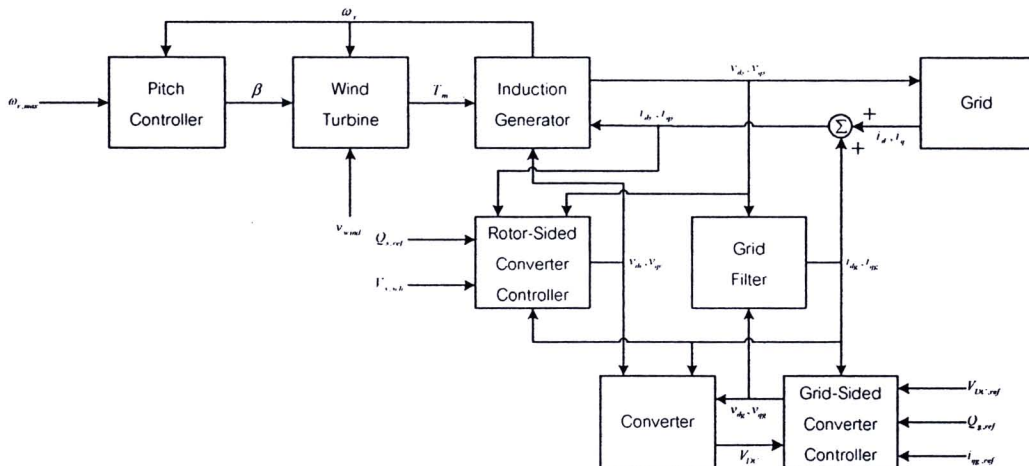


บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

บทนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG ซึ่งได้แก่ แบบจำลองของความเร็วลม แบบจำลองของกังหันลม แบบจำลองของ DFIG และแบบจำลองของตัวควบคุม แบบจำลองทั้งหมดถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink [5]

แผนภาพของแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพของแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG

3.1 แบบจำลองของความเร็วลม

ความเร็วลมมีการแปรเปลี่ยนไปในแต่ละพื้นที่ด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพพื้นที่ ความสูง สภาพอากาศ ฤดูกาล เป็นต้น ความเร็วลมอาจถูกจำลองเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นส่วนที่เปลี่ยนแปลงช้ามากตามฤดูกาลและช่วงเวลากลางวันหรือกลางคืน การเปลี่ยนแปลงนี้จะอยู่ในระดับนาที่หรือชั่วโมงขึ้นไป ส่วนนี้อาจถือว่ามีค่าคงที่เท่ากับค่าเฉลี่ยเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้นๆ สำหรับส่วนหลังเป็นส่วนที่มีการแปรปรวนในช่วงเวลาสั้นๆ รอบค่าเฉลี่ยในระดับวินาทีซึ่งถูกจำลองด้วยตัวแปรสุ่ม ทั้งนี้ความเร็วลมไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดได้จึงต้องนำสัญญาณที่ได้จากการสุ่มมากรองผ่านวงจรกรอง [12, 25–27]

วิทยานิพนธ์นี้จำลองความเร็วลมโดยใช้แบบจำลองในช่วงระยะเวลาสั้นๆ แบบจำลองดังกล่าวเป็นไปตามสมการ (3.1) [25]

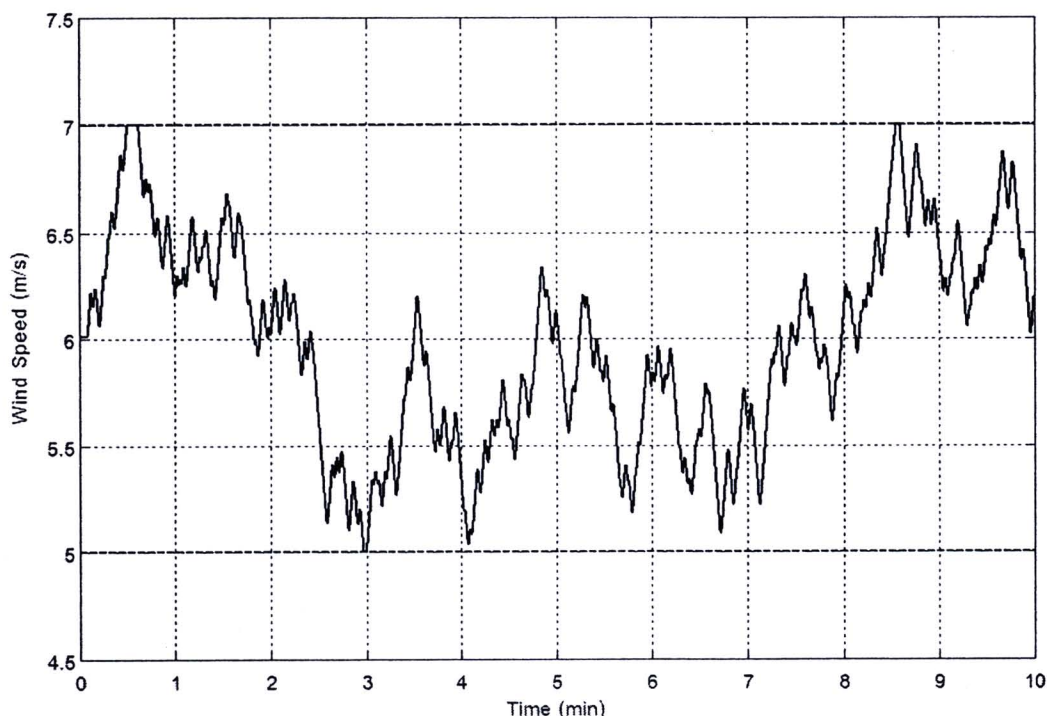
$$v_{wind} = v_m + v_i \quad (3.1)$$

โดยที่ v_{wind} คือ ความเร็วลม v_m คือ ความเร็วลมเฉลี่ย และ v_i คือ ความเร็วลมส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งได้จากการนำสัญญาณสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และมีความแปรปรวนเป็น 1 มากรองผ่านวงจรกรองที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ (3.2) [25]

$$H(s) = \frac{k(v_m)}{(p_1(v_m)s + 1)(p_2(v_m)s + 1)} \quad (3.2)$$

โดยที่ $H(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรอง k คือ อัตราขยายของวงจรกรอง p_1 และ p_2 คือ ค่าคงตัวเวลาของวงจรกรอง พารามิเตอร์ของวงจรกรองทั้งหมดเป็นฟังก์ชันของค่าความเร็วลมเฉลี่ย

วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ความเร็วลมเฉลี่ยมีค่า 6 m/s [28] อัตราขยาย ค่าคงตัวเวลาตัวที่ 1 และค่าคงตัวเวลาตัวที่ 2 ในสมการ (3.2) มีค่าเป็น 6 pu 70 s และ 2 s ตามลำดับ [25] นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองความเร็วลมโดยสุ่มค่าจากตัวแปรสุ่มทุก 1 s [12] จำกัดความเร็วลมให้อยู่ในช่วง 5 ถึง 7 m/s และจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมไว้ไม่เกิน 0.1 m/s² ผลการจำลองความเร็วลมเป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบ

3.2 แบบจำลองของกังหันลม

กังหันลมทำหน้าที่รับกำลังกลจากลมเพื่อใช้ขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้จำลองกำลังกลที่ออกจากกังหันลมด้วยแบบจำลองที่ละเอียดพลวัตในระบบเชิงกลในระบบต่อหน่วยดังสมการ (3.3) [1, 2, 5, 13, 29]

$$P_m = k_p \cdot c_p(\lambda, \beta) \cdot v_{wind}^3 \quad (3.3)$$

โดยที่ P_m คือ กำลังกลขาออกจากกังหันลม k_p คือ กำลังกลสูงสุดที่ได้เมื่อความเร็วลมมีค่า 1 pu c_p คือ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของกังหันลม β คือ มุมพิชของใบพัดกังหันลม และ λ คือ อัตราส่วนความเร็วยอด (Tip Speed Ratio) ซึ่งมีค่าดังสมการ (3.4)

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_{wind}} \quad (3.4)$$

โดยที่ ω_r คือ ความเร็วโรเตอร์ และ R คือ รัศมีของพื้นที่ที่กังหันลมกวาด

กราฟกำลังกลขาออกจากกังหันลมที่ได้จากผู้ผลิตส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกัน ดังนั้นจึงใช้การประมาณค่า c_p ด้วยฟังก์ชันเดียวกันได้ [1] ทั้งนี้ [1, 5, 13, 29] ได้แสดงผลการประมาณค่า c_p ไว้

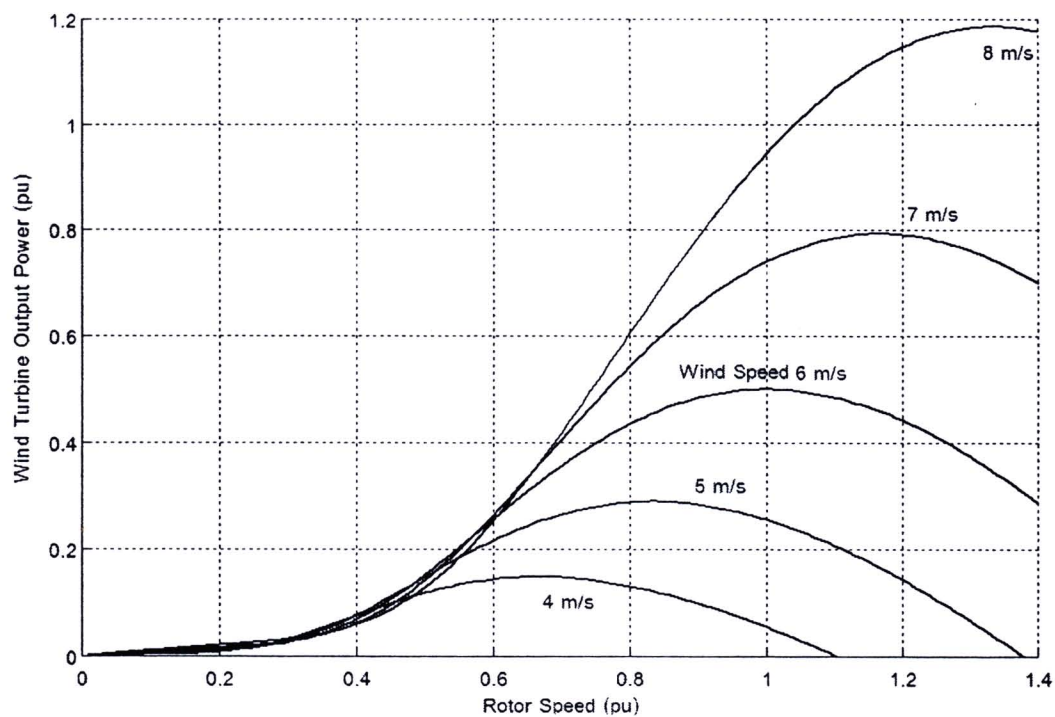
วิทยานิพนธ์นี้กำหนดค่าฐานของความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s รัศมีของพื้นที่ที่กังหันลมกวาดเท่ากับ 48.6 m ค่า k_p ในสมการ (3.3) เท่ากับ 0.5 pu และค่า c_p ในสมการ (3.3) เป็นไปตามสมการ (3.5) [5]

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(\frac{-21}{\lambda_i} \right) + 0.0068\lambda \quad (3.5)$$

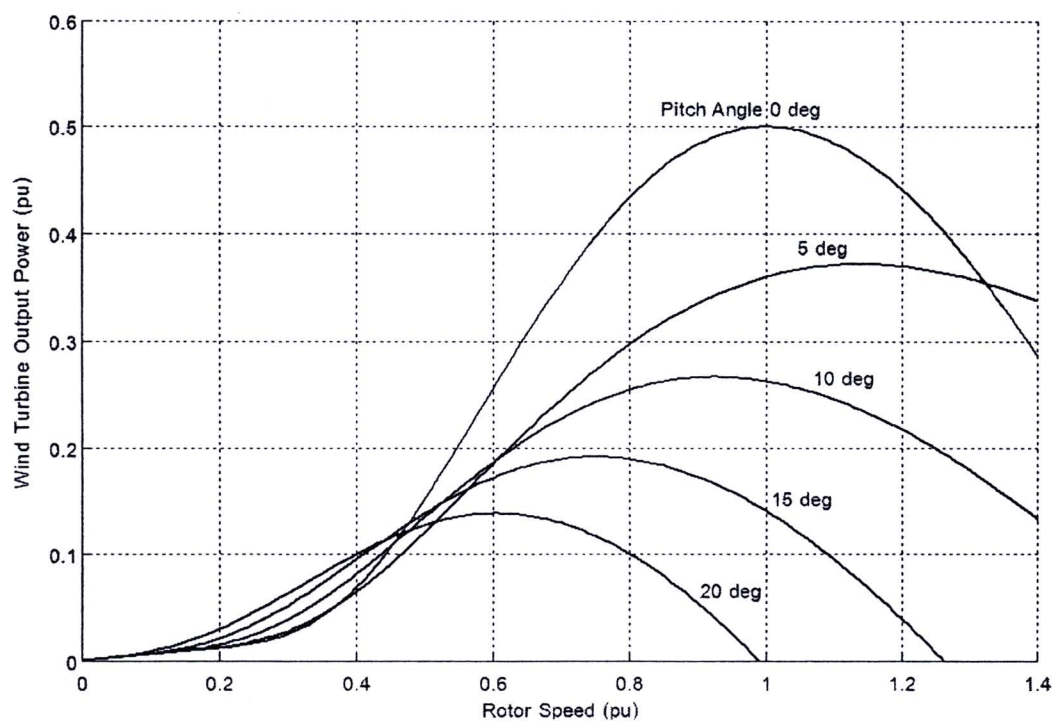
โดยที่ λ_i มีค่าดังสมการ (3.6)

$$\lambda_i = \left[\left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} \right) - \left(\frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \right]^{-1} \quad (3.6)$$

กล่าวโดยสรุป ลักษณะสมบัติของกังหันลมเป็นดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ลักษณะสมบัติของกังหันลมที่ความเร็วลมค่าต่างๆ (มุมพิชเท่ากับ 0 องศา)



รูปที่ 3.4 ลักษณะสมบัติของกังหันลมที่มุมพิชค่าต่างๆ (ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s)

สำหรับแรงบิดทางกลที่ได้จากกังหันลมเป็นไปตามสมการ (3.7)

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (3.7)$$

โดยที่ T_m คือ แรงบิดทางกลที่ได้จากกังหันลม

3.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานกลที่ได้จากกังหันลมเป็นพลังงานไฟฟ้า DFIG ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คอนเวอร์เตอร์ และวงจรกรองที่กริด โดยค่าพารามิเตอร์ของ DFIG ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้แสดงไว้ในภาคผนวก [5]

3.3.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ละเลยผลของสภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้าในสเตเตอร์ โดยสมการของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสและระบบต่อหน่วยเป็นดังนี้ [1, 2, 13–16]

สมการฟลักซ์เชื่อมโยง คือ

$$\begin{aligned}\psi_{ds} &= -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{dr} &= -L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \psi_{qs} &= -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{qr} &= -L_m i_{qs} + L_r i_{qr}\end{aligned}\tag{3.8}$$

โดยที่

- ψ_{ds} คือ ฟลักซ์ในขดลวดสเตเตอร์ในแกน d
- ψ_{qs} คือ ฟลักซ์ในขดลวดสเตเตอร์ในแกน q
- ψ_{dr} คือ ฟลักซ์ในขดลวดโรเตอร์ในแกน d
- ψ_{qr} คือ ฟลักซ์ในขดลวดโรเตอร์ในแกน q
- L_s คือ ความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดสเตเตอร์
- L_r คือ ความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดโรเตอร์
- L_m คือ ความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์
- i_{ds} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ในแกน d
- i_{qs} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ในแกน q
- i_{dr} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน d
- i_{qr} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน q

สมการแรงดันของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ คือ

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= -R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} \\
 v_{qs} &= -R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} \\
 v_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} \\
 v_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

โดยที่

v_{ds} คือ แรงดันคร่อมขดลวดสเตเตอร์ในแกน d

v_{qs} คือ แรงดันคร่อมขดลวดสเตเตอร์ในแกน q

v_{dr} คือ แรงดันคร่อมขดลวดโรเตอร์ในแกน d

v_{qr} คือ แรงดันคร่อมขดลวดโรเตอร์ในแกน q

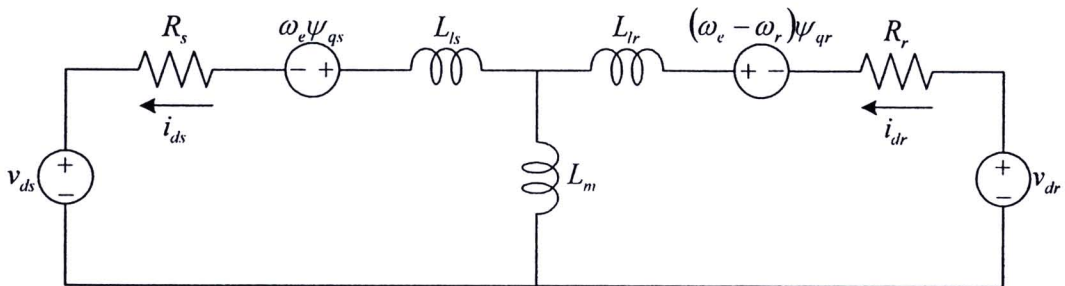
R_s คือ ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

R_r คือ ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์

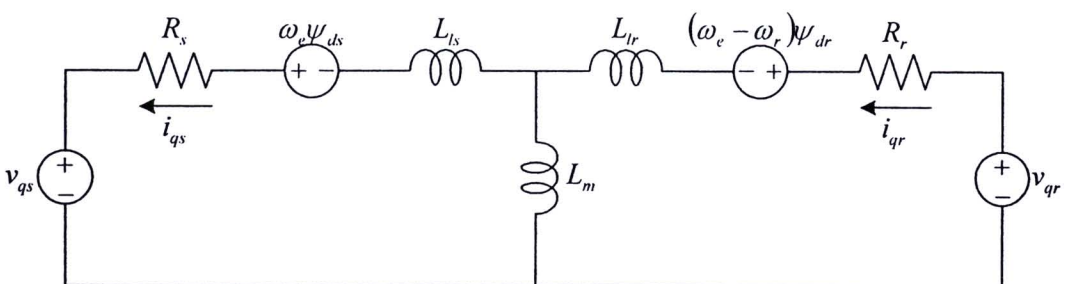
ω_{base} คือ ค่าฐานของความเร็วโรเตอร์

ω_s คือ ความเร็วซิงโครนัส

จากสมการ (3.8) และ (3.9) สามารถเขียนวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกน d



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกน q

สมการสถานะของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ คือ

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H}(T_m - T_{em}) \quad (3.10)$$

โดยที่ H คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ T_{em} คือ แรงบิดทางไฟฟ้าซึ่งมีค่าดังสมการ (3.11)

$$T_{em} = \psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds} \quad (3.11)$$

สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากสเตเตอร์และกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าโรเตอร์เป็นดังสมการ (3.12)

$$\begin{aligned} P_s &= v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} \\ Q_s &= v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \\ P_r &= v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr} \\ Q_r &= v_{qr}i_{dr} - v_{dr}i_{qr} \end{aligned} \quad (3.12)$$

โดยที่ P_s คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากสเตเตอร์ Q_s คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลออกจากสเตเตอร์ P_r คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าโรเตอร์ และ Q_r คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าโรเตอร์

3.3.2 แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์

คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากกริดเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่อีกความถี่หนึ่งเพื่อป้อนให้กับโรเตอร์ โดยสามารถควบคุมแรงดันขาออกของคอนเวอร์เตอร์โดยใช้ดัชนีการมอดูเลต (Modulation Index) ดังสมการ (3.13) [30]

$$V_{AC} = \frac{mV_{DC}}{2\sqrt{2}} \quad (3.13)$$

โดยที่ V_{AC} คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเฟสไฟสลับที่คอนเวอร์เตอร์ V_{DC} คือ แรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ และ m คือ ดัชนีการมอดูเลตซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ส่วนแบบจำลองของวงจรไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์เป็นไปตามสมการ (3.14) [2, 13]

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC}}(I_{DCg} - I_{DCr}) \quad (3.14)$$

โดยที่ C_{DC} คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจรไฟตรง I_{DCg} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรไฟตรงด้านที่เชื่อมต่อกับกริด และ I_{DCr} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรไฟตรงด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์

กำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าโรเตอร์ตามสมการ (3.12) ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสและระบบต่อหน่วยเป็นดังสมการ (3.15) [2]

$$\begin{aligned} P_c &= v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg} \\ Q_c &= v_{qg} i_{dg} - v_{dg} i_{qg} \end{aligned} \quad (3.15)$$

โดยที่ P_c คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด และ Q_c คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด

3.3.3 แบบจำลองของวงจรกริดที่กริด

วงจรกริดที่กริดมีแบบจำลองในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสและระบบต่อหน่วยตามสมการ (3.16)

$$\begin{aligned} v_{ds} - v_{dg} &= R_g i_{dg} + \frac{L_g}{\omega_{base}} \frac{di_{dg}}{dt} - \omega_s L_g i_{qg} \\ v_{qs} - v_{qg} &= R_g i_{qg} + \frac{L_g}{\omega_{base}} \frac{di_{qg}}{dt} + \omega_s L_g i_{dg} \end{aligned} \quad (3.16)$$

โดยที่

v_{dg} คือ แรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดในแกน d

v_{qg} คือ แรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดในแกน q

i_{dg} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกริดที่กริดในแกน d

i_{qg} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกริดที่กริดในแกน q

R_g คือ ความต้านทานของตัวต้านทานในวงจรกริดที่กริด

L_g คือ ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำในวงจรกริดที่กริด

สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าวงจรกริดที่กริดและกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสและระบบต่อหน่วยเป็นดังสมการ (3.17) [2]

$$\begin{aligned} P_g &= v_{ds} i_{dg} + v_{qs} i_{qg} \\ Q_g &= v_{qs} i_{dg} - v_{ds} i_{qg} \\ P_t &= v_{ds} i_{dt} + v_{qs} i_{qt} \\ Q_t &= v_{qs} i_{dt} - v_{ds} i_{qt} \end{aligned} \quad (3.17)$$

โดยที่

P_g คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าวงจรกริดที่กริด

Q_g คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกริดที่กริด

- P_t คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้ากริด
 Q_t คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้ากริด
 i_{dt} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดในแกน d
 i_{qt} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดในแกน q

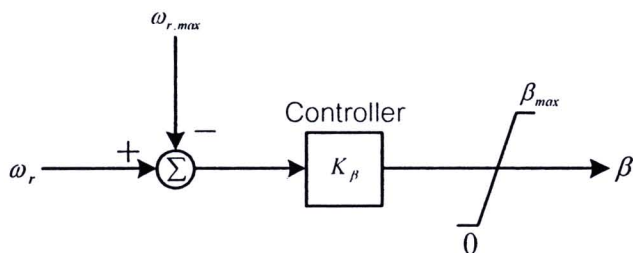
3.4 แบบจำลองของตัวควบคุม

การควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมทางกลซึ่งควบคุมผ่านทางมุมพิชของใบพัดกังหันลม และการควบคุมทางไฟฟ้าซึ่งควบคุมผ่านทางคอนเวอร์เตอร์ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้แสดงไว้ในภาคผนวก [5]

3.4.1 แบบจำลองของตัวควบคุมทางกล

ตัวควบคุมทางกล ได้แก่ ตัวควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลมซึ่งทำงานเมื่อความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ โดยตัวควบคุมจะปรับมุมพิชให้รับพลังงานจากลมน้อยลงเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับความเสียหาย [5] ดังนั้นเมื่อตัวควบคุมนี้ทำงานทำให้ไม่สามารถนำพลังงานจากลมมาใช้ได้อย่างเต็มที่ แผนภาพของตัวควบคุมมุมพิชเป็นดังรูปที่

3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพการควบคุมมุมพิชของใบพัดกังหันลม

3.4.2 แบบจำลองของตัวควบคุมทางไฟฟ้า

ในการควบคุมทางไฟฟ้า จะสามารถแยกการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และการควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟหรือแรงดันออกจากกันได้โดยอาศัยหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ การควบคุมแบบนี้จะทำผ่านคอนเวอร์เตอร์ทั้งด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์และด้านที่เชื่อมต่อกับกริด โดยการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากสเตเตอร์ และการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าคอนเวอร์เตอร์

3.5 การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์

การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ และการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์หรือการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์แยกการควบคุมระหว่างการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ โดยหมุนแกน d ของกรอบอ้างอิงให้อยู่ในแนวเดียวกับฟลักซ์ในขดลวดสเตเตอร์ [2–4] ดังนั้น $\psi_{qs} = 0$ และเมื่อแทนค่าในสมการ (3.8) จะได้

$$i_{qs} = \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (3.18)$$

และเมื่อแทนค่าในสมการ (3.9) จะได้

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} \quad (3.19)$$

เมื่อละเลยความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์โดยให้ $R_s = 0$ และความเร็วเชิงโคโรนัส ω_s มีค่าเป็น 1 pu จากสมการ (3.9) และ (3.19) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} v_{ds} &= 0 \\ v_{qs} &= \psi_{ds} \end{aligned} \quad (3.20)$$

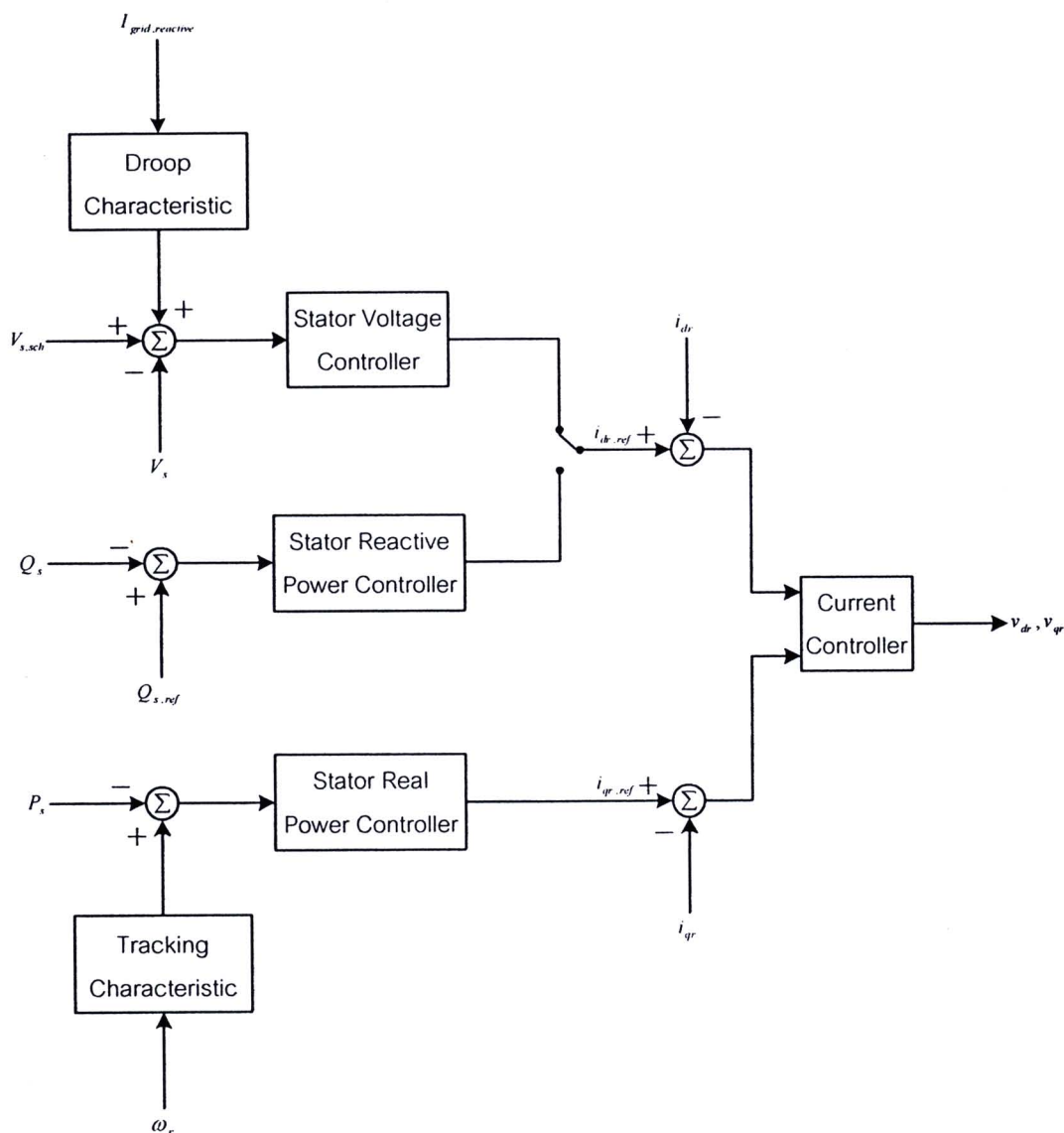
แทนค่าสมการ (3.20) ในสมการ (3.12) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_s &= \psi_{ds} i_{qs} \\ Q_s &= \psi_{ds} i_{ds} \end{aligned} \quad (3.21)$$

แทนค่าสมการ (3.8) และ (3.18) ในสมการ (3.21) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} i_{qr} \\ Q_s &= \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} i_{dr} - \frac{1}{L_s} \psi_{ds}^2 \end{aligned} \quad (3.22)$$

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อกับกริด ฟลักซ์ในขดลวดสเตเตอร์จึงค่อนข้างจะคงที่ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ออกจากสเตเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน q และแกน d ตามลำดับ แผนภาพการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 3.8



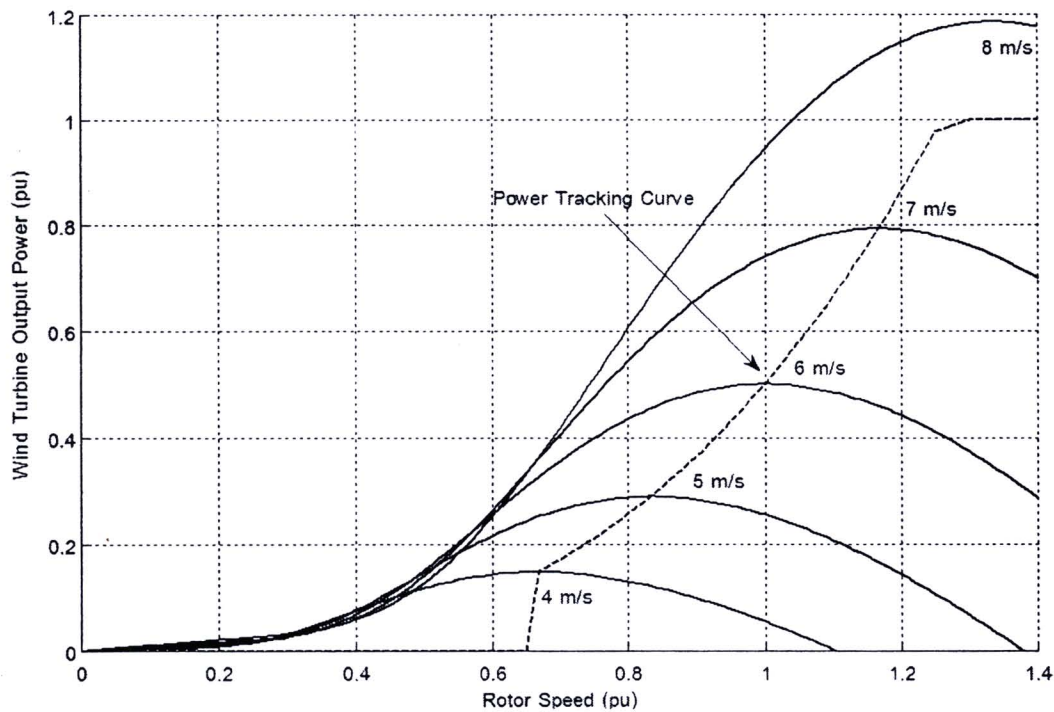
รูปที่ 3.8 แผนภาพการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์

3.5.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานโดยการควบคุมให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่งๆ [5] กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกจากสเตเตอร์จะถูกควบคุมให้มีค่าเป็นไปตามค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ซึ่งคำนวณจากสมการ (3.23)

$$P_{s,ref} = \frac{P_{t,ref}}{1-s} \quad (3.23)$$

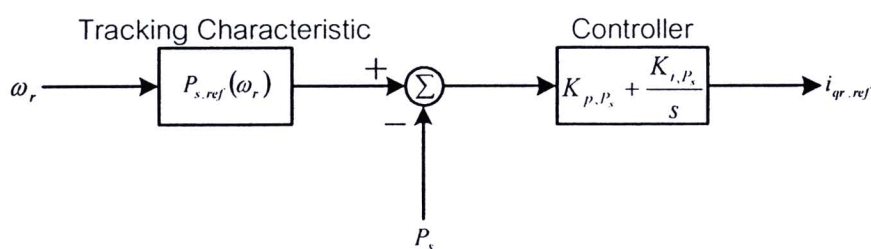
โดยที่ $P_{s,ref}$ คือ ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ $P_{t,ref}$ คือ ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG ซึ่งเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 3.9 และ s คือ สลิป



รูปที่ 3.9 กราฟค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG

จากรูปที่ 3.9 เมื่อความเร็วลมมีค่าต่ำจนไม่สามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้ การควบคุมจะให้ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงมีค่าเป็น 0 pu เมื่อความเร็วลมมีค่าที่สามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้ การควบคุมจะให้ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของกำลังกลขาออกจากกังหันลมที่ความเร็วลมค่าต่างๆ และเมื่อความเร็วลมมีค่าสูงจนนำมาผลิตไฟฟ้าได้เกินค่าพิสัยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การควบคุมจะให้ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงมีค่าเป็น 1 pu ซึ่งเป็นค่าพิสัย

การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ทำโดยใช้การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน q [2-4] ดังรูปที่ 3.10



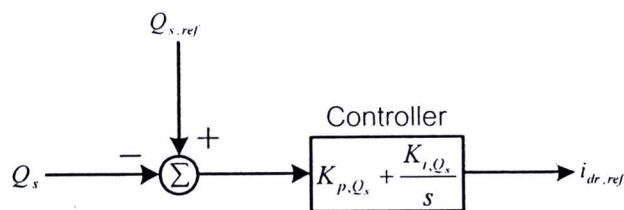
รูปที่ 3.10 แผนภาพการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

การทำงานของตัวควบคุมเป็นดังนี้ เริ่มจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ทำงานในสถานะคงตัว เมื่อความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้น แรงบิดทางกลที่ได้จากกังหันลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่าแรงบิดทางไฟฟ้า ดังนั้นความเร็วโรเตอร์จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวควบคุมจะเพิ่มค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์และ

กำลังไฟฟ้าจริงรวมที่จ่ายออกจาก DFIG มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกำลังไฟฟ้าจริงรวมที่จ่ายออกจาก DFIG และกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่างๆ รวมกันมีค่าเท่ากับกำลังกลที่ได้จากกังหันลม จะทำให้ความเร็วโรเตอร์มีค่าคงที่ ตัวควบคุมหยุดปรับค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ และระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจะกลับเข้าสู่ทำงานในสถานะคงตัว สำหรับการดำเนินงานของตัวควบคุมในกรณีที่ความเร็วลมมีค่าลดลงจะสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน [13, 31]

3.5.2 การควบคุมกำลังไฟฟารีแอคทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

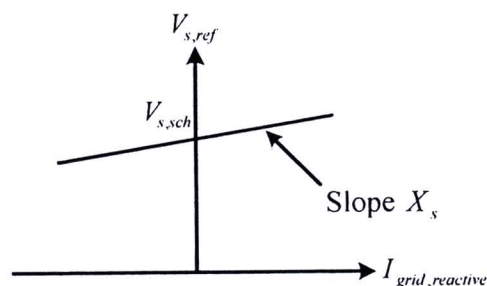
เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานโดยการควบคุมกำลังไฟฟารีแอคทีฟ กำลังไฟฟารีแอคทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกจากสเตเตอร์จะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ ซึ่งการควบคุมทำโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน d [2–4] ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนภาพการควบคุมกำลังไฟฟารีแอคทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

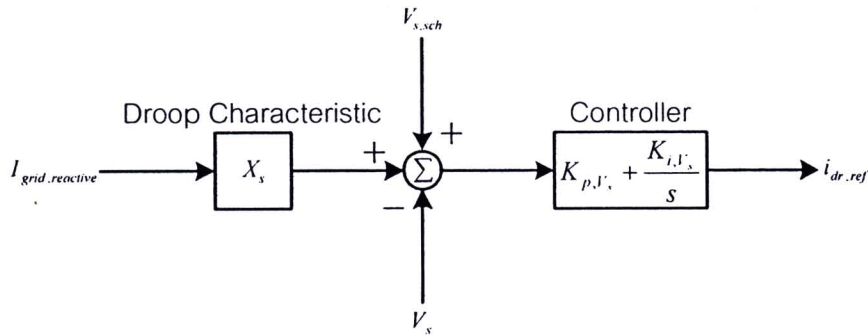
3.5.3 การควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานโดยการควบคุมขนาดแรงดัน ขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ตามกราฟลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟารีแอคทีฟที่จ่ายเข้าสู่กริด และขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้างดรูปที่ 3.12 ซึ่งมีลักษณะเป็นดรู๊ป (Droop) [5] กล่าวคือเมื่อกระแสไฟฟารีแอคทีฟเป็นบวกซึ่งแสดงว่ามีความต้องการกำลังไฟฟารีแอคทีฟ การควบคุมจะทำให้ขนาดแรงดันมีค่าสูงเพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าช่วยจ่ายกำลังไฟฟารีแอคทีฟ และในทางกลับกันเมื่อกระแสไฟฟารีแอคทีฟเป็นลบซึ่งแสดงว่ามีกำลังไฟฟารีแอคทีฟมากเกินไปเกินความต้องการ การควบคุมจะทำให้ขนาดแรงดันมีค่าต่ำเพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าช่วยดูดซับกำลังไฟฟารีแอคทีฟ



รูปที่ 3.12 กราฟลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟารีแอคทีฟและค่าอ้างอิงขนาดแรงดัน

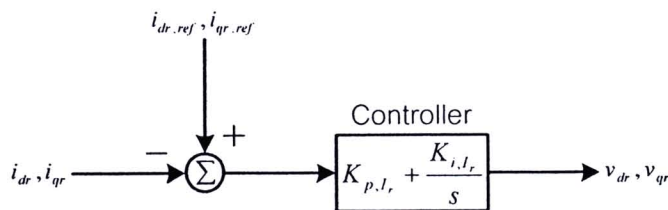
เนื่องจากขนาดแรงดันมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟอย่างมาก ดังนั้นการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ในแกน d [2–4] เช่นเดียวกับการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ เพราะฉะนั้นการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่จ่ายออกจากสเตเตอร์และการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงไม่สามารถทำพร้อมกันได้ แผนภาพการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนภาพการควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.5.4 การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์

เมื่อได้ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงจากตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟหรือแรงดัน ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าจริงที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ แล้วคำนวณค่าแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภาพการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์

3.6 การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด

การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดใช้ในการควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ และการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองที่กริด

การควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดแยกการควบคุมระหว่างการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ โดยหมุนแกน d ของกรอบอ้างอิงให้อยู่ในแนวเดียวกับแรงดันที่กริด [2–4] ดังนั้น $v_{qs} = 0$ และเมื่อแทนค่าในสมการ (3.17) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_g &= v_{ds} i_{dg} \\ Q_g &= -v_{ds} i_{qg} \end{aligned} \quad (3.24)$$

เนื่องจาก $P_c = V_{DC} I_{DCg}$ และ $P_r = V_{DC} I_{DCr}$ แทนค่าในสมการ (3.14) จะได้ว่า

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC} V_{DC}} (P_c - P_r) \quad (3.25)$$

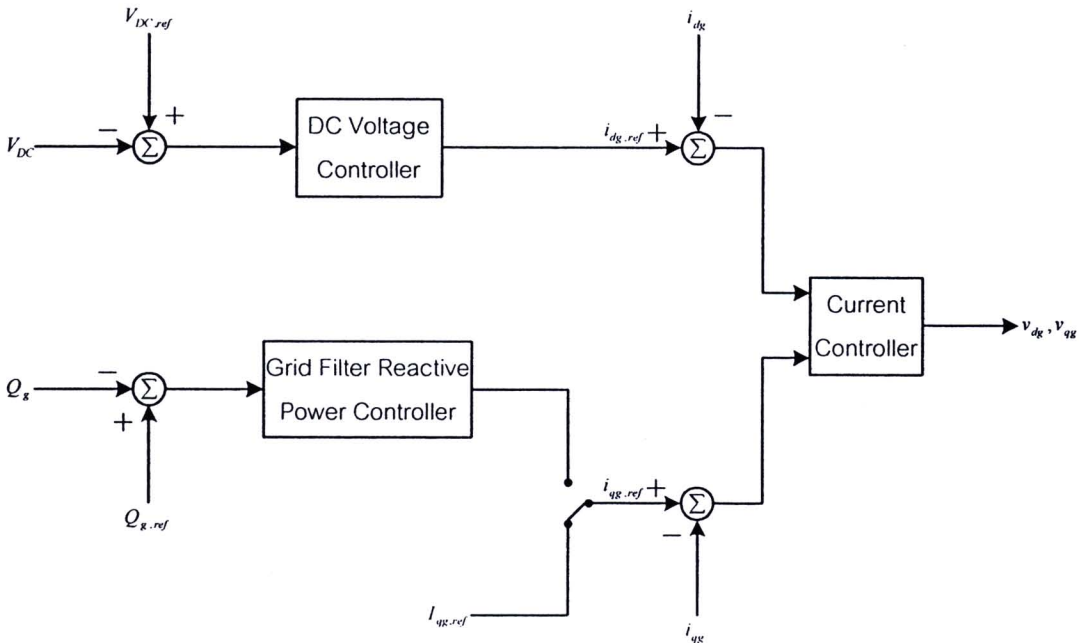
เมื่อละเลยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรกริดที่กริด ดังนั้น $P_c = P_g$ แทนค่าในสมการ (3.25) จะได้

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC} V_{DC}} (P_g - P_r) \quad (3.26)$$

แทนค่าสมการ (3.24) ในสมการ (3.26) จะได้

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC} V_{DC}} (v_{ds} i_{dg} - P_r) \quad (3.27)$$

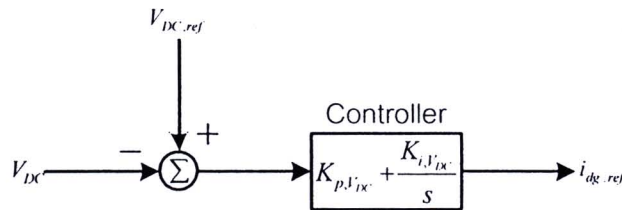
เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อกับกริด แรงดันคร่อมขดลวดสเตเตอร์จึงค่อนข้างจะคงที่ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมแรงดันไฟตรงและกำลังไฟรีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกริดที่กริดด้วยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกริดที่กริดในแกน d และแกน q ตามลำดับ แผนภาพการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดแสดงไว้ในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แผนภาพการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด

3.6.1 การควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์

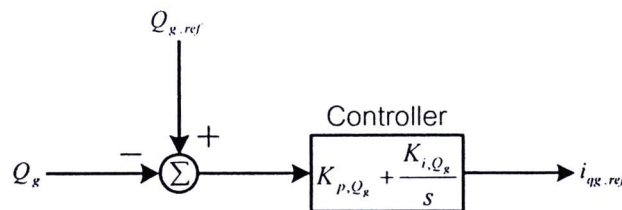
แรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมให้คงที่ไม่ขึ้นกับขนาดและทิศทางของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนเวอร์เตอร์โดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองที่กริดในแกน d [2-4] ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แผนภาพการควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์

3.6.2 การควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองที่กริด

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานโดยการควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองที่กริดจะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ โดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองที่กริดในแกน q [2-4] ดังรูปที่ 3.17

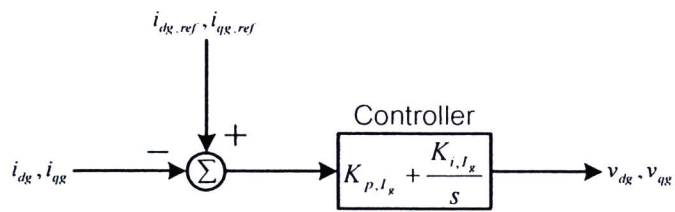


รูปที่ 3.17 แผนภาพการควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลเข้าวงจรกรองที่กริด

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานโดยไม่ได้ใช้งานตัวควบคุมนี้ ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงจะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่

3.6.3 การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรกรองที่กริด

ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ได้จากตัวควบคุมแรงดันไฟตรงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าจริงที่ไหลในวงจรกรองที่กริด เพื่อกำหนดค่าแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริดดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แผนภาพการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในในวงจรกริดที่กริด