

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

CONTROLLER DESIGNED

BY COEFFICIENT DIAGRAM METHOD (CDM)



โดย

นายันทวัฒน์

วิรัชพิสิฐ

นายอนุภาพ

พงษานุสรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ พรสุข

รติโรจน์อ่อนนัต

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขาม.....  
เลขทะเบียน.....36872.....  
วัน, เดือน, ปี.....พ.ศ. 2543.....

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิ์

ผู้จัดทำ

- |                  |             |          |
|------------------|-------------|----------|
| 1. นายนันท์วัฒน์ | วิรัชพิสิฐ  | 39014252 |
| 2. นายอานุกาพ    | พงษ์านุสรณ์ | 39014674 |

(อาจารย์พรสุช

รติโรจน์อนันต์ )

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

## CONTROLLER DESIGNED BY COEFFICIENT DIAGRAM METHOD (CDM)

โดย

นายันทวัฒน์

วิรัชพิสิฐ

นายอานูภาพ

พงษานุสรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์พรสุข

รติโรจน์อนันต์

### บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งถือว่ยังเป็นทฤษฎีที่ค่อนข้างใหม่อยู่ มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบมีคุณสมบัติตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้ออกแบบสามารถออกแบบตัวควบคุมและโพลีโนเมียลของระบบวงปิดที่ต้องการได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งผลตอบสนองของระบบที่ได้มีเสถียรภาพและความคงทนเป็นที่น่าพอใจและที่สำคัญ คือ แผนภาพสัมประสิทธิ์ที่แสดงความสัมพันธ์กับสมรรถนะของระบบ สามารถใช้ในการเปรียบเทียบผลตอบสนองที่แตกต่างกันของระบบ

### ABSTRACT

This thesis presents a controller design method called Coefficient Diagram Method (CDM). By this method, the simplest controller can be designed to achieve specification requirements efficiently. The designer can design the controller and the characteristic polynomial of the closed-loop system simultaneously. The closed-loop step response using the proposed controller exhibit a good balance of stability and robustness. In addition, the relation between coefficient diagram and closed-loop performance can be used to compare the different responses between the systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์พรสุข รติโรจน์อนันต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการนี้ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการนี้เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ MR. MANABE SHUNJI ที่ได้ส่งบทความทางวิชาการหลักการและตัวอย่างในการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงการได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ถาวร เบญจนาสุทธิ์ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้งานโปรแกรม MATLAB และหลักการในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบควบคุม อีกทั้งยังได้ช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ได้ให้กำลังใจและความสนับสนุนทางด้านทุนทรัพย์ รวมทั้งได้ให้โอกาสทางการศึกษาที่ดี รวมทั้งเพื่อน ๆ ทุกคนที่ได้ให้กำลังใจและความช่วยเหลือตลอดมา

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ปริญญาโทฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจทางด้านนี้ทุกท่าน ความดีที่ได้จากโครงการนี้ขอมอบให้ อาจารย์พรสุข รติโรจน์อนันต์ และอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำชี้แนะและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับคณะผู้จัดทำ รวมทั้งขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้เอื้อเฟื้อเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำโครงการนี้ให้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้คำปรึกษาและคอยช่วยเหลือในการทำโครงการครั้งนี้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

กิตติกรรมประกาศ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 วิธีการออกแบบตัวควบคุมทั่วไป

1.2 การวางโพล

1.3 วิธีพีชคณิตเชิงเส้น

1.4 การหาคำตอบของสมการ Diophantine

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของการออกแบบตัวควบคุมโดย CDM

2.1 การออกแบบตัวควบคุมโดย CDM

2.2 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

2.3 เงื่อนไขเสถียรภาพสำหรับ CDM

2.4 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

2.5 Canonical Open-loop Transfer Function

2.6 รูปแบบมาตรฐานของ CDM

2.7 การพิจารณาความคงทนของระบบ

2.8 การปรับค่าดัชนีเสถียรภาพ

2.9 การพิจารณาอันดับของตัวควบคุมจากการออกแบบโดย CDM

บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง

3.1 การทดลอง

3.1.1 การทดลองที่ 1

3.1.2 การทดลองที่ 2

3.1.3 การทดลองที่ 3

บทที่ 4 บทสรุปและวิจารณ์

ภาคผนวก

บรรณานุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบควบคุมทั่วไป	2
1.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนรวม	2
2.1 โครงสร้างของระบบควบคุมทั่วไป	7
2.2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน	7
2.3 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์	13
a.) กราฟค่าสัมประสิทธิ์	13
b.) กราฟค่าดัชนีเสถียรภาพ $\gamma_i$ และค่าจำกัดเสถียรภาพ $\gamma_i'$	13
2.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์	14
a.) ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเนื่องจากค่า $\gamma_i$	14
b.) ผลกระทบต่อความเร็วของผลตอบสนองของระบบเนื่องจากค่า $\tau$	14
2.5 แสดง Canonical Open-loop Transfer Function $G(s)$ และ Canonical Open-loop Transfer Function $T(s)$	15
2.6 ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบสตีปของระบบ Canonical แบบชนิด 1	17
2.7 ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบสตีปของระบบ Canonical แบบชนิด 2	17
2.8 แสดงค่าอินทิกรัลของสัญญาณค่าผิดพลาดของระบบ Canonical แบบชนิด 2	18
2.9 เปรียบเทียบเวลาเข้าที่เมื่อกำหนดค่า $\gamma_i$ ต่าง ๆ กัน	19
2.10 ตำแหน่งโพลของระบบอันดับต่าง ๆ	20
2.11 แสดงค่าโพลของระบบอันดับ 3 ที่กำหนดค่า $\gamma_i$ ต่างกัน	21
2.12 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเมื่อกำหนดค่า $\gamma_i$ ต่างกัน	22
3.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่ควบคุมแบบป้อนกลับหมด ต่ออินพุตแบบสตีป	27
3.2 แผนภาพโบลของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่ควบคุมแบบป้อนกลับหมด	27
3.3 แผนภาพโบลของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PD ; $\gamma_1 = 2.5, \tau = 0.04$	29
3.4 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PD ต่ออินพุตแบบสตีป ; $\gamma_1 = 2.5, \tau = 0.04$	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
3.5 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PD ต่ออินพุทแบบสแต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสแต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุม และพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \tau = 0.04$	30
3.6 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PD ต่ออินพุทแบบสแต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสแต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ $\gamma_1 = 2.5, \tau = 0.04$	31
3.7 แผนภาพโบทของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PI ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 1.667$	33
3.8 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PI ต่ออินพุทแบบสแต็ป ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 1.667$	34
3.9 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PI ต่ออินพุทแบบสแต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสแต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุม และพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 1.667$	34
3.10 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PI ต่ออินพุทแบบสแต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสแต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 1.667$	35
3.11 แผนภาพโบทของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	37
3.12 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสแต็ป ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	38
3.13 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสแต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสแต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุม และพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	38
3.14 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสแต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสแต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	39
3.15 แผนภาพโบทของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [1/1] ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
3.16 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [1/1] ต่ออินพุทแบบสเต็ป ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	42
3.17 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [1/1] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	42
3.18 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [1/1] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	43
3.19 แผนภาพโบคของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	45
3.20 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ป ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	46
3.21 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	46
3.22 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$	47
3.23 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง	51
3.24 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [1/1] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง	51
3.25 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง	52
3.26 แสดงแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบต่าง ๆ	52
3.27 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่ควบคุมแบบป้อนกลับหมด ต่ออินพุทแบบสเต็ป	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
3.28 แผนภาพโพลของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีความควบคุมแบบป้อนกลับหมด	54
3.29 แผนภาพโพลของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \tau = 0.7671$	57
3.30 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ป ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \tau = 0.7671$	57
3.31 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุม และพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \tau = 0.7671$	58
3.32 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \tau = 0.7671$	58
3.33 แผนภาพโพลของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.6548, \tau = 1.24$	59
3.34 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ป ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.6548, \tau = 1.24$	60
3.35 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุม และพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.6548, \tau = 1.24$	60
3.36 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.6548, \tau = 1.24$	61
3.37 แผนภาพโพลของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 2, \tau = 0.7517$	63
3.38 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ป ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 2, \tau = 0.7517$	64
3.39 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุม และพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 2, \tau = 0.7517$	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
3.40 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสตีปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสตีปขนาด 0.5 ที่เอาท์พุทของระบบ ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 2, \tau = 0.7517$	65
3.41 แผนภาพโบทของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.7, \gamma_4 = 2.3, \tau = 0.8167$	66
3.42 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสตีป ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.7, \gamma_4 = 2.3, \tau = 0.8167$	66
3.43 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสตีปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสตีปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุม และพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.7, \gamma_4 = 2.3, \tau = 0.8167$	67
3.44 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสตีปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสตีปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาท์พุทของระบบ $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.7, \gamma_4 = 2.3, \tau = 0.8167$	67
3.45 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสตีปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง กำหนดค่า $\gamma_i$ มาตรฐาน	70
3.46 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสตีปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง โดยมีการปรับค่า $\gamma_3$	70
3.47 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสตีปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง กำหนดค่า $\gamma_i$ มาตรฐาน	71
3.48 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสตีปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง โดยมีการปรับค่า $\gamma_3$ และ $\gamma_4$	71
3.49 แสดงแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID และ [2/2]	72
3.50 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ควบคุมแบบป้อนกลับหมด ต่ออินพุทแบบสตีป	73
3.51 แผนภาพโบทของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1	74

รูปที่	หน้า
3.52 แผนภาพโพลของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ; $\gamma_3 = 2.3599, \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5, \tau = 2$	76
3.53 แผนภาพโพลของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 2.3599, \tau = 2$	76
3.54 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุม และพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 2.3599, \tau = 2$	77
3.55 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 2.3599, \tau = 2$	77
3.56 แผนภาพโพลของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 5.4165, \tau = 2$	79
3.57 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ป ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 5.4165, \tau = 2$	80
3.58 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุม และพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 5.4165, \tau = 2$	80
3.59 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 5.4165, \tau = 2$	81
3.60 แผนภาพโพลของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/3] $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 4, \gamma_5 = 0.7708, \tau = 2$	83
3.61 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/3] ต่ออินพุทแบบสเต็ป ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 4, \gamma_5 = 0.7708, \tau = 2$	84
3.62 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/3] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุม และพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 4, \gamma_5 = 0.7708, \tau = 2$	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
3.63 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/3] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 4, \gamma_5 = 0.7708, \tau = 2$	85
3.64 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [3/3] $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 2$	87
3.65 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [3/3] ต่ออินพุทแบบสเต็ป ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 2$	88
3.66 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [3/3] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุม และพลาเน็ต ; $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 2$	88
3.67 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [3/3] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 2$	89
3.68 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง	92
3.69 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง	93
3.70 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/3] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง	93
3.71 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [3/3] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง	94
3.72 แสดงแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบต่าง ๆ	94

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบต่าง ๆ สำหรับพลาเน็ตอันดับ 2 แบบชนิด 1	48
2. แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID และ [2/2] เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีเสถียรภาพสำหรับพลาเน็ตอันดับ 3 แบบชนิด 0	68
3. แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบต่าง ๆ สำหรับพลาเน็ตอันดับ 3 แบบชนิด 1	90



## บทที่ 1

### บทนำ

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ( coefficient diagram method ) หรือ CDM<sup>[1],[2],[3],[4]</sup> จัดว่าเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการออกแบบตัวควบคุม เพื่อให้ได้ข้อกำหนดตามต้องการ ผู้ออกแบบสามารถออกแบบตัวควบคุม ( controller ) และสมการคุณลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ( closed-loop transfer function ) โดยพิจารณาถึงเสถียรภาพ ( stability ) ผลตอบสนองของระบบ ( system response ) และความคงทน ( robustness ) ของระบบจากตัวรบกวนภายนอกไปพร้อม ๆ กันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบระบบควบคุมด้วย CDM เป็นวิธี inward approach คือการกำหนดสมรรถนะ ( performance ) ของระบบรวม ( overall system ) ที่ต้องการก่อน และคำนวณตัวชดเชยให้ได้ระบบตามต้องการและสามารถใช้ในการออกแบบตัวควบคุมที่มีอันดับสูง ๆ ได้

#### 1.1 วิธีการออกแบบตัวควบคุมทั่วไป

เมื่อได้กำหนดเงื่อนไขการทำงานของระบบควบคุมตามที่ต้องการ จากพลานต์ ( plant ) ที่มีอยู่เดิม จึงต้องมีการออกแบบตัวควบคุมที่สามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวได้และได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบเป็นไปตามที่ต้องการ สามารถออกแบบระบบได้ดังนี้

**วิธีที่ 1. Open-Loop Approach** ใช้ออกแบบใน Classical Control โดยขั้นแรกจะสมมติตัวควบคุมตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นมาก่อน และหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบกับตัวควบคุม และนำฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดที่ได้มาตรวจสอบว่าได้ค่าต่าง ๆ ตรงตามเงื่อนไขที่ต้องการหรือไม่ หากค่าที่ได้ไม่เป็นที่พอใจ ต้องกลับไปเปลี่ยนตัวควบคุมให้มีค่าใหม่และทำซ้ำขั้นตอนเดิม ( iteration ) จนกว่าจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดที่มีคุณสมบัติตามต้องการ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าวิธี outward approach

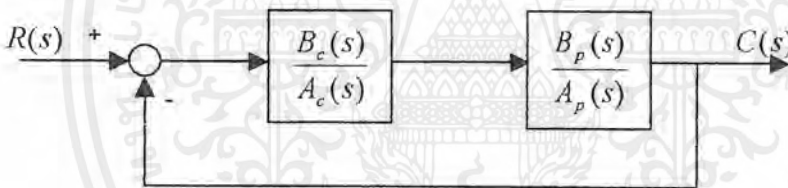
**วิธีที่ 2. Closed-Loop Approach** นิยมใช้ออกแบบใน Modern Control โดยขั้นแรกจะนำเงื่อนไขที่กำหนดต่าง ๆ มาคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดก่อน และหาตัวควบคุมจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ตรวจสอบตัวควบคุมที่ได้ว่าทำงานภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ต้องกลับไปแก้ไขที่ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดใหม่ และหาตัวควบคุม ทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนได้ตัวควบคุมที่พอใจ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าวิธี inward approach

**วิธีที่ 3. Simultaneous Approach** วิธีนี้จะกำหนดค่าของพารามิเตอร์บางค่าในฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด และตัวควบคุมก่อน จากนั้นค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ จะหาได้จากขั้นตอนการออกแบบไปพร้อม ๆ กันทั้งค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและตัวควบคุม ซึ่งคือการออกแบบด้วย CDM

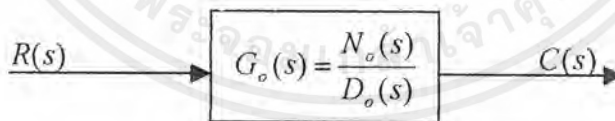
ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตามที่กำหนด สามารถแสดงด้วย 2 พารามิเตอร์ คือ ค่าดัชนีเสถียรภาพ (stability index)  $\gamma_i$  และค่าคงตัวเวลาสมมูล (equivalent time constant)  $\tau$  พารามิเตอร์ทั้ง 2 นี้ จะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด และยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของตัวควบคุมอีกด้วย ซึ่งถือเป็นจุดเด่นของการออกแบบด้วย CDM

## 1.2 การวางโพล

โพลจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมการคุณลักษณะ ปัญหาในการวางโพล ถือเป็นส่วนที่สำคัญของ CDM



รูปที่ 1.1 ระบบควบคุมทั่วไป



รูปที่ 1.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนรวม

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนรวม  $G_o(s) = N_o(s)/D_o(s)$  โพลิโนเมียลตัวส่วน  $D_o(s)$  คือ สมการคุณลักษณะ หรือ เรียกว่า สมการ Diophantine ดังสมการ

$$D_o(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \quad (1.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสัมประสิทธิ์ของ  $D_o(s)$  คือผลรวมเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์ที่เป็นค่าคงที่ของพหุนาม  $B_p(s), A_p(s)$  กับสัมประสิทธิ์ของตัวไม่ทราบค่าของตัวควบคุม  $B_c(s), A_c(s)$  และจากค่าสัมประสิทธิ์ของ  $D_o(s)$  ที่ได้จาก CDM จะมีวิธีหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเหมือนกับการแก้สมการหาค่าชุดคำตอบของระบบสมการเชิงเส้น

### 1.3 วิธีพีชคณิตเชิงเส้น

ระบบสมการ simultaneous สามารถแสดงในรูปเมทริกซ์ได้ จากสมการ (1.1) จะสมมติให้โพลีโนเมียลแต่ละตัวมีรูปแบบดังนี้

$$A_p(s) = A_0 + A_1s + A_2s^2 + \dots + A_n s^n \quad (1.2)$$

$$B_p(s) = B_0 + B_1s + B_2s^2 + \dots + B_n s^n \quad (1.3)$$

$$A_c(s) = C_0 + C_1s + C_2s^2 + \dots + C_m s^m \quad (1.4)$$

$$B_c(s) = D_0 + D_1s + D_2s^2 + \dots + D_m s^m \quad (1.5)$$

$$D_o(s) = P(s) = a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_{n+m} s^{n+m} \quad (1.6)$$

เมื่อ  $n$  คือ อันดับของพหุนาม และ  $m$  คือ อันดับของตัวควบคุม จากสมการข้างต้นจะได้สมการ Diophantine ดังนี้

$$D_o(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \quad (1.7)$$

$$= (C_0 + C_1s + \dots + C_m s^m) \times (A_0 + A_1s + \dots + A_n s^n) + (D_0 + D_1s + \dots + D_m s^m) \times (B_0 + B_1s + \dots + B_n s^n) \quad (1.8)$$

$$= A_p(s)C_0 + A_p(s)C_1s + \dots + A_p(s)C_m s^m + B_p(s)D_0 + B_p(s)D_1s + \dots + B_p(s)D_m s^m \quad (1.9)$$

จากสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (1.6) และ (1.9) จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของสมการ Diophantine ได้ตามตารางด้านล่าง



เมตริกซ์  $S$  เรียกว่า Sylvester matrix ,  $P$  คือ เวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ของโพลิโนเมียลคุณลักษณะ และ  $X$  คือ เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ไม่ทราบค่า ( $A_c(s), B_c(s)$ ) ในเนื้อความของ CDM  $P$  เป็นฟังก์ชันของ  $\gamma_i$  และ  $z$  ซึ่งถูกกำหนดโดยผู้ออกแบบ โดยการหาค่า  $\gamma_i$  และ  $z$  นี้จะได้กล่าวถึงในบทที่ 2 ดังนั้นจะได้เมตริกซ์  $S$  เป็นค่าคงที่

#### 1.4 การหาคำตอบของสมการ Diophantine

วิธีที่ชคณิตเชิงเส้นจะมีสมการ Diophantine ซึ่งเป็นสมการแทนระบบที่มีความสัมพันธ์กับ Sylvester matrix ซึ่งจะสามารถหาคำตอบของสมการได้เมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

ขั้นแรกพหุนามโพลิโนเมียลจะต้องเป็น coprime คือ ทั้ง  $B_p(s)$  และ  $A_p(s)$  จะต้องไม่มี common factor ในกรณีที่มี common factor เกิดขึ้น สมมติเป็น  $F(s)$  แล้วรากของสมการที่เกิดจาก  $F(s)$  จะไปปรากฏเป็นรากของของสมการ Diophantine ด้วย ดังตัวอย่าง

$$B_p(s) = F(s)\overline{B_p(s)} \quad (1.10)$$

$$A_p(s) = F(s)\overline{A_p(s)} \quad (1.11)$$

$$D_o(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \quad (1.12)$$

$$= F(s)(A_c(s)\overline{A_p(s)} + B_c(s)\overline{B_p(s)}) \quad (1.13)$$

ดังนั้น ระบบจะมีรากของ  $F(s)$  เสมือนเป็นโพลของระบบด้วย เมื่อมองในแง่ของ state space จะเห็นว่า ความเป็น coprime ของพหุนามจะมีความหมายเหมือนกันกับความสามารถควบคุมได้ (controllability) และความสามารถในการสังเกตได้ (observability) ของระบบ นอกจากนี้ ความเป็น coprime ของ  $B_p(s)$  และ  $A_p(s)$  จะเป็นการรับรองว่า Sylvester matrix เป็น nonsingular ดังนั้น ถ้า Sylvester matrix เป็น nonsingular และเป็นเมตริกซ์จัตุรัสแล้ว พารามิเตอร์ของตัวควบคุมสามารถคำนวณได้จาก

$$X = S^{-1} \times P$$

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของการออกแบบตัวควบคุมโดย CDM

#### 2.1 การออกแบบตัวควบคุมโดย CDM

การออกแบบตัวควบคุมโดย CDM เป็นการออกแบบตัวควบคุมจากสมการคุณลักษณะ โดยพิจารณาค่าเวลาเข้าที่ (settling time) ซึ่งเป็นสมรรถนะของระบบที่กำหนดให้ และอันดับของตัวควบคุมควรจะน้อยกว่าพลาเน็ต ซึ่งจะทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด  $G_c(s)G_p(s)$  มีโพลมากกว่าซีโร (strictly proper) ในการออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM นั้น ต้องทำการแปลงโครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 2.1 ให้อยู่ในรูปโครงสร้าง CDM มาตรฐานตามรูปที่ 2.2 โดยแยกตัวเศษและตัวส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมและพลาเน็ตออกจากกัน ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ดังนี้

$$G_c(s) = \frac{B_c(s)}{A_c(s)} = \frac{k_\lambda s^\lambda + k_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + k_0}{l_\lambda s^\lambda + l_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + l_0} \quad (2.1)$$

$$G_p(s) = \frac{B_p(s)}{A_p(s)} = \frac{q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_0}{p_k s^k + p_{k-1} s^{k-1} + \dots + p_0} \quad (2.2)$$

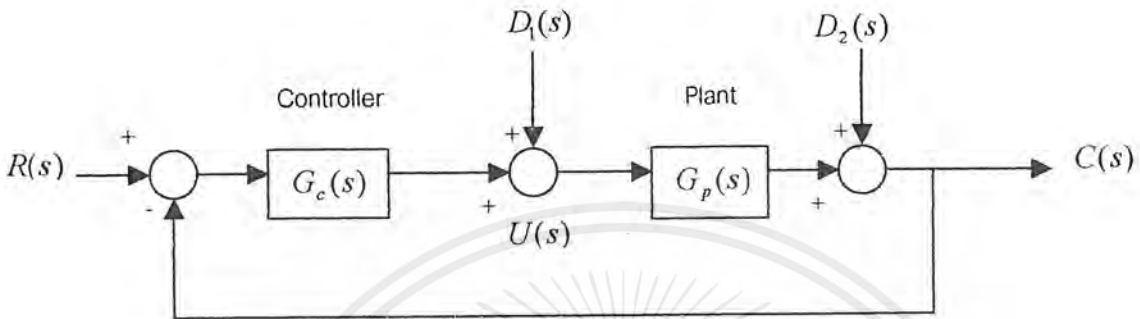
โดยที่  $\lambda < k$  และ  $m < k$  ดังนั้นจะเขียนสมการคุณลักษณะจากโครงสร้างของ CDM มาตรฐานได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) = 0 \\ &= a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \\ &= \sum_{i=0}^n a_i s^i \end{aligned} \quad (2.3)$$

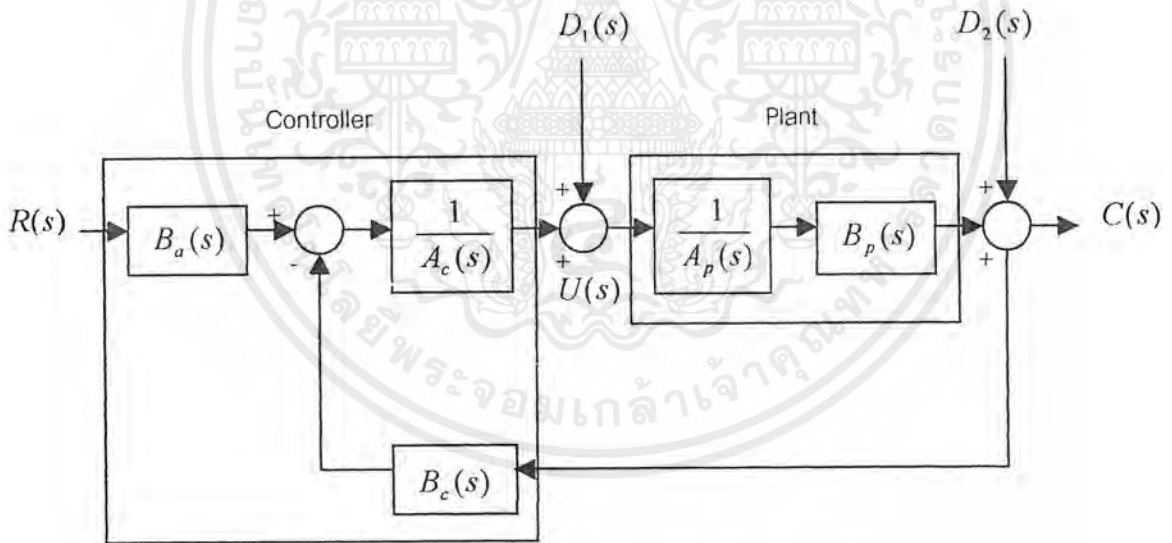
โดยที่  $a_0, a_1, \dots, a_n$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะและเป็นค่าที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM

ค่า  $B_a(s)$  เป็นพรีฟิลเตอร์ (prefilter) ของระบบควบคุม ที่ทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady-state error) ถ้า  $B_a(s)$  มีค่าเท่ากับ  $k_0$  จะทำให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีค่าพุ่งเกิน (overshoot) แต่ค่าช่วงเวลาขึ้น (rise time) จะช้า

และถ้า  $B_a(s)$  มีค่าเท่ากับตัวเศษของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม  $B_c(s)$  จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน แต่ค่าช่วงเวลายื่นจะน้อยลง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบควบคุมทั่วไป



รูปที่ 2.2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน

## 2.2 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ( Mathematical Relations )

ในการออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบจะประกอบไปด้วย ค่าดัชนีเสถียรภาพ  $\gamma$ , และค่าคงตัวเวลาสมมูล  $\tau$  ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโพลีโนเมียลคุณลักษณะ กล่าวคือสามารถหาโพลีโนเมียลคุณลักษณะได้เมื่อทราบค่าของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\gamma_i$  และ  $\tau$  และสามารถหาค่า  $\gamma_i$  และ  $\tau$  ได้จากโพลิโนเมียลคุณลักษณะ ซึ่งสมการที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ ได้แก่ สูตรการสังเคราะห์ของ CDM ( CDM synthesis formula ) และ สูตรการแยกส่วนของ CDM ( CDM decomposition formula ) ตามลำดับ

### 2.2.1 สูตรการสังเคราะห์ของ CDM

สูตรการสังเคราะห์ของ CDM ใช้ในการคำนวณหาโพลิโนเมียลคุณลักษณะ  $P(s)$  จากค่าดัชนีเสถียรภาพ  $\gamma_i$  และค่าคงตัวเวลาสมมูล  $\tau$  ที่เลือกโดยผู้ออกแบบ สูตรการสังเคราะห์มีดังนี้

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (2.4)$$

$$a_1 = a_0 \tau \quad (2.5)$$

$$a_i = \frac{a_0 \tau^i}{\gamma_{i-1} \gamma_{i-2} \dots \gamma_1} \quad \text{โดยที่ } i = 2 \dots n \quad (2.6)$$

เมื่อ  $a_i$  คือค่าสัมประสิทธิ์ที่สัมพันธ์กับเทอม  $s^i$  ของโพลิโนเมียลคุณลักษณะ  $P(s)$  และ  $n$  คืออันดับของ  $P(s)$

### 2.2.2 สูตรการแยกส่วนของ CDM

สูตรการแยกส่วนของ CDM ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีเสถียรภาพ  $\gamma_i$  และค่าคงตัวเวลาสมมูล  $\tau$  จากโพลิโนเมียลคุณลักษณะ  $P(s)$  ที่กำหนด สูตรการแยกส่วนมีดังนี้

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1} a_{i-1}} \quad \text{โดยที่ } i = 1 \dots (n-1) \quad (2.7)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (2.8)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} \quad \text{โดยที่ } \gamma_0 = \gamma_n = \infty \quad (2.9)$$

ค่า  $\gamma_i^*$  คือค่าจำกัดเสถียรภาพ

จากสมการที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะสามารถเขียนโพลิโนเมียลคุณลักษณะในเทอมของ  $a_0$ ,  $\tau$  และ  $\gamma_i$  ได้ดังสมการ (2.10)

$$P(s) = a_0 \left[ \left\{ \sum_{i=2}^n \left( \prod_{j=1}^{i-1} 1/\gamma_{i-j} \right) (\tau s^i) \right\} + \tau s + 1 \right] \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 เงื่อนไขเสถียรภาพสำหรับ CDM

สำหรับ CDM การพิจารณาในเรื่องของเสถียรภาพจะใช้เงื่อนไขความพอเพียงสำหรับเสถียรภาพของลีพาทอฟ (Lipatov's sufficient condition for stability) โดยลีพาทอฟกล่าวไว้ว่าวิธีที่ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของระบบต่าง ๆ เช่น ทฤษฎีของเฮอริวิทซ์ (Hurwitz criterion) นั้นค่อนข้างยุ่งยากและไม่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบควบคุมอันดับสูง ๆ เงื่อนไขเสถียรภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานควรตรวจสอบได้ง่าย และใช้วิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน

ลีพาทอฟได้เสนอว่า ระบบอันดับที่  $n$  ที่มีจำนวนพารามิเตอร์  $n$  ตัว ขอบเขตเสถียรภาพที่แท้จริง (exact stability region) สามารถอนุมานให้อยู่ในรูปเชิงซ้อนที่มี  $n$  มิติ ( $n$ -dimensional space) แต่ขอบเขตเสถียรภาพที่พอเพียง (sufficient stability region) จะเป็นส่วนย่อยของขอบเขตเสถียรภาพที่แท้จริง ดังนั้นระบบใด ๆ อาจมีเสถียรภาพแม้ว่าเงื่อนไขเสถียรภาพที่พอเพียงจะไม่น่าพอใจก็ตาม ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่าเงื่อนไขเสถียรภาพของลีพาทอฟเป็นเงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับความพอเพียง

จากทฤษฎีตรวจสอบเสถียรภาพของเรท์-เฮอริวิทซ์ (Routh-Hurwitz stability criterion) ระบบอันดับ 3 จะเสถียรก็ต่อเมื่อ

$$a_2 a_1 > a_3 a_0 \quad (2.11)$$

ซึ่งสามารถเขียนในเทอมของดัชนีเสถียรภาพได้คือ

$$\gamma_2 \gamma_1 > 1 \quad (2.12)$$

ระบบอันดับ 4 จะเสถียรก็ต่อเมื่อเงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริง

$$a_2 > (a_1 / a_3) a_4 + (a_3 / a_1) a_0 \quad (2.13)$$

จัดรูปสมการ (2.13) ให้อยู่ในเทอมของดัชนีเสถียรภาพและค่าเสถียรภาพจำกัด

$$\gamma_2 > \gamma_2^* \quad (2.14)$$

สำหรับระบบอันดับ 5 และอันดับที่สูงขึ้นไป ลีพาทอฟได้เสนอเงื่อนไขพอเพียงสำหรับความมีเสถียรภาพและความไม่มีเสถียรภาพของระบบไว้ในหลายรูปแบบ ทฤษฎีที่เหมาะสมกับการออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM กล่าวไว้ว่า

“ ระบบจะเสถียรก็ต่อเมื่อโพลิโนเมียลย่อยอันดับ 4 ทุกชุดของระบบมีเสถียรภาพด้วยตัวคุณขนาด 1.12 และระบบจะไม่เสถียรก็ต่อเมื่อมีระบบย่อยอันดับ 3 บางชุดของระบบไม่มีเสถียรภาพ ”

จากทฤษฎีข้างต้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎี 1 เงื่อนไขพอเพียงเพื่อการตรวจสอบความมีเสถียรภาพสำหรับระบบใด ๆ ที่มีโพลีโนเมียล  
คุณลักษณะดังสมการ (2.4)

$$a_i > 1.12 \left[ \frac{a_{i-1}}{a_{i+1}} a_{i+2} + \frac{a_{i+1}}{a_{i-1}} a_{i-2} \right] \quad (2.15)$$

$$\gamma_i > 1.12 \gamma_i^* \quad \text{สำหรับทุก ๆ ค่าของ } i=2 \dots (n-2) \quad (2.16)$$

ทฤษฎี 2 เงื่อนไขพอเพียงเพื่อการตรวจสอบความไม่มีเสถียรภาพสำหรับระบบใด ๆ ที่มีโพลีโน  
เมียลคุณลักษณะดังสมการ (2.4)

$$a_{i+1} a_i \leq a_{i+2} a_{i-1} \quad (2.17)$$

$$\gamma_{i+1} \gamma_i \leq 1 \quad \text{สำหรับบางค่าของ } i=1 \dots (n-2) \quad (2.18)$$

สังเกตว่าทฤษฎีข้างต้นทั้ง 2 ทฤษฎีนั้นไม่ขึ้นกับค่าคงตัวเวลาสมมูล และระบบจะเสถียร  
อย่างแน่นอนสำหรับระบบที่เป็นจริงตามทฤษฎีทั้งสอง

ตัวอย่างที่ 2.1 กำหนด  $P(s) = s^6 + 4s^5 + 3s^4 + 2s^3 + s^2 + 4s + 4$  ทำการตรวจสอบ  
เสถียรภาพของระบบ ขั้นตอนแรกทำการตรวจสอบว่าระบบเสถียรหรือไม่ด้วยทฤษฎี 2 จาก  
สมการ (2.18)

$$\gamma_{i+1} \gamma_i \leq 1 \quad \text{เมื่อ } i=1 \dots 4$$

ค่า  $\gamma_i$  หาได้จากสมการ (2.7)

$$\gamma_i = [\gamma_5 \ \gamma_4 \ \gamma_3 \ \gamma_2 \ \gamma_1] = [5.333 \ 1.125 \ 1.333 \ 0.125 \ 4]$$

พบว่า  $\gamma_3 \gamma_2 < 1$  และ  $\gamma_2 \gamma_1 < 1$  แสดงว่าระบบนี้ไม่มีเสถียรภาพ โดยไม่ต้องตรวจสอบเงื่อนไข  
พอเพียงสำหรับความมีเสถียรภาพตามทฤษฎี 1 อีก ต่อไปหารากของระบบ

ค่ารากของ  $P(s) = s^6 + 4s^5 + 3s^4 + 2s^3 + s^2 + 4s + 4$  คือ  $-3.2644$ ,  $-0.8858$ ,  
 $-0.6046 \pm 0.9935i$ ,  $0.6797 \pm 0.7488i$  มีค่ารากที่เป็นบวก 2 ค่า แสดงว่าระบบไม่เสถียร เป็น  
จริงตามทฤษฎี 2

ตัวอย่างที่ 2.2 กำหนด  $P(s) = s^5 + 5s^4 + 11s^3 + 23s^2 + 28s + 12$  หาค่า  $\gamma_i$

$$\gamma_i = [\gamma_4 \ \gamma_3 \ \gamma_2 \ \gamma_1] = [2.723 \ 1.052 \ 1.718 \ 2.841]$$

จากค่า  $\gamma_i$  ที่คำนวณได้พบว่าไม่มีค่าใด ๆ ที่ทำให้สมการ (2.18) เป็นจริง แต่ยังไม่ได้แสดงว่า  
ระบบนี้มีเสถียรภาพ ต้องทำการตรวจสอบต่อไปด้วยทฤษฎี 1

หาค่า  $\gamma_i^*$  จะได้

$$\gamma_i^* = [\gamma_4^* \ \gamma_3^* \ \gamma_2^* \ \gamma_1^*] = [0.951 \ 0.949 \ 1.303 \ 0.582]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า  $\gamma_3 < 1.12\gamma_3^*$  จึงสรุปได้ว่าระบบนี้ไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากค่ารากของระบบ

รากของ  $P(s) = s^5 + 5s^4 + 11s^3 + 23s^2 + 28s + 12$  คือ  $-3, -1, -1, \pm 2i$  ระบบนี้ไม่มีรากที่เป็นบวก แต่มีค่ารากที่อยู่บนแกนจินตภาพ คือ  $\pm 2i$  หมายความว่าระบบนี้มีเสถียรภาพแบบวิกฤต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ระบบอาจจะเปลี่ยนเป็นระบบที่ไม่เสถียรหรือยังอาจจะเสถียรอยู่ก็ได้ จึงอาจกล่าวได้ว่าระบบนี้ไม่มีเสถียรภาพในแง่ของ CDM

ตัวอย่างทั้ง 2 ที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าระบบใด ๆ สามารถตรวจสอบเสถียรภาพได้ด้วยเงื่อนไขความพอเพียงทั้ง 2 ทฤษฎีที่กล่าวข้างต้นสะดวกและรวดเร็วกว่าการตรวจสอบเสถียรภาพด้วยวิธีของราท-เฮอริวิทซ์ จากสมการที่ (2.9) และ (2.16) จะได้ว่าเมื่อค่า  $\gamma_i$  ทุกตัวมีค่ามากกว่า 1.5 ระบบจะเสถียร และเมื่อค่า  $\gamma_i$  มีค่ามากกว่า 4 ทุกตัวจะทำให้ค่ารากของระบบเป็นจำนวนจริงลบทั้งหมด ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการของระบบเนื่องจากทำให้ปรับค่าสมรรถนะตามที่ต้องการได้ยาก ฉะนั้นการเลือกค่า  $\gamma_i$  ควรให้มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 - 4

## 2.4 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram)

แผนผังค่าสัมประสิทธิ์เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการออกแบบด้วย CDM ประกอบไปด้วยกราฟ 3 รูปคือ

- 1.) กราฟที่พล็อตจากค่าสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะบนสเกลลอการิทึม
- 2.) กราฟที่พล็อตจากค่าดัชนีเสถียรภาพ
- 3.) กราฟที่พล็อตจากค่าจำกัดเสถียรภาพ

รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของระบบอันดับ 5 ค่าพารามิเตอร์  $\gamma_i$  และ  $\tau$  ได้กำหนดไว้ด้านล่างนี้ สมการคุณลักษณะจะถูกคำนวณด้วยสูตรการสังเคราะห์ของ CDM ตามสมการ (2.5) และ (2.6) ค่าจำกัดเสถียรภาพ  $\gamma_i^*$  คำนวณจากสมการ (2.9)

$$\gamma = [\gamma_4 \ \gamma_3 \ \gamma_2 \ \gamma_1] = [2 \ 2 \ 2 \ 2.5] \quad (2.19)$$

$$\tau = 5 \quad (2.20)$$

$$\gamma^* = [\gamma_4^* \ \gamma_3^* \ \gamma_2^* \ \gamma_1^*] = [0.5 \ 1 \ 0.9 \ 0.5] \quad (2.21)$$

$$P(s) = 1.25s^5 + 5s^4 + 10s^3 + 10s^2 + 5s + 1 \quad (2.22)$$

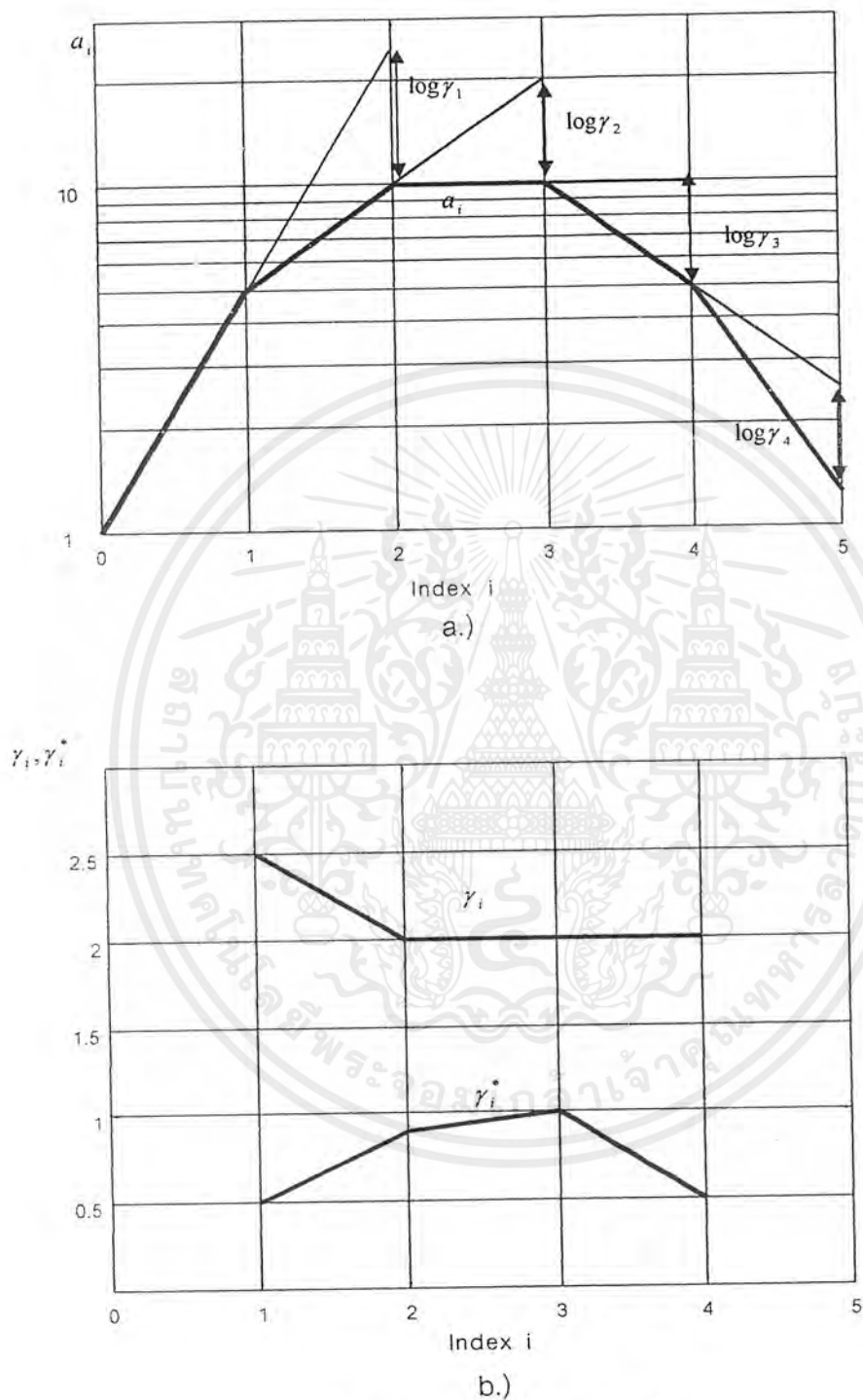
จากการพล็อตค่าดัชนีเสถียรภาพ  $\gamma_i$  เทียบกับค่าจำกัดเสถียรภาพ  $\gamma_i^*$  ในรูป 2.3b ทำให้ทราบถึงความคงทน (robustness) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ เงื่อนไขเสถียรภาพทำให้มั่นใจได้ว่าเสถียรภาพของระบบรวมจะเป็นที่น่าพอใจเมื่อ  $\gamma_i > 1.12\gamma_i^*$  เนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากดัชนีเสถียรภาพเป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะ ระยะห่างระหว่าง  $\gamma_i$  และ  $\gamma_i^*$  จึงเป็นตัวแสดงให้เห็นถึงระดับของความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ของระบบ ดังนั้นถ้าระยะห่างระหว่าง  $\gamma_i$  และ  $\gamma_i^*$  มีค่ามากขึ้น ระบบจะทนกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ได้มากกว่า

สามารถหาค่าดัชนีเสถียรภาพได้อีกวิธีหนึ่งคือดูจากแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ โดยการต่อเส้นเชื่อมระหว่างจุดดังแสดงในรูปที่ 2.3a ดังนั้นระบบที่มีความคงทนมากกว่า จะเป็นผลให้เส้นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์มีความโค้งมากขึ้น

เส้นกราฟค่าสัมประสิทธิ์ที่มีความโค้งมากขึ้นจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $\gamma_i$  ที่เพิ่มมากขึ้น และจะมีเสถียรภาพลดลงเมื่อความโค้งของเส้นกราฟลดลง ดังรูปที่ 2.4a และถ้าเส้นกราฟมีความลาดเอียงทางขวามากขึ้น ค่าคงตัวเวลาสมมูล  $\tau$  จะมีค่าลดลงซึ่งผลตอบสนองของระบบจะเร็วขึ้น ในทางกลับกันถ้าเส้นกราฟมีความลาดเอียงน้อยจะทำให้ค่า  $\tau$  มากขึ้น ความเร็วของผลตอบสนองจะลดลง ดังรูปที่ 2.4b ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาสมรรถนะของระบบควบคุมได้จากกราฟค่าสัมประสิทธิ์

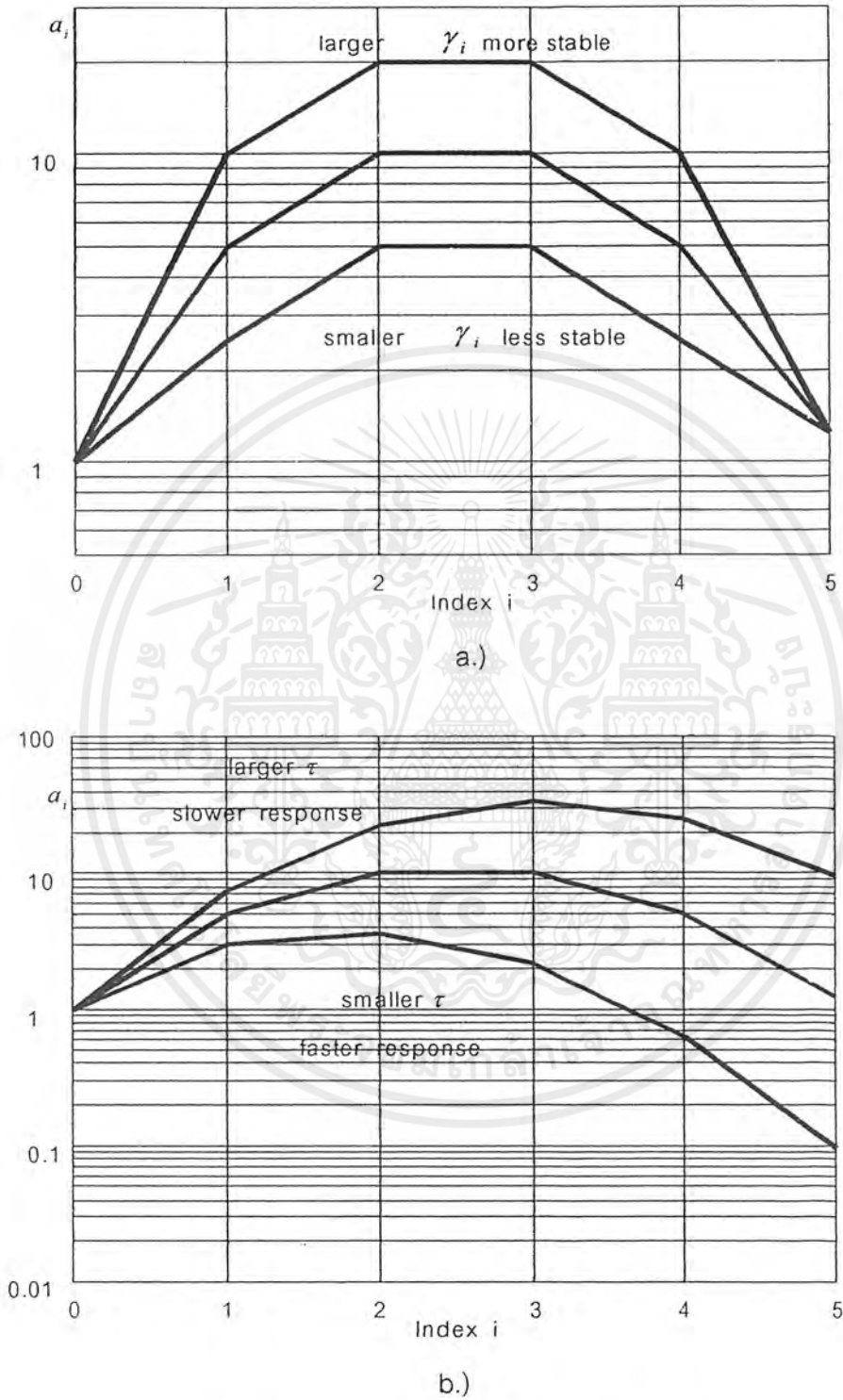


รูปที่ 2.3 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

a.) กราฟค่าสัมประสิทธิ์

b.) กราฟค่าดัชนีเสถียรภาพ  $\gamma_i$  และค่าจำกัดเสถียรภาพ  $\gamma_i^*$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

a.) ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเนื่องจากค่า  $\gamma_i$

b.) ผลกระทบต่อความเร็วของผลตอบสนองของระบบเนื่องจากค่า  $\tau$

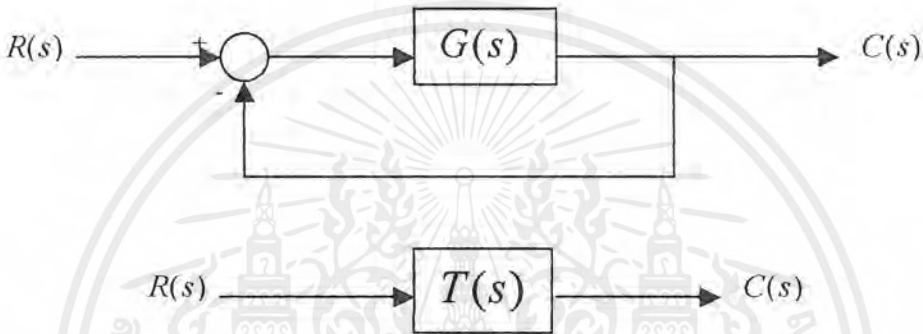
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 Canonical Open-loop Transfer Function

สำหรับโพลีโนเมียลคุณลักษณะที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด  $T(s)$  ดังสมการ (2.23)

$$T(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2.23)$$

Canonical Open-loop Transfer Function สำหรับ  $T(s)$  จะแทนด้วยสัญลักษณ์  $G(s)$  ซึ่งมีโครงสร้างจะอยู่ในรูปของระบบป้อนกลับหมดดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดง Canonical Open-loop Transfer Function  $G(s)$  และ Canonical Closed-loop Transfer Function  $T(s)$

เมื่อ

$$G(s) = \frac{Q(s)}{[P(s) - Q(s)]} = \frac{\sum_{i=0}^m b_i s^i}{[\sum_{i=m+1}^n a_i s^i + \sum_{i=0}^m (a_i - b_i) s^i]} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $b_i = a_i$  สำหรับ  $i = 0 \sim k$  จะกล่าวได้ว่าระบบมีแบบชนิด  $(k+1)$  และจะเรียก  $G(s)$  ว่าเป็น Canonical open-loop transfer function แบบชนิด  $(k+1)$  ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะ  $P(s)$  ก็ต่อเมื่อ  $b_i = 0$  สำหรับ  $i = (k+1) \sim m$  ด้วย ดังนั้น  $G(s)$  และ  $T(s)$  แบบชนิด 1 ของระบบ คือ

$$G_1(s) = \frac{a_0}{(a_n s^n + \dots + a_1 s)} \quad (2.25)$$

$$T_1(s) = \frac{a_0}{(a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0)} \quad (2.26)$$

Canonical open-loop transfer function แบบชนิด 2 ของระบบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_2(s) = \frac{(a_1s + a_0)}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2)} \quad (2.27)$$

$$T_2(s) = \frac{(a_1s + a_0)}{(a_n s^n + \dots + a_1s + a_0)} \quad (2.28)$$

กรณีเป็นแบบชนิดอื่น ๆ ก็สามารถแสดงได้โดยการแทนค่าในสมการ (2.24)

## 2.6 รูปแบบมาตรฐานของ CDM ( CDM standard form )

รูปแบบมาตรฐานของการออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM เป็นการกำหนดค่าดัชนีเสถียรภาพให้มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการเริ่มต้นออกแบบตัวควบคุมแบบใด ๆ

ค่า  $\gamma_i$  มาตรฐาน คือ

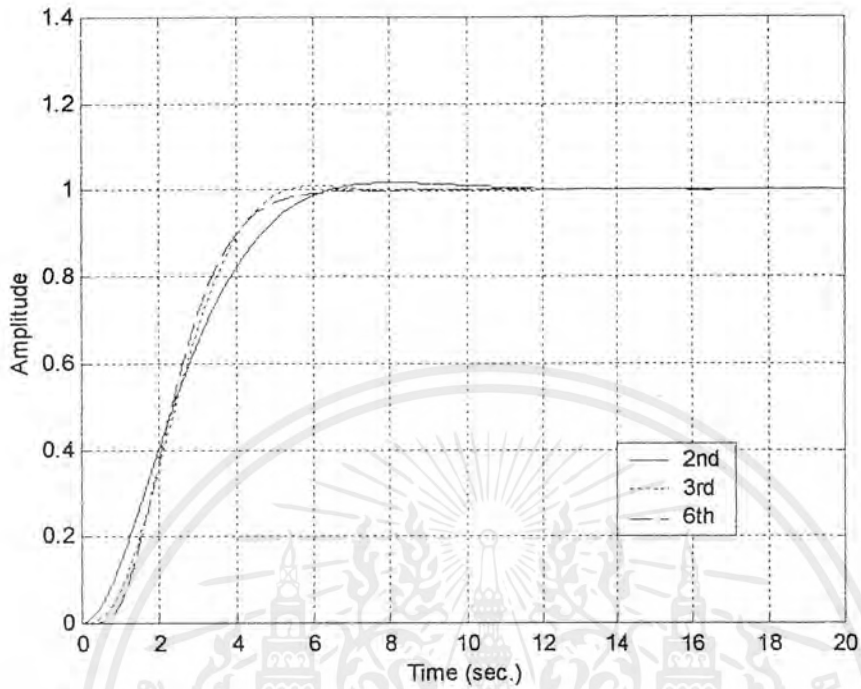
$$\gamma_{n-1} \sim \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5 \quad (2.29)$$

ค่า  $\gamma_i$  มาตรฐานนี้เป็นค่าที่กำหนดจากผู้คิดค้นทฤษฎี CDM ( S.manabe ) ซึ่งได้จากการประกอบการออกแบบตัวควบคุม โดยมีพื้นฐานจากทฤษฎีต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ค่ามาตรฐานนี้จะได้ระบบที่มีสมรรถนะที่ดี

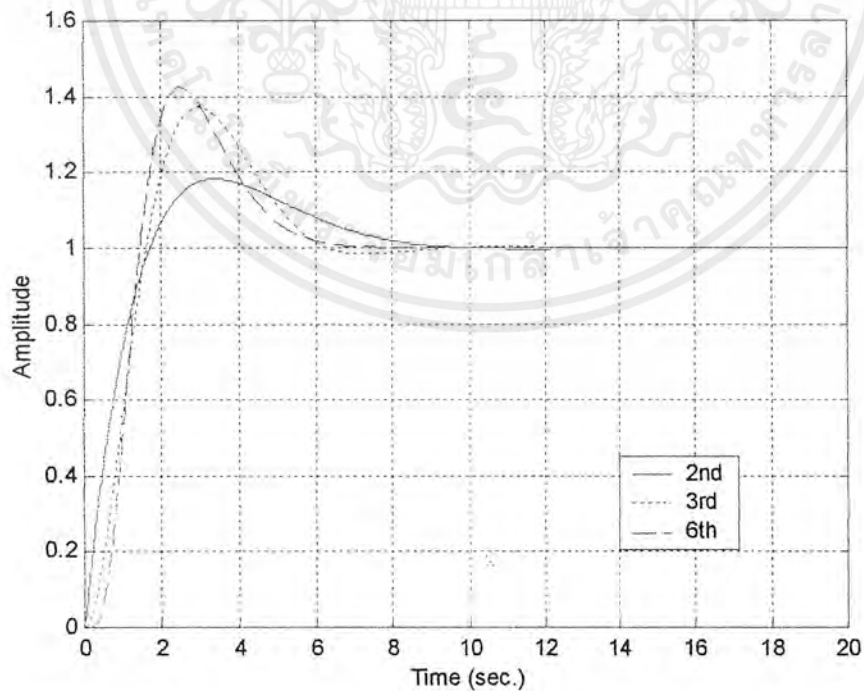
ทำการกำหนดค่า  $a_0 = 0.4$  และ  $\tau = 2.5$  และกำหนดค่า  $\gamma_i$  มาตรฐาน จะได้โพลีโนเมียลคุณลักษณะดังสมการที่ (2.24)

$$P(s) = 2 \frac{(n-2)(n-1)}{2} s^n + \dots + 2^{-10} s^6 + 2^{-6} s^5 + 2^{-3} s^4 + 0.5s^3 + s^2 + s + 0.4 \quad (2.30)$$

ผลตอบสนองต่ออินพุทแบบสเต็ปของ Canonical closed-loop transfer function สำหรับระบบ canonical แบบชนิด 1 และ แบบชนิด 2 ที่มีโพลีโนเมียลคุณลักษณะอันดับต่าง ๆ กัน แสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ

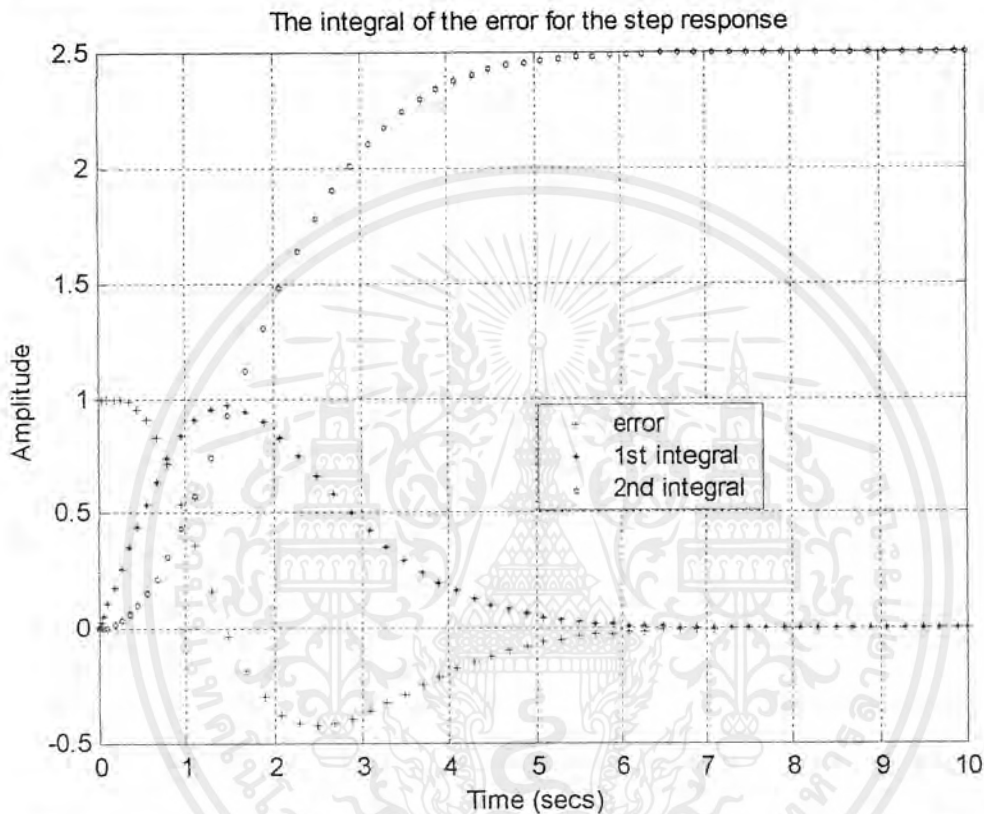


รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบสเต็ปของระบบ Canonical แบบชนิด 1



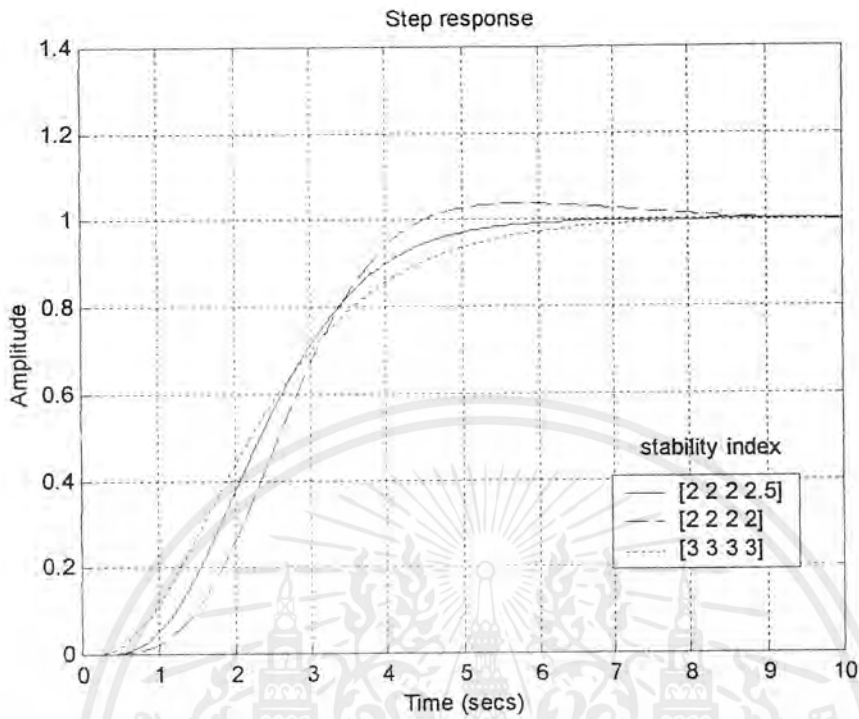
รูปที่ 2.7 ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบสเต็ปของระบบ Canonical แบบชนิด 2

ระบบ canonical แบบชนิด 1 จะไม่มีค่าพุ่งเกินเกิดขึ้นไม่ว่าระบบจะมีอันดับเท่าไรก็ตาม แต่ระบบ canonical แบบชนิด 2 จะเกิดค่าพุ่งเกินขึ้นประมาณ 40 % ค่าพุ่งเกินนี้มีความจำเป็น เนื่องจากมีผลให้ค่าอินทิกรัลของค่าสัญญาณค่าผิดพลาดลู่เข้า (convergence) ดังรูปที่ 2.8 ทั้งนี้เพราะระบบ canonical แบบชนิด 2 มีคุณสมบัติเหมือนอินทิเกรเตอร์ 2 ตัวต่ออนุกรมกัน



รูปที่ 2.8 แสดงค่าอินทิกรัลของสัญญาณค่าผิดพลาดของระบบ canonical แบบชนิด 2

ค่า  $\gamma_i$  มาตรฐานถือว่าเป็นค่าที่สมควรใช้ในการเริ่มต้นออกแบบตัวควบคุม เนื่องจากค่าเวลาเข้าที่มีค่าประมาณ  $2.5 \sim 3\tau$  ซึ่งถือว่าเร็วพอสมควร และเป็นค่าที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบโดยใช้ค่า  $\gamma_i$  ค่าอื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.9



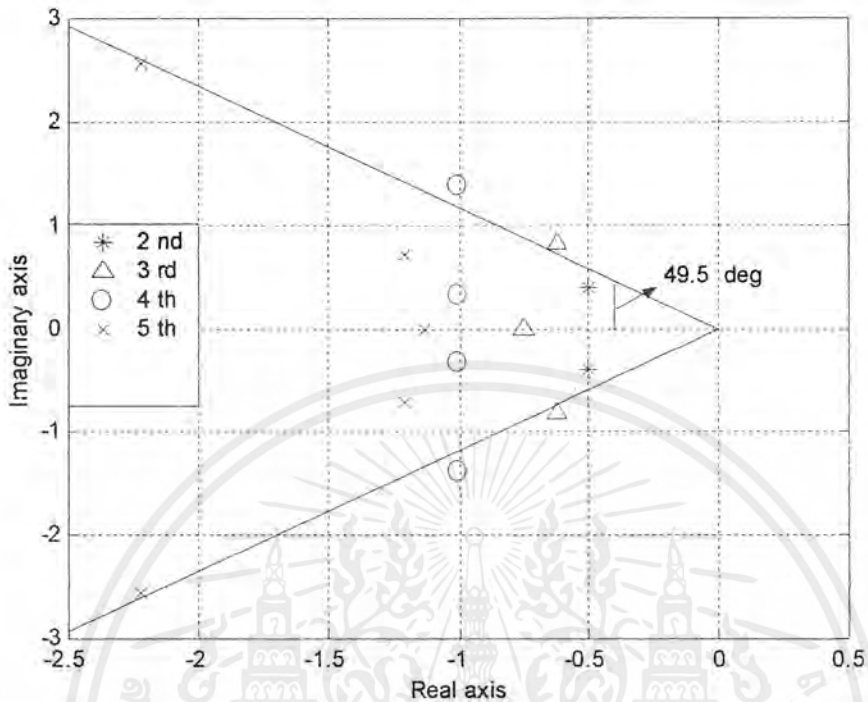
รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบเวลาเข้าที่เมื่อกำหนดค่า  $\gamma_i$  ต่าง ๆ กัน

จากสมการที่ (2.30) ตำแหน่งโพลสำหรับระบบอันดับต่าง ๆ กัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 มี

ค่าดังนี้

2 nd order	$-0.5000 \pm j0.38730$
3 rd order	$-0.62273 \pm j0.82004$ , $-0.75454$
4 th order	$-1.0000 \pm j1.3764$ , $-1.0000 \pm j0.32492$
5 th order	$-1.2084 \pm j0.70569$ , $-2.2228 \pm j2.5593$ , $-1.1377$
6 th order	$-1.2867 \pm j0.74408$ , $-4.4569 \pm j5.2163$ , $-1.1805$ , $-3.3301$
7 th order	$-1.2843 \pm j0.73912$ , $-8.9003 \pm j10.427$ , $-1.1805$ , $-4.5963$ , $5.8539$
8 th order	$-1.2843 \pm j0.73925$ , $-17.802 \pm j20.853$ , $-1.1806$ , $-4.2969$ , $-8.3419$ , $-12.009$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งโพลของระบบอันดับต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.10 ตำแหน่งของโพลที่อันดับต่ำ ๆ จะเรียงกันตามแนวแกนจินตภาพ ส่วนระบบอันดับสูง ๆ นั้น โพลจะเรียงตัวกันตามแนวเส้นตรงที่ทำมุม 49.5 องศา สำหรับอันดับ 6 ขึ้นไปนั้นลักษณะการเรียงตัวของโพลจะอยู่ในลักษณะเดียวกัน สังเกตว่าระบบอันดับ 4 โพลทั้งหมดจะเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงขนานกับแกนจินตภาพ

ระบบอันดับ 3 ที่มีโพลเรียงอยู่ในแนวแกนขนานกับแกนจินตภาพแสดงคุณสมบัติแบบ non-decreasing เมื่อป้อนอินพุตแบบสเต็ป คือผลตอบสนองของระบบจะไม่มีค่าพุ่งเกิน ยกตัวอย่างเช่น ระบบมีฟังก์ชันถ่ายโอน  $G(s)$  ดังสมการที่ (2.31)

$$G(s) = \frac{(\beta^2 + 1)}{[(s + 1)\{(s + 1)^2 + \beta^2\}]} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.31) แปลงกลับให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา

$$g(t) = \left(1 + \frac{1}{\beta^2}\right)e^{-t}(1 - \cos \beta t) \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.32) จะได้ว่า  $g(t)$  เป็นค่าบวกเสมอ

กำหนดให้  $\beta^2 = 1.5$  จะได้โพลิโนเมียลคุณลักษณะ  $P(s)$  ดังสมการที่ (2.33)

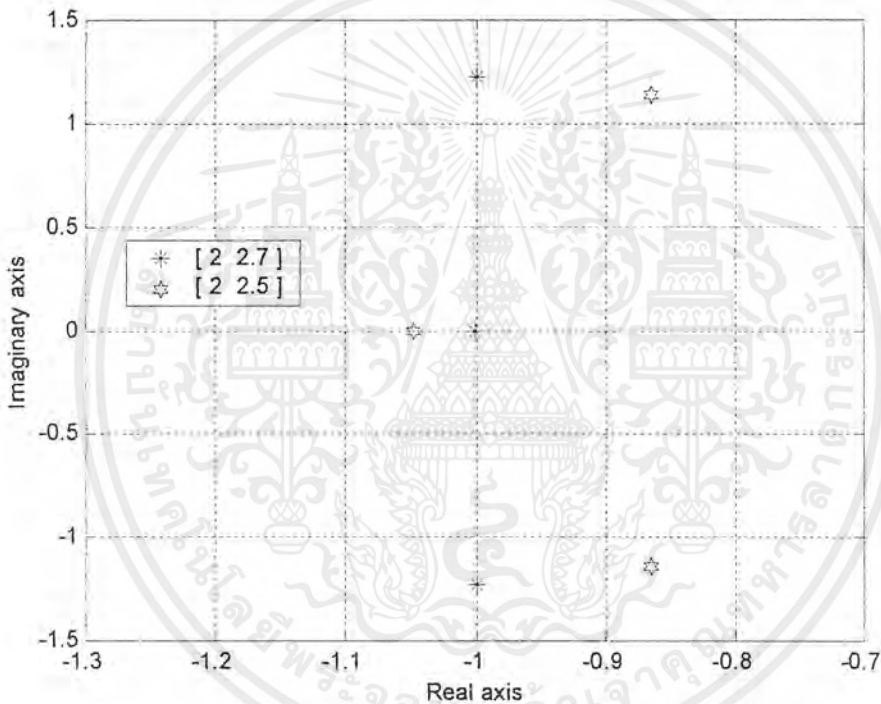
$$P(s) = s^3 + 3s^2 + 4.5s + 2.5 \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

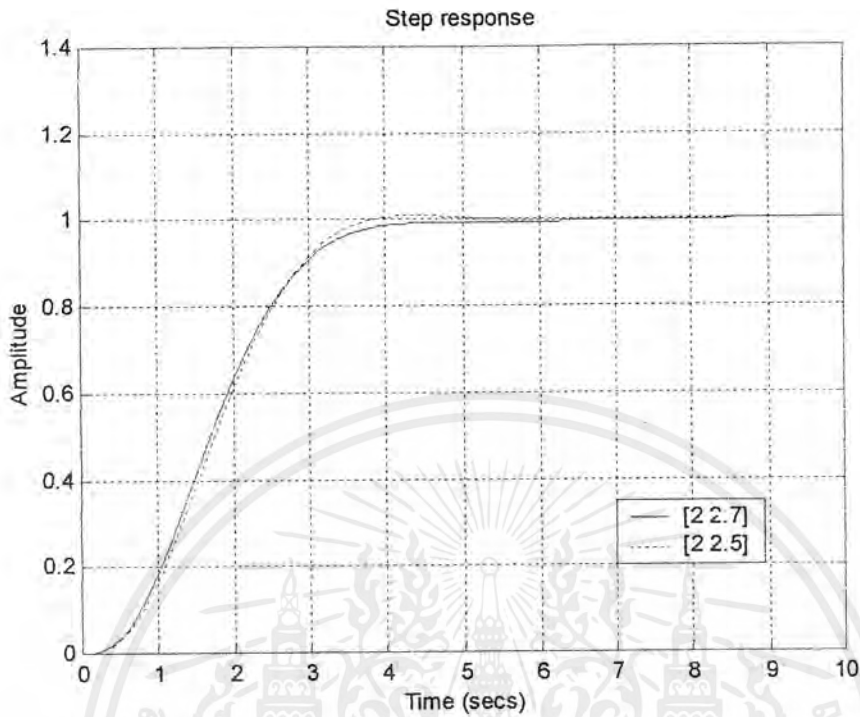
จากสมการที่ (2.33) ค่าดัชนีเสถียรภาพคือ

$$\gamma_i = [2 \ 2.7] \quad (2.34)$$

กรณีนี้ผลตอบสนองของระบบจะไม่มีค่าพุ่งเกิน ถ้าหากทำการออกแบบโดยใช้ค่า  $\gamma_i$  มาตรฐาน ค่าโพลทั้งสามตัวของระบบจะไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันแสดงดังรูปที่ 2.11 โพลในเมียดเชิงซ้อนที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพจะทำให้เกิดค่าพุ่งเกินเล็กน้อย ผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าเราสามารถเลือกใช้ค่า  $\gamma_i$  มาตรฐานได้เพื่อความสะดวก



รูปที่ 2.11 แสดงค่าโพลของระบบอันดับ 3 ที่กำหนดค่า  $\gamma_i$  ต่างกัน



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเมื่อกำหนดค่า  $\tau_r$  ต่างกัน

ข้อดีของรูปแบบมาตรฐานของ CDM สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1.) สำหรับระบบอันดับ 1 จะไม่มีค่าพุ่งเกินหรือมีน้อยมาก ระบบอันดับ 2 จะมีค่าพุ่งเกิน ที่จำเป็นประมาณ 40% เกิดขึ้น
- 2.) สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลาสมมูลเท่ากัน รูปแบบมาตรฐานจะมีค่าเวลาเข้าที่น้อยที่สุด ประมาณ  $2.5 \tau \sim 3 \tau$
- 3.) ผลตอบสนองต่ออินพุตแบบสเต็ปมีลักษณะใกล้เคียงกัน ไม่ขึ้นกับอันดับของโพลีโนเมียลคุณลักษณะ
- 4.) โพลีของระบบอันดับต่ำ ๆ จะวางตัวในแนวตั้งขนานกับแกนจินตภาพ ส่วนโพลีของระบบอันดับสูง ๆ จะอยู่ภายในบริเวณที่ล้อมรอบด้วยเส้นตรงที่ทำมุม  $\pm 49.5$  องศา วัดจากแกนจริงลบ
- 5.) รูปแบบมาตรฐานของ CDM จำได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 การพิจารณาความคงทนของระบบ ( Robustness Consideration )

ความคงทนและเสถียรภาพของระบบ มีหลักการในการพิจารณาแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง กล่าวคือเสถียรภาพเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของโพล แต่ความคงทนพิจารณาจากความเร็วของการเคลื่อนที่ของโพลเข้าหาแกนจินตภาพเมื่อค่าพารามิเตอร์ในระบบมีการเปลี่ยนแปลง

เสถียรภาพจะถูกกำหนดจากค่าดัชนีเสถียรภาพ  $\gamma_i$  ของโพลิโนเมียลคุณลักษณะ แต่ความคงทนจะหาได้หลังจากที่ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดถูกกำหนดขึ้นแล้ว

ตัวอย่าง 2.3 กำหนดโพลิโนเมียลอันดับ 3 ดังสมการ (2.35)

$$P(s) = 0.5s^3 + s^2 + s + 0.4 \quad (2.35)$$

กรณีให้ระบบวงเปิดมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดแบบ canonical แบบชนิด 1,  $G_1(s)$  ดังสมการ (2.36)

$$G_1(s) = \frac{0.4}{(0.5s^3 + s^2 + s)} \quad (2.36)$$

ระบบจะมีค่าเฟสมารจินเท่ากับ 66.6 องศา

กรณีเป็น canonical แบบชนิด 2,  $G_2(s)$  มีค่าดังสมการ (2.37)

$$G_2(s) = \frac{(s + 0.4)}{(0.5s^3 + s^2)} \quad (2.37)$$

ระบบจะมีค่าเฟสมารจินเท่ากับ 41.7 องศา ซึ่งค่าความคงทนของระบบจะลดลง ทำการเพิ่มตัวควบคุมแบบ non-minimum จะได้ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด,  $G_a(s)$  ดังสมการ (2.38)

$$G_a(s) = \frac{(-9s + 0.4)}{(0.5s^3 + s^2 + 10s)} \quad (2.38)$$

กรณีนี้ระบบมีค่าเกนมารจินเท่ากับ 1.087 และค่าความคงทนของระบบต่ำมาก

จากตัวอย่างที่ 2.3 นี้แสดงให้เห็นว่าโพลิโนเมียลคุณลักษณะค่าเดียวกันซึ่งมีเสถียรภาพเหมือนกันนั้น อาจจะมีค่าความคงทนแตกต่างกันก็ได้ และในบางกรณีอาจต่ำมากจนไม่สามารถยอมรับได้

## 2.8 การปรับค่าดัชนีเสถียรภาพ

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นการออกแบบระบบควบคุมด้วย CDM ซึ่งใช้รูปแบบมาตรฐานในการออกแบบ แต่ในทางปฏิบัติยังต้องพิจารณาปัจจัยอื่นๆ อีก ค่า  $\gamma_1 = 2.5$  และ  $\gamma_2 = \gamma_3 = 2$  จัดได้ว่าเป็นค่าที่ให้ผลในเรื่องของเสถียรภาพและผลตอบสนองของระบบได้อย่างน่าพอใจ แต่ไม่จำเป็นที่จะต้องกำหนดค่า  $\gamma_4 \sim \gamma_n = 2$  เสมอไป เงื่อนไขที่ใช้ในการกำหนดค่าของ  $\gamma_i$  คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma_i > 1.5\gamma_i^* \quad (2.39)$$

ด้วยเหตุนี้ ผู้ออกแบบจะมีอิสระในการออกแบบตัวควบคุมและโพลีโนเมียลคุณลักษณะ โดยสามารถออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบมีสมรรถนะที่ต้องการ พร้อมทั้งพิจารณาเสถียรภาพ และความคงทนของระบบควบคู่กันไปเพื่อให้ได้ระบบที่ดีที่สุด อนึ่ง เนื่องจากการออกแบบด้วย CDM เป็นการเลือกค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม จึงต้องใช้ประสบการณ์และความชำนาญพอสมควร เพื่อให้การออกแบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

## 2.9 การพิจารณาอันดับของตัวควบคุมจากการออกแบบโดย CDM

เนื่องจากขนาดของ sylvester matrix ขึ้นอยู่กับอันดับของตัวควบคุม ดังนั้นการเลือกอันดับของตัวควบคุมที่ทำให้ sylvester matrix เป็นเมตริกซ์จัตุรัส จะสามารถแก้สมการได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพียงชุดคำตอบเดียว ในทางตรงกันข้ามอาจเกิดปัญหาในกรณีที่มีพารามิเตอร์มากเกินไปหรือน้อยเกินไป

เงื่อนไขในการแก้สมการให้ได้ชุดคำตอบเดียว คือ จำนวนของสมการและจำนวนของตัวไม่ทราบค่า จะต้องมีความเท่ากัน โดยให้  $O(\cdot)$  เป็นอันดับของตัวดำเนินการ กำหนดให้

$$O(B_c) = \text{อันดับของตัวเศษของตัวควบคุม } B_c(s) \quad (2.40)$$

$$O(A_c) = \text{อันดับของตัวส่วนของตัวควบคุม } A_c(s) \quad (2.41)$$

$$O(B_p) = \text{อันดับของตัวเศษของพลาเน็ต } B_p(s) \quad (2.42)$$

$$O(A_p) = \text{อันดับของตัวส่วนของพลาเน็ต } A_p(s) \quad (2.43)$$

เมื่อ จำนวนของตัวไม่ทราบค่า คือ จำนวนสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลตัวเศษ  $B_c(s)$ ,  $A_c(s)$  และจำนวนของสมการ คือ จำนวนสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะ  $D_0(s)$  จะได้

$$\text{num\_unknowns} = O(B_c) + O(A_c) + 2 \quad (2.44)$$

$$\text{num\_equations} = O(A_p) + O(A_c) + 1 \quad (2.45)$$

สมมติให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของทั้งพลาเน็ตและตัวควบคุม proper อันดับของโพลีโนเมียลคุณลักษณะสามารถแสดงได้โดย  $O(A_p) + O(A_c)$  และเมื่อนำจำนวนของสมการมาสมมูลกับจำนวนของตัวไม่ทราบค่า จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{num\_unknowns} = \text{num\_equations} \quad (2.46)$$

$$O(B_c) + O(A_c) + 2 = O(A_p) + O(A_c) + 1 \quad (2.47)$$

$$O(B_c) = O(A_p) - 1 \quad (2.48)$$

$$O(A_c) \geq O(B_c) \quad \text{เพื่อความ proper} \quad (2.49)$$

ดังนั้นสำหรับชุดค่าตอบเดียวของสมการ อันดับของ  $B_c(s)$  จะต้องน้อยกว่าอันดับของ  $A_p(s)$  อยู่หนึ่ง คือ  $O(B_c) = O(A_p) - 1$  โดยยังคงอยู่ภายใต้เงื่อนไข

$$O(A_c) \geq O(B_c)$$

ยกตัวอย่างพลาเน็ตอันดับ 4 จะได้ sylvester matrix เป็นเมตริกซ์จัตุรัสสำหรับ  $B_c(s)$  ขนาด  $3 \times 3$  และ  $A_c(s)$  จะมีขนาดได้ตั้งแต่  $3 \times 3$  ขึ้นไป เพื่อความสะดวกจะใช้สัญลักษณ์  $[p/q]$  แสดงอันดับของตัวควบคุม โดย  $p$  คือ อันดับของ  $B_c(s)$  และ  $q$  คือ อันดับของ  $A_c(s)$

## บทที่ 3

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 3.1 การทดลอง

การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม  $G_c(s)$  มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าคงตัวเวลาสมมูลจากค่าเวลาเข้าที่
2. หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมจากค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐาน
3. หาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่กำหนดขึ้นมา โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากสมการที่ (2.3) โดยใช้ตัวควบคุมที่เลือก และนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ ที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะจากสมการที่ (2.10) ที่เกิดจากขั้นตอนที่ 1 และ 2
4. กำหนดให้  $B_o(s) = k_0$

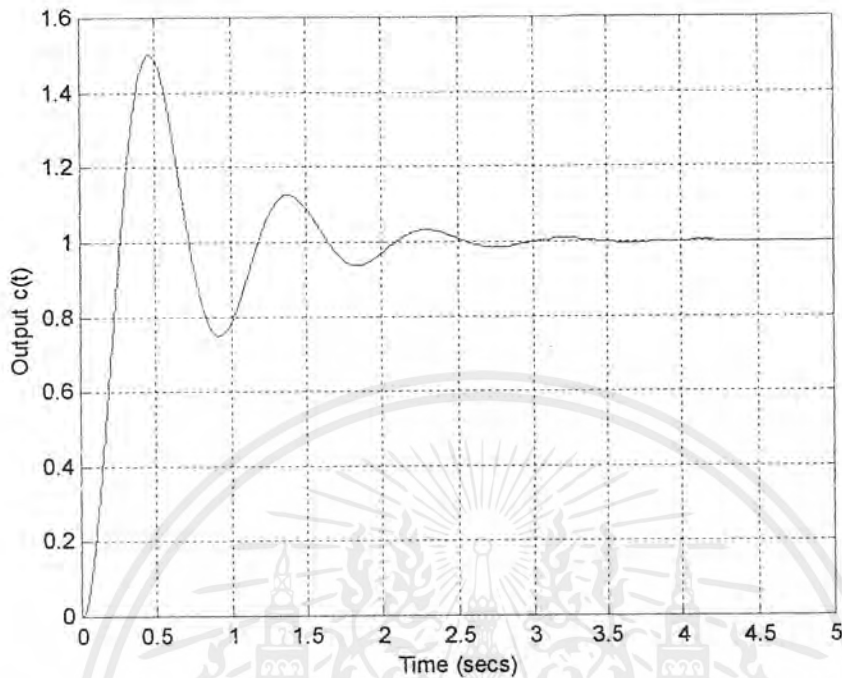
ในหัวข้อนี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมแบบต่างๆ ด้วย CDM แล้วเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้เพื่อหาตัวควบคุมที่สามารถทำให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตรงตามข้อกำหนด มีเสถียรภาพเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบ และคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของพลานต์ได้ดีที่สุด

##### 3.1.1 การทดลองที่ 1

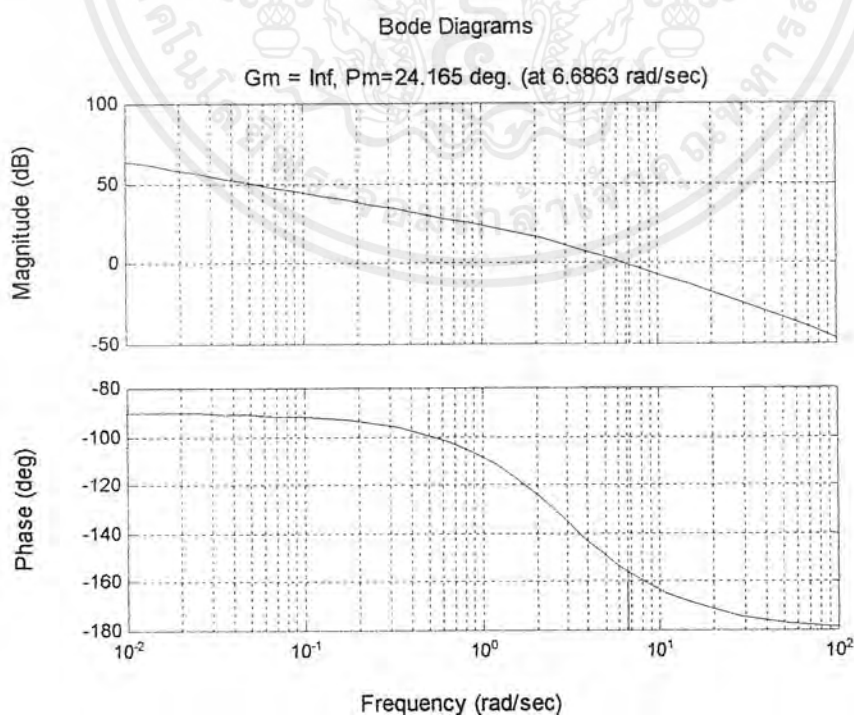
กำหนดให้ข้อกำหนดสมรรถนะ สำหรับการออกแบบตัวควบคุม ที่ทำให้ระบบควบคุมมีเวลาเข้าที่ที่ 0.1 % คือ  $t_s \leq 0.1$  วินาที

สำหรับพลานต์อันดับ 2 แบบชนิด 1

$$G_p(s) = \frac{49}{s(s+3)}$$



รูปที่ 3.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่ควบคุมแบบป้อนกลับหมด ต่ออินพุทแบบสเต็ป



รูปที่ 3.2 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่ควบคุมแบบป้อนกลับหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ PD จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะได้

$$G_c(s) = k_1 s + k_0$$

$$B_c(s) = k_1 s + k_0$$

$$A_c(s) = 1$$

$$G(s) = (k_1 s + k_0) \times \left( \frac{49}{s(s+3)} \right)$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= s(s+3) + (49 \times (k_1 s + k_0)) \\ &= s^2 + (3 + 49k_1)s + 49k_0 \end{aligned}$$

จะได้สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$a_2 = a_0 \tau^2 / \gamma_1 = 1$$

$$a_1 = a_0 \tau = 3 + 49k_1$$

$$a_0 = 49k_0$$

จะเห็นว่าระบบสมการ มีจำนวนสมการเท่ากับ 3 สมการ จำนวนตัวไม่ทราบค่าเท่ากับ 4 ตัว คือ  $a_0, k_0, k_1, \tau$  ในการแก้สมการเพื่อหาคำตอบจะต้องมีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปร ดังนั้นต้องลดตัวแปรลงไป 1 ตัว ซึ่งหมายความว่าผู้ออกแบบสามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ ในที่นี่จะเลือกกำหนด  $\tau$  โดยตัวพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ จะเป็นตัวแปรตามเพื่อหาคำตอบของสมการให้สอดคล้องกับค่า  $\tau$  ที่กำหนดในตอนต้น ขั้นตอนของการออกแบบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) ข้อกำหนดสมรรถนะค่าเวลาเข้าที่ คือ 0.1 วินาที โดยทั่วไปค่าเวลาคงที่จะสัมพันธ์กับ  $\tau$  คือ  $t_s = 2.5\tau$  ดังนั้นเลือก  $\tau = 0.04$  วินาที

ขั้นตอนที่ (2) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลาเน็ต โดยใช้ค่ามาตรฐานของ CDM พร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไขเสถียรภาพ ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

$$\gamma_1 = 2.5$$

ขั้นตอนที่ (3) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PD โดย CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุมแบบ PD แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาคำความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐาน จะได้ค่าพารามิเตอร์  $k_0, k_1$  ของตัวควบคุม และตัวควบคุมมีโครงสร้างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_c(s) = k_1 s + k_0$$

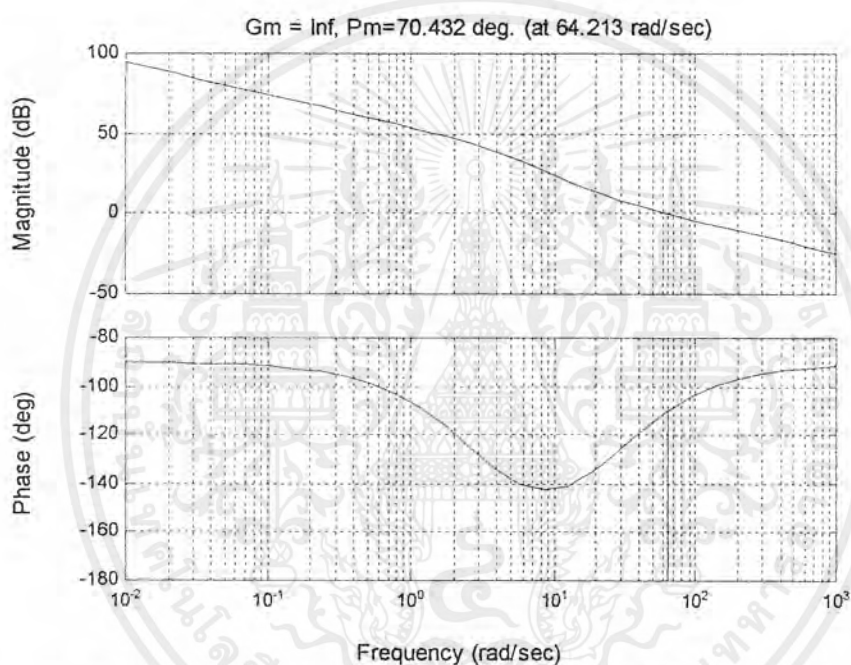
$$= 1.2143s + 31.8878$$

ขั้นตอนที่ (4) เนื่องจากค่า  $k_0 = 31.8878$  ดังนั้นค่า  $B_a(s) = 31.8878$

เมื่อนำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองตัวเมื่อป้อนอินพุทแบบสเต็ป และแผนภาพโบด โดยใช้โปรแกรม MATLAB จะได้ผลดังรูปที่ 3.3 - รูปที่ 3.6

$$G_o(s) = \frac{1562.5}{s^2 + 62.5s + 1562.5}$$

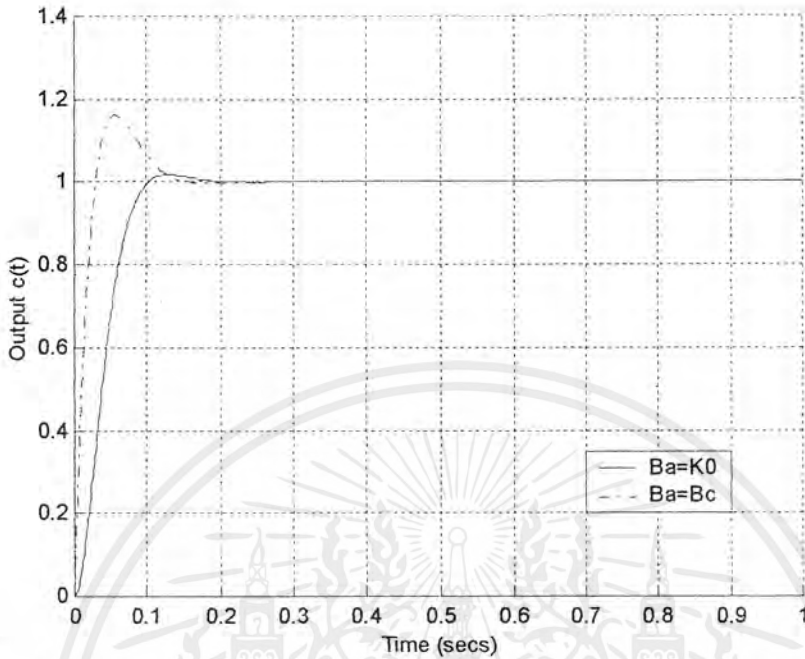
Bode Diagrams



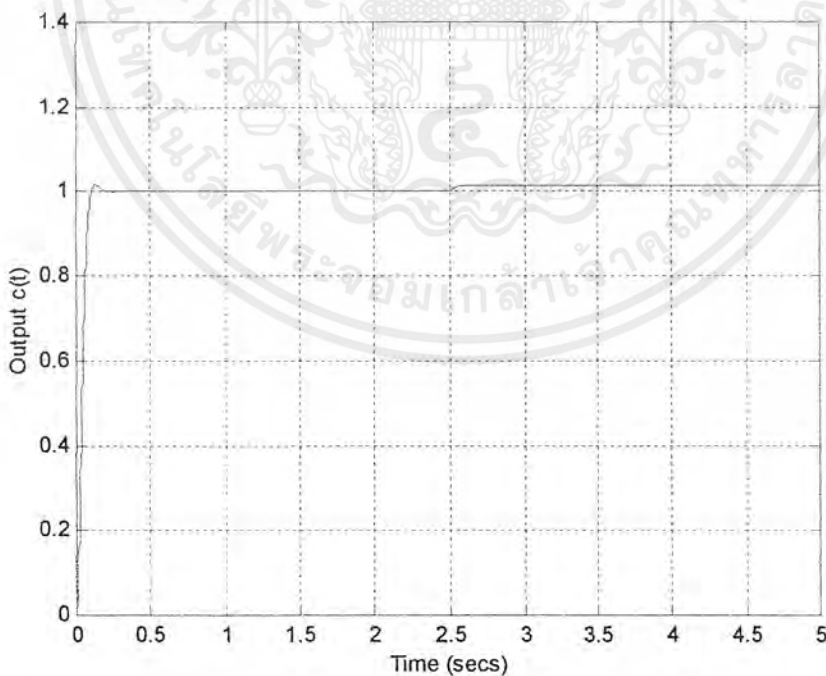
รูปที่ 3.3 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PD

$$\gamma_1 = 2.5, \tau = 0.04$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



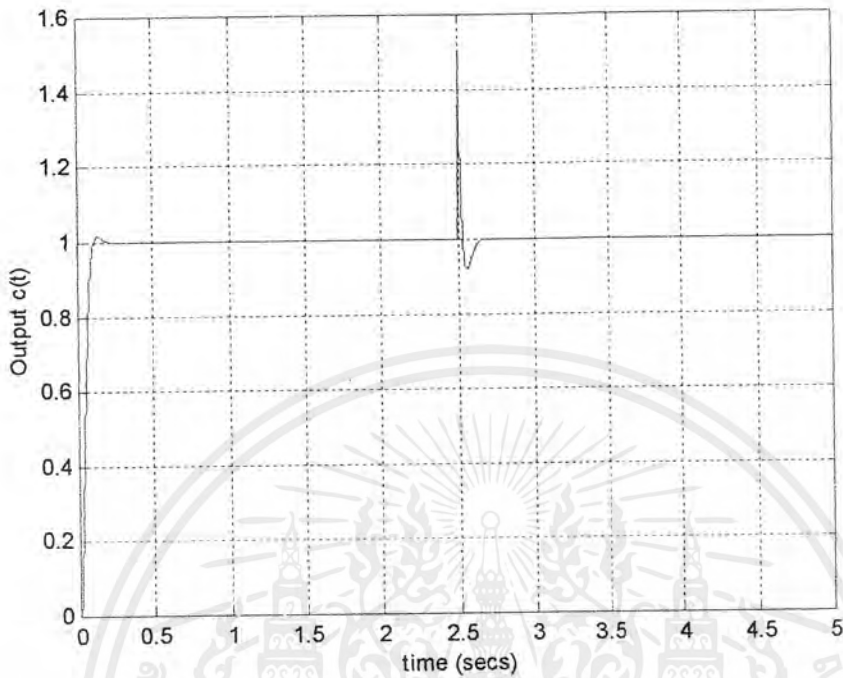
รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PD ต่ออินพุทแบบสเต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \tau = 0.04$



รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PD ต่ออินพุทแบบสเต็ป เมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลานต์ ;

$$\gamma_1 = 2.5, \tau = 0.04$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PD ต่ออินพุทแบบสเต็ป  
เมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ ;  $\gamma_1 = 2.5, \tau = 0.04$

กรณีที่ 2. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ PI จากสมการ (2.1) และ (2.2) จะได้

$$G_c(s) = \frac{k_1 s + k_0}{s}$$

$$B_c(s) = k_1 s + k_0$$

$$A_c(s) = s$$

$$G(s) = \left( \frac{k_1 s + k_0}{s} \right) \times \left( \frac{49}{s(s+3)} \right)$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= s^2(s+3) + (49 \times (k_1 s + k_0)) \\ &= s^3 + 3s^2 + 49k_1 s + 49k_0 \end{aligned}$$

จะได้สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$a_3 = a_0 \tau^3 / \gamma_1^2 \gamma_2 = 1$$

$$a_2 = a_0 \tau^2 / \gamma_1 = 3$$

$$a_1 = a_0 \tau = 49k_1$$

$$a_0 = 49k_0$$

จะเห็นว่าระบบสมการ มีจำนวนสมการเท่ากับ 4 สมการ และจำนวนตัวไม่ทราบค่าเท่ากับ 4 ตัว คือ  $a_0, k_0, k_1, \tau$  ซึ่งมีจำนวนเท่ากันแล้ว จึงไม่สามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ ดังนั้น ระบบสมการชุดนี้ จะมีชุดคำตอบเพียงชุดคำตอบเดียวที่ทำให้ระบบสมการเป็นจริง ขั้นตอนของการออกแบบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) เนื่องจากจำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปรแล้ว จึงไม่สามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ ดังนั้น  $\tau$  จะเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

ขั้นตอนที่ (2) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลาเน็ต โดยใช้ค่ามาตรฐานของ CDM ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

$$\gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

ขั้นตอนที่ (3) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ด้วย CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุมแบบ PI แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐาน จะได้ค่าพารามิเตอร์  $k_0, k_1$  ของตัวควบคุม และตัวควบคุมมีโครงสร้างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_c(s) = \frac{k_1 s + k_0}{s}$$

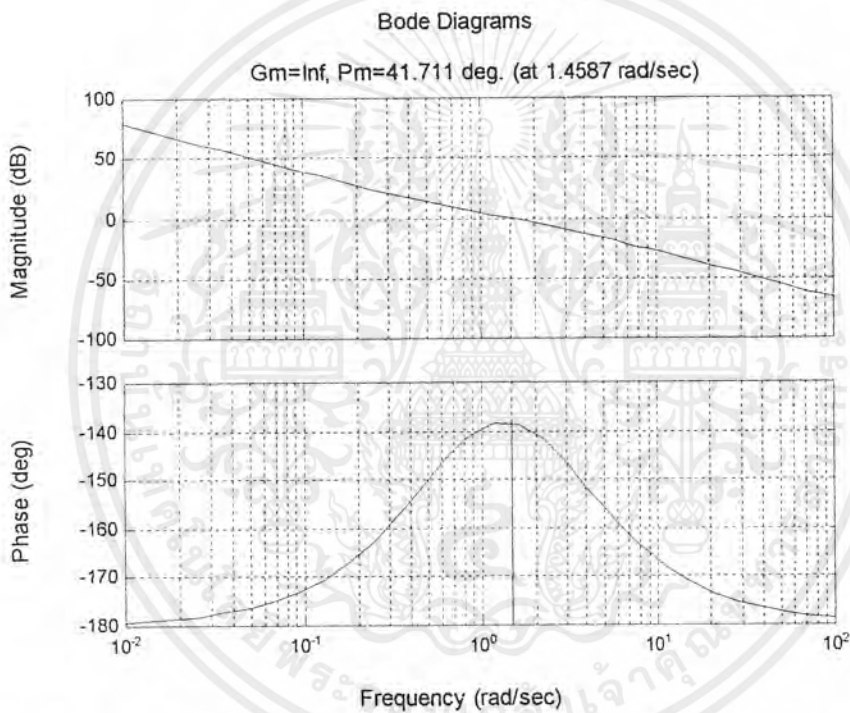
$$= \frac{0.0918367s + 0.055102}{s}$$

ขั้นตอนที่ (4) เนื่องจากค่า  $k_0 = 0.055102$  ดังนั้นค่า  $B_a(s) = 0.055102$

เมื่อนำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองเมื่ออินพุตแบบสเต็ป

และแผนภาพโบด โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.7 - รูปที่ 3.10

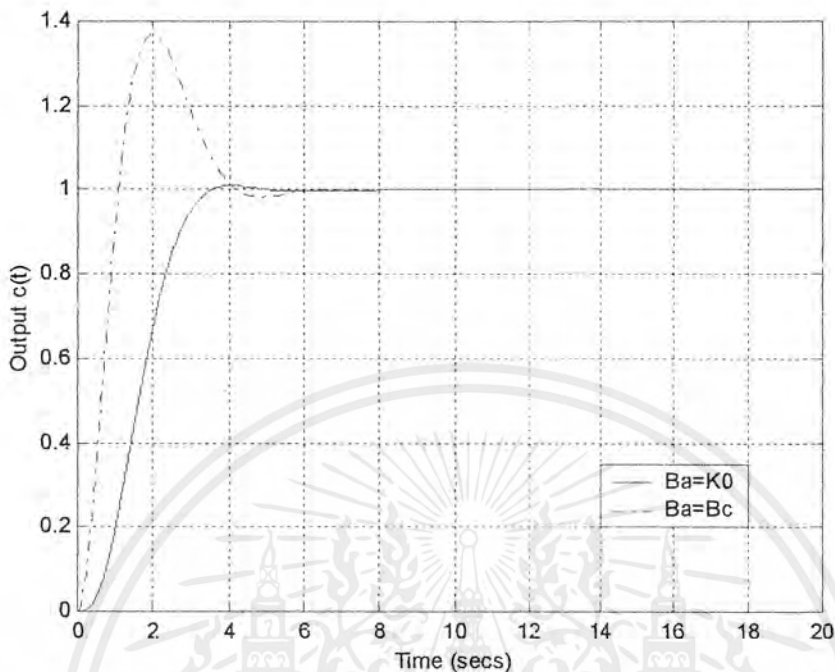
$$G_o(s) = \frac{2.7}{s^3 + 3s^2 + 4.5s + 2.7}$$



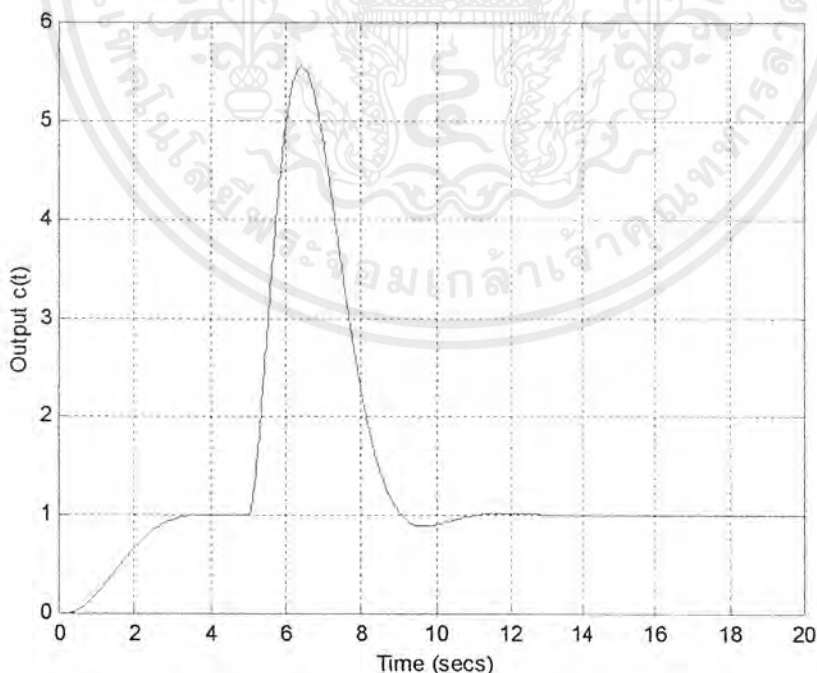
รูปที่ 3.7 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PI

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 1.667$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



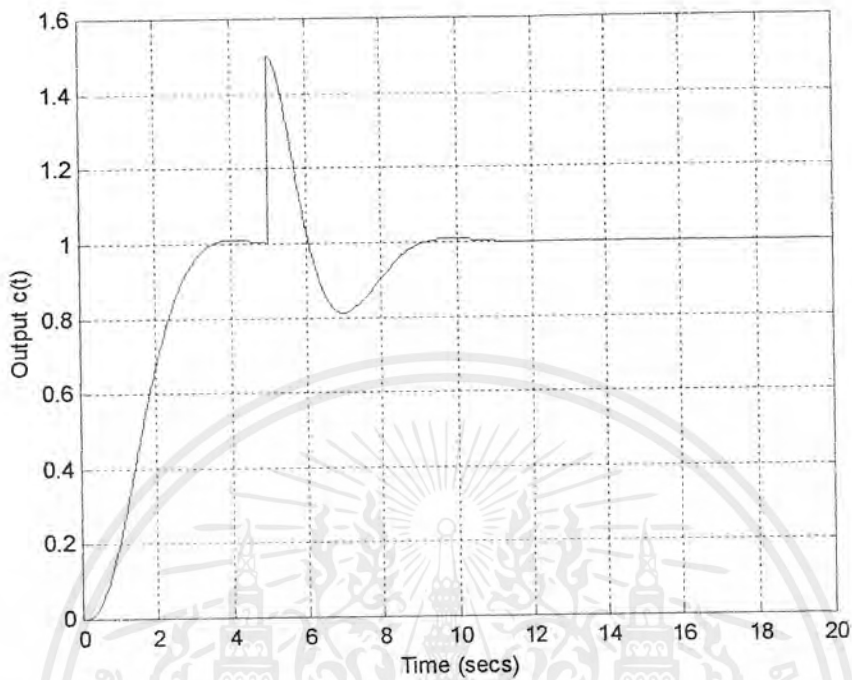
รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PI ต่ออินพุทแบบสเต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 1.667$



รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PI ต่ออินพุทแบบสเต็ป เมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลาเนต์

$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 1.667$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PI ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ป เมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ  
 $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 1.667$

กรณีที่ 3. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ PID จากสมการ (2.1) และ (2.2) จะได้

$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s}$$

$$B_c(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0$$

$$A_c(s) = s$$

$$G(s) = \left( \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s} \right) \times \left( \frac{49}{s(s+3)} \right)$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)$$

$$= s^2(s+3) + (49 \times (k_2 s^2 + k_1 s + k_0))$$

$$= s^3 + (3 + 49k_2)s^2 + 49k_1 s + 49k_0$$

จะได้สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$a_3 = a_0 \tau^3 / \gamma_1^2 \gamma_2 = 1$$

$$a_2 = a_0 \tau^2 / \gamma_1 = 3 + 49k_2$$

$$a_1 = a_0 \tau = 49k_1$$

$$a_0 = 49k_0$$

จะเห็นว่าระบบสมการ มีจำนวนสมการเท่ากับ 4 สมการ จำนวนตัวไม่ทราบค่าเท่ากับ 5 ตัว คือ  $a_0, k_0, k_1, k_2, \tau$  ในการแก้สมการเพื่อหาคำตอบจะต้องมีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปร ดังนั้นต้องลดตัวแปรลงไป 1 ตัว ซึ่งหมายความว่าผู้ออกแบบสามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ ในที่นี้จะเลือกกำหนด  $\tau$  โดยตัวพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ จะเป็นตัวแปรตามเพื่อหาคำตอบของสมการให้สอดคล้องกับค่า  $\tau$  ที่กำหนดในตอนต้น

ขั้นตอนของการออกแบบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) ข้อกำหนดสมรรถนะค่าเวลาดังที่ คือ 0.1 วินาที ค่า  $\tau$  คือ 0.04 วินาที

ขั้นตอนที่ (2) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลาเน็ต โดยใช้ค่ามาตรฐานของ CDM พร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไข ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

$$\gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

ขั้นตอนที่ (3) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID ด้วย CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุมแบบ PID แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐาน จะได้ค่าพารามิเตอร์  $k_0, k_1, k_2$  ของตัวควบคุม และตัวควบคุมมีโครงสร้างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

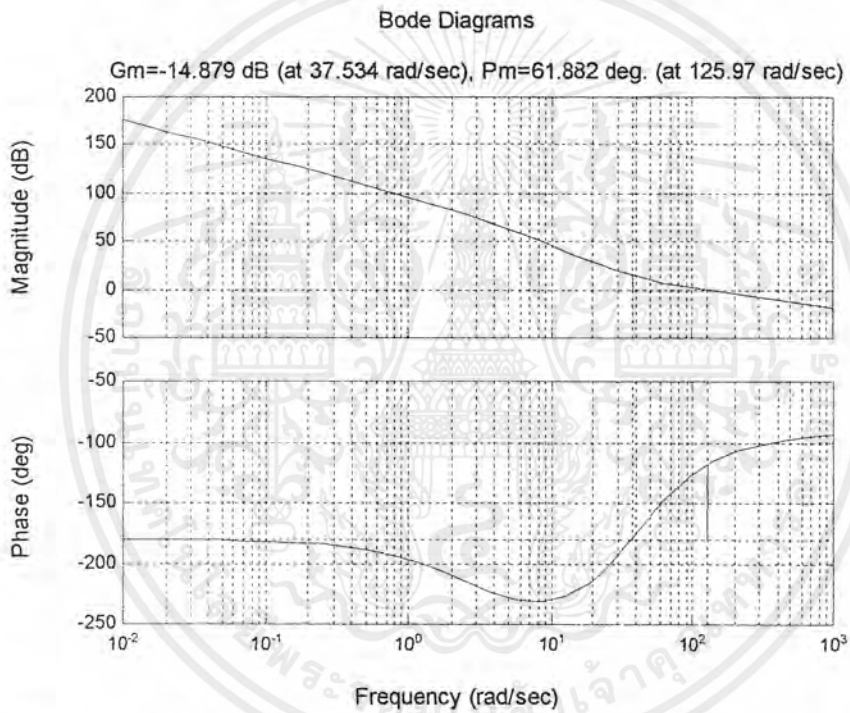
$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s}$$

$$= \frac{2.4898s^2 + 159.4388s + 3986}{s}$$

ขั้นตอนที่ (4) เนื่องจากค่า  $k_0 = 3986$  ดังนั้นค่า  $B_d(s) = 3986$

เมื่อนำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองเมื่อป้อนอินพุทแบบ สเต็ป และแผนภาพโบด โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.11 – รูปที่ 3.14

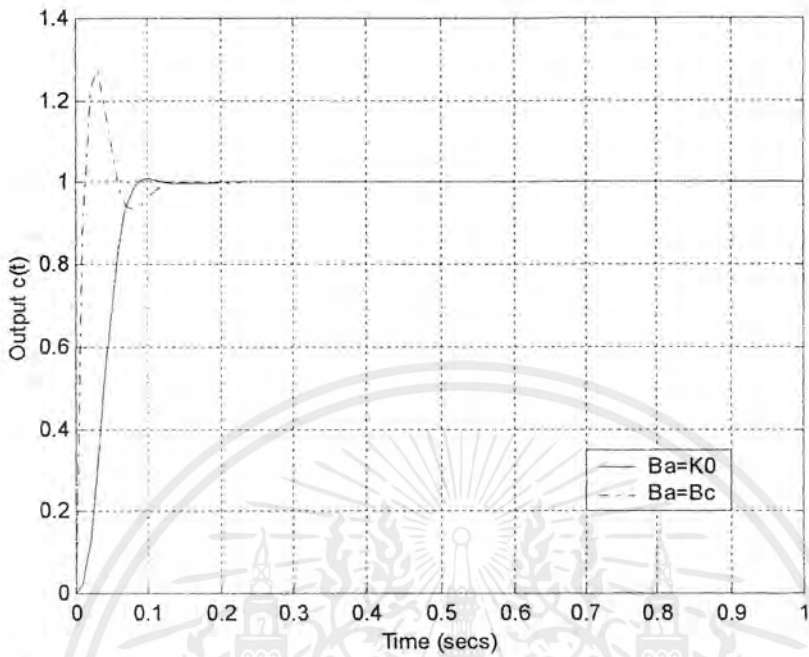
$$G_o(s) = \frac{195313}{s^3 + 125s^2 + 7812.5s + 195313}$$



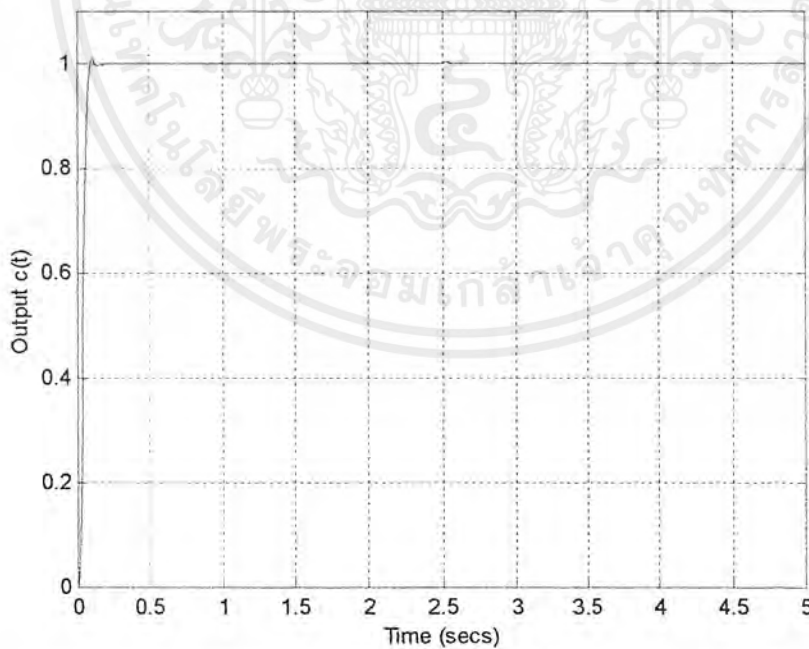
รูปที่ 3.11 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ;

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



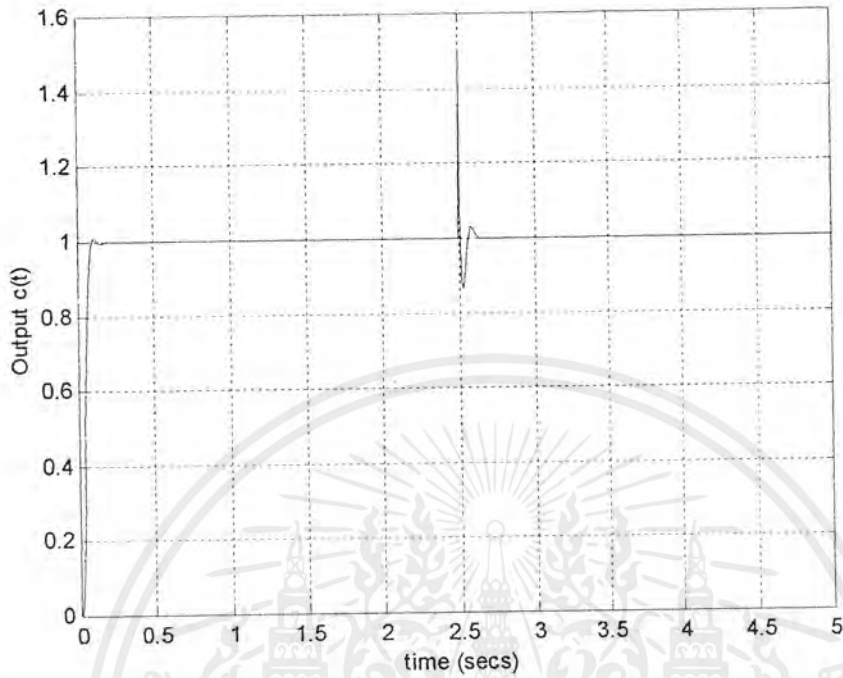
รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ป;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$



รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลานต์

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ  
 $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$

กรณีที่ 4. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ  $[1/1]$  จากสมการ (2.1) และ (2.2) จะได้

$$\begin{aligned}G_c(s) &= \frac{k_1s + k_0}{l_1s + l_0} \\B_c(s) &= k_1s + k_0 \\A_c(s) &= l_1s + l_0 \\G(s) &= \left( \frac{k_1s + k_0}{l_1s + l_0} \right) \times \left( \frac{49}{s(s+3)} \right)\end{aligned}$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$\begin{aligned}P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\&= (l_1s + l_0)(s^2 + 3s) + (49 \times (k_1s + k_0)) \\&= l_1s^3 + (3l_1 + l_0)s^2 + (3l_0 + 49k_1)s + 49k_0\end{aligned}$$

จะได้สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$\begin{aligned}a_3 &= a_0\tau^3/\gamma_1^2\gamma_2 = l_1 \\a_2 &= a_0\tau^2/\gamma_1 = 3l_1 + l_0 \\a_1 &= a_0\tau = 3l_0 + 49k_1 \\a_0 &= 49k_0\end{aligned}$$

จะเห็นว่าระบบสมการ มีจำนวนสมการเท่ากับ 4 สมการ จำนวนตัวไม่ทราบค่าเท่ากับ 6 ตัว คือ  $a_0, k_0, k_1, l_0, l_1, \tau$  ในการแก้สมการเพื่อหาคำตอบจะต้องมีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปร ดังนั้นต้องลดตัวแปรลงไป 2 ตัว ซึ่งหมายความว่าผู้ออกแบบสามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ ในที่นี้จะเลือกกำหนด  $\tau$  และ  $k_0$  โดยตัวพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ จะเป็นตัวแปรตามเพื่อหาคำตอบของสมการให้สอดคล้องกับค่า  $\tau$  และ  $k_0$  ที่กำหนดในตอนต้น ขั้นตอนของการออกแบบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) ข้อกำหนดสมรรถนะค่าเวลาเข้าที่ คือ 0.1 วินาที ค่า  $\tau$  คือ 0.04 วินาที และกำหนดค่า  $k_0 = 1$

ขั้นตอนที่ (2) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลาเน็ต โดยใช้ค่ามาตรฐานของ CDM พร้อมทั้งตรวจจสอบเงื่อนไข ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

$$\gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

ขั้นตอนที่ (3) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ  $[1/1]$  ด้วย CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุมแบบ  $[1/1]$  แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐาน จะได้ค่าพารามิเตอร์  $k_0, k_1, l_0, l_1$  ของตัวควบคุม และตัวควบคุมมีโครงสร้างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

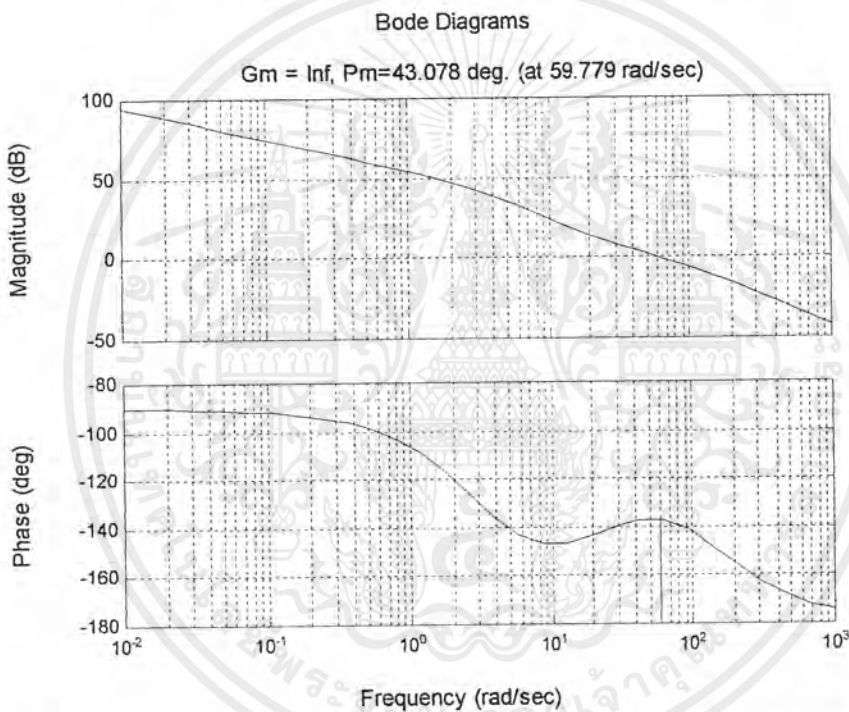
$$G_c(s) = \frac{k_1 s + k_0}{l_1 s + l_0}$$

$$= \frac{0.0381s + 1}{0.00025088s + 0.0306}$$

ขั้นตอนที่ (4) เนื่องจากค่า  $k_0 = 1$  ดังนั้นค่า  $B_a(s) = 1$

เมื่อนำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองของเมื่อป้อนอินพุตแบบ สเต็ป และแผนภาพโบด โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.15 – รูปที่ 3.18

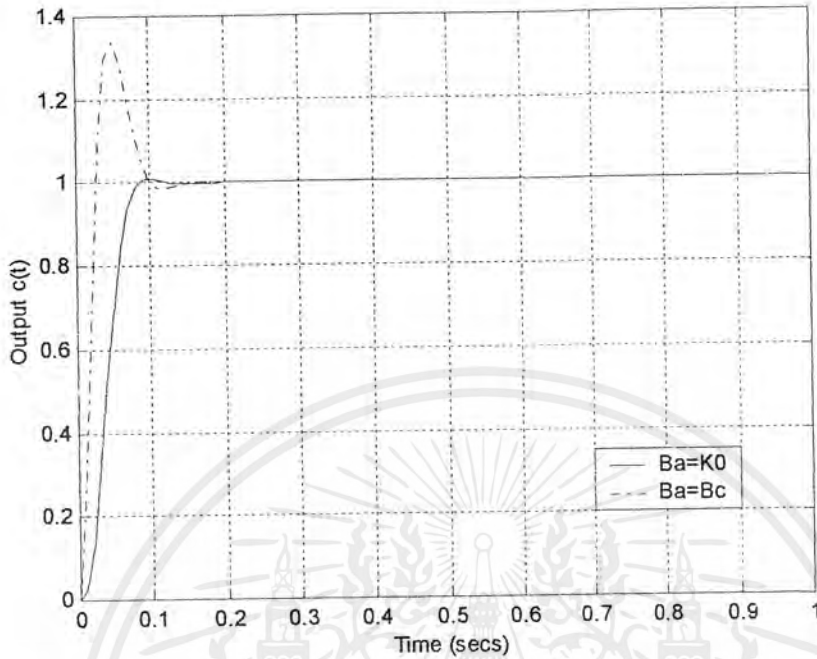
$$G_o(s) = \frac{49}{0.00025088s^3 + 0.03136s^2 + 1.96s + 49}$$



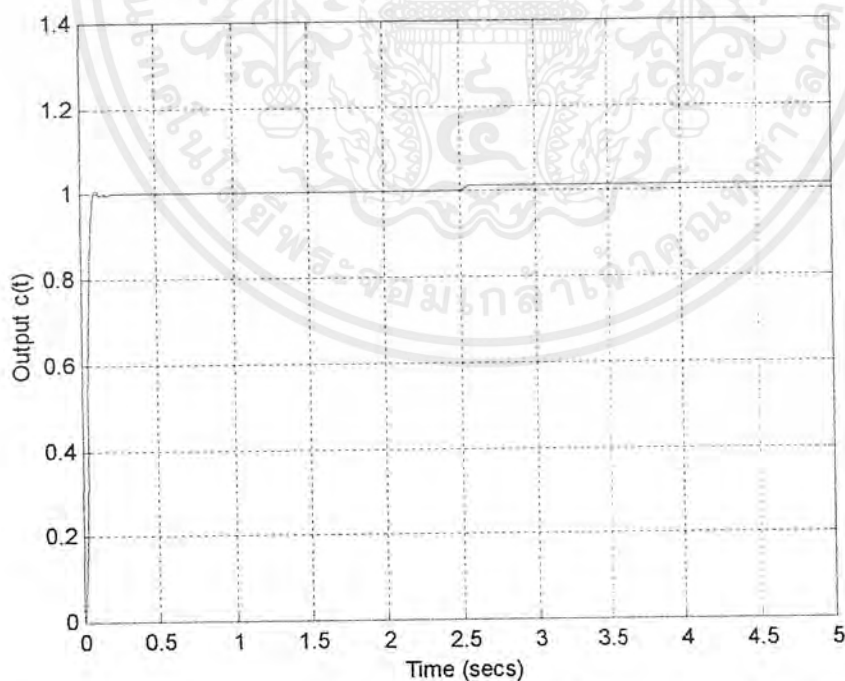
รูปที่ 3.15 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ  $[1/1]$

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



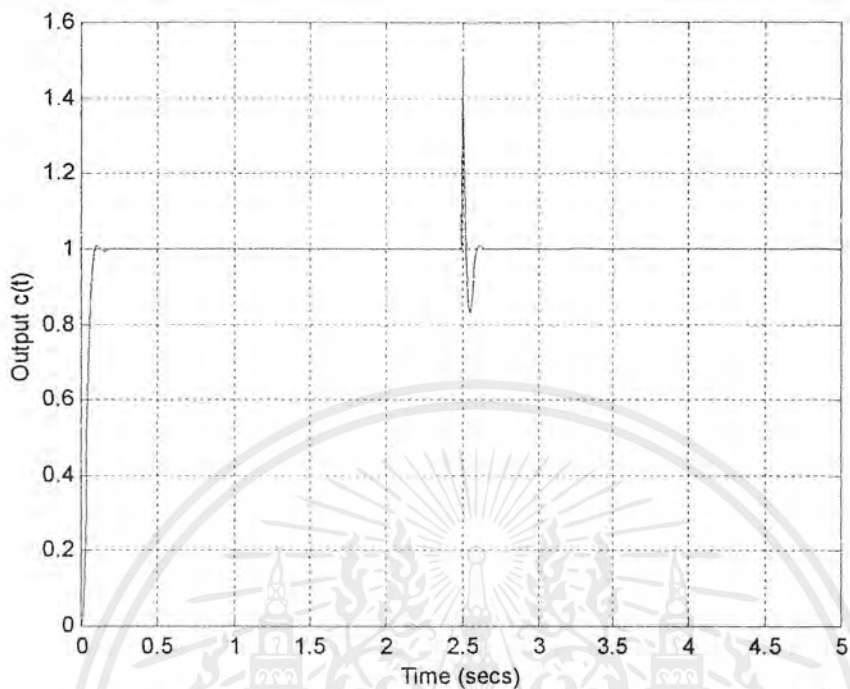
รูปที่ 3.16 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ  $[1/1]$  ต่ออินพุทแบบสเต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$



รูปที่ 3.17 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ  $[1/1]$  ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลาเน็ต

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ  $[1/1]$  ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ ;  $\gamma_1 = 2.5$ ,  
 $\gamma_2 = 2$ ,  $\tau = 0.04$

กรณีที่ 5. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ [2/2] จากสมการ (2.1) และ (2.2) กำหนด  $l_0 = 0$  จะได้

$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_2 s^2 + l_1 s}$$

$$B_c(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0$$

$$A_c(s) = l_2 s^2 + l_1 s$$

$$G(s) = \left( \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_2 s^2 + l_1 s} \right) \times \left( \frac{49}{s(s+3)} \right)$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)$$

$$= (l_2 s^2 + l_1 s)(s^2 + 3s) + (49 \times (k_2 s^2 + k_1 s + k_0))$$

$$= l_2 s^2 + (3l_2 + l_1)s^3 + (3l_1 + 49k_2)s^2 + 49k_1 s + 49k_0$$

จะได้สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$a_4 = a_0 \tau^4 / \gamma_1^3 \gamma_2^2 \gamma_1 = l_2$$

$$a_3 = a_0 \tau^3 / \gamma_1^2 \gamma_2 = 3l_2 + l_1$$

$$a_2 = a_0 \tau^2 / \gamma_1 = 3l_1 + 49k_2$$

$$a_1 = a_0 \tau = 49k_1$$

$$a_0 = 49k_0$$

จะเห็นว่าระบบสมการ มีจำนวนสมการเท่ากับ 5 สมการ จำนวนตัวไม่ทราบค่าเท่ากับ 7 ตัว คือ  $a_0, k_0, k_1, k_2, l_0, l_1, \tau$  ในการแก้สมการเพื่อหาคำตอบจะต้องมีจำนวนสมการเท่ากับ จำนวนตัวแปร ดังนั้นต้องลดตัวแปรลงไป 2 ตัว ซึ่งหมายความว่าผู้ออกแบบสามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ ในที่นี้จะเลือกกำหนด  $\tau$  และ  $k_0$  โดยตัวพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ จะเป็นตัวแปรตามเพื่อหาคำตอบของสมการให้สอดคล้องกับค่า  $\tau$  และ  $k_0$  ที่กำหนดในตอนต้น

ขั้นตอนของการออกแบบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) ข้อกำหนดสมรรถนะค่าเวลาเข้าที่ คือ 0.1 วินาที ค่า  $\tau$  คือ 0.04 วินาที และกำหนดค่า  $k_0 = 1$

ขั้นตอนที่ (2) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลาเน็ต โดยใช้ค่ามาตรฐานของ CDM พร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไข ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

$$\gamma_3 = 2, \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

ขั้นตอนที่ (3) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ [2/2] ด้วย CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุมแบบ [2/2] แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐาน จะได้ค่าพารามิเตอร์  $k_0, k_1, k_2, l_2, l_1$  ของตัวควบคุม และตัวควบคุมมีโครงสร้างดังนี้

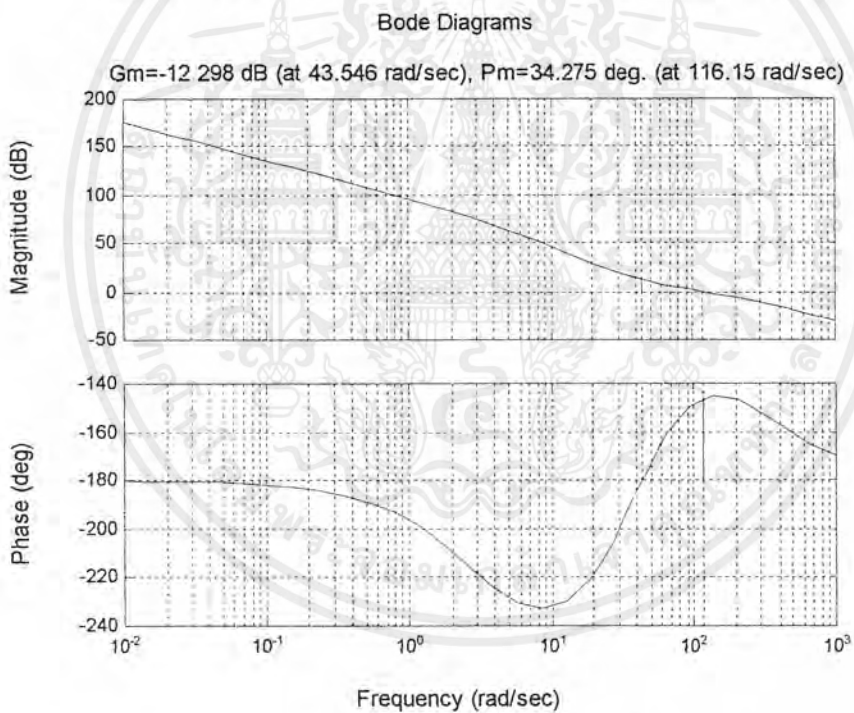
$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_2 s^2 + l_1 s}$$

$$= \frac{(6.2482 \times 10^{-4})s^2 + 0.04s + 1}{(1.0035 \times 10^{-6})s^2 + (2.4787 \times 10^{-4})s}$$

ขั้นตอนที่ (4) เนื่องจากค่า  $k_0 = 1$  ดังนั้นค่า  $B_a(s) = 1$

เมื่อนำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองเมื่อป้อนอินพุทแบบ สเต็ป และแผนภาพโบด โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.19 – รูปที่ 3.22

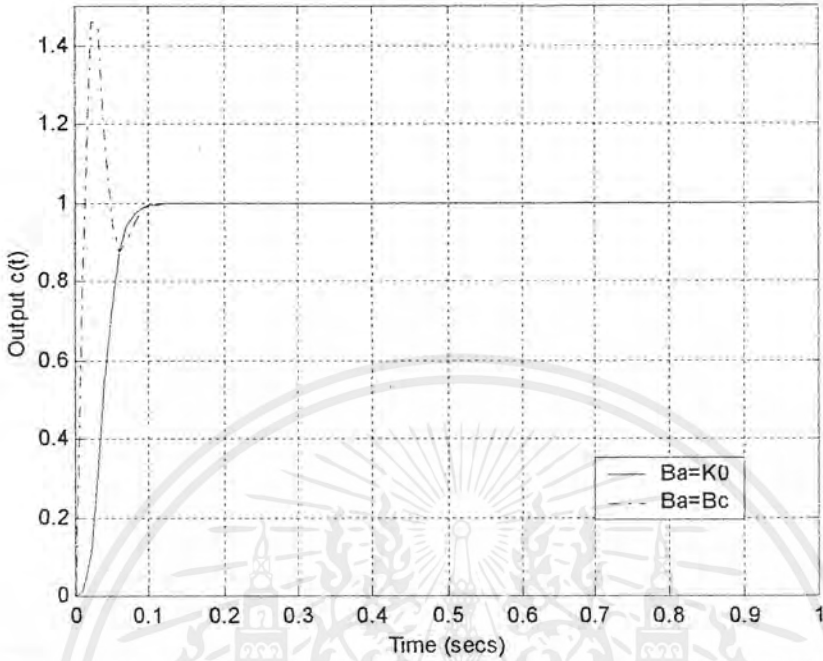
$$G_o(s) = \frac{49}{(1.00352 \times 10^{-6})s^4 + (2.5088 \times 10^{-4})s^3 + 0.03136s^2 + 1.96s + 49}$$



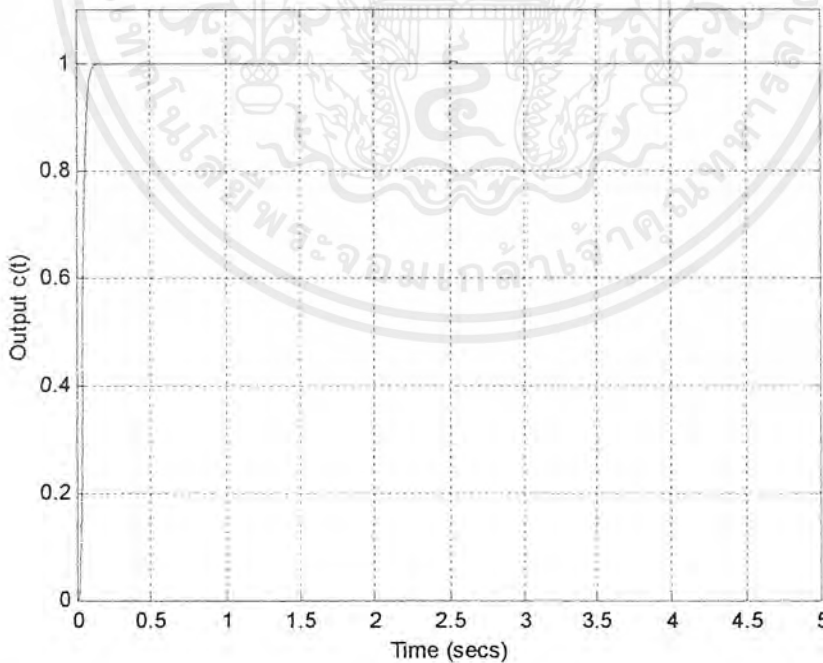
รูปที่ 3.19 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2]

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



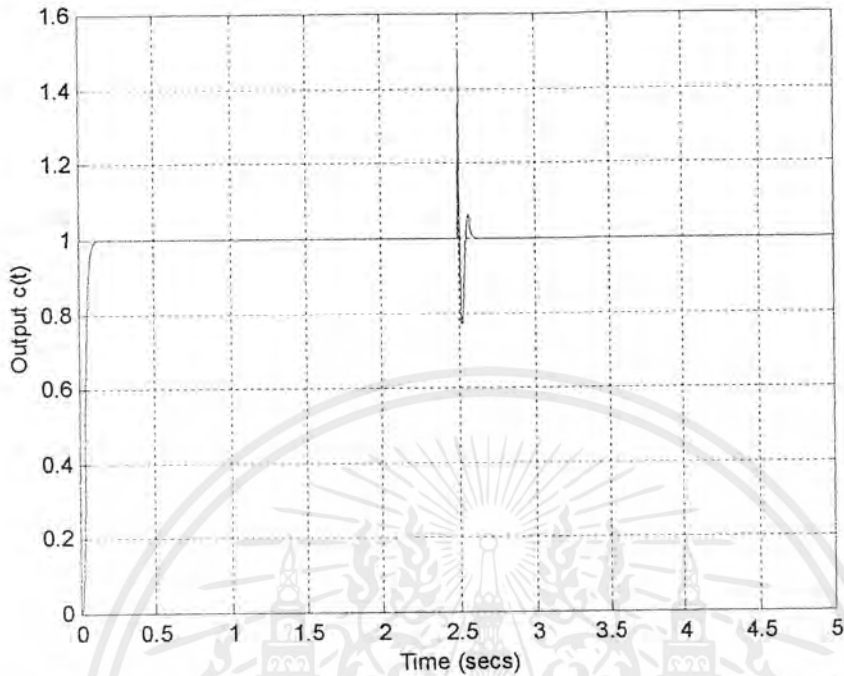
รูปที่ 3.20 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ  $[2/2]$  ต่ออินพุทแบบสเต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$



รูปที่ 3.21 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ  $[2/2]$  ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลานต์

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ  $[2/2]$  ต่ออินพุทแบบสแต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสแต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \tau = 0.04$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบตัวควบคุมแบบต่าง ๆ จะแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมได้ ดังตารางที่ 1  
 ตารางที่ 1 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบต่าง ๆ สำหรับพลาสมาด้วยระดับ 2 แบบชนิด 1

ชนิดตัวควบคุม	$\tau$ (secs)	โพลงปีตรวม	Gain Margin (dB)	Phase Margin (degrees)	Ess (%)	$t_p$ (secs)	$t_r$ (secs)	$t_s$ (secs)	$M_o$ (%)
Unity Feedback	0.6676	$-1.5 \pm 6.8374i$	Inf	24.1650 (6.686rad/s)	0	0.4590	0.1741	2.4350	50.1971
PD	0.04	$-31.25 \pm 24.2061i$	Inf	70.4324 (64.213rad/s)	0	0.1316	0.0607	0.0911	1.728
PI	1.667	$-1.1318$ $-0.9341 \pm 1.2301i$	Inf	41.7109 (1.459rad/s)	0	4.0708	1.9469	3.1858	0.9635
PID	0.04	$-47.1586$ $-38.9207 \pm 51.2522i$	-14.8787 (37.5341rad/s)	61.8818 (125.97rad/s)	0	0.0976	0.0467	0.0764	0.9634
[1/1]	0.04	$-47.1586$ $-38.9207 \pm 51.2522i$	Inf	43.0784 (59.779rad/s)	0	0.0976	0.0467	0.0764	0.9634
[2/2]	0.04	$-62.5 \pm 86.0239i$ $-62.5 \pm 20.3075i$	-12.2977 (43.546rad/s)	34.275 (116.154rad/s)	0	0.1520	0.0440	0.0840	0.0157

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 3.3 – รูปที่ 3.22 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. กรณีเป็นตัวควบคุมแบบ PD ผู้ออกแบบสามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ 1 ค่า เนื่องจากมีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่าจำนวนสมการอยู่ 1 โดยกำหนด  $\tau$  และใช้ค่าดัชนีเสถียรภาพเป็นค่ามาตรฐานของ CDM คือ  $\gamma_1 = 2.5$  เมื่อพิจารณาผลตอบสนองต่ออินพุตแบบสเต็ป ขณะที่ตัวระบบแบบสเต็ปเข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลาเน็ต จะเกิดค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวขึ้น แสดงว่าตัวควบคุมแบบ PD ไม่สามารถกำจัดค่าผิดพลาดให้หมดไปได้ แต่สามารถกำจัดตัวระบบแบบสเต็ปที่เข้ามาทางเอาต์พุตของระบบได้ สามารถพิจารณาจากทฤษฎีบทค่าสุดท้าย ( Final value Theorem ) ดังนี้

$$\lim_{s \rightarrow 0} sC(s) = s \left( \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \right) R(s) + s \left( \frac{G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \right) D_1(s) + s \left( \frac{1}{1 + G_c(s)G_p(s)} \right) D_2(s)$$

$D_1(s)$  : ตัวระบบแบบสเต็ปเข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลาเน็ต

$D_2(s)$  : ตัวระบบแบบสเต็ปเข้ามาที่เอาต์พุตของระบบ

กำหนดให้

$$R(s) = A/s$$

$$D_1(s) = B/s$$

$$D_2(s) = C/s$$

เมื่อพลาเน็ตเป็นแบบชนิด 1 และตัวควบคุมเป็นแบบชนิด 0 จะได้ว่า

$$\lim_{s \rightarrow 0} sC(s) = A + B + 0$$

2. กรณีตัวควบคุมแบบ PI พบว่าระบบสมการมีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนพารามิเตอร์แล้ว ดังนั้นจะไม่สามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ และจากระบบสมการจะได้คำตอบของสมการ 1 ชุด ในกรณีเลือกค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐาน ถ้าต้องการปรับสมรรถนะของระบบสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐาน แต่การควบคุมด้วยควบคุมแบบ PI นี้จะได้ผลตอบสนองที่ช้าและไม่สามารถทำควบคุมให้ได้ ค่าเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการได้ เพราะระบบจะไม่มีเสถียรภาพ แต่สามารถกำจัดตัวระบบแบบสเต็ปที่เข้ามาในระบบได้ โดยพิจารณาจากทฤษฎีบทค่าสุดท้าย เมื่อพลาเน็ตเป็นแบบชนิด 1 และตัวควบคุมเป็นแบบชนิด 1 จะได้ว่า

$$\lim_{s \rightarrow 0} sC(s) = A + 0 + 0$$

3. กรณีตัวควบคุมแบบ PID ผู้ออกแบบสามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ 1 ค่า เนื่องจากมีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่าจำนวนสมการอยู่ 1 โดยกำหนด  $\tau$  และใช้ค่าดัชนีเสถียรภาพเป็นค่ามาตรฐานของ CDM คือ  $\gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$  พิจารณาเสถียรภาพจาก แผนภาพโพล พบว่าค่าเกนมาริจินเป็นค่าลบ แต่ระบบที่ได้มีเสถียรภาพ ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณา แผนภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โบดอย่างเดี่ยวไม่เพียงพอ ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาเสถียรภาพแบบไนควิสต์ ( nyquist ) แล้วพบว่าระบบเสถียรและตัวควบคุมสามารถกำจัดตัวรบกวนแบบสเต็ปได้ โดยพิจารณาจากทฤษฎีบทค่าสุดท้ายเมื่อพลานต์เป็นแบบชนิด 1 และตัวควบคุมเป็นแบบชนิด 1 จะได้ว่า

$$\lim_{s \rightarrow 0} sC(s) = A + 0 + 0$$

4. กรณีตัวควบคุมแบบ [1/1] ผู้ออกแบบสามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ 2 ค่า เนื่องจากมีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่าจำนวนสมการอยู่ 2 โดยกำหนด  $\tau$  และ  $k_0$  และใช้ค่าดัชนีเสถียรภาพเป็นค่ามาตรฐานของ CDM คือ  $\gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$  เมื่อพิจารณาผลตอบสนองต่ออินพุทแบบ สเต็ป เมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปเข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลานต์ จะเกิดค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัวขึ้น แสดงว่าตัวควบคุมแบบ [1/1] ไม่สามารถกำจัด ค่าผิดพลาดให้หมดไปได้ แต่สามารถกำจัดเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปเข้ามาที่เอาต์พุทของระบบได้ สามารถพิจารณาจากทฤษฎีบทค่าสุดท้าย เมื่อพลานต์เป็นแบบชนิด 1 และตัวควบคุมเป็นแบบชนิด 0 จะได้ว่า

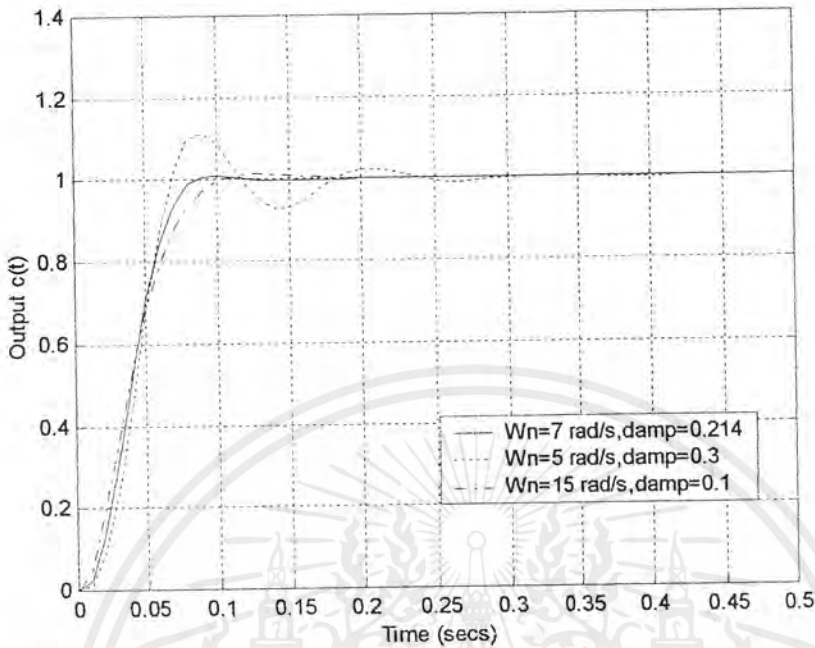
$$\lim_{s \rightarrow 0} sC(s) = A + B + 0$$

5.กรณีตัวควบคุมแบบ [2/2] ผู้ออกแบบสามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ 2 ค่า เนื่องจากมีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่าจำนวนสมการอยู่ 2 โดยกำหนด  $\tau$  และ  $k_0$  และใช้ค่าดัชนีเสถียรภาพเป็นค่ามาตรฐานของ CDM คือ  $\gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$  พิจารณาเสถียรภาพจาก แผนภาพโบด พบว่าค่าเกนมารีจิ้นเป็นค่าลบ แต่ระบบที่ได้มีเสถียรภาพ ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณาแผนภาพโบด อย่างเดี่ยวไม่เพียงพอ ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาเสถียรภาพแบบ ไนควิสต์ แล้วพบว่าระบบเสถียร และตัวควบคุมสามารถกำจัดตัวรบกวนแบบสเต็ปได้ เนื่องจากกำหนดให้  $I_0 = 0$  เพื่อให้ตัวควบคุมเป็นแบบชนิด 1 โดยพิจารณาจากทฤษฎีบทค่าสุดท้าย เมื่อพลานต์เป็นแบบชนิด 1 และตัวควบคุมเป็นแบบชนิด 1 จะได้ว่า

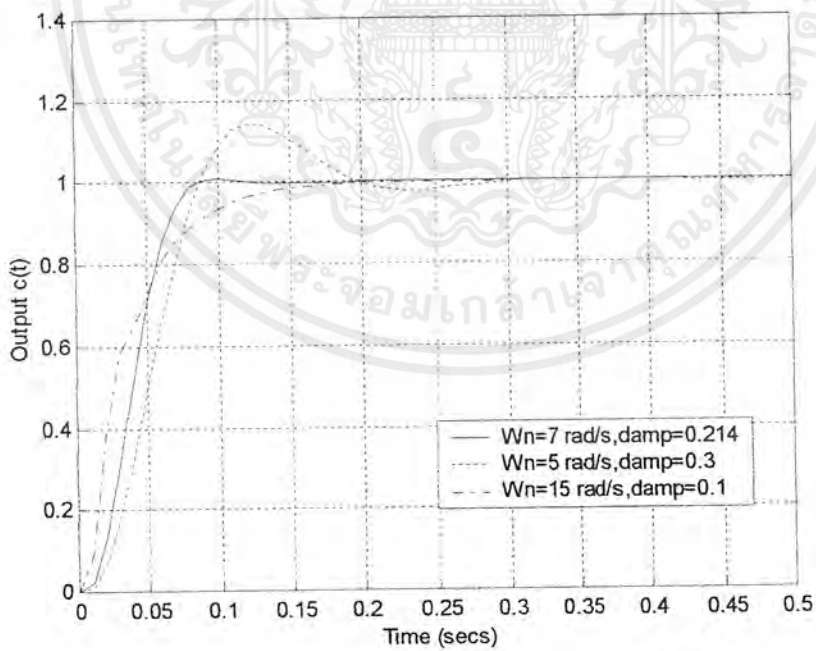
$$\lim_{s \rightarrow 0} sC(s) = A + 0 + 0$$

จากผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมที่ได้จากการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID และตัวควบคุมแบบ [1/1] ได้สมรรถนะของระบบที่เหมือนกันสำหรับผลตอบสนองเชิงเวลา และใกล้เคียงกับการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ [2/2] ในการพิจารณาเลือกตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับพลานต์นั้น นอกจากสมรรถนะข้างต้น ยังต้องพิจารณาความคงทนของระบบที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมทั้ง 3 แบบ เมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 3.23 – รูปที่ 3.25 ซึ่งจะเห็นว่าตัวควบคุมแบบ PID มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของพลานต์ได้ดีที่สุด และจากแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ในรูปที่ 3.26 แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของระบบมีความสัมพันธ์กับลักษณะของกราฟค่าสัมประสิทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

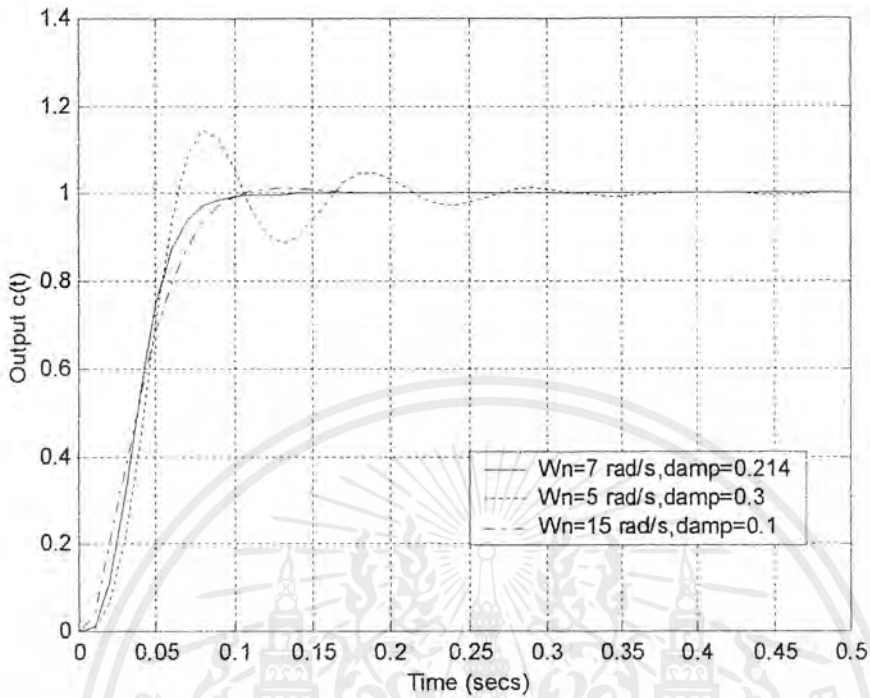


รูปที่ 3.23 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุตแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์เปลี่ยนแปลง

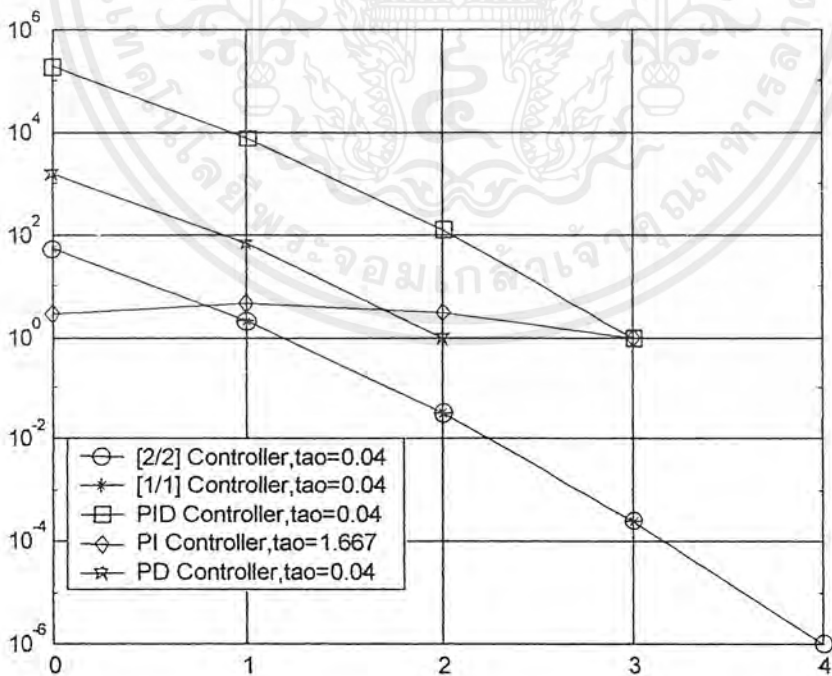


รูปที่ 3.24 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [1/1] ต่ออินพุตแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.26 แสดงแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบอันดับ 2 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การทดลองที่ 2

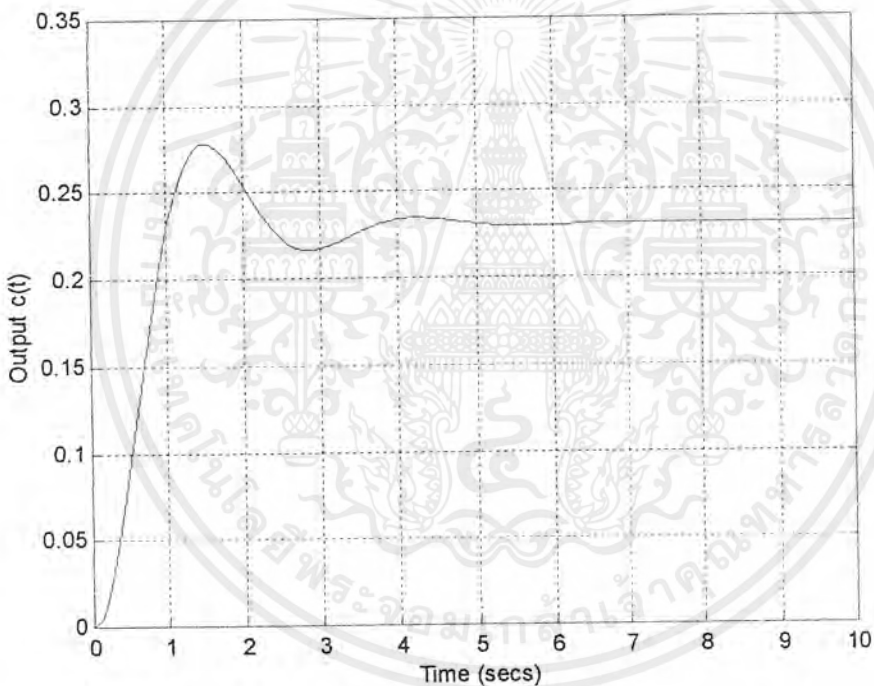
กำหนดให้ข้อกำหนดสมรรถนะสำหรับการออกแบบตัวควบคุม ที่ทำให้ระบบควบคุมมีค่าเวลาเข้าที่ที่ 2% คือ  $t_s \leq 2$  วินาที

สำหรับพลาเน็ตอันดับ 3 แบบชนิด 0 มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

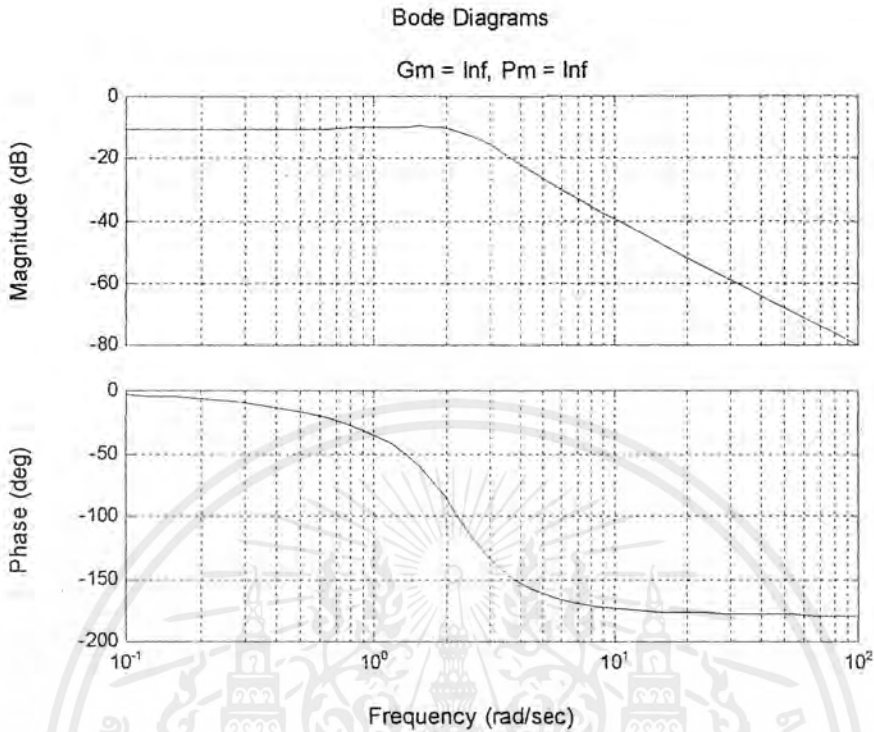
$$G_p(s) = \frac{(s+3)}{(s^3 + 4s^2 + 9s + 10)}$$

$$B_p(s) = (s+3)$$

$$A_p(s) = (s^3 + 4s^2 + 9s + 10)$$



รูปที่ 3.27 ผลตอบสนองของของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่ควบคุมแบบป้อนกลับหมด ต่ออินพุทแบบสเต็ป



รูปที่ 3.28 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่ควบคุมแบบป้อนกลับหมด

กรณีที่ 1. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ PI จากสมการ (2.1) และ (2.2) จะได้

$$G_c(s) = \frac{k_1 s + k_0}{s}$$

$$B_c(s) = k_1 s + k_0$$

$$A_c(s) = s$$

$$G(s) = \left( \frac{k_1 s + k_0}{s} \right) \times \left( \frac{s + 3}{s^3 + 4s^2 + 9s + 10} \right)$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)$$

$$= s(s^3 + 4s^2 + 9s + 10) + (k_1 s + k_0)(s + 3)$$

$$= s^4 + 4s^3 + (k_1 + 9)s^2 + (3k_1 + k_0 + 10)s + 3k_0$$

จะได้สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$a_4 = a_0 \tau^4 / \gamma_3 \gamma_2^2 \gamma_1^3 = 1$$

$$a_3 = a_0 \tau^3 / \gamma_2 \gamma_1^2 = 4$$

$$a_2 = a_0 \tau^2 / \gamma_1 = k_1 + 9$$

$$a_1 = a_0 \tau = 3k_1 + k_0 + 10$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_0 = 3k_0$$

ขั้นตอนการออกแบบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลาเน็ต โดยใช้ค่ามาตรฐานของ CDM ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

$$\gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

เนื่องจากระบบสมการมีจำนวนตัวไม่ทราบค่าจำนวน 4 ตัวคือ  $a_0, \tau, k_0$  และ  $k_1$  ซึ่งน้อยกว่าจำนวนสมการ ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มตัวแปรให้กับระบบสมการคือ  $\gamma_3$  ซึ่งผลเฉลยของระบบสมการจะให้ค่า  $k_1$  เป็นลบ ตัวควบคุมที่ได้จะไม่เสถียร กล่าวคือมีซีโรไม่เสถียร (unstable zero)

ขั้นตอนที่ (2) ทำการเพิ่มตัวแปรให้แกระบบสมการเพื่อให้สามารถกำหนดค่า  $\tau$  ได้ เลือกกำหนดค่า  $\gamma_2$  จากการทดลองพบว่าตัวควบคุมจะไม่เสถียรไม่ว่าจะทำการกำหนดค่า  $\tau$  เท่าไรก็ตาม โดยที่  $\tau > 1.8$  ค่า  $k_1$  ที่ได้จะเป็นลบ ตัวควบคุมที่ได้จะไม่เสถียร และถ้า  $\tau \leq 1.8$  ค่า  $\gamma_2$  และ  $\gamma_3$  ที่ได้จะขัดแย้งกับเงื่อนไขข้อเท็จจริงสำหรับความมีเสถียรภาพของตัวควบคุม จึงสรุปได้ว่า ตัวควบคุมแบบ PI ไม่เหมาะสำหรับการควบคุมระบบที่มีพลาเน็ตตามตัวอย่างนี้

กรณีที่ 2. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ PID จากสมการ (2.1) และ (2.2) จะได้

$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s}$$

$$B_c(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0$$

$$A_c(s) = s$$

$$G(s) = \left( \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s} \right) \times \left( \frac{s + 3}{s^3 + 4s^2 + 9s + 10} \right)$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= s(s^3 + 4s^2 + 9s + 10) + (k_2 s^2 + k_1 s + k_0)(s + 3) \\ &= s^4 + (k_2 + 4)s^3 + (3k_2 + k_1 + 9)s^2 + (3k_1 + k_0 + 10)s + 3k_0 \end{aligned}$$

จะได้สัมประสิทธิ์โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$a_4 = a_0 \tau^4 / \gamma_3 \gamma_2^2 \gamma_1^3 = 1$$

$$a_3 = a_0 \tau^3 / \gamma_2 \gamma_1^2 = k_2 + 4$$

$$a_2 = a_0 \tau^2 / \gamma_1 = 3k_2 + k_1 + 9$$

$$a_1 = a_0 \tau = 3k_1 + k_0 + 10$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_0 = 3k_0$$

ขั้นตอนการออกแบบมีดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลาเน็ต โดยใช้ค่ามาตรฐานของวิธี CDM ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

$$\gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

เนื่องจากระบบสมการมีจำนวนตัวไม่ทราบค่าเท่ากับจำนวนสมการ ดังนั้น  $\tau$  จึงเป็นผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณ ไม่สามารถกำหนดได้ตามต้องการ

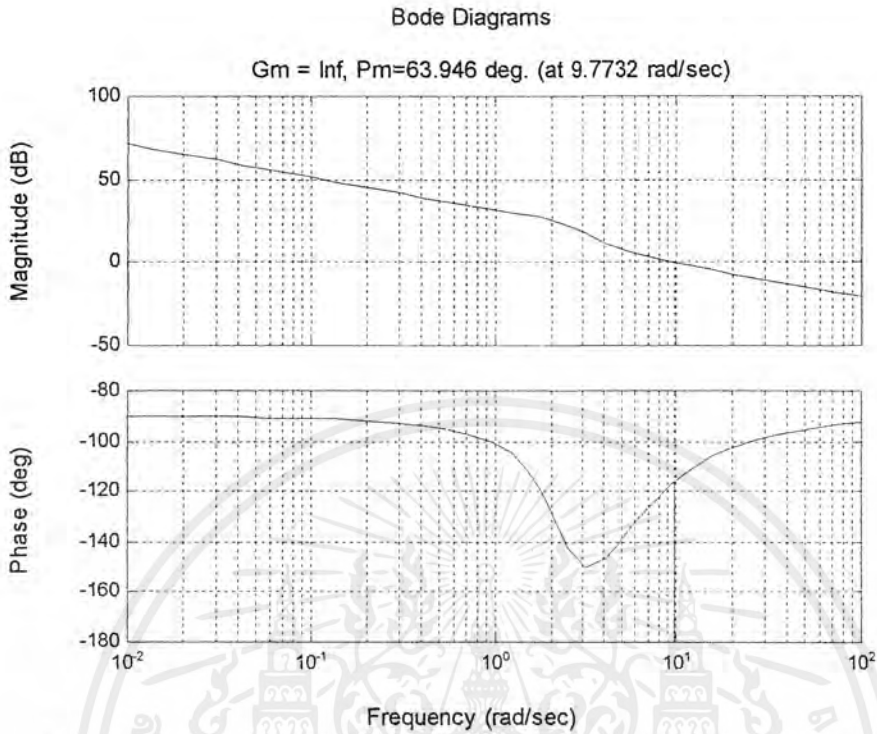
ขั้นตอนที่ (2) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วย CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุม PID แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐาน จะได้ตัวควบคุมดังนี้

$$G_c(s) = \frac{9.037s^2 + 48.870s + 120.362}{s}$$

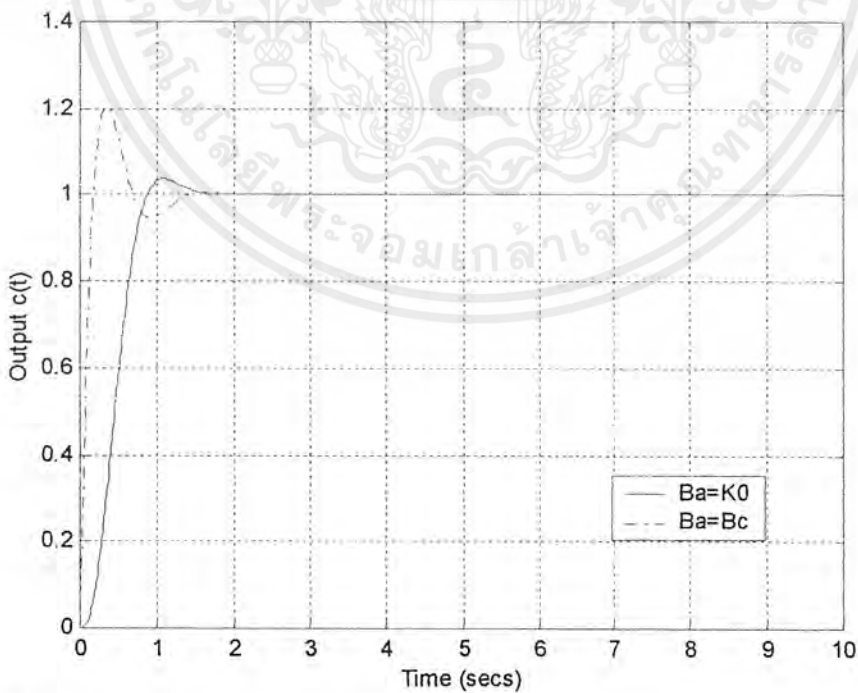
ขั้นตอนที่ (3) เนื่องจากค่า  $k_0 = 120.326$  ดังนั้นค่า  $B_a(s) = 120.326$  ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ

$$G_0(s) = \frac{120.362(s+3)}{s^4 + 13.037s^3 + 84.981s^2 + 276.971s + 361.085}$$

นำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองเมื่อป้อนอินพุตแบบสเต็ป และแผนภาพโบท โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.29 – รูปที่ 3.32



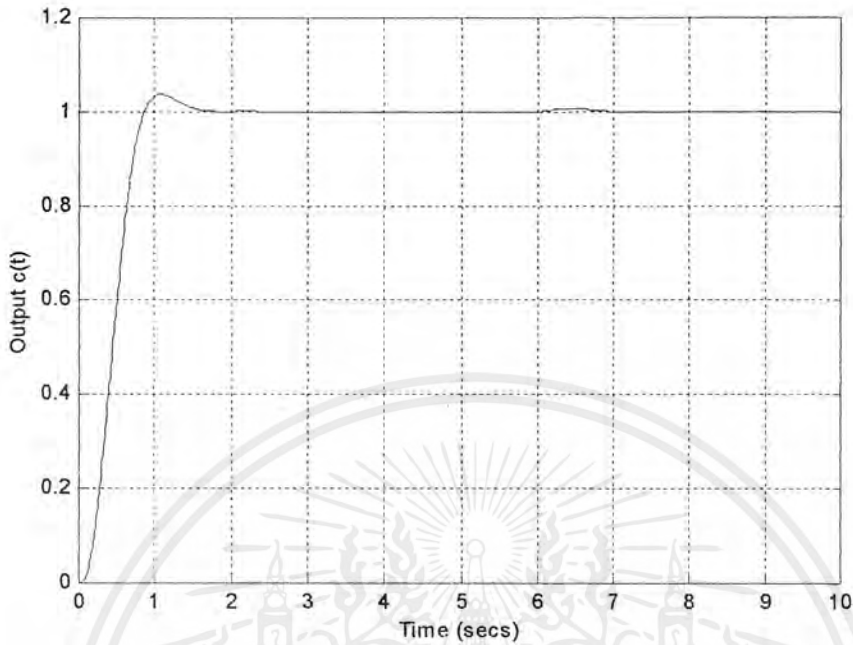
รูปที่ 3.29 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID  
 $\gamma_3 = \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5, \tau = 0.7671$



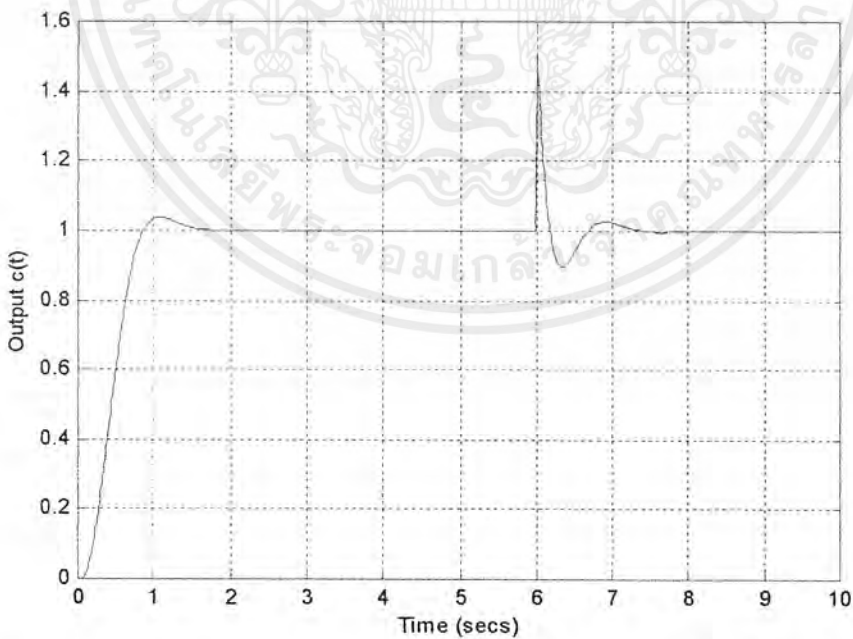
รูปที่ 3.30 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID

ต่ออินพุทแบบสเต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \tau = 0.7671$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลานต์ ;  
 $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \tau = 0.7671$



รูปที่ 3.32 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ ;  $\gamma_1 = 2.5,$   
 $\gamma_2 = \gamma_3 = 2, \tau = 0.7671$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

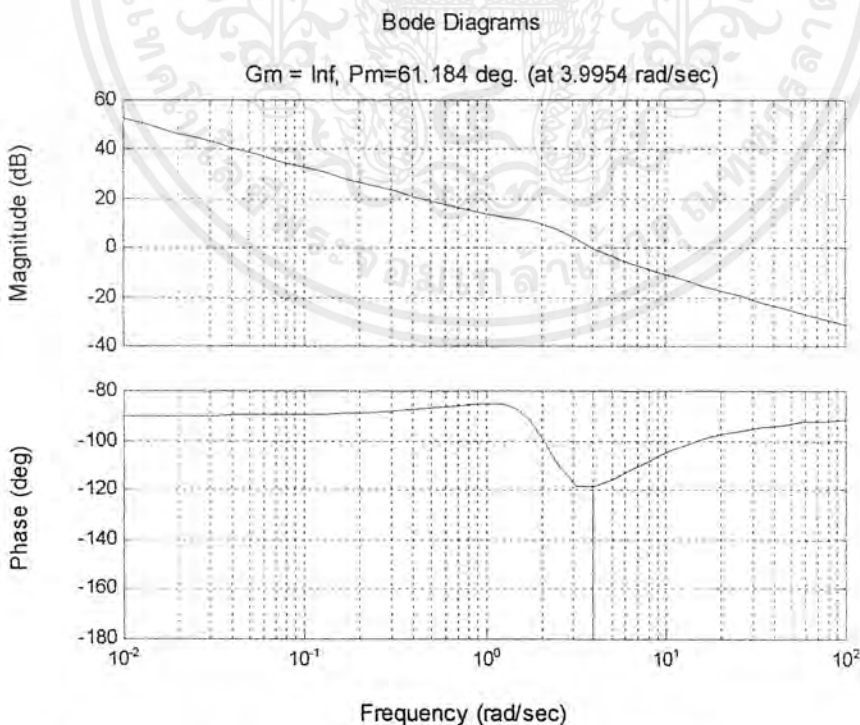
จากระบบสมการที่ใช้ในการคำนวณจะเห็นว่า ถ้าต้องการกำหนดค่า  $r$  โดยให้ค่า  $\gamma_3$  เป็นตัวแปรที่เพิ่มเข้ามา จะทำให้ระบบมีสมรรถนะเป็นไปตามความต้องการของผู้ออกแบบได้ดีขึ้น เช่นกรณีที่ระบบไม่ต้องการค่าพุ่งเกินเลย และต้องการค่า  $r_s$  ประมาณ 2 วินาที ต้องกำหนดค่า  $r$  เท่ากับ 1.24 และค่า  $\gamma_3$  เท่ากับ 1.6548 ซึ่งค่า  $\gamma_3$  ที่ได้ก็ยังอยู่ในเงื่อนไขของการกำหนดเลือกค่า  $\gamma_i$  ที่เสถียร จะเห็นว่าเมื่อมีตัวรบกวน ระบบใหม่นี้จะใช้เวลามากกว่าในการกำจัดตัวรบกวน เมื่อเทียบกับค่า  $\gamma_i$  มาตรฐาน ตัวควบคุมที่ออกแบบนี้คือ

$$G_c(s) = \frac{2.673s^2 + 9.888s + 14.582}{s}$$

เนื่องจากค่า  $k_0 = 14.582$  ดังนั้นค่า  $B_u(s) = 14.582$  ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดแสดงได้ดังนี้

$$G_0(s) = \frac{14.582(s+3)}{s^4 + 6.6727s^3 + 26.906s^2 + 54.246s + 43.747}$$

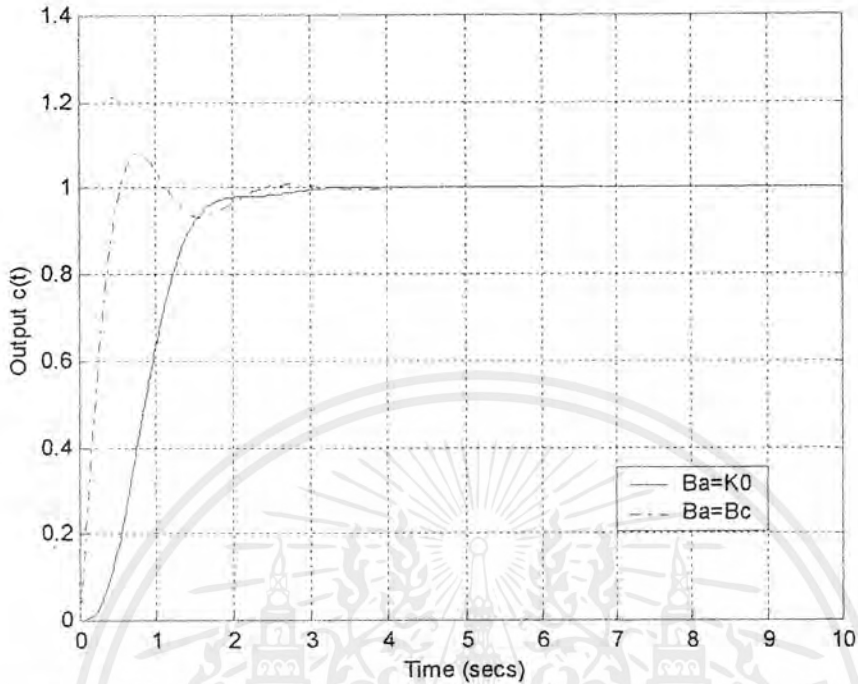
นำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองเมื่อป้อนอินพุทแบบลัดเตีปี และแผนภาพโบด โดยใช้โปรแกรม MATLAB จะได้ผลดังรูปที่ 3.33 – รูปที่ 3.36



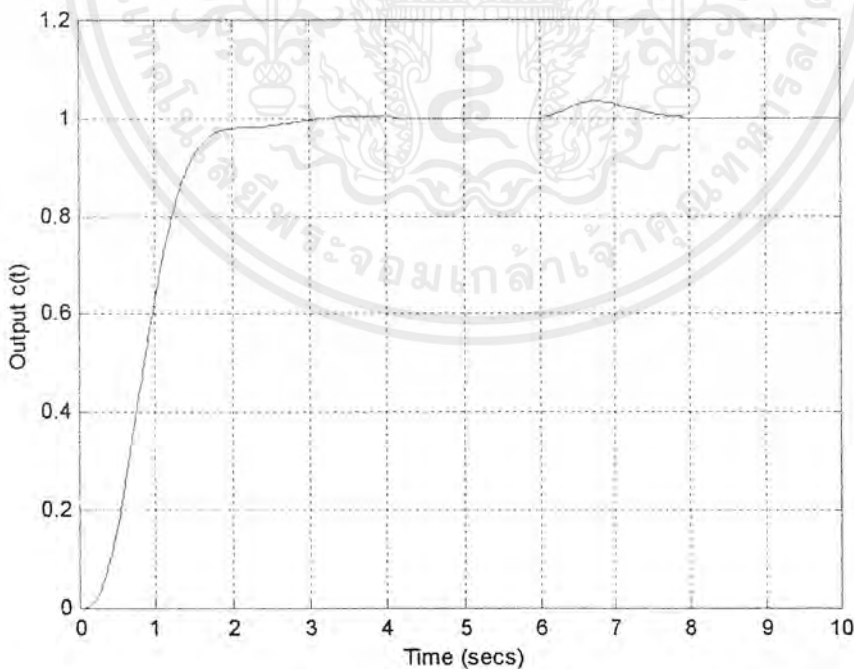
รูปที่ 3.33 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.6548, r = 1.24$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



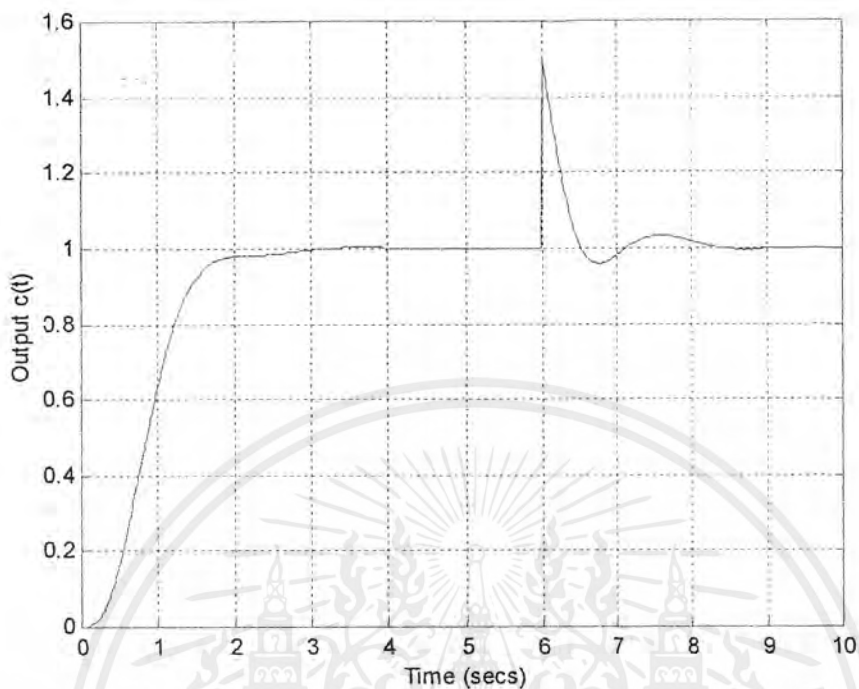
รูปที่ 3.34 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุตแบบสเต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.6548, \tau = 1.24$



รูปที่ 3.35 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุตแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลานต์

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.6548, \tau = 1.24$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.36 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ ;  $\gamma_1 = 2.5$ ,  
 $\gamma_2 = 2$ ,  $\gamma_3 = 1.6548$ ,  $\tau = 1.24$

กรณีที่ 3. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ [2/2] จากสมการ(2.1) และ (2.2) กำหนด  $l_0 = 0$  จะได้

$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_2 s^2 + l_1 s + l_0}$$

$$B_c(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0$$

$$A_c(s) = l_2 s^2 + l_1 s + l_0$$

$$G(s) = \left( \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_2 s^2 + l_1 s + l_0} \right) \times \left( \frac{s+3}{s^3 + 4s^2 + 9s + 10} \right)$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)$$

$$= (l_2 s^2 + l_1 s + l_0)(s^3 + 4s^2 + 9s + 10) + (k_2 s^2 + k_1 s + k_0)(s + 3)$$

$$= l_2 s^5 + (4l_2 + l_1)s^4 + (9l_2 + 4l_1 + l_0 + k_2)s^3 + (10l_2 + 9l_1 + 4l_0 + 3k_2 + k_1)s^2$$

$$+ (10l_1 + 9l_0 + 3k_1 + k_0)s + 3k_0 + 10l_0$$

จะได้สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$a_5 = a_0 \tau^5 / \gamma_4 \gamma_3^2 \gamma_2^3 \gamma_1^4 = l_2$$

$$a_4 = a_0 \tau^4 / \gamma_3 \gamma_2^2 \gamma_1^3 = 4l_2 + l_1$$

$$a_3 = a_0 \tau^3 / \gamma_2 \gamma_1^2 = 9l_2 + 4l_1 + l_0 + k_2$$

$$a_2 = a_0 \tau^2 / \gamma_1 = 10l_2 + 9l_1 + 4l_0 + 3k_2 + k_1$$

$$a_1 = a_0 \tau = 10l_1 + 9l_0 + 3k_1 + k_0$$

$$a_0 = 3k_0 + 10l_0$$

ขั้นตอนการออกแบบมีดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลาเน็ต โดยใช้ค่ามาตรฐานของวิธี CDM ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

$$\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

ขั้นตอนที่ (2) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ [2/2] ด้วย CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุม แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐาน จะได้ตัวควบคุมดังนี้

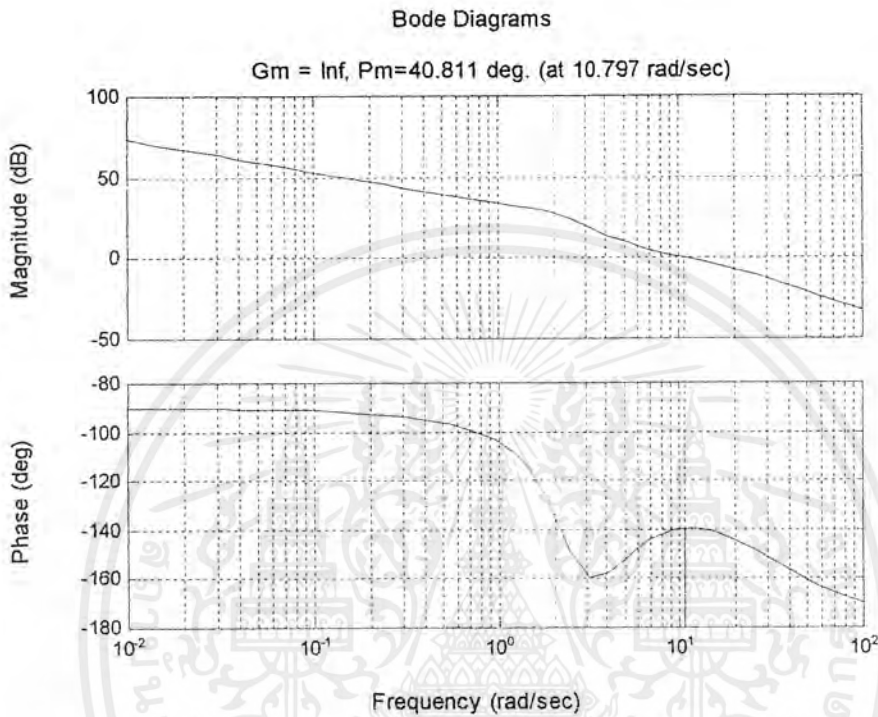
$$G_c(s) = \frac{1.466s^2 + 7.934s + 20}{0.00576s^2 + 0.1302s}$$

ขั้นตอนที่ (3) เนื่องจากค่า  $k_0 = 20$  ดังนั้นค่า  $B_g(s) = 20$  ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ

$$G_o(s) = \frac{20(s+3)}{0.00576s^5 + 0.153s^4 + 2.039s^3 + 13.563s^2 + 45.105s + 60}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

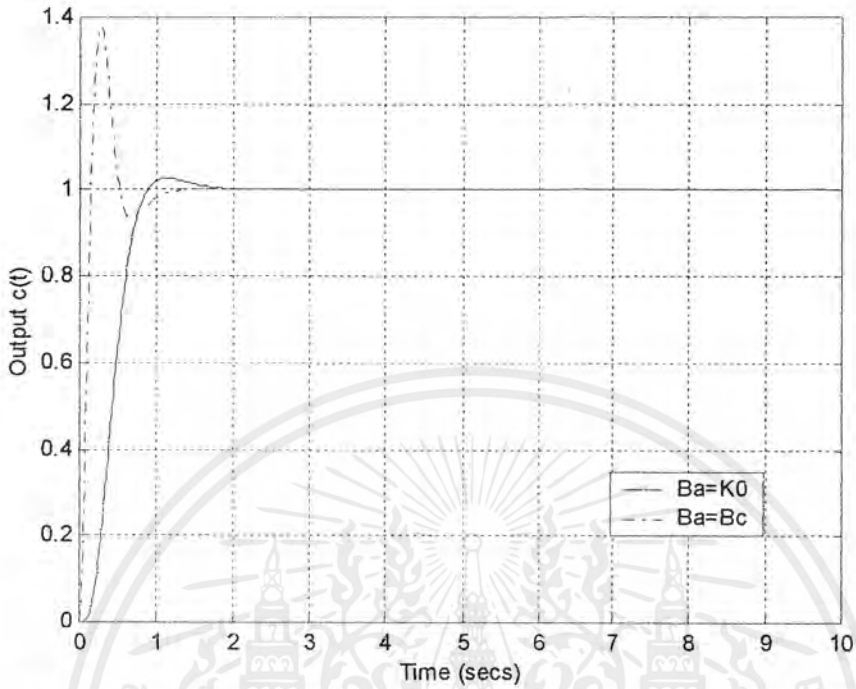
นำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองเมื่อป้อนอินพุทแบบสเต็ป และแผนภาพโบด โดยใช้โปรแกรม MATLAB จะได้ผลดังรูปที่ 3.37 – รูปที่ 3.40



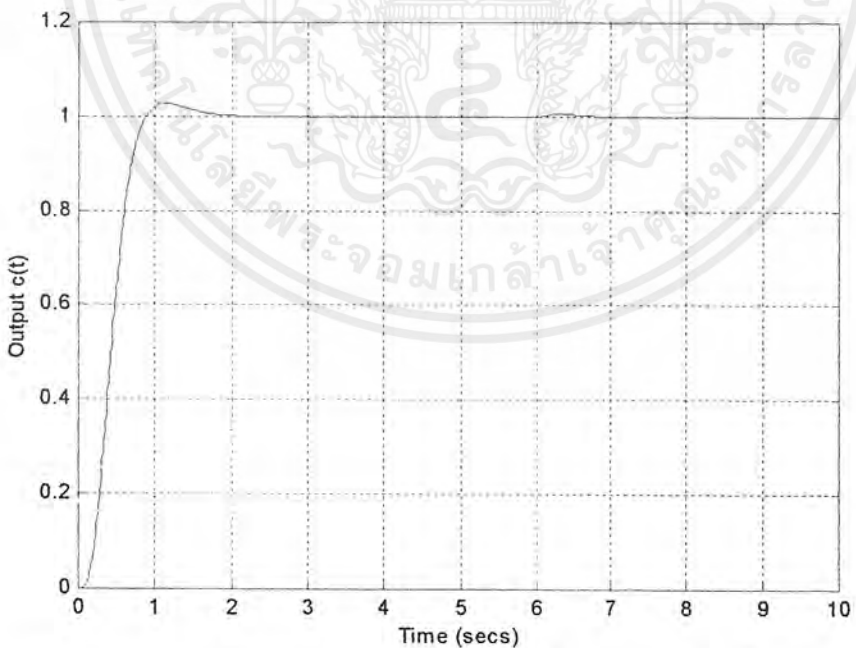
รูปที่ 3.37 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2]

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 2, \tau = 0.7517$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



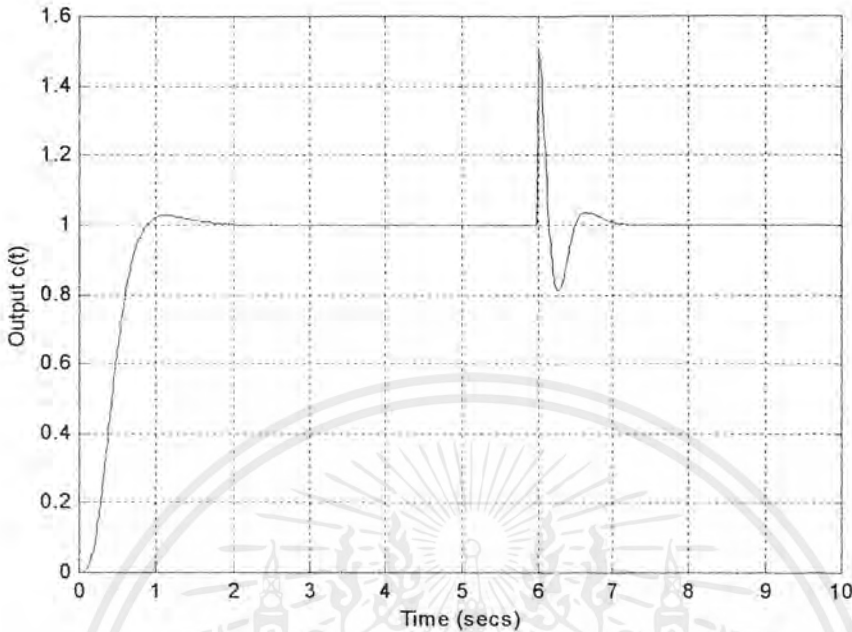
รูปที่ 3.38 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 2, \tau = 0.7517$



รูปที่ 3.39 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลานต์

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 2, \tau = 0.7517$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.40 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสแต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสแต็ปขนาด 0.5 ที่เอาท์พุทของระบบ ;  $\gamma_1 = 2.5$ ,

$$\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 2, \tau = 0.7517$$

กรณีต้องการให้ระบบมีค่าพุงเกินลดลง ทำการปรับค่า  $\gamma_4$  และ  $\gamma_3$  ได้คือ  $[\gamma_4 \ \gamma_3] = [2.3 \ 1.7]$  ตัวควบคุมที่ออกแบบใหม่นี้แสดงได้คือ

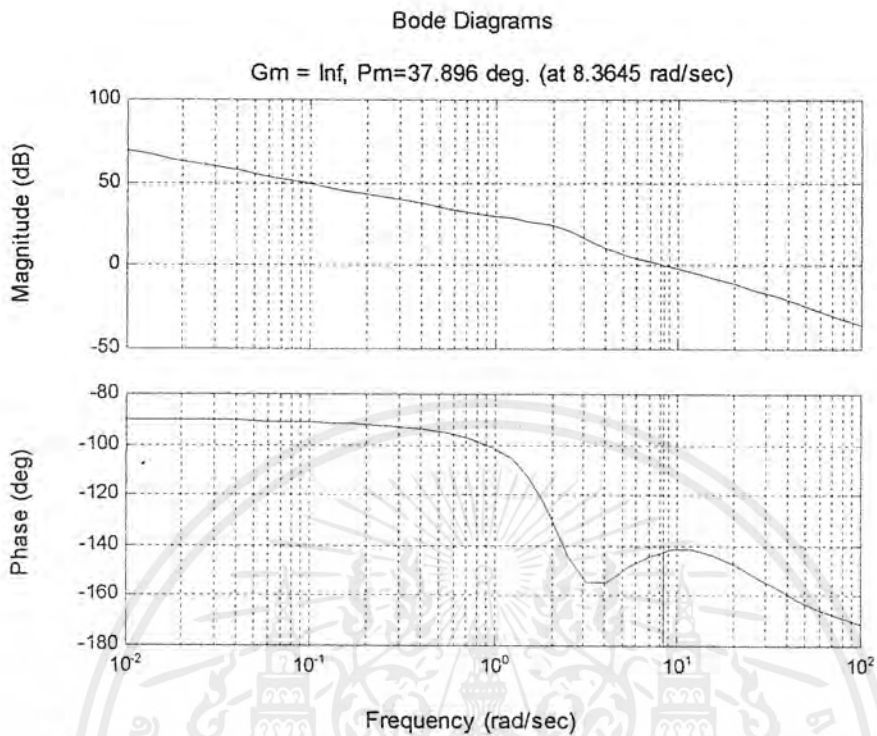
$$G_c(s) = \frac{1.6835s^2 + 8.9704s + 20}{0.0105s^2 + 0.2093s}$$

เนื่องจากค่า  $k_0 = 20$  ดังนั้นค่า  $B_u(s) = 20$  ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดแสดงได้ดังนี้

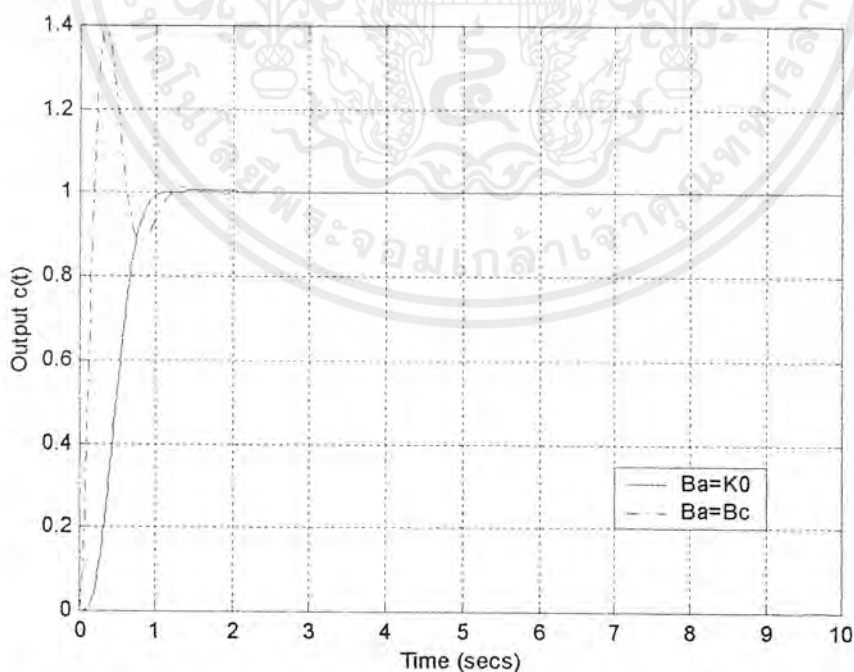
$$G_0(s) = \frac{20(s+3)}{0.01049s^5 + 0.2513s^4 + 2.615s^3 + 16.009s^2 + 49.004s + 60}$$

นำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองเมื่อป้อนอินพุทแบบสแต็ป

และแผนภาพโบลด์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB จะได้ผลดังรูป 3.41 - รูปที่ 3.44



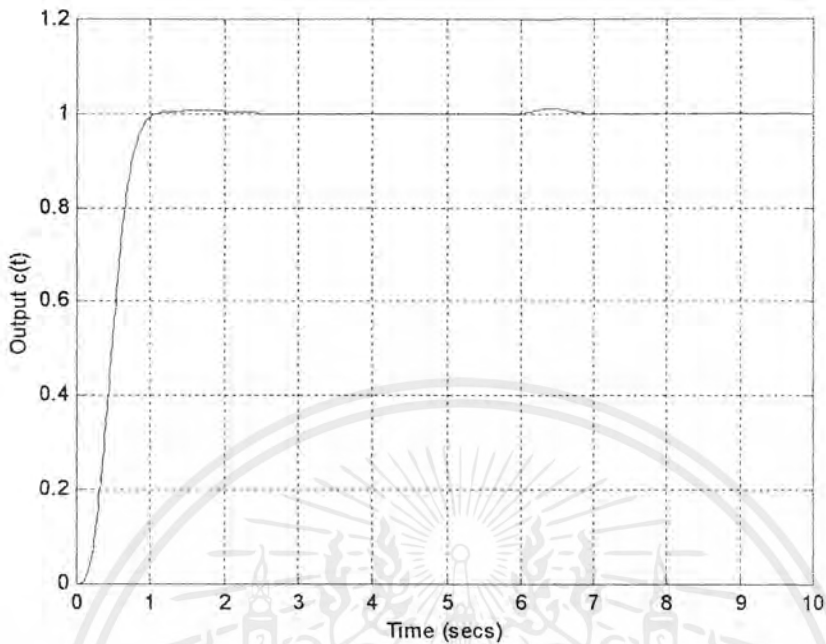
รูปที่ 3.41 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2]  
 $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.7, \gamma_4 = 2.3, \tau = 0.8167$



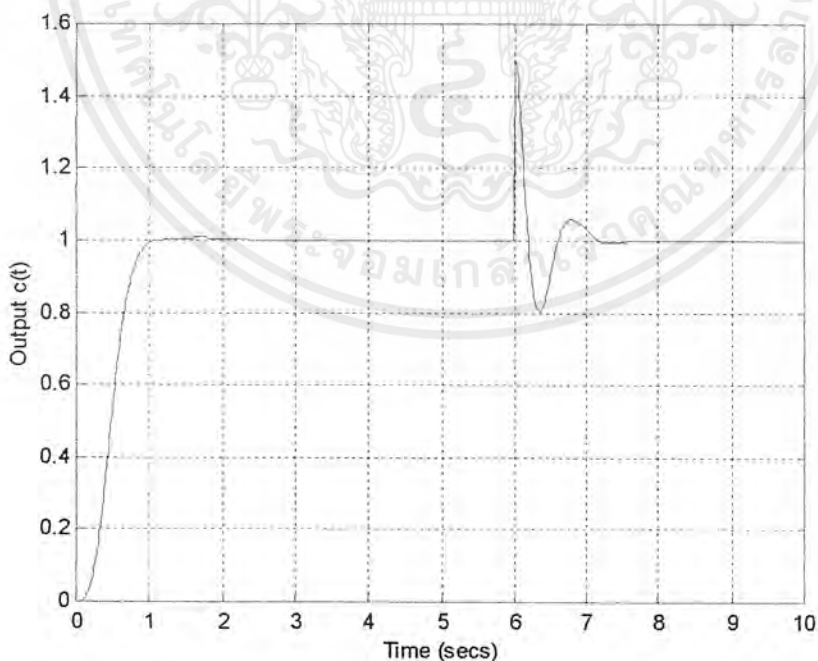
รูปที่ 3.42 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2]

ต่ออินพุตแบบสเต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.7, \gamma_4 = 2.3, \tau = 0.8167$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.43 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุตแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลานต์  
 $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.7, \gamma_4 = 2.3, \tau = 0.8167$



รูปที่ 3.44 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุตแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุตของระบบ ;  $\gamma_1 = 2.5,$

$$\gamma_2 = 2, \gamma_3 = 1.7, \gamma_4 = 2.3, \tau = 0.8167$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบตัวควบคุมแบบต่าง ๆ จะแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมได้ ดังตารางที่ 2 ตารางที่ 2 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID และ [2/2] เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีเสถียรภาพ

สำหรับพลาสมาชั้นดับ 3 แบบชนิด 0

ชนิดของตัวควบคุม	$\gamma_i$	โพลาไรซ์รวม	$\tau$	Gain Margin (dB)	Phase Margin (degrees)	Ess (%)	$t_p$ (secs)	$t_r$ (secs)	$t_s$ (secs)	$M_0$ (%)
PID	[ 2 2 2.5 ]	-3.2592 ± 1.0599i -3.2592 ± 4.4859i	0.7671	Inf	63.946 ( 9.77321 rad/s )	0	1.0526	0.5263	1.2865	3.7389
PID	[ 1.6548 2 2.5 ]	-1.5807 ± 3.1192i -1.7557 ± 0.7038i	1.2400	Inf	61.184 ( 3.9953 rad/s )	0	3.6	1	2	0.2369
[ 2/2 ]	[ 2 2 2 2.5 ]	-4.0186 ± 2.3468i -7.3919 ± 8.511i -3.7837	0.7517	Inf	40.8115 ( 10.7972 rad/s )	0	1.12	0.48	1.36	2.7813
[ 2/2 ]	[ 2.3 1.7 2 2.5 ]	-2.9894 ± 1.1752i -3.7516 ± 6.2382i -10.4549	0.8167	Inf	37.8959 ( 8.3645 rad/s )	0	1.72	0.48	0.92	0.6779

จากการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบอันดับ 3 ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะได้ดังตารางที่ 2 และสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

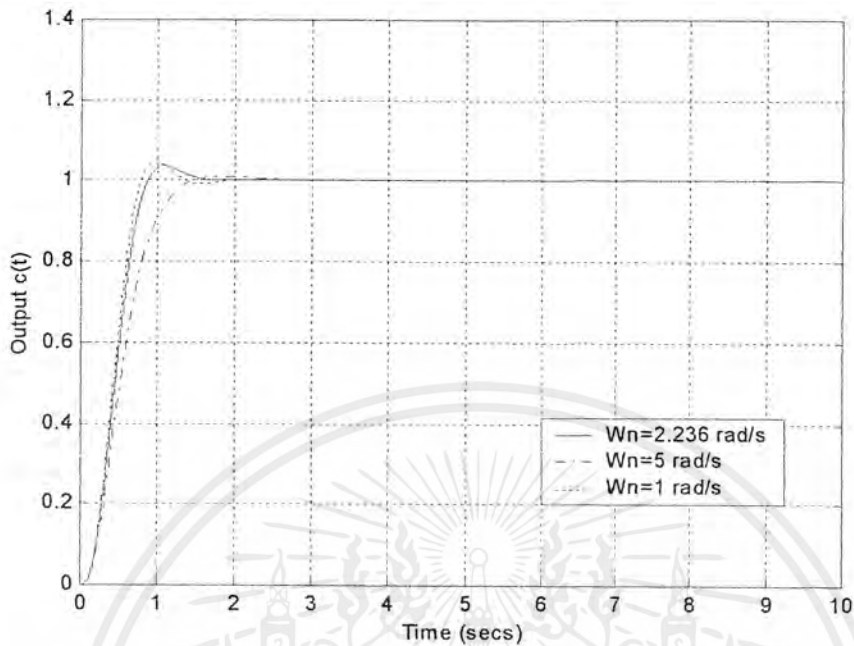
1.) ตัวควบคุมแบบ PI ไม่เหมาะสำหรับการควบคุมระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีซีโร 1 ตัว ยกตั้งเช่นการทดลองที่ 3.1.2 เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาในขั้นตอนการทดลองแล้ว คือ ตัวควบคุมแบบ PI ที่คำนวณได้นั้นไม่มีเสถียรภาพ

2.) จากตารางที่ 2 สามารถสรุปได้ดังนี้

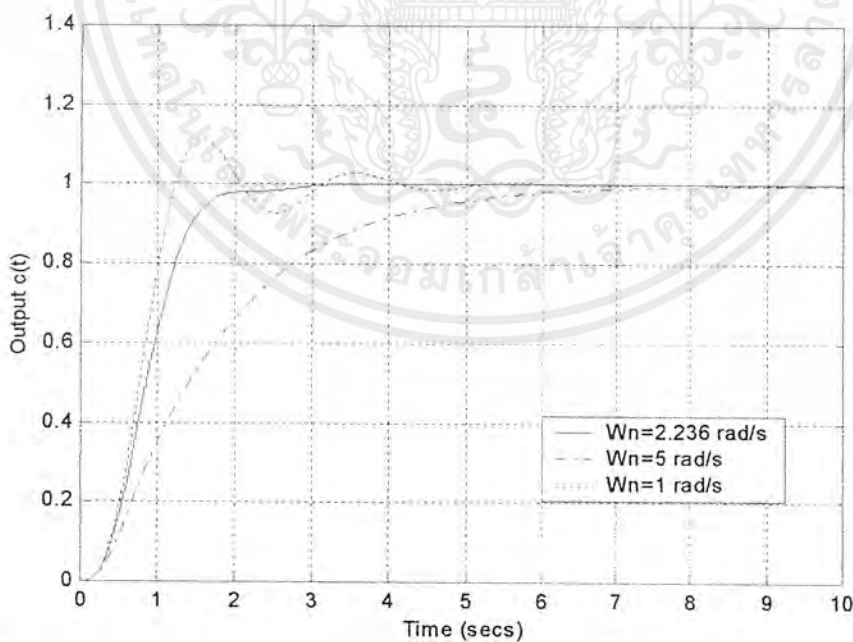
พิจารณาที่ค่า  $\gamma_i$  มาตรฐาน พบว่าตัวควบคุมแบบ PID จะมีค่า  $t_s$  น้อยกว่าตัวควบคุมแบบ [2/2] แต่มีค่าพุ่งเกินมากกว่า ดังนั้นการพิจารณาว่าตัวควบคุมใดให้ผลที่ดีกว่ากันนั้น จึงขึ้นอยู่กับว่าต้องการสมรรถนะใดของระบบเป็นหลัก ถ้าต้องการให้ระบบมีค่าพุ่งเกินน้อยที่สุดก็ควรที่จะเลือกใช้ตัวควบคุมแบบ [2/2] แต่ถ้าต้องการระบบที่มีค่า  $t_s$  น้อย ๆ ตัวควบคุมแบบ PID ดูจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่า แต่โดยรวมแล้วถือว่าตัวควบคุมทั้งสองทำให้ระบบมีสมรรถนะใกล้เคียงกัน เนื่องจากใช้ค่า  $\gamma_i$  มาตรฐาน ในการออกแบบเหมือนกัน

ในการออกแบบตัวควบคุมแบบ [2/2] นั้น ต้องทำการกำหนดค่า  $I_0$  เป็นศูนย์ เนื่องจากต้องการกำจัดค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวหลังจากมีตัวรบกวนเข้ามาในระบบ

พิจารณาการปรับค่า  $\gamma_i$  ในกรณีที่ต้องการลดค่าพุ่งเกินและกำหนดค่า  $\tau$  เพื่อที่จะให้ได้ค่า  $t_s$  ตามต้องการ จะทำให้ค่าเฟสmarginลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความคงทนของระบบลดลง การพิจารณาความคงทนของระบบจะทำการพิจารณาผลตอบสนองของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของพลานต์ ดังรูปที่ 3.45 ถึงรูปที่ 3.48 จะเห็นว่าที่ค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐานจะทำให้ระบบควบคุมมีความคงทนมากกว่า ส่วนรูปที่ 3.49 เป็นการแสดงกราฟค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งใช้ในการอธิบายสมรรถนะของระบบ

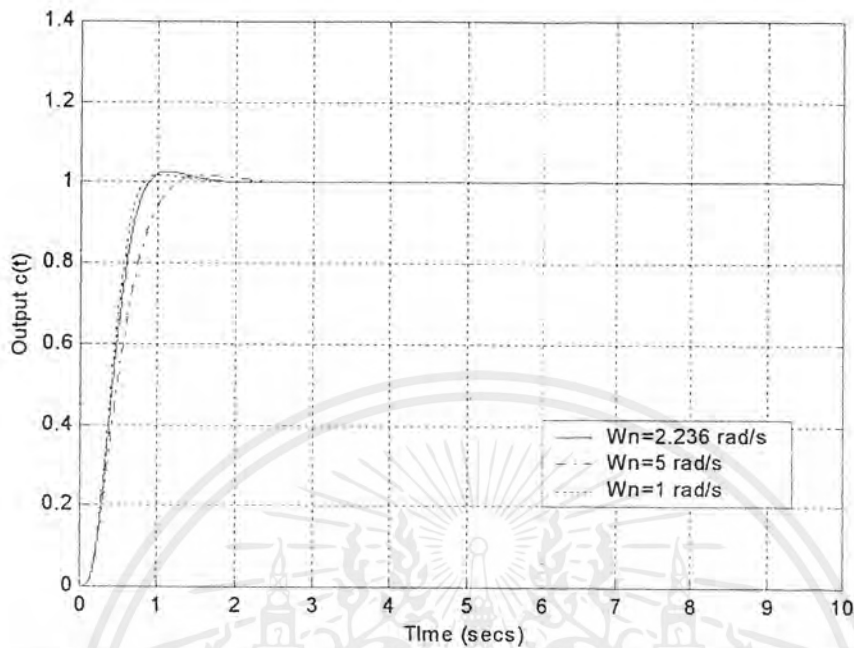


รูปที่ 3.45 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ป เมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์เปลี่ยนแปลง กำหนดค่า  $\gamma$ , มาตรฐาน

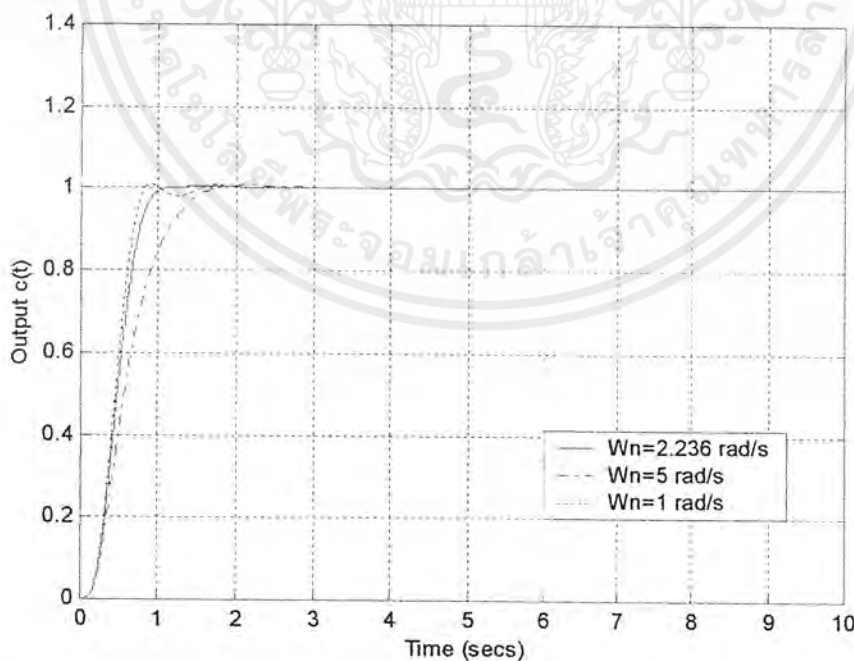


รูปที่ 3.46 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ป เมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์เปลี่ยนแปลง โดยมีการปรับค่า  $\gamma_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



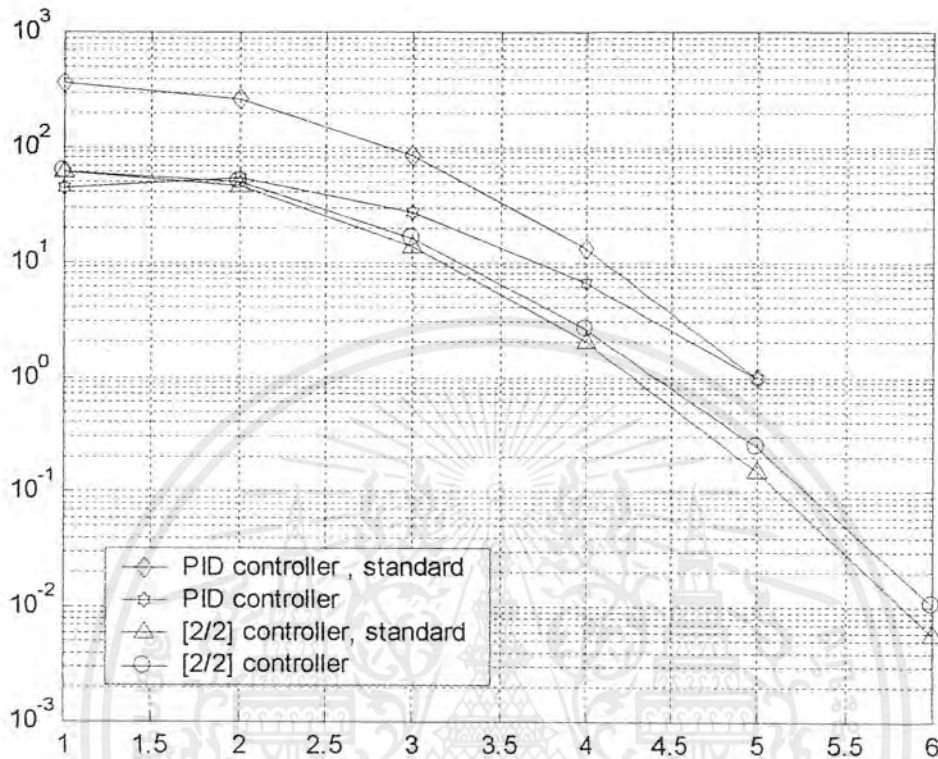
รูปที่ 3.47 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ป เมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์เปลี่ยนแปลง กำหนดค่า  $\gamma_3$  มาตรฐาน



รูปที่ 3.48 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบสเต็ป เมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์เปลี่ยนแปลง โดยมีการปรับ

ค่า  $\gamma_3$  และ  $\gamma_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.49 แสดงแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 0 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID และ [2/2]

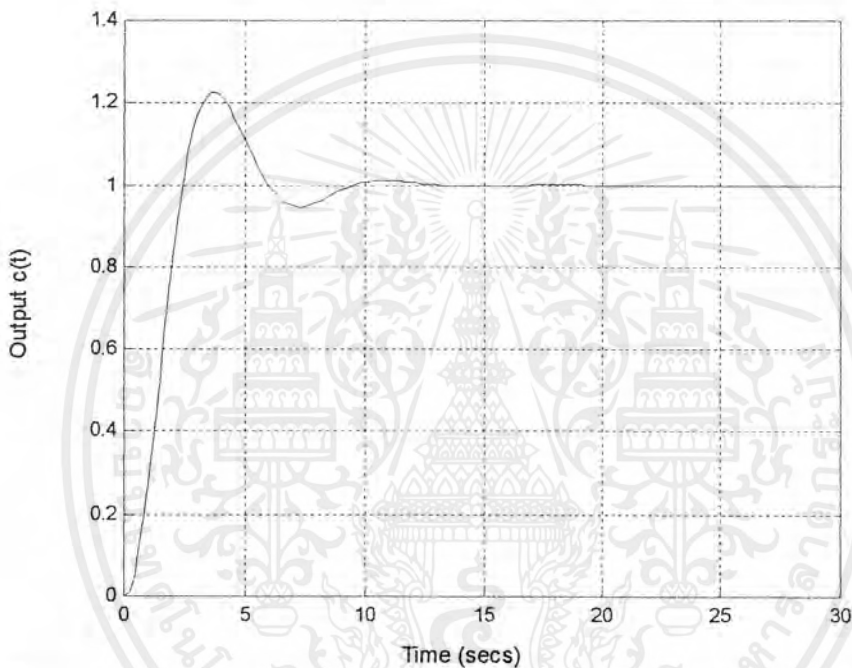
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การทดลองที่ 3

กำหนดให้ข้อกำหนดสมรรถนะ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมเพื่อลดค่าพุงเกินของระบบให้มากที่สุด

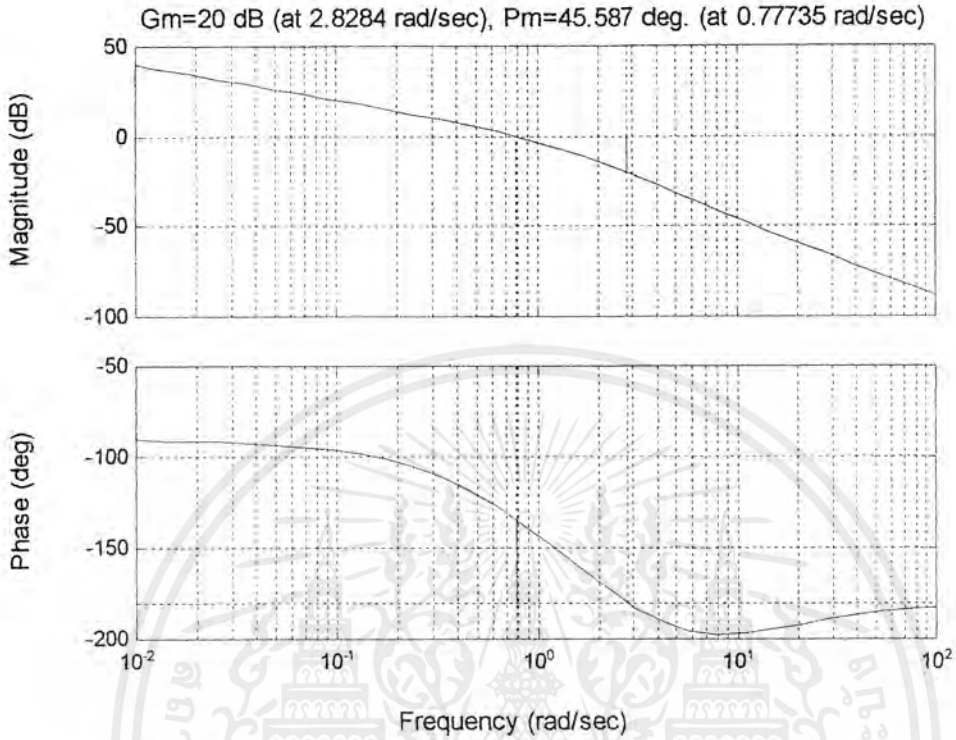
สำหรับพลาเน็ต อันดับ 3 แบบชนิด 1

$$G_p(s) = \frac{0.1s + 1}{0.25s^3 + 1.25s^2 + s}$$



รูปที่ 3.50 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ควบคุมแบบป้อนกลับหมด ต่ออินพุตแบบสเต็ป

Bode Diagrams



รูปที่ 3.51 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1

กรณีที่ 1. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ PID จากสมการ (2.1) และ (2.2) จะได้

$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s}$$

$$B_c(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0$$

$$A_c(s) = s$$

$$G(s) = \left( \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s} \right) \times \left( \frac{0.1s + 1}{0.25s^2 + 1.25s + s} \right)$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= s(0.25s^3 + 1.25s^2 + s) + ((0.1s + 1) \times (k_2 s^2 + k_1 s + k_0)) \\ &= 0.25s^4 + (1.25 + 0.1k_2)s^3 + (1 + k_2 + 0.1k_1)s^2 + (k_1 + 0.1k_0)s + k_0 \end{aligned}$$

จะได้สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$a_4 = a_0 \tau^4 / \gamma_1^3 \gamma_2^2 \gamma_3 = 0.25$$

$$a_3 = a_0 \tau^3 / \gamma_1^2 \gamma_2 = 1.25 + 0.1k_2$$

$$a_2 = a_0 \tau^2 / \gamma_1 = 1 + k_2 + 0.1k_1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_1 = a_0 \tau = k_1 + 0.1k_0$$

$$a_0 = k_0$$

จะเห็นว่าระบบสมการ มีจำนวนสมการเท่ากับ 5 สมการ จำนวนตัวไม่ทราบค่าเท่ากับ 5 ตัว คือ  $a_0, k_0, k_1, k_2, \tau$  ในการแก้สมการเพื่อหาคำตอบจะต้องมีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปร ซึ่งมีจำนวนเท่ากันแล้วจึงไม่สามารถกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นได้ ในกรณีใช้ค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐานของ CDM ดังนั้นระบบสมการชุดนี้ จะมีชุดคำตอบเพียงชุดคำตอบเดียวที่ทำให้ระบบสมการเป็นจริง

ในกรณีที่ต้องการกำหนดค่า  $\tau$  ของระบบสามารถทำได้โดยการเพิ่มพารามิเตอร์เข้าในสมการให้มีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่าจำนวนสมการ พารามิเตอร์ที่เลือกคือ  $\gamma_3$  ซึ่งเป็นค่าดัชนีเสถียรภาพอันดับสูงสุด ให้เป็นตัวแปรค่าได้ ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพและเพื่อลดค่าฟังก์ชัน ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่ใช้จะไม่ใช่ค่ามาตรฐานของ CDM ซึ่งจะได้โครงสร้างของตัวควบคุมและระบบรวมดังนี้

ขั้นตอนของการออกแบบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) กำหนดสมรรถนะค่า  $\tau = 2$  วินาที

ขั้นตอนที่ (2) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลาเน็ต โดยใช้ค่ามาตรฐานของ CDM พร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไข ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมคือ

$$\gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

ขั้นตอนที่ (3) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วย CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุม PID แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐานในสมการที่ (2.10) จากที่กล่าวข้างต้น จะได้ค่าพารามิเตอร์  $k_0, k_1, k_2$  ของตัวควบคุม และตัวควบคุมมีโครงสร้างดังนี้

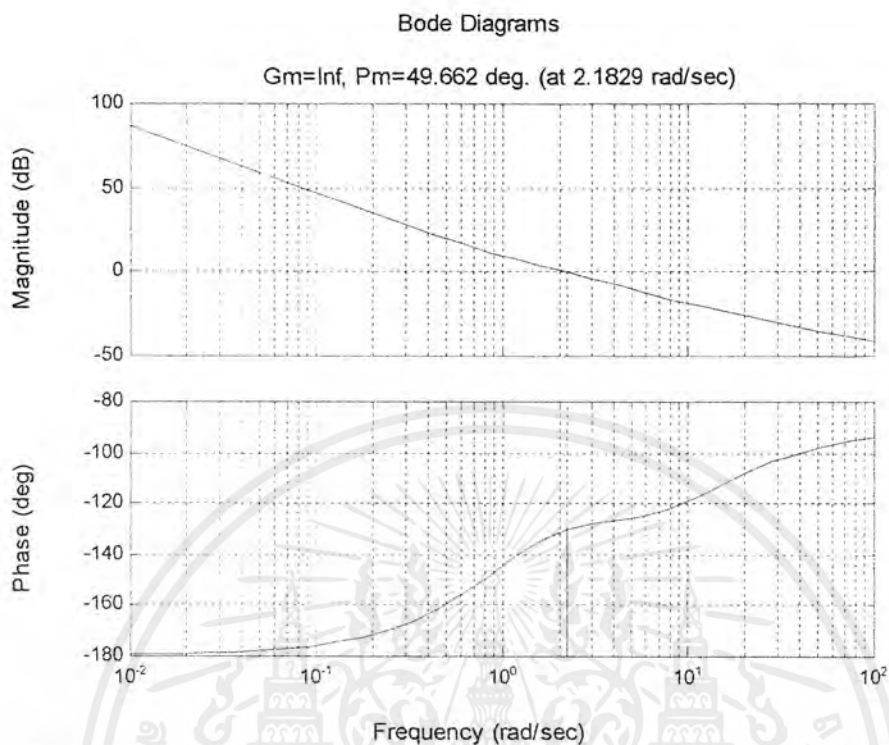
$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s} \\ = \frac{2.2495s^2 + 4.37876s + 2.30461}{s}$$

ขั้นตอนที่ (4) เนื่องจากค่า  $k_0 = 2.30461$  ดังนั้นค่า  $B_n(s) = 2.30461$

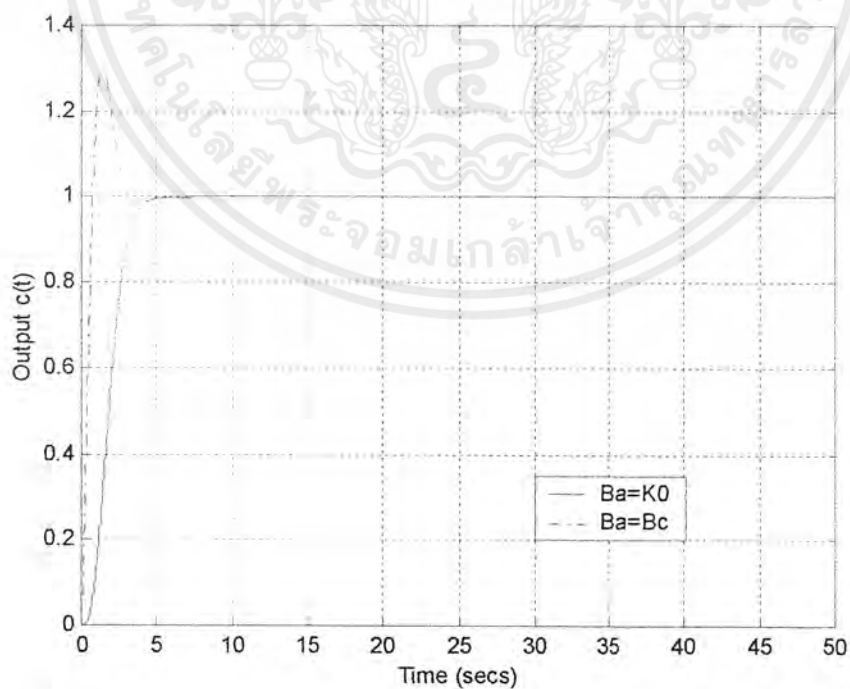
เมื่อนำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองเมื่อป้อนอินพุตแบบสเต็ป และแผนภาพโพล โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.52 – รูปที่ 3.55

$$G_o(s) = \frac{0.230461s + 2.30461}{0.25s^4 + 1.47495s^3 + 3.68737s^2 + 4.60922s + 2.30461}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



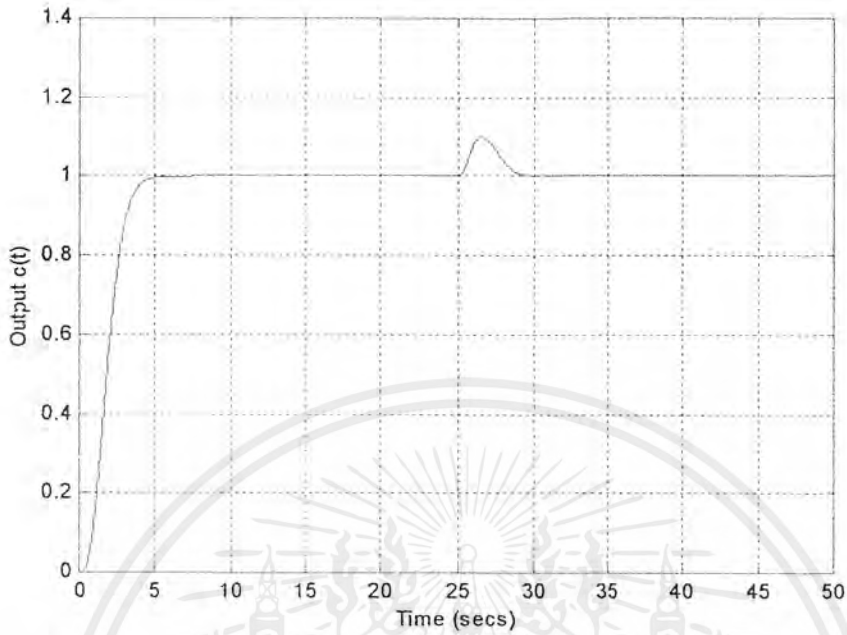
รูปที่ 3.52 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ;  
 $\gamma_3 = 2.3599, \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5, \tau = 2.0$



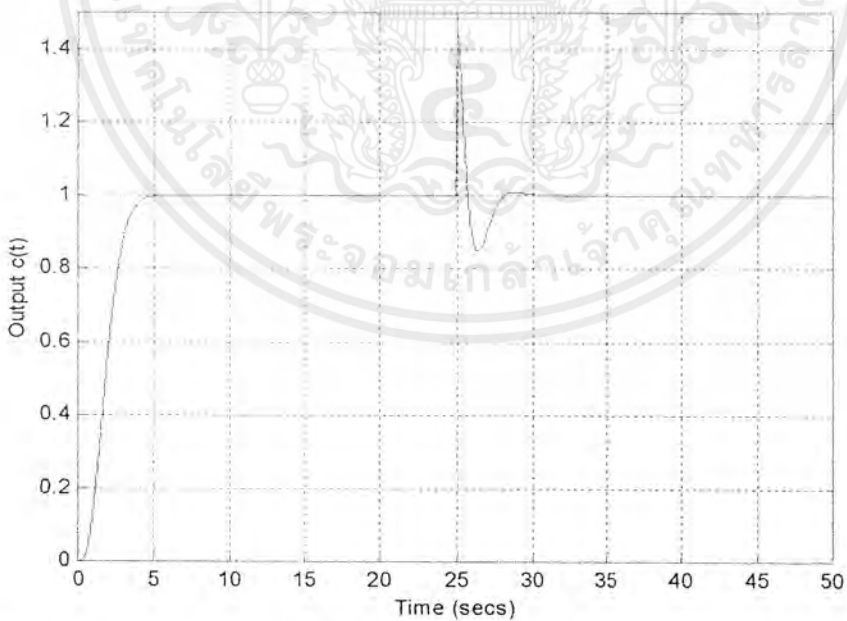
รูปที่ 3.53 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID

ต่ออินพุทแบบสเต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 2.3599, \tau = 2.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.54 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลาเน็ต  
 $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 2.3599, \tau = 2.0$



รูปที่ 3.55 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ  
 $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 2.3599, \tau = 2.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ [2/2] จากสมการ (2.1) และ (2.2) กำหนด  $l_0 = 0$  จะได้

$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_2 s^2 + l_1 s}$$

$$B_c(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0$$

$$A_c(s) = l_2 s^2 + l_1 s$$

$$G(s) = \left( \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_2 s^2 + l_1 s} \right) \times \left( \frac{0.1s + 1}{0.25s^2 + 1.25s^2 + s} \right)$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)$$

$$= (l_2 s^2 + l_1 s) \times (0.25s^3 + 1.25s^2 + s) + ((k_2 s^2 + k_1 s + k_0) \times (0.1s + 1))$$

$$= 0.25s^5 + (1.25l_2 + 0.25l_1)s^4 + (l_2 + 1.25l_1 + 0.1k_2)s^3 + (l_1 + k_2 + 0.1k_1)s^2$$

$$+ (k_1 + 0.1k_0)s + k_0$$

จะได้สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$a_5 = a_0 \tau^5 / \gamma_1^4 \gamma_2^3 \gamma_3^2 \gamma_4 = 0.25l_2$$

$$a_4 = a_0 \tau^4 / \gamma_1^3 \gamma_2^2 \gamma_3 = 0.25$$

$$a_3 = a_0 \tau^3 / \gamma_1^2 \gamma_2 = 1.25 + 0.1k_2$$

$$a_2 = a_0 \tau^2 / \gamma_1 = 1 + k_2 + 0.1k_1$$

$$a_1 = a_0 \tau = k_1 + 0.1k_0$$

$$a_0 = k_0$$

จะเห็นว่าระบบสมการ มีจำนวนสมการเท่ากับ 6 สมการ จำนวนตัวไม่ทราบค่าเท่ากับ 7 ตัว คือ  $a_0, k_0, k_1, k_2, l_1, l_2, \tau$  ในการแก้สมการเพื่อหาคำตอบจะต้องมีจำนวนสมการเท่ากับ จำนวนตัวแปร ในที่นี้จะเลือกกำหนด  $\tau$  และ  $k_0$  เป็นพารามิเตอร์เบื้องต้น และให้  $\gamma_4$  เป็นตัวพารามิเตอร์แปรตามเพื่อหาคำตอบของสมการให้สอดคล้องกับค่า  $\tau$  และ  $k_0$  ที่กำหนดในตอนต้น ขั้นตอนของการออกแบบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) กำหนดสมรรถนะค่า  $\tau = 2$  วินาที และกำหนดค่า  $k_0 = 10$

ขั้นตอนที่ (2) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลาเน็ต โดยใช้ค่ามาตรฐานของ CDM พร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไข ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

$$\gamma_3 = 2, \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

ขั้นตอนที่ (3) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม [2/2] ด้วย CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุม [2/2] แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์

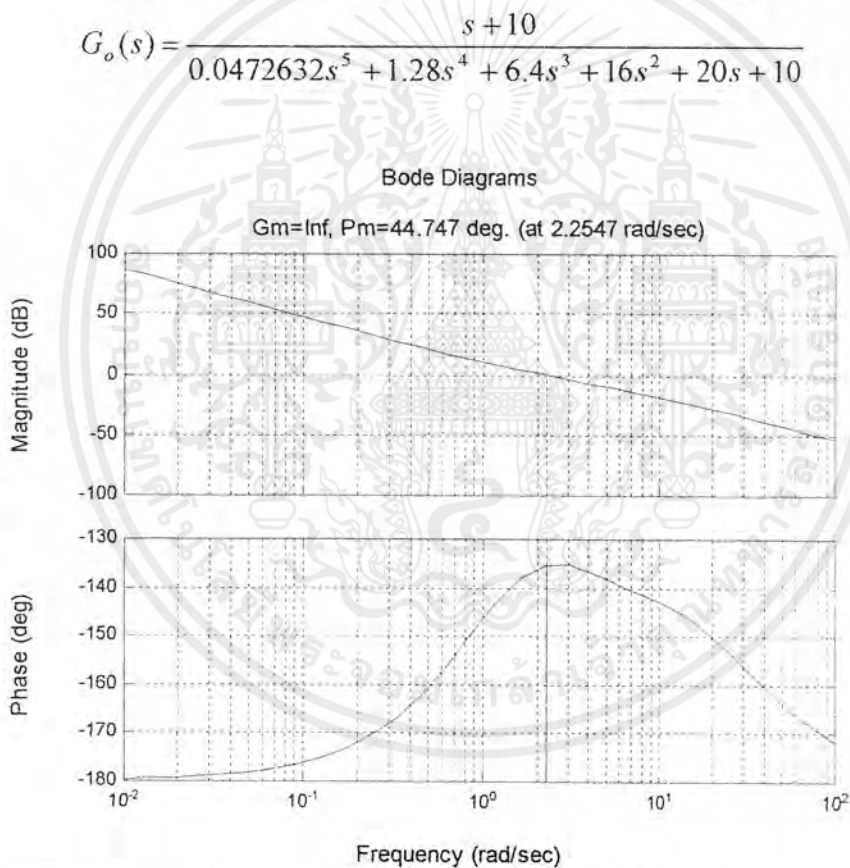
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐานในสมการที่ (2.10) จากที่กล่าวข้างต้น จะได้ค่าพารามิเตอร์  $k_0, k_1, k_2, l_2, l_1$  ของตัวควบคุม และตัวควบคุมมีโครงสร้างดังนี้

$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_2 s^2 + l_1 s} = \frac{9.92526s^2 + 19s + 10}{0.189053s^2 + 4.17474s}$$

ขั้นตอนที่ (4) เนื่องจากค่า  $k_0 = 10$  ดังนั้นค่า  $B_a(s) = 10$

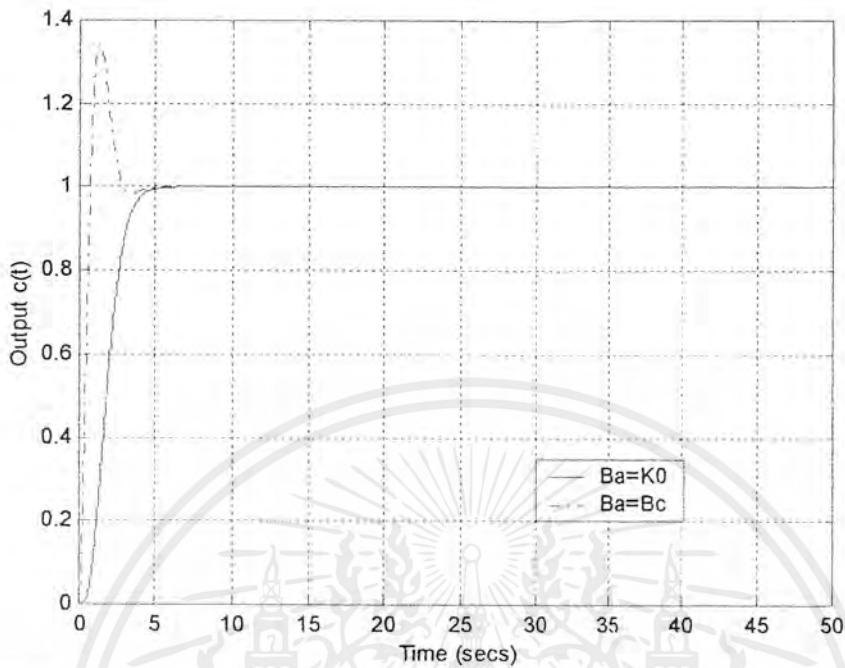
เมื่อนำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองเมื่อป้อนอินพุทแบบ สเต็ป และแผนภาพโบท โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.56 – รูปที่ 3.59



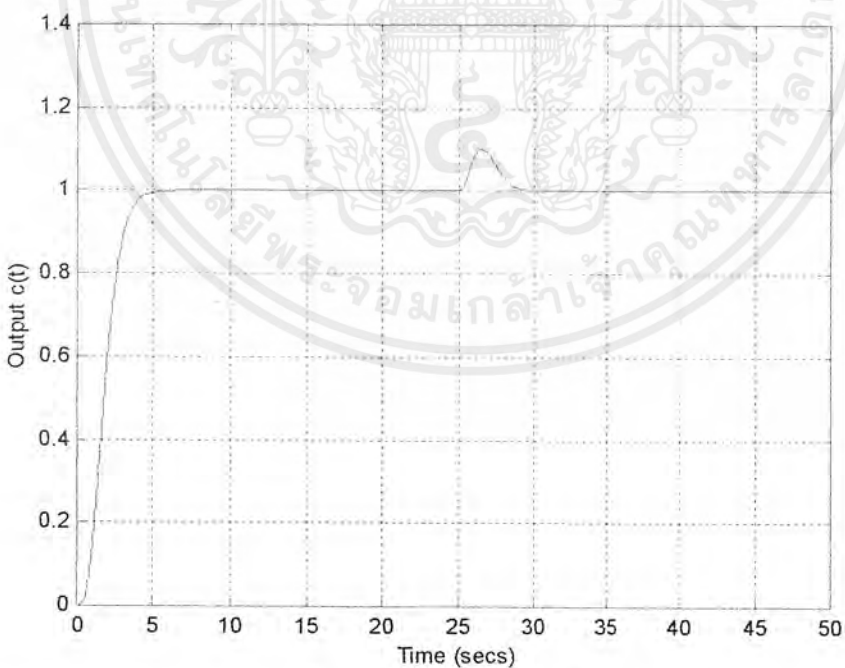
รูปที่ 3.56 แผนภาพโบทของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2]

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 5.4165, \tau = 2.0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



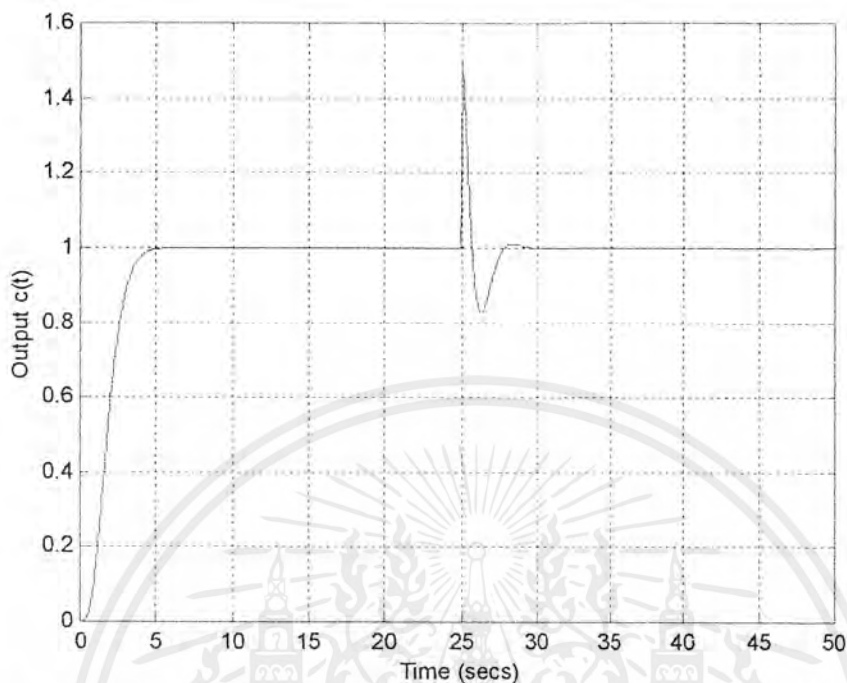
รูปที่ 3.57 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 5.4165, \tau = 2.0$



รูปที่ 3.58 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลานต์

$$\gamma_1 = 2.5, \quad \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \quad \gamma_4 = 5.4165, \quad \tau = 2.0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.59 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ  $[2/2]$  ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ  
 $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 5.4165, \tau = 2.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 3. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ [2/3] จากสมการ (2.1) และ (2.2) กำหนด  $l_0 = 0$  จะได้

$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s}$$

$$B_c(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0$$

$$A_c(s) = l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s$$

$$G(s) = \left( \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s} \right) \times \left( \frac{0.1s + 1}{0.25s^2 + 1.25s^2 + s} \right)$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)$$

$$= (l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s) \times (0.25s^3 + 1.25s^2 + s) + ((k_2 s^2 + k_1 s + k_0) \times (0.1s + 1))$$

$$= 0.25l_3 s^6 + (1.25l_3 + 0.25l_2) s^5 + (l_3 + 1.25l_2 + 0.25l_1) s^4 + (l_2 + 1.25l_1 + 0.1k_2) s^3$$

$$+ (l_1 + k_2 + 0.1k_1) s^2 + (k_1 + 0.1k_0) s + k_0$$

จะได้สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$a_6 = a_0 \tau^6 / \gamma_1^5 \gamma_2^4 \gamma_3^3 \gamma_4^2 \gamma_5 = 0.25l_3$$

$$a_5 = a_0 \tau^5 / \gamma_1^4 \gamma_2^3 \gamma_3^2 \gamma_4 = 1.25l_3 + 0.25l_2$$

$$a_4 = a_0 \tau^4 / \gamma_1^3 \gamma_2^2 \gamma_3 = l_3 + 1.25l_2 + 0.25l_1$$

$$a_3 = a_0 \tau^3 / \gamma_1^2 \gamma_2 = l_2 + 1.25l_1 + 0.1k_2$$

$$a_2 = a_0 \tau^2 / \gamma_1 = l_1 + k_2 + 0.1k_1$$

$$a_1 = a_0 \tau = k_1 + 0.1k_0$$

$$a_0 = k_0$$

จะเห็นว่าระบบสมการ มีจำนวนสมการเท่ากับ 7 สมการ จำนวนตัวไม่ทราบค่าเท่ากับ 8 ตัว คือ  $a_0, k_0, k_1, k_2, l_1, l_2, l_3, \tau$  ในการแก้สมการเพื่อหาคำตอบจะต้องมีจำนวนสมการเท่ากับ จำนวนตัวแปร ในที่นี้จะเลือกกำหนด  $\tau$  และ  $k_0$  เป็นพารามิเตอร์เบื้องต้น และให้  $\gamma_5$  เป็นตัวพารามิเตอร์แปรตามเพื่อหาคำตอบของสมการให้สอดคล้องกับค่า  $\tau$  และ  $k_0$  ที่กำหนดในตอนต้น ขั้นตอนของการออกแบบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) กำหนดสมรรถนะค่า  $\tau = 2$  วินาที และกำหนดค่า  $k_0 = 10$

ขั้นตอนที่ (2) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลาเน็ต พร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไข

ไซ ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

$$\gamma_4 = 4, \gamma_3 = 2, \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

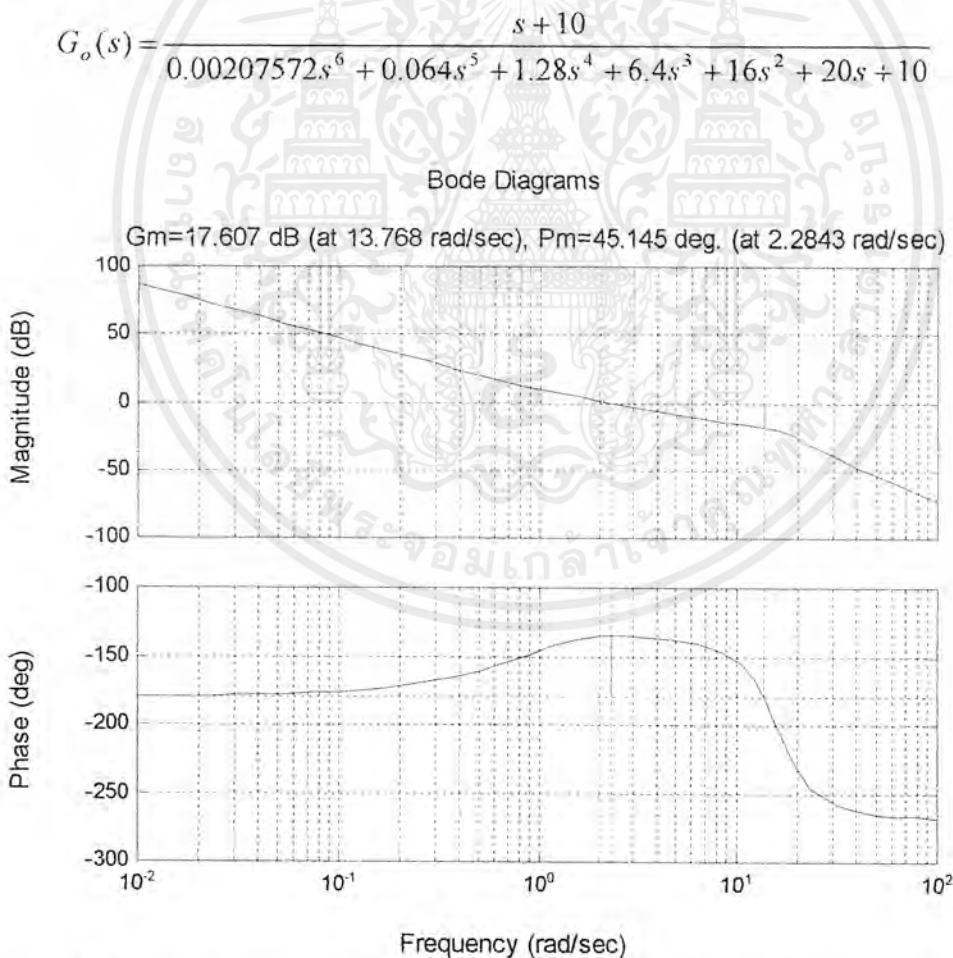
ขั้นตอนที่ (3) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม [2/3] ด้วย CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุม [2/3] แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐาน จะได้ค่าพารามิเตอร์  $k_0, k_1, k_2, l_1, l_2, l_3$  ของตัวควบคุม และตัวควบคุมมีโครงสร้างดังนี้

$$G_c(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s}$$

$$= \frac{9.91128s^2 + 19s + 10}{0.0166057s^3 + 0.172971s^2 + 4.18872s}$$

ขั้นตอนที่ (4) เนื่องจากค่า  $k_0 = 10$  ดังนั้นค่า  $B_n(s) = 10$

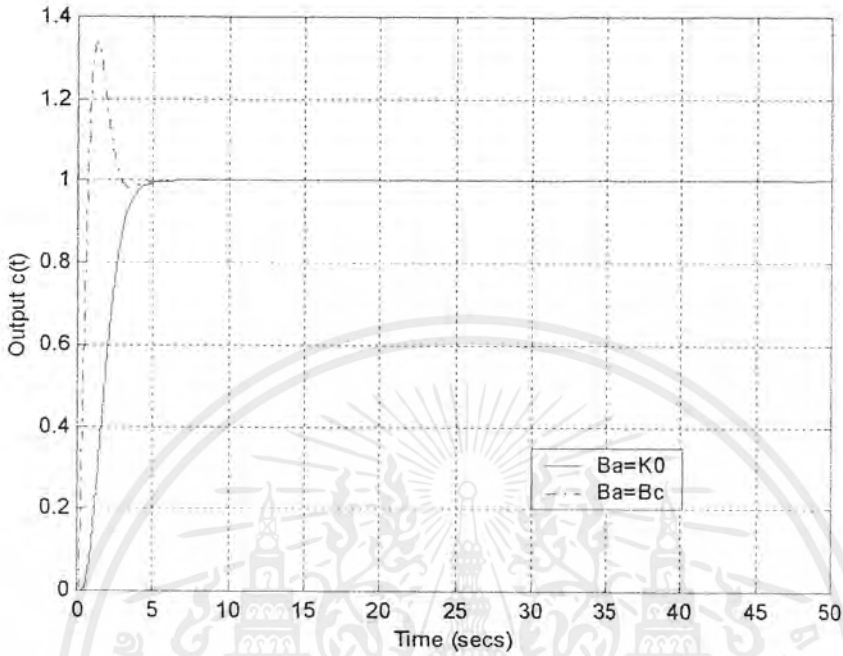
เมื่อนำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองเมื่ออินพุตแบบสเต็ป และแผนภาพโบด โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.60 - รูปที่ 3.63



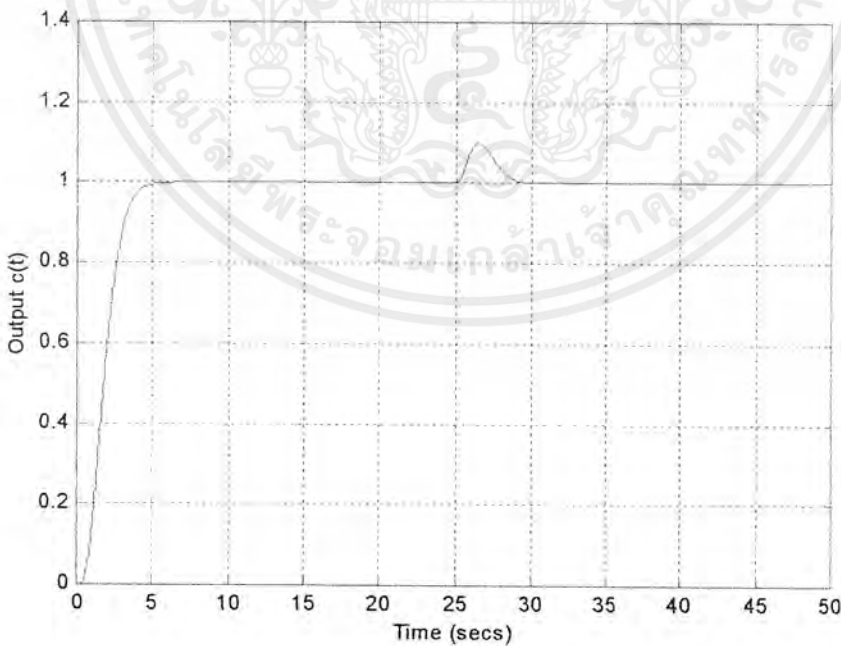
รูปที่ 3.60 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/3]

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 4, \gamma_5 = 0.7708, \tau = 2.0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



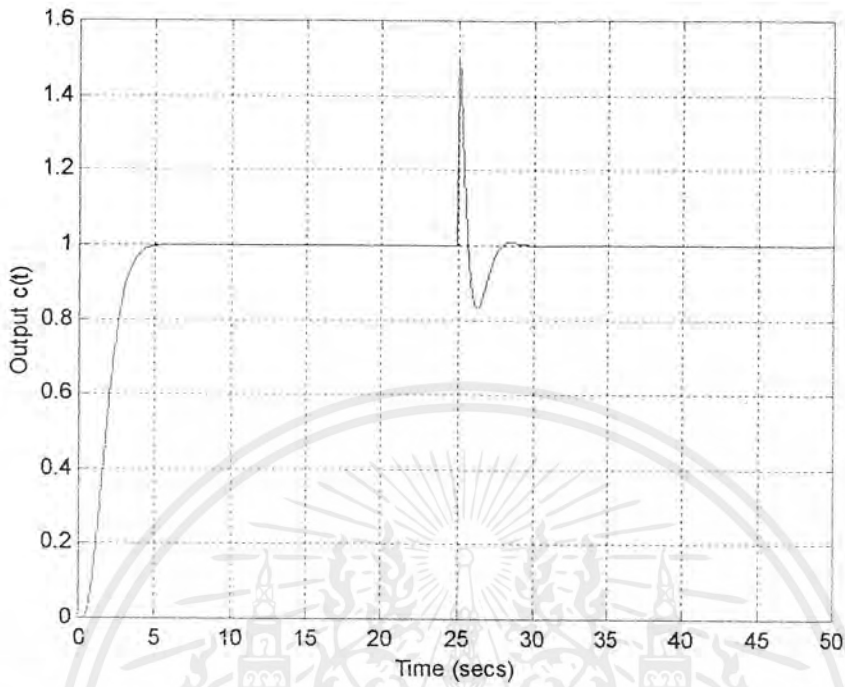
รูปที่ 3.61 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/3] ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 4, \gamma_5 = 0.7708, \tau = 2.0$



รูปที่ 3.62 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ป เมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลาเน็ต

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 4, \gamma_5 = 0.7708, \tau = 2.0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.63 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ป เมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ  
 $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 4, \gamma_5 = 0.7708, \tau = 2.0$

กรณีที่ 4. เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ [3/3] จากสมการ (2.1) และ (2.2) กำหนด  $l_0 = 0$  จะได้

$$G_c(s) = \frac{k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s}$$

$$B_c(s) = k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0$$

$$A_c(s) = l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s$$

$$G(s) = \left( \frac{k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s} \right) \times \left( \frac{0.1s + 1}{0.25s^2 + 1.25s^2 + s} \right)$$

โพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.3) คือ

$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)$$

$$= (l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s) \times (0.25s^3 + 1.25s^2 + s) + ((k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0) \times (0.1s + 1))$$

$$= 0.25l_3 s^6 + (1.25l_3 + 0.25l_2) s^5 + (l_3 + 1.25l_2 + 0.25l_1 + 0.1k_3) s^4$$

$$+ (l_2 + 1.25l_1 + k_3 + 0.1k_2) s^3 + (l_1 + k_2 + 0.1k_1) s^2 + (k_1 + 0.1k_0) s + k_0$$

จะได้สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะตามสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$a_6 = a_0 \tau^6 / \gamma_1^5 \gamma_2^4 \gamma_3^3 \gamma_4^2 \gamma_5 = 0.25l_3$$

$$a_5 = a_0 \tau^5 / \gamma_1^4 \gamma_2^3 \gamma_3^2 \gamma_4 = 1.25l_3 + 0.25l_2$$

$$a_4 = a_0 \tau^4 / \gamma_1^3 \gamma_2^2 \gamma_3 = l_3 + 1.25l_2 + 0.25l_1 + 0.1k_3$$

$$a_3 = a_0 \tau^3 / \gamma_1^2 \gamma_2 = l_2 + 1.25l_1 + k_3 + 0.1k_2$$

$$a_2 = a_0 \tau^2 / \gamma_1 = l_1 + k_2 + 0.1k_1$$

$$a_1 = a_0 \tau = k_1 + 0.1k_0$$

$$a_0 = k_0$$

จะเห็นว่าระบบสมการ มีจำนวนสมการเท่ากับ 7 สมการ จำนวนตัวไม่ทราบค่าเท่ากับ 9 ตัว คือ  $a_0, k_0, k_1, k_2, k_3, l_1, l_2, l_3, \tau$  ในการแก้สมการเพื่อหาคำตอบจะต้องมีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปร ในที่นี้จะเลือกกำหนด  $\tau$  และ  $k_0$  เป็นพารามิเตอร์เบื้องต้น โดยพารามิเตอร์อื่นเป็นตัวพารามิเตอร์แปรตามเพื่อหาคำตอบของสมการให้สอดคล้องกับค่า  $\tau$  และ  $k_0$  ที่กำหนดในตอนต้น

ขั้นตอนของการออกแบบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) กำหนดสมรรถนะค่า  $\tau = 2$  วินาที และกำหนดค่า  $k_0 = 10$

ขั้นตอนที่ (2) หาค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลานต์ โดยใช้ค่ามาตรฐานของ

CDM พร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไข ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 2$$

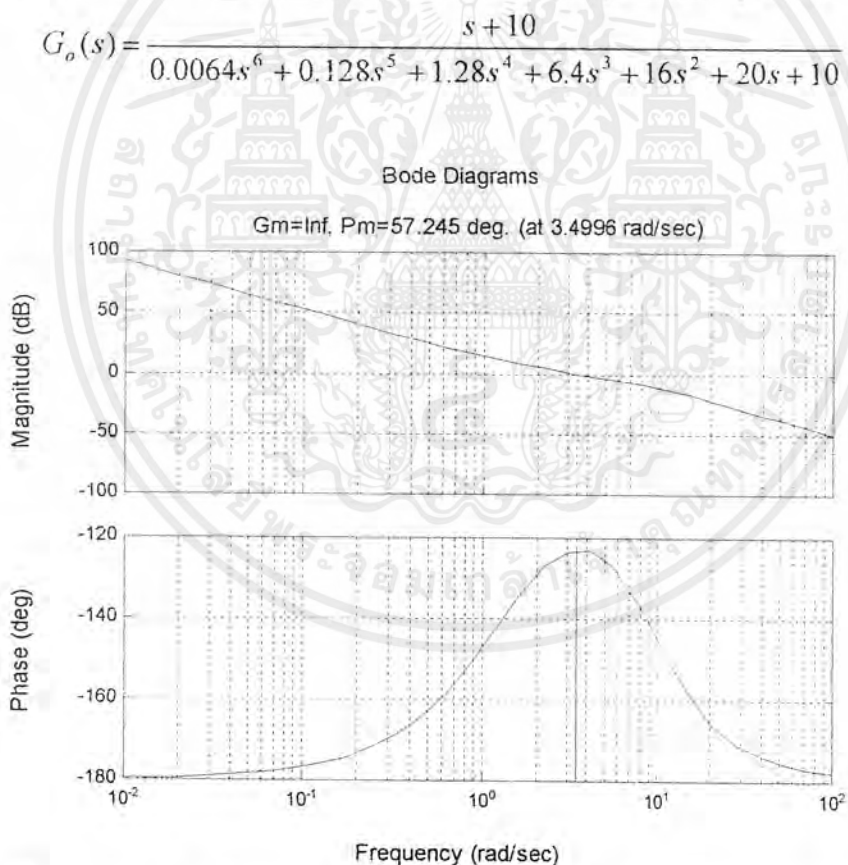
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ (3) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม [3/3] ด้วย CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุม [3/3] แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐาน จะได้ค่าพารามิเตอร์  $k_0, k_1, k_2, k_3, l_1, l_2, l_3$  ของตัวควบคุม และตัวควบคุมมีโครงสร้างดังนี้

$$G_c(s) = \frac{k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s} = \frac{1.93289s^3 + 11.7756s^2 + 19s + 10}{0.0256s^3 + 0.384s^2 + 2.32444s}$$

ขั้นตอนที่ (4) เนื่องจากค่า  $k_0 = 10$  ดังนั้นค่า  $B_u(s) = 10$

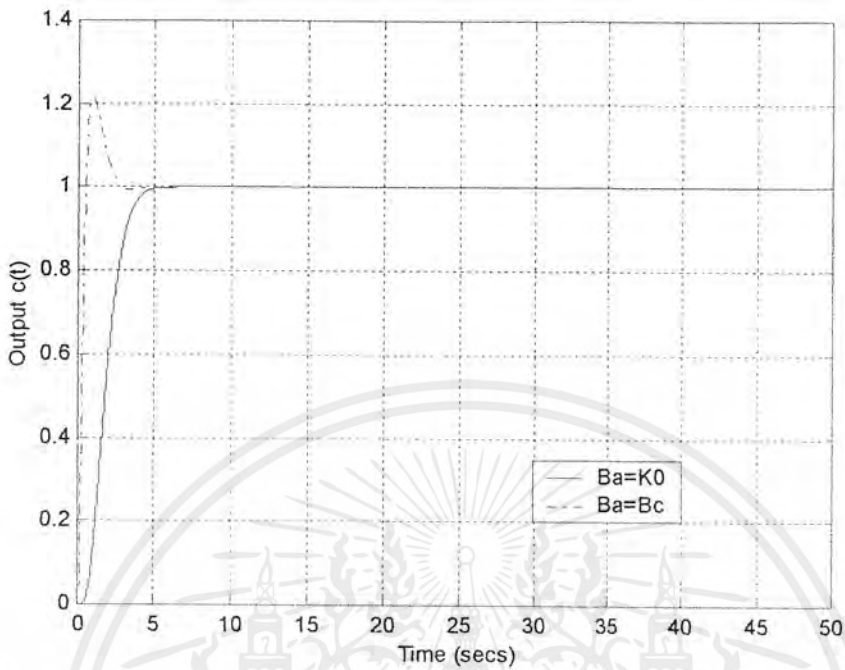
เมื่อนำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองเมื่อป้อนอินพุตแบบสแต็ป และแผนภาพโบด โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.64 - รูปที่ 3.67



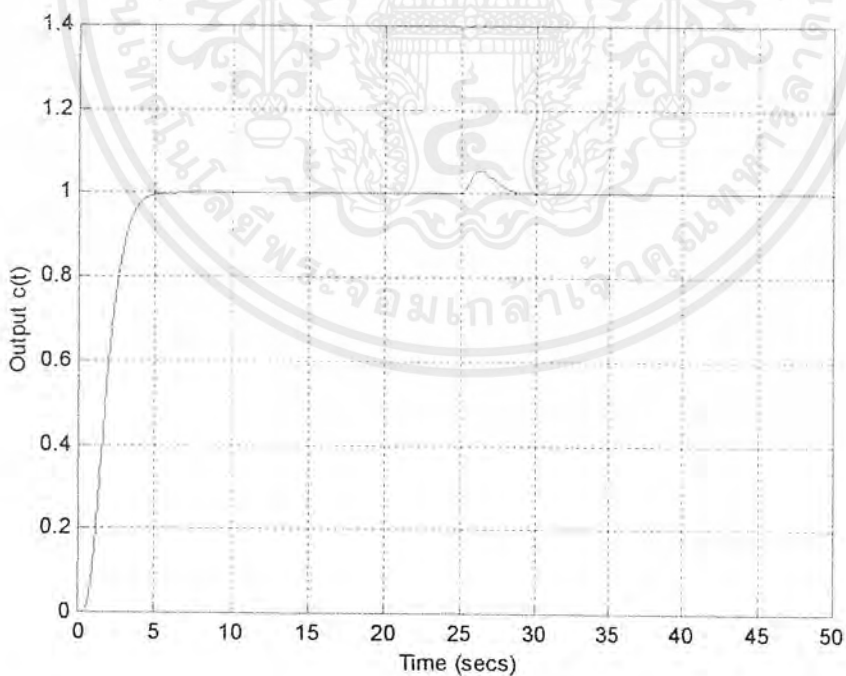
รูปที่ 3.64 แผนภาพโบดของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [3/3]

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



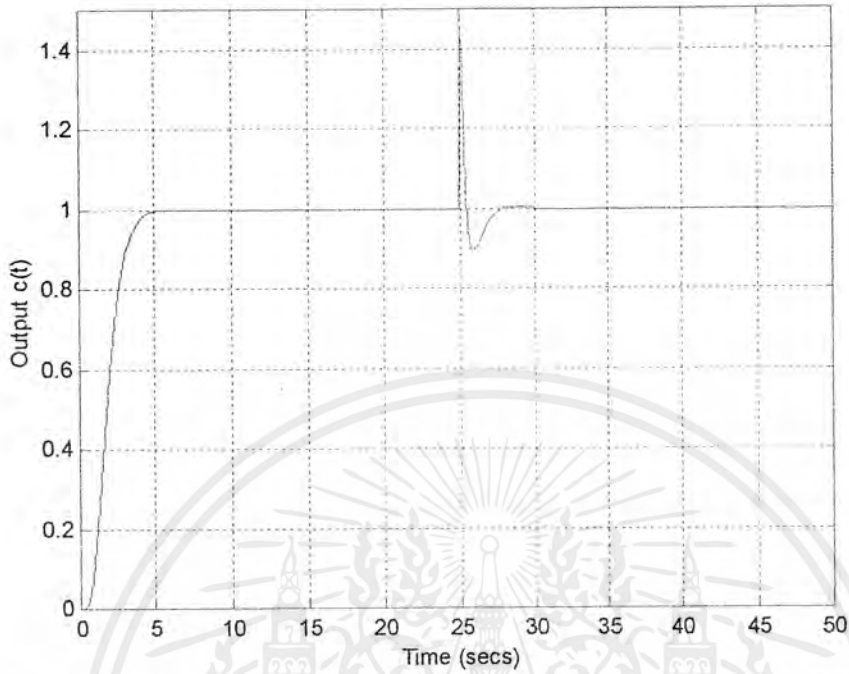
รูปที่ 3.65 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [3/3] ต่ออินพุทแบบ  
สแต็ป ;  $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 2$



รูปที่ 3.66 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [3/3] ต่ออินพุทแบบ  
สแต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสแต็ปขนาด 0.5 เข้ามาระหว่างตัวควบคุมและพลาเน็ต

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.67 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [3/3] ต่ออินพุทแบบ  
 สเต็ปเมื่อมีตัวรบกวนแบบสเต็ปขนาด 0.5 เข้ามาที่เอาต์พุทของระบบ  
 $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 2$

จากการออกแบบตัวควบคุมแบบต่าง ๆ จะแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมได้ ดังตารางที่ 3 ตารางที่ 3 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบต่าง ๆ สำหรับพลาสมาอันดับ 3 แบบชนิด 1

ชนิดตัวควบคุม	$\tau$ (secs)	โพลวงปิดรวม	Gain Margin (dB)	Phase Margin (degrees)	Ess (%)	$t_p$ (secs)	$t_r$ (secs)	$t_s$ (secs)	$M_o$ (%)
Unity Feedback	2.426	-4.1757 -0.4122±0.8877i	20 (2.828rad/s)	45.5870 (0.777rad/s)	0	3.6960	1.5807	8.7200	22.6673
PID $\gamma_3 = 2.3599$	2.0	-1.3170±1.3484i -1.9005 -1.3654	Inf	49.6624 (2.18294rad/s)	0	8.5000	2.1994	3.9589	0.0000
[2/2] $\gamma_4 = 5.4165$	2.0	-21.4674 -1.4721±1.7016i -1.3354±0.4044i	Inf	44.747 (2.2547rad/s)	0	7.7000	2.2000	4.1000	0.0060
[2/3] $\gamma_5 = 0.7708$ $\gamma_4 = 4$	2.0	-4.8128±14.6296i -1.5296±1.6367i -1.3658±0.3979i	17.6072 (13.7685rad/s)	45.1446 (2.28433rad/s)	0	7.9000	2.2000	4.1000	0.0040
[3/3]	2.0	-5.5711±6.5204i -4.1627 -1.6084±0.9301i -1.4784	Inf	57.2448 (3.49962rad/s)	0	8.0000	2.1680	4.0650	0.0000

จากตารางที่ 3 และรูปที่ 3.52 – รูปที่ 3.67 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. กรณีตัวควบคุมแบบ PID เลือกตัวควบคุมแบบชนิด 1 เพื่อให้สามารถกำจัดตัวรบกวนที่สถานะอยู่ตัวของระบบได้ตามทฤษฎีบทค่าสุดท้าย ระบบสมการที่ได้มีจำนวนพารามิเตอร์เท่ากับจำนวนสมการเมื่อใช้ค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐานของ CDM จะได้คำตอบของระบบสมการที่เป็นจริง 1 ชุดคำตอบ ถ้าต้องการกำหนดค่า  $\tau$  ของระบบจะต้องเพิ่มพารามิเตอร์เข้าไปในระบบสมการให้มีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่าจำนวนสมการ ซึ่งพารามิเตอร์ที่เหมาะสม คือ  $\gamma_3$  ซึ่งเป็นดัชนีเสถียรภาพลำดับสูงสุดเป็นตัวแปรค่าแทน  $\tau$  และดัชนีเสถียรภาพลำดับต่ำลงมาจะใช้ค่ามาตรฐานของ CDM ดังนี้

$$\gamma_3 = 2.3599, \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5, \tau = 2.0$$

2. กรณีตัวควบคุมแบบ [2/2] เลือกตัวควบคุมแบบชนิด 1 เพื่อให้สามารถกำจัดตัวรบกวนที่สถานะอยู่ตัวของระบบได้ตามทฤษฎีบทค่าสุดท้าย ระบบสมการที่ได้มีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่าระบบสมการอยู่ 1 แต่ในการเลือกกำหนด  $\tau$  จะไม่สามารถหาคำตอบของสมการได้ จึงเลือกกำหนดพารามิเตอร์  $\tau$  และ  $k_0$  โดยให้  $\gamma_4$  ซึ่งเป็นดัชนีเสถียรภาพลำดับสูงสุดเป็นตัวแปรค่าแทน  $k_0$  และดัชนีเสถียรภาพลำดับต่ำลงมาจะใช้ค่ามาตรฐานของ CDM ดังนี้

$$\gamma_4 = 5.4165, \gamma_3 = 2, \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5, \tau = 2.0$$

3. กรณีตัวควบคุมแบบ [2/3] มีลักษณะเหมือนตัวควบคุมแบบ [2/2] แต่จะได้สมการคุณลักษณะอันดับ 6 ดังนั้นจึงให้  $\gamma_5$  ซึ่งเป็นดัชนีเสถียรภาพลำดับสูงสุดเป็นตัวแปรค่าแทน  $k_0$  และปรับ  $\gamma_4$  ให้เหมาะสม สำหรับดัชนีเสถียรภาพลำดับต่ำลงมาจะใช้ค่ามาตรฐานของ CDM ดังนี้

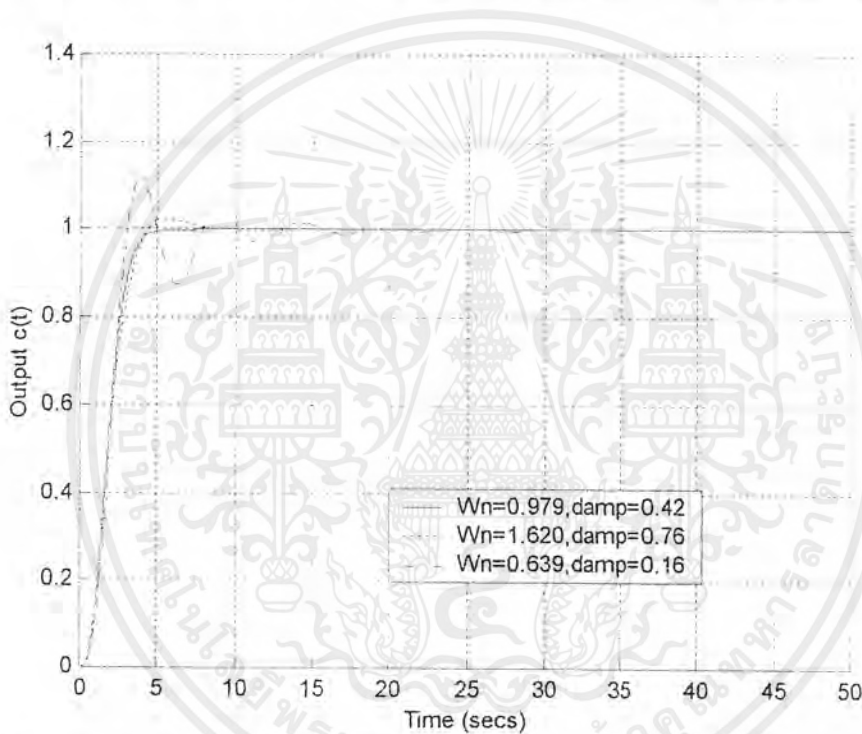
$$\gamma_5 = 0.7708, \gamma_4 = 4, \gamma_3 = 2, \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5, \tau = 2.0$$

4. กรณีตัวควบคุมแบบ [3/3] เลือกตัวควบคุมแบบชนิด 1 เพื่อให้สามารถกำจัดตัวรบกวนที่สถานะอยู่ตัวของระบบได้ตามทฤษฎีบทค่าสุดท้าย ระบบสมการมีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่าจำนวนสมการอยู่ 2 ในการกำหนด  $\tau$  และ  $k_0$  เบื้องต้น สามารถทำได้โดยใช้ค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐานของ CDM ดังนี้

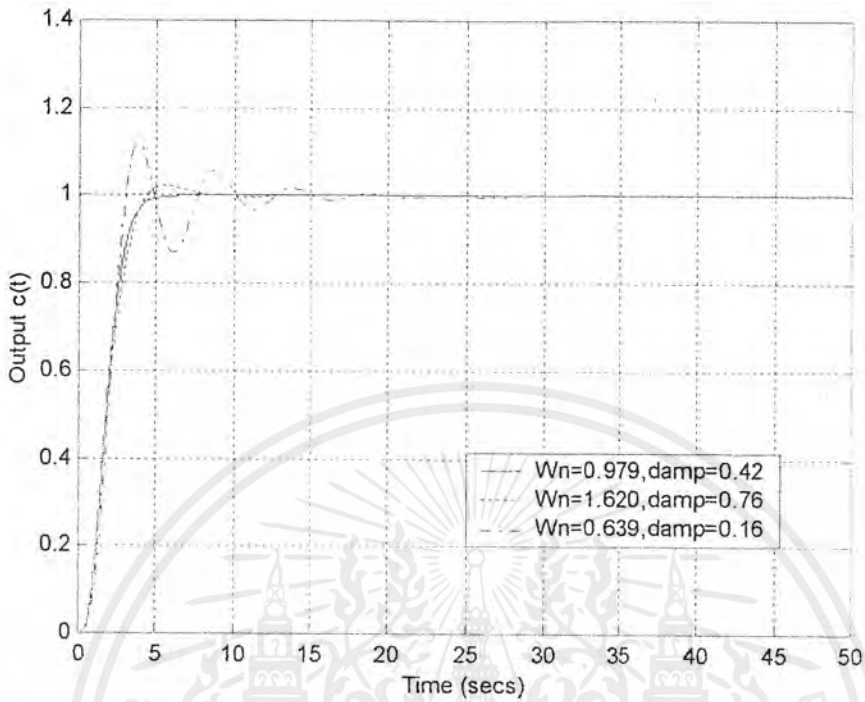
$$\gamma_5 = \gamma_4 = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

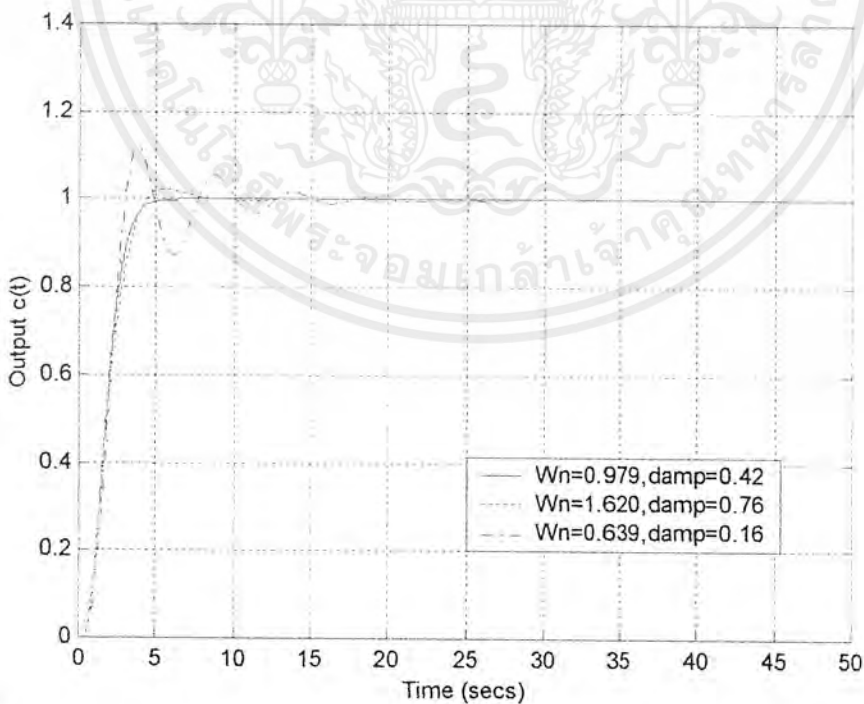
จากผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมที่ได้จากการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID , [2/2] , [2/3] และ [3/3] ได้สมรรถนะของระบบที่ใกล้เคียงกันสำหรับผลตอบสนองเชิงเวลา แต่มีค่าเฟสแมริจินแตกต่างกัน ในการพิจารณาเลือกตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับพลาตันั้น นอกจากสมรรถนะข้างต้น ยังต้องพิจารณาความคงทนของระบบที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมทั้ง 3 แบบ เมื่อพารามิเตอร์ของพลาตันเปลี่ยนแปลง ดังรูปด้านล่างซึ่งจะเห็นว่าตัวควบคุมแบบ [3/3] มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของพลาตันได้ดีที่สุด และจากแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ในรูปที่ 3.72 แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของระบบมีความสัมพันธ์กับลักษณะของกราฟค่าสัมประสิทธิ์



รูปที่ 3.68 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ต่ออินพุทแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาตันเปลี่ยนแปลง



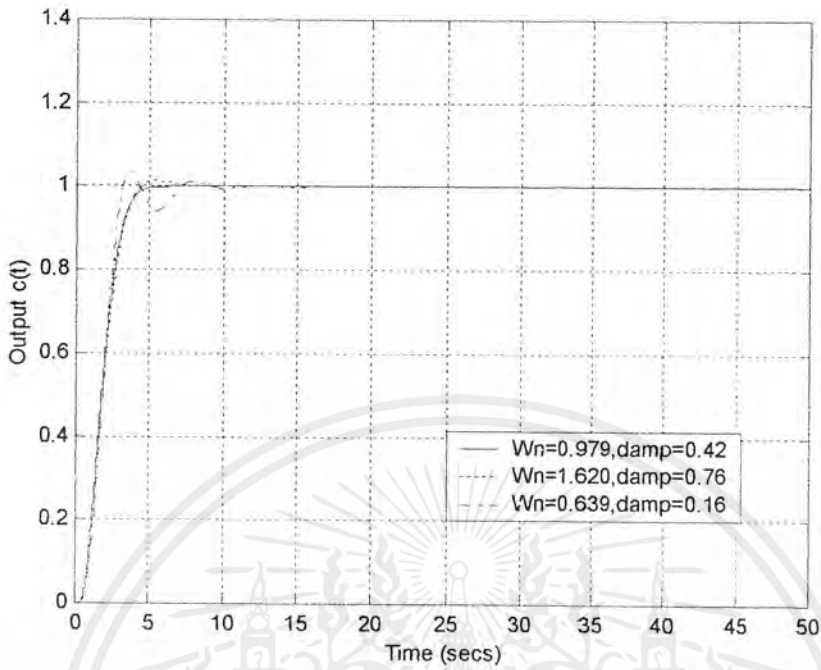
รูปที่ 3.69 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/2] ต่ออินพุตแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์เปลี่ยนแปลง



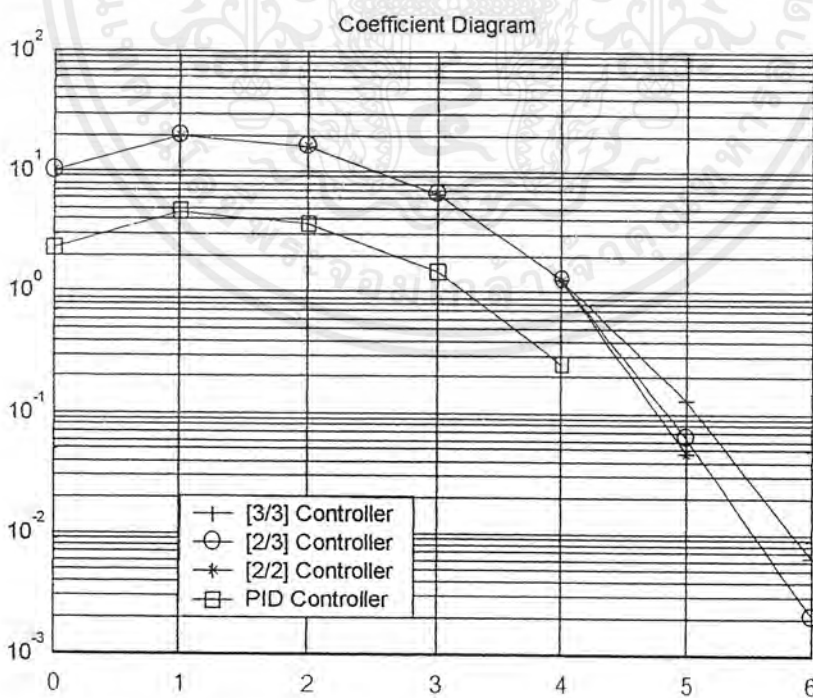
รูปที่ 3.70 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [2/3]

ต่ออินพุตแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.71 แสดงผลตอบสนองของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบ [3/3] ต่ออินพุตแบบสเต็ปเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.72 แสดงแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบอันดับ 3 แบบชนิด 1 ที่มีตัวควบคุมแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 บทสรุปและวิจารณ์

การออกแบบระบบควบคุมด้วย CDM ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปเป็นประเด็นสำคัญ ๆ ได้ดังนี้

1.) การออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM เป็นวิธีการที่ง่ายต่อการศึกษาและทำความเข้าใจ เนื่องจากอาศัยหลักการทางพีชคณิตเป็นหลัก ในการคำนวณหาคำตอบของระบบสมการ ซึ่งคือพารามิเตอร์ของตัวควบคุม กระบวนการหาคำตัวควบคุมจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการกำหนดค่าโพลีโนเมียลคุณลักษณะวงปิดของระบบที่ต้องการ วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจวิธีหนึ่ง

2.) ค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐานของ CDM เมื่อนำไปใช้ในการออกแบบจะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีในระดับหนึ่ง ซึ่งใกล้เคียงกับสมรรถนะของระบบที่ต้องการ แต่ในบางกรณีจะไม่สามารถใช้ในการออกแบบตัวควบคุมได้ เนื่องจากโครงสร้างของตัวควบคุมที่เลือกทำให้ได้ค่าที่ไม่ตรงตามเงื่อนไขเสถียรภาพ จึงต้องปรับค่าดัชนีเสถียรภาพบางค่าให้เหมาะสม เพื่อทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น ซึ่งถือเป็นความยืดหยุ่นในการออกแบบตัวควบคุมของ CDM

3.) การกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นให้กับระบบสมการ ขึ้นอยู่กับระบบสมการของแต่ละพลาเน็ตและโครงสร้างของตัวควบคุมที่เลือก โดยพิจารณาว่าเมื่อกำหนดแล้วจะสามารถคำนวณหาคำตอบของสมการที่เป็นจริงได้หรือไม่ ถ้าไม่ได้ต้องเลือกกำหนดค่าใหม่ (trial & error) จึงไม่มีหลักการที่แน่นอนในการกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้น ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ออกแบบในการพิจารณาด้วย

4.) พิจารณาในแง่ของการกำจัดตัวรบกวน ค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐานถือว่าให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจในระดับหนึ่งในการออกแบบเบื้องต้น ซึ่งต้องอาศัยการปรับแต่งเพื่อให้ได้สมรรถนะของระบบตามต้องการ นอกจากนี้ในเรื่องของการกำจัดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบ การออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM ถือว่าสามารถลดค่าพุ่งเกินเป็นอย่างดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% โปรแกรมคำนวณค่าพารามิเตอร์เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ PID สำหรับพลาเน็ตอันดับ 2

% แบบชนิด 1 ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด คือ  $G_p = 49/s(s+3)$

% โดยกำหนดค่าคงตัวเวลาสมมูล เป็นพารามิเตอร์ตั้งต้น

tao=input('tao = '); % รับค่าอินพุตที่เป็นค่าคงตัวเวลาสมมูล

syms k0 k1 k2 % กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณในระบบสมการ

eqn1=[num2str(tao),'/5 = 1/(3+49\*k2)']; % eqn1 =  $a_3/a_2$

eqn2=[num2str(tao),'/2.5 = (3+49\*k2)/(49\*k1)']; % eqn2 =  $a_2/a_1$

eqn3=[num2str(tao),' = (49\*k1)/(49\*k0)']; % eqn3 =  $a_1/a_0$

s=solve(eqn1,eqn2,eqn3,'k0,k1,k2'); % หาค่าคำตอบของสมการ

K0=double(s.k0) % เปลี่ยนรูปแบบของตัวแปรให้เป็นค่าที่สามารถนำไปคำนวณได้

K1=double(s.k1) % เปลี่ยนรูปแบบของตัวแปรให้เป็นค่าที่สามารถนำไปคำนวณได้

K2=double(s.k2) % เปลี่ยนรูปแบบของตัวแปรให้เป็นค่าที่สามารถนำไปคำนวณได้

a0=49\*K0;

a1=a0\*tao;

a2=(a0\*tao^2)/2.5;

a3=(a0\*tao^3)/(12.5);

num=49\*K0;

den=[a3 a2 a1 a0];

fprintf('n= %g \n',num);

fprintf('d= [%g %g %g %g] \n',den);

(1)

% วิเคราะห์เสถียรภาพวงเปิดจาก โปต ไตอะแกรม และเฟส-แกน มาร์จิน

Bc=[K2 K1 K0]; % โพลีโนเมียลตัวเศษของตัวควบคุม

Ac=[1 0]; % โพลีโนเมียลตัวส่วนของตัวควบคุม

Bp=[49]; % โพลีโนเมียลตัวเศษของพลาเน็ต

Ap=[1 3 0]; % โพลีโนเมียลตัวส่วนของพลาเน็ต

Ba=K0; % ฟรีฟิลเตอร์

(2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

olnum=conv(Bc,Bp);
olden=conv(Ac,Ap);
[Gm,Pm,Wcp,Wcg]=margin(olnum,olden);
grid
Gm=20*log10(Gm);
Pm=Pm;
figure(1);
margin(olnum,olden)
fprintf('Gain Margin : %g dB & Phase crossover Freq : %g rad/s\n',Gm,Wcp);
fprintf('Phase Margin : %g degrees & Gain crossover Freq : %g rad/s\n',Pm,Wcg);

% วิเคราะห์เสถียรภาพวงปิด
D=length(olden)-length(olnum);
olnum1=[zeros(1,D) olnum];
polepoly=olden+olnum1;
zeropoly=conv(Ba,Bp);
[z,p,k]=tf2zp(zeropoly,polepoly);
disp('Zeros = ');disp(z);
disp('Pole = ');disp(p);
disp('Gain = ');disp(k);

% แสดงผลกราฟผลตอบสนองต่ออินพุตแบบสแต็ป และความสามารถในการกำจัดตัวรบกวน
numol=conv(Bp,Bc);
denol=conv(Ac,Ap);
[numcl,dencl]=feedback(numol,denol,1,1);
numclr=conv(numcl,Ba);
denclr=conv(dencl,Bc);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

t=0:0.01:20;
r=ones(size(t));
yr=lsim(numclr,denclr,r,t);
figure(2); plot(t,yr),...
grid
numcl1d=conv(numcl,Ac);
dencl1d=conv(denc1,Bc);
d=[zeros(1,250) ones(1,1751)/2];
yd=lsim(numcl1d,dencl1d,d,t);
y=yr+yd;
figure(3);plot(t,y),...
grid
numcl1d1=conv(numcl,conv(Ac,Ap));
dencl1d1=conv(denc1,conv(Bc,Bp));
yd1=lsim(numcl1d1,dencl1d1,d,t);
y1=yr+yd1;
figure(4);plot(t,y1),...
grid

% วิเคราะห์สมรรถนะของผลตอบสนองเชิงเวลาต่ออินพุตแบบสเต็ป
finalvalue=polyval(num,0)/polyval(den,0)
[y,x,t]=step(numclr,denc1r,20);
[Y,k]=max(y);
timetopeak=t(k)
percentovershoot=100*(Y-finalvalue)/finalvalue
% compute rise time
n=1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```
% โปรแกรมคำนวณค่าพารามิเตอร์เมื่อเลือกตัวควบคุมแบบ [2/2] สำหรับพลาเน็ตอันดับ 3
% แบบชนิด 1 ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด คือ  $G_p = (0.1s+1)/(0.25s^3+1.25s^2+s)$ 
% โดยกำหนดค่าคงตัวเวลาสมมูล และ  $k_0$  เป็นพารามิเตอร์ตั้งต้น เมื่อให้ดัชนีเสถียรภาพ 3 ตัวแรก
% เป็นค่ามาตรฐาน และให้ค่าดัชนีเสถียรภาพสูงสุดเป็นตัวแปรค่า
```

```
r1=input('r1 = ');
r2=input('r2 = ');
r3=input('r3 = ');
tao=input('tao = ');
K0=input('k0 = ');
syms R4 k1 k2 l1 l2
eqn1=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(r2),'*',num2str(r3),'
    *R4)=(0.25*l2)/((1.25*l2)+(0.25*l1))];
eqn2=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(r2),'*',num2str(r3),')=
    ((1.25*l2)+(0.25*l1))/(l2+(1.25*l1)+(0.1*k2))];
eqn3=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(r2),')=(l2+(1.25*l1)+
    (0.1*k2))/(l1+k2+(0.1*k1))];
eqn4=[num2str(tao),'/',num2str(r1),')=(l1+k2+(0.1*k1))/(k1+(0.1*',
    num2str(K0),'))];
eqn5=[num2str(tao),')=(k1+(0.1*',num2str(K0),'))/',num2str(K0),'];
s=solve(eqn1,eqn2,eqn3,eqn4,eqn5,'R4,k1,k2,l1,l2');
r4=double(s.R4)
K1=double(s.k1)
K2=double(s.k2)
L1=double(s.l1)
L2=double(s.l2)
a0=K0;
a1=a0*tao;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

a2=(a0*tao^2)/r1;
a3=(a0*tao^3)/(r2*r1^2);
a4=(a0*tao^4)/(r3*r2^2*r1^3);
a5=(a0*tao^5)/(r4*r3^2*r2^3*r1^4);
num=K0*[0.1 1];
den=[a5 a4 a3 a2 a1 a0];
fprintf('k0 = %g \n',K0);
fprintf('k1 = %g \n',K1);
fprintf('k2 = %g \n',K2);
fprintf('L1 = %g \n',L1);
fprintf('L2 = %g \n',L2);
fprintf('n= [%g %g] \n',num);
fprintf('d= [%g %g %g %g %g %g] \n',den);

% Open loop analysis,Bode plot,Gain&Phase Margin
Bc=[K2 K1 K0];
Ac=[L2 L1 0];
Bp=[0.1 1];
Ap=[0.25 1.25 1 0];
Ba=K0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1.] S.Manabe, "Coefficient Diagram Method", to be presented in the 14<sup>th</sup> IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Seoul, Aug 1988.
- [2.] Tason Lo, "An Algebraic Approach to Control System Design", to be presented to the University of Waterloo, Ontario, Canada, 1996.
- [3.] พงษ์ โพธิ์ทอง, จงกล งามวิวิทย์, Noriyuki Komine, Shunji Manabe, "PI Controller Design for SISO Process by CDM", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541.
- [4.] พงษ์ โพธิ์ทอง, จงกล งามวิวิทย์, Noriyuki Komine, Shunji Manabe, "PIDA Controller Design for Third Order Plant by CDM", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541.

