

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

CONTROLLER DESIGN BY

COEFFICIENT DIAGRAM METHOD (CDM)



นางสาวชมพूर्รัตน์ สุคันธมาลัย
นางสาวฐิติภาภรณ์ ศิริสวัสดิ์พิพัฒน์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42539
วัน, เดือน, ปี 24 พ.ศ. 2545



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CONTROLLER DESIGNED BY
COEFFICIENT DIAGRAM METHOD (CDM)**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2543
ภาควิชา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์
ผู้จัดทำ

นางสาวชมพูนุรัตน์ สุคันธมาลย์ 40010163
นางสาวจุฬารัตน์ ศิริสวัสดิ์พิพัฒน์ 40010204



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิ
จัดทำโดย	นางสาวชมพูนุรัตน์ สุคันธมาลัย นางสาวจุฬารัตน์ ศิริสวัสดิ์พัฒน์
ระดับการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รองศาสตราจารย์กิตติ ตีรเศรษฐ อาจารย์อาจินต์ น่วมสำราญ

บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม ที่เรียกว่า วิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิ ซึ่งวิธีนี้สามารถออกแบบตัวควบคุมที่มีความเหมาะสมให้กับระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้ออกแบบสามารถออกแบบตัวควบคุมและสมการคุณลักษณะของระบบปิด ให้มีผลตอบสนองชั่วคราว และผลตอบสนองสภาวะอยู่ตัวที่มีเสถียรภาพเป็นไปตามกำหนดโดยไม่ต้องทำการปรับแต่ง และผลตอบสนองที่ได้จะไม่มีค่าพุ่งเกิน และสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น โดยง่ายด้วยการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล และผลตอบสนองไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลง

Thesis Title CONTROLLER DESIGN BY COEFFICIENT DIAGRAM
METHOD :CDM

By Miss Chompornrut Sucanthamal
Miss Thipaporn Siriswadpipat

Degree Bachelor of Engineering

Year 2000

Thesis Advisor Assoc.Prof.Kitti Tirasesth
Mr.Arjin Numsomran

Abstract

This project presents a controller design method which is called Coefficient Diagram Method (CDM) . By this method the simplest controller to satisfy the specification can be designed efficiently. The designer can design the controller and the characteristic polynomial of the close-loop system simultaneously taking a good balance of stability that can be made stable and satisfied both transient and steady state response specification without any adjustment required. The designed fast step response with small overshoot can also be achieved by reducing the equivalent time constant and the robustness of the control system when parameter of the plant has changed ,can also shown.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับคำปรึกษาและความอนุเคราะห์จาก รศ.กิตติ ตีรเศรษฐ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์และอาจารย์อาจินต์ น่วมสำราญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ร่วม ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนและคำปรึกษาจนสำเร็จตามจุดประสงค์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ โนริยุกิ โคมิเนะ (Assoc.Prof.NoriYuki Komine) อาจารย์จากมหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่นที่ได้แนะนำแนวทางคำปรึกษาด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ถาวร เบญจนราสุทธิ์ อาจารย์ภาควิชาระบบควบคุม ที่ให้ความกรุณาแนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม และอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลองและความช่วยเหลือ ให้กำลังใจต่อผู้วิจัย จนสามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นลงตามวัตถุประสงค์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอบอบแต่บิดาและมารดา

ชมพורתน์ สุคันธมาลย์
ฐิภาภรณ์ ศิริสวัสดิ์พิพัฒน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	1
1.4 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....	4
2.3 สมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.4 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....	8
บทที่ 3 การทดลองการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	11
3.1 กล่าวนำ.....	11
3.2 การทดลองจำลองระบบควบคุมและการออกแบบตัวควบคุม.....	12
3.3 สรุป.....	23
บทที่ 4 การสร้างตัวควบคุมเพื่อใช้ในการควบคุมจริง.....	24
4.1 กล่าวนำ.....	24
4.2 ฮาร์ดแวร์.....	24
4.3 โปรแกรมควบคุมที่ใช้ในการทดลอง.....	27

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 การทดลองการออกแบบตัวควบคุมให้กับกระบวนการจริง.....	32
5.1 กล่าวนำ.....	32
5.2 การทดลอง.....	32
5.3 สรุปผลการทดลอง.....	38
บทที่ 6 โปรแกรมประยุกต์เพื่อช่วยการออกแบบตัวควบคุม ด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิ.....	43
6.1 กล่าวนำ.....	43
6.2 รูปแบบของโปรแกรมประยุกต์เพื่อช่วยการออกแบบตัวควบคุม ด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิ.....	43
6.3 การใช้งานโปรแกรมประยุกต์เพื่อช่วยการออกแบบตัวควบคุม ด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิ.....	46
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
7.1 บทสรุป.....	50
7.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	53

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดง โครงสร้างของระบบควบคุมทั่วไป.....	4
2.2 แสดง โครงสร้าง CDM มาตรฐาน.....	4
2.3 แสดงแผนผังค่าสัมประสิทธิ์(Coefficient Diagram).....	7
2.4 แสดงค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐาน (Stability Index).....	8
2.5 แสดงความมีเสถียรภาพ(Effect of Stability Index).....	9
2.6 แสดงผลของค่าคงตัวเวลาสมมูล.....	9
3.1 แสดงผลตอบสนองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ CDM กับกระบวนการอันดับหนึ่งชนิดหนึ่ง.....	12
3.2 แสดงผลตอบสนองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ CDM กับกระบวนการอันดับสองชนิดหนึ่ง.....	12
3.3 แสดงผลตอบสนองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ CDM กับกระบวนการอันดับสามชนิดหนึ่ง.....	13
3.4 แสดงผลตอบสนองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ CDM กับกระบวนการอันดับสี่ชนิดหนึ่ง.....	13
3.5 แสดงผลตอบสนองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ CDM กับกระบวนการอันดับห้าชนิดสอง.....	14
3.6 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธี CDM เปรียบเทียบกับวิธีของ Ziegler-Nichols กับกระบวนการอันดับสองชนิดศูนย์.....	15
3.7 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธี CDM เปรียบเทียบกับวิธีของ Ziegler-Nichols กับกระบวนการอันดับสองชนิดศูนย์.....	15
3.8 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธี CDM เปรียบเทียบกับวิธีของ Ziegler-Nichols กับกระบวนการอันดับสองชนิดหนึ่ง.....	16
3.9 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธี CDM เปรียบเทียบกับวิธีของ Ziegler-Nichols กับกระบวนการอันดับสองชนิดสอง.....	16
3.11แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ PIDA ด้วยวิธี CDM กับกระบวนการอันดับ สามชนิดศูนย์.....	18
3.12แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ PIDA ด้วยวิธี CDM กับกระบวนการอันดับ สามชนิดหนึ่ง.....	18
3.13แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ PIDA ด้วยวิธี CDM กับกระบวนการอันดับ สามชนิดสอง.....	19
3.14แสดงผลตอบสนองเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูลเปลี่ยนแปลง.....	19
3.15แสดงแผนผังค่าสัมประสิทธิ์เมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูลเปลี่ยนแปลง.....	20

สารบัญรูป(ต่อ)

3.16แสดงผลตอบสนองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบด้วยวิธีของ ศาสตราจารย์ชาร์ต คอฟ.....	21
3.17แสดงผลตอบสนองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยใช้วิธี CDM....	22
3.18แสดงความคงทนของระบบเมื่อใช้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM.....	22
4.1 แสดงการ์ดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกและอนาลอกเป็นดิจิตอล.....	25
4.2 แสดงวงจรแปลงสัญญาณแรงดัน0-5 โวลต์เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 4-20มิลลิแอมป์ และวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง4-20มิลลิแอมป์เป็นแรงดันไฟฟ้า0-5 โวลต์.....	25
4.3 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า0-5 โวลต์เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง4-20 มิลลิแอมป์.....	26
4.4 วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง4-20มิลลิแอมป์เป็นแรงดันไฟฟ้า0-5 โวลต์.....	26
4.5 ภาพแสดงกระบวนการวัดระดับ.....	27
4.6 แสดงการเชื่อมต่อพารามิเตอร์ของบล็อก Adapter.....	28
4.7 แสดงการเชื่อมต่อพารามิเตอร์ของบล็อก RT_In.....	29
4.8 แสดงการเชื่อมต่อพารามิเตอร์ของบล็อก RT_Out.....	29
4.9 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน.....	30
4.10แสดง โครงสร้างตัวควบคุมเพื่อควบคุมใช้งานจริง.....	30
4.11การทดลองการรับส่งค่าของการ์ดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกและอนาลอก เป็นดิจิตอล.....	31
5.1 ระบบการควบคุมที่ใช้ในการทดลอง.....	32
5.2 แสดงผลตอบสนองการเปิดวาล์วควบคุม 100 เปอร์เซ็นต์.....	34
5.3 แสดงผลตอบสนองจากการ Close Loop.....	35
5.4 แสดงบล็อก Simulink เมื่อทำการใส่ค่าของตัวควบคุมเพื่อส่งออกไปควบคุม กระบวนการ.....	37
5.5 แสดงผลตอบสนองของระบบปิด (Close Loop) เมื่อยังไม่มีตัวควบคุม.....	37
5.6 แสดงผลตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM โดยกำหนดค่าเวลาเข้าที่ 60 วินาที.....	38
5.7 แสดงบล็อก Simulink ของตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ที่กำหนดเวลาเข้าที่ ที่ 80 วินาที.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

5.8 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ที่กำหนด เวลาเข้าที่ที่ 80 วินาที.....	39
5.9 แสดงบล็อก Simulink เมื่อทำการใส่ค่าของตัวควบคุมแบบ PI ที่ออกแบบด้วย วิธี CDM เพื่อส่งค่าออกไปควบคุมกระบวนการ.....	40
5.10 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ออกแบบด้วย วิธี CDM.....	41
5.11 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ออกแบบด้วย วิธีสองผิวดสองถูก.....	41
6.1 แสดงหน้าต่างหลักของ โปรแกรม.....	44
6.2 แสดงแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้เมื่อกดปุ่ม Coefficient Diagram.....	45
6.3 แสดงผลตอบสนองที่เมื่อกดปุ่ม Response.....	45
6.4 แสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรม.....	46
6.5 แสดงแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของระบบตัวอย่าง.....	47
6.6 แสดงผลตอบสนองของระบบตัวอย่าง.....	48
6.7 แสดงตัวอย่างเมื่อค่าของระบบไม่เป็นไปตามเงื่อนไข.....	48
6.8 แสดงตัวอย่างของการใส่จำนวนของ Stability Index ไม่เหมาะสม.....	49

สารบัญตาราง

รูปที่

3.10 แสดงตารางเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ

หน้า

17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในวงการอุตสาหกรรมนั้น การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับที่ให้ผลตอบสนองและสมรรถนะเป็นไปตามความต้องการมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ดังที่ผ่านมามีผู้คิดค้นและนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อใช้ควบคุมกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งก็คือสามารถควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพ มีผลตอบสนองที่ตรงถึงคุณสมบัติความคงทนของระบบ แต่ในหลายๆวิธีดังกล่าวมักจะมีข้อจำกัดในการทำให้ระบบมีสมรรถนะทุกอย่างดังกล่าวได้ทั้งหมด

วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์สามารถแก้ปัญหานี้ได้ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ค่อนข้างใหม่และยังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลาย แต่วิธีนี้เป็นที่รู้จักกันมานานพอสมควรแล้วในวงการอุตสาหกรรม โดยได้รับการพัฒนามาจากหลายๆแนวความคิดและจากประสบการณ์ในการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งจะกล่าวถึงทฤษฎี วิธีการที่ใช้ในการออกแบบและการนำมาประยุกต์ใช้ในบทต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาทฤษฎี หลักการ โครงสร้างของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) และสามารถออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบได้
2. เพื่อเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) กับตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีอื่นๆ
3. เพื่อทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) ที่สามารถควบคุมระบบจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และโครงสร้างของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์
2. สามารถใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์
3. ทำการจำลองระบบเพื่อศึกษาผลตอบสนอง ทำการเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ กับวิธีอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาการแปลงสัญญาณ A/D และ D/A เพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสาร (interface) ระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก
5. ทำการออกแบบโปรแกรมประยุกต์เพื่อช่วยในการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิ
6. ทำการออกแบบตัวควบคุม ด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิให้กับกระบวนการจริงให้สามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งออกเป็น 7 บท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวนำ วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์และขอบเขตในการศึกษา

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึง ทฤษฎี หลักการ โครงสร้าง และการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิ

บทที่ 3 เป็นผลการทดลองในการจำลองระบบควบคุม เพื่อศึกษาผลตอบสนองของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิ และการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีอื่นๆ

บทที่ 4 กล่าวถึงการสร้างตัวควบคุมและระบบควบคุมซึ่งประกอบด้วย วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและขั้นตอนการเขียน โปรแกรมเพื่อนำไปใช้ในการทดลองควบคุมระบบ ในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยการ์ดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล วงจรแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแส และวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองเอาการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิไปใช้ควบคุมกับกระบวนการจริง

บทที่ 6 เป็นการกล่าวถึงโปรแกรมประยุกต์เพื่อช่วยในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิรวมถึงการใช้งาน

บทที่ 7 กล่าวถึงการสรุปผลการวิจัย

บทที่ 2

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

Controller Design By Coefficient Diagram Method

บทคัดย่อ

วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method : CDM) เป็นวิธีการที่ผู้ออกแบบสามารถใช้ในการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีนี้ ผู้ออกแบบจะทำการออกแบบสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) ของระบบควบคุมวงปิด (Closed Loop System) ได้โดยมีความเหมาะสมทั้งในด้านผลตอบสนอง ความมีเสถียรภาพ และความคงทนระบบควบคุม

2.1 บทนำ

ในการออกแบบระบบควบคุมนั้นเป้าหมายสูงสุด คือการสร้างตัวควบคุมที่สามารถควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างเหมาะสม คือมีผลตอบสนองที่ดี มีเสถียรภาพและสามารถควบคุมระบบที่เมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์ (Plant) เปลี่ยนแปลงภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ล่วงหน้าได้อย่างเหมาะสมคุณสมบัตินี้เรียกว่า ความคงทน (Robustness) ของระบบควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์นี้ยังเป็นวิธีที่ค่อนข้างใหม่ และยังไม่ค่อยเป็นที่รู้จัก แต่วิธีนี้ได้ถูกพัฒนามาจากหลายแนวคิดและทฤษฎี โดยทฤษฎีที่เป็นพื้นฐานของ CDM นั้นเป็นที่รู้จักกันมานานแล้วในการออกแบบระบบควบคุม (Kessler 1960 , Lipatov)

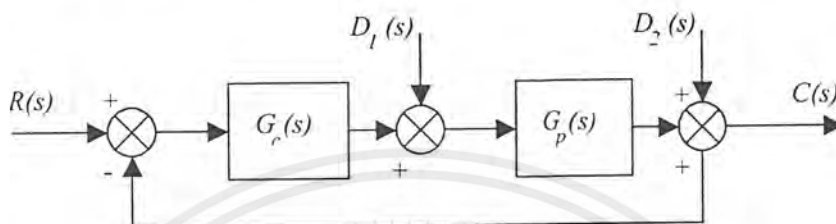
หัวใจสำคัญในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM คือการเลือกหรือการออกแบบสมการคุณลักษณะ โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_s (Stability Index) และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ (Equivalent Time Constant) โดยสมการคุณลักษณะที่ได้จะทำให้ระบบมีความเหมาะสมทั้งทางด้านผลตอบสนองความมีเสถียรภาพและความคงทนดังกล่าวข้างต้น

แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ เป็นแผนผังที่อยู่ในรูป Semilogarithmic โดยแผนผังนี้มีประโยชน์อย่างมากในการออกแบบ เนื่องจากผู้ออกแบบสามารถพิจารณาแนวโน้มต่างๆ จากแผนผังเพื่อทำการเลือกปรับค่าต่าง ๆ ในการออกแบบได้เป็นอย่างดี ดังจะกล่าวต่อไป

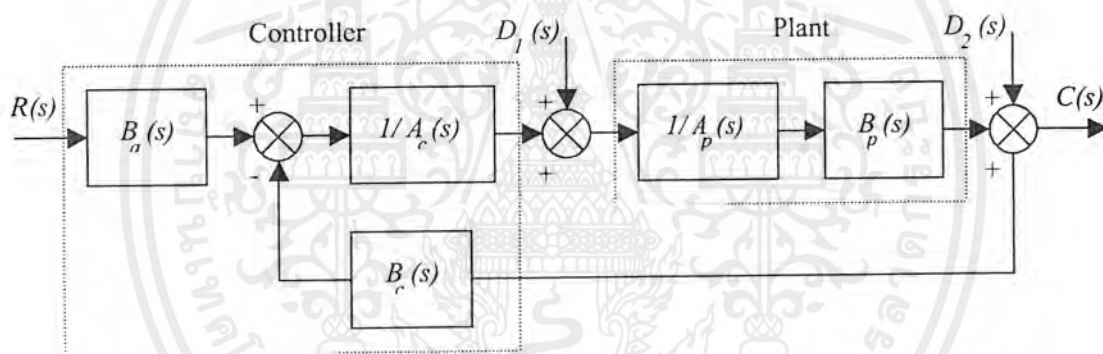
บทความนี้จะนำเสนอหลักการเบื้องต้นในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) วิธีการและสมการทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ

2.2 วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ CDM นั้น จะต้องทำการแปลงโครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 2.1 ให้อยู่ในรูปโครงสร้าง CDM มาตรฐานตามรูปที่ 2.2 โดยโครงสร้าง CDM มาตรฐานนี้ตัวตั้ง (Numerator) และตัวหาร (Denominator) ทั้งของตัวควบคุมและพลานต์จะถูกแยกออกจากกัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบควบคุมทั่วไป (Structure of the control system)



รูปที่ 2.2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน (CDM standard block diagram)

$$\begin{aligned} G_c(s) &= \frac{B_c(s)}{A_c(s)} \\ &= \frac{k_\lambda s^\lambda + k_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + k_0}{l_\lambda s^\lambda + l_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + l_0} \end{aligned}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\lambda < k$ และ $m < k$ เนื่องจากอันดับของตัวควบคุมจะน้อยกว่าอันดับของพลานต์ (Plant) ซึ่งจะทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด (open-loop transfer function) $G_c(s)G_p(s)$ มีโพลมากกว่าซีโร (Strictly proper)

จากรูปโครงสร้าง CDM มาตรฐานจะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมนั้นจะประกอบด้วยตัวตั้ง (Numerator) 2 ตัว คือ

$$B_u(s) = \text{Reference numerator}$$

$$B_c(s) = \text{Feedback numerator}$$

ดังนั้นจึงเรียกระบบนี้ว่า Two degree-of freedom system

สำหรับ $B_u(s)$ นั้นทำหน้าที่เป็นพรีฟิลเตอร์ (Prefilter) ของระบบควบคุม ซึ่งทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (Steady-state error) โดยถ้า $B_u(s)$ มีค่าเท่ากับ k_0 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีค่าพุ่งเกิน หรือไม่มี overshoot จากโครงสร้าง CDM มาตรฐานจะสามารถเขียนสมการคุณลักษณะได้ดังนี้

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

โดยที่ a_i เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ และเป็นค่าที่นำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM

2.3 สมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง (Mathematics Relations)

การออกแบบสมการคุณลักษณะด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์นั้นมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและมีความสำคัญอย่างยิ่ง 2 ตัวคือ

1. ค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i (Stability index)
2. ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ (Equivalent time constant)

พารามิเตอร์ทั้ง 2 ค่านี้จะเป็นตัวกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะนี้จะมีความสัมพันธ์ทางพีชคณิตกับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม โดยความเร็วในการตอบสนองจะแสดงด้วยค่าคงตัวเวลาสมมูล τ

$$\tau = \frac{a_i}{a_0} \quad \text{--- 1)}$$

และสำหรับเสถียรภาพ (Stability) ของระบบและความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของพลาเน็ตแสดงได้ด้วยค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* (Stability limit)

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1}a_{i-1}} \quad \text{--- 2)}$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}}, \gamma_0 = \gamma_n = \infty \quad \text{--- 3)}$$

เมื่อ $i = 1, \dots, n-1$ และ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วค่าเวลาที่เข้าที่จะสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลาสมมูลดังสมการ

$$t_s = 2.5 \sim 3\tau \quad \text{--- 4)}$$

สำหรับค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐานของ CDM ที่ใช้ในการออกแบบทั่วไปคือ

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5$$

อย่างไรก็ตามในการนำค่ามาตรฐานนี้ไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นจะต้องตรวจสอบเงื่อนไขสถานะของการมีเสถียรภาพด้วย

$$P_k / P_{k-1} > \tau / (\gamma_{n-1}\gamma_{n-2}\dots\gamma_1) \quad \text{--- 5)}$$

โดย p_k และ p_{k-1} คือสัมประสิทธิ์อันดับที่ k และ $k-1$ ของพลาเน็ต (plant) ตามลำดับ

ถ้าเงื่อนไขเป็นจริงสามารถใช้ค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐานเพื่อออกแบบตัวควบคุมต่อไปได้ แต่ถ้าเงื่อนไขไม่เป็นจริงให้ทำการเพิ่มค่า γ_i ในค่าดัชนีเสถียรภาพมาตรฐานให้สูงขึ้น

จากสมการที่ 1, 2 และ 3 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a_i ของสมการคุณลักษณะกับค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} a_i &= a_0 \tau^i \frac{1}{\gamma_{i-1} \dots \gamma_2^{\prime-2} \gamma_1^{\prime-1}} \\ &= a_0 \tau \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{(\gamma_{i-j})^j} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถเขียนสมการคุณลักษณะให้อยู่ในเทอมของ a_0 , τ และ γ_i ได้ดังนี้

$$P(s) = a_0 \left[\sum_{i=2}^n \left[\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}^j} \right] (\tau s)^i \right] + \tau s + 1 \quad \text{--- 6)}$$

2.4 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram)

แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram) เป็นแผนผังค่าประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะบนสเกลที่อยู่ในรูปของ logarithmic

ตัวอย่าง ถ้าสมการคุณลักษณะ $P(s)$ คือ

$$P(s) = 0.25s^5 + s^4 + 2s^3 + 2s^2 + s + 0.2$$

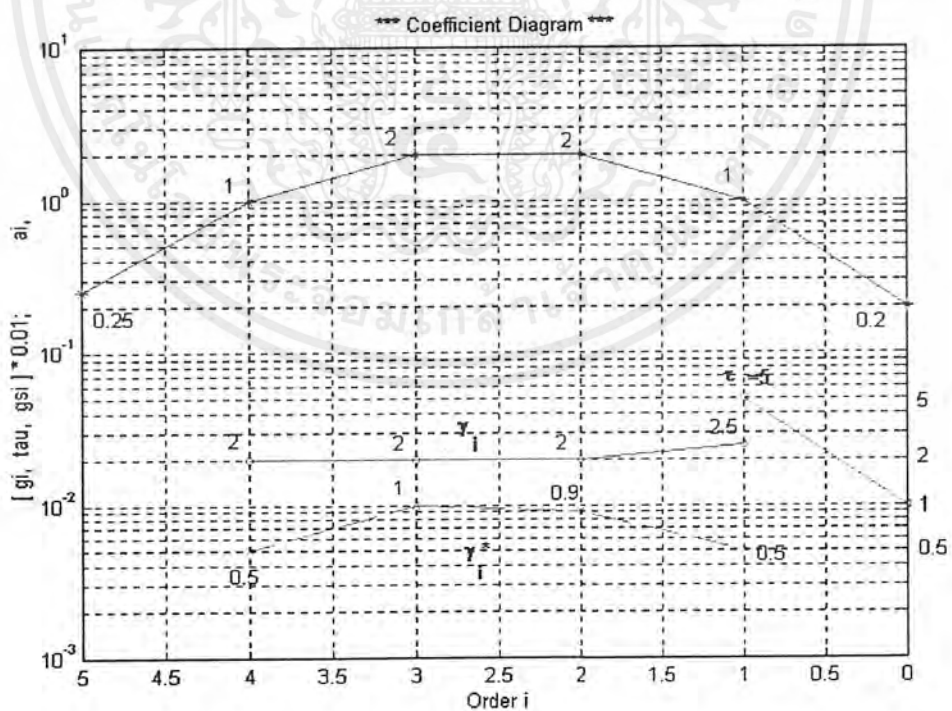
ดังนั้น $a_i = [0.25 \ 1 \ 2 \ 2 \ 1 \ 0.2]$

$$\gamma_i = [2 \ 2 \ 2 \ 2.5]$$

$$\gamma_i^* = [0.5 \ 1 \ 0.9 \ 0.5]$$

$$\tau = 5$$

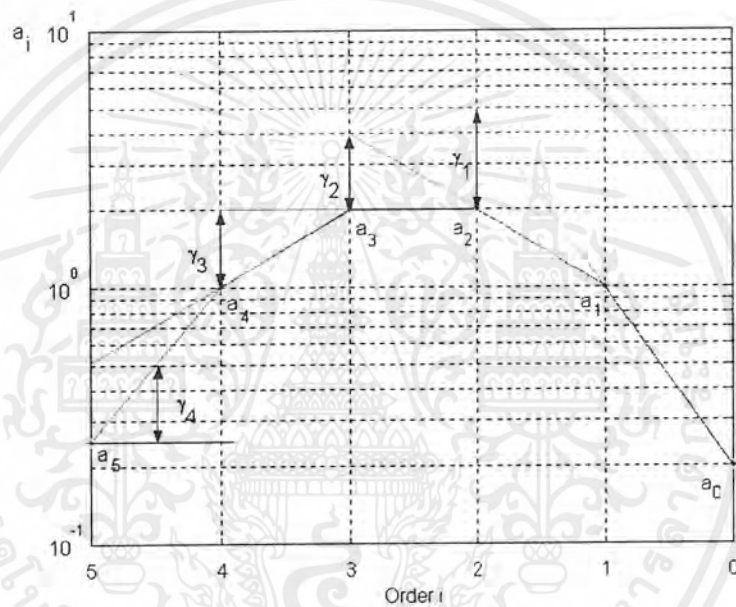
จะได้แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ดังนี้



รูปที่ 2.3 Coefficient Diagram

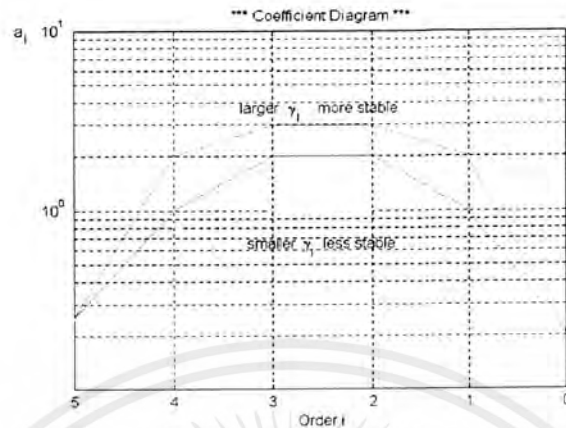
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ ค่าดัชนีเสถียรภาพ (γ_i) ค่าจำกัดเสถียรภาพ (γ_i^*) และค่าคงตัวเวลาสมมูล (τ) สามารถแสดงอยู่ในแผนผังเดียวกันได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ a_i จะถูกแสดงค่าโดยสเกลทางซ้ายมือ ส่วนค่าดัชนีเสถียรภาพ (γ_i) ค่าจำกัดเสถียรภาพ (γ_i^*) และค่าคงตัวเวลาสมมูล (τ) จะถูกแสดงค่าโดยสเกลทางด้านขวามือ แกนนอนของแผนผังจะแสดงอันดับของสมการคุณลักษณะ ค่าดัชนีเสถียรภาพ (γ_i) สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.4

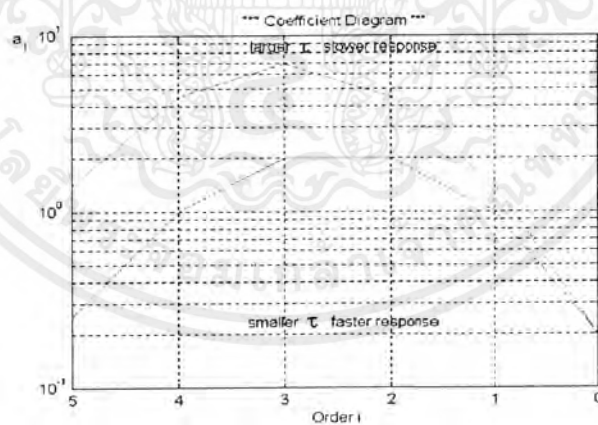


รูปที่ 2.4 Stability Index γ_i

ถ้าหากลักษณะ Curve ของค่าประสิทธิ์มีค่ามากขึ้น (ค่า a_i มีค่าสูงขึ้น) จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นดังรูปที่ 2.5 ซึ่งการที่ค่าสัมประสิทธิ์ a_i มีค่ามากขึ้นนั้น มีผลทำให้ค่าดัชนีเสถียรภาพมีค่าสูงขึ้นด้วย แต่ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์ a_i มีค่าลดลง ความมีเสถียรภาพจะมีค่าลดลงด้วย

รูปที่ 2.5 Effect of γ_i

จากรูปที่ 2.6 ถ้าลักษณะ Curve ของค่าสัมประสิทธิ์ a_i มีแนวโน้มที่มีค่าลดลงอย่างมากที่ปลายด้านซ้ายของ Curve แสดงให้เห็นว่าระบบมีผลตอบสนองเร็ว เนื่องจากค่าคงตัวเวลาสมมูลนั้นมีค่าน้อย

รูปที่ 2.6 Effect of τ

การพิจารณาความมีเสถียรภาพจะวัดได้จากการหักมุม (Convexity) ของ curve โดยถ้ามีองศาการหักมุมมาก แสดงค่าดัชนีเสถียรภาพจะมีค่ามาก ทำให้เสถียรภาพของระบบมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนผลตอบสนองของระบบจะดูได้จากความโน้มเอียงของ Curve และลักษณะที่เบี่ยงเบนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ Curve จะใช้วัดความคงทนของระบบ ดังนั้น สามคุณลักษณะของระบบควบคุมคือ ความมีเสถียรภาพ ผลตอบสนองและความคงทน สามารถที่จะพิจารณาได้โดยใช้เพียงแผนผังเดียว ซึ่งทำให้ผู้ออกแบบสามารถที่จะเลือกปรับค่าเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับระบบได้เป็นอย่างดี

ทั้งหมดนี้เป็นทฤษฎี หลักการและโครงสร้างของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ และในบทต่อไปจะเป็นการนำเอาทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษาไปทดลองทำการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อศึกษาผลตอบสนองดังจะกล่าวต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ผลการทดลองจากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองควบคุมกระบวนการโดยการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Matlab ในการจำลองระบบ

จากทฤษฎีบทที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 นำมาทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) ด้วยการทดลองกับกระบวนการที่อันดับ และชนิดต่างๆกัน เพื่อศึกษาถึงผลตอบสนองของกระบวนการ นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ กับการออกแบบด้วยวิธี Ziegler-Nichols ตัวควบคุมแบบ PIDA ที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ กับวิธีของ ศาสตราจารย์ Richard Doff

3.2 การทดลองจำลองระบบควบคุมและการออกแบบตัวควบคุม

การจำลองระบบควบคุมจะใช้โปรแกรม Matlab ในส่วนของ Simulink เพื่อศึกษาผลตอบสนองของระบบซึ่งการทดลองและผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

3.2.1 เป็นการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) โดยการจำลองระบบในส่วนนี้ เป็นการจำลองระบบที่ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ให้กับกระบวนการที่มีอันดับและชนิดต่างๆกัน ซึ่งผลตอบสนองของระบบแสดงได้ในรูปที่ 3.1 ถึงรูปที่ 3.5

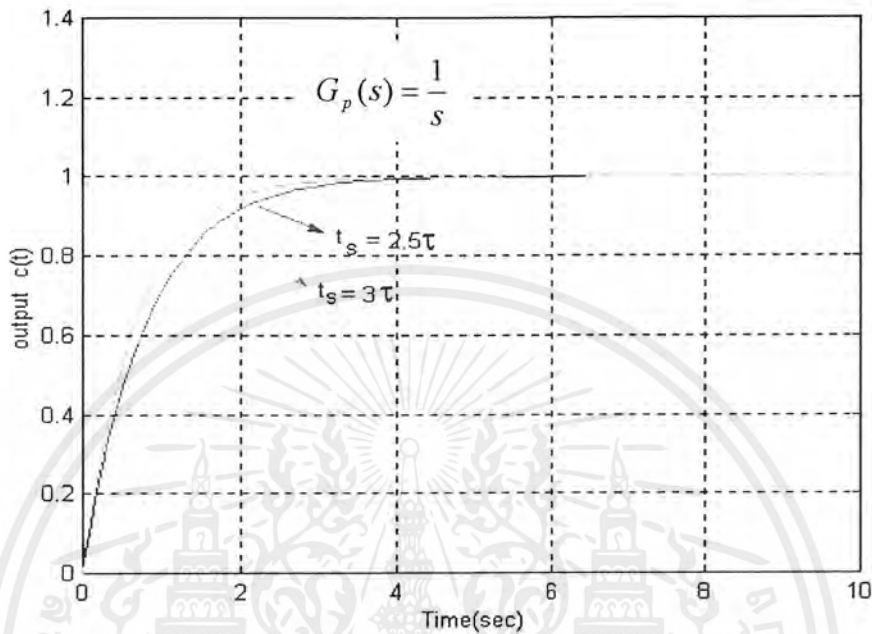
3.2.2 เป็นการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์เปรียบเทียบกับวิธีของ Ziegler-Nichols ที่กระบวนการอันดับต่างๆ และแสดงผลตอบสนองเปรียบเทียบดังรูปที่ 3.6 ถึง รูปที่ 3.9 พร้อมแสดงตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะในตารางรูปที่ 3.10

3.2.3 เป็นการออกแบบตัวควบคุมแบบ PIDA ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งผลตอบสนองที่ได้เป็นดังรูปที่ 3.11 ถึงรูปที่ 3.13

3.2.4 เป็นการแสดงผลตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนค่าคงตัวสมมูลที่ค่าต่างๆรวมทั้งแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ในรูปที่ 3.14 ถึง 3.15 และในรูปที่ 3.16 ถึงรูปที่ 3.18 เป็นการแสดงผลตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบเพื่อศึกษาคุณสมบัติความคงทนของระบบ โดยใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์เปรียบเทียบกับเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองของระบบที่ออกแบบด้วยวิธีของ ศาสตราจารย์ชาร์ต คอฟ รวมทั้งแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้

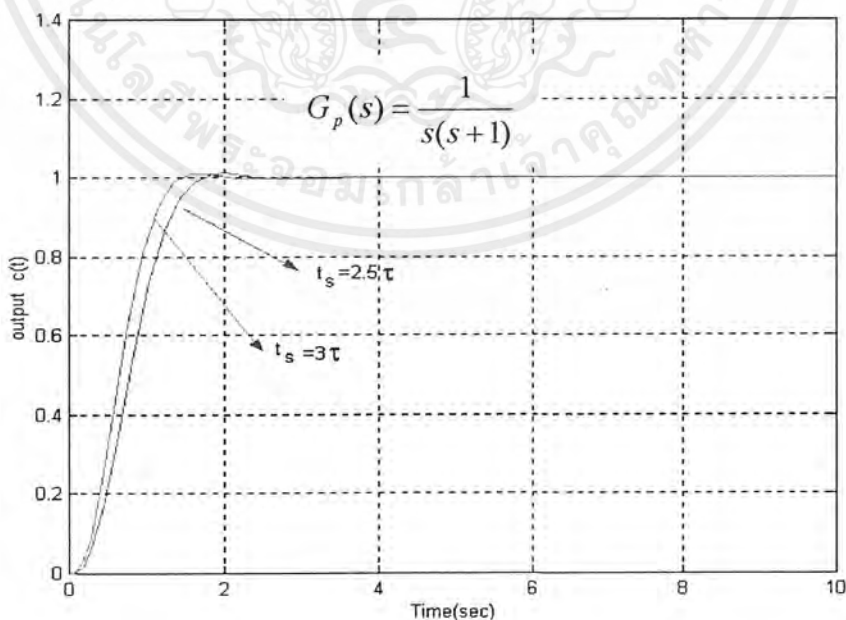
3.2.1 ผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

CDM Plant type 1 order 1



รูปที่ 3.1 ผลตอบสนองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ CDM กับกระบวนการอันดับหนึ่งชนิดหนึ่ง

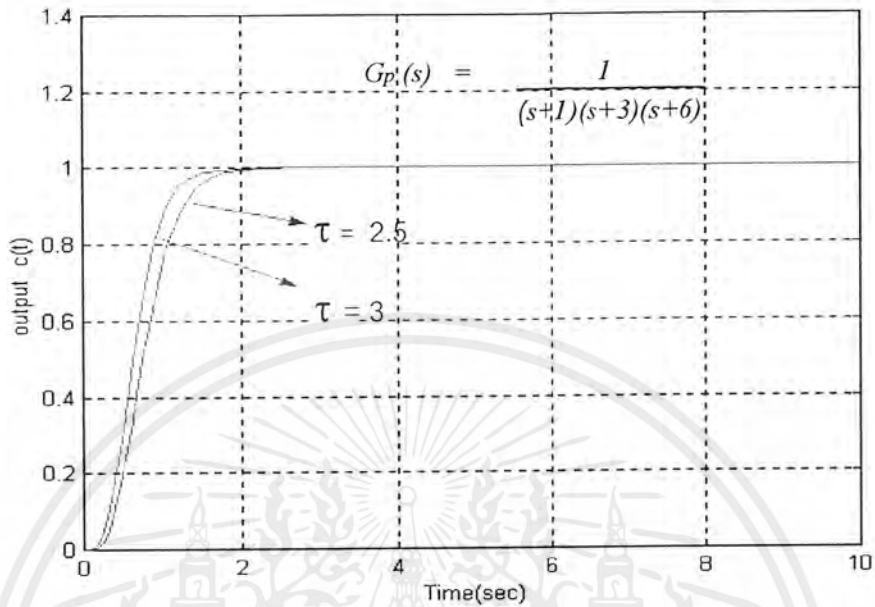
CDM Plant type 1 order 2



รูปที่ 3.2 ผลตอบสนองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ CDM กับกระบวนการอันดับสองชนิดหนึ่ง

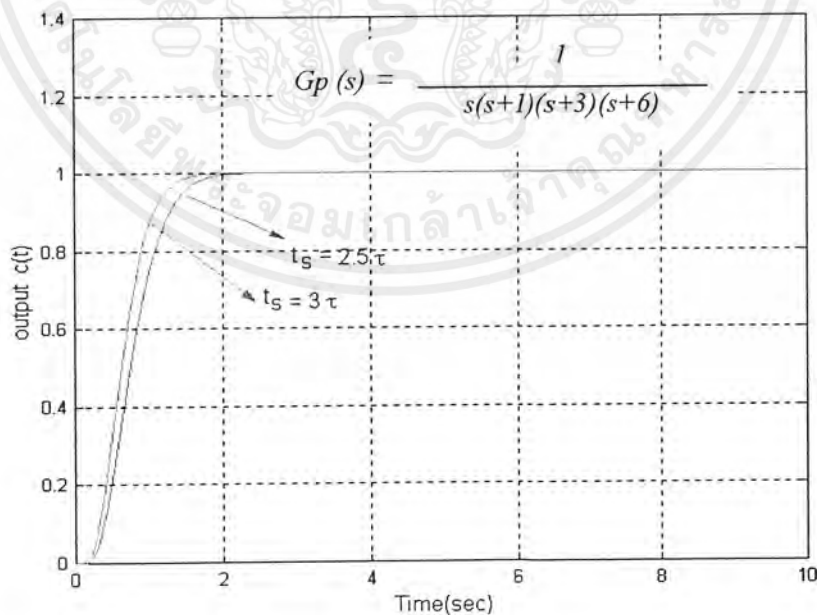
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CDM Plant type 0 order 3



รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ CDM กับกระบวนการอันดับสามชนิดศูนย์

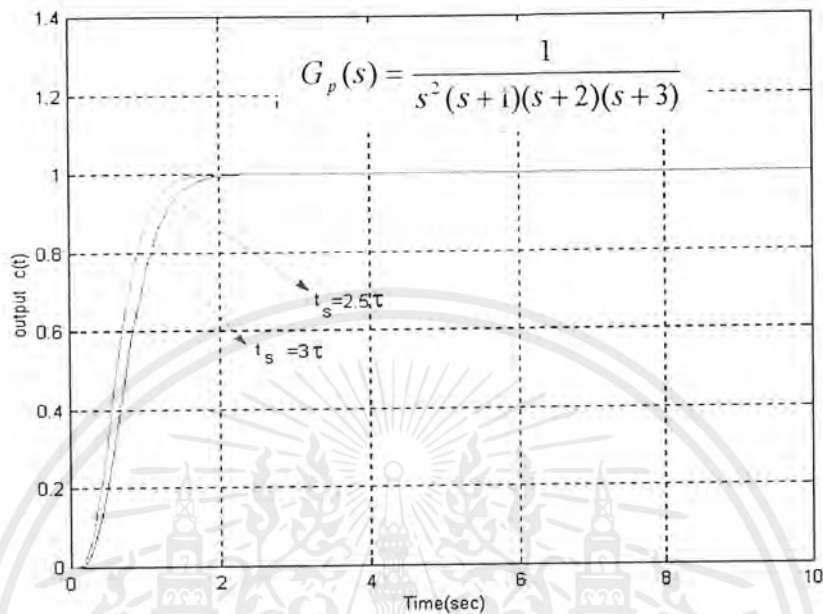
CDM Plant Type 1 order4



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ CDM กับกระบวนการอันดับสี่ชนิดหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CDM Plant Type 2 Order 5



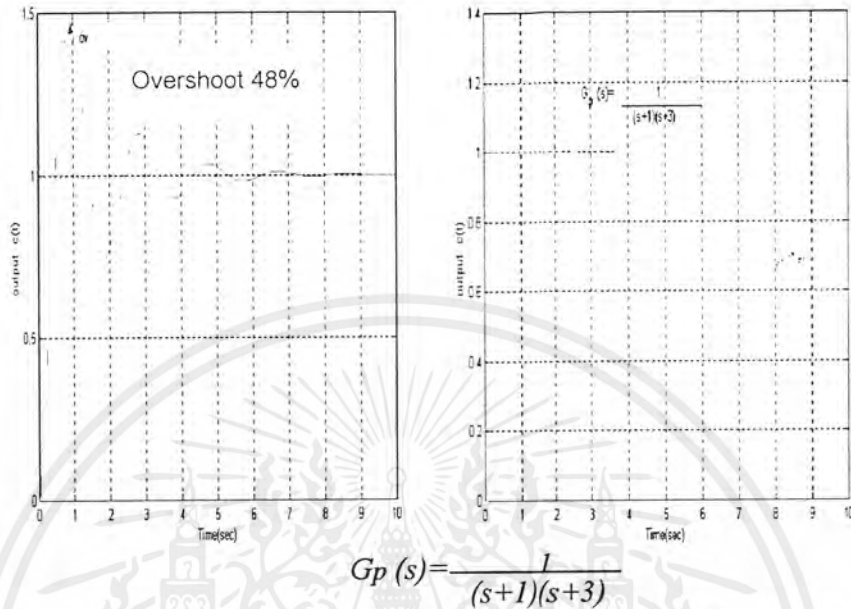
รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ CDM กับกระบวนการอันดับห้าชนิดสอง

จากผลตอบสนองที่ได้ทั้งหมด จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพและไม่มีค่าพุ่งเกิน (overshoot) หรือมีน้อยมาก รวมทั้งยังให้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่กำหนด ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดค่าเวลาเข้าที่ที่ 2 วินาทีโดยไม่ต้องทำการปรับแต่งค่าของตัวควบคุมที่ออกแบบได้

3.2.2 ผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์เปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบของ Ziegler-Nichols

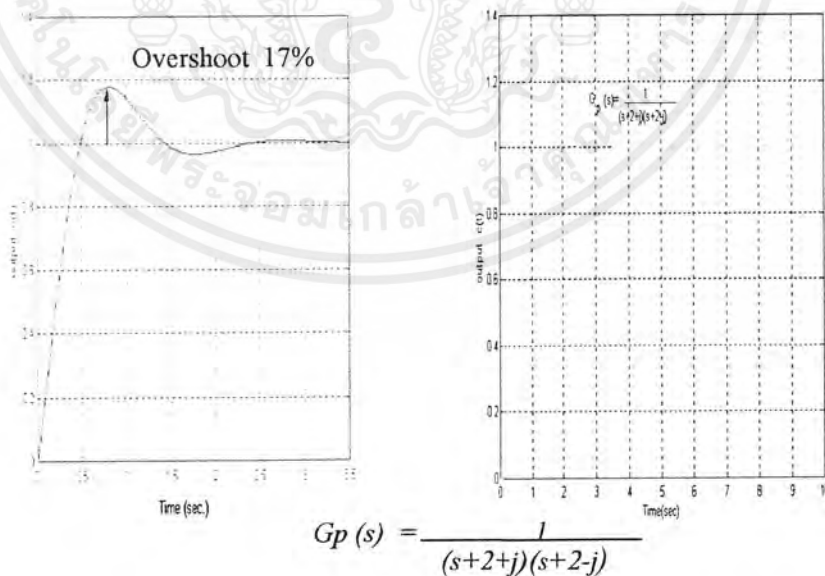
ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์และออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ที่ออกแบบด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols เพื่อทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองกัน รวมถึงศึกษาข้อดีข้อเสียเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลตอบสนองที่ได้เป็นดังนี้

Ziegler-Nichols **PID Controller**
CDM



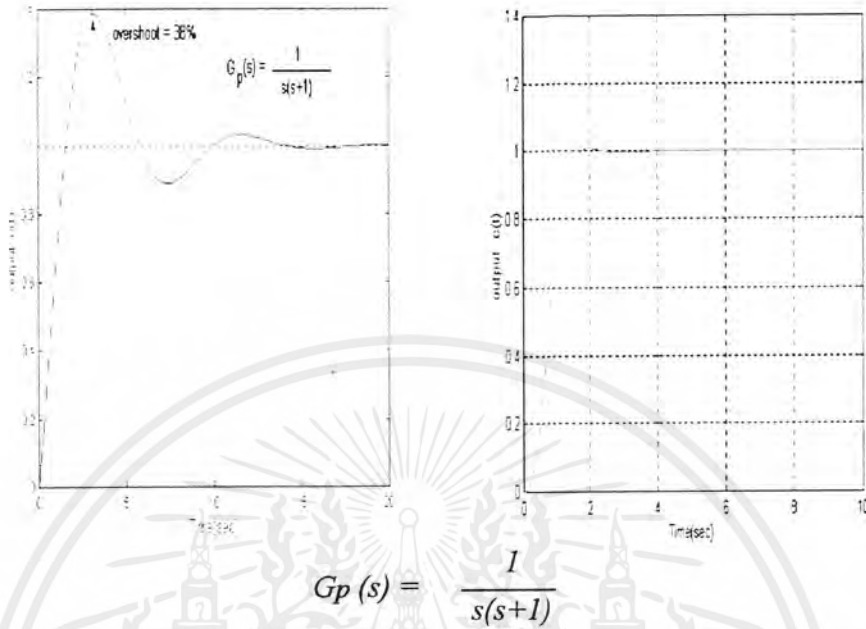
รูปที่ 3.6 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธี CDM เปรียบเทียบกับวิธีของ Ziegler-Nichols
กระบวนการอันดับสองชนิดศูนย์

Ziegler-Nichols **CDM**

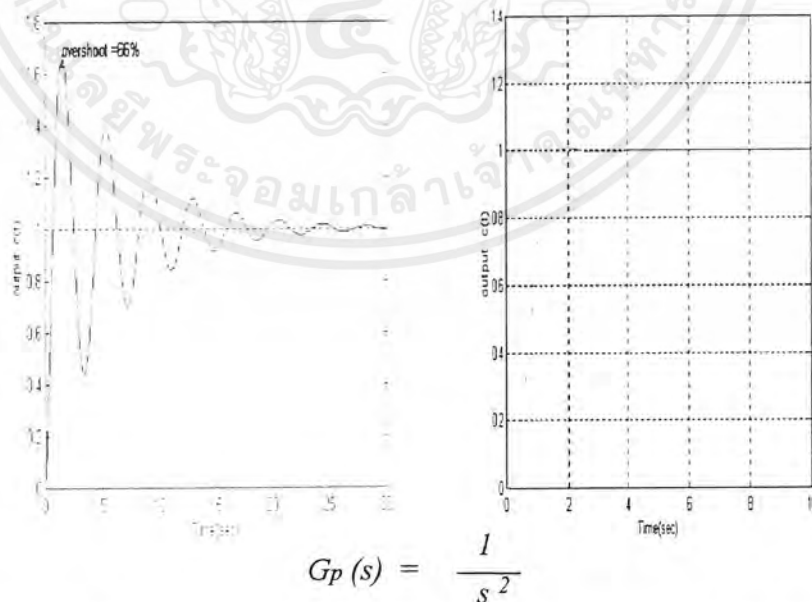


รูปที่ 3.7 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธี CDM เปรียบเทียบกับวิธีของ Ziegler-Nichols
เมื่อใช้ตัวควบคุมกระบวนการอันดับสองชนิดศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ziegler-Nichols**CDM**

รูปที่ 3.8 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธี CDM เปรียบเทียบกับวิธีของ Ziegler-Nichols
เมื่อใช้ตัวควบคุมกระบวนการอันดับสองชนิดหนึ่ง

Ziegler-Nichols**CDM**

รูปที่ 3.9 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธี CDM เปรียบเทียบกับวิธีของ Ziegler-Nichols
เมื่อใช้ตัวควบคุมกระบวนการอันดับสองชนิดสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

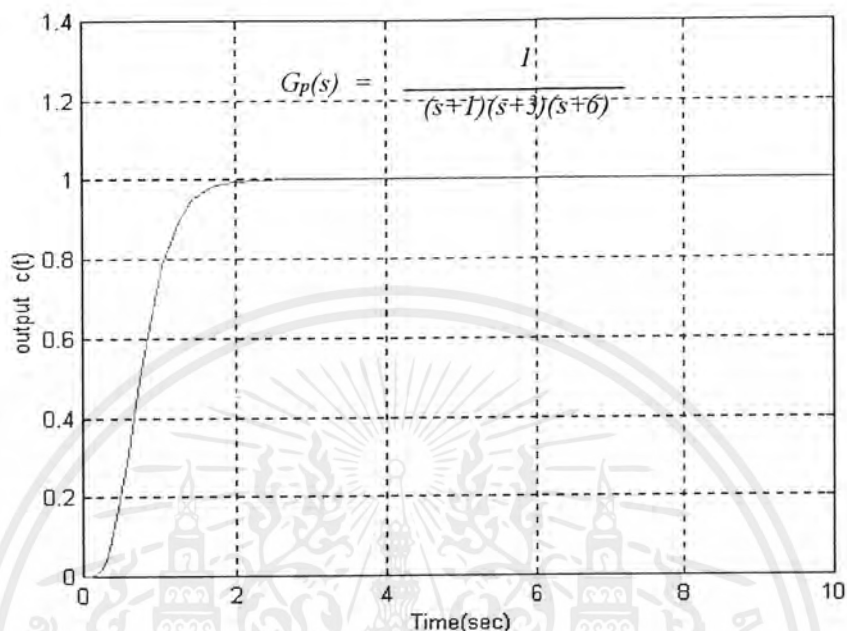
Process $G(s)$	PID Controller	t_r (sec)	t_s (sec)	Ess (%)	O_s (%)
$\frac{1}{(s+1)(s+3)}$	CDM	0.937	1.55	0	1
	Z-N	0.43	6.4	0	48
$\frac{1}{(s+2+j)(s+2-j)}$	CDM	0.936	1.54	0	1
	Z-N	0.384	2.08	0	17
$\frac{1}{s(s+1)}$	CDM	1.4	1.55	0	1
	Z-N	1.29	12.8	0	38
$\frac{1}{s^2}$	CDM	0.937	1.55	0	1
	Z-N	0.604	22.8	0	66

รูปที่ 3.10 ตารางเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ

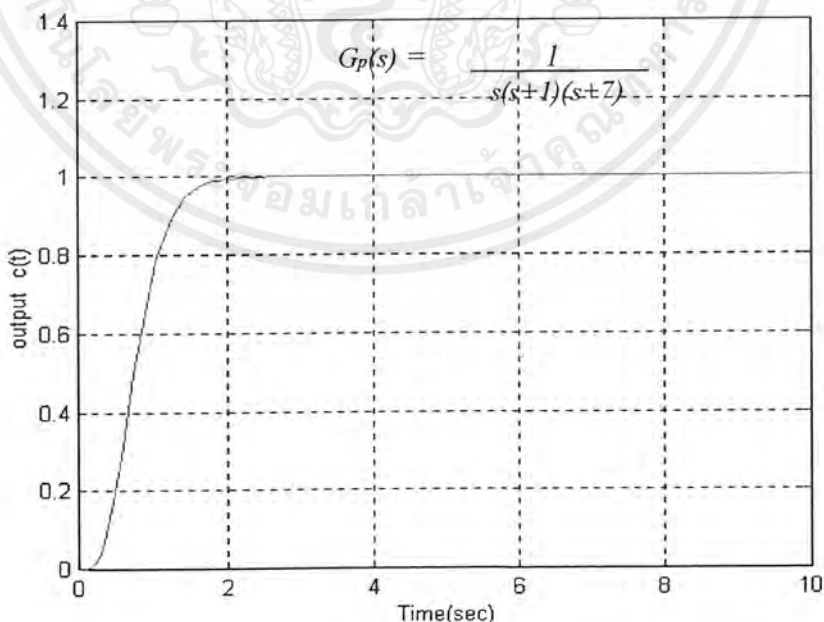
จากผลตอบสนองที่ได้จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบ PID ที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่าพุงเกินที่น้อยกว่าและมีค่าเวลาเข้าที่ใกล้เคียงกับค่าเวลาเข้าที่กำหนดคือที่เวลา 2 วินาทีโดยไม่ต้องทำการปรับแต่ง แต่วิธีของ Ziegler-Nichols หากต้องการให้ได้ตามกำหนดที่ต้องการมักจะต้องการปรับแต่งค่าหลายครั้ง แต่การออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะมีเวลาขาขึ้น (Rise Time) ที่ค่อนข้างช้า ซึ่งค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.10

3.2.3 ผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบPIDA ที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ในหัวข้อนี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบ PIDA ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 3.11 ถึงรูปที่ 3.13

PIDA Controller By CDM

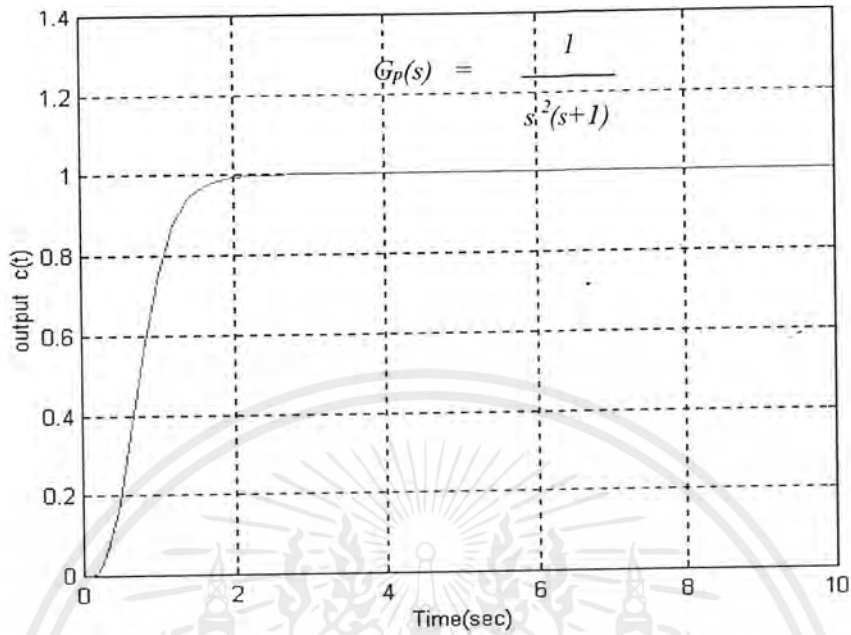


รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ PIDA ด้วยวิธี CDM กระบวนการอันดับสามชนิดศูนย์



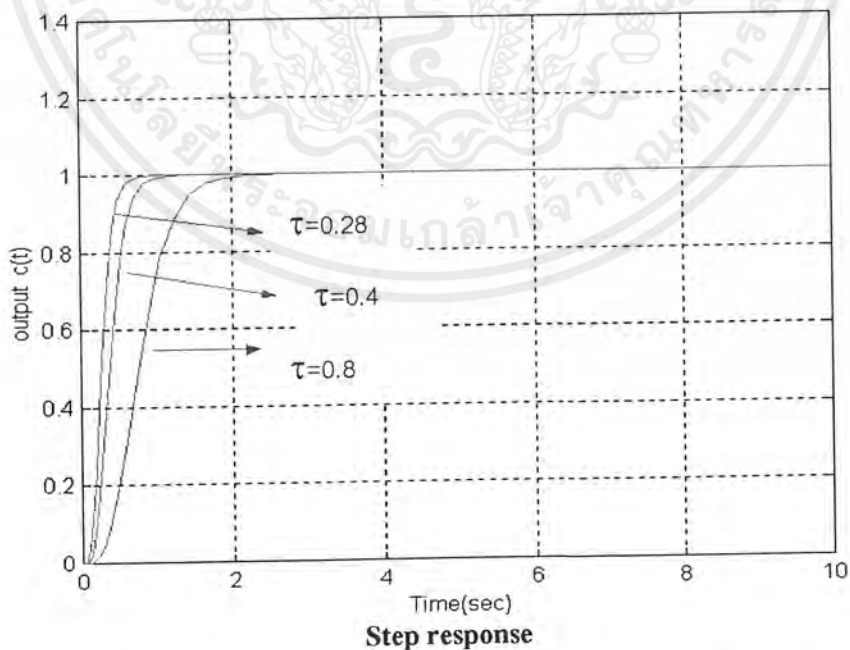
รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ PIDA ด้วยวิธี CDM กระบวนการอันดับสามชนิดหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ PIDA ด้วยวิธี CDM กระบวนการอันดับสามชนิดสอง

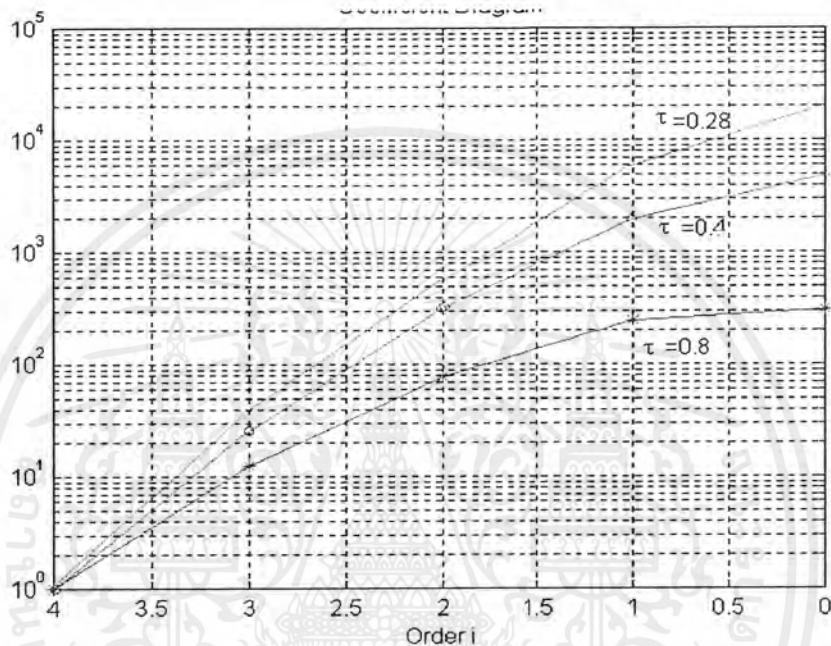
3.2.4 การศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะของระบบและแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient diagram)



รูปที่ 3.14 แสดงผลตอบสนองเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูลเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 เป็นผลตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวเวลาสมมูล ซึ่งผลตอบสนองจะเร็วขึ้นเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูลมีค่าน้อยลง ซึ่งเมื่อนำมาเขียนเป็นแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงแผนผังค่าสัมประสิทธิ์เมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูลเปลี่ยนแปลง

จากแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ตามรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวเวลาสมมูลเพื่อให้ผลตอบสนองเร็วขึ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จะมีแนวโน้มลดลงอย่างมากที่ปลายทางด้านซ้าย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ต่อมาได้ทำการศึกษาความคงทน (Robustness) ของระบบ ซึ่งความคงทนของระบบก็คือการที่ผลตอบสนองไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อพารามิเตอร์ของพลานต์เปลี่ยนแปลง ซึ่งได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของพลานต์ (plant) เพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์และลดค่าพารามิเตอร์ของพลานต์ (plant) 50 เปอร์เซ็นต์ โดยทดลองกับพลานต์ (plant) ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(s+3)(s+6)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

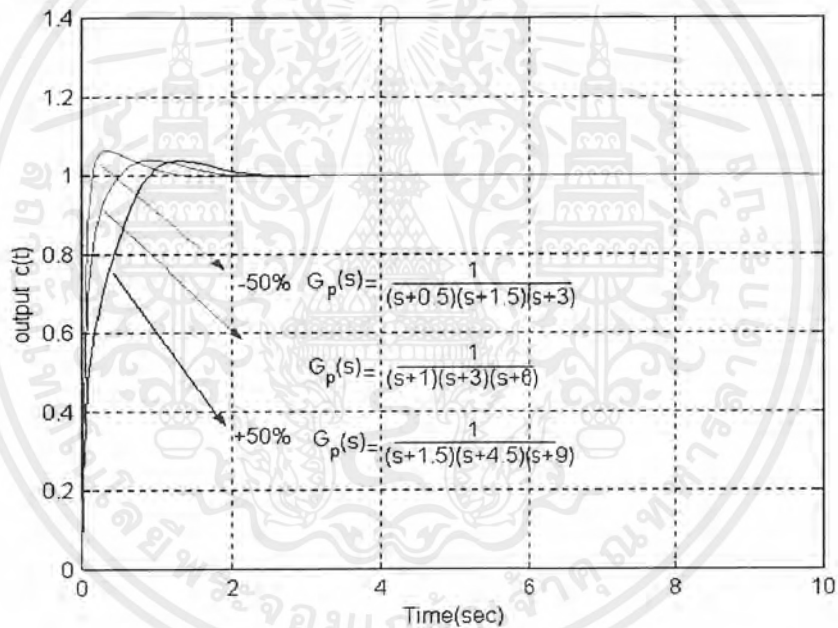
เมื่อเพิ่มค่าพารามิเตอร์ 50 เปอร์เซ็นต์

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1.5)(s+4.5)(s+9)}$$

เมื่อลดค่าพารามิเตอร์ 50 เปอร์เซ็นต์

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+0.5)(s+1.5)(s+3)}$$

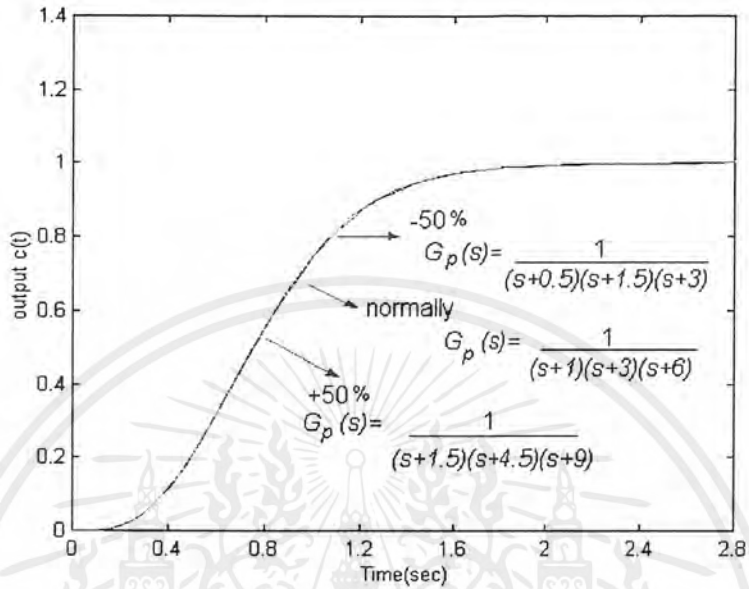
จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีของศาสตราจารย์ริชาร์ด คอฟ และด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะได้ผลซึ่งจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 ตามลำดับ



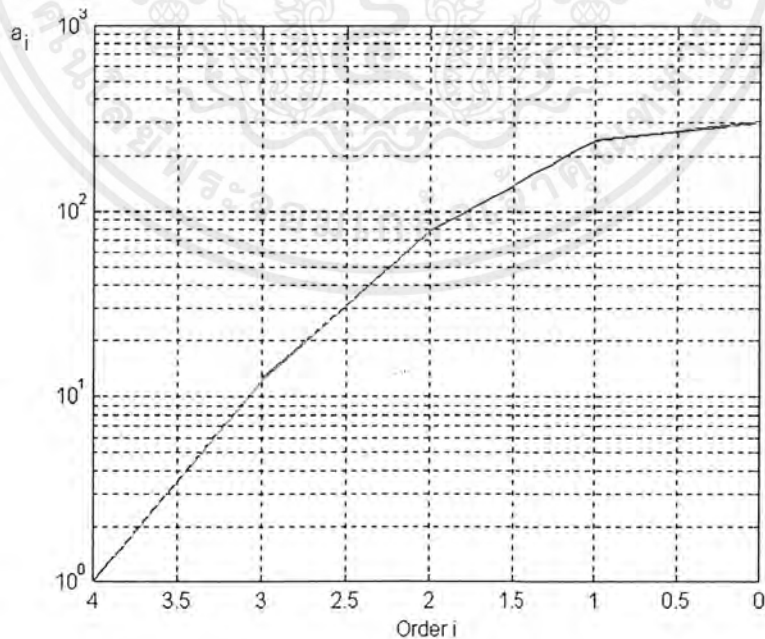
รูปที่ 3.16 แสดงผลตอบสนองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ออกแบบด้วยวิธีของศาสตราจารย์ริชาร์ด คอฟ

ซึ่งจะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีของศาสตราจารย์ริชาร์ด คอฟนั้นจะให้ผลตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าผลตอบสนองของระบบที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งผลตอบสนองของวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากซึ่งแสดงว่าระบบมีความคงทน(Robustness) และเมื่อนำไปเขียนเป็นแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะได้ดังรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงผลตอบสนองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ โดยใช้วิธี CDM



รูปที่ 3.18 แสดงความคงทนของระบบเมื่อใช้การออกแบบด้วยวิธี CDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.18 จะเห็นได้ว่าแผนผังค่าสัมประสิทธิ์แทบจะทับกันสนิท ซึ่งหมายถึงผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ซึ่งเป็นไปตามที่ทฤษฎีได้กล่าวไว้ในเรื่องของความคงทนของระบบ

3.3 สรุป

จากผลการทดลองการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรม Matlab ในบทนี้จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองที่ได้จะมีความเสถียรภาพที่ดี ไม่มีค่าพุ่งเกิน (overshoot) หรือมีน้อยมากและมีผลตอบสนองที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง รวมทั้งให้ผลตอบสนองสภาวะอยู่ตัวเป็นไปตามข้อกำหนดโดยไม่ต้องทำการปรับแต่ง

ในบทต่อไปผู้วิจัยจะกล่าวถึงส่วนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์เพื่อนำไปควบคุมกับกระบวนการจริง โดยกล่าวถึงฮาร์ดแวร์และโปรแกรมที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยต่อไป



บทที่ 4

การสร้างตัวควบคุมเพื่อใช้ในการควบคุมจริง

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นการสร้างตัวควบคุม เพื่อนำมาใช้จำลองการทำงานของระบบ และทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้กับกระบวนการควบคุมระดับ (Level Process) ซึ่งในการสร้างจะกล่าวถึงส่วนของฮาร์ดแวร์เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เชื่อมโยงอุปกรณ์ภายนอกเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และเป็นตัวส่งสัญญาณควบคุมให้กับกระบวนการซึ่งระบบจะประกอบด้วยแผ่นวงจรแปลงสัญญาณ A/D และ D/A วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส (V/I Converter) วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน (I/V Converter) เนื่องจากอุปกรณ์ในระบบควบคุมในกระบวนการ ต้องพิจารณาอินพุตในกระบวนการเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 4-20 mA ในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบในวิศวกรรมหลายแขนง ซึ่งได้นำเอาส่วนใช้งานที่เรียกว่า Simulink ซึ่งมี toolbox ที่สามารถเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์กับอุปกรณ์ภายนอกได้ในลักษณะเวลาจริง ซึ่งจะขอกกล่าวถึงส่วนที่เกี่ยวข้องเป็นหลัก

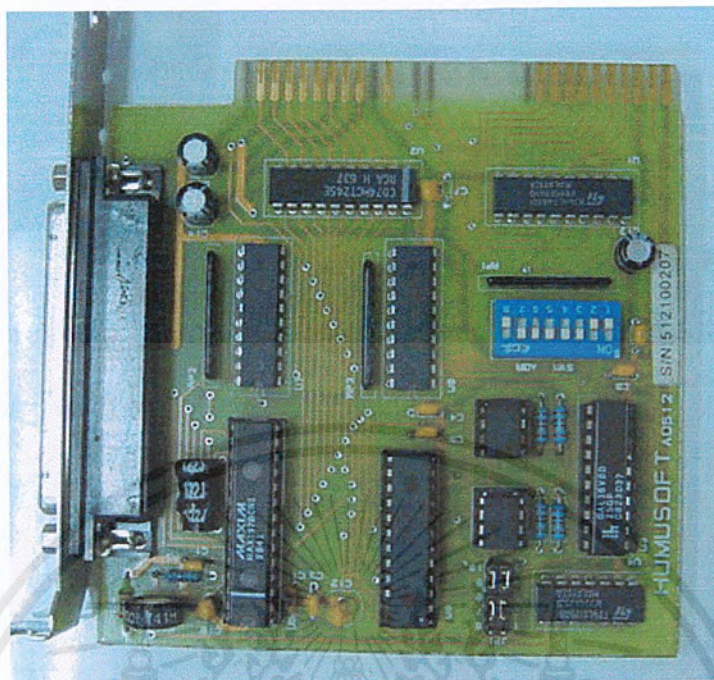
4.2 ฮาร์ดแวร์

4.2.1 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A

การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ที่ใช้ในงานวิจัย มีรายละเอียดสำคัญดังนี้

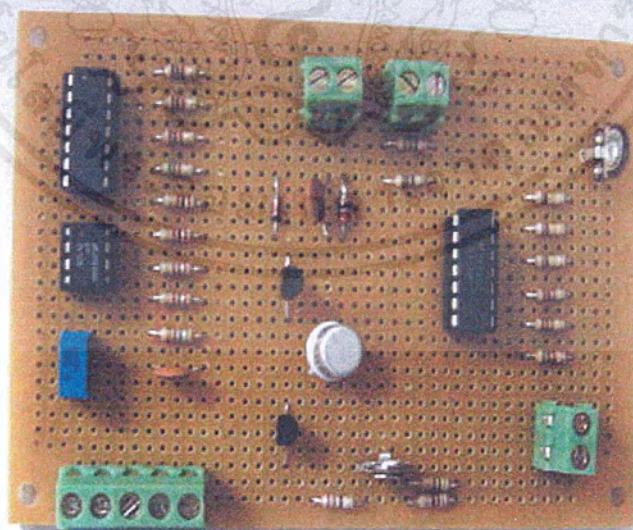
- วงจรในส่วนของการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 12 บิต 8 ช่องสัญญาณ
 - อัตราการสุ่มสูงสุด 100 KHz
 - สามารถโปรแกรมย่านการใช้งานด้วยโปรแกรมตั้งแต่ $\pm 10V$, $\pm 5V$, $0-10V$, $0-5V$
 - มีวงจรมหาพีคาและแรงดันอ้างอิงภายใน
 - มีเอาต์พุต 2 ช่อง มีย่านการใช้งานด้วยโปรแกรมตั้งแต่ $\pm 10V$, $\pm 5V$, $0-10V$, $0-5V$ โดยการเซตที่จัมเปอร์บนแผ่นวงจร
 - มี DIP switch ในการตั้ง Address นำข้อมูลเข้า และส่งข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์
 - อัตราการใช้พลังงานที่ 5 V ใช้ 100 mA และที่ 12 Volt ใช้ 50 mA และที่ $-12V$ olt ใช้ 50 mA
- อุณหภูมิย่านใช้งาน 0 C จนถึง +70C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



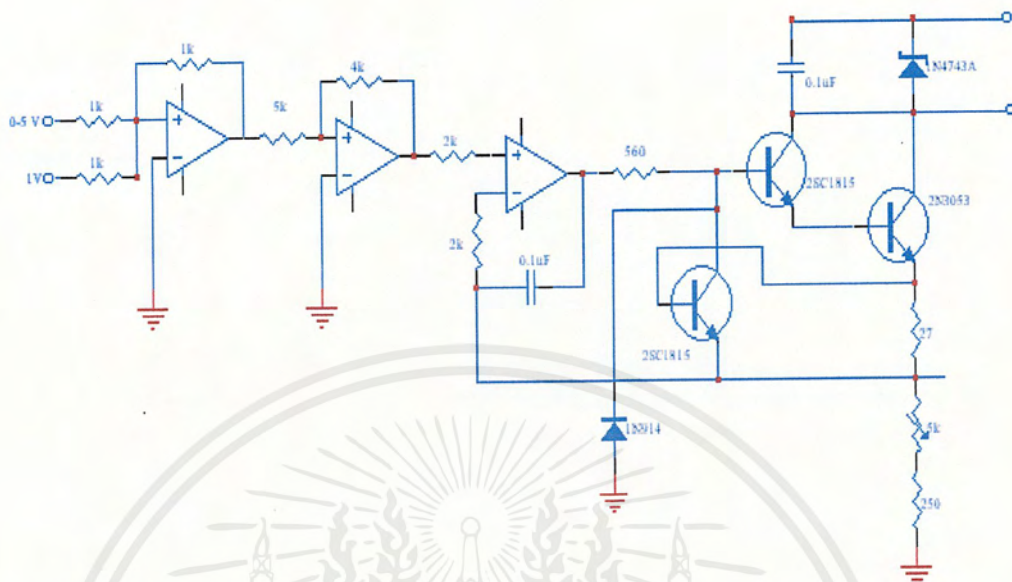
รูปที่ 4.1 แสดงการ์ดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกและแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

4.2.2 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสและวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน

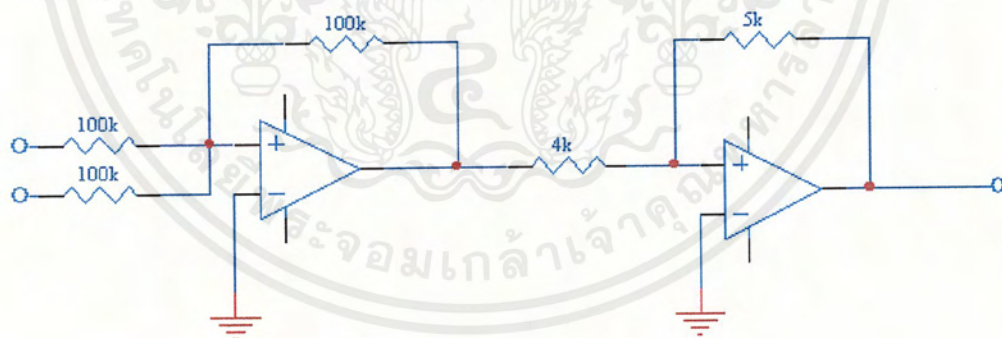


รูปที่ 4.2 แสดงวงจรแปลงสัญญาณแรงดัน 0-5 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 4 – 20 mA และวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง 4-20 mA เป็นแรงดันไฟฟ้า 0-5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-5 โวลต์ เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแส
ขนาด 4-20 มิลลิแอมป์

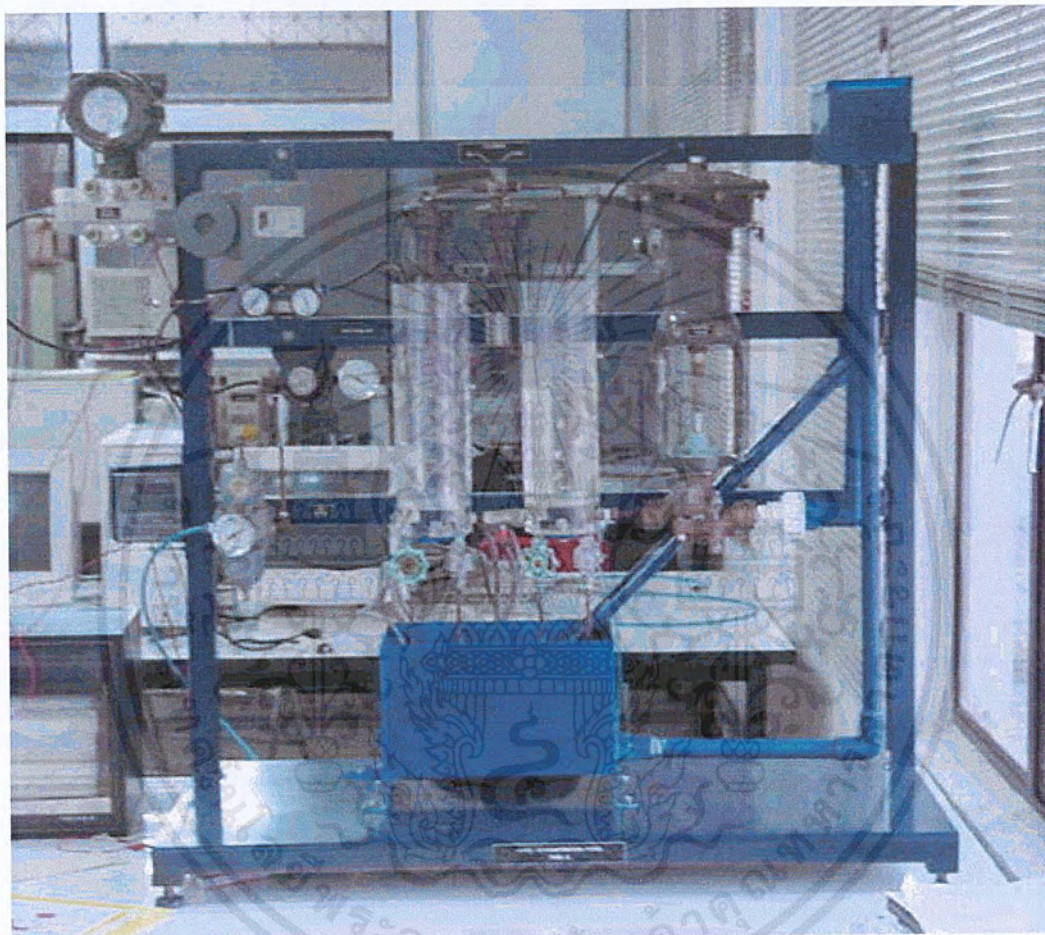


รูปที่ 4.4 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 มิลลิแอมป์เป็นสัญญาณแรงดัน
ไฟฟ้าขนาด 0-5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 กระบวนการที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองได้ใช้กระบวนการการควบคุมระดับ (Level process) ซึ่งกระบวนการควบคุมระดับนี้มีวาล์วควบคุมแบบปกติเปิด (Normally open) และมีอุปกรณ์วัดระดับคือ ตัววัดความดันแตกต่าง Differential Pressure Transmitter ดังรูป



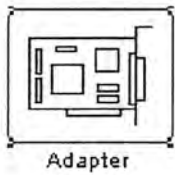
รูปที่ 4.5 ภาพแสดงกระบวนการวัดระดับ

4.3 โปรแกรมควบคุมที่ใช้ในงานทดลอง

โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย Toolbox ของโปรแกรม Matlab ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางในหมู่วิศวกร หรือนักออกแบบระบบ ดังนั้นในส่วนนี้จะกล่าวถึงส่วนเพิ่มเติม ในการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกคือ ติดต่อกับการ์ด แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก และแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล ซึ่งขอแบ่งเป็น 3 ส่วนเพื่อง่ายต่อการเข้าใจ

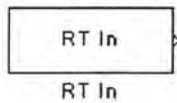
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รายละเอียด Toolbox ที่ใช้งาน



Adapter

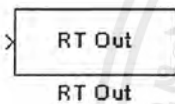
เป็น Toolbox ที่ช่วยในการติดต่อกับแผ่นการ์ด ซึ่งอยู่ใน slot ของคอมพิวเตอร์เพื่อนำ ค่าสู่อุปกรณ์ภายนอก



RT In

โปรแกรม

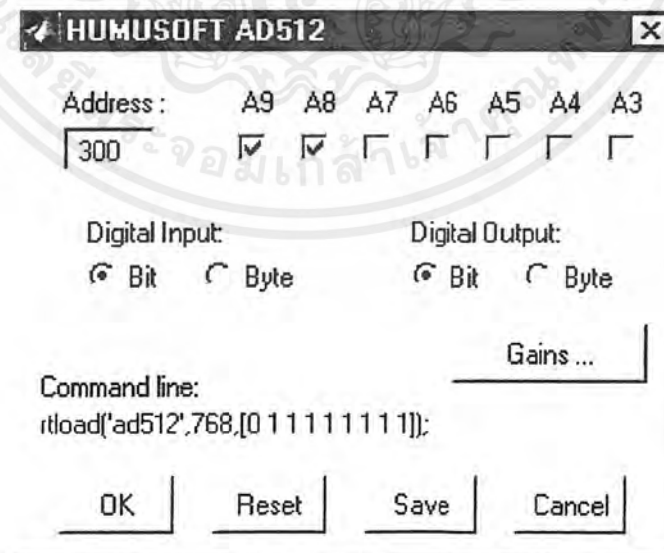
เป็น Toolbox ที่ช่วยในการนำค่าจากบล็อก Adapter สู่ตัวควบคุมใน



RT Out

เป็น Toolbox ที่ช่วยในการนำค่าออกจากบล็อกคำนวณสู่บล็อก Adapter

- การติดตั้งโปรแกรมสามารถเซตค่าบล็อกต่างๆ ดังรูปที่ 4.6 ,รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 แสดงการเซตค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Adapter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Block Parameters: RT In

RT Input (mask) (link)

Real-time input unit

Parameters

Sample time: 1

Maximum ticks lost: 100

HW adapter: 'Adapter'

Adapter channels: 1

OK Cancel Help Apply

รูปที่ 4.7 แสดงการเซตค่าพารามิเตอร์ของบล็อก RT_In

Block Parameters: RT Out

RT Output (mask) (link)

Real-time output unit

Parameters

Sample time: 1

Maximum ticks lost: 100

HW adapter: 'Adapter'

Adapter channels: 1

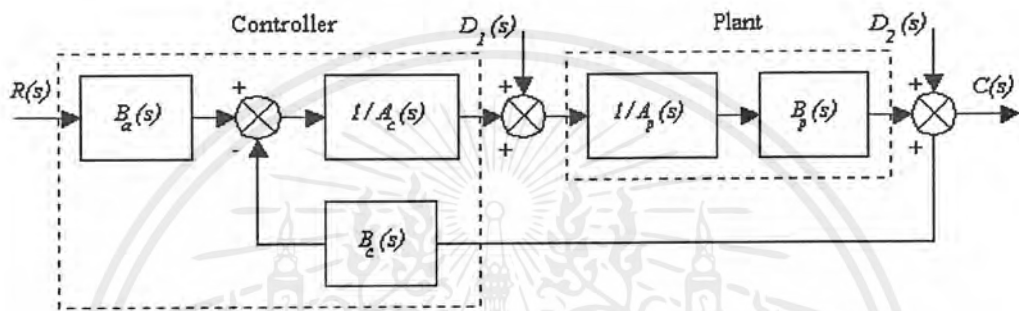
OK Cancel Help Apply

รูปที่ 4.8 แสดงการเซตค่าพารามิเตอร์ของบล็อก RT Out

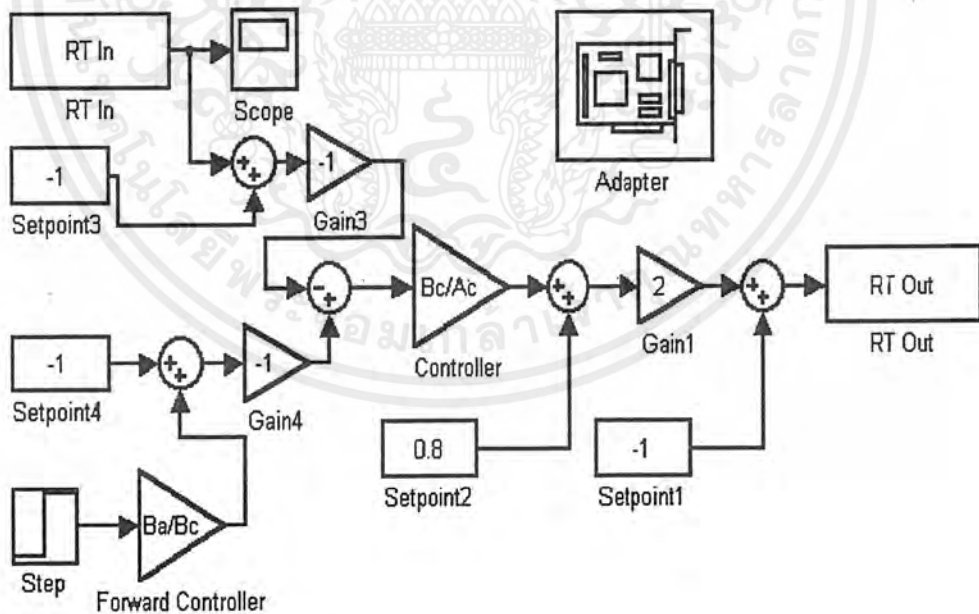
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โครงสร้างตัวควบคุม

ในที่นี้ได้ทำการออกแบบโปรแกรม Matlab โดยใช้ในส่วนของ Simulink และ Real-time toolbox เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมในการรับและส่งค่าการควบคุมกับระบบภายนอก และจากโครงสร้างของตัวควบคุมแบบวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 จะทำให้ได้โครงสร้างของตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมกับกระบวนการจริงเป็นดังรูปที่ 4.10



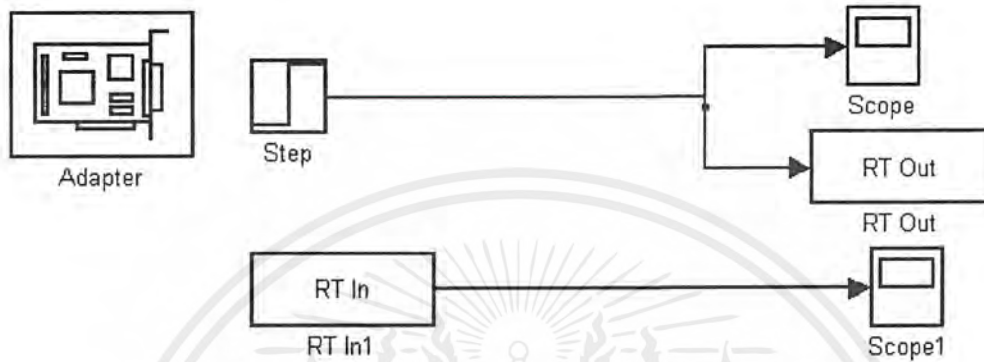
รูปที่ 4.9 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน (CDM Standard Block Diagram)



รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างตัวควบคุมเพื่อควบคุมใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในตอนแรกได้ทำการทดลองใช้การ์ดแปลงสัญญาณ AD512 อย่างเดียวก่อนโดยยังไม่ทำการต่อกับกระบวนการจริง เพื่อศึกษาการทำงานของการ์ด การรับส่งค่าสัญญาณเพื่อให้สามารถรับส่งค่ากันได้อย่างถูกต้องดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การทดลองการรับส่งค่าของการ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าที่ส่งออกทางบัสคือ RT Out และค่าที่ส่งกลับผ่านมาทางบัสคือ RT In มีช่วงการใช้งาน (Range) ไม่ตรงกันจึงต้องทำการปรับค่าสัญญาณทางเข้ากับสัญญาณทางออกให้เป็นช่วงเดียวกัน คือการใส่ค่าคูณด้วยสองและลบออกด้วยหนึ่งก่อนที่สัญญาณจะออกไปที่บัสคือ RT Out ตามรูปที่ 4.9 ส่วนการที่นำค่าลบหนึ่งเข้าไปบวกและค่าลบหนึ่งเข้าไปคูณนั้น เพราะเนื่องจากวาล์วที่ใช้ในกระบวนการควบคุมระดับเป็นแบบปกติเปิดซึ่งอาจทำให้สับสนในการทดลองจึงได้ทำการปรับช่วงการใช้งานเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ

ในบทต่อไปจะกล่าวถึงการนำอุปกรณ์และโปรแกรมที่ติดต่อทั้งหมด ไปออกแบบและควบคุมระบบตามข้อกำหนดที่ต้องการ

บทที่ 5

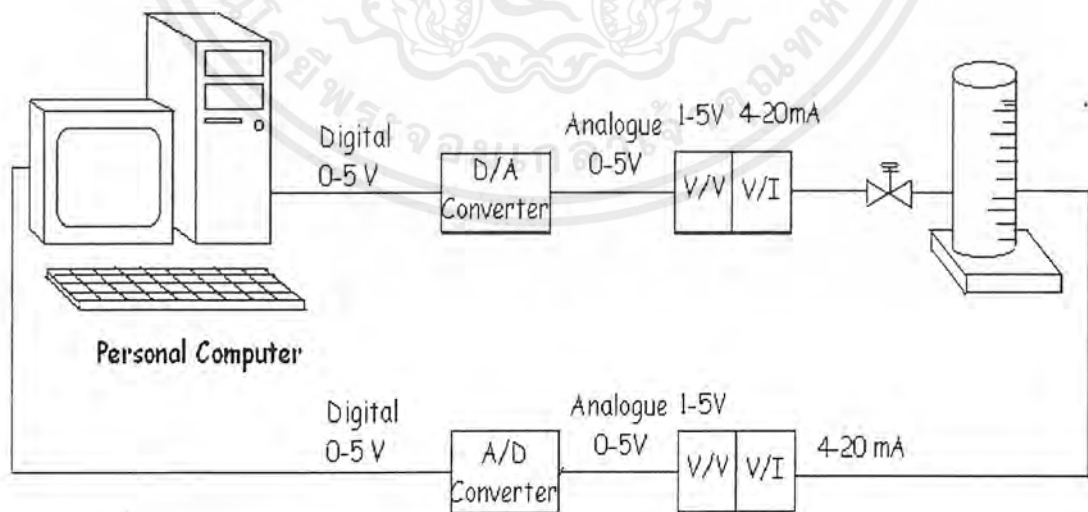
การทดลองออกแบบตัวควบคุมให้กับกระบวนการจริง

5.1 กล่าวนำ

จากการศึกษาทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) การออกแบบตัวควบคุม การจำลองระบบด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งให้ผลตอบสนองที่เป็นไปตามที่ ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ให้กับ กระบวนการจริง เพื่อศึกษาผลตอบสนองของระบบการควบคุมให้เห็นจริงว่าตัวควบคุมที่ออกแบบ ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์สามารถควบคุมกระบวนการ ได้อย่างดีตามทฤษฎีและตามผลตอบ สอนงที่ได้ศึกษาข้างต้น

5.2 การทดลอง

การทดลองได้ทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์โดยใช้คอมพิวเตอร์ เป็นตัวควบคุม(Controller) โดยใช้ในส่วนของ Real time toolbox ของโปรแกรม Matlab ส่งค่าออกไป ควบคุมกระบวนการ โดยกระบวนการที่ใช้ในการทดลองคือกระบวนการวัดระดับ (Level Process) และแสดงผลตอบสนองออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งระบบการควบคุมแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 5.1 ระบบการควบคุมที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการควบคุมประกอบด้วย

1. คอมพิวเตอร์- ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม (Controller)ซึ่งออกแบบ โดยใช้ real-time toolbox ของโปรแกรม Matlab
2. การ์ดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกและแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล โดยใช้การ์ดสำเร็จรูป AD512
3. วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้าและวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้า
4. กระบวนการวัดระดับ (Level Process) โดยมีวาล์วควบคุมแบบปกติเปิด (Normally Open)
5. ตัววัดความดันแตกต่าง Differential Pressure Transmitter เพื่อใช้วัดระดับน้ำ

การทำงานของระบบ

เริ่มด้วยการกำหนดค่าเป้าหมาย (Set point) ที่ต้องการให้กับระบบ โดยใส่เป็นค่าของสัญญาณ Step โดยมีย่านตั้งแต่ค่า 0 ถึงค่า 1 ซึ่งก็คือค่าของระดับน้ำที่ต้องการควบคุมจากที่ไม่มีน้ำ (0%) ถึงระดับน้ำเต็มถึง (100%) คอมพิวเตอร์จะทำการประมวลผลและส่งค่าออกไปควบคุมโดยผ่านการ์ดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อก 0 ถึง 5 โวลต์ และผ่านวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ ซึ่งเป็นค่าสัญญาณมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมออกไปควบคุมสัญญาณลมเพื่อควบคุมวาล์ว เมื่อระดับน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงตัววัดความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) ก็จะส่งค่าระดับน้ำกลับไปยังตัวควบคุม โดยผ่านกลับเข้าวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้า 1 ถึง 5 โวลต์ และ 0 ถึง 5 โวลต์ตามลำดับเข้าสู่การ์ดสำเร็จรูป AD512 เพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อเข้าตัวควบคุมให้ชดเชยค่าเพื่อควบคุมค่าให้ได้ตามเป้าหมายต่อไป

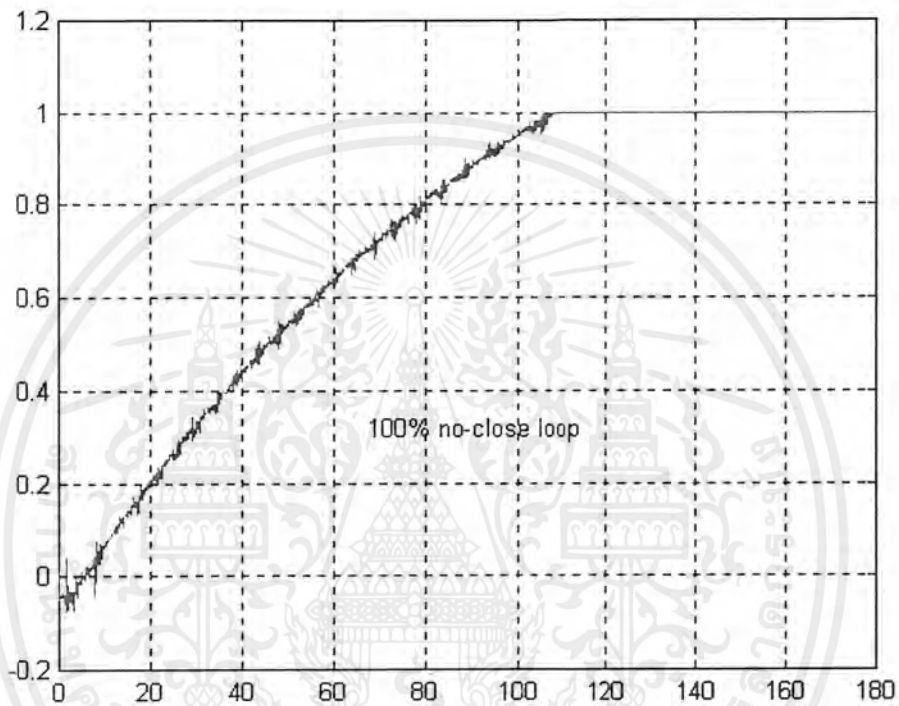
โดยจาก โครงสร้างของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ที่ได้แสดงในบทที่ 4 แล้วนั้นต่อไปก็เป็นขั้นตอนของการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

ขั้นตอนการหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)

ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองควบคุมกระบวนการควบคุมระดับแบบถังเดียวและวาล์วควบคุมในกระบวนการนี้เป็นแบบปกติเปิดดังที่ได้กล่าวไว้ ดูตามรูปที่ 4.3 โดยได้กำหนดระดับน้ำที่ระดับศูนย์ตามสเกลที่มีบนถังซึ่ง ณ จุดนี้ตัววัดความดันแตกต่างจะวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้ 4 มิลลิแอมป์และเมื่อแปลงค่าด้วยวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันแล้วจะได้เท่ากับ 1 โวลต์และที่ระดับเต็มถึง (ที่ 100 เปอร์เซ็นต์) จะวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ 5 โวลต์ โดยในที่นี้วาล์วเปิดปิด

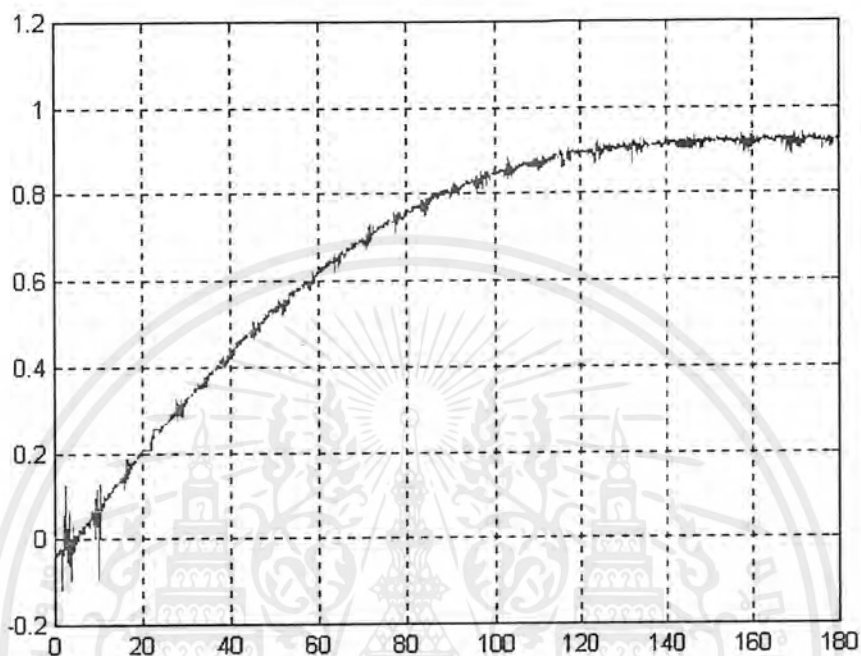
สามตัวที่ต่ออยู่กับถัสนั้น ได้ทำการเปิดวาล์วตัวล่างทางด้านซ้ายมือจนสุดให้น้ำไหลออก ส่วนวาล์วตัวอื่นจะถูกปิดสนิท

จากนั้นทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 100 เปอร์เซ็นต์(ป้อนสัญญาณ Step เท่ากับหนึ่ง)และดูผลตอบสนองที่ได้จะได้ดังรูป



รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองเปิดวาล์วควบคุม 100%

จากผลตอบสนองที่ได้ การที่ค่าเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่าศูนย์นั้นเนื่องมาจากในการทดลองไม่ได้ทำการสอบเทียบค่าระดับน้ำที่ระดับศูนย์จึงทำให้เกิดผลตอบสนองเริ่มต้นที่มีค่าต่ำกว่าศูนย์ขึ้นและจากผลตอบสนองที่ได้ในรูปนี้จะถูกจำกัดอันเนื่องมาจากโวลท์ที่เข้าสู่การ์ดแปลงสัญญาณ AD512 ที่ไม่สามารถมีค่าเกิน 5 โวลท์ได้จึงได้ทำการทำเป็นวงปิด (Closed loop) เพื่อที่จะสามารถกำหนดค่าที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ดังนั้นจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองจากการ Closed loop

จากการสมมติว่าระบบเป็นระบบอันดับหนึ่ง ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดของผลตอบสนองรูปที่ 5.3 ดังต่อไปนี้

$$G(s) = \frac{k/k+1}{(\tau/k+1)s+1} \quad \Leftrightarrow \quad G(s) = \frac{0.9}{36s+1}$$

เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ค่า $k=9$ และ $\tau=360$ วินาที ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่หาได้จะเป็นดังต่อไปนี้

$$G_p(s) = \frac{9}{360s+1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกระบวนการวัดระดับนี้เมื่อทำการเปิดวาล์วสุดที่ 100 เปอร์เซ็นต์จะใช้เวลาที่ทำให้ระดับน้ำเป็นที่ครึ่งถึงประมาณ 45 วินาทีและที่ระดับน้ำเต็มถึงประมาณ 100 วินาทีซึ่งก็คือเวลาที่เร็วที่สุดที่จะเป็นไปได้ของการควบคุมที่ระดับนั้นๆ

ในที่นี้จะทำการควบคุมระดับน้ำที่ครึ่งถึงดังนั้นป้อน Step ค่า 0.5 โดยยังไม่มี การควบคุมด้วยตัวควบคุมจะได้ค่าเวลาเข้าที่ (Setting Time) ที่ประมาณ 100วินาทีดังรูปที่ 5.5 ต่อมาทำการหาตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์โดยกำหนดเวลาเข้าที่เท่ากับ 60 วินาทีจะได้ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$Ba(s) = 1.6667$$

$$Bc(s) = 1.5556$$

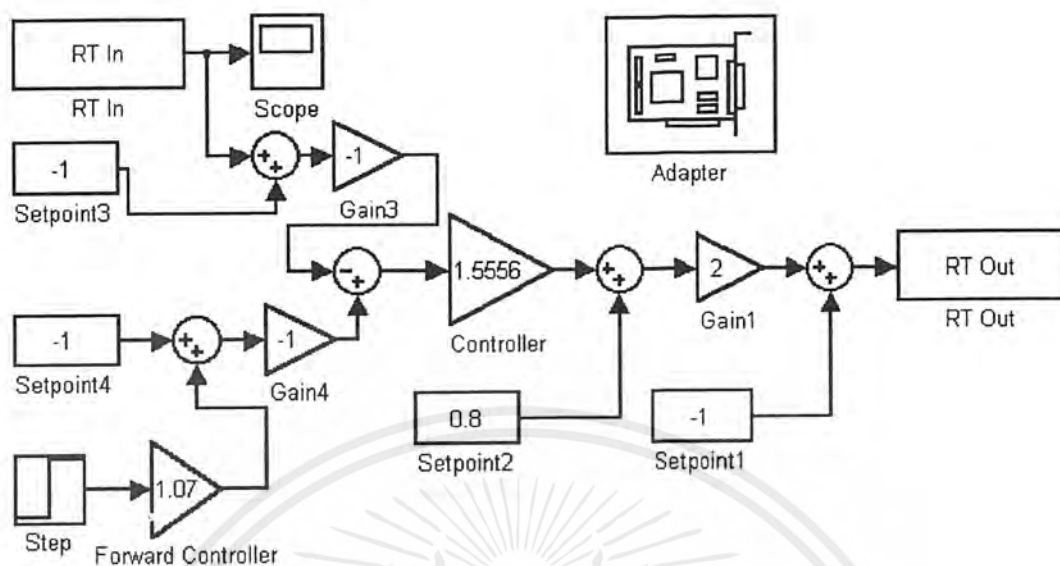
$$Ac(s) = 1$$

เมื่อนำตัวควบคุมไปควบคุมระบบจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ลู่เข้าสู่ค่าเวลาเข้าที่ที่ 60 วินาทีตามข้อกำหนดของระบบดังรูปที่ 5.6 และหากกำหนดเวลาเข้าที่ที่ 80วินาทีก็จะได้ผลตอบสนองที่ลู่เข้าสู่ข้อกำหนดตามรูปที่ 5.8 โดยจะได้ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ที่ค่าเวลาเข้าที่ที่ 80 วินาทีดังนี้

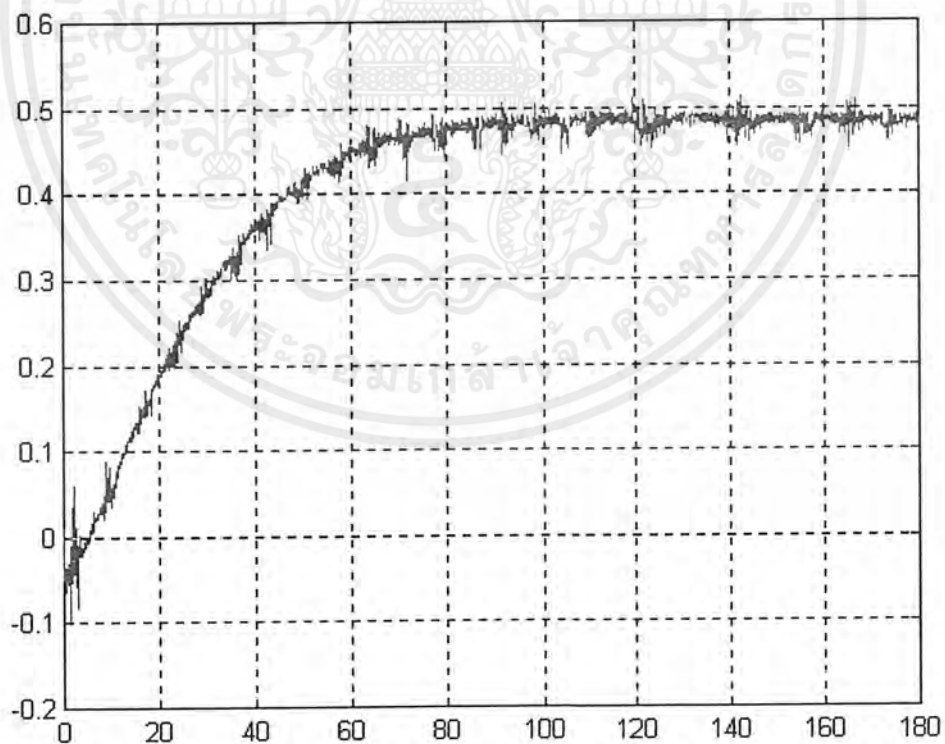
$$Ba(s) = 1.25$$

$$Bc(s) = 1.1389$$

$$Ac(s) = 1$$

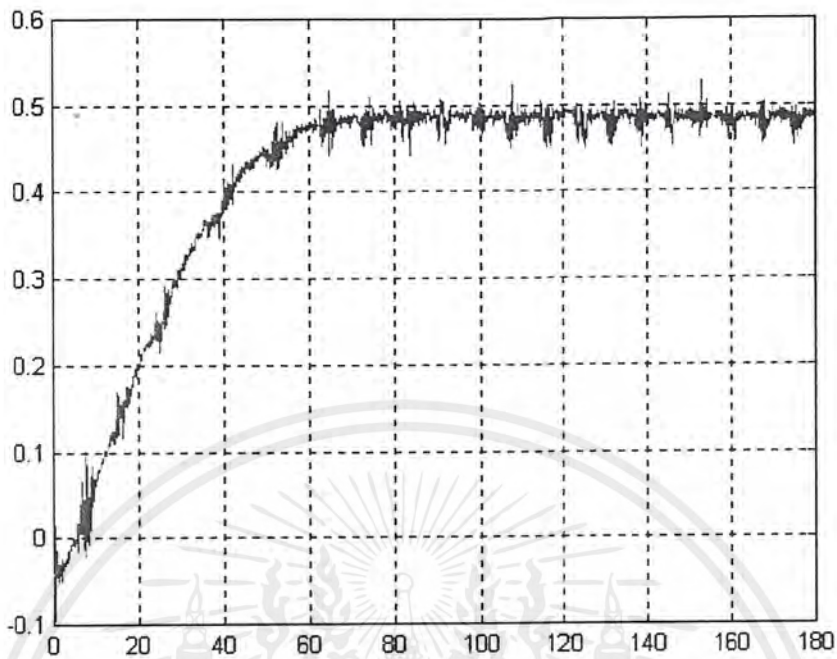


รูปที่ 5.4 บล็อก simulink เมื่อทำการใส่ค่าของตัวควบคุมเพื่อส่งออกไปควบคุมกระบวนการ

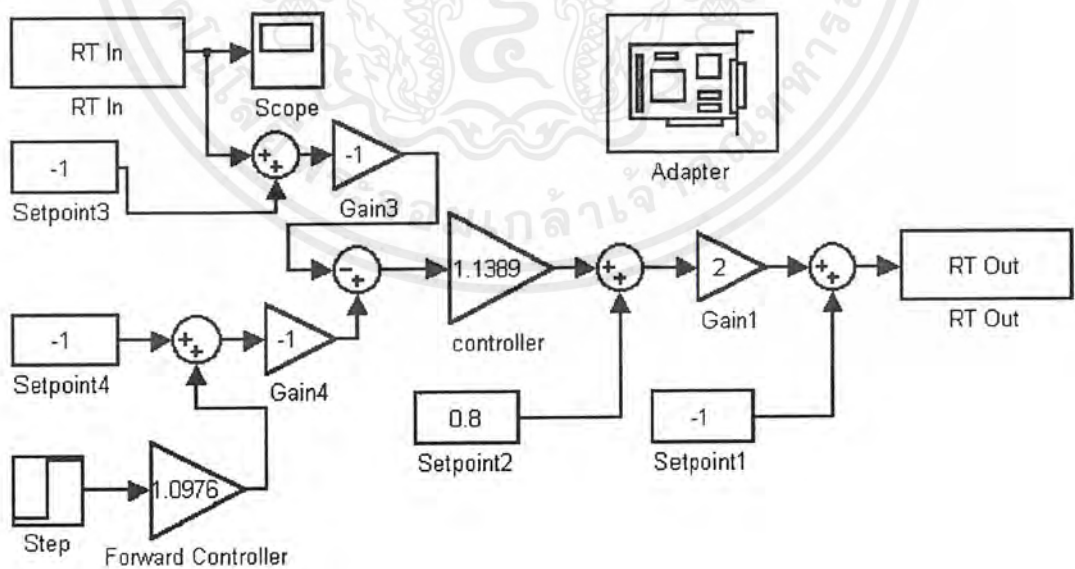


รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองของระบบปิด (Close loop) เมื่อยังไม่มีตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

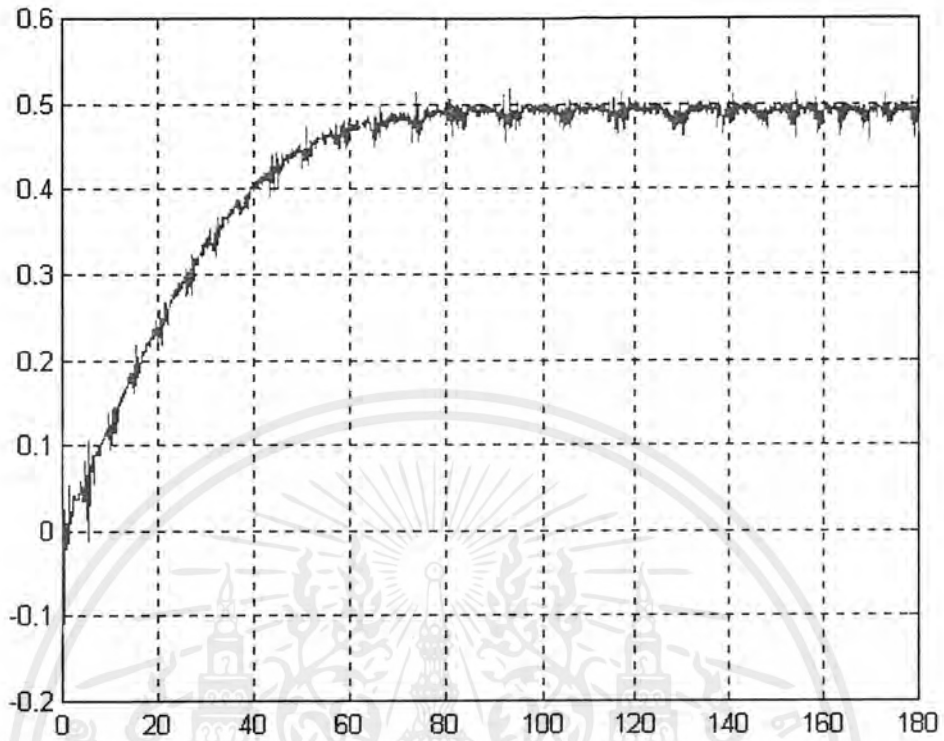


รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่า
สัมประสิทธิ์ โดยกำหนดค่าเวลาเข้าที่ 60 วินาที



รูปที่ 5.7 บล็อก Simulink ของตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธี CDM ที่กำหนดเวลาเข้าที่ 80 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



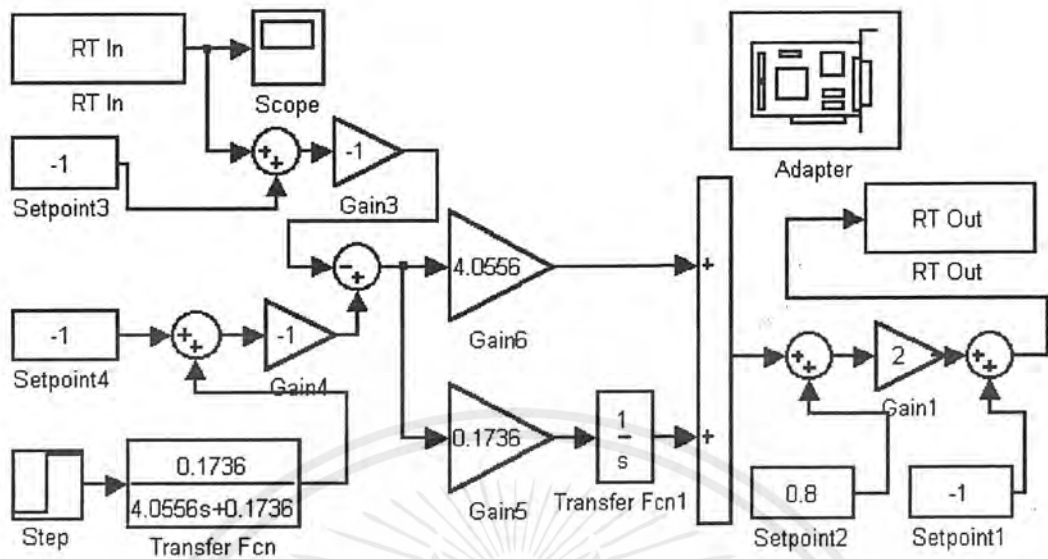
รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ที่กำหนดเวลาเข้าที่ 80 วินาที

ต่อมาได้ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบ PI ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ จะได้ตัวควบคุมแบบ PI ที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์สำหรับกระบวนการวัดระดับที่กำหนดค่าเวลาเข้าที่ 60 วินาทีดังต่อไปนี้

$$Ba(s) = 0.1736$$

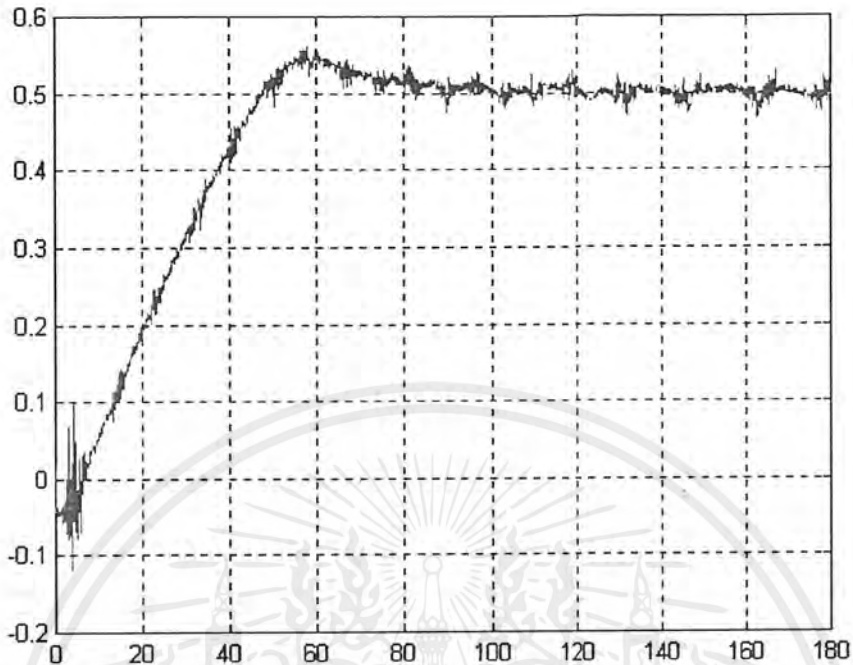
$$Bc(s) = 4.0556s + 0.1736$$

$$Ac(s) = 1$$

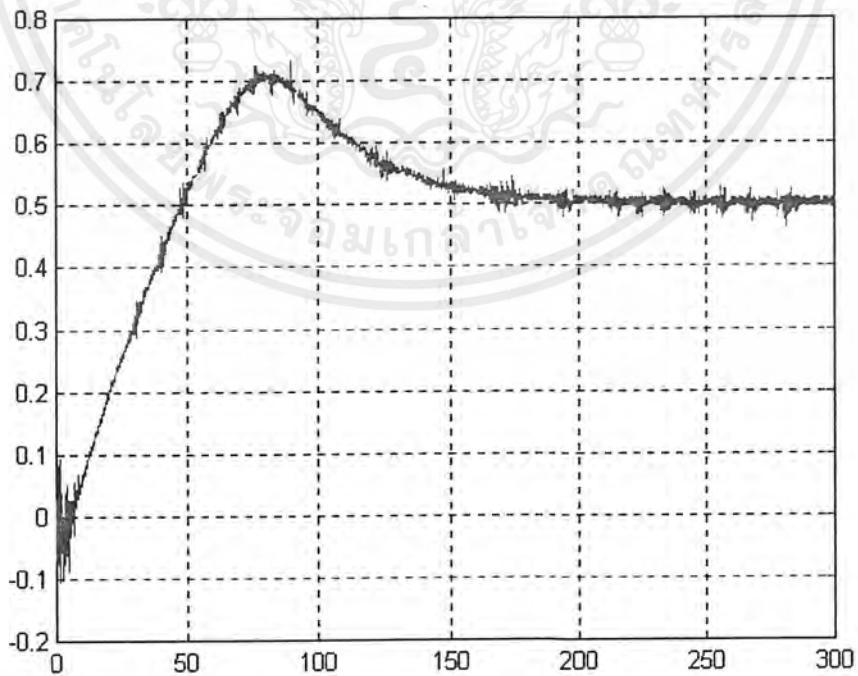


รูปที่ 5.9 บล็อก simulink เมื่อทำการใส่ค่าของตัวควบคุมแบบ PI ที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังคำสั่ง
สัมพันธ์เพื่อส่งค่าออกไปควบคุมกระบวนการ

ซึ่งจะเห็นว่าผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินที่น้อยมากและผลตอบสนองที่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดคือมีค่าเวลาเข้าที่ที่เวลา 60 วินาทีดังรูปที่ 5.10 จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมแบบ PI โดยทำการหาค่าให้กับตัวควบคุมด้วยวิธีลองผิดลองถูก ซึ่งจะต้องทำการปรับแต่งหลายครั้งเพื่อให้ได้ค่าของตัวควบคุมที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ควบคุมกระบวนการ



รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองของระบบที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์



รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของระบบที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ด้วยวิธีลองผิดลองถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบมีค่าพุ่งเกินที่มากกว่ารวมทั้งไม่สามารถเข้าสู่ค่าเวลาเข้าที่ที่ต้องการได้ ต้องทำการปรับแต่งซึ่งยากแก่การหาค่าของตัวควบคุมที่จะทำให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการได้

5.3 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะให้ผลที่มีเสถียรภาพ ไม่มีค่าพุ่งเกิน (overshoot) หรือมีน้อยมาก ไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady state error) รวมทั้งสามารถควบคุมระบบให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการคือเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ตามต้องการ โดยไม่ต้องทำการปรับแต่งอีกครั้ง

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์สามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 6

โปรแกรมประยุกต์เพื่อช่วยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

6.1 กล่าวนำ

เนื่องจากการคำนวณหาตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์นั้น บางครั้งอาจมีความยุ่งยาก เนื่องจากระบบอาจมีอันดับที่สูง ทำให้การคำนวณเป็นไปได้ช้า และอาจเกิดความผิดพลาดในการคำนวณขึ้น เพื่อเป็นการง่ายในการออกแบบหาค่าของตัวควบคุม จึงได้ทำโปรแกรมที่ช่วยในการคำนวณขึ้น โดยใช้โปรแกรม Matlab มาช่วยในการออกแบบ

โปรแกรมที่ออกแบบนี้ ใช้ GUI (Guide User Interface) ของโปรแกรม Matlab ออกแบบเป็นหน้าต่างเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน

โปรแกรมนี้เมื่อสามารถหาค่าของตัวควบคุมได้แล้ว ผู้ออกแบบยังสามารถศึกษาถึงผลตอบสนอง (Response) ของระบบ รวมทั้งแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method) ได้อีกด้วย

6.2 รูปแบบของโปรแกรมประยุกต์เพื่อช่วยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

โปรแกรมประยุกต์เพื่อช่วยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) ได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Matlab ในส่วนของ GUI (Guide User Interface) ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางในหมู่วิศวกร หรือนักออกแบบโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบมีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

หน้าต่างหลัก (Main Window)

ส่วนที่ 1

ส่วนของระบบ (Plant) ประกอบด้วย

Numerator – เป็นตัวเลขของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (Plant)

Denominator – เป็นตัวเลขของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (Plant)

ส่วนที่ 2

ส่วนของพารามิเตอร์ (Parameters) ประกอบด้วย

1. ดัชนีเสถียรภาพ (Stability Index)
2. ค่าคงตัวเวลาสมมูล (Equivalent Time Constant)

ส่วนที่ 3

ส่วนของการคำนวณ

Select the Method – เป็นรายการเพื่อใช้ในการเลือกรูปแบบของตัวควบคุม

ประกอบด้วย ตัวควบคุมแบบ CDM

ตัวควบคุมแบบ PI

ตัวควบคุมแบบ PID

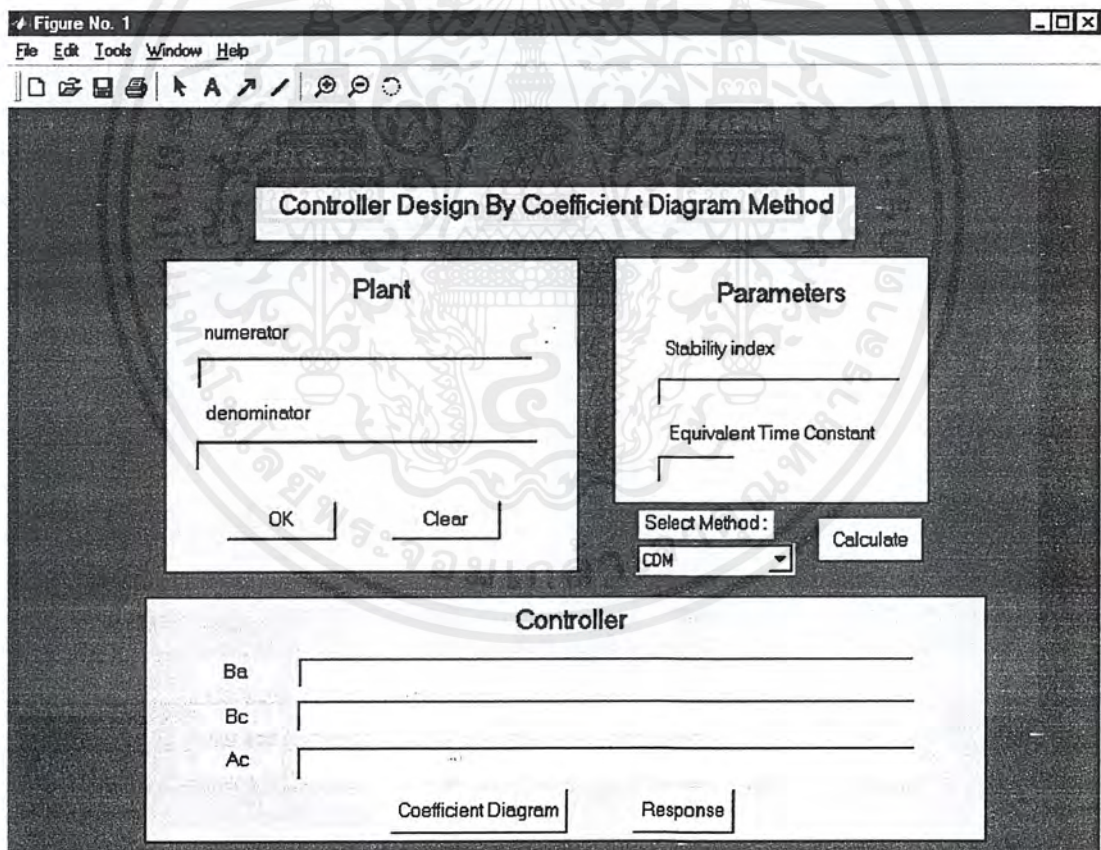
ตัวควบคุมแบบ PIDA

Calculate – เป็นปุ่ม Push Button เพื่อใช้สำหรับการคำนวณหาค่าของตัวควบคุม

Response – เป็นปุ่ม Push Button เพื่อใช้สำหรับดูผลตอบสนองของระบบ

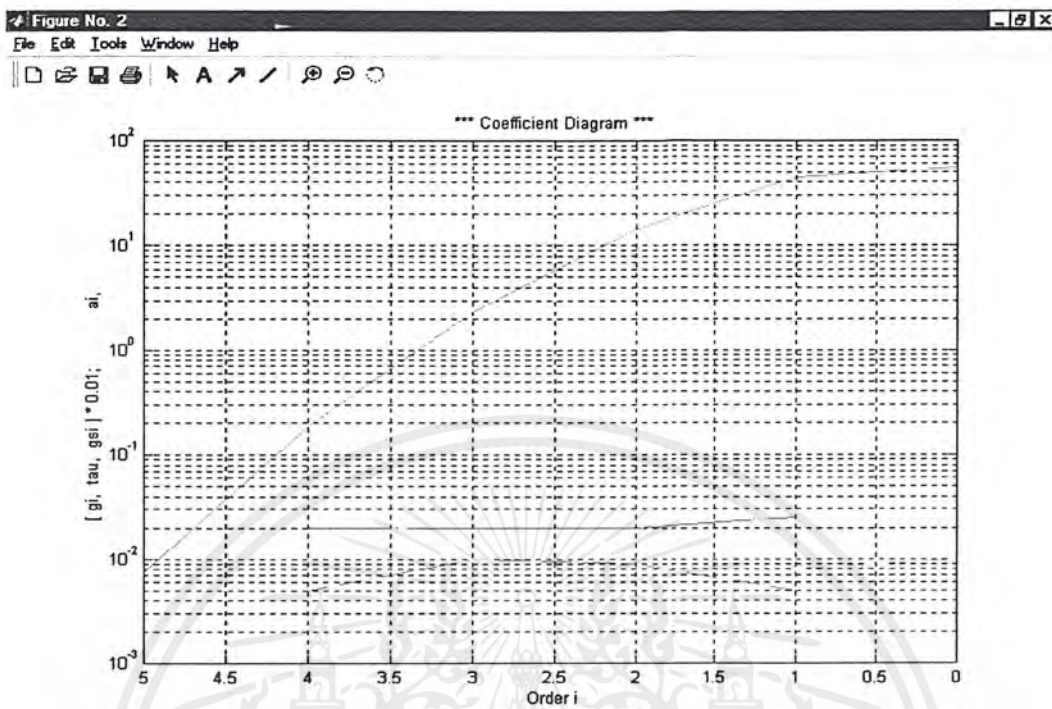
Coefficient Diagram – เป็นปุ่ม Push Button เพื่อใช้สำหรับดูแผนผังค่า

สัมประสิทธิ์

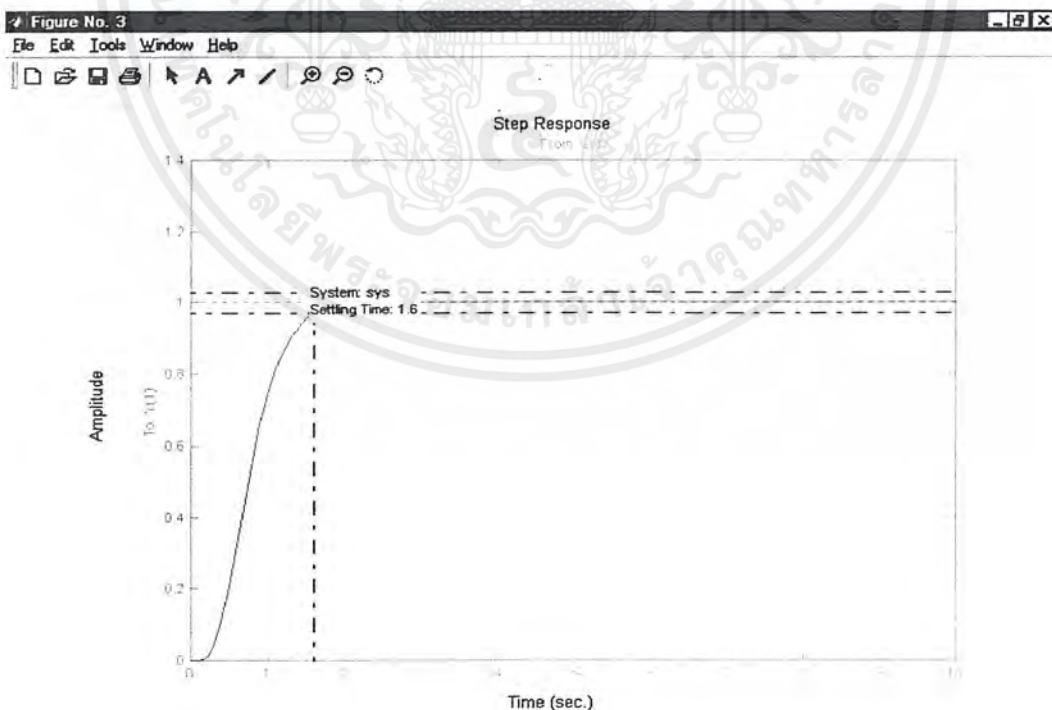


รูปที่ 6.1 แสดงหน้าต่างหลักของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



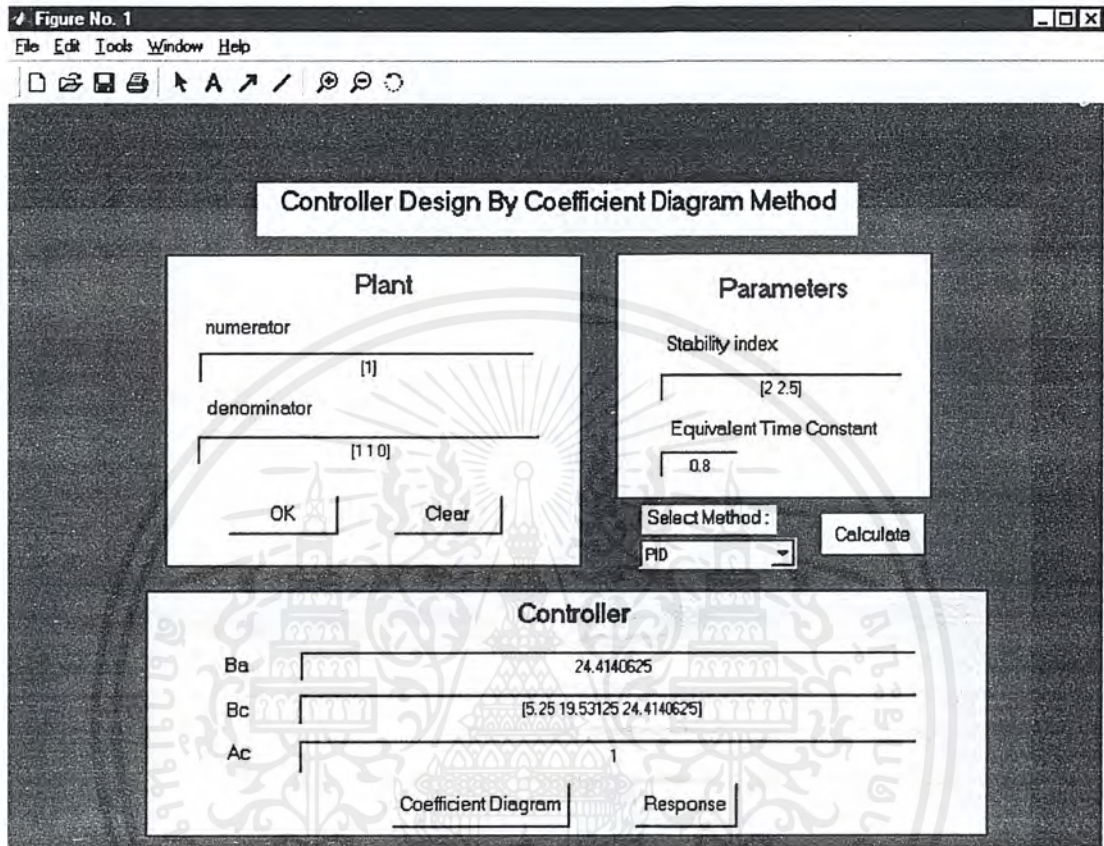
รูปที่ 6.2 รูปแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้เมื่อออกแบบ Coefficient Diagram



รูปที่ 6.3 ผลตอบสนองที่ได้เมื่อออกแบบ Response

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 การใช้งานโปรแกรมประยุกต์เพื่อช่วยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์



รูปที่ 6.4 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม

จากรูปที่ 6.4 สมมติฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการคือ

$$G_p(s) = \frac{1}{s(s+1)}$$

ดังนั้นการใส่ค่าจะได้ดังต่อไปนี้

$$\text{numerator} = [1]$$

$$\text{denominator} = [1 \ 1 \ 0]$$

แล้วกดปุ่ม OK เพื่อยืนยันค่า หากต้องการลบค่าทิ้งให้กดปุ่ม Clear

จากนั้นทำการเลือกรูปแบบของตัวควบคุมที่ Select Method ซึ่งในตัวอย่างนี้เลือกใช้ตัวควบคุม

แบบ PID ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพ (Stability Index) จะมีสองค่าคือ

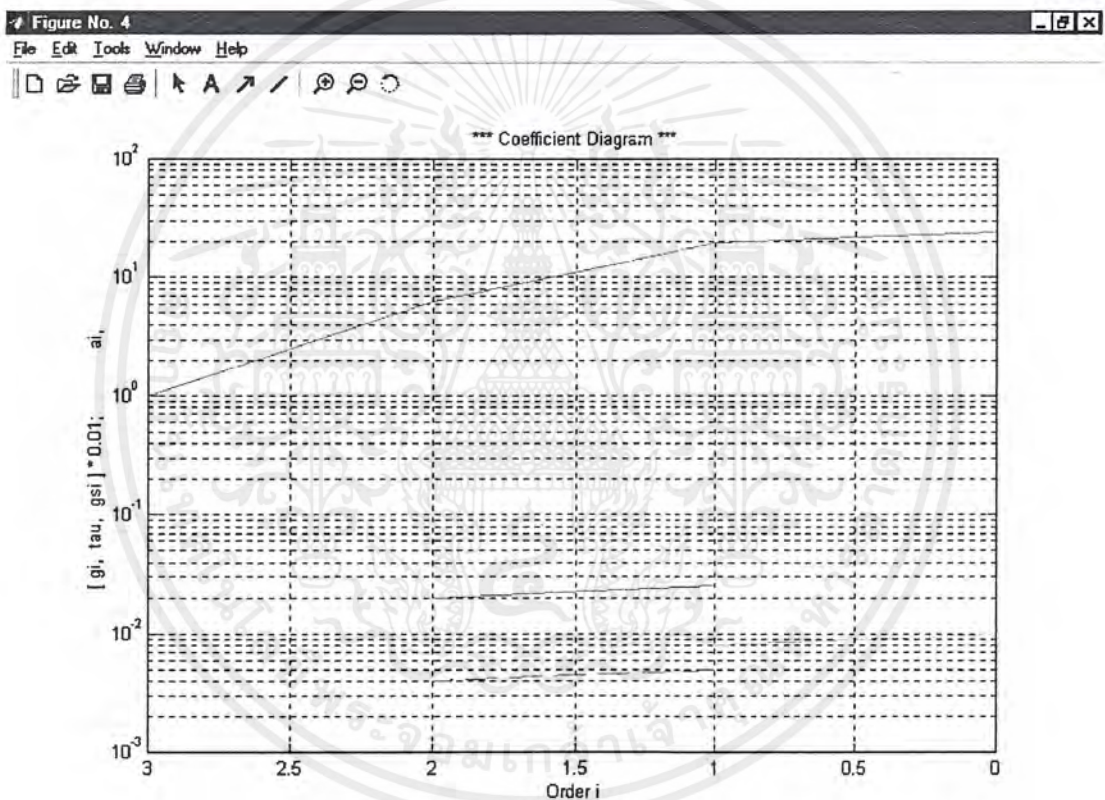
$$\text{Stability Index} = [2 \ 2 \ 2.5]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในทีนี้ค่าเวลาเข้าที่ (Setting Time) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 วินาทีซึ่งจะทำให้ค่าคงตัวเวลาสมมูลมีค่าเท่ากับ 0.8 วินาที

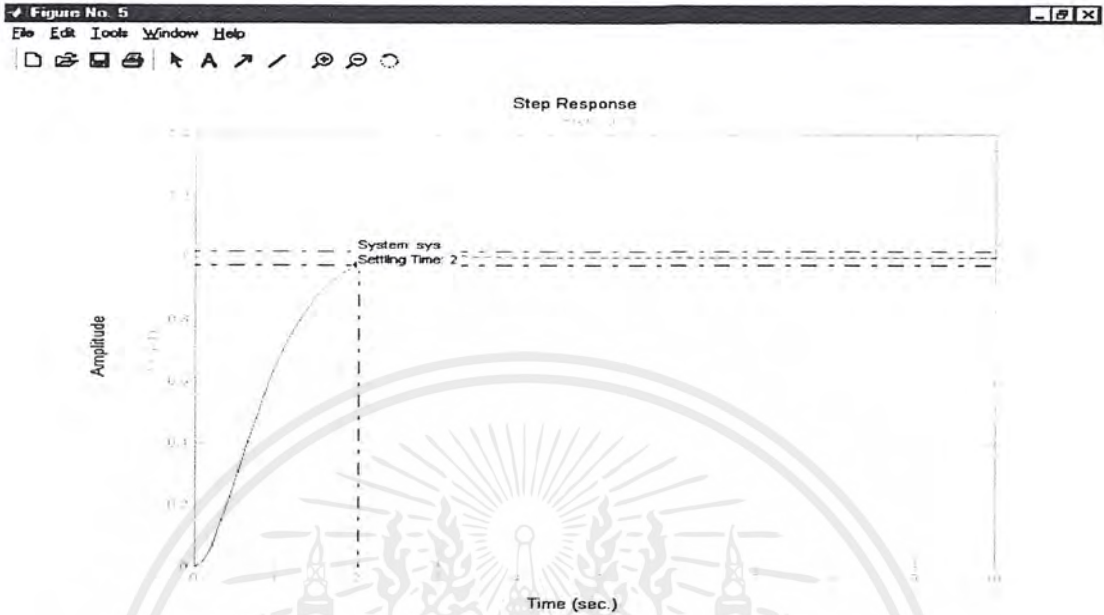
$$\text{Equivalent Time Constant} = 0.8$$

เมื่อใส่ค่าทุกอย่างครบแล้วให้กดปุ่ม Calculate โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าของตัวควบคุมออกมาดังรูป จากนั้นหากต้องการดูผลตอบสนองหรือแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้ก็ทำการกดปุ่ม Coefficient Diagram หรือปุ่ม Response ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น



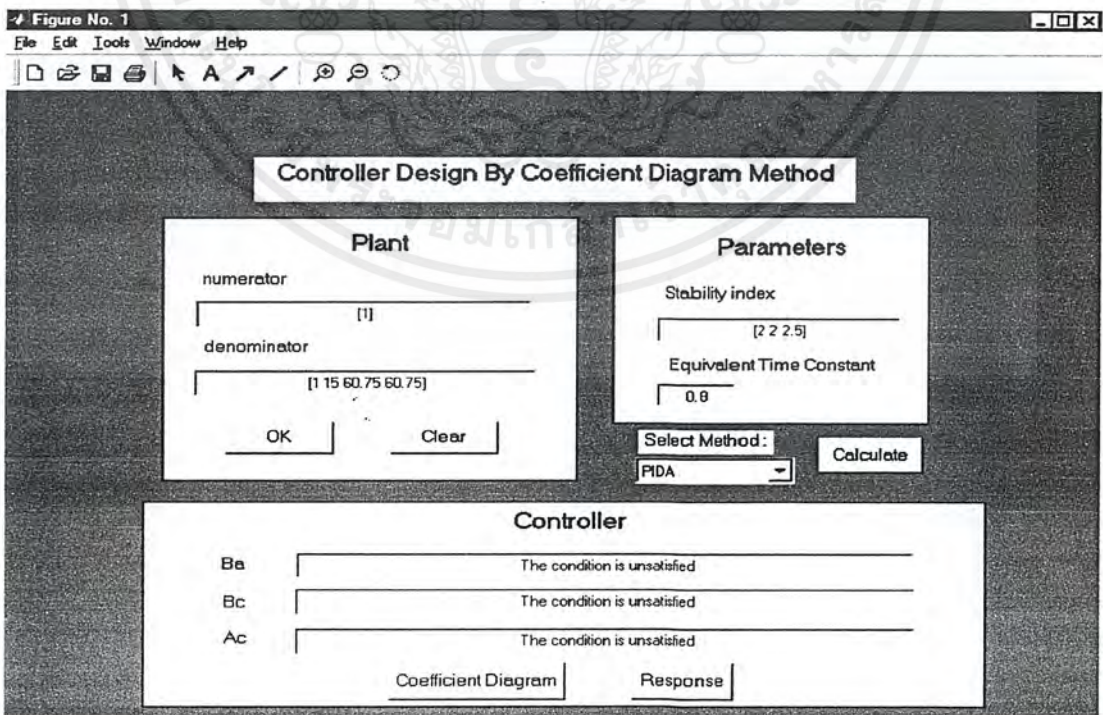
รูปที่ 6.5 แสดง Coefficient diagram ของระบบตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



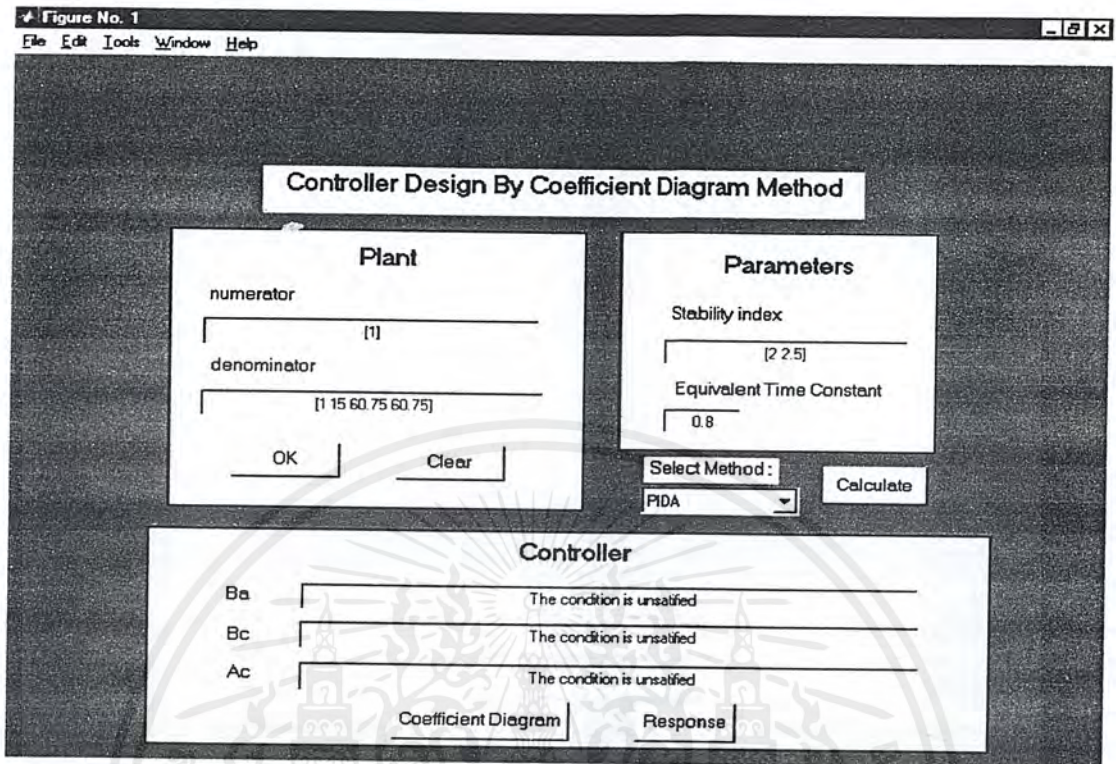
รูปที่ 6.6 แสดงผลตอบสนองของระบบตัวอย่าง

และหากผู้ใช้งานใส่ค่าที่ไม่เหมาะสม ไม่เป็นไปตามทฤษฎีดังกล่าวข้างต้น โปรแกรมจะไม่สามารถคำนวณได้และจะแสดงคำว่า “ The condition is unsatisfied “ ดังรูป



รูปที่ 6.7 แสดงตัวอย่างเมื่อค่าของระบบไม่เป็นตามเงื่อนไข $P_k/P_{k-1} > \tau/\gamma_{n-1}\gamma_{n-2}\dots\gamma_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 แสดงตัวอย่างของการใส่จำนวนของ Stability index ไม่เหมาะสม

จะเห็นได้ว่าโปรแกรมประยุกต์เพื่อช่วยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์นี้มีประโยชน์ทำให้การออกแบบ การศึกษาผลตอบสนองรวมทั้งแผนผังค่าสัมประสิทธิ์มีความง่ายขึ้นเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุป

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method : CDM) เพื่อใช้ในการออกแบบให้กับตัวควบคุม ได้นำเสนอวิธีการ ทฤษฎี หลักการ โครงสร้างของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งสามารถ ออกแบบระบบควบคุมให้มีผลตอบสนองได้ตามต้องการ คือสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ไม่มี ค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ทำให้ผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกิน ทำให้ระบบมีความคงทนรวมทั้ง สามารถควบคุมระบบให้มีสมรรถนะคือมีค่าเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ตามที่ต้องการได้ทำการ ทดลองออกแบบตัวควบคุมและจำลองระบบด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อศึกษาผลตอบสนองของ ระบบเพื่อความเข้าใจทฤษฎี อีกทั้งศึกษาถึงข้อดี ข้อเสียของการออกแบบตัวควบคุมที่ออกแบบด้วย วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ และได้นำเสนอโปรแกรมที่ช่วยในการออกแบบระบบควบคุม รวมถึง ฮาร์ดแวร์ต่างๆเพื่อนำไปควบคุมกับกระบวนการจริงซึ่งในการปฏิบัติจริงนั้นได้ทำการทดลองกับ กระบวนการควบคุมระดับ (Level Process) ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่า สัมประสิทธิ์นี้มีข้อดีหลายประการดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างโปรแกรม ประยุกต์เพื่อช่วยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ขึ้น เพื่อความเข้าใจถึงวิธีการ ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์มากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นโปรแกรมที่ช่วยให้ผู้ที่ทำ การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีนี้สะดวกในการศึกษาผลตอบสนอง ช่วยคำนวณค่าของตัวควบคุมที่ เหมาะสมกับระบบ ซึ่งทำให้ผู้ที่ทำการออกแบบมีความง่ายขึ้นในการออกแบบ

ในการทดลองทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติได้ผลดีเป็นที่น่าพอใจ และในการทดลองควบ คุมกับกระบวนการได้ผลตอบสนองตามข้อกำหนดของกระบวนการและเมื่อเปลี่ยนสัญญาณค่าควบ คุมเป้าหมาย ผลตอบสนองของระบบก็เข้าสู่ค่าที่ต้องการควบคุม ดังนั้นวิธีที่ได้นำเสนอในปริญญา นิพนธ์เล่มนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมได้

7.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา

ในการทดสอบตัวควบคุมยังมีได้นำเสนอในส่วนของ การพิสูจน์ความคงทนของระบบต่อ สัญญาณรบกวนภายนอก ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ผู้วิจัยสนใจที่จะทำการศึกษารออกแบบตัว ควบคุมด้วยวิธีแผนผังคำสั่งประสิทธิ์ต่อไป



เอกสารอ้างอิง

1. พฐุ โปธิ์ทอง,จงกล งามวิวิทย์,Noriyuki Komine,Shunji Manabe “ การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วย CDM สำหรับพลาตันต์อันดับ 3” วิศวกรรมภาคกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 1,2541.
2. S.Manabe “Coefficient Diagram Method”, 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace,Seoul,August,1998.
3. M.Okata Modern Control Engineering,3rd Edition, Prentice-Hall,Int,PP 670-679,1997.
4. Danupon Kampannya,Patu Photong,Jongkol Ngamwiwit,Noriyuki Komine,Shunji Manabe “ PID Controller Design by CDM for Level Process”, IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems,ISPACS,1999.
5. Shunji Manabe “A SOLUTION OF THE ACC BENCHMARK PROBLEM BY COEFFICIENT DIAGRAM METHOD”
6. Shunji Manabe,Kazuki Shibata,YoungChol Kim,Sum WookChoi “Coefficient Diagram Method TOOLBOX for use with Matlab ver 2.0J”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วย CDM สำหรับพลาเน็ตอันดับ 3 PIDA Controller Design for Third Order Plant by CDM

พญ โทธิทอง

จงกล งามวิวิทย์

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Noriyuki Komine

Shunji Manabe

Department of Control Engineering, School of Engineering, Tokai University

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอสำหรับระบบอันดับ 3 ให้มีผลการตอบสนองชั่วคราว และผลตอบสนองสถานะอยู่ตัวเป็นไปตามข้อกำหนดด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ จากผลการจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่า เมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีเอที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ กับตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีของจุงและดอร์ฟแล้ว ผลตอบสนองจะไม่มีค่าพุ่งเกิน และผู้เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบ และมีผลตอบสนองไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอให้มีผลตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็วขึ้นโดยง่ายด้วยการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล

Abstract

This paper presents a PIDA controller design method for a 3rd order system by coefficient diagram method which satisfies both transient and steady state specifications. The simulation results comparing to the PIDA controller designed by Jung and Dorf show that the performance of the control system without overshoot and fast disturbance rejection can be achieved. The robustness of the control system when the parameter of the plant has changed, are also shown. Furthermore, the PIDA controller can easily be designed for obtaining the required fast system response by adjusting the equivalent time constant.

1. บทนำ

ในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้ตัวควบคุม PID (proportional-integral-derivative) โดยต้องมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เหมาะสมกับพลาเน็ต [1] นอกจากนี้การออกแบบตัวควบคุม PID เพื่อควบคุมพลาเน็ตที่มีอันดับสูงกว่าอันดับสองจะพบปัญหาเนื่องจากอันดับของพลาเน็ตสูงกว่าจำนวนซีโรของตัวควบคุม จุงและดอร์ฟจึง

ได้คิดค้นการออกแบบตัวควบคุม PIDA (proportional-integral-derivative-acceleration) โดยกำหนดโพลวงปิดเด่นไว้หนึ่งคู่ ให้โพลตัวหนึ่งเป็นโพลวงปิดที่อยู่ต่ำกว่าโพลเด่น และโพลอีกตัวหนึ่งเป็นโพลวงปิดค้อย สำหรับควบคุมพลาเน็ตอันดับ 3 ให้ผลตอบสนองมีสมรรถนะเป็นไปตามข้อกำหนด [4]

บทความนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (coefficient diagram method: CDM) [2,3] สำหรับควบคุมพลาเนตอันดับ 3 จีการออกแบบนี้เป็นวิธีที่ผู้ออกแบบสามารถใช้ในการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านความมีเสถียรภาพ ผลตอบสนอง และความทนทาน (robustness) ของระบบควบคุม โดยทำการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมเปรียบเทียบกับสมรรถนะของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบโดยวิธีจุงและคอร์ฟ [4] พบว่าตัวควบคุม PIDA ที่นำเสนอในที่นี้สามารถควบคุมให้ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็ว ผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่มีค่าพุ่งเกิน (overshoot) มีค่าเวลาเข้าที่ (settling time : ts) ตามที่ได้ออกแบบไว้ และลดผลกระทบอื่นเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน ได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบตัวควบคุม PIDA ให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองเร็วขึ้นด้วยการปรับแต่งค่าคงตัวเวลาสมมูล (equivalent time constant : τ)

2. การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์ [2,3] เป็นการออกแบบตัวควบคุมจากสมการคุณลักษณะ (characteristic equation) โดยพิจารณาค่าเวลาเข้าที่ซึ่งเป็นสมรรถนะของระบบที่กำหนดไว้ และอันดับของตัวควบคุมควรจะน้อยกว่าพลาเนต ซึ่งจะช่วยให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด (open-loop transfer function) $G_p(s)G_c(s)$ มีโหลมากกว่าซีโร (strictly proper) ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM นั้น จะต้องแปลงโครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 1 ให้อยู่ในรูปโครงสร้าง CDM มาตรฐานตามรูปที่ 2 โดยจะแยกตัวตั้งและตัวหารของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมและพลาเนตออกจากกันดังสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$G_c(s) = \frac{B_c(s)}{A_c(s)} = \frac{k_2 s^2 + k_{2-1} s^{2-1} + \dots + k_0}{l_2 s^2 + l_{2-1} s^{2-1} + \dots + l_0} \quad (1)$$

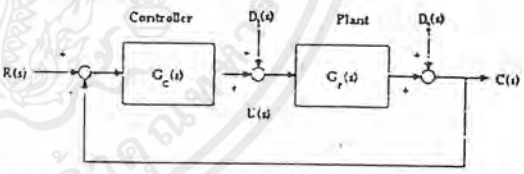
$$G_p(s) = \frac{B_p(s)}{A_p(s)} = \frac{q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_0}{p_k s^k + p_{k-1} s^{k-1} + \dots + p_0} \quad (2)$$

โดยที่ $\lambda < k$ และ $m < k$ ดังนั้นจะเขียนสมการคุณลักษณะจากโครงสร้างของ CDM มาตรฐาน ได้ดังนี้

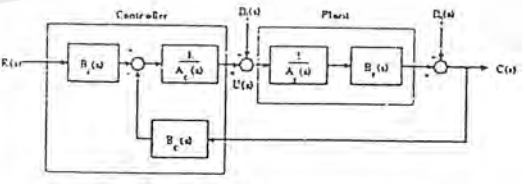
$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) = 0 = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (3)$$

โดยที่ a_n, a_{n-1}, \dots, a_0 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะและเป็นค่าที่นำมาใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM

สำหรับ $B_p(s)$ นั้นเป็นพรีฟิลเตอร์ (prefilter) ของระบบควบคุม ซึ่งทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady-state error) โดยถ้า $B_p(s)$ มีค่าเท่ากับ k_0 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีค่าพุ่งเกิน แต่ช่วงเวลายื่น (rise time) จะช้า และถ้า $B_p(s)$ มีค่าเท่ากับ $B_c(s)$ จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน แต่ช่วงเวลายื่นจะเร็ว



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบควบคุมทั่วไป



รูปที่ 2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมระบบโดยทั่วไปนั้น นอกจากจะให้ไม่มีสมรรถนะที่ติ่งในลักษณะการ

คอบสนองชั่วคราว และผลตอบสนองสถานะอยู่ตัวแล้ว ยังต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบและความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของพลาเน็ตด้วย โดยเสถียรภาพของระบบแสดงได้ด้วยค่าครรชนิเสถียรภาพ (stability index) γ_i ดังสมการที่ (4)

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1}a_{i-1}} \quad (4)$$

โดยที่ $i = 1, \dots, n-1$ สำหรับความเร็วในการคอบสนองแสดงด้วยค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของพลาเน็ตแสดงด้วยค่าจำกัดเสถียรภาพ (stability limit) γ_i^* ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับดังนี้

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (5)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} \quad \gamma_0, \gamma_n = \infty \quad (6)$$

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วค่าเวลาเข้าที่จะสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลาสมมูลดังสมการที่ (7)

$$t_s = 2.5\tau \quad (7)$$

สำหรับค่าครรชนิเสถียรภาพมาตรฐานของ CDM [2,3] ที่ใช้ในการออกแบบคือ

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5 \quad (8)$$

และในการนำค่ามาตรฐานนี้ไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นจะต้องตรวจสอบเงื่อนไข

$$p_k / p_{k-1} > \tau / (\gamma_{n-1} \gamma_{n-2} \dots \gamma_1) \quad (9)$$

เมื่อ p_k และ p_{k-1} คือสัมประสิทธิ์อันดับที่ k และ $k-1$ ของพลาเน็ตตามลำดับ

ถ้าเงื่อนไขเป็นจริงสามารถนำค่าครรชนิเสถียรภาพมาตรฐานเพื่อออกแบบตัวควบคุมต่อไปได้ แต่ถ้าเงื่อนไขไม่เป็นจริงให้เพิ่มค่า γ_i ในค่าครรชนิเสถียรภาพมาตรฐานให้สูงขึ้น

จากสมการที่ (4), (5) และ (6) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a_i ของสมการคุณลักษณะกับค่าครรชนิเสถียรภาพ γ_i และค่าคงที่เวลาสมมูล τ ดังสมการที่ (10)

$$a_i = a_0 \tau^i \frac{1}{\gamma_{i-1} \dots \gamma_2^{i-2} \gamma_1^{i-1}} = a_0 \tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{(\gamma_{i-j})^j} \quad (10)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการคุณลักษณะให้อยู่ในเทอมของ a_0, τ และ γ_i ได้ดังนี้

$$P(s) = a_0 \left[\left\{ \sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}^j} \right) s^i \right\} + s + 1 \right] \quad (11)$$

ซึ่งสมการที่ (11) นี้จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วยวิธี CDM ต่อไป

3. การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วย CDM

จากโครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 1 ตัวควบคุม $G_c(s)$ ซึ่งที่โครงสร้างเป็นแบบ PIDA [4] แสดงดังสมการที่ (12)

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d}{(s+d)}s + \frac{ka}{(s+d)(s+e)}s^2 = K \frac{(s+a)(s+b)(s+z)}{s(s+d)(s+e)} \quad (12)$$

เนื่องจาก $d, e \gg a, b, z$ จึงพิจารณาตัดโพล d, e ทิ้งไว้ ดังนั้นจึงเขียนตัวควบคุม PIDA ที่จะถูกออกแบบด้วยวิธี CDM ได้ใหม่ดังนี้

$$G_c(s) = \frac{k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s} \quad (13)$$

โดยที่ $k_3 = K, k_2 = K(a+b+z), k_1 = K[(a+b)z + ab]$ และ $k_0 = K(az)$ ซึ่งจะเห็นว่าตัวควบคุมนี้มี $l_3 = l_2 = l_0 = 0$ และ $l_1 = 1$ หรืออีกนัยหนึ่งคือ $A_1(s)$ เป็นอันดับ 1 และ $B_1(s)$ เป็นอันดับ 3 ซึ่งจะมีระดับนำกับพลาเน็ต แต่ระบบควบคุมนี้เป็นจริงได้ เพราะจะมีทั้งอันดับโพลและโพล $v_1(s), v_2(s)$ มีโพลมากกว่าโพล

การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม $G_c(s)$ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าคงที่เวลาสมมูลจากค่าเวลาเข้าที่
2. หาค่าครุณีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุม จากค่าครุณีเสถียรภาพมาตรฐาน
3. หาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PIDA โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากสมการที่ (3) โดยใช้ตัวควบคุมในสมการ (13) และนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะจากสมการที่ (11) ที่เกิดจากขั้นตอนที่ 1 และ 2
4. กำหนดให้ $B_u(s) = k_p$

4. การทดลอง

ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM นั้น นอกจากจะสามารถควบคุมให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตรงตามข้อกำหนดแล้ว ยังมีเสถียรภาพเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบ และคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของพลานต์ และจะเปรียบเทียบกับผลตอบสนองกับระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบโดยจุงและคอร์ฟอน [4]

4.1 ผลตอบสนองเมื่อค่าคงที่เวลาสมมูลเปลี่ยนแปลง

กำหนดให้ข้อกำหนดสมรรถนะสำหรับการออกแบบตัวควบคุม PIDA ที่ทำให้ระบบควบคุมมีเวลาเข้าที่ที่ 2% คือ $t_s \leq 2$ วินาที สำหรับพลานต์ ชนิด 0

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(s+3)(s+6)}$$

ขั้นตอนของการออกแบบเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) ข้อกำหนดสมรรถนะค่าเวลาเข้าที่ คือ 2 วินาที จากสมการที่ (7) ค่าคงที่เวลาสมมูล τ คือ 0.8 วินาที

ขั้นตอนที่ (2) หาค่าครุณีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับพลานต์ จากสมการที่ (8) พร้อมทั้งตรวจสอบ

เงื่อนไขตามสมการที่ (9) ดังนั้นค่าครุณีเสถียรภาพที่เหมาะสม คือ

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

ขั้นตอนที่ (3) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PIDA ด้วยวิธี CDM โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากตัวควบคุม PIDA ในสมการที่ (13) ซึ่งจะได้

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_r(s) \\ &= s^4 + (10 + k_3)s^3 + (27 + k_2)s^2 + (18 + k_1)s + k_0 \end{aligned}$$

แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์สมการคุณลักษณะของ CDM มาตรฐานในสมการ (11) จะได้อพารามิเตอร์ k_p, k_i, k_d และ k_f ของตัวควบคุม และตัวควบคุมมีโครงสร้างดังนี้

$$\begin{aligned} G_c(s) &= \frac{k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s} \\ &= \frac{2.5s^3 + 51.13s^2 + 226.14s + 305.18}{s} \end{aligned}$$

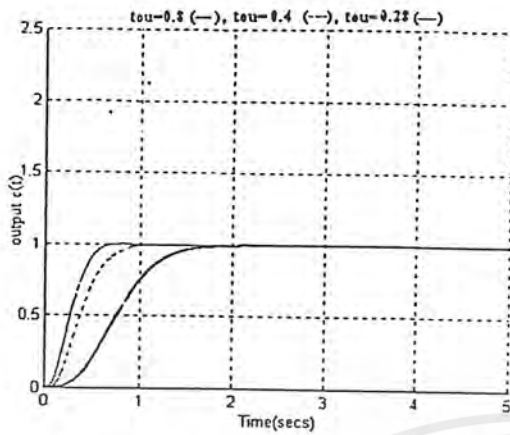
ขั้นตอนที่ (4) เนื่องจากค่า $k_p = 305.18$ ดังนั้นค่า

$$B_u(s) = 305.18$$

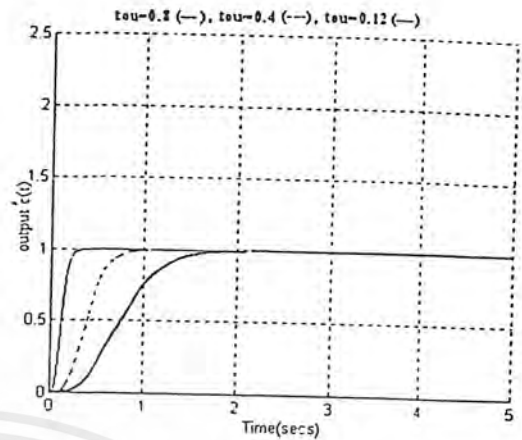
เมื่อนำตัวควบคุมที่ได้นี้มาควบคุมระบบเพื่อทดสอบผลตอบสนองชั่วคราว และผลตอบสนองสถานะอยู่ตัวเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณขั้นบันไดขนาดหนึ่งหน่วย (unit step signal) โดยใช้โปรแกรม MATLAB จากรูปที่ 3 พบว่ามีสมรรถนะตามที่ได้ออกแบบไว้ และถ้าต้องการให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองเร็วขึ้น ก็ตามารถลดค่าเวลาสมมูลเป็น 0.4 วินาทีและ 0.28 วินาทีได้ด้วย การลดค่าเวลาเข้าที่สำหรับการออกแบบเป็น 1.0 วินาทีและ 0.71 วินาทีตามลำดับ ดังนั้นจะได้ตัวควบคุมใหม่ คือ $G_{cs}(s)$ และ $G_{cu}(s)$ ตามลำดับดังนี้

$$G_{cs}(s) = \frac{15s^3 + 285.50s^2 + 1935.13s + 4882.81}{s}$$

$$G_{cu}(s) = \frac{25.21s^3 + 592.91s^2 + 5439.01s + 19214.83}{s}$$



รูปที่ 3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่มีพลาหนค์ชนิด 0 เมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูลของระบบมีค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่มีพลาหนค์ชนิด 1 เมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูลของระบบมีค่าต่าง ๆ

สำหรับพลาหนค์ชนิด 1

$$G_p(s) = \frac{1}{s(s+1)(s+7)}$$

หลังจากดำเนินการออกแบบเช่นเดียวกับพลาหนค์ชนิด 0 แล้ว ตัวควบคุม PIDA ที่ทำให้ระบบควบคุมมีเวลา $t_s \leq 2$ วินาที ที่ 2% คือ

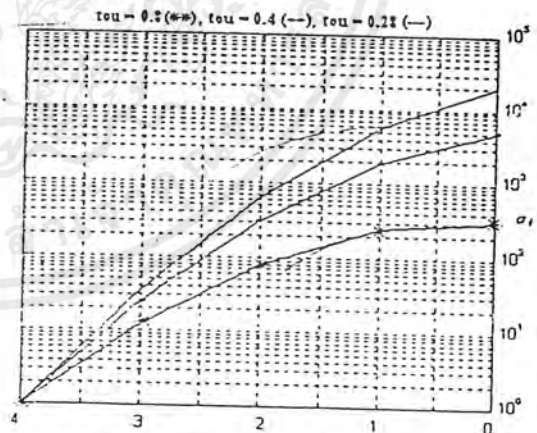
$$G_c(s) = \frac{k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s} = \frac{4.5s^3 + 71.125s^2 + 244.14s + 305.18}{s}$$

จากรูปที่ 4 พบว่าระบบควบคุมมีสมรรถนะตรงตามที่ต้องการได้ และเมื่อปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เป็น 0.4 วินาทีและ 0.12 วินาที ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองเร็วขึ้น ดังนั้นจะได้ตัวควบคุม $G_{c,1}(s)$ และ $G_{c,2}(s)$ ตามลำดับดังนี้

$$G_{c,1}(s) = \frac{17s^3 + 305.50s^2 + 1953.13s + 4882.81}{s}$$

$$G_{c,2}(s) = \frac{75.33s^3 + 3465.22s^2 + 7235.796s + 602816.35}{s}$$

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ a , ของสมการคุณลักษณะที่เกิดจากตัวควบคุม $G_{c,1}(s)$, $G_{c,2}(s)$ และ $G_{c,0}(s)$ ที่ออกแบบสำหรับพลาหนค์ชนิด 0 ตามลำดับ ไปสร้างแผนผังเขมิล็อกค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะจะได้ดังรูปที่ 5 พบว่าเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่าเล็กลง เส้นโค้งของสัมประสิทธิ์ a , จะเบนไปทางซ้ายมากขึ้น ทำให้ผลตอบสนองของระบบเร็วขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับผลตอบสนองที่แสดงไว้ในรูปที่ 3

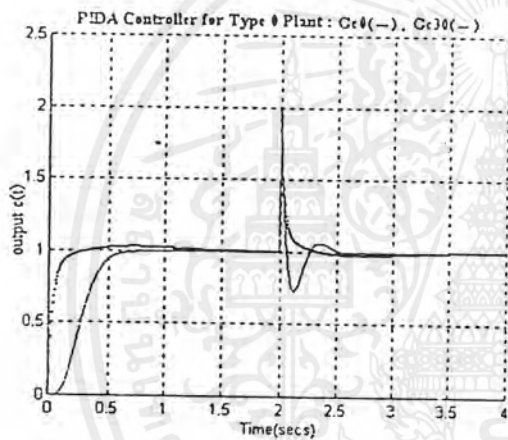


รูปที่ 5 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

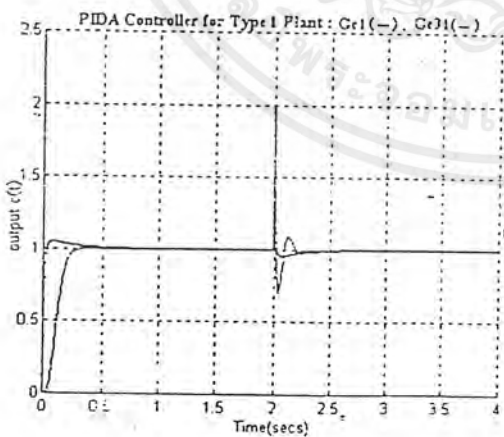
4.2 ผลตอบสนองที่อิมพัลส์ของระบบ

ให้ $G_{c,0}(s)$ และ $G_{c,1}(s)$ คือตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบโดยฟุงและคอร์ฟ [4] และตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบ

แบบด้วยวิธี CDM สำหรับพลาตชนิด 0 และกำหนดให้ $G_p(s)$ และ $G_{cm}(s)$ คือ ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบโดยจุง และคอร์ฟ และตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย CDM สำหรับพลาตชนิด 1 เมื่อมีสัญญาณอ้างอิง $R(s)$ และ สัญญาณรบกวนค่านอก $D_r(s)$ เป็นขั้นบันไดขนาดหนึ่ง หน่วย โดยที่สัญญาณรบกวนนี้จะเข้าสู่ระบบควบคุมที่เวลา $t = 2$ วินาที ซึ่งจะได้ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่แสดงได้ในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ จะเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM จะทำให้ผลตอบสนองเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่า และเมื่อมีสัญญาณรบกวนจะกลับเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าเช่นกัน



รูปที่ 6 ผลตอบสนองของระบบ (พลาตเป็นชนิด 0)



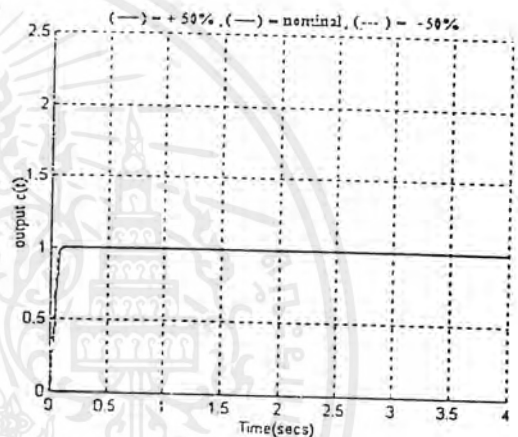
รูปที่ 7 ผลตอบสนองของระบบ (พลาตเป็นชนิด 1)

4.3 ความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของพลาต

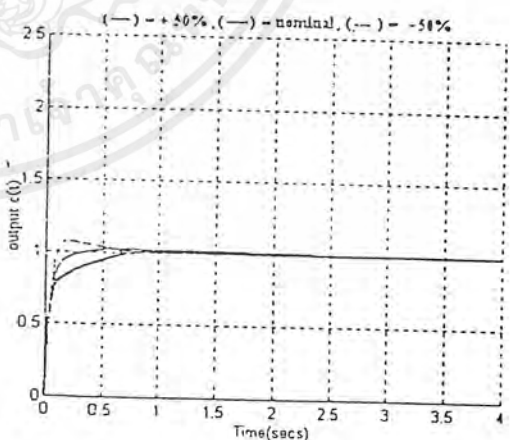
เมื่อพารามิเตอร์ของพลาตชนิด 0 เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 50% และเปลี่ยนแปลงลดลง 50% ซึ่งจะได้ $G_p(s)$ ตามลำดับดังนี้

$$G_p(s) = \frac{1}{(s + 1.5)(s + 4.5)(s + 9)}$$

$$G_p(s) = \frac{1}{(s + 0.5)(s + 1.5)(s + 3)}$$



รูปที่ 8 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อตัวควบคุม PIDA ถูกออกแบบด้วยวิธี CDM



รูปที่ 9 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อตัวควบคุม PIDA ถูกออกแบบด้วยวิธีทางเดินราก

จากรูปที่ 8 พบว่าตัวควบคุม $G_{cd}(s)$ ที่ถูกออกแบบด้วยวิธี CDM ให้ผลตอบสนองของระบบไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก ในขณะที่ผลตอบสนองของระบบที่มีตัวควบคุม $G_{cd}(s)$ ที่ถูกออกแบบโดยจุงและดอร์ฟ จะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าดังรูปที่ 9

5. บทสรุป

จากการทดลองพบว่าในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบ ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบโดยวิธี CDM สามารถควบคุมให้ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวตรงตามข้อกำหนดโดยไม่ต้องปรับแต่งอีกครั้ง และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็วกว่าตัวควบคุมที่ออกแบบโดยจุงและดอร์ฟโดยไม่มีค่าหุงเกิน เมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบพบว่าตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM จะเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้เร็วกว่าเช่นกัน และเมื่อพารามิเตอร์ของพลาเน็ตเปลี่ยนไปผลตอบสนองของระบบควบคุมก็ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถออกแบบตัวควบคุม PIDA ให้มีผลตอบสนองเร็วขึ้น ได้ง่ายและสะดวกด้วยการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล T ให้มีค่าน้อยลง แต่จะทำให้ค่าของเกน K

มากขึ้น ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมจะต้องคำนึงถึงค่าของเกน K ที่เป็นจริงด้วย

6. เอกสาร อ้างอิง

- [1] J.G.Ziegler and N.B.Nichols, Optimum Settling for Automatic Controller, Trans. ASME, vol 64 , pp.759-768, 1942.
- [2] S. Manabe, Analytical weight selection for LQ design, to be published in the 8th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, Sagamihara, ISAS, July 23-24,1998.
- [3] S.Manabe, Coefficient Diagram Method, to be presented in the 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Seoul, Aug. 24-28 1998.
- [4] Seul Jung and Richard C. Dorf, Analytic PIDA Controller Design Technique for A Third Order System, Proceeding of the 35th Conference on Decision and Control, Kobe, December 11-13,1996.

COEFFICIENT DIAGRAM METHOD

S. Manabe

Tokai University, Control Engg. Dept., 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, Japan

Abstract: A controller design method, called Coefficient Diagram Method (CDM), is introduced. By this method the simplest controller to satisfy the specification can be designed efficiently. The designer can design the controller and the characteristic polynomial of the closed-loop system simultaneously taking a good balance of stability, response, and robustness. *Copyright©1998 IFAC*

Keywords: Control system design, control theory, controllers, stability, polynomials.

1. INTRODUCTION

In control system design, sensors, actuators, and controllers are considered as the three major components of the system. However design theory must be viewed as the fourth major component, because it affects the controller complexity greatly. Thus theory must be evaluated for its effectiveness in practical application and not for its mathematical authenticity.

All the control system design for linear time invariant dynamic system boils down to proper selection of the characteristic polynomials (denominator polynomials) and proper selection of numerator polynomials for concerned input-output relations. When these polynomials are properly selected, the design of controller transfer function is straight forward, and requires only simple mathematics. The proper selection of the characteristic polynomial is not difficult, if only stability and response are to be satisfied, but it becomes complicated when robustness issue is present. The coefficient diagram method (CDM) (Manabe, 1991) is an answer to this problem.

The paper is organized as follows. In Section 2, a

simple design example is introduced to give the total picture of CDM. The historical background of CDM and its comparison with other control theories are given. In Section 3, basics of CDM, such as mathematical relations, the coefficient diagram, and stability, are given. In Section 4, the general design methodology of CDM is explained with example.

2. BRIEF DESCRIPTION OF CDM

2.1 Simple Example

In order to give the general picture of CDM, a simple design example is given. Fig. 1 is a generic block diagram for a DC motor position control, where position y and velocity v are sensed. The problem is to find velocity gain k_1 and position gain k_0 .

From Fig. 1, the plant equation is obtained in a differential equation form, where $s = d/dt$.

$$(0.25s^3 + 1.25s^2 + s)y = u \quad (1)$$

The controller equation is derived as follows.

$$u = k_0 y_r - (k_1 s + k_0) y \quad (2)$$

By eliminating u , the closed-loop equation is derived.

$$[0.25s^3 + 1.25s^2 + (k_1 + 1)s + k_0]y = k_0 u \quad (3)$$

The term preceding y is the characteristic

polynomial denoted as $P(s)$. Thus

$$P(s) = 0.25s^3 + 1.25s^2 + (k_1 + 1)s + k_0 \quad (4)$$

$$= \sum_{i=0}^n a_i s^i$$

For stability, all coefficient a_i must be positive, and the Routh stability condition, $a_2 a_1 > a_3 a_0$, must be satisfied. This leads to the the following condition.

$$k_0 > 0, \quad k_1 > 0.2k_0 - 1 \quad (5)$$

The stability region is shown in Fig. 2a, but, for the controller design, specific values for k_1 and k_0 must be determined.

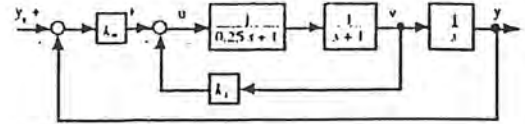


Fig. 1. DC motor position control

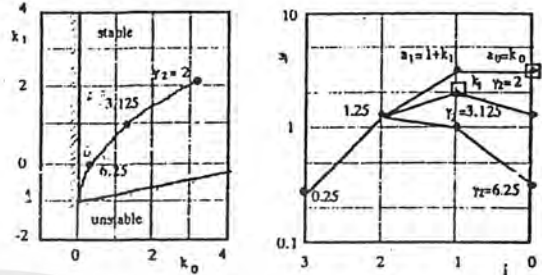


Fig. 2a. Stability region b. Coefficient diagram

As will be explained later, stability index γ_i and equivalent time constant τ are defined as follows.

$$\gamma_i = a_i^2 / (a_{i+1} a_{i-1}), \quad i = 1 \sim n - 1 \quad (6a)$$

$$\tau = a_1 / a_0 \quad (6b)$$

From Eqs. (4) (6a) (6b), a_i and τ can be expressed in terms of γ_1 as follows.

$$a_1 = 1 + k_1 = a_2^2 / (a_3 \gamma_2) = 6.25 / \gamma_2 \quad (7a)$$

$$a_0 = k_0 = a_1^2 / (a_2 \gamma_1) = 31.25 / (\gamma_2^2 \gamma_1) \quad (7b)$$

$$\tau = 0.2 \gamma_2 \gamma_1 \quad (7c)$$

From many design experiences and analytical works, the best choice of stability index is found to be

$$\gamma_i = [\gamma_2 \ \gamma_1] = [2 \ 2.5] \quad (8)$$

This leads to the following design results.

$$a_i = [a_3 \ a_2 \ a_1 \ a_0] = [1 \ 1.25 \ 3.125 \ 3.125] \quad (9a)$$

$$k_i = [k_1 \ k_0] = [2.125 \ 3.125] \quad (9b)$$

$$\tau = 1 \quad (9c)$$

The settling time t_s is about 2.5τ . For this design t_s is about 2.5 sec. Sometimes it may not be necessary to have such fast response. Then increase γ_2 while keeping $\gamma_1 = 2.5$ until a proper τ is obtained. In this case, the results are

$$a_i = [0.25 \ 1.25 \ 6.25 / \gamma_2 \ 12.5 / \gamma_2^2] \quad (10a)$$

$$k_i = [(6.25 / \gamma_2 - 1) \ 12.5 / \gamma_2^2] \quad (10b)$$

$$\tau = 0.5 \gamma_2 \quad (10c)$$

By eliminating γ_2 from Eq. (10a) and using Eqs (7a) (7b) the relation between k_1 and k_0 is obtained.

$$k_0 = 0.32 (1 + k_1)^2 \quad (11)$$

For $\gamma_2 = 6.25, 3.125, 2$, the results are shown in Fig. 2a. This shows the parameter values of controller to be taken in the stability region.

The coefficient diagram is shown in Fig. 2b. The ordinate is the coefficient a_i of the characteristic polynomial in log scale and the abscissa is the order i in the descending order. The convexity at $i = 2$ is more conspicuous for large γ_2 . Larger γ_2 means a more pronounced convexity at $i = 2$.

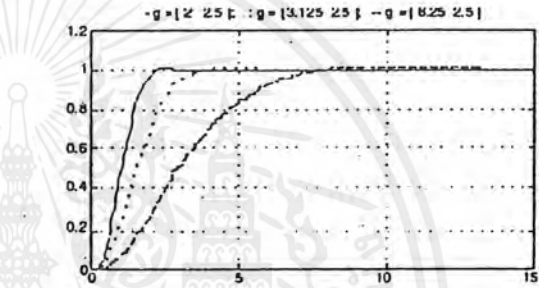


Fig. 3. Step response

corresponds to greater stability as will be later explained. The inclination at the right end corresponds to the equivalent time constant τ , which is the measure of response speed.

The step response for these cases are shown in Fig. 3. The waveforms take similar nice forms, because γ_1 is kept to the optimum value of 2.5, and γ_2 is larger than 2. But the response speeds are different, and the settling time t_s is found to be about 2.5τ .

There are many measure for robustness. One of such measures is the percent variation of a_i to the percent variation of k_i .

$$\Delta a_1 / a_1 = (k_1 / a_1) (\Delta k_1 / k_1) = 0.68 (\Delta k_1 / k_1) \quad (12a)$$

$$\Delta a_0 / a_0 = (k_0 / a_0) (\Delta k_0 / k_0) = 1 (\Delta k_0 / k_0) \quad (12b)$$

For this case, the percent variation of a_i is less than that of k_i . This is the indication of good robustness. This can be easily expressed in the coefficient diagram by plotting k_1 and k_0 with small square symbols besides a_1 and a_0 (shown for $\gamma_2 = 2$).

Thus the coefficient diagram such as Fig. 2b gives the sufficient information about stability, response, and robustness, the three major characteristics of control systems. The three major characteristics of control systems are stability, response, and robustness. The coefficient diagram provides a visual representation of these characteristics. The stability is indicated by the location of the poles in the s-plane. The response is indicated by the settling time and overshoot. The robustness is indicated by the sensitivity of the system parameters to changes in the controller gains.

systems. The stability is given by curvature, the response is given by inclination, and the robustness is given by the square symbols. From Fig. 2b, it is understood that the increase of γ_2 corresponds to the increase of robustness and stability with the sacrifice of response. The fact that stability, response, and robustness are expressed in the single diagram is the source of the effectiveness of CDM design.

2.2 Historical Background

The CDM has developed over many previous ideas and experiences in control system design. Some of the important topics will be covered in the following.

The first treatment of the polynomial approach is "On governors" by J. C. Maxwell in 1868 and the Routh stability criterion in 1877 (Franklin, 1994), where the stability is analyzed using the coefficients of the characteristic polynomial. However it keeps the original form of stability criterion since then and no further conspicuous effort has been made to make this approach a workable design methodology until Lipatov's work (1978).

In 1950s, the frequency response method was widely used in control system design. During that period, it was commonly recognized that, for good system design, such criteria as the phase margin or gain margin were not sufficient and the frequency characteristics of the open loop transfer function should have proper shape for a fairly wide frequency range (Tustin, 1958).

Chestnut (1951) pointed out in his celebrated book the importance of the relative location of break points and the change of slope at these break points at the straight line approximation of the Bode diagram (gain only) of the open loop transfer function, and he proposed a design method based on these findings. His proposal was very practical, and has been widely used in industry not only in 1950s but even today.

The rule of thumb, such that the straight line approximation of the gain should intersect the 0 dB line at the slope of -20 dB/dec., the change of slope at each break point should be 20 dB/dec., and the break points (time constant) should be separated at least by factor of two, has been widely used in practical design of simple control systems.

For such simple control system, the separation of break points approximately corresponds to the stability index. The rule of thumb that the break

points be separated at least by factor of two roughly corresponds to specifying stability index γ_i to be larger than two. The effort to make this rule applicable to more complex systems have led later to the adoption of stability index rather than the break points, and the adoption of the coefficient diagram rather than Bode diagram, and finally culminated to CDM.

Graham (1953) made intensive research to find the relation between the coefficients of characteristic polynomials and the transient responses, and proposed standard forms for desirable characteristic polynomials. This is commonly called ITAE! (Integral Time Absolute Error) standard form. The values of coefficients of this standard form are similar, but a little more oscillatory, compared to the proposed values for CDM.

The shortcoming of ITAE as a design approach is due to its lack of flexibility. Because it gives a standard form for each order of characteristic polynomial, it is very inconvenient when the order varies in the course of design. Because it gives only one standard form, and fails to show the way to modify it when necessary, unreasonably unrobust controller can be designed at certain occasion (Franklin, 1994, p. 534, Ex. 7.21).

Around these time, Kessler (1960) made intensive efforts to establish synthesis (design) procedures for multi-loop control systems, and came out with a standard form, commonly called "Kessler Canonical Multi-loop Structure". The proposed system is more stable compared to ITAE standard form, and, for this reason, has been widely used in the steel mill control. However Kessler's standard form has unnecessary overshoot of 8 %, and it was found that no-overshoot condition can be easily obtained by a small modification of making $\gamma_1 = 2.5$ instead of 2. The CDM incorporates this modification.

Various researchers have helped to develop the similar idea in Europe (Brandenburg, 1996) (Zach, 1987) (Naslin, 1968). However the term "double ratio" is used instead of stability index γ_i , because it is simply the ratio of ratios of adjacent coefficients.

$$\gamma_i = (a_i / a_{i+1}) / (a_{i-1} / a_i) \quad (13)$$

Kitamori (1979) proposed an improved version of the approach of Graham (1953), where the specification of the characteristic polynomials was given only for the low order, and the flexibility of design was greatly improved.

Stability of control systems can be analyzed by Routh or Hurwitz criterion utilizing coefficients of characteristic polynomials. However in this way the effect of the variation of coefficients on stability is not clearly seen. Lipatov (1978) proposed sufficient conditions for stability and instability. Because of its simplicity, the relation of stability and instability with respect to the coefficients of the characteristic polynomials becomes very clear. These conditions are integrated to the design procedures of CDM.

Especially it becomes a powerful design tool, when it becomes clear that these conditions can be easily shown on the coefficient diagram graphically. It also helps to clarify the meaning of stability index. Thus the designer can graphically design the characteristic polynomial on the coefficient diagram by fully utilizing his intuition and experiences..

In control system design, classical control theory and modern control theory are widely used. But there is another approach called algebraic approach, where polynomials are used instead of transfer functions (Kailath, 1980, p. 306) (Chen, 1987) (Franklin, 1994, p. 564). This method does not say anything about choosing the proper characteristic polynomial for the given problem, and it is usually done by pole assignment. However it greatly simplifies the process of finding controller from the given characteristic polynomial, and this process is adopted in CDM.

As stated above, three features are added to the previous work in deriving the CDM. The first addition is the introduction of the coefficient diagram, where the important features of the control system, namely stability, response and robustness, are represented in a graphical manner, and the understanding of the total system becomes much easier. The second addition is the improvement of the Kessler's standard form, by which the 8 % overshoot in Kessler becomes no overshoot. The third addition is the introduction of the Lipatov's sufficient condition for stability in the form compatible with the CDM.

In this way, the CDM has developed from the crude infancy (1991) to a sound control design theory with many successful applications (Manabe, 1994a, 1994b, 1997a, 1998a). Tanaka (1992b) developed independently similar approach by specifying α parameter, which is the reciprocal of stability index, with successful application to a gas turbine design (Tanaka, 1992a). Hori (1994) used the stability index for the design of two-mass resonant system. Such

trend will be further accelerated when the theoretical foundation for the CDM (Manabe, 1997b, 1997c) becomes clearer.

2. 3 Comparison with Other Control Theories

The overview of the control design theories are shown in Table 1. One group is the classical control and the other is the modern control. In the middle, there is the third group, called the algebraic approach. These theories are characterized by the mathematical expression used for the system representation, and the way the design proceeds to obtain the controller and the closed-loop transfer function.

As to the mathematical expression, the transfer function (classical control) and the state space (modern control) are commonly used. The transfer function is easy to handle, but it becomes inaccurate when pole-zero cancellation occurs due to uncontrollable or unobservable modes. The state space is accurate and well-suited in machine computation, but manual handling is very difficult.

The third method is the polynomial expression, where the denominator and the numerator of the transfer function is handled as the independent entity. This expression enjoys the easiness of handling of the transfer function together with the rigor of the state space, because it is equivalent to the state space expression in control or observer canonical form.

The control system design problem can be stated as follows; When the plant dynamics and the performance specifications are given, find the controller under some practical limitation together with the closed-loop transfer function such that the performance specifications and controller practical limitation are reasonably satisfied.

Table 1 Overview of control design theories

Classification	Design method	Expression	Approach
Classical control	Frequency response design (Bode / Nyquist)	Transfer function	Open-loop
	Root-locus design		
Algebraic approach	Routh stability criteria	Polynomial	Simultaneous method
	Coefficient diagram method	Polynomial	
	Direct method (Pole placement)	Polynomial	
Modern control	Pole placement	State space	Closed-loop
	Optimal control (LQR, LQG)		
	Flat outputs		

One way to proceed in design is to assume the controller under practical limitation first, and then obtain the closed-loop transfer function. After that, it is checked against the performance specification. If it is not satisfactory, modify the controller and repeat the process. This approach is called as "Open-loop approach" and mainly used in the classical control design.

The other way is to find the closed-loop transfer function to meet the performance specification first, and then obtain the controller. If the controller does not satisfy the practical limitation, modify the closed-loop transfer function and repeat the process. This approach is called as "Closed-loop approach" and mainly used in the modern control design.

The third approach is to specify partially the closed-loop transfer function and controller at first, and decide the rest of parameters by design. This approach is called "Simultaneous approach" and used in CDM.

In CDM, the performance specification is rewritten in a few parameters (stability index γ_i and equivalent time constant τ). These parameters specify the closed-loop transfer function. Also these parameters are related to the controller parameters algebraically in explicit form. These features make this approach possible in CDM.

Because of this simultaneous design nature, the designer is able to keep good balance between the rigor of the requirements and the complexity of the controller. Thus the simplest controller to satisfy the specification is realized without much difficulty.

The strength of CDM lies in that, for any plant, minimum phase or non-minimum phase, the simplest and robust controller under practical limitation can be found. Such controller closely agrees with the controllers which are accepted as good controllers in practical application. It is worthy to notice that there always exists a LQR controller with proper weights and state augmentation, which is exactly the same as the CDM controller (Manabe, 1998b).

Simply stated, CDM is an algebraic approach over polynomial ring in the parameter space, where a special diagram called "Coefficient diagram" is used as the vehicle to carry the necessary information, and as the criteria of good design. An improved version of Kessler's standard form and the stability condition of Linhart constitute the theoretical basis.

3. BASICS OF CDM

3.1 Mathematical Relations

Some mathematical relations extensively used in CDM will be introduced hereafter. The characteristic polynomial is given in the following form.

$$P(s) = a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0 = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (14)$$

The stability index γ_i , the equivalent time constant τ , and stability limit γ_i^* are defined as follows.

$$\gamma_i = a_i^2 / (a_{i+1} a_{i-1}), \quad i = 1 \sim n-1 \quad (15a)$$

$$\tau = a_1 / a_0 \quad (15b)$$

$$\gamma_i^* = 1 / \gamma_{i+1} + 1 / \gamma_{i-1}, \quad \gamma_n = \gamma_0 = \infty \quad (15c)$$

From these equations the following relations are derived.

$$a_{i+1} / a_i = (a_j / a_{j-1}) / (\gamma_i \gamma_{i-1} \dots \gamma_{j+1} \gamma_j) \quad i \geq j \quad (16a)$$

$$a_i = a_0 \tau^i / (\gamma_{i-1} \gamma_{i-2}^2 \dots \gamma_2^{i-2} \gamma_1^{i-1}) \quad (16b)$$

Then characteristic polynomial will be expressed by a_0 , τ , and γ_i as follows.

$$P(s) = a_0 \left[\sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} 1 / \gamma_{i-j}^j \right) (\tau s)^i + \tau s + 1 \right] \quad (17)$$

The equivalent time constant of the i -th order τ_i and the stability index of the j -th order $\gamma_{i,j}$ are defined as follows.

$$\tau_i = a_{i+1} / a_i = \tau / (\gamma_i \dots \gamma_2 \gamma_1) \quad (18)$$

$$\gamma_{i,j} = a_i^2 / (a_{i+j} a_{i-j}) = \left[\prod_{k=1}^{j-1} (\gamma_{i+j-k} \gamma_{i-j+k})^k \right] \gamma_i^j \quad (19)$$

Thus τ can be considered the equivalent time constant of the 0-th order and γ_i is considered as the stability index of the 1st order. The stability index of the 2nd order is a good measure of stability and is shown below.

$$\gamma_{i,2} = a_i^2 / (a_{i+2} a_{i-2}) = \gamma_{i+1} \gamma_i^2 \gamma_{i-1} \quad (20)$$

3.2 Coefficient Diagram

When a characteristic polynomial is expressed as

$$P(s) = 0.25s^5 + s^4 + 2s^3 + 2s^2 + s + 0.2, \quad (21)$$

then

$$a_i = [0.25 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 1 \quad 0.2] \quad (22a)$$

$$\gamma_i = [2 \quad 2 \quad 2 \quad 2.5] \quad (22b)$$

$$\tau = 5 \quad (22c)$$

$$\gamma_i^* = [0.5 \quad 1 \quad 0.9 \quad 0.5] \quad (22d)$$

The coefficient diagram is shown as in Fig. 4, where coefficient a_i is read by the left side scale, and stability index γ_i , equivalent time constant τ , and stability limit γ_i^* are read by the right side scale. The τ is expressed by a line connecting 1 to τ .

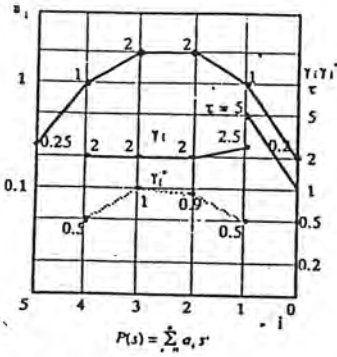


Fig. 4. Coefficient diagram

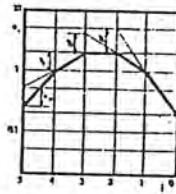


Fig. 5a. γ_i

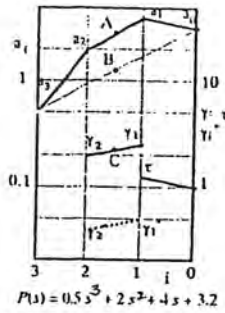
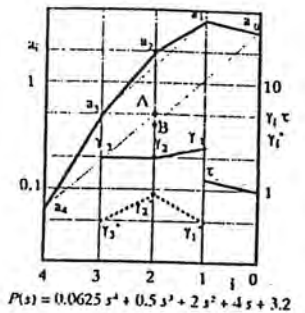


Fig. 6a. 3rd order



b. 4th order

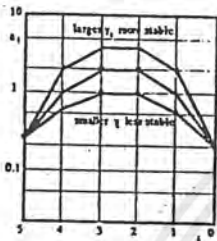
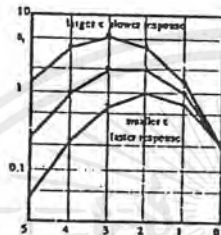


Fig. 5b. Effect of γ_i



c. Effect of τ

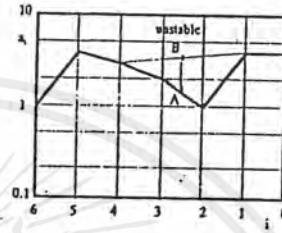
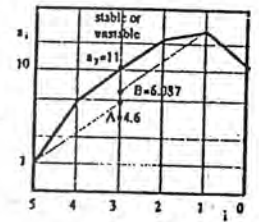


Fig. 7a. 6th order



b. 5th order

The stability index γ_i can be graphically obtained (Fig. 5a). If the curvature of the a_i becomes larger (Fig. 5b), the system becomes more stable, corresponding to larger stability index γ_i . If the a_i curve is left-end down (Fig. 5c), the equivalent time constant τ is small and response is fast. The equivalent time constant τ specifies the response speed.

3.3 Stability Condition

From the Routh-Hurwitz stability criterion, the stability condition for the 3rd order is given as

$$a_2 a_1 > a_3 a_0 \quad (23a)$$

If it is expressed by stability index,

$$\gamma_2 \gamma_1 > 1 \quad (23b)$$

The stability condition for the fourth order is given as

$$a_2 > (a_1 / a_3) a_4 + (a_3 / a_1) a_0 \quad (24a)$$

$$\gamma_2 > \gamma_2^* \quad (24b)$$

For the system higher than or including 5th degree, Lipatov (1978) gave the sufficient condition for stability and instability in several different forms. The conditions most suitable to CDM can be stated as follows;

"The system is stable, if all the partial 4th order polynomials are stable with the margin of 1.12. The system is unstable if some 3rd order polynomial is unstable."

Thus the sufficient condition for stability is given as

$$a_i > 1.12 \left[\frac{a_{i-1}}{a_{i-1}} a_{i+2} + \frac{a_{i+1}}{a_{i-1}} a_{i-2} \right] \quad (25a)$$

$$\gamma_i > 1.12 \gamma_i^* \quad \text{for all } i = 2 \sim n-2 \quad (25b)$$

The sufficient condition for instability is given as

$$a_{i+1} a_i \leq a_{i+2} a_{i-1} \quad (26a)$$

$$\gamma_{i+1} \gamma_i \leq 1, \quad \text{for some } i = 1 \sim n-2 \quad (26b)$$

These conditions can be graphically expressed in the coefficient diagram. Fig. 6a is a 3rd-order example. Point A is $(a_2 a_1)^{0.5}$ and point B is $(a_3 a_0)^{0.5}$. Thus if A is above B, the system is stable. Point C is $(\gamma_2 \gamma_1)^{0.5}$. If it is above 1, the system is stable.

Fig. 6b is a 4th-order example. Point A is obtained by drawing a line from a_4 in parallel with line $a_3 a_1$. Similarly point B is obtained by drawing a line from a_0 in parallel with line $a_3 a_1$. The stability condition is $a_2 > (A + B)$. The other condition is $\gamma_2 > \gamma_2^*$.

Fig. 7a is a 6th order example (Franklin, 1994, p. 217), where

$$P(s) = s^6 + 4s^5 + 3s^4 + 2s^3 + s^2 + 4s + 4 \quad (27a)$$

By the first glance, the worst points are found to be $[a_4 a_3 a_2 a_1]$, $A < B$, and the system is unstable.

Fig. 7b is for another 5th order example (Franklin, 1994, p. 219), where

$$P(s) = s^5 + 5s^4 + 11s^3 + 23s^2 + 28s + 12 \quad (27b)$$

By the first glance, the worst point is $a_3 = i$. because $A = 23/5 = 4.6$, $B = (5/23) \cdot 28 = 6.087$, and $A + B = 10.687$, the sufficient condition for stability is

not satisfied. Also by looking at the figure, it is clear that the sufficient condition for instability is not satisfied either. In fact, this system is on the boundary of stability and has imaginary roots at $\pm j2$. It is very interesting to note that $(a_2 / a_4)^{0.5} = 2.145$ is approximately equal to these imaginary roots.

It is clear from Eqs. (15c) (25b) that, if all γ_i s are larger than 1.5, the system is stable. Lipatov (1978) proved, in the process of proving his main theorem, that all roots are real negative, if all γ_i s are larger than 4. From these observation it is safe to say that γ_i should be chosen in a region of 1.5 ~ 4.

3.4 Canonical Open-Loop Transfer Function

For a given characteristic polynomial, the closed-loop transfer function $T(s)$ is given as follows.

$$T(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (28)$$

The canonical open-loop transfer function for $T(s)$ is defined as the open-loop transfer function $G(s)$, whose unity feedback structure produces $T(s)$. Then

$$G(s) = Q(s) / [P(s) - Q(s)] = [\sum_{i=0}^m b_i s^i] / [\sum_{i=m+1}^n a_i s^i + \sum_{i=0}^m (a_i - b_i) s^i] \quad (29)$$

When $b_i = a_i$ for $i = 0 \sim k$, the system type is said to be $(k + 1)$ (Franklin, 1994, p. 200). Furthermore, if $b_i = 0$ for $i = (k + 1) \sim m$, $G(s)$ is called the canonical open-loop transfer function of system type $(k + 1)$ for characteristic polynomial $P(s)$. Thus the canonical open-loop transfer function of system type 1, $G_1(s)$, for $P(s)$ and its corresponding closed-loop transfer function $T_1(s)$ are given as

$$G_1(s) = a_0 / (a_n s^n + \dots + a_1 s) \quad (30a)$$

$$T_1(s) = a_0 / (a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0) \quad (30b)$$

For system type 2,

$$G_2(s) = (a_1 s + a_0) / (a_n s^n + \dots + a_2 s^2) \quad (31a)$$

$$T_2(s) = (a_1 s + a_0) / (a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0) \quad (31b)$$

In this way, the canonical open/closed-loop transfer function of a given system-type for a characteristic polynomial $P(s)$ is defined. These canonical transfer functions are helpful to clarify the characteristics of $P(s)$.

Also break point ω_i is defined as

$$\omega_i = a_i / a_{i+1} \quad (32)$$

From Eq. (18), ω_i is found to be the reciprocal of the equivalent time constant of high order τ_i . The ratio of adjacent break points is equal to the stability index γ_i .

$$\gamma_i = \omega_{i+1} / \omega_i \quad (33)$$

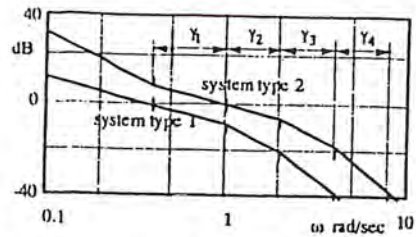


Fig. 8. Canonical open-loop transfer function

Fig. 8 shows an example of Bode diagram for the system type 1 and 2. The straight line approximation (asymptotic representation) of Bode diagram used here is somewhat different from the ordinary way, where the break points are chosen from the poles and zeros of the transfer function, and not the ratio of the coefficients. However this way is more accurate and the relation with the coefficient diagram is closer.

Thus it becomes clear that the coefficient diagram has a one-to-one correspondence with the straight line approximation of Bode diagram of its canonical open-loop transfer function.

3.5 Standard Form

From number of reasons to be explained later, the recommended standard form for CDM is

$$\gamma_{n-1} \sim \gamma_2 = 2, \quad \gamma_1 = 2.5 \quad (34)$$

When $a_0 = 0.4$ and $\tau = 2.5$ are chosen, the characteristic polynomial $P(s)$ is obtained by Eq. (17) in the following simple form.

$$P(s) = 2^{-\frac{(n-2)(n-1)}{2}} s^n + \dots + 2^{-10} s^6 + 2^{-6} s^5 + 2^{-3} s^4 + 0.5 s^3 + s^2 + s + 0.4 \quad (35)$$

The step response of the canonical closed-loop transfer function for the system type 1 and 2 for various orders are given in Fig. 9 and 10. There is virtually no overshoot for the system type 1.

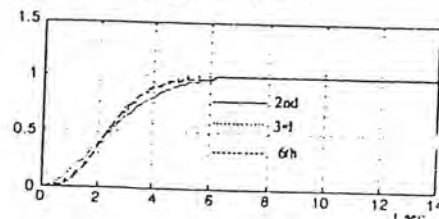


Fig. 9. System type 1

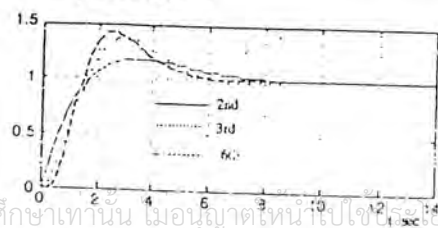


Fig. 10. System type 2

There is an overshoot of about 40% for system type 2. This overshoot is necessary, because the integral of the error for the step response must become zero in system type 2. It is also noticed that the responses are about the same irrespective of the order of the system. Because of this nature, the designer can start from a simple controller and move to more complicated one in addition to the previous design. The settling time is about $2.5 \sim 3\tau$. Many simulation runs show that the standard form has the shortest settling time for the same value of τ .

The pole location is given in Fig. 11. They are listed as follows.

- 2nd order $-0.50000 \pm j 0.38730$
- 3rd order $-0.62273 \pm j 0.82004, -0.75454$
- 4th order $-1.0000 \pm j 1.3764, -1.0000 \pm j 0.32492$
- 5th order $-1.2084 \pm j 0.70569, -1.1377$
 $-2.2228 - j 2.5593$
- 6th order $-1.2867 \pm j 0.74408, -1.1827$
 $-4.4569 \pm j 5.2163, -3.3301$
- 7th order $-1.2843 \pm j 0.73912, -1.1805$
 $-8.9003 \pm j 10.427, -5.8539, -4.5963$
- 8th order $-1.2843 \pm j 0.73925, -1.1806$
 $-17.802 \pm j 20.853, -12.009, -8.3419$
 -4.2969 (36)

It is found that the three lowest order poles are aligned in a vertical line and the two highest order poles are at the point about 49.5 deg from the negative real axis. The rest of the poles are on or close to the negative real axis. For 4th order, all poles are exactly on the vertical line.

It is interesting to note that a 3rd order system with three poles on a vertical line shows a non-decreasing feature for the step response or no overshoot. For example, the transfer function $G(s)$ is given as

$$G(s) = (\beta^2 + 1) / [(s + 1)\{(s + 1)^2 + \beta^2\}] \quad (37a)$$

The first order derivative of its unit step response is the inverse Laplace transform $g(t)$ of $G(s)$, given as

$$g(t) = (1 + 1/\beta^2) e^{-t}(1 - \cos \beta t) \quad (37b)$$

Because $g(t)$ is always positive and the unit response is non-decreasing.

A 3rd order system with $\beta^2 = 1.5$ gives a characteristic polynomial $P(s)$ such as

$$P(s) = s^3 + 3s^2 + 4.5s + 2.5 \quad (38a)$$

$$\gamma_i = [2 \quad 2.7] \quad (38b)$$

For this case, the overshoot is zero. If $\gamma_1 = 2.5$ as in the standard form, three poles are not exactly on the vertical line, and the complex poles are a little bit closer to the imaginary axis with the result of a small

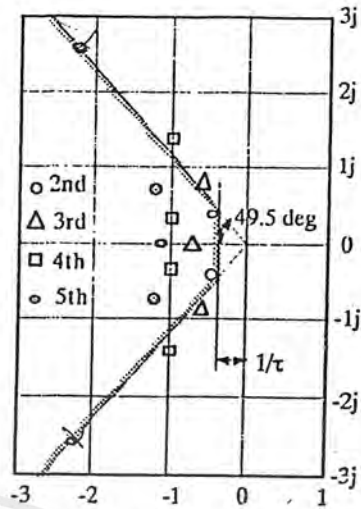


Fig. 11. Pole location

overshoot. The choice of $\gamma_1 = 2.5$ instead of 2.7 is made for the reason of simplicity.

In summary, the standard form has the favorable characteristics as listed below.

- (1) For system type 1, overshoot is almost zero. For system type 2, necessary overshoot of about 40% is realized.
- (2) Among the system with the same equivalent time constant τ , the standard form has the shortest settling time. The settling time is about $2.5 \sim 3\tau$.
- (3) The step responses show almost equal wave forms irrespective to the order of the characteristic polynomials.
- (4) The lower order poles are aligned on a vertical line. The higher order poles are located within a sector 49.5 degrees from the negative real axis, and their damping coefficient ζ is larger than 0.65.
- (5) The CDM standard form is very easy to remember.

In other words, the standard form seems to possess all the characteristics of "good designs" found from experience, such as no overshoot, short settling time, and pole alignment on a vertical line.

Table 2 Comparison of stability index

standard forms	stability index				standard forms	stability index			
	γ_4	γ_3	γ_2	γ_1		γ_4	γ_3	γ_2	γ_1
Binomial			4		ITAE			2	
		3	3				1.424	2.641	
		2.667	2.25	2.667			1.297	2.039	2.144
		2.5	2	2.5			1.568	1.624	1.779
Butterworth			2		Kessler			2	
		2	2				2	2	
		2	1.707	2			2	2	2
		2	1.618	1.618		2	2	2	2
Bessel			1		(2)M			2.5	
		2.4	2.5				2	2.5	
		2.222	1.929	2.333			2	2	2.5
		2.143	1.75	1.778		2.25	2	2	2.5

For comparison, stability indices γ_i 's for various standard forms used in the control theory are given in Table 2. It is found that CDM standard is similar to Bessel at the low order, and become similar to binomial at the high order.

3.6 Robustness Consideration

Robustness and stability are completely different concepts. Simply stated, stability concerns where the poles are located, and robustness concerns how fast the poles move to imaginary axis for the variation of parameters.

Stability is specified by the stability index γ_i of the characteristic polynomial, but robustness is only specified after the open loop structure is specified.

As an example, a 3rd order polynomial is given as

$$P(s) = 0.5s^3 + s^2 + s + 0.4 \tag{39a}$$

If the canonical open-loop transfer function of system type 1, $G_1(s)$, is assumed, it becomes

$$G_1(s) = 0.4 / (0.5s^3 + s^2 + s) \tag{39b}$$

For this case phase margin PM = 66.6 deg. For system type 2, $G_2(s)$ becomes

$$G_2(s) = (s + 0.4) / (0.5s^3 + s^2) \tag{39c}$$

For this case, PM = 41.7 deg and robustness is decreased. If a non-minimum controller is used, the open-loop transfer function $G_a(s)$ may become as

$$G_a(s) = (-9s + 0.4) / (0.5s^3 + s^2 + 10s) \tag{39d}$$

For this case, gain margin GM = 1.087 and robustness is extremely poor.

In other words, for the same characteristic polynomial and thus for the same stability, the system can take different robustness. It can become extremely unrobust in some cases.

Conversely any system, which is extremely robust, can be poor in stability. One example is the case, where the open-loop transfer function $G_b(s)$ is given as

$$G_b(s) = k(s^2 + 0.99) / (s^3 + s) \tag{40a}$$

Its characteristic polynomial $P_b(s)$ is given as

$$P_b(s) = s^3 + ks^2 + s + 0.99k \tag{40b}$$

This system is stable for any positive value of k (GM = ∞), and also PM = 90 deg. However the stability is very poor as is clear from Eq. (40b).

Thus in designing the characteristic polynomial, more consideration is required beyond the choice of γ_i .

The traditional design principle of sticking to the minimum-phase controller, wherever possible, with the lowest possible order and with the narrowest possible bandwidth is actually found to be a strong guarantee of robustness.

In the actual design, the choice of $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2$ is strongly recommended due to stability and response requirement, but it is not necessary to make $\gamma_4 \sim \gamma_{n-1}$ equal to 2. The condition can be relaxed as

$$\gamma_i > 1.5\gamma_i^* \tag{44}$$

With such freedom, designer have the freedom of designing the controller together with the characteristic polynomial, and he can integrate robustness in the the characteristic polynomial with a small sacrifice of stability and response. Because the essence of the CDM lies in the proper selection of stability indices γ_i 's, some experiences are required in actual design, as is true in any design effort.

4. CDM DESIGN

4.1 Mathematical Model

The standard block diagram of the CDM design for a single-input single-output system is shown in Fig. 12. A similar block diagram for multi-input multi-output system can be obtained, but for reasons of simplicity, it will not be treated here.

The plant equation is given as

$$A_p(s)x = u + d \tag{45a}$$

$$y = B_p(s)x, \tag{45b}$$

where u, y, and d are input, output, and disturbance. The symbol x is called the basic state variable. $A_p(s)$ and $B_p(s)$ are the denominator and numerator polynomial of the plant transfer function $G_p(s)$.

It will be easily seen that this expression has a direct correspondence with the control canonical form of the state-space expression, and x corresponds to the state variable of the lowest order. All the other states are expressed as the derivatives of x of high order. This

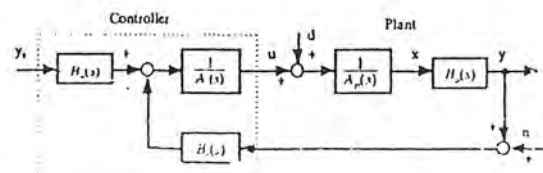


Fig. 12. CDM standard block diagram

form will be called the right polynomial form hereafter, because it corresponds to the right co-prime factorization of the plant transfer function.

Controller equation is given as

$$A_c(s) u = B_a(s) y_r - B_c(s) (y + n), \quad (46)$$

where y_r and n are reference input and noise on the output. $A_c(s)$ is the denominator of the controller transfer function. $B_a(s)$ and $B_c(s)$ are called the reference numerator and the feedback numerator of the controller transfer function. Because the controller transfer function has two numerators, it is called two-degree-of-freedom system.

This expression corresponds to the observer canonical form of the state-space expression. This form will be called the left polynomial form of the controller transfer function.

Elimination of y and u from Eq (46) by Eqs. (45a, b) gives

$$P(s) x = B_a(s) y_r + A_c(s) d - B_c(s) n, \quad (47a)$$

where $P(s)$ is the characteristic polynomial and given as

$$P(s) = A_c(s) A_p(s) + B_c(s) B_p(s). \quad (47b)$$

In a similar manner, equation for y and u are obtained.

$$P(s) y = B_p(s) [B_a(s) y_r + A_c(s) d - B_c(s) n] \quad (47c)$$

$$P(s) u = A_p(s) [B_a(s) y_r - B_c(s) n] - B_c(s) B_p(s) d \quad (47d)$$

Because this system has 3 inputs and 3 outputs, there are 9 transfer functions. But these are related each other. Four basic relations are selected, namely

$$P(s) x = P(0) y, \quad (48a)$$

$$P(s) y = B_p(s) B_a(s) y_r, \quad (48b)$$

$$P(s) y = B_p(s) A_c(s) d \quad (48c)$$

$$P(s) (-u) = B_c(s) B_p(s) d. \quad (48d)$$

Eq. (48a) is the response of x to y_r when $B_a(s) = P(0)$, and it corresponds to the canonical closed-loop transfer function of system type 1 for $P(s)$. This equation specifies the characteristic polynomial, and it is a very good measure of stability. Eq. (48b) is for the command following characteristics. Eq. (48c) is for the disturbance rejection characteristics. Eq. (48d) corresponds to the complementary sensitivity function $T(s)$, and it is useful for checking the robustness. In the CDM design, these four basic relations are used for performance specification..

4.2 Analysis of the specification

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
When the performance specifications are given, they
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

must be modified to the design specifications. In CDM, the design specifications are as follows.

- (1) The equivalent time constant τ
- (2) The stability indices γ_i for the higher order terms. The stability indices for the lower order terms are already specified.
- (3) The high frequency attenuation characteristics.
- (4) The low frequency disturbance rejection characteristics.

The items (1) and (2) specifies the characteristic polynomial. The controller is said to be the order m/n , if the order of feedback numerator is m and the order of denominator is n . The item (3) (4) specifies the controller structure, that is, the order m/n and some parameter values.

Usually the rise time, the settling time, the overshoot, and the peak time are used for the time response specification. However from the CDM design point of view, only the settling time t_s is meaningful, because it gives upper bound of τ , where $t_s = 2.5 \sim 3 \tau$. The frequency response specifications are used for the items (3) and (4).

4.3 Design Example

Plant parameters are give as

$$A_p(s) = 0.25 s^3 + 1.25 s^2 + s \quad (49a)$$

$$B_p(s) = 0.1 s + 1. \quad (49b)$$

A 2/2-order controller is to be designed, whose steady state gain is to be 20 due to the disturbance rejection characteristics specification. The controller should have reasonably narrow bandwidth. The command following characteristics of system type 1 is required.

Then the structure of the controller becomes as follows.

$$A_c(s) = l_2 s^2 + l_1 s + 1 \quad (50a)$$

$$B_c(s) = k_2 s^2 + k_1 s + 20 \quad (50b)$$

$$B_a(s) = 20 \quad (50c)$$

In order to make the bandwidth narrow, the highest denominator breakpoint of the controller is limited to twice of that of the plant.

$$l_1 / l_2 = 2 \times 1.25 / 0.25 = 10 \quad (50d)$$

Eqs (50a, b, c, d) have only three degrees of freedom. Thus only $\gamma_1 = 2.5$, $\gamma_2 = \gamma_3 = 2$ can be specified. γ_4 and τ are determined as the result of design.

Now the Diophantine equation is derived as follows.

$$A_c(s) A_p(s) + B_c(s) B_p(s) = P(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (51a)$$

$$a_i = a_0 \tau^i / (\gamma_{i-1} \gamma_{i-2} \dots \gamma_2^i \gamma_1^{i-1}) \quad (51b)$$

When Eqs. (49a, b) (50a, b, c, d) are used in Eqs. (51a, b), the following matrix relation is obtained.

$$\begin{bmatrix} 0.375 & 0 & 0 \\ 1.35 & 0.1 & 0 \\ 1 & 1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ k_2 \\ k_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_4 \\ a_3 - 0.25 \\ a_2 - 1.25 \\ a_1 - 1 - 2 \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$a_4 = a_0 \tau^4 / 125, \quad a_3 = a_0 \tau^3 / 12.5, \\ a_1 = a_0 \tau^2 / 2.5, \quad a_0 = 20$$

By multiplying a row vector $[-10/3 \quad 1 \quad -0.1 \quad 0.01]$ from the left to the Eq. (52), its left hand side vanishes, and an algebraic equation in τ is derived. By solving the equation, $\tau = 2.4248$ is obtained.

Then all the other parameters are determined by Eq. (52). The result is as follows.

$$k_1 = [26.488 \quad 45.496 \quad 20] \quad (53a)$$

$$l_1 = [1.4750 \quad 14.750 \quad 1] \quad (53b)$$

$$a_i = [0.36876 \quad 5.5313 \quad 22.811 \quad 47.037 \\ 48.496 \quad 20] \quad (53c)$$

$$\gamma_i = [3.6371 \quad 2 \quad 2 \quad 2.5] \quad (53d)$$

$$\tau = 2.4248 \quad (53e)$$

$$\gamma_i^* = [0.5 \quad 0.77494 \quad 0.9 \quad 0.5] \quad (53f)$$

$$s_i = -9.9385, \quad -1.3679 \pm j 1.3654, \\ -1.1628 \pm j 0.33004 \quad (53g)$$

$$PM = 45.764 \text{ deg (at } 1.7714 \text{ rad/sec)}$$

The vector values such as k_p, l_p, \dots , are shown in descending order. s_i 's are the closed-loop poles.

In this design, $\gamma_4 = 3.6371$ is different from the standard form, but the controller becomes simpler. The performance characteristics are shown in Fig. 13.

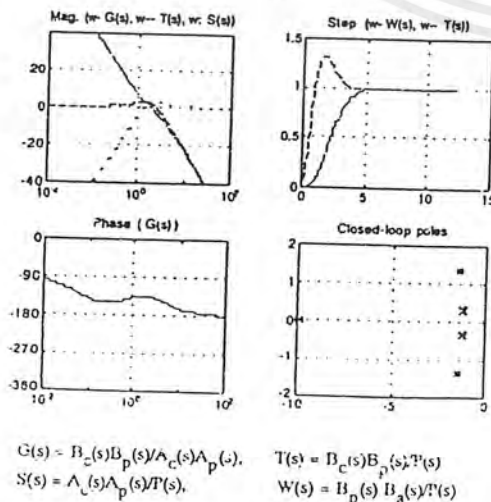


Fig. 13. Performance characteristics

4.4 Summary of Design process

From the design example, the formal statement of the CDM design problem will be summarized as follows;

"Given the plant polynomials, the limitation on the equivalent time constant τ , stability index γ_i , and the controller parameters, find the equivalent time constant τ , the stability index γ_i , the characteristics polynomial $P(s)$, and the controller polynomials, $A_c(s)$, $B_c(s)$ and $B_a(s)$, such that the responses in Eqs. (48b) (48c)(48d) are satisfactory."

The solution process will be as follows;

- (1) Define the plant in the right polynomial form.
- (2) Analyze the performance specifications and derive design specifications for CDM.
- (3) Assume the controller in the simplest possible form. Express it in the left polynomial form.
- (4) Derive the Diophantine equation and solve for unknown variables.
- (5) Make some adjustment to satisfy the performance specification if necessary.

The nature of the problem is to solve the Diophantine equation (51a, b). If a_0, τ , and γ_i are given beforehand, the problem is exactly the same as the pole allocation design problem. The solution is straight forward, but there is no guarantee of robustness. In the CDM, some of these values are to be determined in the course of solution. The knowns and unknowns are mixed in both sides of the equation. The number of unknowns are not necessarily equal to the number of equations. Eqs. (51a, b) are nonlinear. Because of these reasons, the solution is not straight forward.

There are three methods in the solution. The first method is graphical one. When the coefficient diagram for $A_p(s)$ is drawn, the general structure of the controller and the possible range of the equivalent time constant τ can be graphically obtained, after some experience. The second method is to use the special design form. By filling this form systematically, the solution can be obtained by hand calculation. The third method is the computerization of the second method. Special MATLAB M-files have been developed for this purpose.

In the previous example, graphical method was used to evaluate approximate value of τ . Actual design is done by the second method. The third method is much faster and extensively used in actual design.