโรเตอร์

จุดประสงค์ของการควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งโรเตอร์ คือ การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลออกจากสเตเตอร์ รวมถึงเป็นการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการควบคุมกระแสที่ไหลภายในขดลวดโรเตอร์ [8-9, 14]

การควบคุมดังกล่าวนี้ ประกอบด้วยการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยใช้กรอบอ้างอิง Stator-flux oriented ซึ่งแกน d ของกรอบอ้างอิง $d-q$ จะถูกจัดให้เป็นแนวเดียวกับกับเวกเตอร์ของฟลักซ์ของขดลวดสเตเตอร์ (φ_s) นั่นคือ $\varphi_{ds} = \varphi_s$ และ $\varphi_{qs} = 0$ เมื่อแทนค่าฟลักซ์ดังกล่าวในสมการสมการแรงดัน (2.20) จะได้ว่า

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} \quad (2.42)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \quad (2.43)$$

และเมื่อแทนค่าในสมการฟลักซ์เชื่อมโยง (2.25) จะพบว่า

$$i_{qs} = \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (2.44)$$

$$i_{ds} = \frac{L_m}{L_s} i_{dr} - \frac{1}{L_s} \varphi_{ds} \quad (2.45)$$

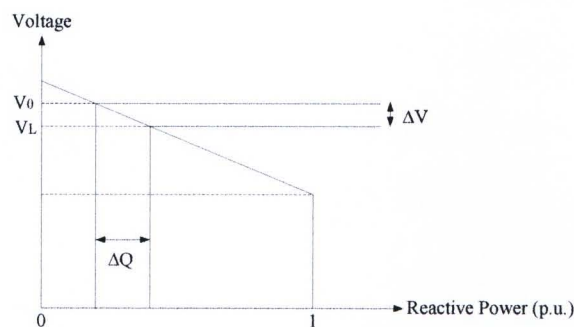
เมื่อละเลยค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ($R_s = 0$) และให้ความเร็วเชิงโคเน็ล $\omega_s = 1$ เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการกำลังไฟฟ้า (2.29) - (2.30) จะพบว่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ออกจากสเตเตอร์จะถูกควบคุมด้วยกระแสในโรเตอร์ ดังสมการ (2.46) - (2.47)

$$P_s = \varphi_{ds} \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (2.46)$$

$$Q_s = \varphi_{ds} \frac{L_m}{L_s} i_{dr} - \frac{1}{L_s} \varphi_{ds}^2 \quad (2.47)$$

ที่ค่าความเร็วเชิงมุมค่าหนึ่งๆ กำลังไฟฟ้าจริง (P_s) จะถูกควบคุมให้ได้ค่าสูงสุด ซึ่งเมื่อความเร็วลมที่เข้ามามีค่าต่ำจนไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ที่ความเร็วค่านั้นกำลังไฟฟ้าจริงจะถูกควบคุมให้มีค่าเป็น 0 p.u. และเมื่อความเร็วลมที่เข้ามามีค่าสูงเกินพิคกำลังไฟฟ้าจริงจะถูกควบคุมให้มีค่าเป็น 1 p.u. ซึ่งเป็นค่าพิค

ในส่วนของการควบคุมกำลังรีแอกทีฟนั้น จะมีผลต่อแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งทำให้เราไม่สามารถควบคุมทั้งกำลังรีแอกทีฟและแรงดันพร้อมกันได้ กล่าวคือ ถ้ามีความต้องการกำลังรีแอกทีฟเพิ่มขึ้น แรงดันจะถูกควบคุมให้มีค่าสูงเพื่อช่วยจ่ายกำลังรีแอกทีฟ แต่ถ้าความต้องการกำลังรีแอกทีฟลดลง แรงดันจะถูกควบคุมให้มีค่าต่ำลงเพื่อช่วยดูดซับกำลังรีแอกทีฟโดยถ้าต้องการควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่ การควบคุมจะทำได้โดยการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน d และการควบคุมจะเป็นไปตามกราฟลักษณะสมบัติของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟและแรงดันตามรูปที่ 2.9 ซึ่งมีลักษณะเป็นรูป (Droop) [2]



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟและขนาดแรงดัน

2.6.4.2.2 การควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้า

จุดประสงค์ของการควบคุมผ่านคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบไฟฟ้า คือ เพื่อรักษาแรงดันที่ตกคร่อมวงจรไฟตรงให้มีค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นกับขนาดและทิศทางของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนเวอร์เตอร์ และควบคุมการไหลของกำลังรีแอกทีฟที่เข้าวงจรกรองที่ระบบไฟฟ้า โดยผ่านการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองฝั่งระบบไฟฟ้า [8-9,14]

การควบคุมดังกล่าวนี้ ประกอบด้วยการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ โดยใช้กรอบอ้างอิง Stator-voltage oriented ซึ่งแกน d ของกรอบอ้างอิง $d-q$ จะถูกจัดให้เป็นแนวเดียวกันกับเวกเตอร์แรงดันของระบบไฟฟ้า (v_s) ดังนั้น $v_s = v_{ds}$ และ $v_{qs} = 0$ เมื่อแทนค่าแรงดันดังกล่าวในสมการกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่วงจรกรอง (2.38) - (2.39) จะได้ว่า

$$P_g = v_{ds} i_{dg} \quad (2.48)$$

$$Q_g = -v_{ds} i_{qg} \quad (2.49)$$

จากสมการ (2.33) เมื่อกำหนดให้ $P_{gc} = V_{dc} I_{dc,g}$ และ $P_{gr} = V_{dc} I_{dc,g}$ จะได้ว่า

$$\rho V_{dc} = \frac{1}{CV_{dc}} (P_{gc} - P_{gr}) \quad (2.50)$$

หากจะเลยกำลังสูญเสียในวงจรกรองที่ระบบไฟฟ้า จะทำให้ $P_{gc} = P_g$ ดังนั้น

$$\rho V_{dc} = \frac{1}{CV_{dc}} (P_g - P_{gr}) = \frac{1}{CV_{dc}} (S_{base} v_{ds} i_{dg} - P_{gr}) \quad (2.51)$$

โดยที่

S_{base} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน