

บทที่ 3

แบบจำลองการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่

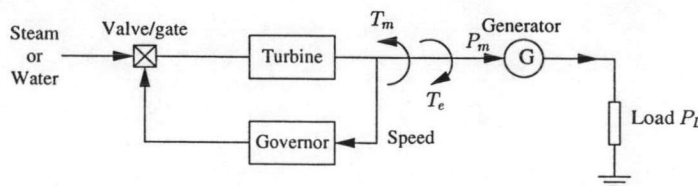
3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ ซึ่งรวมความไม่แน่นอนของระบบในแบบจำลองด้วย ความไม่แน่นอนในระบบเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในเมทริกซ์พลวัตของระบบ มีสาเหตุมาจากการทำให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงาน หรือจากข้อจำกัดทางกายภาพของระบบ ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในเมทริกซ์สัญญาณออกและเมทริกซ์สมรรถนะขาออกมีสาเหตุมาจากความผิดพลาดของการวัด นอกจากนี้ในกรณีที่พิจารณาสัญญาณควบคุมเป็นส่วนหนึ่งของเมทริกซ์สมรรถนะขาออก พบว่าเมื่อสัญญาณควบคุมมีความไม่แน่นอนที่เกิดจากตัวขับเคลื่อน จะทำให้เกิดความไม่แน่นอนขึ้นในเมทริกซ์สมรรถนะขาออก ความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ที่กล่าวมานี้สามารถอธิบายด้วยระบบเชิงเส้นที่มีการป้อนกลับของฟังก์ชันแทนความไม่แน่นอนได้

เนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วย §3.2 นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ §3.3 นำเสนอการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ค่าจริง เพื่อหาแบบจำลองที่สามารถอธิบายระบบได้ครอบคลุมทุกจุดในช่วงที่กำหนด §3.4 นำเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีความไม่แน่นอนใน 3 กรณีคือ §3.4.1 กรณีแปรค่าคงตัวทางเวลาของเทอร์โบไบน §3.4.2 กรณีแปรค่าสัมประสิทธิ์ซิงโครไนซ์ทอร์ค §3.4.3 กรณีแปรค่าคงตัวทางเวลาของเทอร์โบไบนและค่าสัมประสิทธิ์ซิงโครไนซ์ทอร์คและ §3.5 เป็นบทสรุป

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้า คือการควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภคในแต่ละช่วงเวลาและการรักษาความถี่ของไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน เนื่องจากการควบคุมความถี่นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นในการควบคุมความถี่เราจะพิจารณาจากระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1: ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

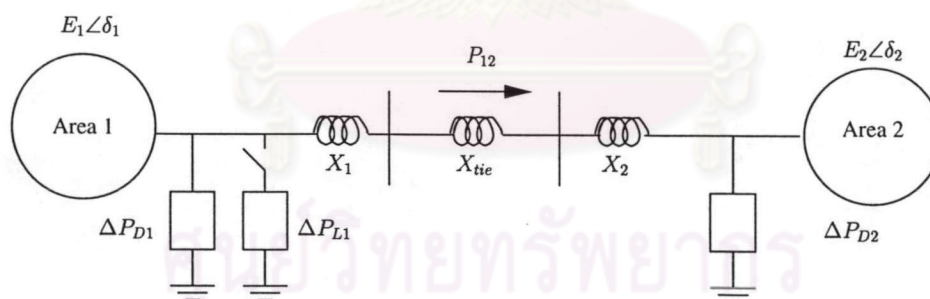
เมื่อ T_m คือ ทอร์กเชิงกล T_c คือ ทอร์กเชิงไฟฟ้า P_L คือ กำลังโหลด (load power)

ระบบควบคุมความเร็วในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า
2. เทอร์ไบน์ (turbine) ทำหน้าที่แปลงพลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานน้ำ พลังงานไอน้ำ พลังงานความร้อนนิวเคลียร์และอื่นๆ ให้อยู่ในรูปแบบพลังงานกล
3. ตัวบังคับเทอร์ไบน์ (turbine governor) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมให้ปรับตำแหน่งวาล์วของเทอร์ไบน์เพื่อควบคุมให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร็วอยู่ในช่วงมาตรฐาน

ในรูปที่ 3.1 เมื่อเทอร์บิเนียงกลและเทอร์บิเนียงไฟฟ้าสมดุลกันจะทำให้กำลังเชิงกลที่ส่งให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าคงที่และทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร็วคงที่ ดังนั้นการรักษาสมดุลนี้ไว้ได้เทียบเท่ากับการที่ระบบสามารถควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่ได้และนั่นหมายถึงความถี่ของไฟฟ้าคงที่เช่นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อกำลังโหลดที่ต้องการมีค่าเปลี่ยนไปจะทำให้สูญเสียสมดุลของเทอร์บิเนียง การควบคุมระบบให้เข้าสู่สมดุลใหม่ทำได้โดยการป้อนกลับความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณหาความแตกต่างของเทอร์บิเนียงกลและเทอร์บิเนียงไฟฟ้า และส่งสัญญาณไปยังตัวบังคับเทอร์ไบน์เพื่อปรับตำแหน่งวาล์วของเทอร์ไบน์จนกระทั่งเทอร์บิเนียงเข้าสู่สมดุลใหม่

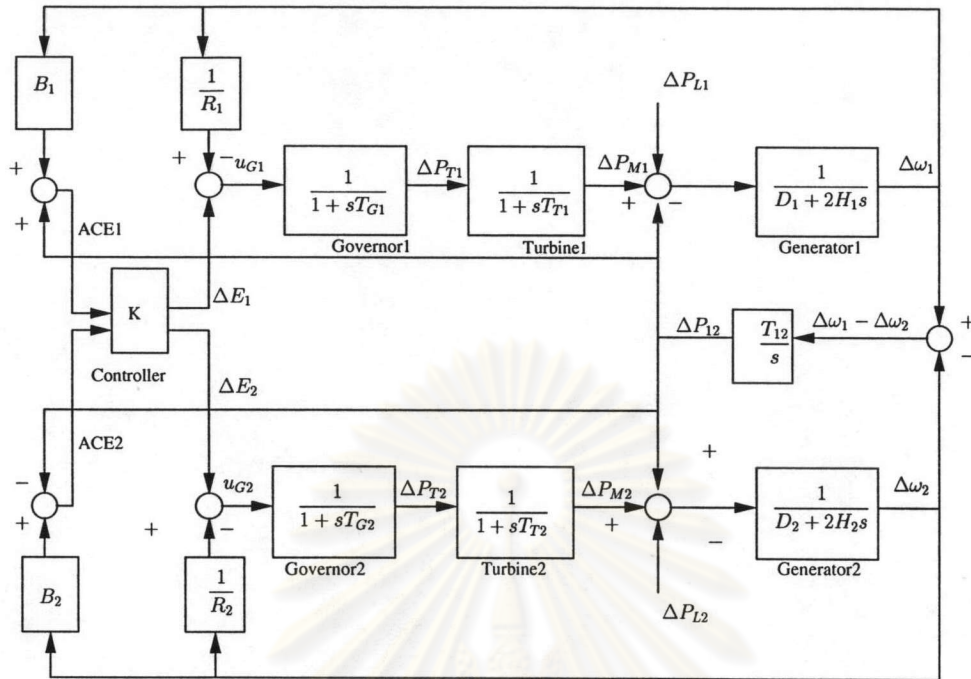
ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อบระบบจากหลายพื้นที่ที่เป็นอิสระต่อกันแล้ว นอกจากการรักษาระดับความถี่ให้คงที่ ยังต้องคำนึงถึงการรักษาระดับกำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อให้เป็นไปตามข้อตกลงที่กำหนดไว้อีกด้วย เราเรียกการควบคุมนี้ว่าการควบคุมการผลิตและความถี่ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการควบคุมกำลังผลิตและความถี่ 2 พื้นที่ ดังรูปที่ 3.2 หรือแสดงเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2: แผนภาพเส้นแสดงการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ 2 พื้นที่

ในรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยระบบผลิตไฟฟ้าจำนวน 2 พื้นที่ซึ่งแต่ละพื้นที่จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันและค่ารีแอกแตนซ์สมมูล X_1 และ X_2 โดยมีการเชื่อมกับพื้นที่ที่ติดกันด้วยบัสเชื่อมต่อที่มีค่ารีแอกแตนซ์เป็น X_{tie} จากรูปแสดงให้เห็นถึงการส่งกำลังไฟฟ้าให้กันผ่านบัสเชื่อมต่อซึ่งเรียกว่ากำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อ (tie line power) เขียนแทนด้วย P_{12}

กำลังเชื่อมต่องดังกล่าวมีผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าทั้ง 2 พื้นที่นี้มีพลวัตที่เกี่ยวข้องกัน เช่นถ้ากำหนดให้มีการส่งไฟฟ้าจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 เมื่อมีโหลด (load) ΔP_{L1} เพิ่มเข้ามาในพื้นที่ 1 จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของกำลังไฟฟ้าในพื้นที่ 1 และส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อลดลงในทันที พื้นที่ 2 จะเกิดความไม่สมดุลของกำลังไฟฟ้าเช่นเดียวกับพื้นที่ 1 ส่งผลให้ความถี่ของไฟฟ้าของทั้ง 2 พื้นที่เบี่ยงเบนไป



รูปที่ 3.3: แผนภาพบล็อกการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ 2 พื้นที่

จากค่าความถี่มาตรฐาน ดังนั้นจุดประสงค์ในการควบคุมระบบนี้จึงประกอบไปด้วยการควบคุมปริมาณไฟฟ้าเชื่อมต่อให้เป็นไปตามปริมาณที่ตกลงและรักษาความถี่ของไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าสัญญาณออกที่ต้องการควบคุมสำหรับการควบคุมกำลังผลิตและความถี่คือการควบคุมการเบี่ยงเบนความถี่ของไฟฟ้าและการเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อเพื่อให้มีค่าน้อยที่สุด โดยเรียกผลบวกเชิงเส้นของปริมาณทั้งสองว่า Area Control Error (ACE) และระบบในรูป 3.2 อธิบายโดยสมการสถานะ ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_u u + B_w w \\ y &= C_y x \end{aligned} \tag{3.1}$$

โดยที่ x คือตัวแปรสถานะของระบบ $x = [\Delta\omega_1 \ \Delta P_{T1} \ \Delta P_{M1} \ \Delta P_{12} \ \Delta\omega_2 \ \Delta P_{T2} \ \Delta P_{M2}]$ สำหรับพื้นที่ i , $\Delta\omega_i$ คือ ค่าเบี่ยงเบนของความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ΔP_{T_i} คือ ค่าเบี่ยงเบนของกำลังขาเข้าของเทอร์ไบน์, ΔP_{M_i} คือ ค่าเบี่ยงเบนของกำลังกลขาออกออกจากเทอร์ไบน์ และ ΔP_{12} คือ ค่าเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ 1 และพื้นที่ 2, $u = [\Delta E_1 \ \Delta E_2]^T$ คือ สัญญาณควบคุมที่ออกจากตัวควบคุม, $w = [\Delta P_{L1} \ \Delta P_{L2}]^T$ คือ ความต้องการกำลังงานที่เปลี่ยนแปลง และ $y = [ACE_1 \ ACE_2]^T$ คือ สัญญาณออกที่ต้องการควบคุม

เมทริกซ์ A , B_u , B_w และ C_y ที่มีค่าดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} -D_1/(2H_1) & 1/(2H_1) & 0 & -1/(2H_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_{T1} & 1/T_{T1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/(R_1T_{G1}) & 0 & -1/T_{G1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline T_{12} & 0 & 0 & 0 & -T_{12} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1/(2H_2) & -D_2/(2H_2) & 1/(2H_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_{T2} & 1/T_{T2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/(R_2T_{G2}) & 0 & -1/T_{G2} \end{bmatrix}$$

$$B_u^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/T_{G1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/T_{G2} \end{bmatrix}$$

$$B_w^T = \begin{bmatrix} -1/(2H_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/(2H_2) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_y = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & B_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- โดยที่ T_G คือ ค่าคงตัวทางเวลาของตัวบังคับเทอร์ไบน์ (วินาที)
 T_T คือ ค่าคงตัวทางเวลาของเทอร์ไบน์ (วินาที)
 H คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (inertia constant) (MW-sec/MV A)
 D คือ ค่าคงที่การหน่วงเนื่องจากโหลด (load-damping constant)
 R คือ ค่าคงที่การคุมค่าความเร็ว
 B คือ ค่าตัวประกอบความถี่ (MW/0.1 Hz)
 T_{12} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งโครไนซ์ทอร์ก

และสัญญาณ ACE หาได้จาก

$$ACE_i = \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij} + B_i \Delta \omega_i \quad (3.2)$$

เมื่อ B_i เป็นตัวประกอบไบแอสความถี่ (frequency bias factor), $B_i = \frac{1}{R_i} + D_i$

3.3 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ในการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่

ปริมาณการผลิตไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องทำให้จุดทำงานและสมการสถานะของการควบคุมกำลังผลิตและความถี่ในแต่ละช่วงเวลาแตกต่างกันไป โดยเมทริกซ์ในสมการสถานะที่จุดทำงานใด ๆ ของแบบจำลองเชิงเส้นอธิบายได้โดย

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A^i x + B_u^i u + B_w w, \quad \text{เมื่อ } i = 1, \dots, N \\ y &= C_y^i x + D_{yu}^i u \\ z &= C_z^i x + D_{zu}^i u \end{aligned} \quad (3.3)$$

เมื่อ $A^i, B_u^i, C_y^i, D_{yu}^i, C_z^i, D_{zu}^i$ เป็นเมทริกซ์ที่อธิบายระบบที่จุดทำงานที่ i และ N คือ จำนวนจุดทำงานทั้งหมดที่สนใจ เราสามารถแสดงวงศ์ของแบบจำลอง (family of model) ใน (3.3) ในรูปของระบบที่มีความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ค่าจริง (real parametric uncertainty) ซึ่งเขียนแทนด้วยสมการที่ (3.4)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + \Delta A) x + (B_u + \Delta B_u) u + B_w w \\ y &= (C_y + \Delta C_y) x + (D_{yu} + \Delta D_{yu}) u \\ z &= (C_z + \Delta C_z) x + (D_{zu} + \Delta D_{zu}) u \end{aligned} \quad (3.4)$$

เรียกเมทริกซ์ $A, B_u, C_y, D_{yu}, C_z, D_{zu}$ ว่าเป็นเมทริกซ์ที่สภาวะระบุ (nominal matrix) ซึ่งผู้ออกแบบมักเป็นผู้เลือกจากสภาวะการทำงานปกติ สำหรับการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. พิจารณาช่วงของความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

2. กำหนดพารามิเตอร์ที่สภาวะระบุ

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อ้างอิงตาม [19] โดยกำหนดให้เมทริกซ์ที่สภาวะระบุเป็นค่ากึ่งกลาง เช่น การเลือกเมทริกซ์ A จากเมทริกซ์ A^i เมื่อ $i = 1, \dots, N$ หาได้จาก

$$A = \frac{1}{2}(A_{\max} + A_{\min})$$

โดยที่ A_{\max} และ A_{\min} คือเมทริกซ์ที่มีค่าของสมาชิกในแต่ละตำแหน่งเป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดตามลำดับ นอกจากนี้กำหนดให้ $\Delta A = A_{\max} - A$ ต่อจากนั้นทำเช่นเดียวกันกับ $B_u^i, C_y^i, D_{yu}^i, C_z^i, D_{zu}^i$ หลังจากขั้นตอนนี้ทำให้เราได้เมทริกซ์ที่สภาวะระบุ $A, B_u, C_y, D_{yu}, C_z, D_{zu}$ และเมทริกซ์ค่าพารามิเตอร์เบี่ยงเบน $\Delta A, \Delta B_u, \Delta C_y, \Delta D_{yu}, \Delta C_z, \Delta D_{zu}$

3. คำนวณค่าเมทริกซ์แยกย่อยเอกลักษณ์ของเมทริกซ์ค่าพารามิเตอร์เบี่ยงเบน

เมื่อนำเมทริกซ์พารามิเตอร์เบี่ยงเบนมาทำการแยกย่อยค่าเอกลักษณ์จะได้เมทริกซ์ย่อยเป็นดังนี้

$$\left[\begin{array}{c|c} \Delta A & \Delta B \\ \hline \Delta C_y & \Delta D_{yu} \\ \hline \Delta C_z & \Delta D_{zu} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \bar{B}_p \\ \bar{D}_{yp} \\ \bar{D}_{zp} \end{array} \right] \bar{\Delta} \left[\begin{array}{cc} \bar{C}_q & \bar{D}_{qu} \end{array} \right] \quad (3.5)$$

โดยที่ $\bar{\Delta} = \text{diag}[\delta_1, \delta_2, \dots]$ กำหนดให้ค่าลำดับชั้นของเมทริกซ์เอกลักษณ์ $\bar{\Delta}$ เท่ากับ r จากนั้นทำการลดมิติของเมทริกซ์เอกลักษณ์โดยตัดให้เหลือเพียงตำแหน่งที่มีค่าเอกลักษณ์ไม่เป็นศูนย์ กล่าวคือตั้งแต่ตัวที่ 1 ถึง ตัวที่ r จะได้

$$\Delta = \text{diag}[\delta_1, \dots, \delta_r]$$

และลดมิติของเมทริกซ์อื่นให้สอดคล้องกัน ได้ผลดังนี้

$$\left[\begin{array}{c} B_p \\ D_{yp} \\ D_{zp} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \bar{B}_p \\ \bar{D}_{yp} \\ \bar{D}_{zp} \end{array} \right] \Delta \quad \text{และ} \quad \left[\begin{array}{cc} C_q & D_{qu} \end{array} \right] = \Delta \left[\begin{array}{cc} \bar{C}_q & \bar{D}_{qu} \end{array} \right] \quad (3.6)$$

จากนั้นจัดสมการ (3.4) ให้อยู่ในรูปของระบบเชิงเส้นที่มีการสัญญาณเข้า p ผ่านฟังก์ชัน Δ และได้สัญญาณออกเป็น q [2] เพื่ออธิบายส่วนเบี่ยงเบนในพารามิเตอร์ ได้ตั้งสมการ (3.7)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_p p + B_w w + B_u u \\ q &= C_q x + D_{qu} u \\ z &= C_z x + D_{zp} p + D_{zu} u \\ y &= C_y x + D_{yp} p + D_{yu} u \\ p &= \Delta q \end{aligned} \quad (3.7)$$

พารามิเตอร์ที่ได้ในสมการ (3.7) นี้จะเป็นพารามิเตอร์ที่นำไปในการวิเคราะห์สมรรถนะ H_2 กรณีเลวสุด และการสังเคราะห์ตัวควบคุมคงทนในบทต่อไป โดย B_p เป็นเมทริกซ์ที่ใช้อธิบายความไม่แน่นอนในเมทริกซ์พลวัต, D_{zp} เป็นเมทริกซ์ที่ใช้อธิบายความไม่แน่นอนในเมทริกซ์สมรรถนะขาออกซึ่งเกิดจากความผิดพลาดจากการวัดและความผิดพลาดจากตัวขับเคลื่อน และ D_{yp} เป็นเมทริกซ์ที่ใช้อธิบายความไม่แน่นอนในสัญญาณออกที่ได้จากการวัดหรือค่าผิดพลาดที่เกิดจากการวัด

3.4 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ค่าจริงที่เกิดขึ้นในการควบคุมกำลังผลิตและความถี่ 2 พื้นที่สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอ้างถึงค่าสมการสถานะและพารามิเตอร์ที่สภาวะระบุจาก [20, หน้า 548] ดังตาราง

ตารางที่ 3.1: ค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมกำลังผลิตและความถี่ 2 พื้นที่

พารามิเตอร์	พื้นที่ 1	พื้นที่ 2
ค่าคงที่ควบคุมความเร็ว	$R_1 = 0.05$	$R_2 = 0.0625$
ค่าคงที่การหน่วง (ต่อหน่วย : per unit)	$D_1 = 0.6$	$D_2 = 0.9$
ค่าคงที่ความเฉื่อย (ต่อหน่วย : per unit)	$H_1 = 5$	$H_2 = 4$
ค่าคงตัวทางเวลาของตัวบังคับเทอร์ไบน์ (วินาที)	$T_{G1} = 0.2$	$T_{G2} = 0.3$
ค่าคงตัวทางเวลาของเทอร์ไบน์ (วินาที)	$T_{T1} = 0.5$	$T_{T2} = 0.6$
ฐานกำลังการผลิต (เมกกะวัตต์)	1000	1000

3.4.1 กรณีแปรค่าคงตัวทางเวลาของเทอร์ไบน์

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์เป็นไปตามขั้นตอน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาช่วงของความไม่แน่นอน

ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในค่าคงตัวทางเวลาของเทอร์ไบน์ (Turbine time constant) ของพื้นที่ 1 กำหนดให้ $T_{T1} = 0.5$ วินาที เป็นข้อมูลที่ต้องการพิจารณาและจาก [20] ระบุว่าพารามิเตอร์นี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วง $0.2 - 2$ วินาที จึงกำหนดให้จากข้อมูลที่ต้องการพิจารณามีค่าเบี่ยง

เบนไปอีก 0.3 วินาทีเพื่อให้ครอบคลุมค่าต่ำสุดของพารามิเตอร์ที่เป็นไปได้ ดังนั้น จะได้ช่วงการเปลี่ยนแปลงที่พิจารณาเป็น $T_{T1} \in [0.2, 0.8]$ วินาที

- ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะระบุพารามิเตอร์ที่ใช้ในเมทริกซ์ A , B_u , B_w และ C_y ของสมการสถานะ (3.1) อ้างอิงจากตารางที่ 3.1 และเลือกค่าที่สภาวะระบุเป็นค่ากึ่งกลาง ส่วน C_z ซึ่งเป็นเมทริกซ์สมรรถนะขาออกนั้น เลือกให้เท่ากับเมทริกซ์สัญญาณออก C_y เนื่องจากต้องการควบคุมผลของสัญญาณรบกวนขาเข้า w ที่มีต่อสัญญาณออกให้มีค่าน้อยที่สุด y
- ขั้นตอนที่ 3 หาค่าแยกย่อยเอกฐานเมทริกซ์ค่าพารามิเตอร์เบี่ยงเบนเนื่องจากค่าคงตัวทางเวลาของเทอร์โบเป็นพารามิเตอร์ที่ปรากฏในเมทริกซ์พลวัตเท่านั้น ทำให้มีเมทริกซ์พารามิเตอร์เบี่ยงเบนมีเฉพาะ ΔA จะได้

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.875 & 1.875 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

เนื่องจากเมทริกซ์ค่าเบี่ยงเบนอื่นมีค่าเป็นศูนย์ดังนั้น เมื่อหาค่าแยกย่อยเอกฐานดังสมการ (3.5) และลดขนาดเมทริกซ์ตามขั้นตอนใน (3.6) แล้วพบว่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นมีค่าลำดับชั้นเป็น 1 ทำให้ได้เมทริกซ์ B_p มีจำนวน 1 สดมภ์ และเมทริกซ์ C_q มีจำนวน 1 แถว ดังแสดงได้ในสมการที่ (3.9) โดยที่เมทริกซ์ D_{yp} , D_{zp} , D_{qu} มีค่าเป็นศูนย์

$$\begin{bmatrix} A & B_p & B_w \\ C_q & D_{qp} & D_{qw} \\ C_z & D_{zp} & D_{zw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.060 & 0.100 & 0 & -0.100 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.100 & 0 \\ 0 & -3.125 & 3.125 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -100 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3.223 & 0 & 0 & 0 & -3.223 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.125 & -0.113 & 0.123 & 0 & 0 & 0 & -0.123 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.667 & 1.667 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -53.333 & 0 & -3.333 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0.707 & -0.707 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 20.6 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 16.9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

และ $p_1 = 2.652 \delta_1 q_1$ เมื่อ $|\delta_1| \leq 1$

3.4.2 กรณีแปรค่าสัมประสิทธิ์เชิงโคโรไนซ์ทอร์ก

ค่าสัมประสิทธิ์เชิงโคโรไนซ์ทอร์ก T_{12} เป็นค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง 2 พื้นที่ที่เชื่อมต่อกัน หากค่าสัมประสิทธิ์เชิงโคโรไนซ์ทอร์กระหว่างพื้นที่คู่ใดมีค่ามากแปลว่า 2 บริเวณนั้นมีความสัมพันธ์กันมาก

การหาสัมประสิทธิ์ซิงโครไนส์ทอริก เริ่มจากการพิจารณาวงจรไฟฟ้าสมมูลของการควบคุมกำลังผลิตและความถี่ 2 พื้นที่ โดยแต่ละพื้นที่จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage source) พร้อมด้วยค่ารีแอคแตนซ์สมมูลที่เชื่อมต่อกับบัสเชื่อมต่อ (tie bus) อ้างอิงจากรูปที่ 3.2 เมื่อ กำลังไฟฟ้าถ่ายโอนเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$P_{12} = \frac{|E_1||E_2|}{X_T} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.10)$$

โดยที่ P_{12} คือ กำลังไฟฟ้าถ่ายโอนจากเครื่องจักรที่ 1 ไปยังเครื่องจักรที่ 2
 E_1 คือ แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรที่ 1
 E_2 คือ แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรที่ 2
 X_T คือ ค่ารีแอคแตนซ์ระหว่างเครื่องจักรที่ 1 และเครื่องจักรที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยค่ารีแอคแตนซ์ในสายส่ง, ค่ารีแอคแตนซ์ในเครื่องจักรที่ 1 และ รีแอคแตนซ์ในเครื่องจักรที่ 2
 $X_T = X_1 + X_{tie} + X_2$
 $\delta_1 - \delta_2$ คือ ผลต่างของมุมระหว่างโรเตอร์ของ 2 พื้นที่

พิจารณาสมการ (3.10) และทำให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานที่ $\delta_1 = \delta_{10}$ และ $\delta_2 = \delta_{20}$ จะได้

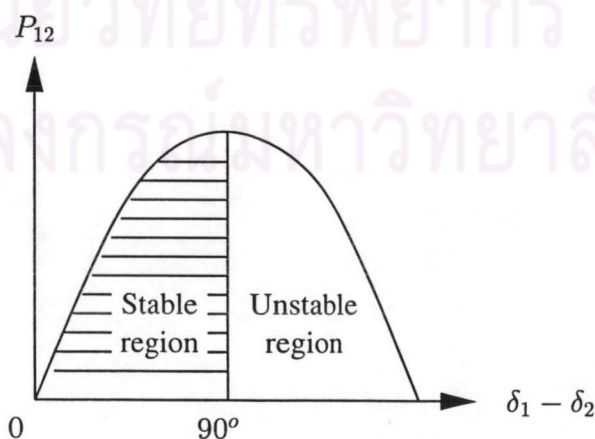
$$\Delta P_{12} = T_{12} \Delta \delta_{12}$$

โดยที่ $\Delta \delta_{12} = \Delta \delta_1 - \Delta \delta_2$ และ นิยามค่าสัมประสิทธิ์ซิงโครไนส์ทอริก T_{12} เป็นดังนี้

$$T_{12} = \frac{|E_1||E_2|}{X_T} \cos(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.11)$$

จะเห็นได้ว่า T_{12} ขึ้นอยู่กับแรงดันในพื้นที่ 1, แรงดันในพื้นที่ 2, ค่ารีแอคแตนซ์รวม และผลต่างของมุมระหว่างโรเตอร์ทั้งสอง

จากนั้น พิจารณาเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าแลกเปลี่ยนและผลต่างของมุมระหว่างโรเตอร์ (Power angle curve) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4: เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและผลต่างมุมของโรเตอร์

จากรูป 3.4 พบว่า เมื่อผลต่างของมุมเพิ่มขึ้นทำให้กำลังไฟฟ้าถ่ายโอนมีปริมาณเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าถ่ายโอนนี้จะทำหน้าที่รักษาระดับความต่างของความเร็วในโรเตอร์ทั้งสองไม่ให้ต่างกันมากกว่าความเร็วเชิงโคโรไนส์ และที่ผลต่างของมุมเป็น 90 องศา จะให้กำลังไฟฟ้าถ่ายโอนสูงสุด หลังจากนั้นเมื่อผลต่างของมุมมีค่ามากกว่า 90 องศา พบว่ากำลังไฟฟ้าถ่ายโอนกลับมีปริมาณลดลง ทำให้กำลังไฟฟ้างดงกล่าวไม่เพียงพอต่อการควบคุมผลต่างระหว่างมุมของโรเตอร์ทั้งสองได้และขาดการซิงโครไนส์กันมากที่สุด เหตุการณ์นี้ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Non-oscillatory Instability [21] สรุปได้ว่าการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์เชิงโคโรไนท์ทอร์คจะต้องพิจารณาในช่วงที่ผลต่างของมุมระหว่างโรเตอร์ไม่เกิน 90 องศา การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์เป็นไปตามขั้นตอน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาช่วงของความไม่แน่นอน

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น [19] เราสามารถหาช่วงของค่าสัมประสิทธิ์เชิงโคโรไนท์ทอร์คได้ โดยกำหนดให้ $E_1 = 1.05$, $E_2 = 0.995$, $X_T \in [0.2, 0.7]$ และเลือก $|\delta_1 - \delta_2| \leq 35$ องศา

- ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะระบุ เลือกค่าที่สภาวะระบุเป็นค่าเดียวกับใน 3.4.1
- ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าเมทริกซ์แยกย่อยเอกฐานของเมทริกซ์ค่าพารามิเตอร์เบี่ยงเบนค่าสัมประสิทธิ์เชิงโคโรไนท์ทอร์คปรากฏขึ้นเฉพาะในเมทริกซ์พลวัตจึงมีเฉพาะ ΔA เช่นเดียวกับใน §3.4.1

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.001 & 0 & 0 & 0 & -2.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

เมื่อทำการแยกย่อยเอกฐานพบว่า มีค่าลำดับชั้นเป็น 1 ทำให้ได้เมทริกซ์ B_p มีจำนวน 1 สดมภ์ และเมทริกซ์ C_q มีจำนวน 1 แถว ดังแสดงได้ในสมการที่ 3.13

$$\begin{bmatrix} A & B_p & B_w \\ C_q & D_{qp} & D_{qw} \\ C_z & D_{zp} & D_{zw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.060 & 0.100 & 0 & -0.100 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.100 & 0 \\ 0 & -3.125 & 3.125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -100 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3.223 & 0 & 0 & 0 & -3.223 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.125 & -0.113 & 0.123 & 0 & 0 & 0 & -0.125 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.667 & 1.667 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -53.333 & 0 & -3.333 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0.707 & 0 & 0 & 0 & -0.707 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 20.600 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & -1 & 16.900 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

และ $p_2 = 2.829 \delta_2 q_2$ เมื่อ $|\delta_2| \leq 1$

3.4.3 กรณีแปรค่าคงตัวทางเวลาของเทอร์ไบน์ในพื้นที่ และค่าสัมประสิทธิ์เชิงโครโมสทอริก

กรณีนี้เป็นการนำความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในค่าคงตัวทางเวลาของเทอร์ไบน์ในพื้นที่และความไม่แน่นอนค่าสัมประสิทธิ์เชิงโครโมสทอริกจาก §3.4.1 และ 6.2.2 มารวมกัน ทำให้เกิดพารามิเตอร์เบี่ยงเบนในเมทริกซ์ ΔA ดังนี้

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.875 & 1.875 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.001 & 0 & 0 & 0 & -2.001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

เมื่อทำการแยกย่อยเอกลักษณ์พบว่ามามีค่าลำดับชั้นเป็น 2 ทำให้ได้เมทริกซ์ B_p มีจำนวน 2 สดมภ์ และเมทริกซ์ C_q มีจำนวน 2 แถว ดังแสดงได้ในสมการที่ 3.15

$$\begin{bmatrix} A & B_p & B_w \\ C_q & D_{qp} & D_{qw} \\ C_z & D_{zp} & D_{zw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.060 & 0.100 & 0 & -0.100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.100 & 0 \\ 0 & -3.125 & 3.125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -100 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3.223 & 0 & 0 & 0 & -3.223 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.125 & -0.113 & 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.125 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.667 & 1.667 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -53.333 & 0 & -3.333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0.707 & 0 & 0 & 0 & -0.707 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.707 & -0.707 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 20.6 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 16.9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\text{และ } \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.829 & \delta_1 & 0 \\ 0 & 2.652 & \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$$

3.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการวิเคราะห์ระบบที่มีความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ค่าจริง ในเมทริกซ์พลวัต, เมทริกซ์สัญญาณออกที่ได้จากการวัดและเมทริกซ์สมรรถนะขาออก เพื่อจัดรูปให้อยู่ในรูปของระบบลูเรได้โดยใช้การแยกย่อยค่าเอกลักษณ์และนำค่าลำดับชั้นของค่าเอกลักษณ์มาใช้ในการลดมิติของเมทริกซ์เพื่อทำให้การคำนวณเร็วขึ้น จากนั้นมีการเพิ่มสัญญาณเข้าและสัญญาณออกเพื่อใช้แทนความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้น และทำการพิจารณาความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในพารามิเตอร์ 2 ตัวของระบบกำลังการผลิตและความถี่คือค่าคงตัวของเทอร์ไบน์และค่าสัมประสิทธิ์เชิงโครโมสทอริก เนื่องจากพารามิเตอร์ทั้ง 2 นี้เป็นพารามิเตอร์ที่อยู่ในเมทริกซ์พลวัตเท่านั้น ดังนั้นเมื่อผ่านขั้นตอนการแยกย่อยเอกลักษณ์จึงมีเพียงเมทริกซ์ที่ใช้อธิบายความไม่แน่นอนในพลวัตคือ B_p และ C_q อย่างไรก็ตามเมื่อระบบมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นในเมทริกซ์สัญญาณออกที่ได้จากการวัดและเมทริกซ์สมรรถนะขาออกเราสามารถใช้ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่กล่าวถึงในบทนี้ได้เช่นกัน โดยนำเมทริกซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนไปใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะและสังเคราะห์ตัวควบคุมคงทนในบทต่อไป