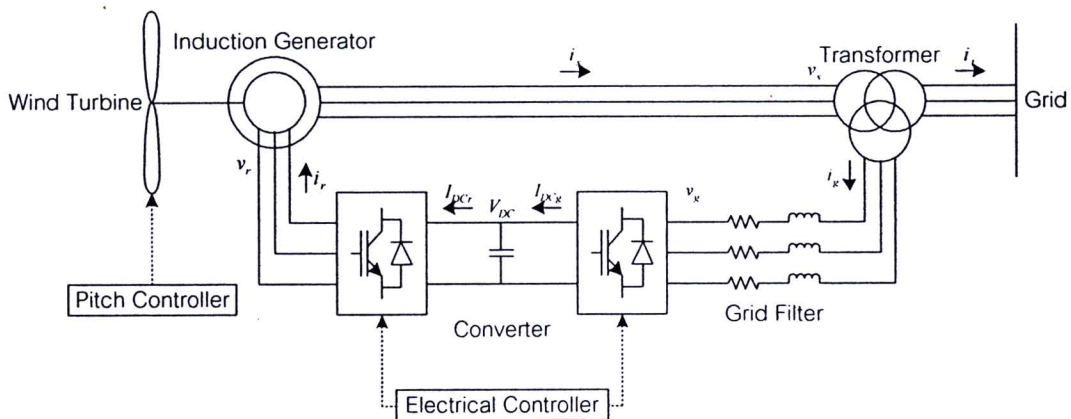


บทที่ 2

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและวิธีการออกแบบตัวควบคุม

บทนี้กล่าวถึงความรู้ทั่วไปที่เกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม และวิธีการออกแบบตัวควบคุม โดยกรอบงานศึกษาที่ได้นี้ได้แก่ วิธีอสมการและหลักการเข้าคู่

แผนภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG แสดงไว้ในรูปที่ 2.1

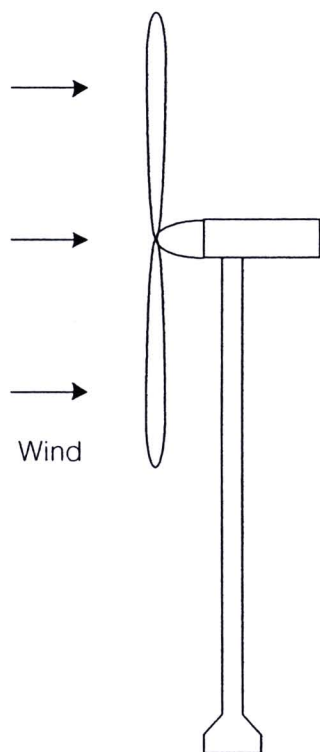


รูปที่ 2.1 แผนภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่ใช้เทคโนโลยี DFIG [1]

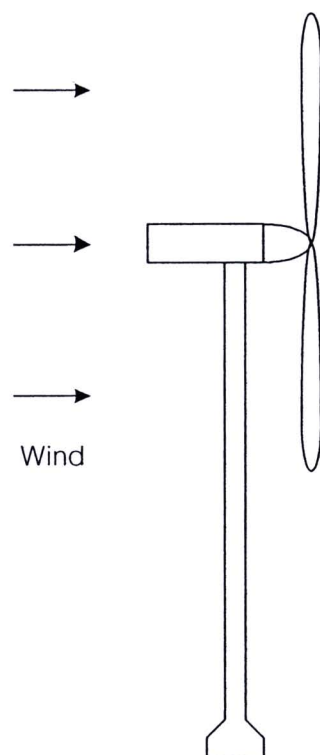
2.1 กังหันลม

กังหันลมเป็นระบบทางกลของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม กังหันลมรับพลังงานจากลมมาเปลี่ยนเป็นพลังงานกลเพื่อนำไปหมุนโรเตอร์ แต่กังหันลมสามารถนำพลังงานในลมมาใช้ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น โดยสามารถเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลได้ไม่เกินค่าสูงสุดทางทฤษฎีคือ 0.593 ซึ่งเป็นไปตามขีดจำกัดของเบตซ์ (Betz Limit) [2, 11–13]

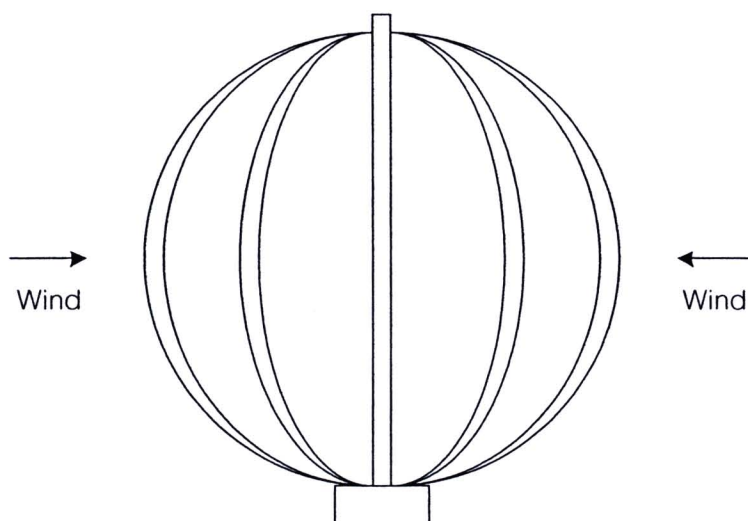
กังหันลมมี 2 ชนิด คือ กังหันลมแกนนอน และกังหันลมแกนตั้ง กังหันลมแกนนอนคือกังหันลมที่ใบพัดหมุนรอบแกนที่ขนานกับพื้นดิน กังหันลมแกนนอนแบ่งออกเป็น 2 ชนิดย่อย คือ ชนิดที่หันหน้าเข้าหาลมดังแสดงในรูปที่ 2.2 และชนิดที่หันหลังเข้าหาลมดังแสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนกังหันลมแกนตั้งคือกังหันลมที่ใบพัดหมุนรอบแกนที่ตั้งฉากกับพื้นดินดังแสดงในรูปที่ 2.4 กังหันลมแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันดังนี้ [11]



รูปที่ 2.2 กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหน้าเข้าหาลม [11, 12]



รูปที่ 2.3 กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหลังเข้าหาลม [11, 12]



รูปที่ 2.4 กังหันลมแกนตั้ง [11]

1. กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหน้าเข้าหาลมมีข้อดีคือ สามารถทำงานได้เรียบและจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้มากกว่ากังหันลมชนิดอื่น แต่กังหันลมชนิดนี้มีข้อเสียคือ ต้องใช้การควบคุมที่ซับซ้อนเพื่อให้กังหันหันหน้าเข้าหาลม

2. กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหลังเข้าหาลมมีข้อดีคือ สามารถใช้ลมในการควบคุมให้กังหันหันหลังเข้าหาลมได้ แต่กังหันลมชนิดนี้มีข้อเสียคือ เสาของกังหันบังลมทำให้กังหันผลิตไฟฟ้าได้น้อยลง

3. กังหันลมแกนตั้งมีข้อดีคือ ไม่ต้องใช้การควบคุมให้กังหันหันเข้าหาลมและสามารถออกแบบให้อุปกรณ์ที่มีน้ำหนักมากตั้งอยู่บนพื้นดินได้ แต่กังหันลมชนิดนี้มีข้อเสียคือ ใบพัดของกังหันลมอยู่ใกล้พื้นดินทำให้ไม่สามารถรับลมที่มีความเร็วสูงได้

จากข้อดีและข้อเสียของกังหันลมแต่ละชนิด กังหันลมแกนนอนชนิดที่หันหน้าเข้าหาลมจึงเป็นที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน [11]

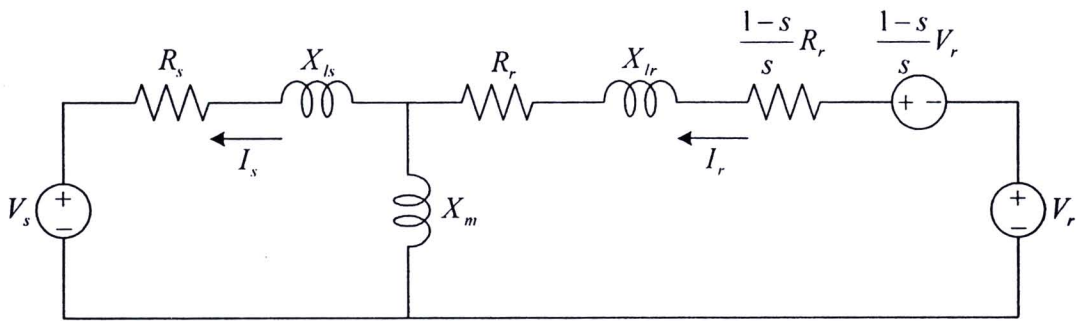
2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนคู่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบขดลวดพันที่มีคอนเวอร์เตอร์ต่อเชื่อมขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกริด เพื่อนำกระแสไฟฟ้าจากกริดไปใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้น DFIG จึงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ และไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากภายนอก อีกทั้ง คอนเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แปรความถี่ได้เข้าทางขดลวดโรเตอร์ ส่งผลให้สามารถชดเชยความแตกต่างระหว่างความถี่ทางกลและความถี่ทางไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ การนำเอาคอนเวอร์เตอร์มาใช้ในการควบคุมทำได้ง่ายขึ้นโดย

สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟหรือแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อีกด้วย [1]

การต่อคอนเวอร์เตอร์เข้ากับโรเตอร์ช่วยให้สามารถลดขนาดของคอนเวอร์เตอร์ลงได้โดยทั่วไป ขนาดกำลังพิกัดของคอนเวอร์เตอร์อยู่ที่ประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 ของกำลังพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานได้ในช่วงที่ความเร็วโรเตอร์แตกต่างจากความเร็วซิงโครนัสไม่เกินร้อยละ 25 ถึง 30 เช่นกัน การที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานได้ในช่วงที่ความเร็วโรเตอร์แตกต่างกันทำให้สามารถดึงพลังงานจากลมที่ความเร็วลมค่าต่างๆ มาใช้ได้เพิ่มขึ้น [1]

การทำงานของ DFIG ในสถานะคงตัวสามารถอธิบายได้ด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของ DFIG ในสถานะคงตัว [2, 14–16]

โดยที่

- V_s คือเฟสเซอร์ของแรงดันที่สเตเตอร์
- V_r คือเฟสเซอร์ของแรงดันที่โรเตอร์
- I_s คือเฟสเซอร์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากสเตเตอร์
- I_r คือเฟสเซอร์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าโรเตอร์
- R_s คือความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
- R_r คือความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
- X_{ls} คือรีแอคแตนซ์รั่วของขดลวดสเตเตอร์
- X_{lr} คือรีแอคแตนซ์รั่วของขดลวดโรเตอร์
- X_m คือรีแอคแตนซ์กระตุ้น
- s คือสลิป (Slip) ซึ่งถูกนิยามโดย

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

โดยที่ ω_s คือ ความเร็วซิงโครนัส และ ω_r คือ ความเร็วโรเตอร์ สำหรับกำลังไฟฟ้าจริงมีค่าดังสมการ (2.2)

$$\begin{aligned} P_s &= \text{Re}(V_s I_s^*) \\ P_r &= \text{Re}(V_r I_r^*) \\ P_m &= \frac{1-s}{s} \left[|I_r|^2 R_r + \text{Re}(V_r I_r^*) \right] \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดยที่ P_s คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจากสเตเตอร์ P_r คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าโรเตอร์ และ P_m คือ กำลังกลขาออกจากกังหันลม จากสมการ (2.2) สามารถพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่ช่องอากาศทางโรเตอร์กับกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายผ่านช่องอากาศทางสเตเตอร์ได้ดังสมการ (2.3)

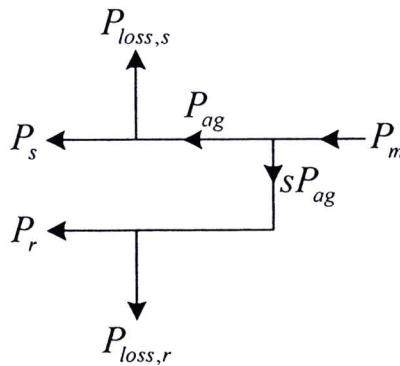
$$P_s + |I_s|^2 R_s = s(P_r + |I_r|^2 R_r) \quad (2.3)$$

เมื่อละเลยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ จะได้ว่า

$$P_s = sP_r \quad (2.4)$$

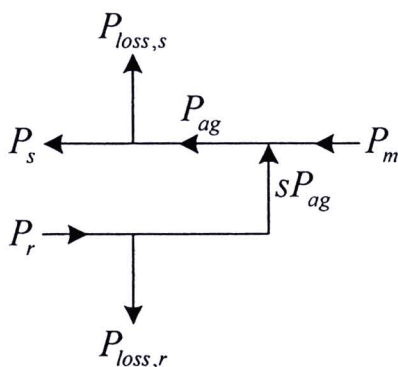
การทำงานของ DFIG มี 2 แบบคือ การทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส และการทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส [2]

การทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสทำให้สลิปเป็นลบและกำลังไฟฟ้าจริงไหลออกจากโรเตอร์ไปสู่กริด ในขณะที่กำลังไฟฟ้าจริงก็ไหลออกจากสเตเตอร์ไปสู่กริดด้วยดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าของ DFIG ที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส [2]

การทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสทำให้สลิปเป็นบวกและกำลังไฟฟ้าจริงจากกริดไหลเข้าสู่โรเตอร์ แต่กำลังไฟฟ้าจริงไหลออกจากสเตเตอร์ไปสู่กริด เช่นเดียวกับการทำงานที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าของ DFIG ที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส [2]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมอย่างแพร่หลาย ดังนั้นนักวิจัยจำนวนมากได้วิจัยเกี่ยวกับการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าดังนี้

ในปี ค.ศ. 1995 Lane [17] ได้ออกแบบตัวควบคุมมูมิช เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถทำงานได้เมื่อมีลมพัดแรงอย่างทันทีทันใด โดยใช้วิธีอสมการและหลักการเข้าคู่ ตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบพีไอและพีไอดี ในการออกแบบได้ใช้แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่คำนึงถึงระบบเชิงกลเป็นหลัก ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหายเมื่อมีลมพัดแรงอย่างทันทีทันใด

ในปี ค.ศ. 1997 Nanayakkara และคณะ [18] ได้ออกแบบตัวควบคุมมูมิช เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้มากที่สุดโดยส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าน้อยที่สุด ตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบพีดี โดยแบ่งสัญญาณอ้างอิงในการควบคุมเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ทำงานปกติ ช่วงที่ความถี่ห่างจากค่าปกติมาก และช่วงที่ลมแรงมาก นอกจากนี้ยังได้นำการพยากรณ์ความเร็วลมมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมในช่วงที่ทำงานปกติด้วย ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ความถี่ของระบบอยู่ในช่วงที่กำหนดได้แต่พลังงานไฟฟ้าที่ได้น้อยกว่าในกรณีที่ใช้การควบคุมมูมิชเฉพาะช่วงที่ลมแรงมาก

ในปี ค.ศ. 2004 Ran และคณะ [19] ได้ออกแบบตัวควบคุมคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมผลิตไฟฟ้าได้คงที่ โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำร่วมกับการควบคุมให้ผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด ในการออกแบบได้ใช้แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่คำนึงถึงระบบไฟฟ้าเป็นหลัก ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมผลิตกำลังไฟฟ้าได้คงที่แต่พลังงานไฟฟ้าที่ได้น้อยกว่าในกรณีที่ใช้การควบคุมให้ผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด

ในปี ค.ศ. 2007 Muhando และคณะ [20] ได้ออกแบบตัวควบคุมมุขพิชและตัวควบคุมแรงบิดทางไฟฟ้า เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด และลดโหลดแรงบิดของเพลลาในสภาวะปกติ และเพื่อลดโหลดการแกว่งของเพลลาในช่วงที่ลมแรงมาก โดยใช้การควบคุมแบบปรับตัวเองได้ (Self-Tuning Regulator หรือ STR) เพื่อลดการรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม ในการออกแบบได้ใช้แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่คำนึงถึงระบบเชิงกลเป็นหลัก ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมผลิตกำลังไฟฟ้าได้คงที่ที่ค่าพิกัด

ในปี ค.ศ. 2009 Kusiak และคณะ [21] ได้ออกแบบตัวควบคุมมุขพิชและตัวควบคุมแรงบิดทางไฟฟ้า เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด โดยใช้วิธีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (Model Predictive Control หรือ MPC) ในการออกแบบได้ใช้ขั้นตอนวิธีทางวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm) ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและความเร็วลม ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าและเร็วกว่าในกรณีที่ไม่ใช้การควบคุมแบบนี้

2.4 วิธีการออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียน

วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ กรอบงานซาเกียนซึ่งได้แก่ วิธีอสมการและหลักการเข้าคู่

2.4.1 วิธีอสมการ

การออกแบบตัวควบคุมโดยทั่วไปมักจะมีข้อกำหนดในการออกแบบอยู่ในรูปของอสมการ เนื่องจากผู้ออกแบบต้องการให้สัญญาณใดสัญญาณหนึ่งอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่าน [6–9] เสนอการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีอสมการซึ่งเป็นหลักการทั่วไปของการออกแบบตัวควบคุมที่มีการกำหนดปัญหาในรูปอสมการ

$$\phi_i(p) \leq c_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2.5)$$

โดยที่ p คือ เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบ $\phi_i : \mathcal{H}^n \rightarrow \mathcal{H} \cup \{\infty\}$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $\phi_i(p)$ คือ จำนวนจริงที่แสดงพฤติกรรมของระบบ และ c_i คือ ค่าสูงสุดของ $\phi_i(p)$ ที่ยอมรับได้ อสมการ (2.5) แสดงสมรรถนะของตัวควบคุมที่ต้องการและเงื่อนไขข้อจำกัดทางกายภาพต่างๆ ของระบบ ดังนั้นคำตอบของการออกแบบคือ ค่า p ใดๆ ที่สอดคล้องกับอสมการ (2.5)

ในทางปฏิบัติ การคำนวณหาคำตอบสามารถทำได้โดยวิธีเชิงเลขต่างๆ เช่น กระบวนการเคลื่อนย้ายขอบเขต (Moving Boundaries Process หรือ MBP) [6, 9] การจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing หรือ SA) [9] ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm หรือ GA) [9] เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การหาคำตอบโดยวิธี MBP เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและไม่ซับซ้อน

การคำนวณโดยใช้วิธีเชิงเลขเหมาะสมกับกรณีที่ $\phi_i(p) < \infty$ สำหรับ $i=1, 2, 3, \dots, m$ เท่านั้น เนื่องจากจุดในบริเวณที่ $\phi_i(p) = \infty$ จับตัวกันเป็นบริเวณที่ต่อเนื่องกัน (Connected Region) ทำให้วิธีเชิงเลขไม่สามารถหาคำตอบได้ ฉะนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ p โดยใช้วิธีเชิงเลขจึงต้องเริ่มต้นจากการหาค่า p^0 ซึ่งสอดคล้องกับอสมการ (2.6)

$$\phi_i(p^0) < \infty, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2.6)$$

ในการออกแบบตัวควบคุม อสมการ (2.6) สามารถแทนได้ด้วยเงื่อนไขที่ระบบมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (Asymptotic Stability) ดังอสมการ (2.7)

$$\alpha(p) < 0 \quad (2.7)$$

โดยที่ $\alpha : \mathcal{H}^n \rightarrow \mathcal{H}$ คือ ฟังก์ชันที่นิยามตามสมการ (2.8)

$$\alpha(p) := \max_i \operatorname{Re} \lambda_i(p) \quad (2.8)$$

โดยที่ $\lambda_i(p)$ คือ รากของสมการลักษณะเฉพาะของระบบ เมื่อนำอสมการ (2.7) มาใช้ร่วมกับวิธีอสมการ อสมการ (2.7) จะถูกแทนด้วยอสมการ (2.9)

$$\alpha(p) \leq -\varepsilon, 0 < \varepsilon \ll 1 \quad (2.9)$$

โดย เมื่อ $0 < \varepsilon \ll 1$ อสมการ (2.9) จะให้คำตอบใกล้เคียงกับอสมการ (2.7) ดังนั้นอสมการ (2.9) จึงเป็นอสมการที่ใช้ในการทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

วิธีการหาคำตอบของอสมการ (2.5) โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ [6, 7]

ขั้นที่ 1 หาค่า p^0 ซึ่งทำให้อสมการ (2.6) เป็นจริง โดยใช้สมการ (2.9) คำตอบที่ได้จากขั้นตอนนี้จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นในขั้นตอนถัดไป

ขั้นที่ 2 หากค่า p ซึ่งทำให้อสมการ (2.5) เป็นจริง โดยในระหว่างการคำนวณต้องไม่ทำให้ $\phi(p) = \infty$ ดังนั้นจึงต้องแก้สมการ (2.9) ไปพร้อมกับอสมการ (2.5)

2.4.2 หลักการเข้าสู่

การออกแบบตัวควบคุมจะต้องพิจารณาถึงสิ่งแวดล้อมที่ระบบทำงานอยู่ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่าน [8–10] เสนอการออกแบบตัวควบคุมโดยหลักการเข้าสู่ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบเข้าสู่กับสิ่งแวดล้อมที่ระบบทำงานอยู่

สัญญาณเข้าหรือสัญญาณรบกวนของระบบเป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติของสิ่งแวดล้อม สัญญาณเข้านี้ถูกกำหนดให้อยู่ในเซตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้ (Possible Set) P เซตนี้ประกอบด้วยสัญญาณเข้าทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้หรืออาจจะเกิดขึ้นหรืออนุญาตให้เกิดขึ้น

สิ่งแวดล้อมควบคุมระบบผ่านทางสัญญาณเข้าซึ่งทำให้เกิดสัญญาณออกหรือผลตอบสนองของระบบ ถ้าสามารถยอมรับผลตอบสนองของระบบได้ในเงื่อนไขที่กำหนดแล้ว จะเรียกสัญญาณเข้าที่ทำให้เกิดผลตอบสนองนี้ว่าสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้ ดังนั้นเซตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้ (Tolerable Set) T จึงเป็นลักษณะสมบัติของระบบ

ระบบจะเข้าสู่กับสิ่งแวดล้อมเมื่อเซตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้เป็นสับเซตของเซตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้ กล่าวคือสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้ทั้งหมดเป็นสัญญาณเข้าที่ระบบสามารถทนได้

นิยามของเซตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ตัดสินผลตอบสนองของระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้ สัญญาณเข้าจะถูกพิจารณาว่าเป็นสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้เมื่อสัญญาณเข้าดังกล่าวผลิตสัญญาณออกที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนดตลอดเวลา ดังสมการ (2.10) [8, 9, 17]

$$\|v_i(f)\|_{\infty} \leq \varepsilon_i, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2.10)$$

โดยที่ f คือ สัญญาณเข้า v_i คือ สัญญาณออก และ ε_i คือ ขอบเขตของสัญญาณออก v_i ที่กำหนด ทั้งนี้ สัญญาณเข้า f และสัญญาณออก v_i เป็นฟังก์ชันของเวลา เซตของสัญญาณเข้าที่สามารถทนได้เป็นดังสมการ (2.11)

$$T := \{f \mid \|v_i(f)\|_{\infty} \leq \varepsilon_i, i = 1, 2, 3, \dots, m\} \quad (2.11)$$

และวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้เซตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้เป็นไปตามสมการ (2.12) [9]

$$P := \{f \mid \|f\|_{\infty} \leq M, \|f\|_{\infty} \leq D, f(t) = 0 \forall t \leq 0\} \quad (2.12)$$



โดยที่ M คือ ค่าขอบเขตของสัญญาณเข้า และ D คือ ค่าขอบเขตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้า

นิยามให้ค่าสูงสุดของสัญญาณออกเป็นตามสมการ (2.13)

$$\hat{v}_i := \sup_{f \in P} \|v_i(f)\|_\infty \quad (2.13)$$

ในทางปฏิบัติ การคำนวณค่าสูงสุดของสัญญาณออก $\hat{v}_i$ อาจทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการเสนอให้คำนวณค่าขอบเขตบนของสัญญาณออก $\tilde{v}_i$ แทน โดย $\tilde{v}_i \geq \hat{v}_i$ ฉะนั้น เมื่อ $\tilde{v}_i \leq \varepsilon_i$ จะได้ว่า $\hat{v}_i \leq \varepsilon_i$ [9] ได้แสดงว่าค่าขอบเขตบนของสัญญาณออก $\tilde{v}_i$ เมื่อเซตของสัญญาณเข้าที่เป็นไปได้เป็นดังสมการ (2.12) เป็นไปตามสมการ (2.14)

$$\tilde{v}_i = \min \{M|s_{ss,i}| + D\|s_i - s_{ss,i}\|_1, M\|h_i\|_1\} \quad (2.14)$$

โดยที่ s_i คือ ผลตอบสนองของสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของสัญญาณออก v_i , $s_{ss,i}$ คือ ผลตอบสนองของสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของสัญญาณออก v_i ที่สภาวะอยู่ตัว และ h_i คือ ผลตอบสนองของสัญญาณเข้าแบบอิมพัลส์ของสัญญาณออก v_i

ในกรณีที่ระบบมีหลายสัญญาณเข้าซึ่งได้แก่ $f_j, j = 1, 2, 3, \dots, n$ ค่าขอบเขตบนของสัญญาณออก $\tilde{v}_i$ มีค่าเป็นไปตามสมการ (2.15)

$$\tilde{v}_i = \sum_{j=1}^N \tilde{v}_{i,j} \quad (2.15)$$

โดยที่ $\tilde{v}_{i,j}$ คือ ค่าขอบเขตบนของสัญญาณออก v_i สำหรับสัญญาณเข้า f_j

2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมโดยกรอบงานซาเกียน

นักวิจัยจำนวนมาก [9, 17, 22–24] ได้นำกรอบงานซาเกียนไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเนื่องจากกรอบงานซาเกียนเป็นวิธีการออกแบบที่มีความยืดหยุ่นและสมจริง นอกจากนี้กรอบงานซาเกียนยังสามารถใช้กับปัญหาการออกแบบตัวควบคุมที่มีหลายวัตถุประสงค์ได้อีกด้วย สำหรับงานวิจัยที่นำกรอบงานซาเกียนไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมในระบบไฟฟ้ากำลังมีดังนี้

ในปี ค.ศ. 2009 Tia และคณะ [22] ได้ออกแบบส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power System Stabilizer หรือ PSS) ในระบบกระตุ้น (Excitation System) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพเมื่อแรงดันที่โหลดมีการแกว่ง ผลการทดสอบแสดงว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพโดยมุมโรเตอร์ ความเร็วโรเตอร์ และแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอยู่ในขอบเขตที่กำหนด