

บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุม

บทนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG โดยกรอบงานซาเกียนซึ่งได้แก่ วิธีอสมการและหลักการเข้าคู่ โดยกล่าวถึงแบบจำลองของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ตัวควบคุมที่ออกแบบ เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ผลการออกแบบตัวควบคุม และสรุปผลการออกแบบตัวควบคุม

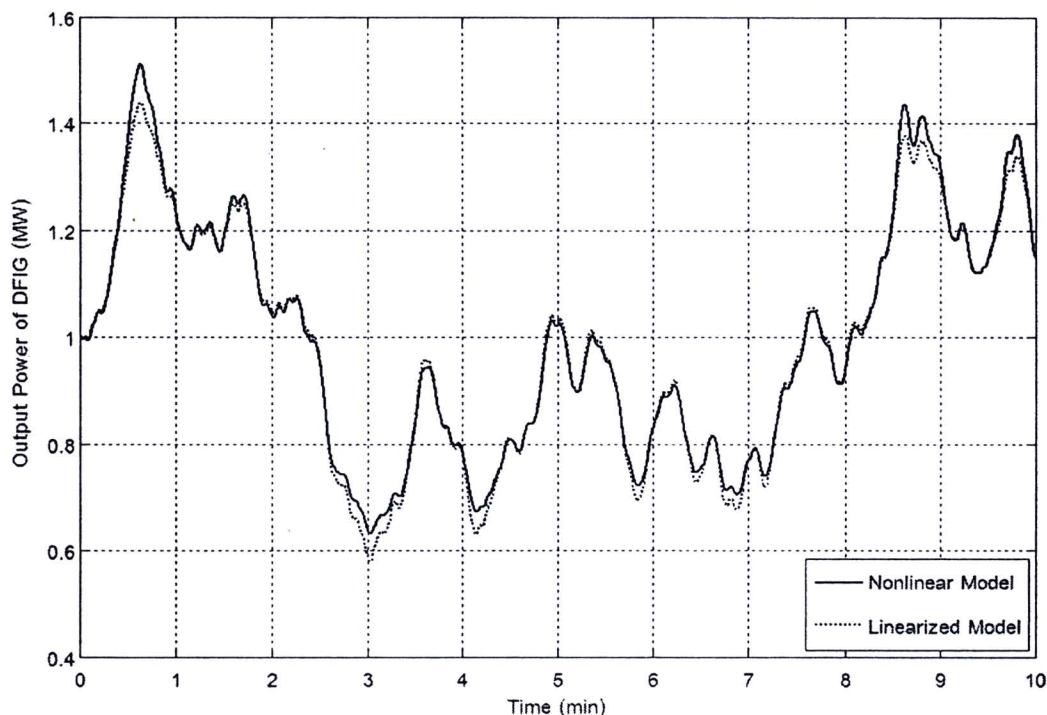
4.1 แบบจำลองของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังมีความซับซ้อนมากและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงไม่สามารถออกแบบตัวควบคุมโดยใช้แบบจำลองของระบบไฟฟ้าทั้งหมดได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอการออกแบบตัวควบคุมโดยแทนระบบไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมต่ออยู่ด้วยวงจรสมมูลของเทวินิน (Thevenin) โดยให้แรงดันเทวินินเป็นสัญญาณเข้าและให้อิมพีแดนซ์เทวินินเป็นค่าคงที่ นอกจากนี้วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้นเพื่อให้ออกแบบการออกแบบตัวควบคุมง่ายขึ้นและเหมาะสมกับการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีอสมการและหลักการเข้าคู่ สำหรับค่าอิมพีแดนซ์เทวินินและจุดทำงานที่ใช้ในการทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้นแสดงไว้ในภาคผนวก

ทั้งนี้ วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์ และกำหนดค่าอ้างอิงกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองที่กริดในแกน q ให้มีค่าคงที่ในการควบคุมที่คอนเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับกริด

แบบจำลองที่ใช้มีตัวแปรสถานะ 13 ตัว ซึ่งเป็นสถานะที่แสดงพลวัตของฟลักซ์ในขดลวดโรเตอร์ในแกน d และแกน q ความเร็วโรเตอร์ แรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองที่กริดในแกน d และแกน q ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ ตัวควบคุมแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ ตัวควบคุมแรงดันไฟตรงในคอนเวอร์เตอร์ และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรกรองที่กริดในแกน d และแกน q สำหรับสัญญาณเข้าของแบบจำลอง ได้แก่ ความเร็วลม แรงดันเทวินินในแกน d และแกน q สัญญาณอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงในรูปที่ 3.10 และสัญญาณอ้างอิงแรงดันในรูปที่ 3.13 ส่วนสัญญาณออกของแบบจำลอง ได้แก่ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและความเร็วโรเตอร์ เนื่องจากสัญญาณทั้งสองเป็นสัญญาณที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการออกแบบตัวควบคุม

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมจะทำได้โดยการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ไม่ได้ทำให้เป็นเชิงเส้น โดยกำหนดให้อิมพีแดนซ์เทวินินมีค่าเป็น 0 pu ความเร็วลมมีค่าดังรูปที่ 3.2 แรงดันเทวินินในแกน d และแกน q มีค่าคงที่เท่ากับ 1 pu และ 0 pu ตามลำดับ สำหรับสัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG ผลการทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.1

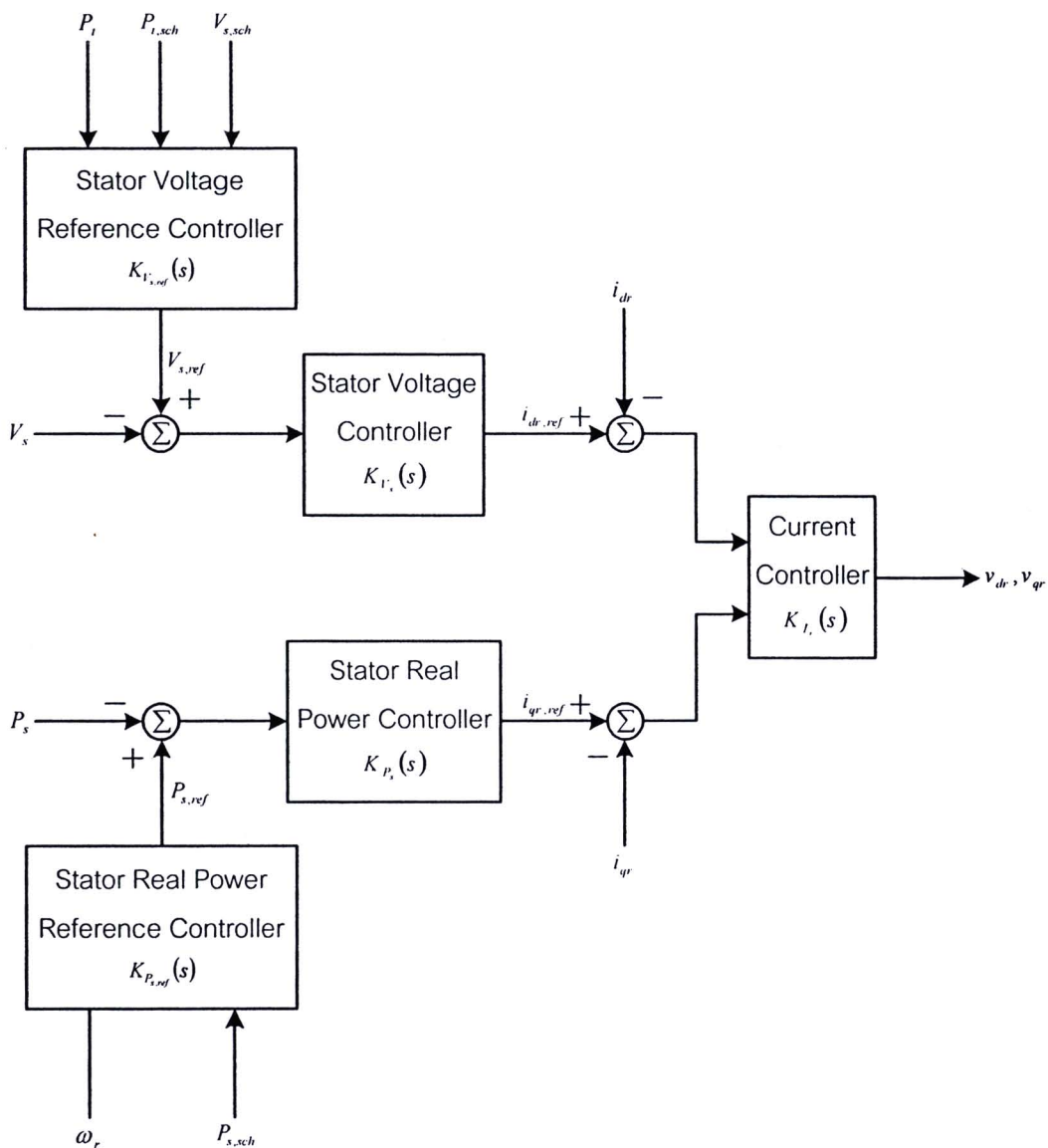


รูปที่ 4.1 กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นมีความถูกต้องเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

4.2 ตัวควบคุมที่ออกแบบ

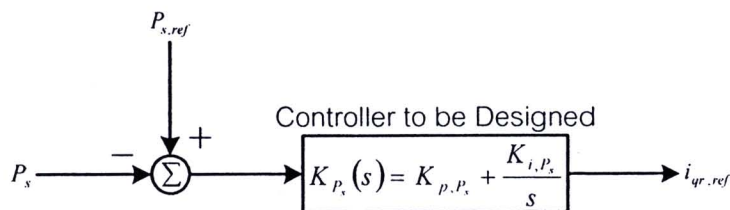
ตัวควบคุมที่ออกแบบมี 5 ตัว โดยเป็นตัวควบคุมที่ดัดแปลงจากตัวควบคุมที่มีอยู่ใน DFIG จำนวน 2 ตัว คือ ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ และตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวควบคุมที่มีอยู่เดิมใน DFIG จำนวน 1 ตัว คือ ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ และเป็นตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นเพิ่มเติมจำนวน 2 ตัว คือ ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริง และตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดัน แผนภาพของตัวควบคุมที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพของตัวควบคุมที่ออกแบบ

4.2.1 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์

แผนภาพตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.3

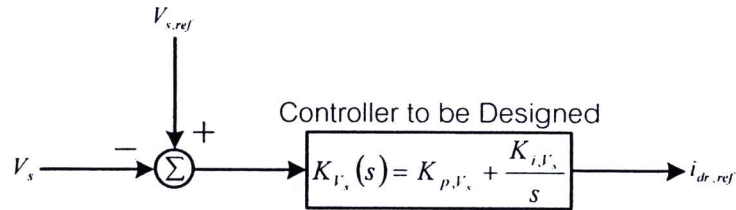


รูปที่ 4.3 แผนภาพของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ที่ออกแบบ

พารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบในตัวควบคุมนี้มีจำนวน 2 ตัว คือ k_{p,P_s} และ k_{i,P_s}

4.2.2 ตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

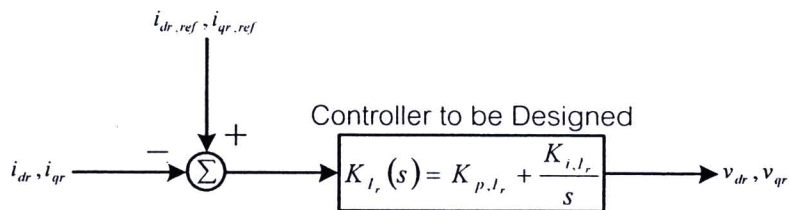
แผนภาพตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพของตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบในตัวควบคุมนี้มีจำนวน 2 ตัว คือ k_{p,V_s} และ k_{i,V_s}

4.2.3 ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์

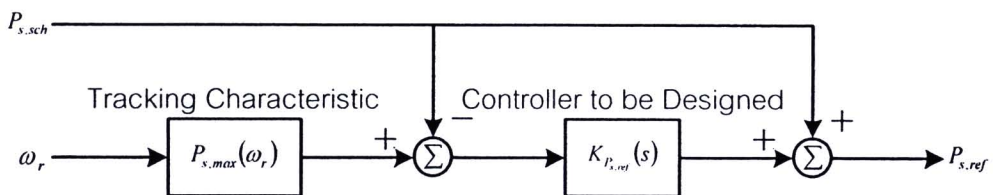
แผนภาพตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ที่ออกแบบพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบในตัวควบคุมนี้มีจำนวน 2 ตัว คือ k_{p,I_r} และ k_{i,I_r}

4.2.4 ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริง

ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงทำหน้าที่คำนวณค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อป้อนให้กับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากสเตเตอร์ แผนภาพตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพของตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกแบบ

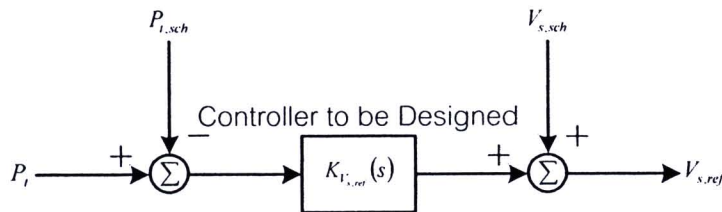
วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ตัวควบคุมค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกแบบมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$K_{P_s,ref}(s) = \frac{k_{P_s,ref}(s^2 + a_{z,P_s,ref}s + b_{z,P_s,ref})}{s^2 + a_{p,P_s,ref}s + b_{p,P_s,ref}} \quad (4.1)$$

พารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบในตัวควบคุมนี้มีจำนวน 5 ตัว คือ $k_{P_s,ref}$ $a_{z,P_s,ref}$ $b_{z,P_s,ref}$ $a_{p,P_s,ref}$ และ $b_{p,P_s,ref}$

4.2.5 ตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดัน

ตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันทำหน้าที่คำนวณค่าอ้างอิงแรงดันเพื่อป้อนให้กับตัวควบคุมขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แผนภาพตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนภาพของตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันที่ออกแบบ

วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ตัวควบคุมค่าอ้างอิงขนาดแรงดันที่ออกแบบมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$K_{V_s,ref}(s) = \frac{k_{V_s,ref}(s^2 + a_{z,V_s,ref}s + b_{z,V_s,ref})}{s^2 + a_{p,V_s,ref}s + b_{p,V_s,ref}} \quad (4.2)$$

พารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบในตัวควบคุมนี้มีจำนวน 5 ตัว คือ $k_{V_s,ref}$ $a_{z,V_s,ref}$ $b_{z,V_s,ref}$ $a_{p,V_s,ref}$ และ $b_{p,V_s,ref}$

กล่าวโดยสรุป พารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบมีจำนวน 16 ตัว เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบเป็นดังนี้

$$p = \begin{bmatrix} k_{p,P_s} & k_{i,P_s} & k_{p,V_s} & k_{i,V_s} & k_{p,I_r} & k_{i,I_r} \\ k_{P_s,ref} & a_{z,P_s,ref} & b_{z,P_s,ref} & a_{p,P_s,ref} & b_{p,P_s,ref} \\ k_{V_s,ref} & a_{z,V_s,ref} & b_{z,V_s,ref} & a_{p,V_s,ref} & b_{p,V_s,ref} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

4.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบมี 2 ส่วน คือ เซตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้และเซตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้

4.3.1 เขตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้

เขตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้จะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขต่อไปนี้

1. สัญญาณกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริง $P_{s,sch}$ และ $P_{l,sch}$ ถือว่ามีค่าคงที่เท่ากับ 0.5 pu
2. สัญญาณกำหนดค่าขนาดแรงดัน $V_{s,sch}$ ถือว่ามีค่าคงที่เท่ากับค่าที่เป็นจุดทำงานเริ่มต้นของ DFIG
3. กำหนดให้ใช้ค่าสัญญาณกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 0.5 pu ในช่วงความเร็วลม 5 ถึง 7 m/s และกำหนดให้ความเร็วลมเฉลี่ยมีค่า 6 m/s ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจึงมีค่าไม่เกิน 1 m/s นอกจากนี้ สมมติให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมมีค่าไม่เกิน 0.1 m/s^2
4. ในสภาวะการทำงานปกติ แรงดันเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 5 ดังนั้นจึงกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันเทวินินในแกน d และแกน q ไว้ไม่เกิน 0.05 pu และสมมติให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทวินินในแกน d และแกน q มีค่าไม่เกิน 0.02 pu/s

ค่าขอบเขตของสัญญาณเข้าและอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้าที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าขอบเขตของสัญญาณเข้าและอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้า

สัญญาณเข้า	ค่าขอบเขตของสัญญาณเข้า	ค่าขอบเขตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้า
Δv_{wind}	1 m/s	0.1 m/s^2
Δv_{dth}	0.05 pu	0.02 pu/s
Δv_{qth}	0.05 pu	0.02 pu/s

4.3.2 เขตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้

เขตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้จะถูกกำหนดโดยความต้องการในการออกแบบตัวควบคุมดังนี้

1. วัตถุประสงค์ในการออกแบบตัวควบคุม คือ เพื่อลดผลกระทบเชิงลบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมต่อความถี่ของระบบไฟฟ้าหลัก ดังนั้นจึงต้องควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมให้ผลิตไฟฟ้าเรียบ ฉะนั้นจึงจำกัดการเปลี่ยนแปลงและอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจาก DFIG

2. ข้อจำกัดของการออกแบบตัวควบคุม คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์ของ DFIG ถูกจำกัดโดยขนาดของคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงต้องจำกัดการเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์ไว้ด้วย

นอกจากนี้ยังต้องจำกัดการเปลี่ยนแปลงค่าอ้างอิงขนาดแรงดัน เนื่องจากจะต้องรักษาขนาดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมด้วย

จากวัตถุประสงค์และข้อจำกัดดังกล่าว นำไปสู่สมการที่ใช้ในการออกแบบดังนี้

$$\begin{aligned}\phi_1(p) &= |\Delta P_i| \leq c_1 \\ \phi_2(p) &= |\dot{P}_i| \leq c_2 \\ \phi_3(p) &= |\Delta \omega_r| \leq c_3 \\ \phi_4(p) &= |\Delta V_{s,ref}| \leq c_4\end{aligned}\quad (4.4)$$

ในการออกแบบตัวควบคุมจะใช้ค่าขอบเขตบนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ϕ_1 ϕ_2 ϕ_3 และ ϕ_4 ตามสมการ (2.14)

4.4 ผลการออกแบบตัวควบคุม

ในระหว่างการออกแบบตัวควบคุมได้ปรับค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ c_1 c_2 c_3 และ c_4 จนมีค่าตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ
c_1	0.251 pu
c_2	0.3 pu/s
c_3	0.1 pu
c_4	0.02 pu

จากการใช้กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขตในการแก้ปัญหาการออกแบบตัวควบคุม จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบดังนี้

$$p = \begin{bmatrix} 0.8703 & 712.4 & 0.4680 & 995.4 & 0.5554 & 284.3 \\ & 0.6133 & 9.223 & 4.989 & 1.572 & 0.6933 \\ & & 0.02637 & 30.15 & 0.0002162 & 0.9568 & 1.272 \end{bmatrix}^T$$

และได้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ออกแบบดังนี้

$$\begin{aligned}\phi_1(p) &= 0.2505 \text{ pu} \\ \phi_2(p) &= 0.2995 \text{ pu/s} \\ \phi_3(p) &= 0.0503 \text{ pu} \\ \phi_4(p) &= 0.0191 \text{ pu}\end{aligned}$$

4.5 สรุปผลการออกแบบตัวควบคุม

จากผลการออกแบบตัวควบคุมแสดงให้เห็นว่าสามารถออกแบบตัวควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการได้

การออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาก็ยอนมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเนื่องจาก สัญญาณเข้าที่ใช้ในการออกแบบมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณเข้าจริง และปัญหาการออกแบบมีหลายวัตถุประสงค์ที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอสมการได้

อย่างไรก็ตาม การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีนี้จะต้องใช้แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น แต่แบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องประมาณแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้น แบบจำลองที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นจะมีความถูกต้องเมื่อสัญญาณเข้ามีค่าใกล้เคียงกับค่าสัญญาณเข้าที่เป็นจุดทำงานที่ใช้ในการทำให้เป็นเชิงเส้นเท่านั้น เพราะฉะนั้น คำตอบของการออกแบบตัวควบคุมจึงถูกต้องเฉพาะเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมทำงานอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับจุดทำงานที่ใช้ในการทำให้เป็นเชิงเส้น