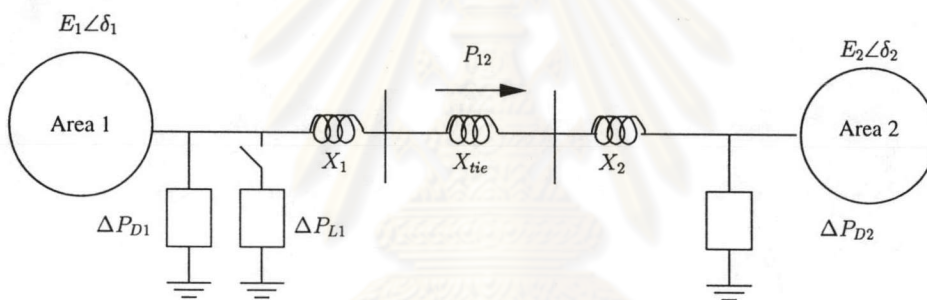


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้า คือการควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้และควบคุมความถี่ให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน กรณีที่นำมาพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการควบคุมการผลิตไฟฟ้าที่มี 2 พื้นที่ซึ่งมีการส่งกำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อกัน ในกรณีนี้นอกจากความถี่ของไฟฟ้าแล้วต้องคำนึงถึงการรักษาระดับกำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อให้เป็นไปตามข้อตกลงที่กำหนดไว้อีกด้วย เราเรียกการควบคุมนี้ว่าการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ (load frequency control : LFC) 2 พื้นที่ดังแสดงได้ในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1: แผนภาพเส้นแสดงการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ 2 พื้นที่

ในรูปที่ 1.1 ประกอบด้วยระบบผลิตไฟฟ้าจำนวน 2 พื้นที่ซึ่งแต่ละพื้นที่จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันและค่ารีแอกแตนซ์สมมูล X_1 และ X_2 โดยมีการเชื่อมกับพื้นที่ที่ติดกันด้วยบัสเชื่อมต่อที่มีค่ารีแอกแตนซ์เป็น X_{tie} จากรูปแสดงให้เห็นถึงการส่งกำลังไฟฟ้าให้กันผ่านบัสเชื่อมต่อซึ่งเรียกว่ากำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อ (tie line power) เขียนแทนด้วย P_{12}

กำลังเชื่อมต่อดังกล่าวมีผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าทั้ง 2 พื้นที่นี้มีพลวัตที่เกี่ยวข้องกัน เช่นถ้ากำหนดให้มีการส่งไฟฟ้าจากพื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 เมื่อมีโหลด (load) ΔP_{L1} เพิ่มเข้ามาในพื้นที่ 1 จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของกำลังไฟฟ้าในพื้นที่ 1 และส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อลดลงในทันที พื้นที่ 2 จะเกิดความไม่สมดุลของกำลังไฟฟ้าเช่นเดียวกับพื้นที่ 1 ส่งผลให้ความถี่ของไฟฟ้าของใน 2 พื้นที่เบี่ยงเบนไปจากค่าความถี่มาตรฐาน ดังนั้นจุดประสงค์ในการควบคุมระบบนี้จึงประกอบไปด้วยการควบคุมปริมาณไฟฟ้าเชื่อมต่อให้เป็นไปตามปริมาณที่ตกลงและรักษาความถี่ของไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมระบบกำลังการผลิตและความถี่ 2 พื้นที่ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่คืนั้น เราจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ของระบบที่ถูกต้อง เพื่อให้สามารถปรับการตอบสนองของระบบที่ต้องการควบคุมได้อย่างแม่นยำ รูปแบบของแบบจำลองที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือสมการสถานะ (state space equation) [1] ดังแสดงในสมการที่ (1.1)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_u u + B_w w \\ y &= C_y x + D_{yu} u \\ z &= C_z x + D_{zu} u \end{aligned} \quad (1.1)$$

เมื่อ $x: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^n$ คือตัวแปรสถานะ, $u: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^{n_u}$ คือสัญญาณเข้า, $w: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^{n_w}$ คือสัญญาณรบกวนขาเข้า, $y: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^{n_y}$ คือสัญญาณออก $z: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^{n_z}$ คือสัญญาณสมรรถนะขาออก ส่วนเมทริกซ์ $A, B_u, B_w, C_y, D_{yu}, C_z$ และ D_{zu} คือ เมทริกซ์พลวัต เมทริกซ์สัญญาณเข้า เมทริกซ์สัญญาณรบกวน เมทริกซ์สัญญาณออก เมทริกซ์ส่งผ่าน (direct transmission matrix) เมทริกซ์สัญญาณสมรรถนะขาออก และ เมทริกซ์สัญญาณเข้าไปยังสมรรถนะตามลำดับ ซึ่งเมทริกซ์ทั้งหมดเป็นเมทริกซ์ที่ได้จากการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) รอบจุดทำงาน เราเรียกระบบที่มีสมการสถานะดังสมการที่ (1.1) ว่าระบบเชิงเส้นไม่แปรผันตามเวลา

ปัญหาในการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่คือปริมาณการผลิตที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทำให้จุดทำงานเปลี่ยนแปลงตาม โดยเมทริกซ์ในสมการสถานะ (1.1) ที่จุดทำงานใดๆของแบบจำลองเชิงเส้นอธิบายได้โดย

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A^i x + B_u^i u + B_w w, \quad \text{เมื่อ } i = 1, \dots, N \\ y &= C_y^i x + D_{yu}^i u \\ z &= C_z^i x + D_{zu}^i u \end{aligned} \quad (1.2)$$

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) ของ (1.2) ภายใต้ความไม่แน่นอนในแบบจำลองที่เรียกว่าความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ค่าจริง (real parametric uncertainty) และเขียนแทนด้วยสมการ (1.3)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + \Delta A) x + (B_u + \Delta B_u) u + B_w w \\ y &= (C_y + \Delta C_y) x + (D_{yu} + \Delta D_{yu}) u \\ z &= (C_z + \Delta C_z) x + (D_{zu} + \Delta D_{zu}) u \end{aligned} \quad (1.3)$$

เรียกเมทริกซ์ $A, B_u, C_y, D_{yu}, C_z, D_{zu}$ ว่าเป็นค่าที่สภาวะระบุ (nominal value) และเรียก $\Delta A, \Delta B_u, \Delta C_y, \Delta D_{yu}, \Delta C_z, \Delta D_{zu}$ ว่าเมทริกซ์พารามิเตอร์เบี่ยงเบน ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบ (1.3) คือการทำให้ระบบในวงศ์ทั้งหมดมีเสถียรภาพและมีสมรรถนะตามข้อกำหนดของระบบ

จากสมการสถานะที่จุดทำงานต่างๆ นำมาวิเคราะห์ระบบและจัดรูปแบบความไม่แน่นอนให้มีลักษณะการแปลงเศษส่วนเชิงเส้น (linear fractional transformation : LFT) การแยกย่อยค่าเอกฐาน (singular value decomposition : SVD) กับเมทริกซ์พารามิเตอร์เบี่ยงเบน ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\left[\begin{array}{c|c} \Delta A & \Delta B \\ \hline \Delta C_y & \Delta D_{yu} \\ \hline \Delta C_z & \Delta D_{zu} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} B_p \\ D_{yp} \\ D_{zp} \end{array} \right] \Delta \left[\begin{array}{cc} C_q & D_{qu} \end{array} \right]$$

โดยที่

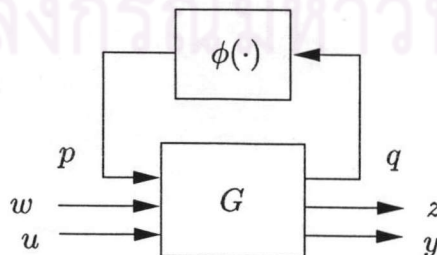
$$U \triangleq \left\{ \begin{array}{l} \Delta A \in \mathbf{R}^{n \times n}, \Delta B_u \in \mathbf{R}^{n \times n_u}, \Delta C_y \in \mathbf{R}^{n_y \times n}, \Delta D_{yu} \in \mathbf{R}^{n_y \times n_u} \\ \Delta C_z \in \mathbf{R}^{n_z \times n}, \Delta D_{zu} \in \mathbf{R}^{n_z \times n_u} \\ \Delta = \text{diag}(\delta_1, \dots, \delta_{n_p}), \delta_i \in [0, l_i], \forall i = 1, \dots, n_p \end{array} \right\}$$

สมการสถานะ (1.3) สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของระบบเชิงเส้นที่มีการป้อนกลับสัญญาณ q ผ่านฟังก์ชันไม่แน่นอน Δ และสัญญาณออกเป็น q [2] ตามสมการที่ (1.4)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_p p + B_w w + B_u u \\ q &= C_q x + D_{qu} u \\ z &= C_z x + D_{zp} p + D_{zu} u \\ y &= C_y x + D_{yp} p + D_{yw} w \\ p &= \Delta q \end{aligned} \quad (1.4)$$

โดยที่ $q: \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}^{n_p}$ และ $p: \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}^{n_p}$ คือสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของฟังก์ชันเชิงเส้น อย่างไรก็ตามความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ที่เป็นกรณีเฉพาะของความไม่แน่นอนที่สอดคล้องกับฟังก์ชันไม่เชิงเส้นซึ่งอธิบายความไม่แน่นอนได้ครอบคลุมกว่า จึงนำไปสู่แนวความคิดในการพิจารณาความไม่แน่นอนที่เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ดังเช่นระบบลูเร (Lur'e system)

ระบบลูเรเป็นระบบเชิงเส้นไม่แปรผันตามเวลาที่มีการป้อนกลับ ด้วยฟังก์ชันไม่เชิงเส้นไม่แปรผันตามเวลาและไม่มีควมจำ (memoryless) ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2: ระบบลูเร

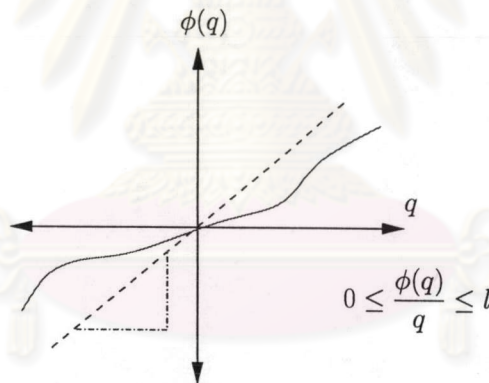
ระบบลู่วีสมการสถานะ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= Ax + B_p p + B_w w + B_u u \\
 q &= C_q x + D_{qu} u \\
 z &= C_z x + D_{zp} p + D_{zu} u \\
 y &= C_y x + D_{yp} p + D_{yw} w \\
 p &= \phi(q) \triangleq \begin{bmatrix} \phi_1(q_1) \\ \vdots \\ \phi_{n_p}(q_{n_p}) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

โดยที่ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ϕ_i สอดคล้องกับเงื่อนไขเชกเตอร์ $[0, l_i]$ นั่นคือ

$$\phi \triangleq \left\{ \begin{array}{l} \phi : \mathbf{R}^{n_p} \rightarrow \mathbf{R}^{n_p}, \phi(q) = [\phi_1(q_1), \dots, \phi_{n_p}(q_{n_p})]^T \\ 0 \leq \phi_i(q_i)/q_i \leq l_i, \phi_i(0) = 0 \end{array} \right\}$$

เมื่อ $l = (l_1, \dots, l_{n_p})$ เป็นเวกเตอร์ที่สมาชิกแต่ละตัวเป็นขอบเขตเชกเตอร์ของฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ในจุดภาค (quadrant) ที่หนึ่งและสามดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3: ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น

เห็นได้ชัดว่า ระบบ (1.4) เป็นกรณีเฉพาะของลู่วีสมการ (1.5) เมื่อฟังก์ชัน ϕ เป็นเชิงเส้น เช่น $\phi(q) = \delta_i q$ โดยที่ $\delta_i \in [0, l_i]$

ดังนั้นเราสามารถนำเทคนิคการวิเคราะห์สมรรถนะ H_2 คงทนและเทคนิคการสังเคราะห์คงทนของระบบลู่วีสมการมาใช้กับปัญหาที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ ในส่วนของการวิเคราะห์สมรรถนะ H_2 คงทนของระบบลู่วีสมการคือการหาขอบเขตบนของค่าสมรรถนะ H_2 ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดไว้ ส่วนปัญหาการสังเคราะห์คงทนมีจุดมุ่งหมายในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อทำให้ค่าสมรรถนะ H_2 กรณีเลวสุด (worst case H_2 performance) มีค่าต่ำสุดเมื่อความไม่แน่นอนมีค่าภายใต้เชกเตอร์ที่กำหนด

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

1.2.1 การควบคุมการผลิตและความถี่

- ปี ค.ศ.1972 Calovic นำเสนอทฤษฎีการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่โดยการใช้การป้อนกลับสถานะมาทำการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ ซึ่งสามารถปรับปรุงผลตอบสนองของการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ 2 พื้นที่ได้ดีแต่การออกแบบไม่มีการพิจารณาความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ในแบบจำลองพลวัต
- ปี ค.ศ.1993 Y. Wang และคณะ [3] นำเสนอการควบคุมคงทนสำหรับการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ 1 เขต โดยนำความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ในพลวัตไปรวมกับฟังก์ชันเลียปูนอฟ (Lyapunov function) เพื่อหาขอบเขตของเสถียรภาพคงทน จากนั้นสังเคราะห์ตัวควบคุมด้วยการป้อนกลับเชิงเส้นจากการแก้สมการรีคาตี (Riccati equation) และทดสอบกับการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ 1 พื้นที่ ในกรณีที่ระบบมีโพลเปลี่ยนแปลงไปซึ่งสามารถควบคุมความถี่ให้เบี่ยงเบนไปในขอบเขตที่ยอมรับได้ แต่ในแนวความคิดนี้ยังต้องอาศัยวิธีลองผิดลองถูก (trial and error) ในขั้นตอนการหาคำตอบเชิงเลข
- ปี ค.ศ.1999 G. Ray และคณะ [4] ได้นำแนวความคิดของ Y. Wang และคณะ มาทดสอบออกแบบตัวควบคุมคงทนการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ 2 เขต ให้ผลการควบคุมความถี่และกำลังไฟฟ้าเชื่อมต่อกันที่น่าพอใจ แต่ไม่นำเสนอการแก้จุดอ่อนของ Y. Wang
- ปี ค.ศ.2003 D. Reckpreedapong และคณะ [5] ได้นำทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุม H_∞ โดยการแก้สมการเมทริกซ์เชิงเส้น (linear matrix inequalities) มาสังเคราะห์ตัวควบคุมคงทน ผลการทดสอบกับการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ 3 พื้นที่ พบว่าสามารถรักษาระดับการเบี่ยงเบนของความถี่ไว้ในขอบเขตจำกัดได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโพล

1.2.2 ระบบลูเร

- ปี ค.ศ. 1944 Lur'e และ Postnikov [6] ได้เสนอปัญหาเสถียรภาพสัมบูรณ์ของระบบที่มีการป้อนกลับด้วยฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่ถูกจำกัดด้วยขอบเขตเซกเตอร์ ระบบนี้เรียกว่าระบบลูเร (Lur'e system) และนำเสนอฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ประกอบด้วยพจน์กำลังสองบวกกับอินทิกรัล (integral) ของฟังก์ชันไม่เชิงเส้นเรียกว่าฟังก์ชันเลียปูนอฟแบบลูเร-โพสนิคอฟ (Lur'e-Postnikov)
- ปี ค.ศ. 1962 Popov [7] ได้แสดงความเชื่อมโยงระหว่างเงื่อนไขเสถียรภาพสัมบูรณ์ที่มาจากฟังก์ชันเลียปูนอฟแบบลูเร-โพสนิคอฟ ในเชิงเวลาและเงื่อนไขเสถียรภาพสัมบูรณ์เชิงความถี่ เรียกว่าเกณฑ์ของโปปอฟ (Popov criterion)
- ปี ค.ศ. 1994 Boyd และคณะ [8] ได้นำเสนอเงื่อนไขการคำนวณค่าขอบเขตบนของสมรรถนะ H_2 กรณีเลวสุดของระบบลูเร โดยใช้เงื่อนไขเสถียรภาพสัมบูรณ์และขอบเขตบนของสัญญาณสมรรถนะขาออก (performance output)

- ปี ค.ศ. 1997 Banjerdpongchai และ How [9, 10] ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม H_2 คงทนโดยใช้เงื่อนไขการคำนวณสมรรถนะของ Boyd *et al.* ด้วยการวนซ้ำแก้ปัญหาอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น (linear matrix inequalities)
- ปี ค.ศ. 2004 ฐาปนา นามประดิษฐ์ และ เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย [11] นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม H_2 คงทนสำหรับระบบลู่วิ่งที่มีการจำกัดเชิงเตอร์และความชัน (slope) โดยนำมาทดสอบกับระบบมวลสปริงและให้ค่าสมรรถนะ H_2 กรณีเลวสุดต่ำกว่าการจำกัดเชิงเตอร์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากการจำกัดความชันและการเพิ่มพจน์อินทิกรัลของส่วนไม่เป็นเชิงเส้นเข้าไปในฟังก์ชันเสียปูโนฟทำให้ความอ่อนรั้งของปัญหาลดลง

1.3 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ คือการออกแบบตัวควบคุมคงทนให้กับการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่ด้วยวิธีการสังเคราะห์ H_2 คงทน เพื่อให้สามารถประกันสมรรถนะกรณีเลวสุดและเสถียรภาพในการทำงานภายใต้ความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ค่าจริงที่เกิดขึ้นในขอบเขตที่พิจารณาได้

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาลักษณะการทำงานของระบบกำลังการผลิตและความถี่
2. วิเคราะห์ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในแบบจำลองพลวัตของระบบกำลังการผลิตและความถี่
3. วิเคราะห์สมรรถนะ H_2 กรณีเลวสุดของระบบกำลังการผลิตและความถี่
4. ออกแบบตัวควบคุมคงทนสำหรับการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่
5. จำลองผลตอบสนองของการควบคุมจากตัวควบคุมที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับตัวควบคุมพื้นฐาน

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาการทำงานของระบบกำลังการผลิตและความถี่ 2 พื้นที่ ศึกษาขอบเขตการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์แต่ละตัวและปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเพื่อจัดรูปแบบให้อยู่ในรูปที่ต้องการ
2. ศึกษาการวิเคราะห์สมรรถนะกรณีเลวสุดของระบบลู่วิ่ง เพื่อหาเงื่อนไขพอเพียงในการทำให้ระบบมีเสถียรภาพ
3. ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ตัวควบคุม H_2 คงทน เพื่อปรับปรุงสมรรถนะกรณีเลวสุดของระบบมีค่าลดลง
4. สร้างชุดคำสั่งบนโปรแกรม Matlab เพื่อวิเคราะห์ความไม่แน่นอน, การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีเลวสุด, การสังเคราะห์ตัวควบคุม H_2 คงทน

5. จำลองผลการควบคุมจากตัวควบคุมคงทนที่ออกแบบได้เทียบกับตัวควบคุมพื้นฐาน
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุม และปรับปรุงการออกแบบจนได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ
7. เขียนวิทยานิพนธ์และคู่มือการใช้คำสั่งโปรแกรม Matlab

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมกำลังผลิตและความถี่ที่รวมความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ค่าจริง
2. ตัวควบคุมคงทนสำหรับการควบคุมกำลังการผลิตและความถี่
3. แนวทางในการพัฒนาตัวควบคุมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังอื่นๆ เช่น ระบบควบคุมแรงดันและกำลังจินตภาพ

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในบทที่ 2 จะนำเสนอคณิตศาสตร์พื้นฐานที่จะใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยกล่าวถึงพีชคณิตพื้นฐานที่จะนำไปวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ค่าจริง, ปัญหาสมการเมทริกซ์เชิงเส้น, อสมการเมทริกซ์เชิงเส้นคู่, นิยามนอร์ม H_2 สำหรับระบบไม่เชิงเส้นเพื่อใช้ในการวัดสมรรถนะของระบบและกล่าวถึงบทตั้งที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวควบคุม บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองของระบบควบคุมกำลังจริงและความถี่, การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ค่าจริง และการหาแบบจำลองที่รวมความไม่แน่นอน บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์สมรรถนะ H_2 เริ่มจากการแปลงวงรอบเพื่อให้ระบบที่นำมาวิเคราะห์อยู่ขอบเขตเซกเตอร์ที่กำหนด, นำเสนอฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ใช้ในการพิจารณาสมรรถนะ และเงื่อนไขเพียงพอในการประกันเสถียรภาพ บทที่ 5 การสังเคราะห์ตัวควบคุมคงทน ปัญหานี้เดิมเป็นปัญหาสมการเชิงเส้นคู่ ซึ่งเราจะใช้วิธีวนซ้ำในการหาคำตอบเพื่อให้สามารถพิจารณาปัญหาอยู่ในรูปอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น และใช้วิธีฮอมโทปีเพื่อให้ปัญหาง่ายลง นอกจากนี้ยังนำบทตั้งจากบทที่ 2 มาใช้กำจัดตัวแปรเพื่อให้การลู่ออกของคำตอบเร็วขึ้น บทที่ 6 เป็นตัวอย่างการสังเคราะห์ตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมกำลังจริงและความถี่ โดยพิจารณาความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในพารามิเตอร์ 2 ตัวคือค่าคงตัวทางเวลาของเทอร์ไบน์และค่าชิ่งโครไนซ์ทอร์ก ในบทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ และภาคผนวก ก. เป็นแบบจำลองของการควบคุมกำลังผลิตและความถี่ ส่วนภาคผนวก ข. เป็นชุดคำสั่ง Matlab ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน การวิเคราะห์สมรรถนะ H_2 คงทนและการสังเคราะห์คงทน