

การออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞
ROBUST H_∞ CONTROLLER DESIGN



นาย สุเมธ ชาวนไว
MR. SUMET CHAOWAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

เลขหมู่.....สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขทะเบียน.....28895

พ.ศ. 2540

วัน, เดือน, ปี 10 พ.ย. 2540

ISBN 974-621-972-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ROBUST H_∞ CONTROLLER DESIGN



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1997

ISBN 974-621-972-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞
นักศึกษา	นาย สุเมธ เซวานไวย
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. จงกล งามวิวิทย์
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2540

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ เสนอวิธีการออกแบบและสร้างตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ สำหรับระบบเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลง ตัวควบคุมนี้เป็นตัวควบคุมป้อนกลับทางเอาต์พุตที่ถูกออกแบบให้ระบบวงรอบปิดมีเสถียรภาพโรบัสต์เมื่อพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง สามารถกำจัดผลกระทบของสัญญาณรบกวนจากภายนอก ลดทอนสัญญาณเซนเซอร์นอยส์ และทำให้ออฟเซตของระบบชนิด 0 เป็นศูนย์เมื่อมีอินพุตเป็นสัญญาณขั้นบันได ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ นี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมกระบวนการในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมมีสมรรถนะเป็นที่พอใจ เมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงภายในขอบเขตที่กำหนด

Thesis Title	Robust H_∞ Controller Design
Student	Mr. Sumet Chaowai
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jongkol Ngamwiwit
Level of Study	Master of Engineering in Electrical Engineering
Department	Control Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1997

ABSTRACT

This thesis presents the design method and implementation of robust H_∞ controller for linear systems with all parameter uncertainties. The controller is an output feedback controller designed to obtain robust closed-loop stability, disturbance elimination and sensor noise attenuation, and also zero offset when type 0 system has step input. This robust H_∞ controller is applied to control level process in laboratory. The experimental results have shown satisfactory performance for the process under norm-bounded parameter uncertainties.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะว่าผู้วิจัยได้รับความเมตตา
กรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จกมล งามวิวิทย์ ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา
รวมถึงการให้ความสนใจสอบถามถึงความคืบหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้วิจัยมีแรงบันดาลใจ
ในการทำงานอย่างมีระบบและบริหารการใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและ
ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ มิชิฮิโกะ อiidะ (Prof. Michihiko Iida) ผู้เชี่ยวชาญเรื่อง
การควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ จากมหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ที่ได้มาแนะนำแนวทางให้กับ
ผู้วิจัยและให้คำปรึกษาปัญหาต่าง ๆ เสมอมา

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือทั้งหมด
ตลอดจนถึงสถานที่ รวมทั้งการอำนวยความสะดวก จนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น
ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านทุกสถาบัน ที่เคยสอนผู้วิจัย จนสามารถเรียนรู้และสร้างสม
ประสบการณ์มาทำเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เคารพอย่างยิ่ง ที่ให้โอกาสแก่ผู้วิจัย
ได้เล่าเรียนจนถึงวันนี้ ตลอดจนสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุเมธ เซาวน์ไว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่	
1. บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
ขอบเขตของการศึกษา.....	4
รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	5
2. ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞	6
นิยามอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการควบคุม.....	6
เมตริกซ์ถ่ายโอน.....	7
ระบบควบคุมคงค่าแบบดั้งเดิม.....	8
ระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิม.....	10
ระบบควบคุม 2-DOF แบบดั้งเดิม.....	12
ระบบควบคุมที่มีการรบกวนจากภายนอกและเซนเซอร์นอยส์.....	14
ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบ.....	15
3. การออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞	17
โครงสร้างของระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง.....	18
โครงสร้างของระบบไฮโรเกต.....	19
โครงสร้างของระบบไฮโรเกตในรูปอินทิกรัลเซอร์โว.....	19
วิธีการแปลงระบบไฮโรเกตในรูปอินทิกรัลเซอร์โวให้เป็นระบบมาตรฐาน GD	22
การออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞	24

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. การสร้างตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞	28
วงจรถ่ายแปลงสัญญาณแวนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล.....	28
วงจรถ่ายแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแวนะลอก.....	29
วงจรถอดรหัส.....	30
วงจรถ่ายแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า.....	33
แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	37
5. การทดลอง.....	45
การหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิด.....	46
การจำลองระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	52
การควบคุมกระบวนการในเวลาจริง.....	54
สรุปผลการทดลอง.....	65
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก. โปรแกรมสำหรับออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞	72
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞	78
ภาคผนวก ค. โครงสร้างของระบบควบคุม H_∞ ขณะที่พารามิเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง.....	85
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	90
ภาคผนวก จ. การทดสอบประสิทธิภาพในการลดทอนเซนเซอร์นอยส์.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	108

สารบัญญภาพ

	หน้า
1. แสดงแผนภาพบล็อก 2 ทางเข้าออกของการควบคุมแบบ H_∞	7
2. แสดงพลาเน็ตที่แยกออกเป็นส่วน.....	8
3. แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมคงค่าแบบดั้งเดิม.....	9
4. แสดงระบบควบคุมคงค่าแบบดั้งเดิมที่มีการรบกวนจากภายนอก.....	9
5. แสดงระบบควบคุมคงค่าแบบดั้งเดิมในรูป 2 ทางเข้าออก.....	10
6. แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิม.....	11
7. แสดงระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิมในรูป 2 ทางเข้าออก.....	12
8. แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุม 2-DOF แบบดั้งเดิม.....	13
9. แสดงระบบควบคุม 2-DOF แบบดั้งเดิมในรูป 2 ทางเข้าออก.....	13
10. แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมที่มีการรบกวนจากภายนอก และเซนเซอร์น้อยส์.....	14
11. แสดงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์แบบไม่มีโครงสร้าง.....	15
12. แสดงการแยกพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงออกจากพลาเน็ต.....	16
13. แสดงโครงสร้างของระบบเซอร์โวทั่วไป.....	20
14. แสดงระบบอินทิกรัลเซอร์โวเมื่อต่อร่วมกับตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞	22
15. แสดงแผนภาพบล็อกของวิธีการลูบชีพติง.....	24
16. แสดงวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล.....	29
17. แสดงแผนภาพการเชื่อมต่อระหว่างวงจร DAC เข้ากับเครื่อง PC.....	29
18. แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะล็อก.....	30
19. แสดงขาสัญญาณต่าง ๆ ในสล๊อต I/O บนเครื่อง PC.....	31
20. แสดงวงจรถอดรหัสสำหรับวงจร ADC และ DAC.....	33
21. แสดงวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า.....	34
22. แสดงวงจรเทียบเคียงในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีทับซ้อน.....	34
23. แสดงวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า.....	35
24. แสดงการต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์บนแผงวงจร.....	36
25. แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมหลัก.....	37
26. แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย File.....	39

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
27. แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย Setup.....	40
28. แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย Control.....	41
29. แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย Simulation.....	42
30. แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย Special.....	43
31. แสดงแผนภูมิการวาดกราฟผลการตอบสนองของระบบด้วยจอคอมพิวเตอร์.....	44
32. แสดงโครงสร้างของกระบวนการควบคุมระดับน้ำ.....	46
33. แสดงผลการตอบสนองวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีดังเดียว.....	48
34. แสดงผลการตอบสนองวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถึง.....	50
35. แสดงการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล.....	55
36. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีดังเดียว ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞}	56
37. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีดังเดียว ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI.....	56
38. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีดังเดียว ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞}	57
39. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีดังเดียว ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI.....	57
40. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีดังเดียว ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 45 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞}	58
41. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีดังเดียว ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 45 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI.....	58
42. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีดังเดียว ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞} เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก.....	59
43. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีดังเดียว ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก.....	59
44. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถึง ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞}	61

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
45. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI.....	61
46. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞	62
47. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI.....	62
48. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 45 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞	63
49. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 45 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI.....	63
50. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก.....	64
51. แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก.....	64
52. แสดงแผนภาพบล็อกของระบบในรูป 2 ทางเข้าออก.....	86
53. แสดงโครงสร้างของพลาตันในระบบมาตรฐาน GD.....	87
54. แสดงโครงสร้างของตัวควบคุม H_∞	87
55. แสดงโครงสร้างวงรอบปิดของระบบควบคุมแบบ H_∞	88
56. แสดงแผนภาพบล็อกที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการลดทอนเซนเซอร์นอยส์.....	102
57. แสดงการต่ออุปกรณ์ในโปรแกรม Simulink.....	102
58. แสดงเซนเซอร์นอยส์ n ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.1	103
59. แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ เมื่อป้อนอินพุต n ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.1	103
60. แสดงเซนเซอร์นอยส์ n ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.5	104
61. แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ เมื่อป้อนอินพุต n ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.5	104

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
62. แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ ในการจำลองการทำงานของกระบวนการอันดับหนึ่งเมื่อมีการบกวนจากเซนเซอร์นอยส์ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 20	105
63. แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุม PI ในการจำลองการทำงานของกระบวนการอันดับหนึ่งเมื่อมีการบกวนจากเซนเซอร์นอยส์ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 20	106
64. แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ ในการจำลองการทำงานของกระบวนการอันดับสองเมื่อมีการบกวนจากเซนเซอร์นอยส์ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 20	106
65. แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุม PI ในการจำลองการทำงานของกระบวนการอันดับสองเมื่อมีการบกวนจากเซนเซอร์นอยส์ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 20	107

คำย่อและสัญลักษณ์

Δ	หมายถึง การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์
$\Delta a(s)$	หมายถึง การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในรูปการบวก
$\Delta m(s)$	หมายถึง การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในรูปการคูณ
τ	หมายถึง ค่าคงตัวเวลา (<i>time constant</i>)
ε	หมายถึง พารามิเตอร์ที่เลือกเพื่อให้ระบบเสถียรภาพกำลังสอง
γ	หมายถึง สมรรถนะในการลดทอนการรบกวนจากภายนอก
ρ	หมายถึง พารามิเตอร์ที่จะต้องเลือกเพื่อให้ระบบเสถียรภาพกำลังสอง
\in	หมายถึง เป็นสมาชิกของ
$\ T_{zw}\ _{\infty}$	หมายถึง แอมพลิจูดสูงสุดของ Bode Plot ของระบบวงรอบปิดจาก w ไปยัง z
$H_{\infty} \in \text{dom}(\text{Ric})$	หมายถึง H_{∞} มีสมาชิกเป็นโดเมนของสมการริกคาตี
$X_{\infty} = \text{Ric}(H_{\infty})$	หมายถึง ค่า X_{∞} หามาจากการแก้สมการริกคาตี H_{∞}
$J_{\infty} \in \text{dom}(\text{Ric})$	หมายถึง H_{∞} มีสมาชิกเป็นโดเมนของสมการริกคาตี
$Y_{\infty} = \text{Ric}(J_{\infty})$	หมายถึง ค่า Y_{∞} หามาจากการแก้สมการริกคาตี J_{∞}
$\rho(X_{\infty}Y_{\infty})$	หมายถึง ค่าเจาะจง (<i>eigenvalue</i>) ที่มีค่าสูงสุดของ $X_{\infty}Y_{\infty}$
F_{∞}	หมายถึง อัตราขยายของตัวควบคุม (<i>controller gain</i>)
L_{∞}	หมายถึง อัตราขยายของออบเซอร์เวอร์ (<i>observer gain</i>)
$G_{\min}(s)$	หมายถึง ขอบเขตต่ำสุดของพลานต์
$G_{\text{nom}}(s)$	หมายถึง พลานต์ที่ระบุ (<i>nominal plant</i>)
$G_{\max}(s)$	หมายถึง ขอบเขตสูงสุดของพลานต์
1-DOF	หมายถึง ระบบควบคุมที่มีตัวแปรเสรี 1 ตัว
2-DOF	หมายถึง ระบบควบคุมที่มีตัวแปรเสรี 2 ตัว
O_s	หมายถึง ค่าพุ่งเกิน (<i>overshoot</i>)
E_{ss}	หมายถึง ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (<i>steady-state error</i>)
T_r	หมายถึง ช่วงเวลาขึ้น (<i>rise time</i>)
T_s	หมายถึง ช่วงเวลาเข้าที่ (<i>settling time</i>)
T	หมายถึง ค่าคงตัวเวลาที่นำไปออกแบบตัวควบคุม PI
L	หมายถึง เวลาไร้ผลสอง (<i>dead time</i>) ที่นำไปออกแบบตัวควบคุม PI

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป้าหมายสูงสุดของการออกแบบระบบควบคุม คือ การสร้างระบบควบคุมที่สามารถนำไปใช้งานในสิ่งแวดล้อมจริง เพราะว่าสิ่งแวดล้อมรอบตัวนั้นมีองค์ประกอบหลายอย่างที่จะเป็นสาเหตุให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลง เช่น อายุการใช้งานของอุปกรณ์ เมื่อใช้ไปนาน ๆ ประสิทธิภาพในการทำงานก็จะด้อยลงไป อุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลง มีการรบกวนจากภายนอก (*disturbance*) รวมทั้งสัญญาณรบกวนสุ่ม (*random noise*) ที่เข้าสู่ระบบโดยผ่านเซนเซอร์ ซึ่งจะเป็สาเหตุให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพลดลง นอกจากนี้แล้วยังเกิดจากการใช้อุปกรณ์ที่มีความ

เที่ยงตรง (*accuracy*) ต่ำ ผลที่ตามมาคือระบบจะมีพารามิเตอร์ (*parameter*) เปลี่ยนแปลงสูง การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เหล่านี้ไม่สามารถทราบค่าแน่นอนอนได้ เพราะฉะนั้น ระบบควบคุมที่จะออกแบบ จะต้องควบคุมการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ล่วงหน้าได้ด้วย

คุณสมบัติของระบบควบคุมที่สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมในสภาวะความเป็นจริง ซึ่งหมายถึงตัวควบคุมสามารถควบคุมระบบที่มีพารามิเตอร์ของพลานต์ (*plant*) เปลี่ยนแปลงภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ล่วงหน้าได้อย่างเหมาะสม คุณสมบัตินี้ เรียกว่า คุณสมบัติโรบัสต์ (*robustness*) ของระบบควบคุม

ในปี ค.ศ. 1981 G. Zames [1] ได้คิดค้นสูตรของทฤษฎีการควบคุมแบบ H_∞ เป็นครั้งแรก ซึ่งเป็นการออกแบบตัวควบคุมในโดเมนความถี่ (*frequency domain*) ต่อมาในปี ค.ศ. 1987 B. A. Francis [2] ได้เขียนหนังสือแนะนำกระบวนการสังเคราะห์ตัวควบคุม H_∞ ซึ่งยังคงเป็นการออกแบบตัวควบคุมในโดเมนความถี่เช่นกัน แต่เทคนิคในการออกแบบตัวควบคุมที่ได้กล่าวไว้ในหนังสือของ B. A. Francis นั้นได้เปลี่ยนมาใช้สมการรีคาตี (*Riccati*) ซึ่งทำการออกแบบในโดเมนเวลา (*time domain*) งานวิจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุม H_∞ ในโดเมนเวลาและยังคงเป็นต้นแบบมาตลอดจนถึงทุกวันนี้ คือ งานวิจัยของ J. C. Doyle และคณะ [3] ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีนี้จะต้องแปลงระบบให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน GD (Glover-Doyle) ซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานที่ถูกคิดค้นโดย K. Glover และ J. C. Doyle และจะต้องหาค่า γ ที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ $\rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2$ โดยที่ γ เป็นสมรรถนะในการลดทอนสัญญาณรบกวนจากภายนอก $\rho(X_\infty Y_\infty)$ เป็นค่าเจาะจง (*eigenvalue*) ที่มีค่าสูงสุดของ $(X_\infty Y_\infty)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X_{∞} เป็นค่าที่ได้จากการแก้สมการรีกาคติของตัวควบคุม และ Y_{∞} เป็นค่าที่ได้จากการแก้สมการรีกาคติของออบเซอร์เวอร์ (observer) การหาค่า γ ทำได้โดยกำหนดให้ γ มีค่าสูงก่อน แล้วลดค่าลงจนไม่ผ่านเงื่อนไข $\rho(X_{\infty}Y_{\infty}) < \gamma^2$ ต่อมาในปี ค.ศ. 1993 X. P. Li และ B. C. Chang [4] ได้นำเสนออัลกอริทึม (algorithm) สำหรับหาค่า γ อย่างรวดเร็ว ทำให้ประหยัดเวลาในการหาค่า γ อย่างไรก็ตาม การหาค่า γ ด้วยวิธีการข้างต้น ยังไม่สามารถหาค่า γ ได้ตามความต้องการ ดังนั้นค่า γ จึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบ

วิธีการออกแบบตัวควบคุม H_{∞} ที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด ยังไม่ได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ ด้วยข้อจำกัดในการใช้งานในทางปฏิบัติ จึงมีผู้ทำการวิจัยระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง เริ่มจากในปี ค.ศ. 1990 P. P. Khargonegar และคณะ [5] ได้ทำการวิจัยระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง 2 ตัว คือ A, B_2 เปลี่ยนแปลง ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดกำเนิดการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞} ปัญหาเสถียรภาพโรบัสต์ถูกแก้ปัญหาคด้วยวิธีการลีอาปูนอฟ (Lyapunov) ดังนั้นจึงสามารถแก้ปัญหาคด้วยทฤษฎีการควบคุมแบบ H_{∞} ได้ด้วย หลังจากนั้นไม่นาน L. Xie และคณะ [6] ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุมแบบโรบัสต์และการควบคุมแบบ H_{∞} โดยแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เป็นส่วนของการควบคุมแบบโรบัสต์ และการกำจัดเทอมของการรบกวนจากภายนอกเป็นส่วนของการควบคุมแบบ H_{∞} และในงานวิจัยนี้ยังสามารถกำหนดสมรรถนะในการลดทอนการรบกวนจากภายนอก γ ได้ล่วงหน้าภายใต้การเปลี่ยนแปลงภายในขอบเขตที่กำหนด การออกแบบตัวควบคุมเป็นการป้อนกลับทางเอาต์พุต และสุดท้ายในปี ค.ศ. 1994 K. Gu [7] ได้พิจารณาถึงระบบควบคุมแบบโรบัสต์ H_{∞} ที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลง ซึ่งระบบควบคุมแบบโรบัสต์ H_{∞} มีพารามิเตอร์ของพลาเน็ตทั้งหมด 9 ตัว คือ $A, B_1, B_2, C_1, D_{11}, D_{12}, C_2, D_{21}$ และ D_{22}

จากการวิจัยของผู้เขียนพบว่า วิธีการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีข้อจำกัดอยู่ในกรณีที่เป็นระบบเป็นระบบชนิด 0 (type 0 system) เมื่อทำการควบคุมระบบแล้วเอาต์พุตจะไม่เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงที่เป็นอินพุตขั้นบันได (step input) โดยอัตโนมัติ จะต้องมีการปรับแต่งอัตราขยายเพื่อที่จะให้ออฟเซต (offset) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด จากปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ จงกลและคณะ [8] จึงคิดที่จะเพิ่มอินทิเกรเตอร์ (integrator) ให้กับระบบชนิด 0 ที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง 4 ตัว คือ A, B_2, C_2 และ D_{22} จากการเพิ่มอินทิเกรเตอร์นี้ ทำให้ระบบมีโครงสร้างเป็นอินทิกรัลเซอร์โว (integral servo) หรือเซอร์โวชนิด 1 (type 1 servo) ซึ่งการเพิ่มอินทิเกรเตอร์จะทำเฉพาะระบบชนิด 0 เท่านั้น นอกจากนี้แล้วงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นถึงการแยกพารามิเตอร์ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงและพารามิเตอร์ส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงออกจากกัน เรียกกระบวนนี้ว่า ระบบ โซโรเกต (sorogate system) ส่วนระบบโซโรเกตที่เพิ่มอินทิเกรเตอร์ เรียกว่า ระบบโซโรเกตในรูปอินทิกรัล

เซอร์โว และสุดท้ายสุเมธและคณะ [9] ได้ทำการวิจัยเรื่องการควบคุมแบบโรบัสต์ H_{∞} ที่สามารถ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัว สามารถกำหนดระดับการลดทอนการรบกวนจากภายนอกได้ตามต้องการ และทำให้ออฟเซตของระบบชนิด 0 เป็นศูนย์ด้วยโครงสร้างของอินทิกรัลเซอร์โว ซึ่งในการควบคุมแบบ H_∞ นี้มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 9 ตัว ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ในออกแบบตัวควบคุมนั้น จะต้องแปลงระบบไซโรเกตให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน GD ด้วยวิธีการลูบชิฟติง (*loop shifting*) [10,11] เพื่อที่จะได้นำไปออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีการ H_∞ แบบมาตรฐาน [3,12] ซึ่งการออกแบบได้ทำในรูปการป้อนกลับทางเอาท์พุท และแปลงตัวควบคุมกลับไปใช้กับระบบที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลง เมื่อนำตัวควบคุมที่ออกแบบมานี้ไปทดลองควบคุมระบบแล้ว พบว่า เอาท์พุทของระบบลู่เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงเร็วและมีออฟเซตเป็นศูนย์ นอกจากนี้ยังทำให้การรบกวนจากภายนอกลู่เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงเร็วและลดทอนเซนเซอร์นอยส์ (*sensor noise*) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างของระบบควบคุมที่สามารถควบคุมระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัวภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ล่วงหน้าให้มีเสถียรภาพและมีสมรรถนะที่ดี
2. ออกแบบตัวควบคุมที่สามารถควบคุมระบบที่มีการรบกวนจากภายนอก และระบบที่ถูกรบกวนจากเซนเซอร์นอยส์
3. ออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้การตอบสนองของสภาวะคงตัวเข้าสู่สัญญาณอ้างอิง โดยที่ออฟเซตเป็นศูนย์โดยอัตโนมัติ

ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างของระบบที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลง มีการรบกวนจากภายนอก และถูกรบกวนจากเซนเซอร์นอยส์
 2. ศึกษาโครงสร้างของระบบที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลง โดยแยกพารามิเตอร์ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงและส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงออกจากกัน
 3. ศึกษาการเพิ่มอินทิเกรเตอร์เข้าไปในระบบชนิด 0 ที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลง เพื่อแก้ปัญหาออฟเซตของระบบควบคุม
 4. ออกแบบโปรแกรมคำนวณตัวควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ โดยเขียน *toolbox* ให้กับโปรแกรม MATLAB [13,14] สองโปรแกรม คือ โปรแกรม RHICON.M ใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุม
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรอตรหัส และวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า ส่วนโปรแกรมควบคุมระบบ ประกอบไปด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบ เพื่อใช้ทดสอบการทำงานของระบบก่อนนำไปใช้งานจริง และโปรแกรมใช้ควบคุมกระบวนการในห้องปฏิบัติการในเวลาจริง

บทที่ 5 กล่าวถึงการนำเอาเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ที่ได้นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานกับการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีถังเดียวและกรณีสองถัง นอกจากนี้ยังได้ทดลองเชิงเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PI

บทที่ 6 จะเป็นการสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะในการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

ในการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ จะต้องศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของระบบควบคุม เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจโครงสร้างและหลักการทํางานของระบบควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ ในบทนี้กล่าวถึงนิยามอินพุตและเอาต์พุตของระบบควบคุมแบบ H_∞ ซึ่งแสดงให้เห็นแผนภาพบล็อกทั่วไปของการควบคุมแบบ H_∞ ศึกษาโครงสร้างของระบบควบคุมคงค่าแบบดั้งเดิม ระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิม และระบบควบคุม 2-DOF แบบดั้งเดิมที่มีการรบกวนจากภายนอกและเซนเซอร์นอยส์ เรียนรู้วิธีการแปลงระบบควบคุมที่กล่าวมาข้างต้นให้อยู่ในรูป 2 ทางเข้าออก (2 port) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการหาพารามิเตอร์ทุกตัวของพลาเน็ตที่จะนำไปออกแบบตัวควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ นอกจากนี้แล้วยังกล่าวถึงระบบที่มีการรบกวนจากภายนอกและเซนเซอร์นอยส์ วิเคราะห์ผลกระทบของการรบกวนเหล่านี้ที่มีต่อระบบควบคุมและแนวความคิดที่จะจัดการกับการรบกวนเหล่านี้ สุดท้ายกล่าวถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่อาจเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งประกอบไปด้วยการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงแบบมีโครงสร้าง

นิยามอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการควบคุม

นิยามอินพุต

อินพุตของแบบจำลอง (model) เป็นสัญญาณที่อยู่ในรูปเวกเตอร์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ อินพุตจากภายนอกและอินพุตควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 1

1. อินพุตควบคุม (control input) แทนด้วยสัญลักษณ์ u ประกอบด้วยอินพุตของแบบจำลองที่สามารถเปลี่ยนแปลงใหม่ให้เหมาะสมด้วยตัวควบคุม เวกเตอร์ u ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของตัวควบคุม บางครั้งเรียกว่าสัญญาณตัวขับเคลื่อน (actuator signal)

2. อินพุตจากภายนอก (exogenous input) แทนด้วยสัญลักษณ์ w ประกอบไปด้วยสัญญาณอื่น ๆ ที่เข้ามาในแบบจำลองทุกตัว ที่ไม่ใช่เป็นอินพุตควบคุม บางครั้งเรียกว่า อินพุตการรบกวนจากภายนอก (disturbance input)

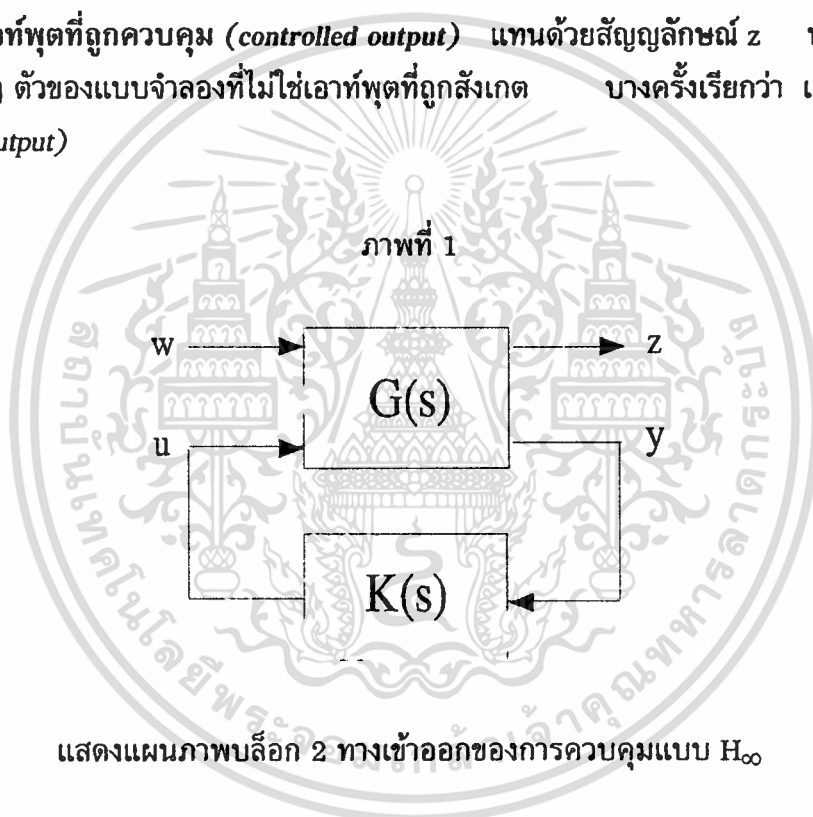
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามเอาต์พุต

เอาต์พุตของแบบจำลองเป็นสัญญาณที่อยู่ในรูปเวกเตอร์ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ เอาต์พุตที่ถูกควบคุม และเอาต์พุตที่ถูกสังเกต ดังแสดงในภาพที่ 1

1. เอาต์พุตที่ถูกสังเกต (*observed output*) แทนด้วยสัญลักษณ์ y ประกอบด้วย เอาต์พุตที่รับเข้าสู่ตัวควบคุม บางครั้งเรียกว่า เอาต์พุตที่วัดได้ (*measured output*) หรือสัญญาณเซนเซอร์ (*sensor signal*)

2. เอาต์พุตที่ถูกควบคุม (*controlled output*) แทนด้วยสัญลักษณ์ z ประกอบด้วย เอาต์พุตทุก ๆ ตัวของแบบจำลองที่ไม่ใช่เอาต์พุตที่ถูกสังเกต บางครั้งเรียกว่า เอาต์พุตคงค่า (*regulated output*)



เมตริกซ์ถ่ายโอน

เมื่อแทนพลาเน็ตด้วยเมตริกซ์ถ่ายโอน (*transfer matrix*) P แล้วเมตริกซ์ถ่ายโอน P แบ่งเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

$$P = \begin{bmatrix} P_{zw} & P_{zu} \\ P_{yw} & P_{yu} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

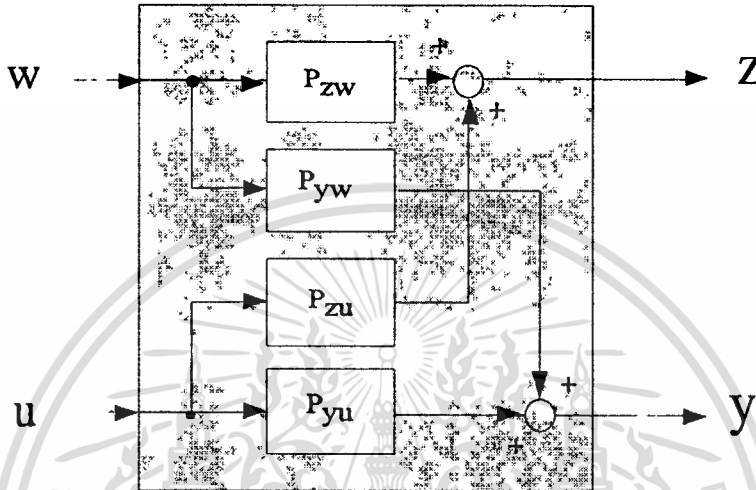
ดังนั้น
$$z = P_{zw} w + P_{zu} u \quad (2.2)$$

$$y = P_{yw} w + P_{yu} u \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ P_{zw} เป็นเมตริกซ์ถ่ายโอนจาก w ไปยัง z P_{zu} เป็นเมตริกซ์ถ่ายโอนจาก u ไปยัง z
 P_{yw} เป็นเมตริกซ์ถ่ายโอนจาก w ไปยัง y และ P_{yu} เป็นเมตริกซ์ถ่ายโอนจาก u ไปยัง y

ภาพที่ 2



แสดงพลานต์ที่แยกออกเป็นส่วน

เมื่อต่อตัวควบคุม $u = Ky$ เข้ากับระบบ โดยที่ K แทนเมตริกซ์ถ่ายโอนของตัวควบคุม
 ดังนั้น z ในเทอมของ w หาได้จาก

$$z = (P_{zw} + P_{zu} K(I - P_{yu} K)^{-1} P_{yw}) \cdot w \quad (2.4)$$

โดยที่ I คือ เมตริกซ์หนึ่งหน่วย (unity matrix)

เมตริกซ์ถ่ายโอนของวงรอบปิด H เป็นเมตริกซ์ถ่ายโอนจาก w ไปยัง z ในขณะที่พลานต์ P
 ต่อกับตัวควบคุม K ดังนั้น

$$z = Hw \quad (2.5)$$

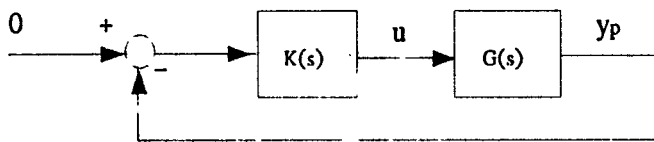
$$\text{เมื่อ} \quad H = P_{zw} + P_{zu} K(I - P_{yu} K)^{-1} P_{yw} \quad (2.6)$$

ระบบควบคุมคงค่าแบบดั้งเดิม

แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมคงค่าแบบดั้งเดิมแสดงดังภาพที่ 3 มีเซนเซอร์และตัว
 ควบคุมระบบเพียงอย่างละตัว โดยให้ $G(s)$ แทนฟังก์ชันถ่ายโอนของพลานต์

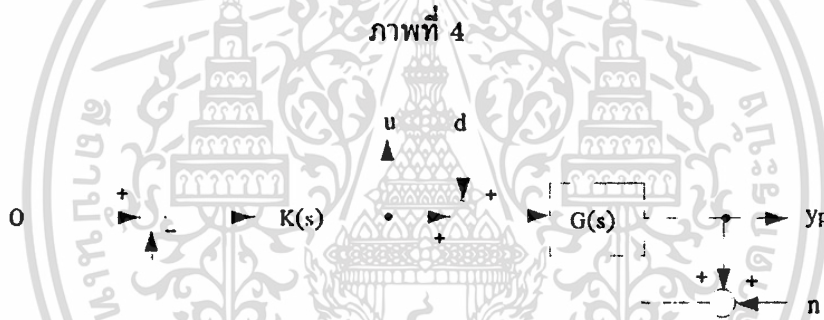
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3



แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมค่าแบบดั้งเดิม

เป้าหมายในการออกแบบให้ระบบควบคุมค่า คือ การทำให้ y_p มีค่าน้อย ๆ และ u ต้องไม่มากเกินไป ทั้ง ๆ ที่ระบบมีการรบกวนจากภายนอกอยู่ ภาพที่ 3 เป็นระบบที่ยังไม่มีการรบกวนจากภายนอก ส่วนระบบที่มีการรบกวนจากภายนอกแสดงดังภาพที่ 4



แสดงระบบควบคุมค่าแบบดั้งเดิมที่มีการรบกวนจากภายนอก

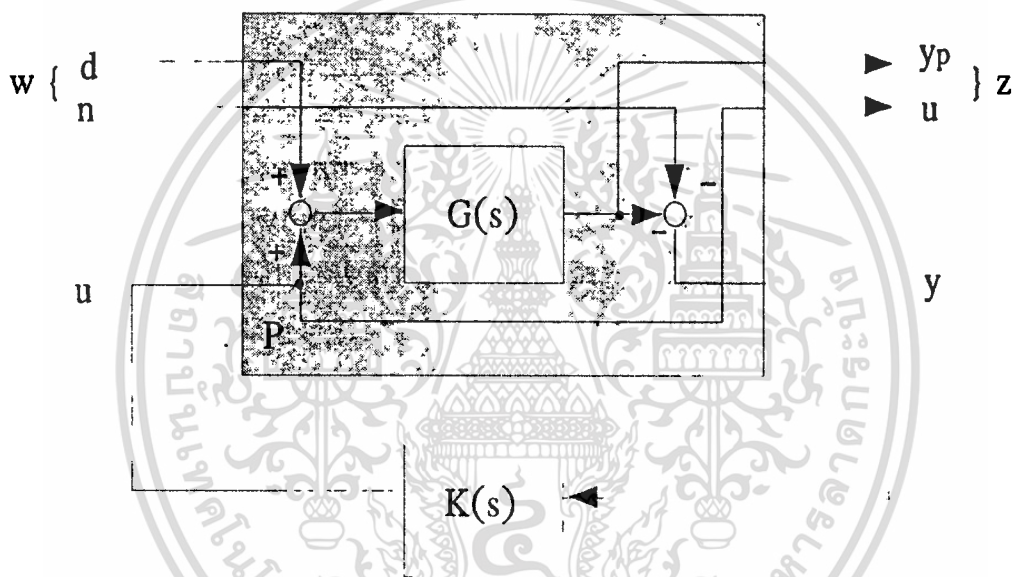
สัญญาณ d เป็นการรบกวนจากภายนอก จะมีผลกับอินพุตเมื่อรวมกับสัญญาณกระตุ้น u ส่วนสัญญาณ n เป็นเซนเซอร์นอยส์ ถึงแม้ว่าสัญญาณนี้จะมีค่าน้อย ๆ แต่ความจริงแล้วสัญญาณเซนเซอร์ ($y_p + n$) จะทำให้ระบบมีความไม่แน่นอนได้ ในระบบควบคุมแบบนี้กำหนดให้อินพุตจากภายนอกมีเวกเตอร์ $w = [d \ n]^T$ และเอาต์พุตที่ถูกควบคุม $z = [y_p \ u]^T$ โดยที่ T แทนเครื่องหมายเมตริกซ์ทรานโพส (transpose matrix) เอาต์พุตของเซนเซอร์มีค่าเท่ากับ $(y_p + n_{\text{sensor}})$ และเมตริกซ์ถ่ายโอนของพลานต์ซนะที่ยังไม่ต่อกับตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

$$P = \begin{bmatrix} P_{zw} & P_{zu} \\ P_{yw} & P_{yu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G(s) & 0 & G(s) \\ 0 & 0 & 1 \\ -G(s) & -1 & -G(s) \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

เมื่อต่อตัวควบคุม K เข้ากับระบบดังแสดงในภาพที่ 4 แล้วแปลงระบบให้อยู่ในรูป 2 ทางเข้าออกได้ดังภาพที่ 5 จากสมการที่ (2.6) สามารถเขียนเมตริกซ์ถ่ายโอน $H(s)$ ของระบบวงรอบปิดจาก w ไปยัง z ได้เป็น

$$H(s) = \begin{bmatrix} \frac{G(s)}{1+G(s)K(s)} & \frac{-G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} \\ \frac{-G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} & \frac{-K(s)}{1+G(s)K(s)} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

ภาพที่ 5



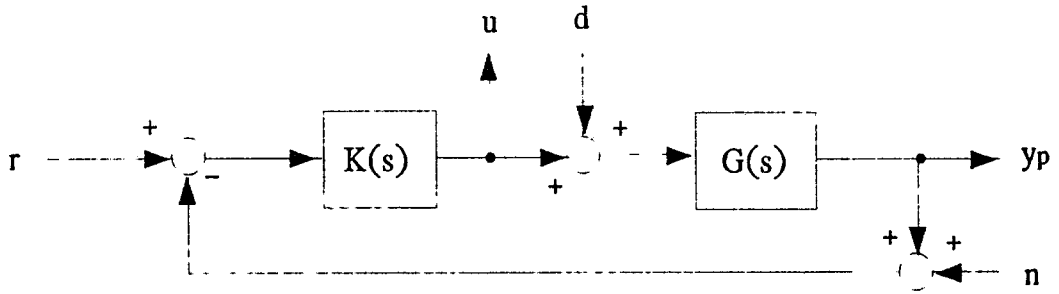
แสดงระบบควบคุมคงค่าแบบดั้งเดิมในรูป 2 ทางเข้าออก

ระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิม

การนำระบบควบคุมคงค่าแบบดั้งเดิม มาขยายการใช้งานเป็นระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิมแสดงดังภาพที่ 6 ระบบนี้จะเพิ่มสัญญาณอ้างอิง r เข้ามาเป็นอินพุตจากภายนอก ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงตามเวลา การควบคุมคงค่าแบบดั้งเดิมก็คือระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิมที่ให้อินพุตอ้างอิงเป็นศูนย์นั่นเอง เป้าหมายในการออกแบบระบบควบคุม 1-DOF คือการทำให้เอาต์พุตของระบบ y_p เข้าสู่สัญญาณอ้างอิง r ถึงแม้ว่าจะมีค่า d และ n อยู่ และสัญญาณ u ต้องมีค่าอัตราขยายไม่มากเกินไป ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของระบบกับสัญญาณอ้างอิง เรียกว่า ค่าผิดพลาดในการติดตาม (*tracking error*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 6



แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิม

ในระบบควบคุมแบบนี้ จะเพิ่มสัญญาณ r ซึ่งเป็นสัญญาณอ้างอิงที่เข้ามารวมกันเป็นอินพุตจากภายนอก w สามารถเขียนได้เป็น $w = [d \ n \ r]^T$ และเอาต์พุตที่ถูกควบคุมจะเหมือนกับการควบคุมคงค่าแบบดั้งเดิม เอาต์พุตที่ถูกสังเกต y ในระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิม จะต้องกำหนดด้วยความระมัดระวัง เพราะว่า y มีค่าเท่ากับค่าผิดพลาดในการติดตาม เขียนสมการได้เป็น

$$y = r - y_p - n \quad (2.9)$$

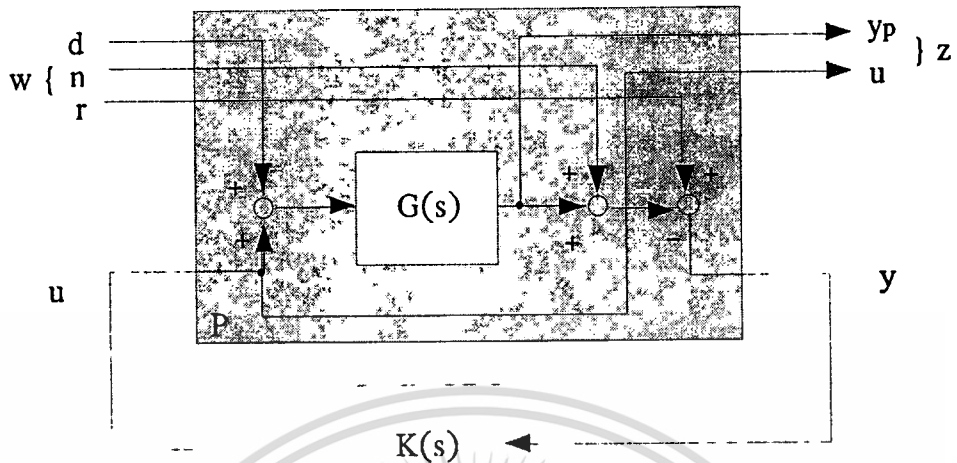
พลาเน็ตของระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิมในรูป 2 ทางเข้าออกดังแสดงในรูปที่ 7 ประกอบด้วย 4 อินพุต และ 3 เอาต์พุต เมตริกซ์ถ่ายโอนของพลาเน็ตที่ยังไม่ต่อตัวควบคุม จะเขียนได้เป็น

$$P = \begin{bmatrix} P_{zw} & P_{zu} \\ P_{yw} & P_{yu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G(s) & 0 & 0 & G(s) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -G(s) & -1 & 1 & -G(s) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

และเมตริกซ์ถ่ายโอน $H(s)$ ของระบบวงรอบปิดดังแสดงในภาพที่ 7 จะเขียนได้เป็น

$$H(s) = \begin{bmatrix} \frac{G(s)}{1+G(s)K(s)} & \frac{-G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} & \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} \\ \frac{-G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} & \frac{-K(s)}{1+G(s)K(s)} & \frac{K(s)}{1+G(s)K(s)} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ภาพที่ 7



แสดงระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิมในรูปแบบ 2 ทางเข้าออก

ระบบควบคุม 2-DOF แบบดั้งเดิม

ระบบควบคุม 2 DOF แบบดั้งเดิมดังแสดงในภาพที่ 8 ต่างจากระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิม คือ ตัวควบคุม $K(s)$ จะทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะสัญญาณผิดพลาดที่ทำให้ระบบเลวลงเท่านั้น แต่ในระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิม ตัวควบคุมจะทำการเปลี่ยนแปลงทั้งอินพุตอ้างอิงและสัญญาณเออร์รอร์ที่ทำให้ระบบเลวลง อินพุตจากภายนอก w และเออร์รอร์ที่ถูกควบคุม z ของการควบคุมแบบนี้เหมือนกับระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิม แต่เออร์รอร์ที่ถูกสังเกตของระบบควบคุม 2-DOF แบบดั้งเดิม จะแตกต่างจากระบบควบคุม 1-DOF แบบดั้งเดิม เขียนได้เป็น

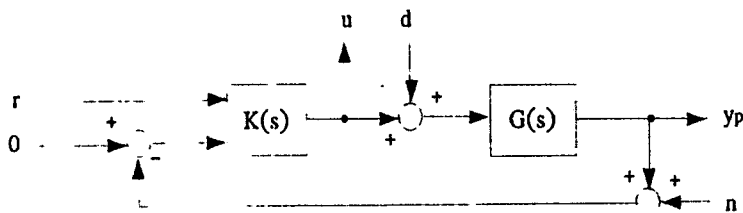
$$y = \begin{bmatrix} -y_p \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{y} \\ r \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

ระบบควบคุม 2-DOF แบบดั้งเดิมในรูปแบบ 2 ทางเข้าออกดังภาพที่ 9 นั้น ในส่วนของพลานต์จะประกอบด้วย 4 อินพุต และ 4 เออร์รอร์ เมตริกซ์ถ่ายโอนของพลานต์ขณะที่ยังไม่ต่อตัวควบคุม เขียนได้เป็น

$$P = \begin{bmatrix} P_{zw} & P_{zu} \\ P_{yw} & P_{yu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G(s) & 0 & 0 & G(s) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -G(s) & -1 & 0 & -G(s) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 8

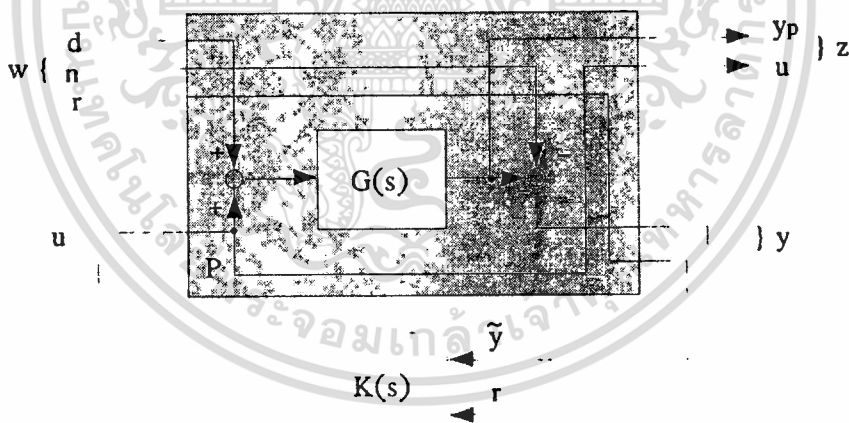


แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุม 2-DOF แบบดั้งเดิม

เมื่อต่อตัวควบคุม $K(s)$ ซึ่งมี 2 อินพุตและ 1 เอาท์พุต เข้าไปในระบบควบคุม 2-DOF แบบดั้งเดิม แล้วจะได้ระบบวงรอบปิดแสดงดังภาพที่ 9 และตัวควบคุม $K(s)$ เขียนได้เป็น

$$K(s) = \begin{bmatrix} K_y & K_r \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

ภาพที่ 9



แสดงระบบควบคุม 2-DOF แบบดั้งเดิมในรูปแบบ 2 ทางเข้าออก

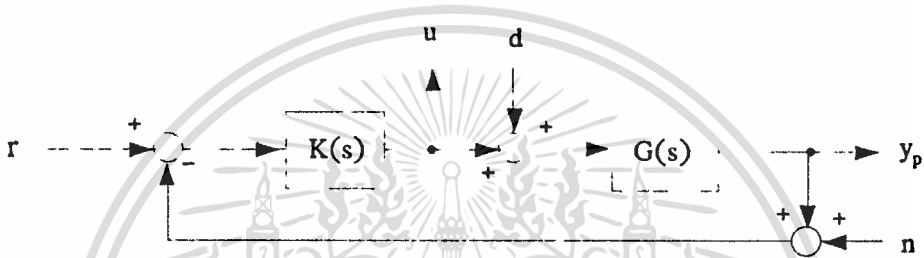
เมตริกซ์ถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด $H(s)$ ของระบบควบคุมแบบนี้จะเขียนได้เป็น

$$H(s) = \begin{bmatrix} \frac{G(s)}{1+G(s)K_y(s)} & \frac{-G(s)K_y(s)}{1+G(s)K_y(s)} & \frac{G(s)K_r(s)}{1+G(s)K_y(s)} \\ \frac{-G(s)K_y(s)}{1+G(s)K_y(s)} & \frac{-K_y(s)}{1+G(s)K_y(s)} & \frac{K_r(s)}{1+G(s)K_y(s)} \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

ระบบควบคุมที่มีการรบกวนจากภายนอกและเซนเซอร์นอยส์

ในการป้อนกลับของระบบควบคุมดังภาพที่ 10 มี $r(s)$ เป็นอินพุตคำสั่งหรืออินพุตอ้างอิง $d(s)$ เป็นอินพุตที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอก อาจจะเป็นอินพุตที่รู้ค่าหรือไม่รู้ก็ได้ เป็นสิ่งที่ต้องกำจัดออกไปจากระบบ ซึ่งปกติเป็นความถี่ต่ำ และ $n(s)$ เป็นเซนเซอร์นอยส์ ปกติเป็นความถี่สูงที่มีความถี่ไม่แน่นอน

ภาพที่ 10



แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมที่มีการรบกวนจากภายนอกและเซนเซอร์นอยส์

และมีเอาต์พุต $y(s)$ เป็น

$$y_p(s) = \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} r(s) + \frac{G(s)}{1+G(s)K(s)} d(s) - \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} n(s) \quad (2.16)$$

การตอบสนองอินพุตคำสั่งจะมีเอาต์พุต $y(s) = r(s)$ เมื่อกำหนดให้ $d(s)$ และ $n(s)$ เท่ากับ ศูนย์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการที่ (2.16) แล้วพบว่า $y_p(s) = r(s)$ เมื่อ $G(s)K(s)$ จะต้องมีค่ามาก ๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอินพุตคำสั่งจะมีความถี่ต่ำ ดังนั้นจึงไม่มีผลกระทบเซนเซอร์นอยส์ $n(s)$ เพราะ $n(s)$ เป็นสัญญาณรบกวนสุ่มที่มีความถี่สูง

เซนเซอร์นอยส์ โดยทั่วไปแล้วเป็นสัญญาณรบกวนสุ่มความถี่สูง ดังนั้นการที่จะทำให้ $n(s)$ มีผลต่อเอาต์พุตน้อยที่สุดจะต้องทำให้ $G(s)K(s)$ มีค่าน้อย ๆ ที่ความถี่สูง เพื่อลดผลการรบกวนจากเซนเซอร์นอยส์เหล่านี้

ในการลดทอนสัญญาณรบกวนจากภายนอก $d(s)$ จะต้องทำให้ $G(s)K(s)$ มีค่าสูง ๆ ที่ความถี่ต่ำ เพราะว่าที่ความถี่ต่ำ $n(s)$ มีค่าน้อยมาก ดังนั้นการทำให้ $G(s)K(s)$ มีค่าสูง ๆ ที่ความถี่ต่ำจึงไม่มีผลกับเซนเซอร์นอยส์ $n(s)$

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบ

การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบ โดยทั่วไปแล้วแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การเปลี่ยนแปลงแบบมีโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีโครงสร้าง

การเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีโครงสร้าง

การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์แบบนี้ ผู้ออกแบบตัวควบคุมจะรู้ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงนี้น้อยมาก หรืออาจจะไม่รู้เลย ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุม จะต้องกำหนดขอบเขตทางความถี่ไว้ล่วงหน้า การเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีโครงสร้างนี้สามารถจำลองได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. การเปลี่ยนแปลงในรูปการบวก (*additive uncertainty*) กำหนดให้ $G(s)$ เป็นแบบจำลองของระบบ แต่ระบบในความเป็นจริงคือ

$$\tilde{G}(s) = G(s) + \Delta_a(s) \quad (2.17)$$

ค่าผิดพลาดของแบบจำลองหรือการเปลี่ยนแปลงในรูปการบวกหาได้จาก

$$\tilde{\Delta}_a(s) = \tilde{G}(s) - G(s) \quad (2.18)$$

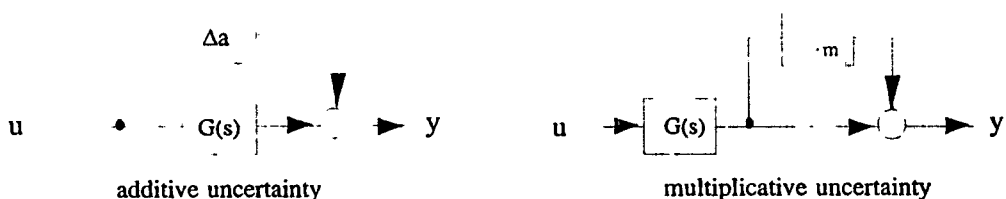
2. การเปลี่ยนแปลงในรูปการคูณ (*multiplicative uncertainty*) ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงในรูปการคูณมีรูปแบบของระบบในความเป็นจริงคือ

$$\tilde{G}(s) = (1 + \Delta_m(s)) \cdot G(s) \quad (2.19)$$

ค่าผิดพลาดของแบบจำลอง หรือการเปลี่ยนแปลงในรูปการคูณหาได้จาก

$$\Delta_m(s) = \frac{\tilde{G}(s) - G(s)}{G(s)} \quad (2.20)$$

ภาพที่ 11



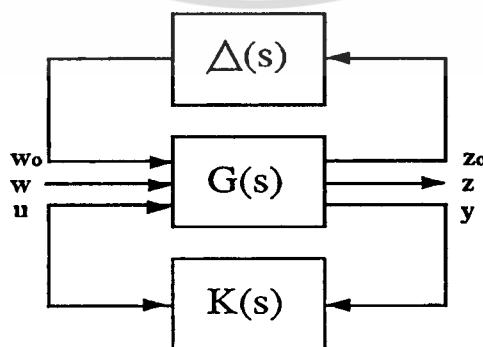
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้แสดงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์แบบไม่มีโครงสร้างไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงแบบมีโครงสร้าง

การเปลี่ยนแปลงแบบมีโครงสร้างนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงภายในพิสัย (*range*) หรือ ขอบเขต (*norm*) ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เช่น การเปลี่ยนแปลงอัตราขยายของระบบ ตำแหน่งโพล (*pole*) หรือซีโร (*zero*) ของพลานต์ เปลี่ยนแปลงจากตำแหน่งเดิมของพลานต์ที่ระบุ (*nominal plant*) วงจรไฟฟ้า RLC มีค่าความต้านทานหรือค่าเก็บประจุ ผิดพลาดจากเดิม 20–30%

ในทางปฏิบัติข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทั้งสองชนิดนี้ คือ การเปลี่ยนแปลงแบบมีโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีโครงสร้าง หาได้จากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของพลานต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเขียนระบบในรูปสเปซสเตต (*state space*) จะเห็นการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในพิสัยที่กำหนดไว้ล่วงหน้าได้อย่างชัดเจน ในขณะที่เดียวกันก็ไม่สามารถรู้ข้อมูลที่แม่นยำได้ เพราะว่ามีบางสิ่งที่ไม่สามารถเขียนแบบจำลองได้ เช่น สัญญาณรบกวน (*noise*) เป็นต้น ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีโครงสร้างนี้จึงไม่สามารถหารายละเอียดได้ทั้งหมด แต่สามารถเขียนการเปลี่ยนแปลงทั้งสองชนิดนี้ให้รวมกันแสดงดังภาพที่ 12 ซึ่งจะเห็นว่าพลานต์มีอินพุต 3 ชุด และเอาต์พุต 3 ชุด อินพุตชุดแรกเป็นสัญญาณควบคุมแทนด้วย u อินพุตชุดที่สองเป็นสัญญาณจากภายนอกทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบประกอบไปด้วย การรบกวนจากภายนอก เช่น เซอร์นอยส์ และอินพุตอ้างอิง อินพุตชุดนี้แทนด้วย w ส่วนเอาต์พุตชุดแรกเป็นเอาต์พุตทั้งหมดที่วัดได้แล้วป้อนกลับไปให้ตัวควบคุม แทนด้วยสัญญาณลักษณะ y เอาต์พุตส่วนที่สองเป็นเอาต์พุตที่ต้องการควบคุม ซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณที่ไม่สามารถวัดได้จากจุดต่างๆ ในพลานต์ แทนด้วยสัญญาณลักษณะ z ส่วนอินพุตและเอาต์พุตชุดที่สามแทนด้วยสัญญาณลักษณะ w_0 และ z_0 ตามลำดับ สัญญาณในชุดที่สามนี้เป็นอินพุตและเอาต์พุตของพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งสองชนิดที่แยกจากพลานต์มาเขียนใหม่เป็น $\Delta(s)$

ภาพที่ 12



แสดงการแยกพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงออกจากพลานต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

ในบทนี้จะนำความรู้ที่ได้ศึกษามาทั้งหมด นำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลง ระบบที่มีการรบกวนจากภายนอกและสัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์นอยส์และระบบที่มีปัญหาเรื่องออฟเซต โดยในแต่ละส่วนแยกมาพิจารณาได้ดังนี้ คือ ส่วนแรกเป็นการควบคุมแบบโรบัสต์ ในส่วนนี้จะทำหน้าที่เกี่ยวกับการจัดการพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยการกำหนดขอบเขตที่ต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงไว้ล่วงหน้า เมื่อมีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงภายในขอบเขตที่กำหนด ตัวควบคุมจะต้องควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดี ส่วนที่สองเป็นการควบคุมแบบ H_∞ ในส่วนนี้เป็นการควบคุมการรบกวนจากภายนอกและสัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์นอยส์ เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก ตัวควบคุมจะต้องทำให้ส่วนที่มีการรบกวนนั้นเข้าสู่ศูนย์ให้เร็วที่สุดหรือมีผลกับเอาต์พุตน้อยที่สุด และเมื่อมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนความถี่สูงแบบสุ่มที่เกิดจากเซนเซอร์นอยส์ ตัวควบคุมจะต้องลดทอนการรบกวนนี้ให้มีผลกับเอาต์พุตน้อยที่สุด เพื่อลดการแกว่งทางเอาต์พุต ส่วนสุดท้ายเป็นการควบคุมแบบอินทิกรัลเซอร์โว ในส่วนนี้จะทำหน้าที่แก้ปัญหออฟเซตของระบบควบคุมเมื่อระบบเป็นระบบชนิด 0

รายละเอียดของบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้างของระบบเชิงเส้น ที่พารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงทุกตัว พารามิเตอร์ที่กล่าวถึงนี้เป็นตัวแปรมาตรฐานของการควบคุมแบบ H_∞ มีทั้งหมด 9 ตัว คือ $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}$ และ D_{22} ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดหาได้จากระบบในรูป 2 ทางเข้าออก ระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงนี้ สามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงและส่วนที่พารามิเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเรียกระบบที่ถูกแยกพารามิเตอร์ออกเป็น 2 ส่วน นี้ว่า ระบบโซโรเกต สำหรับระบบที่เป็นระบบชนิด 0 จะมีปัญหาเรื่องการตอบสนองที่สภาวะคงตัวไม่เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงโดยอัตโนมัติ ดังนั้น ปัญหานี้แก้ไขได้โดยการเพิ่มอินทิเกรเตอร์เข้าไปในระบบ ซึ่งจะทำให้ระบบมีโครงสร้างเป็นอินทิกรัลเซอร์โวหรือระบบชนิด 1 ระบบโซโรเกตที่เพิ่มโครงสร้างของอินทิเกรเตอร์นี้ เรียกว่า ระบบโซโรเกตใหญ่อินทิกรัลเซอร์โว ส่วนระบบชนิด 1 และระบบชนิด 2 ไม่ต้องเพิ่มอินทิเกรเตอร์ให้กับระบบ ระบบโซโรเกตยังไม่สามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมแบบ H_∞ ได้โดยตรง ดังนั้นต้องแปลงระบบให้เป็นระบบมาตรฐาน GD ก่อนด้วยโปรแกรม SSG2GD.M ที่ได้เขียนขึ้นดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก. ระบบมาตรฐาน GD เป็นระบบที่รู้จักกันดีในงานออกแบบตัวควบคุม H_∞ เป็นโครงสร้างที่คิดค้นโดย K. Glover และ J. C. Doyle เมื่อแปลงระบบอยู่ในรูประบบมาตรฐาน GD แล้วก็สามารถนำไปออกแบบตัวควบคุม H_∞ [3,12] ดังวิธีการของ J. C. Doyle และคณะ หลังจากได้ตัวควบคุม H_∞ สำหรับระบบมาตรฐาน GD แล้ว จะต้องแปลงตัวควบคุมของระบบ มาตรฐาน

- GD กลับไปเป็นตัวควบคุมของระบบเดิม เพื่อความสะดวกในการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞
- ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรม RHICON.M ไว้ในภาคผนวก ก. ใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุม การใช้งานโปรแกรมนี้จะต้องแปลงระบบให้อยู่ในรูปมาตรฐาน GD ก่อนด้วยโปรแกรม SSG2GD.M ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก. เช่นกัน

โครงสร้างของระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง

ระบบเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัว เขียนเป็นสมการในรูปสเตตสเปซได้ดังนี้

$$\dot{x}(t) = \{A + \Delta A(t)\}x(t) + \{B_1 + \Delta B_1(t)\}w(t) + \{B_2 + \Delta B_2(t)\}u(t) \quad (3.1)$$

$$z(t) = \{C_1 + \Delta C_1(t)\}x(t) + \{D_{11} + \Delta D_{11}(t)\}w(t) + \{D_{12} + \Delta D_{12}(t)\}u(t) \quad (3.2)$$

$$y(t) = \{C_2 + \Delta C_2(t)\}x(t) + \{D_{21} + \Delta D_{21}(t)\}w(t) + \{D_{22} + \Delta D_{22}(t)\}u(t) \quad (3.3)$$

เมื่อ $x(t) \in R^n$ เป็นเวกเตอร์ของสแตต
 $u(t) \in R^m$ เป็นเวกเตอร์ของอินพุตควบคุม
 $w(t) \in R^q$ เป็นเวกเตอร์ของการรบกวนจากภายนอก
 $y(t) \in R^f$ เป็นเวกเตอร์ของเอาต์พุตที่ถูกสังเกต
 $z(t) \in R^p$ เป็นเวกเตอร์ของเอาต์พุตที่ถูกควบคุม
 $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}$ และ D_{22} เป็นเมตริกซ์จำนวนจริงที่เป็นค่าคงที่ที่มีมิติเหมาะสม ส่วน $\Delta A(t), \Delta B_1(t), \Delta B_2(t), \Delta C_1(t), \Delta D_{11}(t), \Delta D_{12}(t), \Delta C_2(t), \Delta D_{21}(t)$ และ $\Delta D_{22}(t)$ เป็นฟังก์ชันของเมตริกซ์จำนวนจริงที่มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงตามเวลาและกำหนดให้มีโครงสร้างดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta A(t) & \Delta B_1(t) & \Delta B_2(t) \\ \Delta C_1(t) & \Delta D_{11}(t) & \Delta D_{12}(t) \\ \Delta C_2(t) & \Delta D_{21}(t) & \Delta D_{22}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} F(t) \cdot [E_1 \quad E_2 \quad E_3] \quad (3.4)$$

เมื่อ $H_1 \in R^{n \times i}$, $H_2 \in R^{p \times i}$, $H_3 \in R^{f \times i}$, $E_1 \in R^{j \times n}$, $E_2 \in R^{j \times q}$ และ $E_3 \in R^{j \times m}$ เป็นเมตริกซ์ค่าคงที่ที่รู้ค่า แสดงในรูปของขนาด และ $F(t) \in R^{i \times j}$ เป็นฟังก์ชันเมตริกซ์ที่ไม่รู้ค่าและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ภายใต้เงื่อนไข

$$F^T(t) \cdot F(t) \leq \rho^2 I \quad (3.5)$$

ซึ่งได้แสดงไว้ในงานวิจัยของ L. Xie และคณะ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของระบบไฮโรเกต

สำหรับระบบชนิด 1 และระบบชนิด 2 ที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง ดังสมการที่ (3.1) - (3.3) สามารถเขียนสมการเทียบเคียงนิพจน์ของระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงในรูปป้อนกลับได้เป็นเมตริกซ์ 2 ส่วน คือ ส่วนที่พารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงและส่วนที่พารามิเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเรียกระบบในรูปนี้ว่า ระบบไฮโรเกต เขียนเป็นสมการใหม่ได้เป็น

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \begin{bmatrix} \sqrt{\epsilon}\rho H_1 & \gamma^{-1}B_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + B_2 u(t) \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} z_0(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ \sqrt{\epsilon} \\ C_1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & \frac{E_2}{\sqrt{\epsilon}} \\ \sqrt{\epsilon}\rho H_2 & \gamma^{-1}D_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_3 \\ \sqrt{\epsilon} \\ D_{12} \end{bmatrix} u(t) \quad (3.7)$$

$$y(t) = C_2 x(t) + \begin{bmatrix} \sqrt{\epsilon}\rho H_3 & \gamma^{-1}D_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + D_{22} u(t) \quad (3.8)$$

โดยที่ $\gamma > 0$ เป็นสมรรถนะในการลดทอนการรบกวนจากภายนอก
 $\epsilon > 0$ เป็นพารามิเตอร์ที่เลือกเพื่อให้ระบบเสถียรภาพกำลังสอง (*quadratic stability*)
 $\rho > 0$ เป็นค่าที่ต้องกำหนดเพื่อให้ได้ค่า γ ตามที่ต้องการ
 $w_0(t)$ เป็นการรบกวนจากภายนอกที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงในรูปการป้อนกลับ

โครงสร้างของระบบไฮโรเกตในรูปอินทิกรัลเซอร์โว

สำหรับระบบชนิด 0 จะต้องเพิ่มอินทิเกรเตอร์เข้าไปในระบบเพื่อแก้ไขปัญหาออฟเซต เริ่มจากแนวความคิดของการออกแบบเซอร์โวให้กับระบบในรูปสเตตสเปซทั่วไป ที่ไม่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง ที่เขียนสมการได้ดังนี้

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.9)$$

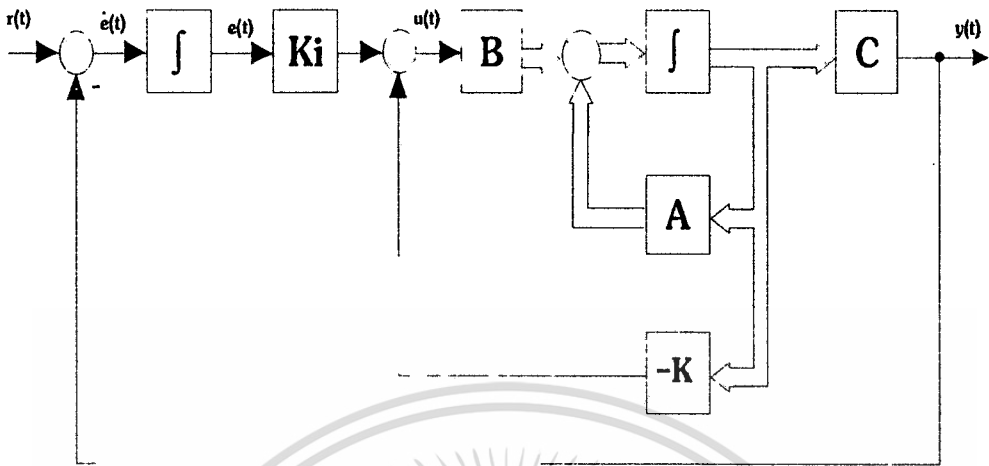
$$y = Cx(t) \quad (3.10)$$

และจะได้เป็นระบบเซอร์โวที่ไม่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงดังภาพที่ 13 ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 13



แสดงโครงสร้างของระบบเซอร์โวทั่วไป

เมื่อนำสมการของระบบชนิด 0 ที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัว ดังสมการที่ (3.1)-(3.3) แทนลงในสมการที่ (3.11) แล้วจะได้โครงสร้างของระบบเซอร์โวที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัวดังภาพที่ 14 และเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + \Delta A(t) & 0 \\ -\{C_2 + \Delta C_2(t)\} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 + \Delta B_1(t) \\ -\{D_{21} + \Delta D_{21}(t)\} \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} B_2 + \Delta B_2(t) \\ -\{D_{22} + \Delta D_{22}(t)\} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \quad (3.12)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} C_1 + \Delta C_1(t) & C_+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} + \Delta D_{11} \\ D_{12} + \Delta D_{12} \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} D_{12} + \Delta D_{12} \end{bmatrix} u(t) \quad (3.13)$$

$$y_+(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + D_+ w_+(t) \quad (3.14)$$

โดยที่ $y_+(t)$ เป็นเอาต์พุตที่เกิดจากการรวมเอาต์พุตของอินทิเกรเตอร์กับเอาต์พุตของการรบกวนจากภายนอก $w_+(t)$ และ $w_+(t)$ เป็นอินพุตจากภายนอก ส่วน C_+ และ D_+ เป็นค่าคงที่จำนวนจริงที่ต้องกำหนดโดยผู้ออกแบบ โดยปกติแล้วกำหนดให้มีค่าน้อย ๆ เพื่อที่จะทำให้อเอาต์พุตของตัวควบคุมมีอัตราขยายไม่สูงเกินไป และเมื่อกำหนดให้ $y^*(t) = y_+(t)$ จะได้ระบบโซโรเกตของสมการที่ (3.12) - (3.14) เช่นเดียวกับงานวิจัยของสุเมธและคณะ [9] เขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{x}^*(t) = A^* x^*(t) + B_1^* w^*(t) + B_2^* u(t) \quad (3.15)$$

$$\dot{z}^*(t) = C_1^* x^*(t) + D_{11}^* w^*(t) + D_{12}^* u(t) \quad (3.16)$$

$$\dot{y}^*(t) = C_2^* x^*(t) + D_{21}^* w^*(t) + D_{22}^* u(t) \quad (3.17)$$

โดยที่ตัวแปรและสัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์มีค่าดังนี้

$$x^*(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}; \quad z^*(t) = \begin{bmatrix} z_0(t) \\ z(t) \end{bmatrix}; \quad w^*(t) = \begin{bmatrix} w_0(t) \\ w(t) \\ w_+(t) \\ r(t) \end{bmatrix};$$

$$A^* = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C_2 & 0 \end{bmatrix}; \quad B_1^* = \begin{bmatrix} \sqrt{\varepsilon\rho}H_1 & \gamma^{-1}B_1 & 0 & 0 \\ -\sqrt{\varepsilon\rho}H_3 & -\gamma^{-1}D_{21} & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$B_2^* = \begin{bmatrix} B_2 \\ -D_{22} \end{bmatrix}; \quad C_1^* = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{\sqrt{\varepsilon}} & 0 \\ C_1 & C_+ \end{bmatrix};$$

$$D_{11}^* = \begin{bmatrix} 0 & \frac{E_2}{\sqrt{\varepsilon}} & 0 & 0 \\ \sqrt{\varepsilon\rho}H_2 & \gamma^{-1}D_{11} & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad D_{12}^* = \begin{bmatrix} \frac{E_3}{\sqrt{\varepsilon}} \\ D_{12} \end{bmatrix};$$

$$C_2^* = [0 \quad 1]; \quad D_{21}^* = [0 \quad 0 \quad D_+ \quad 0]; \quad D_{22}^* = 0$$

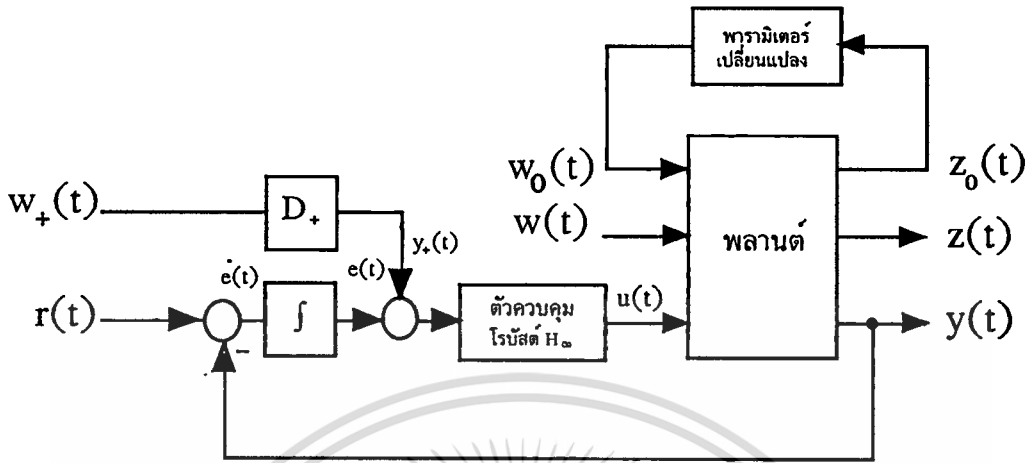
ระบบที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลงดังสมการที่ (3.1) – (3.3) จะมีเสถียรภาพกำลังสองและลดทอนการรบกวนจากภายนอกให้มีค่าน้อยกว่า γ เมื่อมีเมตริกซ์ P สอดคล้องกับเงื่อนไข

$$\text{ก) } [A + \Delta A(t)]^T P + P[A + \Delta A(t)] < 0$$

โดยที่ P สมมาตรและเป็นบวก (*symmetric positive definite*)

$$\text{ข) } \left\| (C_1 + \Delta C_1(t)) \{sI - (A + \Delta A(t))\}^{-1} (B_1 + \Delta B_1(t)) \right\|_{\infty} < \gamma$$

ภาพที่ 14

แสดงระบบอินทิกรัลเซอร์โวเมื่อต่อร่วมกับตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

การออกแบบตัวควบคุม $K(s)$ ให้กับระบบไซโรเกตในรูปอินทิกรัลเซอร์โว ดังสมการที่ (3.15) - (3.17) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ Σ จะทำให้ระบบวงรอบปิดจาก w' ไปยัง z' แทนด้วย $FI(\Sigma, K; z', w') < \gamma$ มีเสถียรภาพกำลังสองและลดทอนการรบกวนจากภายนอก ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นและยังทำให้ระบบวงรอบปิดมีออฟเซตเป็นศูนย์ ดังนั้น ตัวควบคุม $K(s)$ ที่หาได้นี้ จะทำให้ระบบวงรอบปิดของระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัวดังสมการที่ (3.1) - (3.3) มีเสถียรภาพกำลังสอง และลดทอนการรบกวนจากภายนอก จาก w ไปยัง z มีค่าน้อยกว่า γ หรือแทนด้วยสัญลักษณ์ $FI(\Sigma, K; z, w) < \gamma$ สำหรับทุก ๆ ค่าของพารามิเตอร์ที่ยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้เงื่อนไขสมการที่ (3.5) ด้วย

วิธีการแปลงระบบไซโรเกตในรูปอินทิกรัลเซอร์โวให้เป็นระบบมาตรฐาน GD

เนื่องจากระบบไซโรเกตดังสมการที่ (3.15)-(3.17) ยังไม่เป็นระบบมาตรฐาน GD จึงต้องแปลงระบบให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน GD ด้วยวิธีการลูปีพิตติง ซึ่งจะต้องแปลง D'_{12} และ D'_{21} ให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน GD ทำได้โดยวิธีแยกค่าซิงกูลาร์ (singular value decomposition) ดังแสดงในสมการ (3.18) และสมการ (3.19)

$$D^*_{12} = U_{12} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Sigma_{12} \end{bmatrix} V_{12}^T \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{12}^T \cdot U_{12} = I; \quad V_{12}^T \cdot V_{12} = I$$

$$D_{21}^* = U_{21} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & \Sigma_{21} \end{bmatrix} \cdot V_{21}^T \quad (3.19)$$

$$U_{21}^T \cdot U_{21} = I; \quad V_{21}^T \cdot V_{21} = I$$

และแปลงตัวแปรทั้งหมดให้อยู่ในรูปมาตรฐาน GD ได้ดังนี้

$$w^*(t) = V_{21} \cdot w_1^*(t) \quad (3.20)$$

$$u(t) = V_{12} \Sigma_{12}^{-1} \cdot u_1(t) \quad (3.21)$$

$$z_1^*(t) = U_{12}^T \cdot z^*(t) \quad (3.22)$$

$$y_1^*(t) = \Sigma_{21}^{-1} \cdot U_{21}^T \cdot y(t) \quad (3.23)$$

ระบบโซโรเกตในรูปอินทิกรัลเซอร์โวดังสมการที่ (3.15)-(3.17) เมื่อแปลงเป็นระบบมาตรฐาน GD ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ Σ_1 เขียนได้เป็น

$$\dot{x}^*(t) = A^* x^*(t) + B_1^{\#} w_1^*(t) + B_2^{\#} u_1(t) \quad (3.24)$$

$$z_1^*(t) = C_1^{\#} x^*(t) + D_{11}^{\#} w_1^*(t) + D_{12}^{\#} u_1(t) \quad (3.25)$$

$$y_1^*(t) = C_2^{\#} x^*(t) + D_{21}^{\#} w_1^*(t) \quad (3.26)$$

โดยที่

$$B_1^{\#} = B_1^* \cdot V_{21};$$

$$B_2^{\#} = B_2^* \cdot V_{12} \cdot \Sigma_{12}^{-1};$$

$$C_1^{\#} = U_{12}^T \cdot C_1^*;$$

$$C_2^{\#} = \Sigma_{21}^{-1} \cdot U_{21}^T \cdot C_2^*$$

$$D_{11}^{\#} = U_{12}^T \cdot D_{11}^* \cdot V_{21};$$

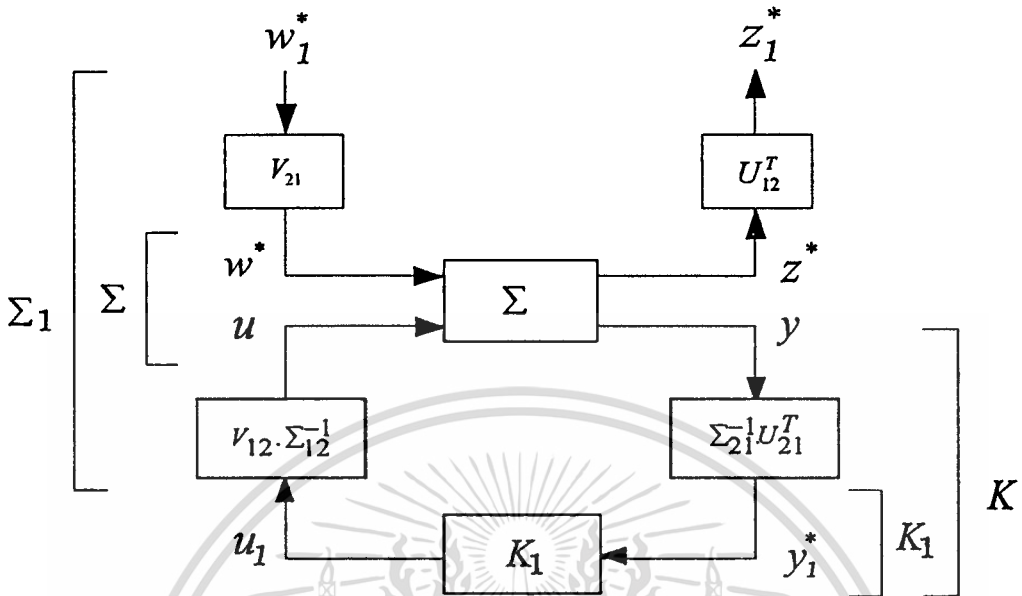
และ

$$D_{12}^{\#} = U_{12}^T \cdot D_{12}^* \cdot \Sigma_{12}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I \end{bmatrix};$$

$$D_{21}^{\#} = \Sigma_{21}^{-1} \cdot U_{21}^T \cdot D_{21}^* \cdot V_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 15



แสดงแผนภาพบล็อกของวิธีการลูบซิปติง
การออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

ในการออกแบบตัวควบคุม H_∞ จะออกแบบโดยใช้สมการริคคาดี ให้ A , Q และ R เป็นเมตริกซ์จำนวนจริงขนาด $n \times n$ โดยที่ $Q \geq 0$ และ $R > 0$ เป็นเมตริกซ์สมมาตร ดังนั้นจึงสามารถหาค่าเมตริกซ์แฮมิลตันเนียน (Hamiltonian Matrix) ขนาด $2n \times 2n$ ได้เป็น

$$H = \begin{bmatrix} A & R \\ -Q & -A^T \end{bmatrix}$$

กำหนดให้ H ไม่มีค่าเจาะจง (eigenvalue) อยู่บนแกนเชิงซ้อน ดังนั้นเมตริกซ์ H จึงมีค่าเจาะจงอยู่ที่ $\text{Re } s < 0$ จำนวน n ตัว และ $\text{Re } s > 0$ จำนวน n ตัว

นิยามที่ 3.1 กำหนดให้ $H \in \text{dom}(\text{Ric})$ และ $X = \text{Ric}(H)$ ดังนั้น

- ก) X เป็นเมตริกซ์สมมาตร
- ข) X จะต้องสอดคล้องกับสมการริคคาดี $A^T X + XA + XRX + Q = 0$
- ค) $A + RX$ เสถียรภาพ

นิยามที่ 3.2 กำหนดให้ H ไม่มีค่าเจาะจงอยู่บนแกนเชิงซ้อน R เป็น positive semidefinite

หรือ negative semidefinite และ (A, R) เสถียรภาพ ดังนั้น $H \in \text{dom}(\text{Ric})$

นิยามที่ 3.3 กำหนดให้ H อยู่ในรูปแบบ

$$H = \begin{bmatrix} A & R \\ -Q & -A^T \end{bmatrix}$$

โดยที่ (A, B) เสถียรภาพได้ (*stabilizable*), (C, A) ตรวจสอบได้ (*detectable*), $H \in \text{dom}(\text{Ric})$ และ $X = \text{Ric}(H) \geq 0$ และก่อนที่จะออกแบบตัวควบคุม $K_1(s)$ ที่ทำให้ค่านอร์มของระบบวงรอบปิดจาก w_1^* ไปยัง z_1^* มีค่าน้อยกว่า γ ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ $\|Tz_1^* w_1^*\|_\infty < \gamma$ จะต้องตรวจสอบระบบมาตรฐาน GD ของสมการที่ (3.24)-(3.26) ให้ผ่านเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ขนาดเมตริกซ์ของระบบ

จำนวนแถวบน (row) ของ $A = n$ ($n =$ มิติของ x)

จำนวนแถวตั้ง (column) ของ $B_1^\# = m_1$ ($m_1 =$ มิติของ $w_1^\#$)

จำนวนแถวตั้งของ $B_2^\# = m_2$ ($m_2 =$ มิติของ u_1)

จำนวนแถวบนของ $C_1^\# = p_1$ ($p_1 =$ มิติของ $z_1^\#$)

จำนวนแถวตั้งของ $C_2^\# = p_2$ ($p_2 =$ มิติของ $y_1^\#$)

2. $(A, B_2^\#)$ เสถียรภาพได้

$(C_2^\#, A)$ ตรวจสอบได้

3. แรงค์ (rank) ของ $D_{12}^\# = m_2$

แรงค์ของ $D_{21}^\# = p_2$

4. แรงค์ $\begin{bmatrix} A^* - j\omega I & B_2^\# \\ C_1^\# & D_{12}^\# \end{bmatrix} = n + m_2$; $\forall \omega > 0$

5. แรงค์ $\begin{bmatrix} A^* - j\omega I & B_1^\# \\ C_2^\# & D_{21}^\# \end{bmatrix} = n + p_2$; $\forall \omega > 0$

ข้อกำหนดที่ 2 ทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าตัวควบคุมยังคงเสถียร ส่วนข้อกำหนดที่ 4 และ 5 ทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าผลลัพธ์จากการแก้สมการริคคาตีมีเสถียรภาพ หลังจากตรวจสอบเงื่อนไขผ่านแล้ว จึงพิจารณาสมการริคคาตีของตัวควบคุมและออกแบบเซอร์เวอร์ดังสมการที่ (3.27) และ (3.28) ตามลำดับ

$$A^* Y_\infty + Y_\infty A^* + Y_\infty (\gamma^{-2} C_1^\# C_1^\# - C_2^\# C_2^\#) Y_\infty + B_1^\# B_1^\#{}^T = 0 \quad (3.27)$$

$$A^* X_\infty + X_\infty A^* + X_\infty (\gamma^{-2} B_1^\# B_1^\#{}^T - B_2^\# B_2^\#{}^T) X_\infty + C_1^\# C_1^\#{}^T = 0 \quad (3.28)$$

โดยที่ X_∞ และ Y_∞ เป็นผลลัพธ์จากการแก้สมการ (3.27) และสมการ (3.28) ซึ่งมีค่าดังนี้
 เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น มิใช่เผยแพร่สู่สาธารณะในด้านการค้า
 ไม่ว่าการณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_\infty = \text{Ric} \begin{bmatrix} A^* & \gamma^{-2} B_1^\# B_1^{\#T} & -B_2^\# B_2^{\#T} \\ -C_1^\# C_1^{\#T} & & -A^* \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$Y_\infty = \text{Ric} \begin{bmatrix} A^* & \gamma^{-2} C_1^\# C_1^{\#T} & -C_2^\# C_2^{\#T} \\ -B_1^\# B_1^{\#T} & & -A^* \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

ตัวควบคุมจะนำมาใช้งานได้และมีค่า $\|Tz_1^* w_1^*\|_\infty < \gamma$ เมื่อผ่านเงื่อนไขเหล่านี้

ก) $H_\infty \in \text{dom}(\text{Ric})$ และ $X_\infty = \text{Ric}(H_\infty) \geq 0$

ข) $J_\infty \in \text{dom}(\text{Ric})$ และ $Y_\infty = \text{Ric}(J_\infty) \geq 0$

ค) $\rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2$

โดยที่

H_∞ คือ สมการที่เขียนอยู่ในรูปสมการริคคาติของตัวควบคุม

J_∞ คือ สมการที่เขียนอยู่ในรูปสมการริคคาติของออบเซอร์เวอร์

X_∞ คือ ผลลัพธ์จากการแก้สมการริคคาติของตัวควบคุม

Y_∞ คือ ผลลัพธ์จากการแก้สมการริคคาติของออบเซอร์เวอร์

$\rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2$ คือ ค่าเจาะจงที่มีค่าสูงสุดของ $(X_\infty Y_\infty)$

เมื่อตรวจสอบเงื่อนไขข้อ ก. ถึง ค. ผ่านแล้ว ตัวควบคุม H_∞ สำหรับระบบมาตรฐาน GD สามารถออกแบบได้เช่นเดียวกับระบบควบคุมแบบ H_∞ ของระบบที่ไม่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ค. ซึ่งคำนวณตัวควบคุมได้จากสมการที่ (3.31)

$$K_1(s) = \begin{bmatrix} \hat{A}_\infty & -Z_\infty L_\infty \\ F_\infty & 0 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

โดยที่

$$\hat{A}_\infty = A^* + \gamma^{-2} B_1^\# B_1^{\#T} X_\infty + B_2^\# F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2^\#$$

$$F_\infty = -B_2^\# X_\infty$$

$$L_\infty = -Y_\infty C_2^\# T$$

$$Z_\infty = (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1}$$

เมื่อ F_∞ เป็นอัตราขยายของตัวควบคุม

L_∞ เป็นอัตราขยายของออบเซอร์เวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคำนวณตัวควบคุม $K_1(s)$ แล้ว จะได้ตัวควบคุมสำหรับระบบมาตรฐาน GD (Σ_1) และจะต้องแปลงตัวควบคุม $K_1(s)$ ให้เป็นตัวควบคุม $K(s)$ เพื่อนำไปใช้กับระบบเดิมดังภาพที่ 15 ซึ่งมีขั้นตอนการแปลงดังนี้

$$K(s) = V_{12} \cdot \Sigma_{12}^{-1} \cdot K_1(s) \cdot \Sigma_{21}^{-1} \cdot U_{21}^T \quad (3.32)$$

การออกแบบตัวควบคุมในส่วนนี้สามารถออกแบบด้วยโปรแกรม RHICON.M ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

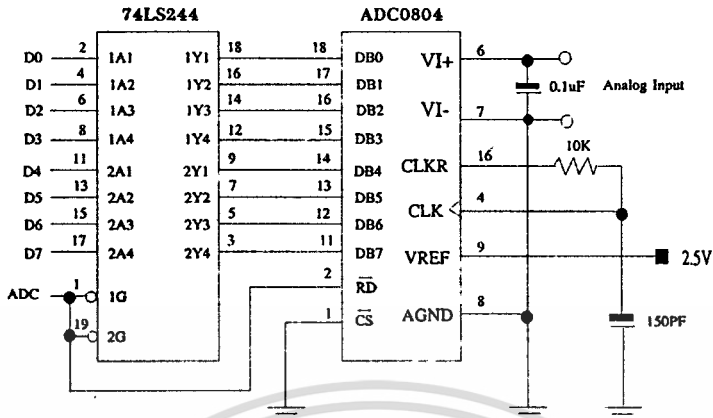
การสร้างตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞}

ในบทนี้เป็นการสร้างตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞} เพื่อนำมาใช้จำลองการทำงานของระบบและทดลองควบคุมระบบในห้องปฏิบัติการ การสร้างตัวควบคุมนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ส่วนของฮาร์ดแวร์เป็นวงจรรีเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เชื่อมโยงอุปกรณ์ภายนอกเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) และเป็นตัวส่งสัญญาณควบคุมให้กับระบบ ซึ่งประกอบไปด้วยการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D converter) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้า 1 - 5 โวลต์ ที่วัดได้จากอุปกรณ์เซนเซอร์ให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปป้อนกลับให้กับระบบ วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (D/A converter) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมแบบโรบัสต์ H_{∞} เพื่อนำไปควบคุมระบบ วงจรถอดรหัสทำหน้าที่แจ้งที่อยู่ (address) ของอุปกรณ์ภายนอกที่ต้องการติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า (V/I converter) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้า 1-5 โวลต์เป็นกระแสไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์ เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมในกระบวนการต้องการอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 4-20 มิลลิแอมป์ ในส่วนของซอฟต์แวร์เป็นการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้ในการควบคุม ถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรมภาษาซีบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพื่อทำหน้าที่ 2 ประการ คือ การจำลองการทำงานของระบบควบคุมวงรอบปิดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการควบคุมระบบในห้องปฏิบัติการ ในการออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมนี้อาจใช้หลักการออกแบบให้มีเมนูแบบดึงลง (pull down) เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน แล้วแบ่งโปรแกรมออกเป็นฟังก์ชันย่อย เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจและแก้ไขได้ง่าย

วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ในการทดลองในการวิจัย เป็นวงจรแปลงที่มีความละเอียด (resolution) ขนาด 8 บิต (bit) วงจรส่วนนี้ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าที่วัดมาได้จากตัวเซนเซอร์ ซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีค่าแรงดันไฟฟ้า 1-5 โวลต์ เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อนำไปเป็นสัญญาณป้อนกลับให้กับระบบควบคุมแบบโรบัสต์ H_{∞} รายละเอียดของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 16

ภาพที่ 16

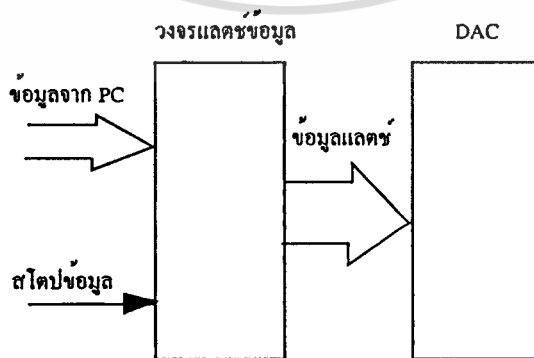


แสดงวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก

วงจรในส่วนนี้จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ ซึ่งเป็นสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณแอนะล็อก เพื่อนำไปควบคุมระบบ แต่การออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ออกแบบตัวควบคุมในโดเมน s ดังนั้นจะต้องมีการแปลงตัวควบคุมไปเป็นโดเมน z ก่อน เมื่อแปลงตัวควบคุมให้อยู่ในรูปโดเมน z แล้วก็สามารถแปลงให้อยู่ในรูป $y[nT]$ หรือเป็นเอาต์พุตในรูปดิจิทัลที่เวลา n เท่าของเวลาซีกตัวอย่าง (*sampling time*)

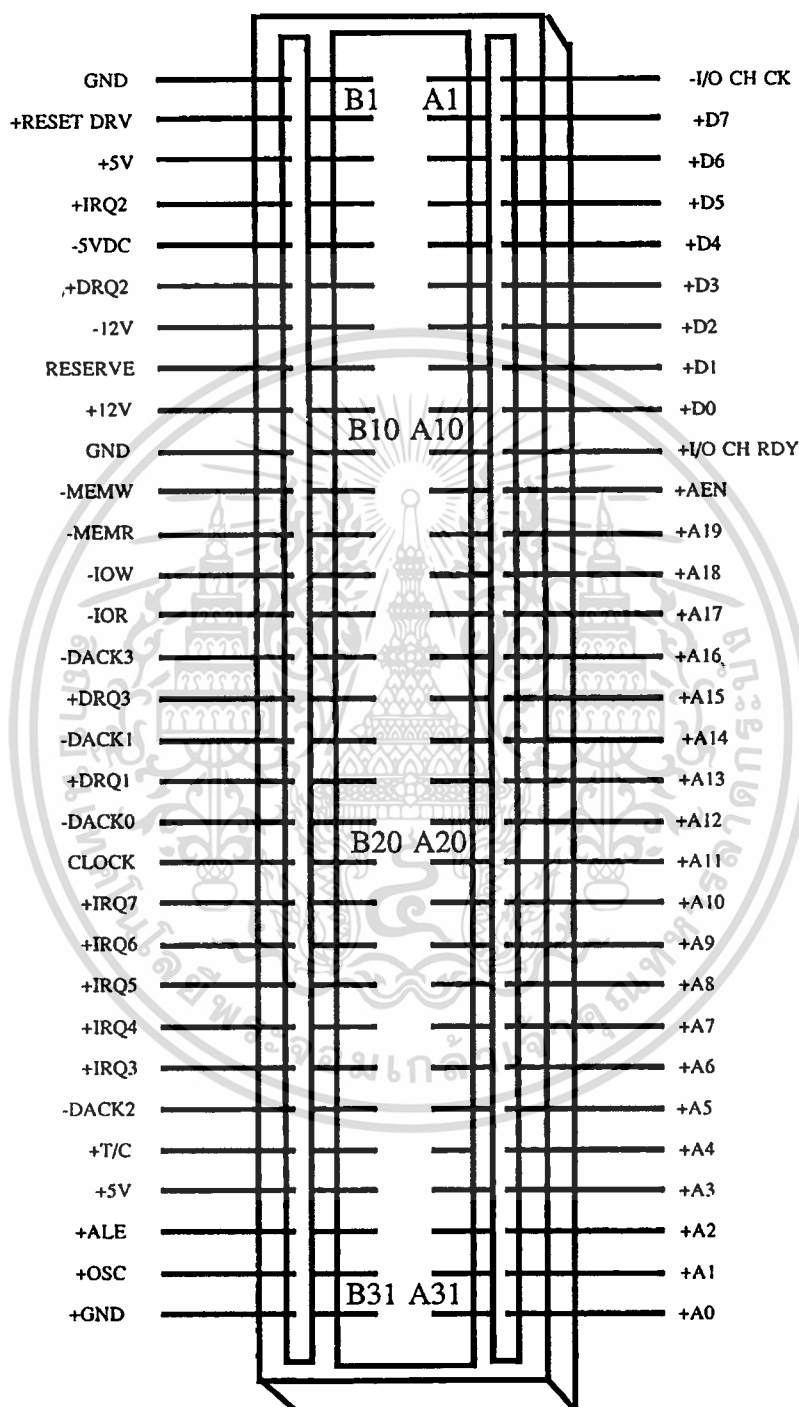
ภาพที่ 17



แสดงแผนภาพการเชื่อมต่อระหว่างวงจร DAC เข้ากับเครื่อง PC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 19



แสดงขาสัญญาณต่าง ๆ ในสล๊อต I/O บนเครื่อง PC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

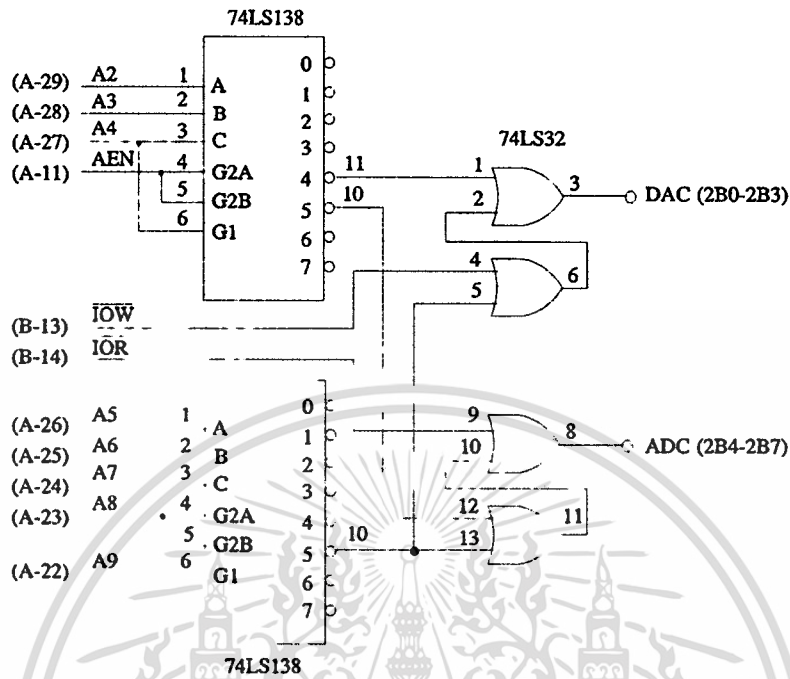
ตารางที่ 1

แสดงการจัดสรรตำแหน่งที่อยู่ที่ใช้ติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกบนเครื่อง PC

เลขฐานสิบหก	9 8	7 6 5 4	3 2 1 0	อุปกรณ์ I/O
00-FF	0 0	0 0 0 Z	A3 A2 A1 A0	DMA CHIP B237-2
20-21	0 0	0 0 1 Z	Z Z Z A0	INTERRUPT 8259A
40-43	0 0	0 1 0 Z	Z Z A1 A0	TIMER 8253-5
60-63	0 0	0 1 1 Z	Z Z A1 A0	PPI 8255A-5
80-83	0 0	1 0 0 Z	Z Z A1 A0	DMA PAGE REGS
AX	0 0	1 0 1		NMI MASK REG
CX	0 0	1 1 0		RESERVED
EX		1 1 1		RESERVED
38F-3FF	1 1	1 1 1 1	1 A2 A2 A0	TP RS-232-C CD
3F0-3F7	1 1	1 1 1 1	0 A2 A1 A0	5 _{1/4} DRV ADAPTOR
2F8-2FF	1 0	1 1 1 1	1 Z A1 A0	RESERVED
378-37F	1 1	0 1 1 1	1 Z A1 A0	PARALLEL PRTR PRT
3D0-3DF	1 1	1 1 0 1	A3 A2 A1 A0	COLOR/GRAPHICS ADAPTER
278-27F	1 0	0 1 1 1	1 Z A1 A0	RESERVED
200-20F	1 0	0 0 0 0	A3 A2 A1 A0	GAME I/O ADAPTER
3B0-3BF	1 1	1 0 1 1	A3 A2 A1 A0	IBM MONOCHOME DISPLAY PARALLEL PRINTER ADAPTER

ในกรณีที่มีการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอก จะต้องมีการถอดรหัสตำแหน่งที่อยู่ให้หมายเลขแก่อุปกรณ์ภายนอกตัวนั้น การถอดรหัสจะต้องไม่ซ้ำซ้อนกับตำแหน่งที่อยู่ที่ใช้สื่อสารกับอุปกรณ์ตัวอื่น จากรายละเอียดในตารางที่ 1 พบว่าตำแหน่งที่อยู่ในช่วง 2B0-2BF (เลขฐานสิบหก) ไม่ได้ใช้งาน จึงสามารถถอดรหัสตำแหน่งที่อยู่ในช่วงดังกล่าวมาใช้เชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกซึ่งเป็นวงจร ADC และวงจร DAC เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลออกและนำข้อมูลเข้าได้ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เลือกใช้ 2B0 สำหรับวงจร DAC และ 2B4 สำหรับวงจร ADC ซึ่งมีรายละเอียดการต่อวงจรแสดงดังภาพที่ 20

ภาพที่ 20



แสดงวงจรถอดรหัสสำหรับวงจร ADC และ DAC

วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า

วงจรขยายความแตกต่างแรงดันไฟฟ้างแสดงในภาพที่ 21 ค่าความต้านทาน R_1 , R_2 , R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากันทั้งหมด ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้างภาพที่ 21 ใช้วิธีการทับซ้อน (superposition) ดังภาพที่ 22 ซึ่งจะได้

$$V_{out} = V_L + e_2 - e_1$$

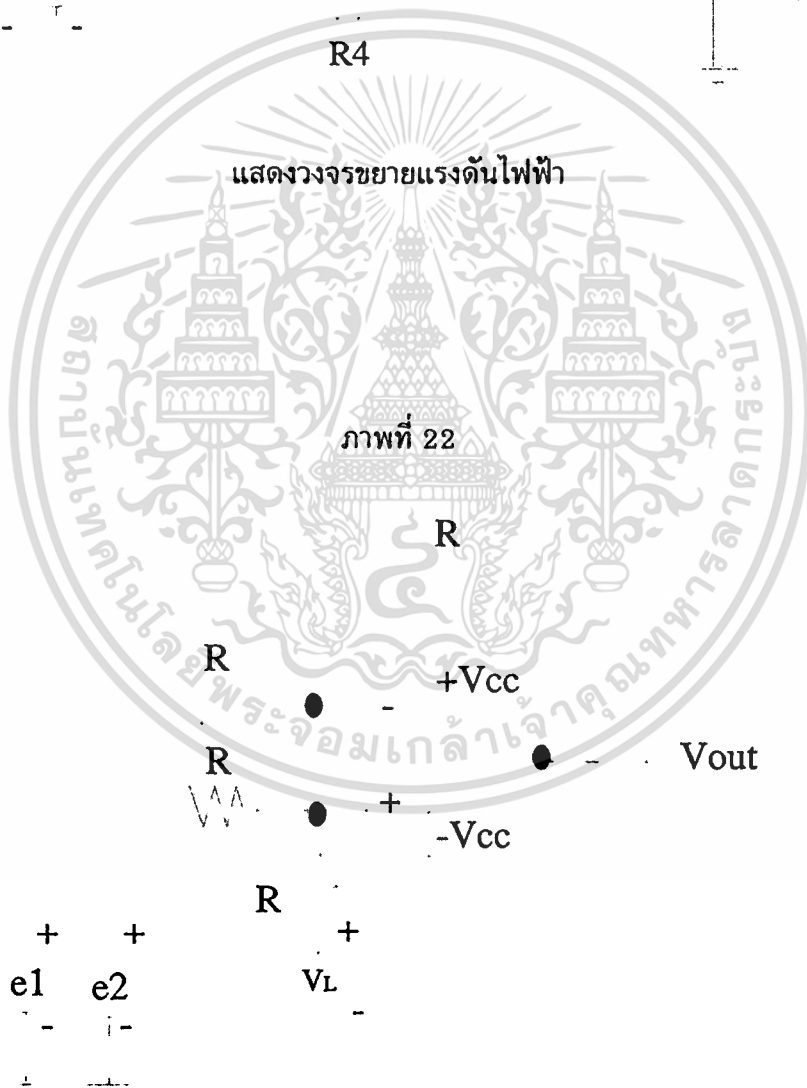
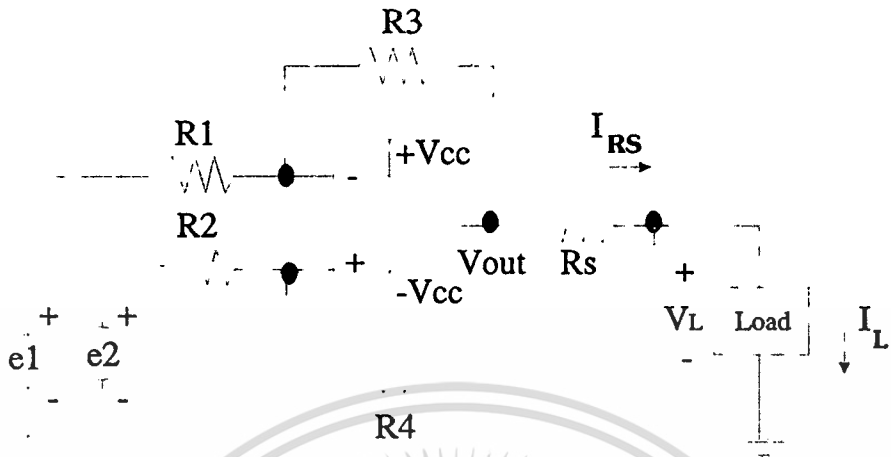
จากภาพที่ 21 แรงดันตกคร่อม R_s คือ

$$\begin{aligned} V_{RS} &= V_{out} - V_L \\ &= (V_L - e_1 - e_2) - V_L \\ &= e_2 - e_1 \end{aligned}$$

และมีกระแสที่ไหลผ่าน R_s คือ $I_{RS} = \frac{V_{RS}}{R_s}$ และ $I_L = I_{RS} = \frac{e_2 - e_1}{R_s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 21



แสดงวงจเทียบเคียงในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีการทับซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้าที่นำไปใช้จริงแสดงดังภาพที่ 23 ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ต้องการแปลงแรงดันไฟฟ้า 1-5 โวลต์เป็นกระแสไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์ ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

$$I_L = \frac{e_2 - e_1}{R_s}$$

$$e_2 = e_{in}$$

$$I_L \cdot R_s = e_{in} - e_1$$

$$\text{ที่ } e_{in} = 1 \text{ V ; } I_L = 4 \text{ mA}$$

$$(4\text{mA}) \cdot R_s = 1\text{V} - e_1 \quad (4.6)$$

$$\text{ที่ } e_{in} = 5 \text{ V ; } I_L = 20 \text{ mA}$$

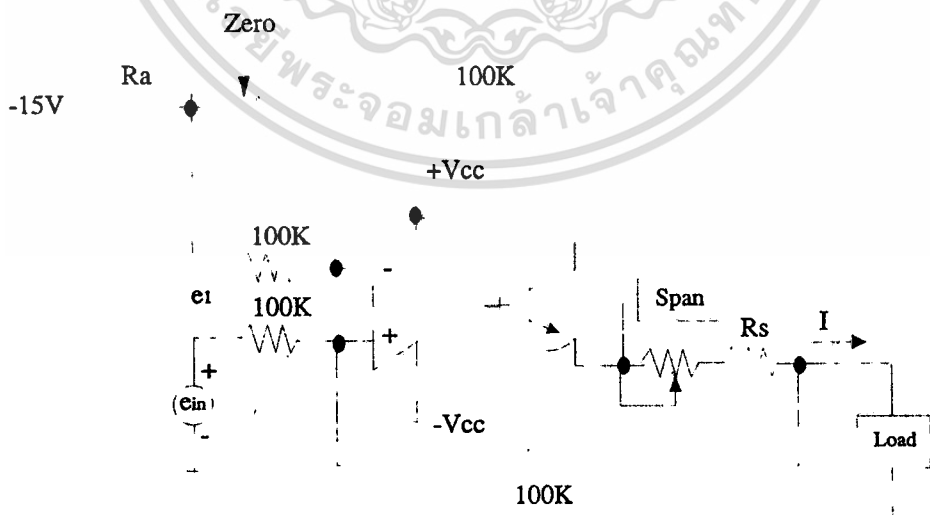
$$(20\text{mA}) \cdot R_s = 5\text{V} - e_1 \quad (4.7)$$

แทนค่าในสมการ (4.6) ลงในสมการ (4.7) จะได้

$$(20\text{mA})(R_s) = 5\text{V} - 1\text{V} + (4\text{mA}) \cdot R_s$$

$$R_s = 250\Omega$$

แทนค่า R_s ลงในสมการที่ (4.6) จะได้ $e_1 = 0$

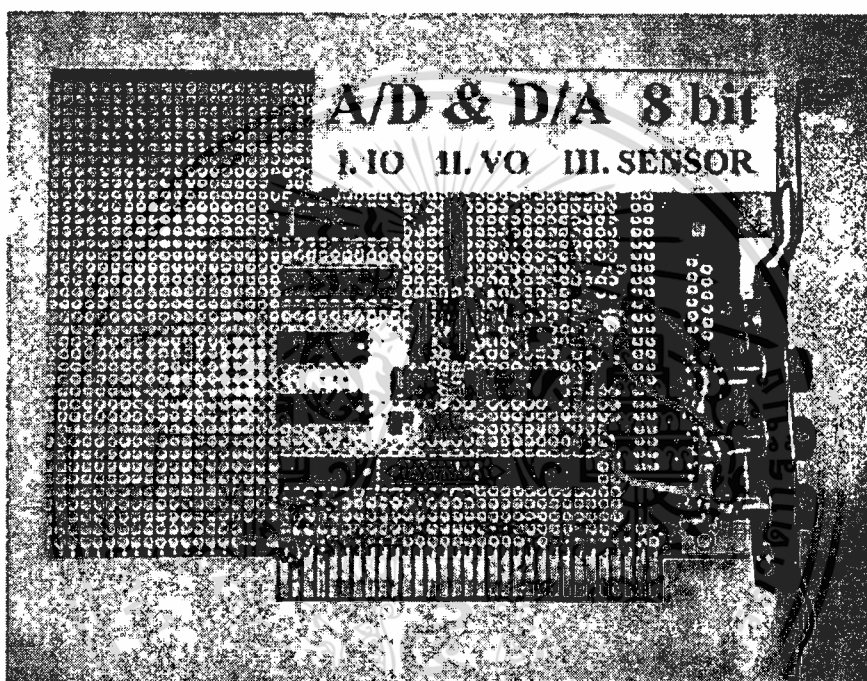


แสดงวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ออกแบบมาทั้งหมดประกอบไปด้วย วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อก เป็นสัญญาณดิจิทัล วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก วงจรถอดรหัส และ วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า สามารถสร้างให้อยู่บนแผงวงจรเดียวกันดังแสดงใน ภาพที่ 24

ภาพที่ 24



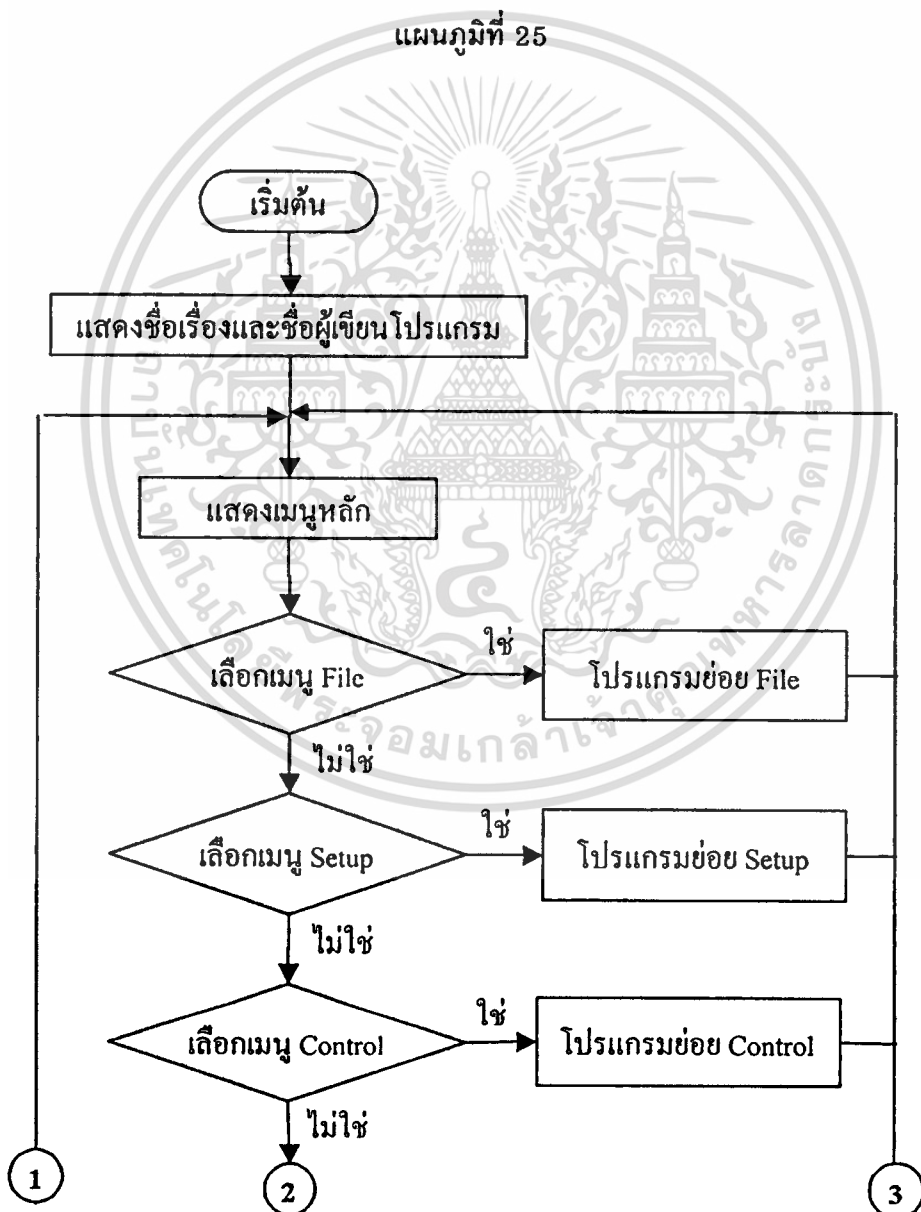
แสดงการต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผงวงจร

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นมานี้มีอินพุต 1 ช่อง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณจากอุปกรณ์ เซนเซอร์ที่เป็นแรงดัน 1-5 โวลต์ เพื่อใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับของระบบควบคุม โดยทั่วไปแล้ว เอาท์พุตของอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ใช้ในกระบวนการ มีเอาท์พุตเป็นกระแสไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์ จึงต้องใช้ตัวต้านทาน 250 โอห์ม ต่อคร่อมเพื่อที่จะได้เอาท์พุต 1-5 โวลต์ ในส่วนของเอาท์พุตมี 2 ช่อง คือเอาท์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้า 1-5 โวลต์ และเอาท์พุตเป็นกระแสไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์ ใช้สำหรับควบคุมกระบวนการจริง ซึ่งเป็นการควบคุมระดับน้ำกรณีถังเดียวและกรณีสองถัง

แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

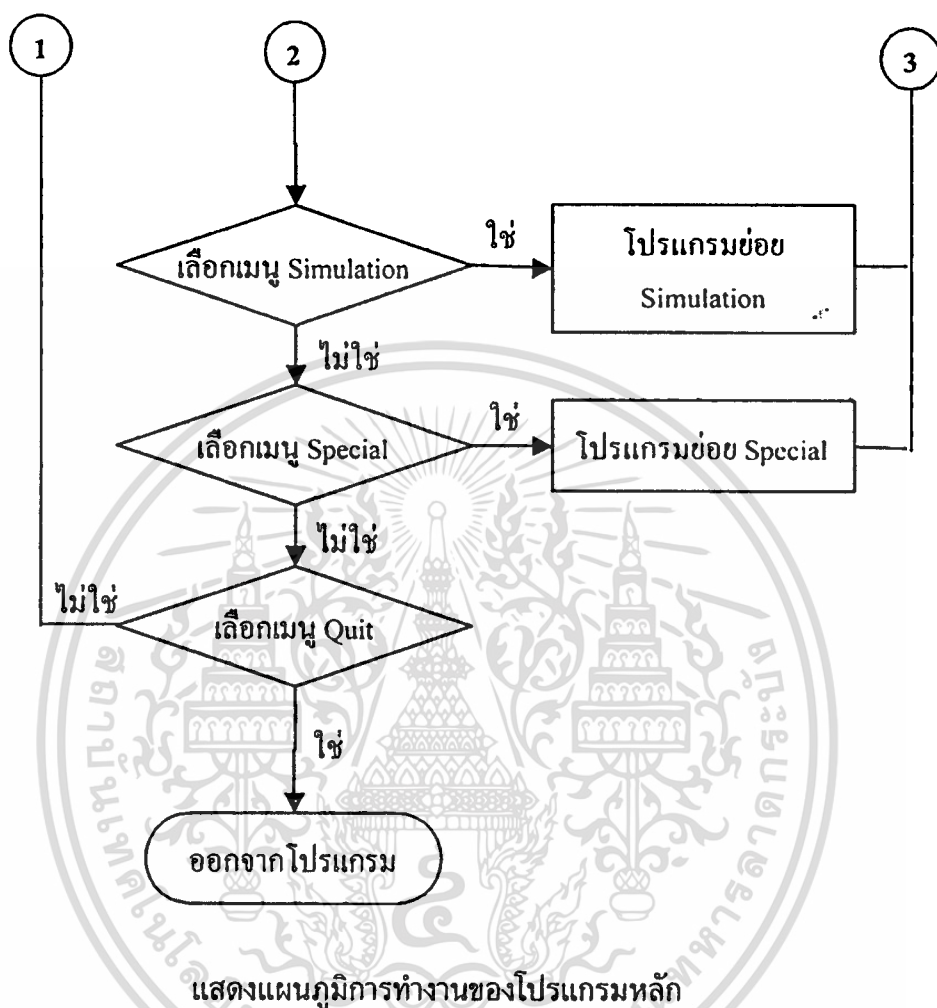
โปรแกรมหลัก

โปรแกรมหลักเป็นส่วนของการแสดงเมนูและรอรับค่าการเลือกเมนูของผู้ใช้ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นเมนูแบบดิ่งลง ซึ่งจะง่ายต่อการใช้งานและผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องจำคำสั่ง การทำงานของโปรแกรมหลักแสดงดังแผนภูมิที่ 25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิที่ 25 (ต่อ)



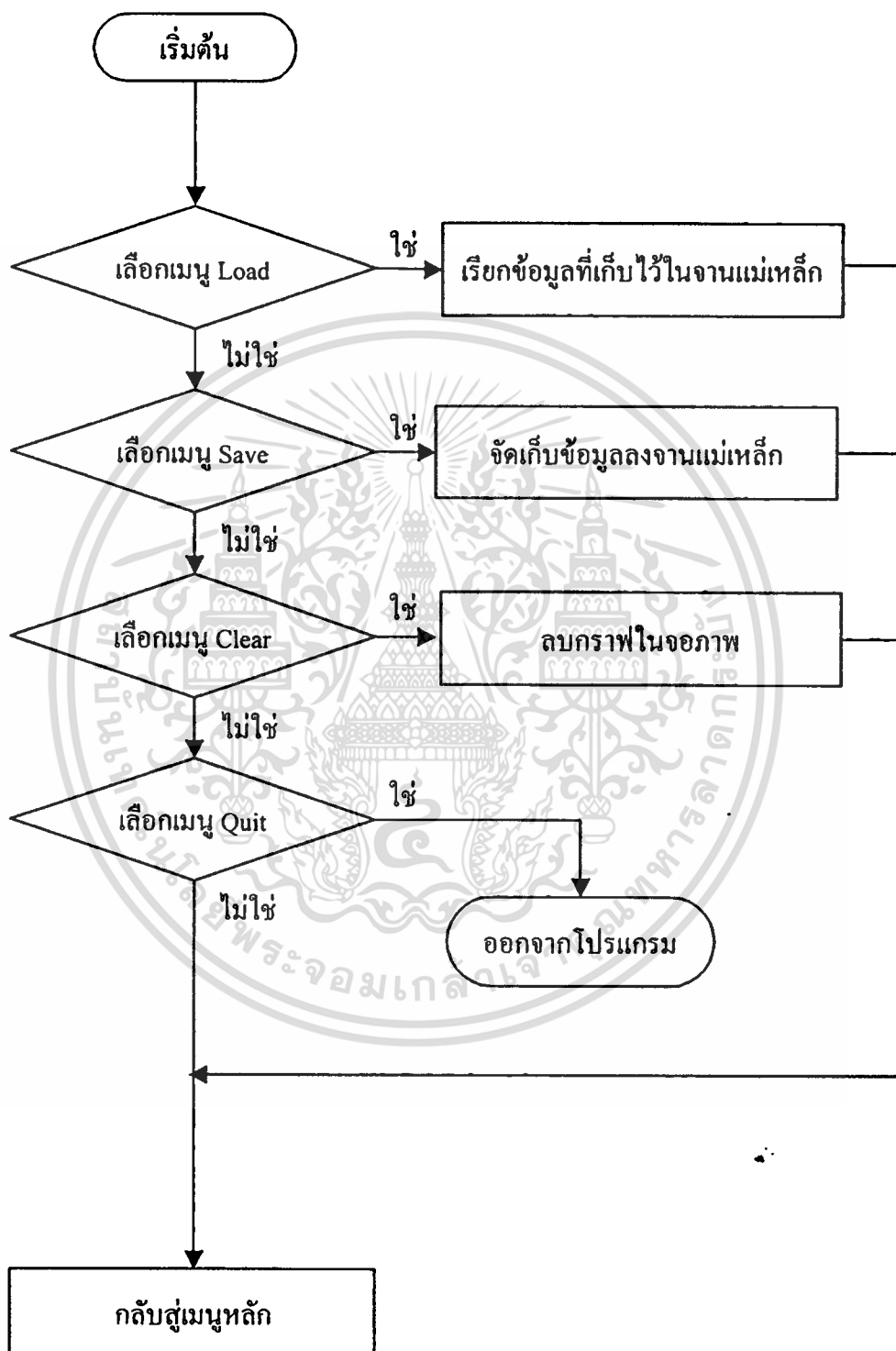
โปรแกรมย่อย File

เมื่อผู้ใช้เลือกโปรแกรมย่อย File เครื่องจะไปทำงานที่โปรแกรมย่อย File ซึ่งจะแสดงเมนูย่อยให้ดู ประกอบไปด้วย Load, Save, Clear และ Quit ในส่วนของ Load จะทำหน้าที่เรียกข้อมูลที่เป็นรูปภาพออกมาจากจานบันทึกแม่เหล็ก (magnetic disk) ที่เก็บไว้ก่อนหน้านี้ เมื่อเลือกคำสั่ง Save เครื่องจะทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่เป็นรูปภาพลงในแผ่นจานบันทึกแม่เหล็ก เพื่อที่จะเรียกมาดูในอนาคตได้ เมื่อเลือกคำสั่ง Clear เครื่องจะลบกราฟที่แสดงผลการตอบสนองของระบบในจอภาพ ถ้าไม่มีการเลือกคำสั่งในเมนู File เครื่องจะกลับไปเมนูหลัก และสุดท้ายเมื่อผู้ใช้เลือกคำสั่ง Quit เครื่องจะออกจากโปรแกรมไปสู่ดอส (DOS) รายละเอียดการทำงานแสดงดัง

แผนภูมิที่ 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิที่ 26



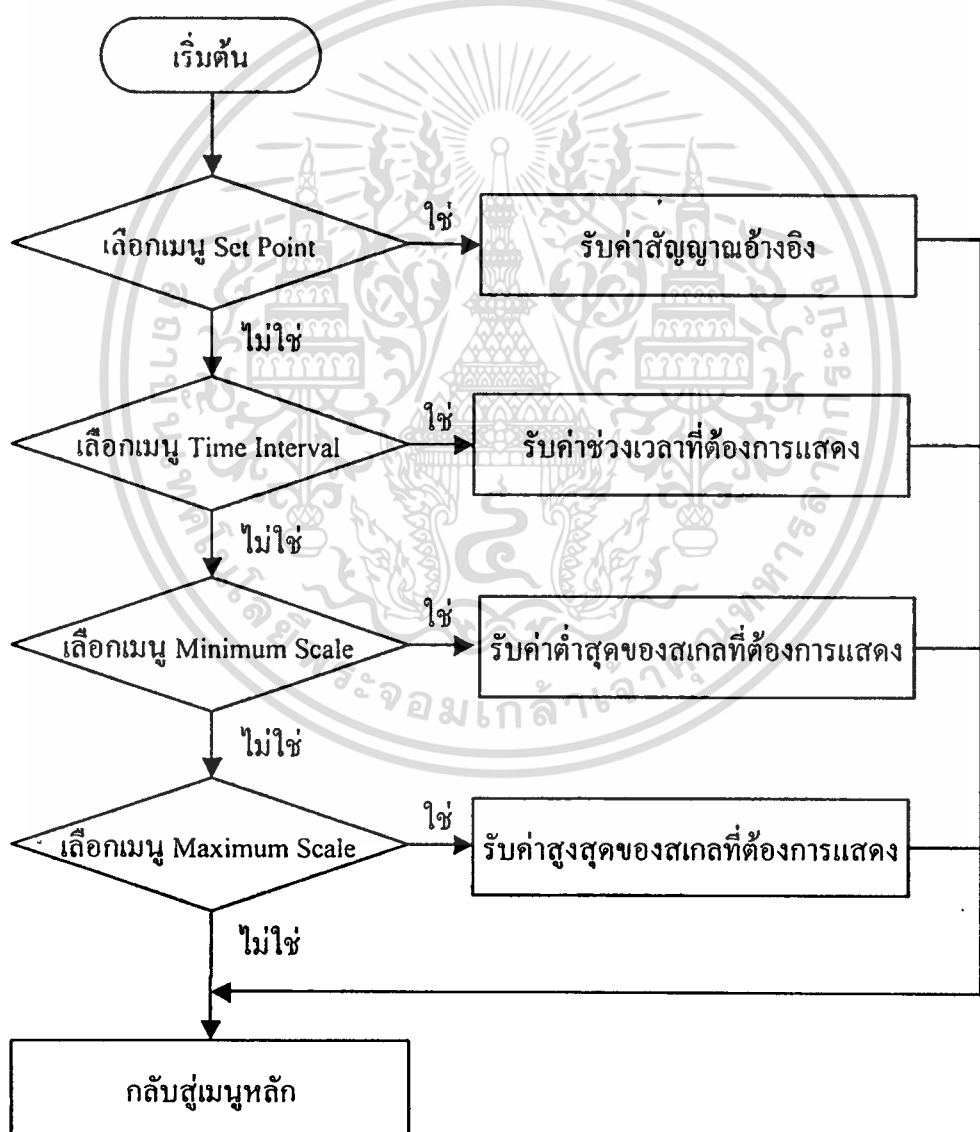
แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย File

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมย่อย Setup

ในส่วนนี้เป็นการปรับสเกลของกราฟให้เหมาะสมกับการใช้งาน เพื่อที่จะได้กราฟในย่านที่กำหนด เมนูในส่วนนี้ประกอบไปด้วยการเปลี่ยนขนาด เปลี่ยนช่วงเวลาการแสดงผลและกำหนดสัญญาณอ้างอิง รายละเอียดแสดงดังแผนภูมิที่ 27

แผนภูมิที่ 27



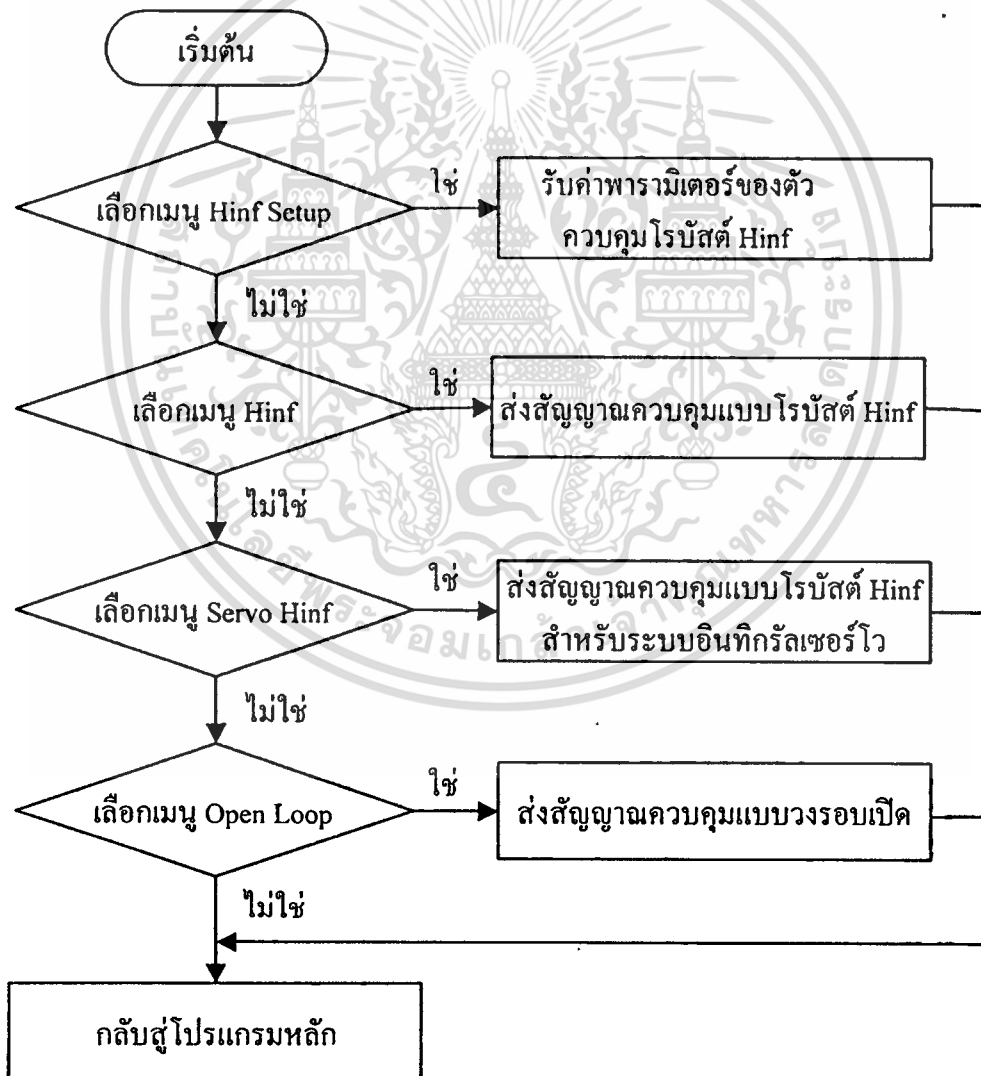
แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย Setup

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมย่อย Control

ในส่วนนี้เป็นการตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบ H_{∞} และทำการควบคุมหลายแบบ ประกอบด้วย การควบคุมแบบโรบัสต์ H_{∞} การควบคุมแบบโรบัสต์ H_{∞} ที่มีโครงสร้างเป็นอินทิกรัลเซอร์โวเพื่อแก้ปัญหาออฟเซต และสุดท้ายเป็นการหาพารามิเตอร์ของพลาเน็ตในระบบวงรอบเปิดดังแผนภูมิที่ 28

แผนภูมิที่ 28



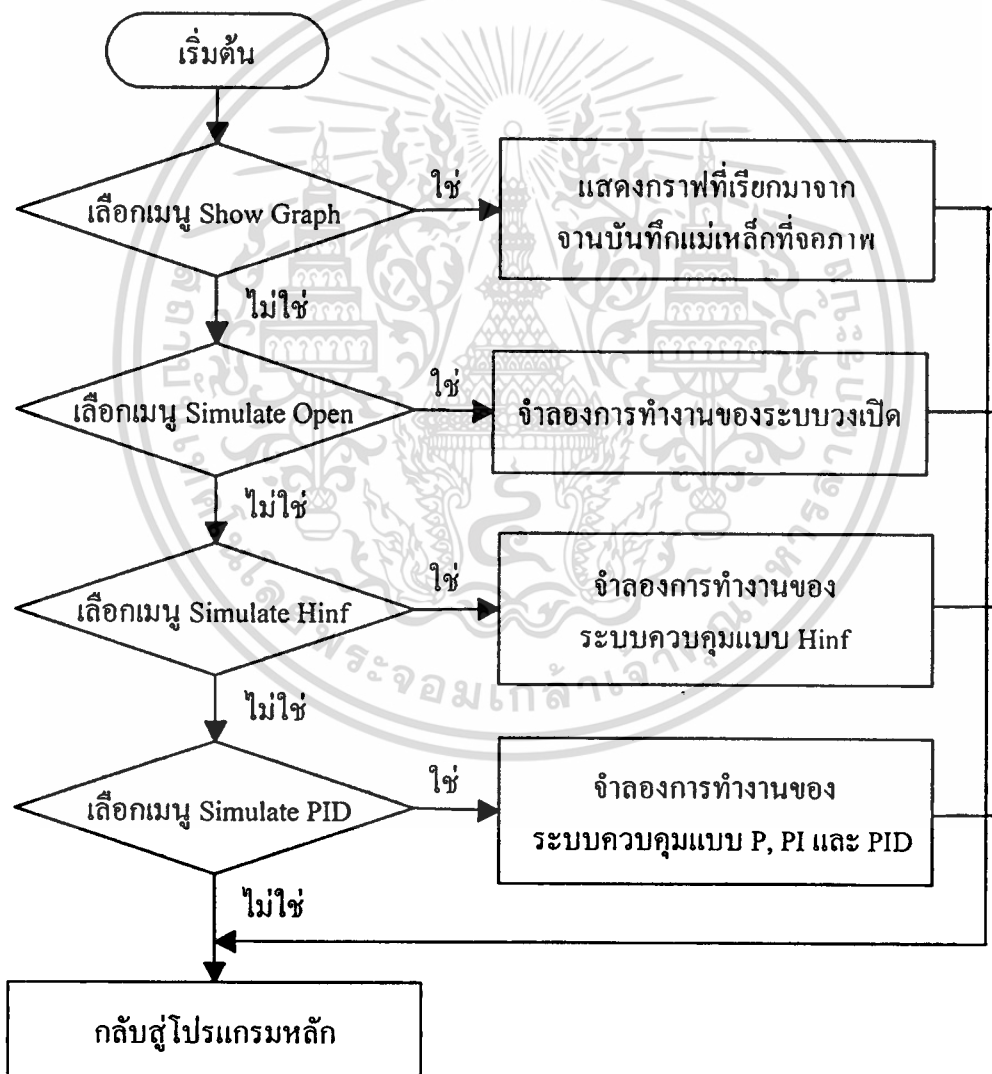
แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมย่อย Simulation

ในส่วนนี้เป็นการจำลองการทำงานของระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง ประกอบด้วย การควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ การควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ ที่มีโครงสร้างเป็น อินทิกรัลเซอร์โว และการควบคุมแบบ P, PI และ PID แสดงดังแผนภูมิที่ 29

แผนภูมิที่ 29



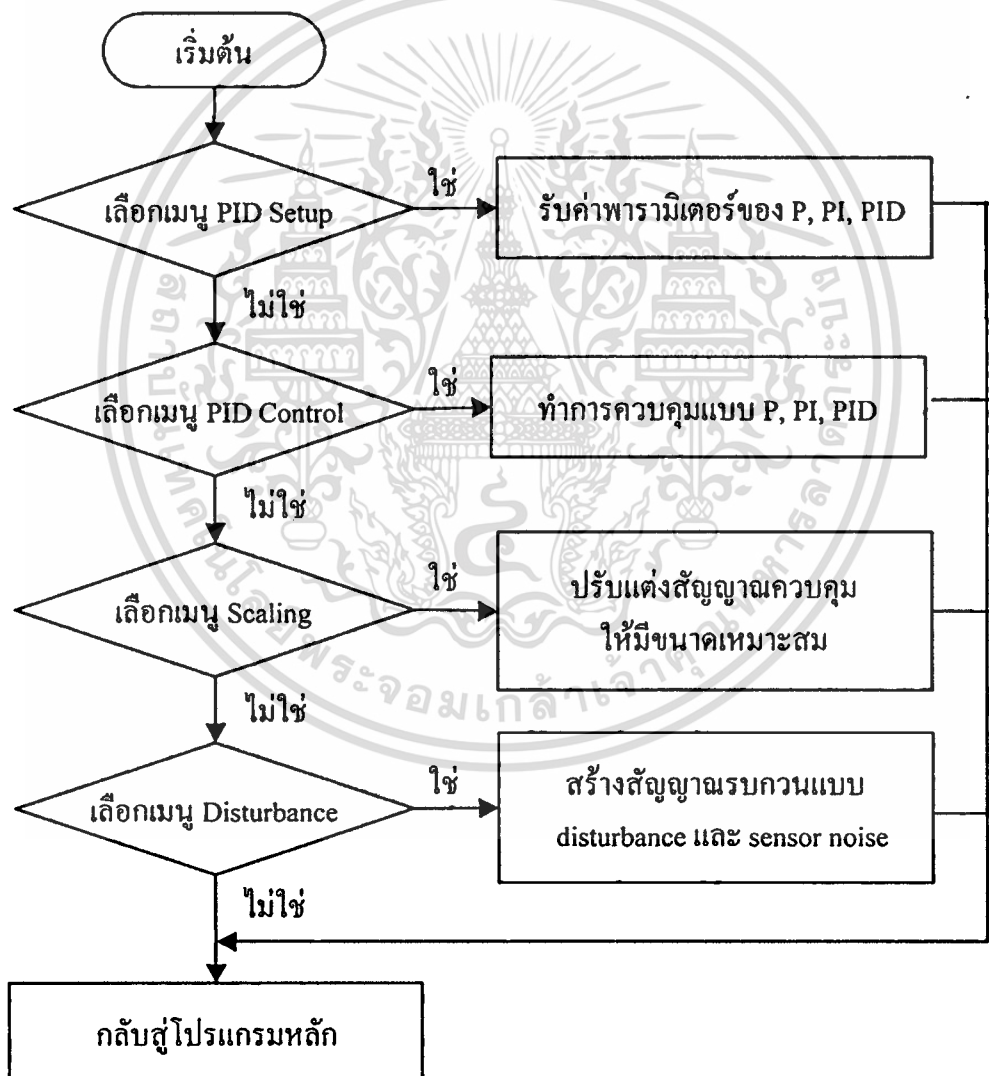
แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมย่อย Special

ในส่วนนี้เป็นการตั้งค่าพารามิเตอร์ของ P, PI และ PID การควบคุมแบบ P, PI และ PID ปรับแต่งสัญญาณควบคุมให้มีขนาดเหมาะสมด้วย Scaling และสร้างสัญญาณรบกวนที่เป็นการรบกวนจากภายนอกและสัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์นอยส์ ซึ่งมีรายละเอียดดังแผนภูมิที่ 30

แผนภูมิที่ 30



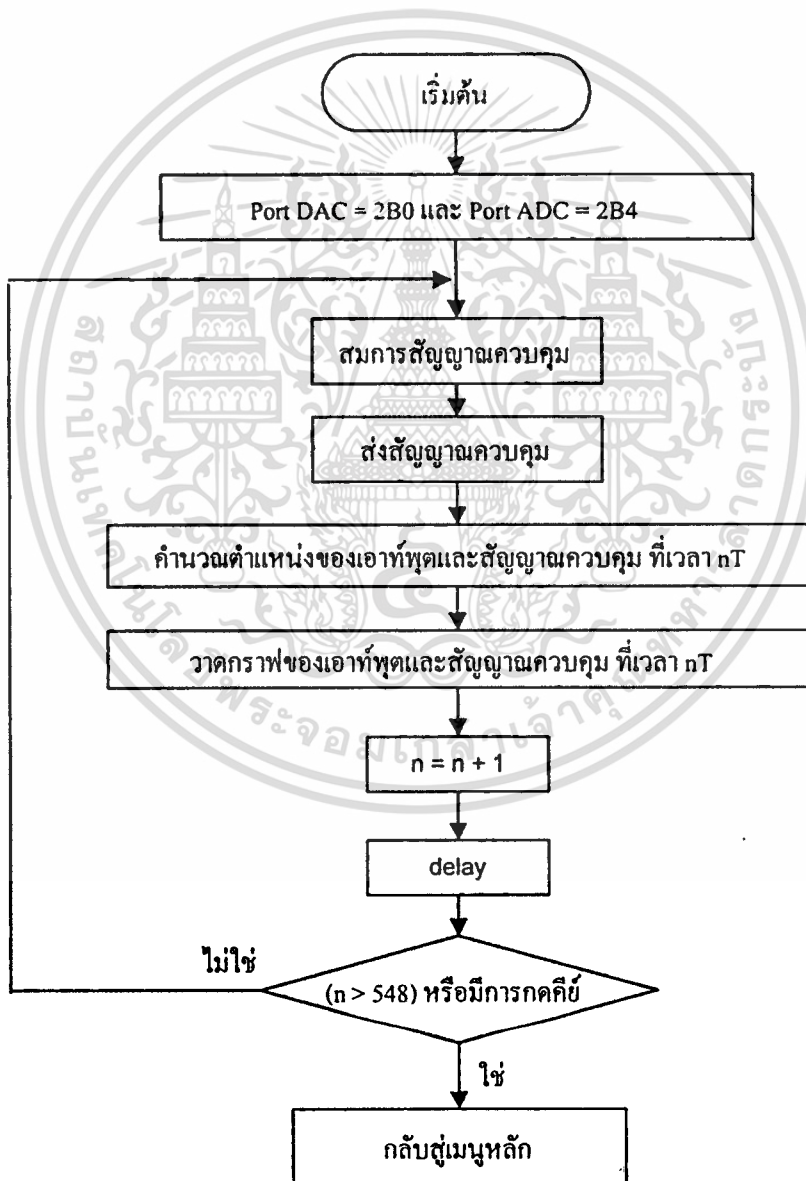
แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย Special

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมบนจอคอมพิวเตอร์

การแสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมบนจอคอมพิวเตอร์ จะเป็นการนำข้อมูล ผลการตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุม ซึ่งเก็บไว้ในตัวแปรแถวอันดับ Data และตัวแปรแถวอันดับ Control มาวาดภาพบนจอคอมพิวเตอร์ รายละเอียดแสดงดังแผนภูมิที่ 31

แผนภูมิที่ 31



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนแสดงแผนภูมิการวาดกราฟผลการตอบสนองของระบบด้วยจอคอมพิวเตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลอง

ในการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ของพลาเน็ต และทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่สร้างขึ้น จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนแรกเป็นการหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิด ส่วนที่สองเป็นการจำลองระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และส่วนสุดท้ายเป็นการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมที่สร้างขึ้นมากับกระบวนการในเวลาจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีถังเดียวและกรณีสองถัง

การทดลองที่ 1 จะทำการหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีถังเดียวและกรณีสองถัง โดยที่กำหนดให้อินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 30 เซนติเมตร 40 เซนติเมตร และ 45 เซนติเมตร ตามลำดับ เพื่อที่จะนำเอาผลการตอบสนองของการควบคุมระดับน้ำทั้งสามระดับนี้มาหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ต แล้วนำเอาฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ตที่ระบุ (*nominal plant*) ที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร และค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ตที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงจากพลาเน็ตที่ระบุ นำไปออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ส่วนการควบคุมแบบ PI ซึ่งเป็นการทดลองเชิงเปรียบเทียบนั้น หาค่า K_p และ K_i ได้จากวิธี Zeigler-Nichols โดยใช้ผลการตอบสนองวงรอบเปิดที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร

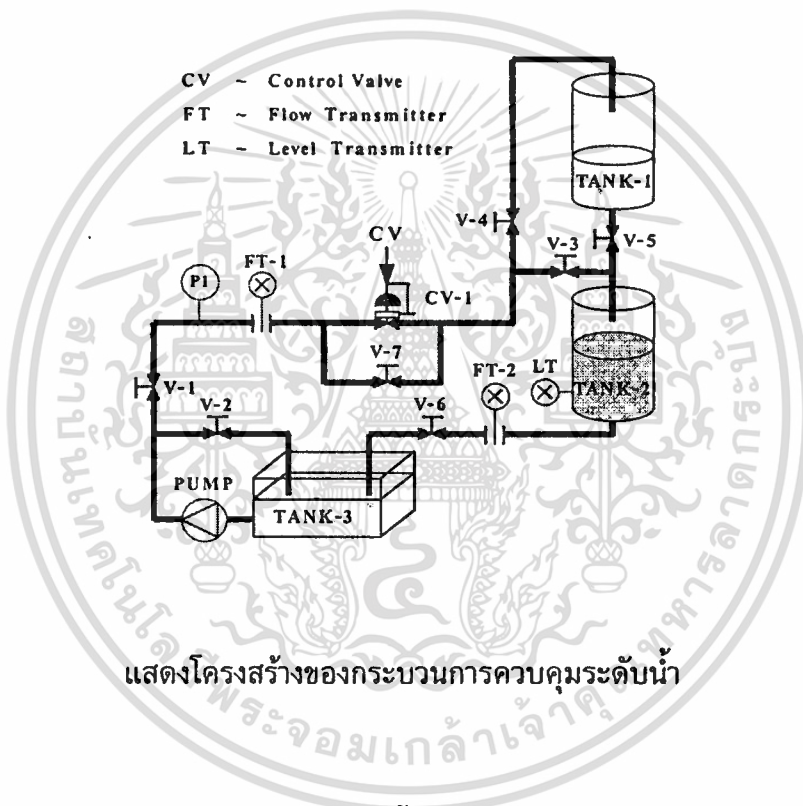
การทดลองที่ 2 จะทำการจำลองระบบทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ก่อนที่จะนำตัวควบคุมนี้ไปใช้ในการควบคุมกระบวนการจริง นอกจากนี้แล้วยังลดความเสี่ยงที่จะทำให้อุปกรณ์ในกระบวนการเสียหาย ผลการทดลองในส่วนนี้จะแสดงผลการตอบสนองเชิงตัวเลขเปรียบกับการทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม PI ในการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม PI นั้น จะต้องจำลองการควบคุมระดับน้ำที่ระดับ 40 เซนติเมตร แล้วปรับแต่ง K_p และ K_i ให้เอาท์พุทของระบบวงรอบปิดมีผลการตอบสนองที่ดี แล้วจึงนำค่า K_p และ K_i ที่ได้จากการปรับนี้ไปควบคุมกระบวนการจริง

การทดลองที่ 3 จะเป็นการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ที่สร้างขึ้น นำไปควบคุมระดับน้ำถังเดียวและกรณีสองถังในห้องปฏิบัติการที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง กระบวนการทั้งสองกรณีนี้จะมีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอินพุตอ้างอิงจากระดับน้ำ 35 เซนติเมตร ถึง ระดับน้ำ 45 เซนติเมตร ส่วนการทดสอบผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอกทำได้โดยปิดเครื่องสูบน้ำ 10 วินาที ที่เวลา 300 วินาที และเติมน้ำลงใน TANK-2 ที่เวลา 400 วินาที

การหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิด

ทดลองหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิด (*open loop*) ของกระบวนการควบคุมระดับน้ำที่มีโครงสร้างดังภาพที่ 32 โดยกำหนดให้อินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 35 เซนติเมตร 40 เซนติเมตร และ 45 เซนติเมตร ตามลำดับ

ภาพที่ 32



การทำงานของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ เครื่องสูบน้ำ (*pump*) จะทำหน้าที่สูบน้ำจาก TANK-3 ขึ้นไปตามท่อตลอดระยะเวลาในการควบคุม น้ำที่ถูกสูบจะผ่าน วาล์ว V-1 มายังวาล์วควบคุม (*control valve*) CV-1 ซึ่งต่อขนานกับวาล์ว V-7 (วาล์ว V-7 ใช้ในการควบคุมแบบ manual ในการทดลองนี้จะปิดตลอดเวลา) และมีวาล์ว V-2 ทำหน้าที่เป็น วาล์วบายพาสส์เพื่อให้น้ำไหลย้อนกลับมาที่ TANK-3 ในการทดลองจะปิดวาล์ว V-2 ให้แรงดัน ด้านหน้าของวาล์วควบคุม CV-1 ขณะที่ปิดวาล์วควบคุมมีค่าเท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร ในกรณีที่ต้องการใช้ถังกระบวนการกรณีเดียว ทำได้โดยการเปิดวาล์ว V-3 และปิด วาล์ว V-4 และเมื่อต้องการใช้ถังกระบวนการกรณีสองถัง ทำได้โดยการปิดวาล์ว V-3 และเปิด วาล์ว V-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดียว

ระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีถึงเดียว จะเป็นการควบคุมระดับน้ำใน TANK-2 ดังแสดงในภาพที่ 32 ซึ่งเอาท์พุทเป็นความสูงของระดับน้ำ $H(s)$ ใน TANK-2 และเมื่ออัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้า TANK-2 คือ $Q_i(s)$ เขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs+1}$$

โดยที่

$Q_i(s)$:= อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้า TANK-2

$H(s)$:= ความสูงของระดับน้ำใน TANK-2

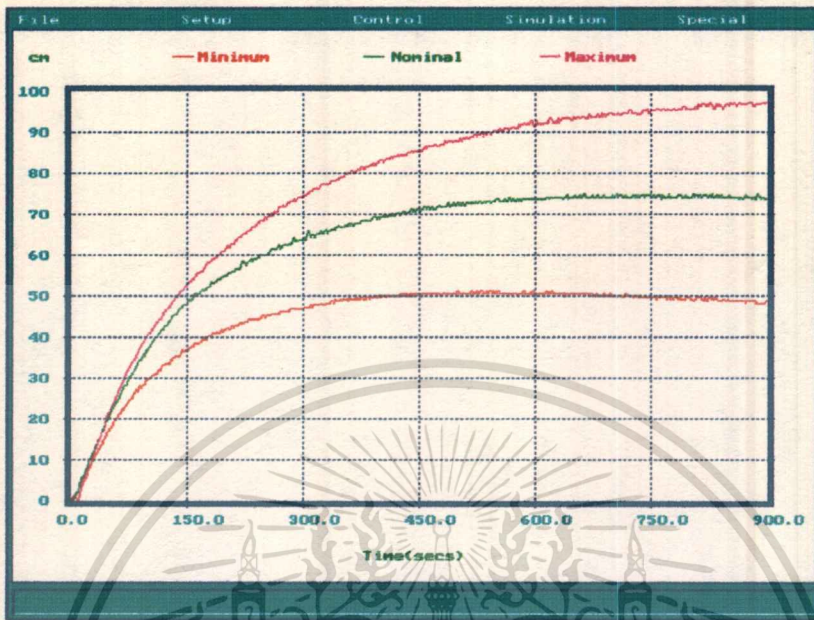
R := ความต้านทานการไหลใน TANK-2

C := พื้นที่หน้าตัดของ TANK-2

เมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำต่างกัน จะทำให้อัตราการไหลเข้า $Q_i(s)$ ของน้ำมีค่าต่างกัน จึงมีผลให้ระดับความสูงของน้ำ $H(s)$ มีค่าต่างกัน เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของ $H(s)/Q_i(s)$ จะเห็นว่าค่าอัตราขยาย (*gain*) ของพลาเน็ตขึ้นอยู่กับค่า R แต่ในทางปฏิบัติแล้วอัตราขยายของพลาเน็ตยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น อัตราขยายของวาล์วควบคุม เป็นต้น ส่วนค่าคงตัวเวลา (*time constant*) ขึ้นอยู่กับค่า R และ C โดยที่ C เป็นพื้นที่หน้าตัดของถังจึงเป็นค่าคงที่ ส่วน R เป็นพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำและความสูงของระดับน้ำ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น $R=H/Q$

การทดลองหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดในส่วนนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้หาพารามิเตอร์ของพลาเน็ต แล้วนำค่าที่หามาได้นี้ไปออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ การทดลองกำหนดให้ Minimum เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 35 เซนติเมตร Nominal เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร และ Maximum เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 45 เซนติเมตร ซึ่งมีผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 33

ภาพที่ 33



แสดงผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถังเดียว

จากผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดดังภาพที่ 33 สามารถหาค่าคงตัวทางเวลา τ ได้จากการหาช่วงเวลาที่ผลการตอบสนอง หรือเอาท์พุทของระบบมีค่าเพิ่มจนถึง 63.2 % ของค่าสุดท้ายของเอาท์พุท และหาค่าอัตราขยายของพลานต์ K_c ได้จากการหารเอาท์พุทที่ค่าสุดท้ายด้วยอินพุตอ้างอิง แล้วเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้จากสมการ $G(s) = \frac{K_c}{\tau s + 1}$ สุดท้ายจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงทั้งสามระดับดังนี้

$$\text{ขอบเขตต่ำสุดของพลานต์ (minimum plant)} \quad G_{\min}(s) = \frac{1.42}{100s + 1}$$

$$\text{พลานต์ที่ระบุ (nominal plant)} \quad G_{\text{nom}}(s) = \frac{1.85}{140s + 1}$$

$$\text{ขอบเขตสูงสุดของพลานต์ (maximum plant)} \quad G_{\max}(s) = \frac{2.15}{200s + 1}$$

เมื่อ a , b_2 , c_2 และ d_{22} เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของพลานต์ที่ระบุเป็นระบบในรูปสเตตสเปซ และสามารถเขียนระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัวในขอบเขต 35 เซนติเมตร ถึง 45 เซนติเมตร ได้ดังนี้

$$\dot{x}(t) = -ax(t) + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \end{bmatrix} w(t) + b_2 u(t)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} c_1 \\ 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & d_{11} \\ d_{11} & 0 \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ d_{12} \end{bmatrix} u(t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้พารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลงจากพลาเน็ตที่ระบุของระบบข้างต้น มีค่าดังนี้

$$a = 0.0071 + 0.01f(t); \quad b_1 = 0.001 + 0.01f(t); \quad b_2 = 1 + f(t)$$

$$c_1 = 0.1 + 0.5f(t); \quad d_{11} = 0 + 0.5f(t); \quad d_{12} = 1 + 0.5f(t)$$

$$c_2 = 0.0132 + 0.005f(t); \quad d_{21} = 0.001 + 0.005f(t); \quad d_{22} = 0$$

นำเอาตัวแปรทั้งหมดไปหาค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ตที่จะนำไปออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ แล้วนำค่า $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}, H_1, H_2, H_3, E_1, E_2$ และ E_3 ที่หามาได้ และให้ $C_+ = 0.1, D_+ = 0.01$ ป้อนเป็นอินพุตให้กับโปรแกรม SSG2GD.M เพื่อแปลงระบบโซ่โรเกตในรูปอินทิกรัลเซอร์โวเป็นระบบมาตรฐาน GD โดยกำหนดให้ $\epsilon=10, \gamma=10, \rho=0.2$ เมื่อระบบอยู่ในรูปมาตรฐาน GD แล้ว สามารถออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ได้จากโปรแกรม RHICON.M แล้วจะได้ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ดังที่แสดงวิธีการออกแบบโดยละเอียดไว้ในภาคผนวก ข. ดังนี้

$$\text{ตัวควบคุมโรบัสต์ } H_\infty \quad K(s) = \frac{213.44s + 1.62}{s(s^2 + 100.46s + 40.59)}$$

ส่วนตัวควบคุมแบบ PI ที่ทดลองเชิงเปรียบเทียบนั้น ได้นำเอาผลการตอบสนองของพลาเน็ตที่ระบุหรือระบบวงรอบเปิดที่กำหนดอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 33 มาคำนวณหาค่า K_p และ K_i ด้วยวิธีการ Zeigler-Nichols จะได้

$$K_p = 0.9T/L = (0.9 \cdot 120)/10 = 10.8$$

$$T_i = L/0.3 = 10/0.3 = 33.33$$

$$K(s) = K_p(1 + 1/T_i s) = K_p + K_i/s$$

$$\text{ตัวควบคุม PI} \quad K(s) = \frac{10.8s + 0.32}{s}$$

ระบบวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง

ระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีสองถังแสดงดังภาพที่ 32 ซึ่งเอาท์พุทของระบบเป็นความสูงของระดับน้ำ $H_2(s)$ ใน TANK-2 และอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้า TANK-1 คือ $Q_1(s)$ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบนี้จะเขียนได้เป็น

$$\frac{H_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{R_1 R_2}{R_1 C_1 R_2 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2) s + 1}$$

โดยที่

$$Q_1(s) := \text{อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าใน TANK-1}$$

$$H_2(s) := \text{ความสูงของระดับน้ำใน TANK-2}$$

$$R_1 := \text{ความต้านทานการไหลใน TANK-1}$$

$$C_1 := \text{พื้นที่หน้าตัดของ TANK-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

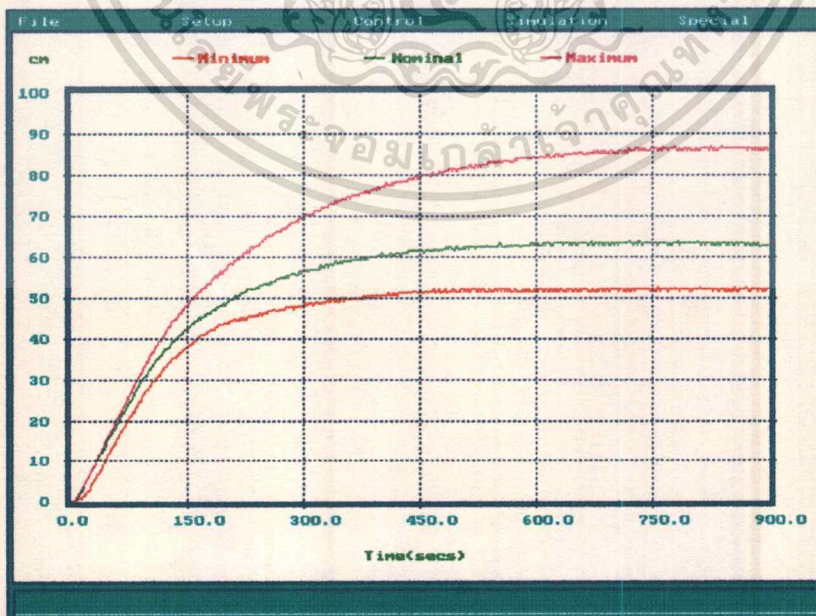
R_2 := ความต้านทานการไหลใน TANK-2

C_2 := พื้นที่หน้าตัดของ TANK-2

อัตราการไหลเข้า $Q_1(s)$ ของน้ำใน TANK-1 จะมีค่าต่างกัน เมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำต่างกัน จากการเปลี่ยนแปลงนี้จึงมีผลให้ระดับความสูงของน้ำ $H_2(s)$ ใน TANK-2 มีความสูงต่างกันด้วย เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของ $H_2(s)/Q_1(s)$ จะเห็นว่าค่าคงตัวทางเวลาขึ้นอยู่กับค่า R_1 , C_1 , R_2 และ C_2 โดยที่ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ทำได้จากพื้นที่หน้าตัดของ TANK-1 และ TANK-2 ตามลำดับ ค่าความต้านทานการไหล R_1 และ R_2 เป็นพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำและความสูงของระดับน้ำ ส่วนค่าอัตราขยายของพลาตันั้นขึ้นอยู่กับค่า R_1 และ R_2 ในทางปฏิบัติแล้วอัตราขยายของพลาตันี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น อัตราขยายของวาล์วควบคุม เป็นต้น

การทดลอง กำหนดให้ Minimum เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 35 เซนติเมตร Nominal เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร และ Maximum เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 45 เซนติเมตร ซึ่งมีผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 34

ภาพที่ 34



แสดงผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดเป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดดังภาพที่ 34 เป็นผลการตอบสนองของกระบวนการอันดับสอง ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ตจะมีค่าคงตัวทางเวลา 2 ตัว คือ τ_1 และ τ_2 ซึ่งค่าคงตัวทางเวลาทั้งสองนี้สามารถหาได้จากวิธีการ percent-incomplete method [16] และหาค่าอัตราขยายของพลาเน็ต K_C ได้จากการหารเอาต์พุตที่ค่าสุดท้ายด้วยอินพุตอ้างอิง แล้วเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้จากสมการ $G(s) = \frac{K_C}{\tau_1 \tau_2 s^2 + (\tau_1 + \tau_2)s + 1}$ โดยที่ $\tau_1 = R_1 C_1$ และ $\tau_2 = R_2 C_2$ สุดท้ายจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตทั้งสามระดับดังนี้

$$\text{ขอบเขตต่ำสุดของพลาเน็ต} \quad G_{\min}(s) = \frac{1.48}{1500s^2 + 115s + 1}$$

$$\text{พลาเน็ตที่ระบุ} \quad G_{\text{nom}}(s) = \frac{1.58}{3300s^2 + 140s + 1}$$

$$\text{ขอบเขตสูงสุดของพลาเน็ต} \quad G_{\max}(s) = \frac{1.9}{3900s^2 + 160s + 1}$$

เมื่อ a_1, a_2, b_2, c_2 และ d_{22} เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ตที่ระบุเป็นระบบในรูปสเตตสเปซและระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัวในขอบเขตที่กำหนดเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & d_{11} \\ d_{11} & 0 \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ d_{12} \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = c_2(t) + \begin{bmatrix} 0 & d_{21} \end{bmatrix} w(t) + d_{22} u(t)$$

กำหนดให้พารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลงจากพลาเน็ตที่ระบุของระบบข้างต้น มีค่าดังนี้

$$a_1 = 0.042 + 0.05f(t); \quad a_2 = 0.0003 + 0.005f(t); \quad b_1 = 0.001 + 0.01f(t)$$

$$b_2 = 1 + f(t); \quad c_1 = 0.1 + 0.05f(t); \quad d_{11} = 0 + 0.5f(t)$$

$$d_{12} = 1 + 0.5f(t); \quad c_2 = 0.0048 + 0.001f(t); \quad d_{21} = 0.001 + 0.005f(t); \quad d_{22} = 0$$

นำเอาตัวแปรทั้งหมดไปหาค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ตที่จะนำไปออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

แล้วนำค่า $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}, H_1, H_2, H_3, E_1, E_2$ และ E_3 ที่หามาได้

และให้ $C_r = 0.1, D_r = 0.01$ ป้อนเป็นอินพุตให้กับโปรแกรม SSG2GD.M เพื่อแปลงระบบ

โซโรเกตในรูปอินทิกรัลเซอร์โวเป็นระบบมาตรฐาน GD โดยกำหนดให้ $\epsilon=10, \gamma=30, \rho=0.5$

เมื่อระบบอยู่ในรูปมาตรฐาน GD แล้ว จึงนำไปออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ด้วยโปรแกรม

RHICON.M สุดท้ายจะได้ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ เช่นเดียวกับที่แสดงวิธีการออกแบบโดยละเอียด

ไว้ในภาคผนวก ข. ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ $K(s) = \frac{47780s^2 + 5577s + 2}{s(s^3 + 100.57s^2 + 146.66s + 89.15)}$

ส่วนตัวควบคุมแบบ PI ที่ทดลองเชิงเปรียบเทียบนั้น ได้นำเอาผลการตอบสนองของพลาเน็ตที่ระบุหรือระบบวงรอบเปิดที่กำหนดอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 34 มาคำนวณหาค่า K_p และ K_i ด้วยวิธีการ Zeigler-Nichols ซึ่งจะได้

$$K_p = 0.9T/L = (0.9 \cdot 170)/20 = 7.65$$

$$T_i = L/0.3 = 20/0.3 = 66.67$$

$$K(s) = K_p(1 + 1/T_i s) = K_p + K_i/s$$

ตัวควบคุม PI $K(s) = \frac{7.65s + 0.11}{s}$

การจำลองระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น ผู้ใช้จะต้องกำหนดค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ ชนิดของตัวควบคุม การทดลองส่วนนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมก่อนที่จะนำไปใช้จริง การทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การจำลองการทำงานของระบบควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดียวและกรณีสองถึง

การจำลองการทำงานของระบบควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดียว

การทดลองในส่วนนี้ จะใช้โปรแกรมจำลองการทำงานของระบบวงรอบปิดที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น จำลองการทำงานของระบบควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดียว โดยเริ่มจากนำเอาตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ที่ออกแบบไว้ในหน้า 49 มาควบคุมพลาเน็ตที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนจากพลาเน็ตที่ระบุ $G_{nom}(s)$ เป็นพลาเน็ตที่ขอบเขตต่ำสุด $G_{min}(s)$ และพลาเน็ตที่ขอบเขตสูงสุด $G_{max}(s)$ ตามลำดับ ส่วนการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม PI นั้น จะใช้ตัวควบคุม PI ที่ออกแบบไว้ในหน้า 49 ซึ่งมีค่า $K_p=10.8$ และ $K_i=0.32$ ควบคุมพลาเน็ตที่ระบุ $G_{nom}(s)$ แล้วปรับ K_p และ K_i ให้ผลการตอบสนองของระบบวงรอบปิดมีสมรรถนะที่ดี ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ $K_p=8$ และ $K_i=0.1$ แล้วนำไปควบคุมพลาเน็ตที่ระบุ $G_{nom}(s)$ พลาเน็ตที่ขอบเขตต่ำสุด $G_{min}(s)$ และพลาเน็ตที่ขอบเขตสูงสุด $G_{max}(s)$ ตามลำดับ ซึ่งการทดลองเปรียบเทียบเชิงตัวเลขแสดงดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2

แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ กับระบบควบคุม PI ในการจำลองการทำงานของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเตี่ยวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สมรรถนะการจำลองการทำงานของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเตี่ยว					
กระบวนการ	ชนิดตัวควบคุม	Tr (Secs)	Ts (Secs)	Ess (%)	Os (%)
$G_{min}(s) = \frac{1.42}{100s+1}$	ROBUST H_∞	24.18	30.77	0.00	0.00
	PI	26.37	65.93	0.00	7.77
$G_{nom}(s) = \frac{1.85}{140s+1}$	ROBUST H_∞	26.37	60.25	0.00	0.43
	PI	23.08	53.85	0.00	7.78
$G_{max}(s) = \frac{2.15}{200s+1}$	ROBUST H_∞	34.7	101.10	0.00	4.51
	PI	31.87	113.19	0.00	12.13

การจำลองการทำงานของระบบควบคุมระดับน้ำกรณีสองถึง

การจำลองการทำงานของระบบควบคุมระดับน้ำกรณีสองถึงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น มีขั้นตอนการจำลองเช่นเดียวกับการจำลองการทำงานของระบบควบคุมระดับน้ำถึงเตี่ยว คือจะนำเอาตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ที่ออกแบบไว้ในหน้า 52 มาควบคุมพลาเน็ตที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนจากพลาเน็ตที่ระบุ $G_{nom}(s)$ เป็นพลาเน็ตที่ขอบเขตต่ำสุด $G_{min}(s)$ และพลาเน็ตที่ขอบเขตสูงสุด $G_{max}(s)$ ตามลำดับ สำหรับการจำลองระบบควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุม PI นั้น จะใช้ตัวควบคุม PI ที่ออกแบบไว้ในหน้าที่ 52 ซึ่งมีค่า $K_p=7.65$ และ $K_i=0.11$ ควบคุมพลาเน็ตที่ระบุ $G_{nom}(s)$ แล้วปรับ K_p และ K_i ให้ผลการตอบสนองของระบบบรรจบปิดมีสมรรถนะที่ดี ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ $K_p=7.65$ และ $K_i=0.05$ แล้วนำไปควบคุมพลาเน็ตที่ระบุ $G_{nom}(s)$ พลาเน็ตที่ขอบเขตต่ำสุด $G_{min}(s)$ และพลาเน็ตที่ขอบเขตสูงสุด $G_{max}(s)$ ตามลำดับ ซึ่งการทดลองเปรียบเทียบเชิงตัวเลขแสดงดังในตารางที่ 3

ตารางที่ 3

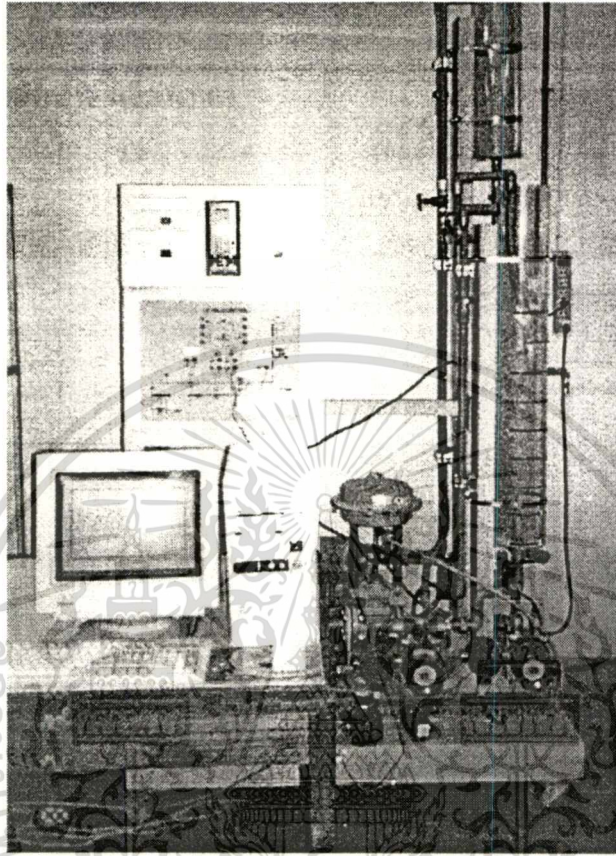
แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ กับระบบควบคุม PI ในการจำลองการทำงานของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถังด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สมรรถนะการจำลองการทำงานของการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง					
กระบวนการ	ชนิดตัวควบคุม	Tr (Secs)	Ts (Secs)	Ess (%)	Os (%)
$G_{\min}(s) = \frac{1.48}{1500s^2 + 115s + 1}$	ROBUST H_∞	35.16	57.14	0.00	3.57
	PI	35.16	67.03	0.00	24.93
$G_{\text{nom}}(s) = \frac{1.58}{3300s^2 + 140s + 1}$	ROBUST H_∞	48.35	89.01	0.00	10.23
	PI	48.35	152.75	0.00	24.93
$G_{\max}(s) = \frac{1.9}{3900s^2 + 160s + 1}$	ROBUST H_∞	50.55	105.49	0.00	12.13
	PI	50.55	160.44	0.00	29.56

การควบคุมกระบวนการในเวลาจริง

หลังจากทดลองจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จนเป็นที่แน่ใจแล้ว จึงทำการทดลองควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีถังเดียวและกรณีสองถังในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีโครงสร้างกระบวนการควบคุมระดับน้ำด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลแสดงดังภาพที่ 35 การทดสอบความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ทำได้โดยการเปลี่ยนแปรงอินพุตอ้างอิงจากระดับน้ำ 35 เซนติเมตร เป็นระดับน้ำ 40 เซนติเมตร และ 45 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนการทดสอบประสิทธิภาพในการลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอก ทำได้โดยการปิดเครื่องสูบน้ำเป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 300$ วินาที และเติมน้ำลงใน TANK-2 ที่เวลา $t = 400$ วินาที

ภาพที่ 35



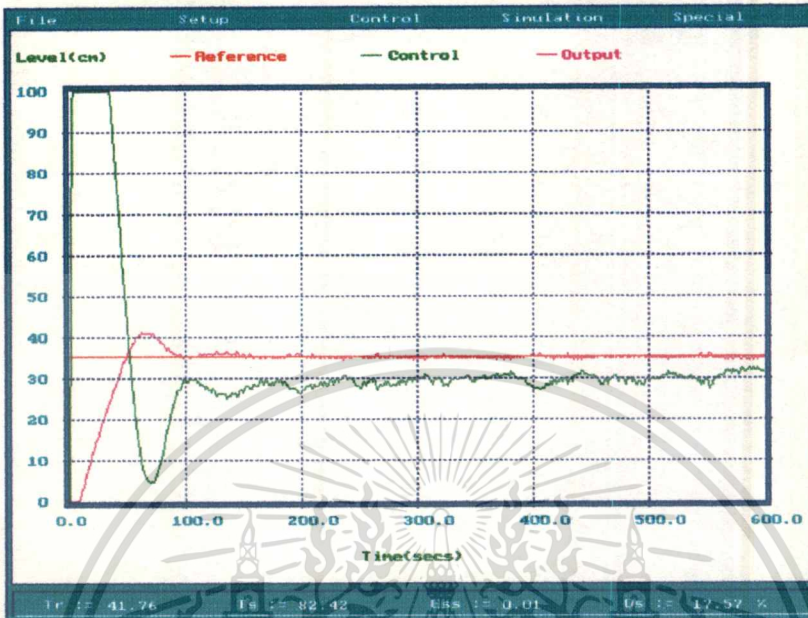
แสดงการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

การควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีถึงเดียว

ทดลองควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีถึงเดียวด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞} ที่ได้ ออกแบบแล้วในหน้า 49 และใช้ตัวควบคุม PI ที่มีค่า $K_p=8$ และ $K_i=0.1$ เพื่อทดลองเชิงเปรียบเทียบความแตกต่างของการใช้ตัวควบคุม การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบความคงทนของระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง โดยกำหนดให้ระบบมีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 35 เซนติเมตร 40 เซนติเมตร และ 45 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 36 ถึง 41 และส่วนที่สองเป็นการทดสอบผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอก ผลการทดลองระดับน้ำกรณีถึงเดียวขณะที่ถูกรบกวนจากภายนอกด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞} และตัวควบคุม PI แสดงดังภาพที่ 42 และ 43 ตามลำดับ

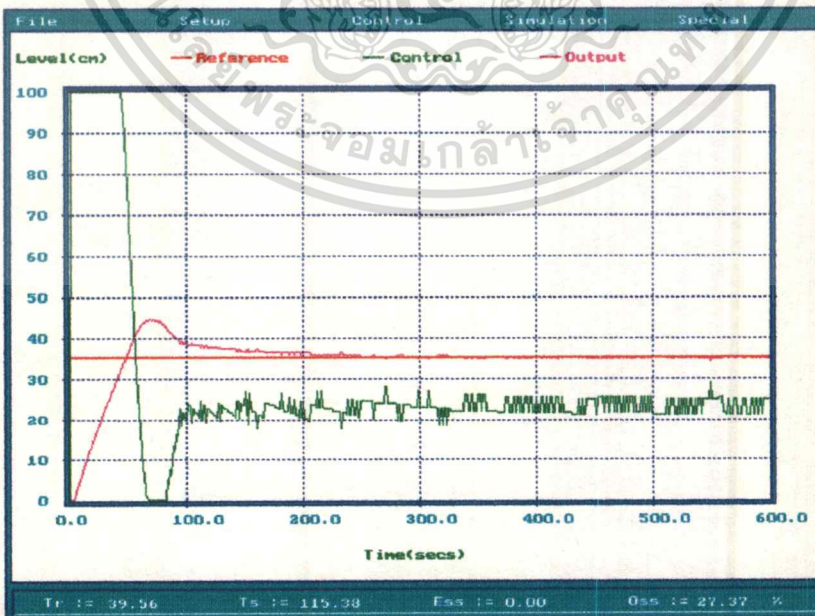
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 36



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดียว
ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

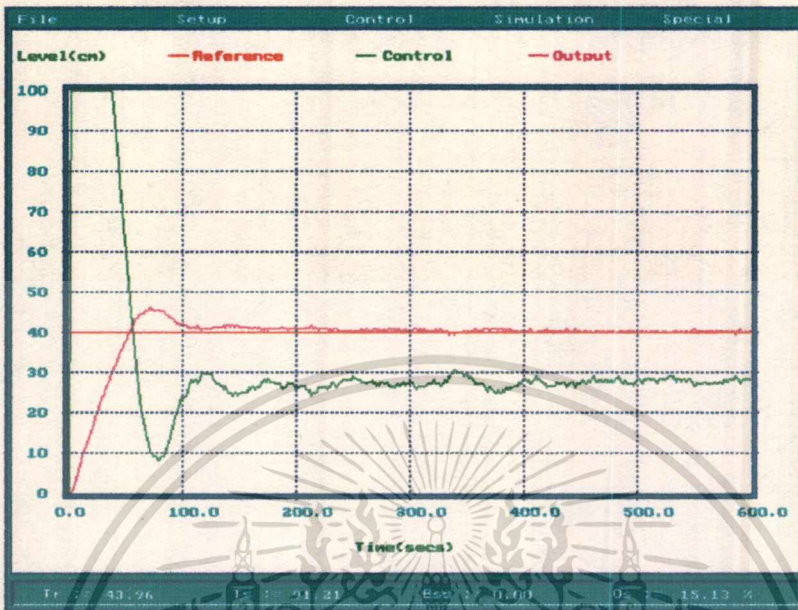
ภาพที่ 37



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดียว

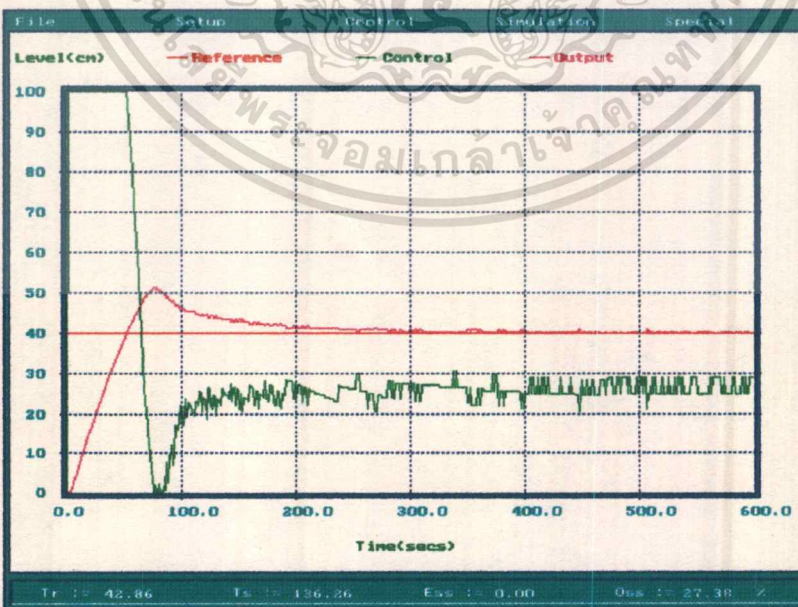
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 38



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดี่ยว
ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

ภาพที่ 39



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดี่ยว
ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI

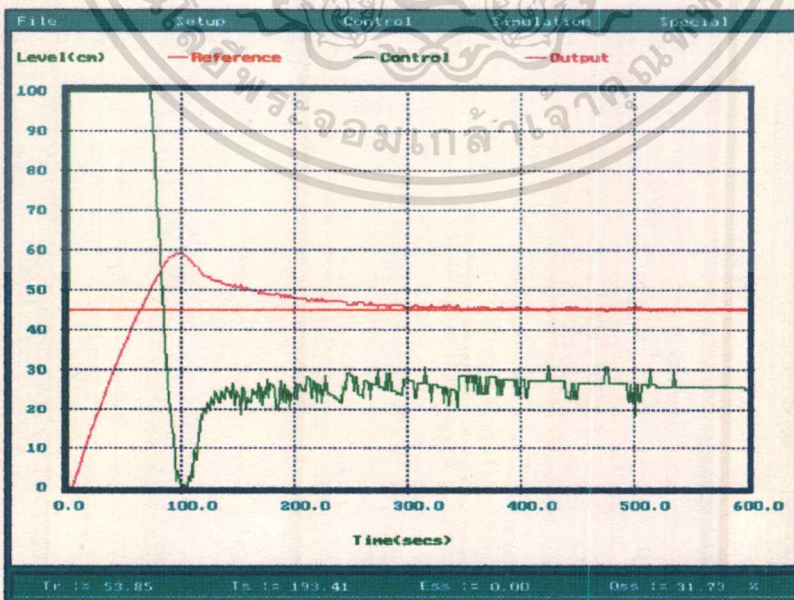
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 40



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดี่ยว
ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 45 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

ภาพที่ 41



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดี่ยว

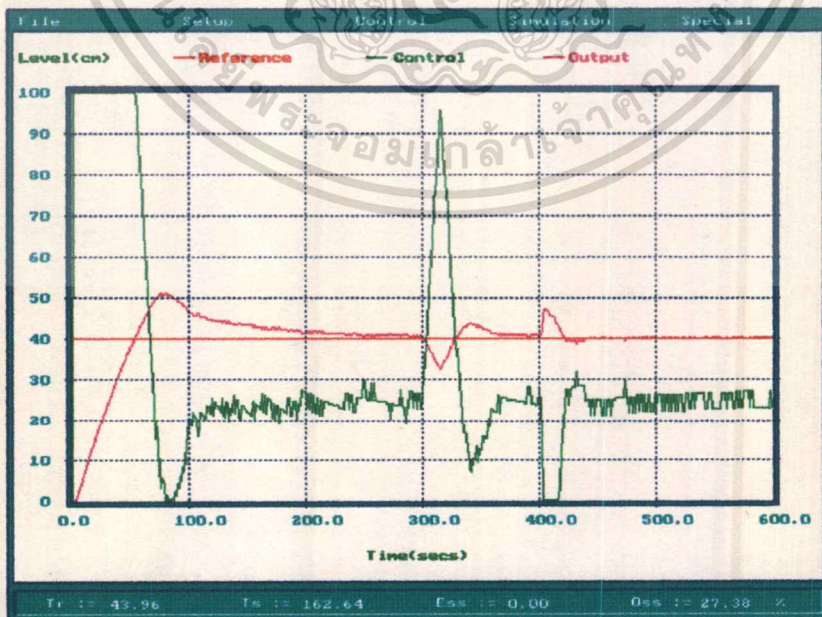
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยสถาบันวิจัยระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 42



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดี่ยวที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก

ภาพที่ 43



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดี่ยว

ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4

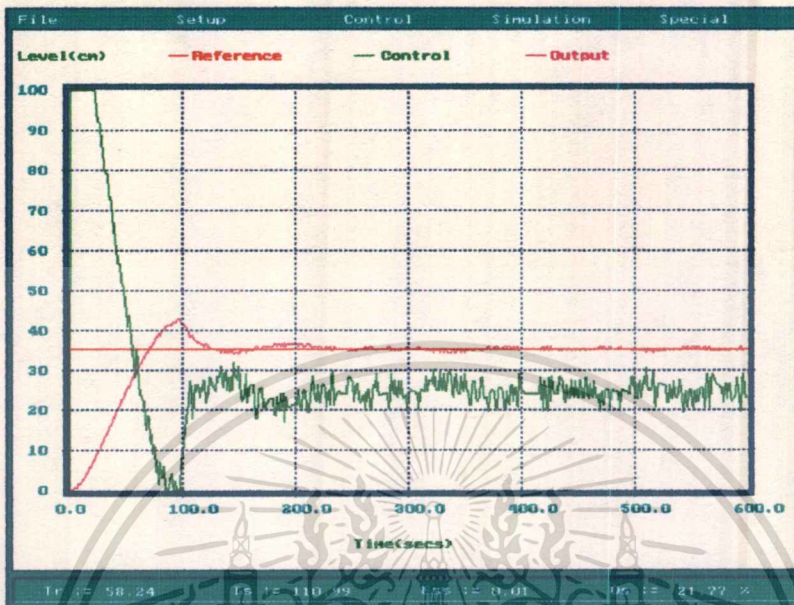
แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ กับระบบควบคุม PI ในการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเตี่ยวเมื่อกำหนดให้กระบวนการมีพารามิเตอร์ต่างกัน

สมรรถนะของการควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเตี่ยว					
กระบวนการ	ชนิดตัวควบคุม	Tr (Secs)	Ts (Secs)	Ess (%)	Os (%)
$G_{min}(s) = \frac{1.42}{100s + 1}$	ROBUST H_∞	41.76	88.52	0.01	17.57
	PI	39.56	115.38	0.00	27.37
$G_{nom}(s) = \frac{182}{140s + 1}$	ROBUST H_∞	43.96	92.31	0.00	15.13
	PI	42.86	136.26	0.00	27.38
$G_{max}(s) = \frac{215}{200s + 1}$	ROBUST H_∞	49.45	108.79	0.00	17.58
	PI	53.85	193.41	0.00	31.73

การควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีสองถัง

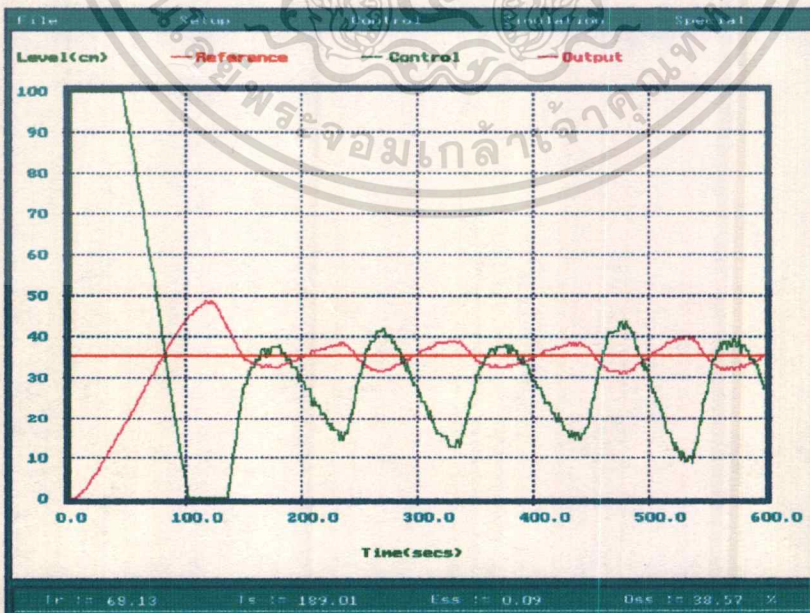
ทดลองควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีสองถังด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ที่ได้ ออกแบบแล้วในหน้า 52 และใช้ตัวควบคุม PI ที่มีค่า $K_p=8$ และ $K_i=0.05$ ทดลองเชิงเปรียบเทียบ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบความคงทนของระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง โดยการกำหนดให้ระบบมีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 35 เซนติเมตร 40 เซนติเมตร และ 45 เซนติเมตร ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 44 ถึง 49 และส่วนที่สองเป็นการทดสอบผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอก ผลการทดลองระดับน้ำกรณีสองถังขณะที่ถูกรบกวนจากภายนอกด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ และตัวควบคุม PI แสดงดังภาพที่ 50 และ 51 ตามลำดับ โดยที่การรบกวนจากภายนอกนี้เกิดจากการปิดเครื่องสูบน้ำเป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 300$ วินาที และเติมน้ำลงใน TANK-2 ที่เวลา $t = 400$ วินาที

ภาพที่ 44



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง
ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞}

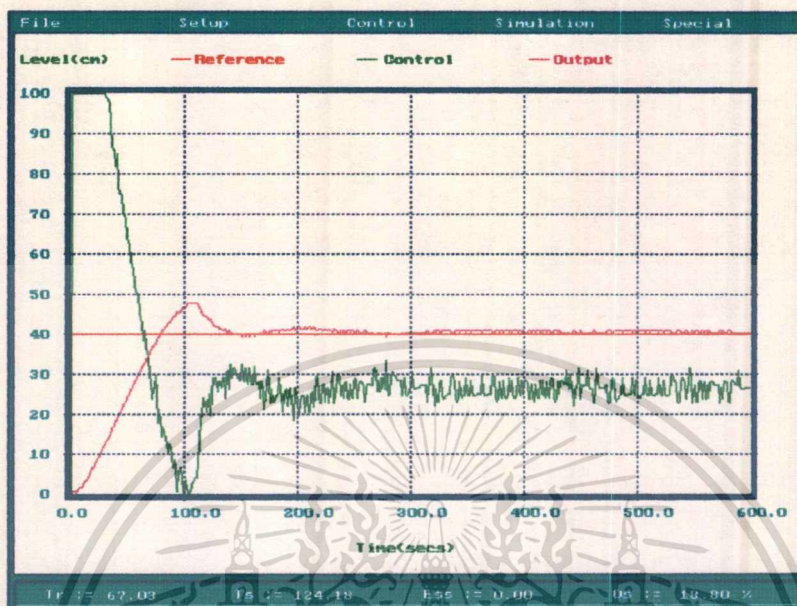
ภาพที่ 45



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง

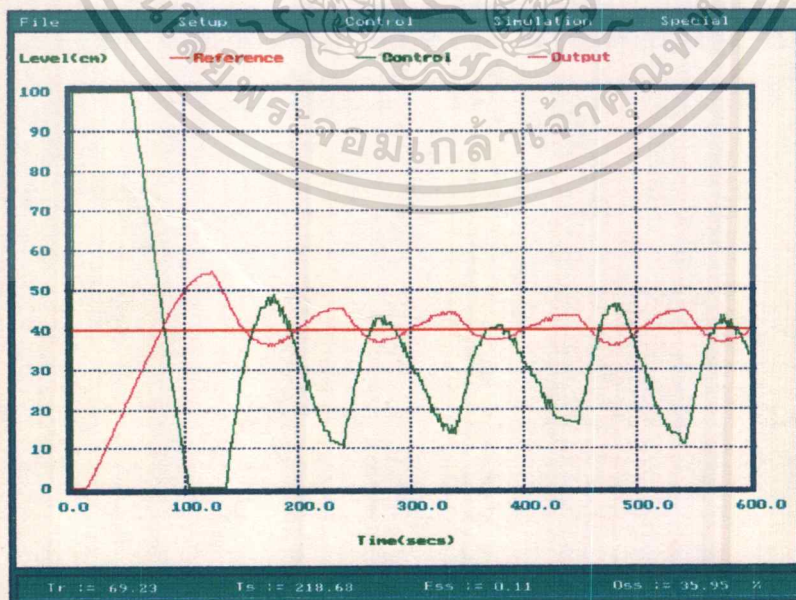
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 46



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถึงที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

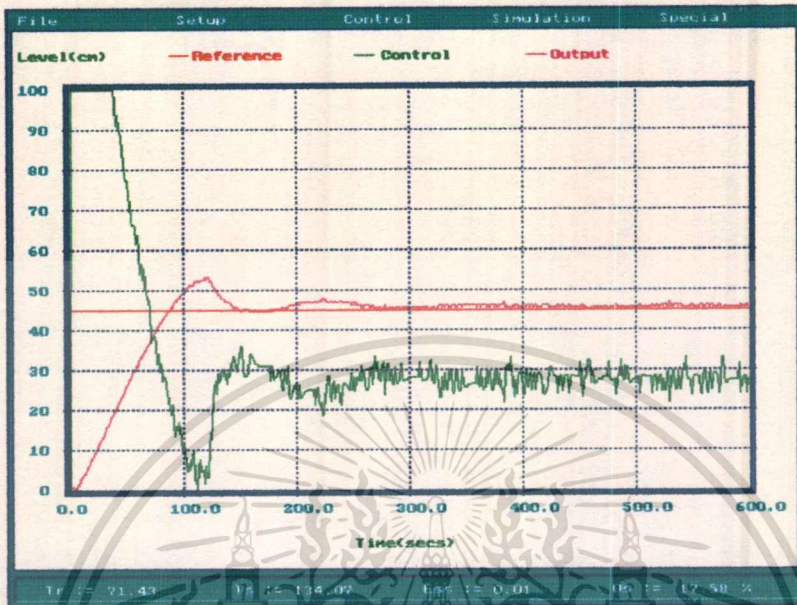
ภาพที่ 47



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถึง

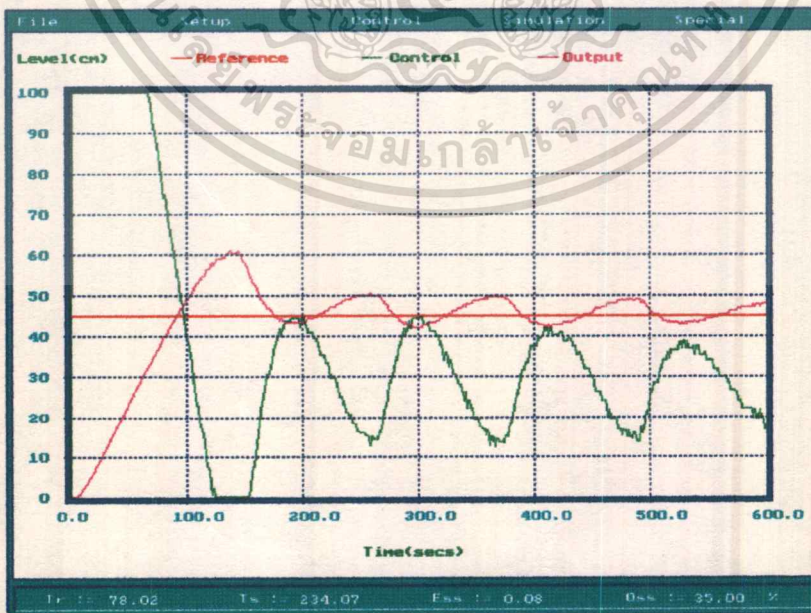
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 48



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถังที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 45 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞}

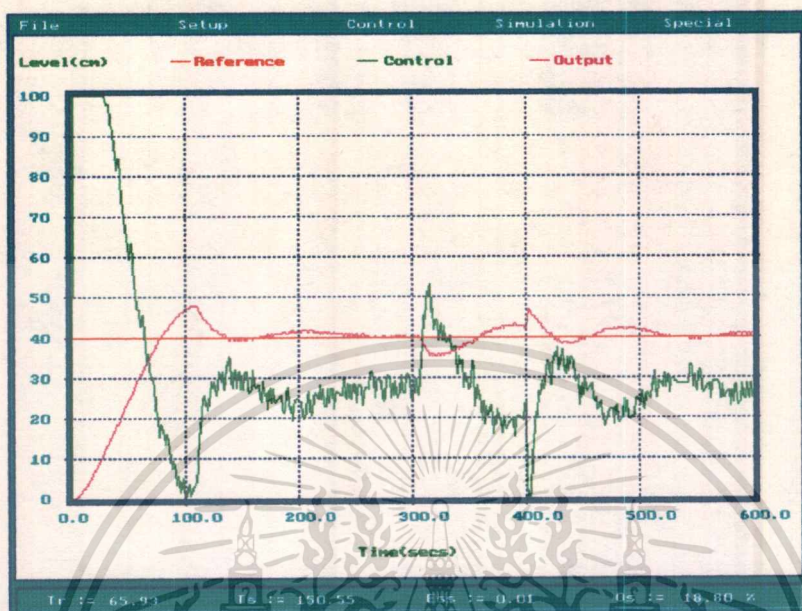
ภาพที่ 49



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง

ที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 45 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 50



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถึงที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞} เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก

ภาพที่ 51



แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถึง

ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก ประโยชน์ด้านการคำนวณที่ง่ายกว่าและไม่รบกวนสัญญาณอื่น ๆ อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5

แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมโรบัสต์ H_{∞} กับระบบควบคุม PI ในการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถังเมื่อกำหนดให้กระบวนการมีพารามิเตอร์ต่างกัน

สมรรถนะของการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง					
กระบวนการ	ชนิดตัวควบคุม	Tr (Secs)	Ts (Secs)	Ess (%)	Os (%)
$G_{\min}(s) = \frac{1.48}{1500s^2 + 115s + 1}$	ROBUST H_{∞}	58.24	101.99	0.01	21.77
	PI	68.13	189.01	0.09	38.57
$G_{\text{nom}}(s) = \frac{1.58}{3300s^2 + 140s + 1}$	ROBUST H_{∞}	67.03	124.18	0.01	18.80
	PI	69.23	218.68	0.11	35.95
$G_{\max}(s) = \frac{1.9}{3900s^2 + 160s + 1}$	ROBUST H_{∞}	71.43	134.07	0.01	17.58
	PI	79.02	234.07	0.08	35.00

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีดังเดี่ยวและกรณีสองถัง ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞} และควบคุมด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบไว้ พบว่า ตัวควบคุมโรบัสต์ H_{∞} สามารถควบคุมระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงและมีการรบกวนจากภายนอกได้ดี โดยที่ในช่วงเวลาสถานะชั่วครู่ ระบบควบคุมโรบัสต์ H_{∞} สามารถควบคุมให้ระบบมีค่าพุ่งเกินน้อยกว่าระบบควบคุม PI และช่วงเวลาขึ้นของระบบควบคุมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วงสถานะอยู่ตัว ระบบควบคุมโรบัสต์ H_{∞} ก็สามารถควบคุมให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าระบบควบคุม PI โดยที่ความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวของระบบควบคุมทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อนำเอาผลการตอบสนองของการควบคุมระดับน้ำกรณีดังเดี่ยวที่อินพุตอยู่ที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร ซึ่งเป็นพลาเน็ตที่ระบุด้วยตัวโรบัสต์ H_{∞} เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วยตัวควบคุม PI ในเชิงตัวเลข จะเห็นว่า ผลการตอบสนองของระบบควบคุมโรบัสต์ H_{∞} มีช่วงเวลาขึ้น Tr ช้ากว่าระบบควบคุม PI 2.5% ช่วงเวลาเข้าที่ Ts เร็วกว่า 32.25 % และมีค่าพุ่งเกิน Os ต่ำกว่าการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม PI 47.7% ส่วนผลการตอบสนองของการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถังนั้น จะเห็นว่า ระบบควบคุมโรบัสต์ H_{∞} สามารถควบคุมให้ระบบมีช่วงเวลาขึ้นเร็วกว่าระบบควบคุม PI 3.18 % ช่วงเวลาเข้าที่ Ts เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าระบบควบคุม PI 43.31 % และมีค่าพุ่งเกินต่ำกว่าระบบควบคุม PI 35.43 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้ว ในการทดลองควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการทั้งกรณีถังเดียวและสองถัง ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่า ในการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ไม่ต้องปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ส่วนตัวควบคุม PI นั้น จะต้องปรับแต่งค่า K_p และ K_i เพื่อให้มีผลการตอบสนองที่ดี โดยการปรับแต่งนี้จะต้องทำหลาย ๆ ครั้ง ในการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี Zeigler–Nichols นั้น มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้ค่าที่คำนวณผิดพลาด เช่น การลากเส้นให้สัมผัสกับผลการตอบสนองของระบบควบคุมวงรอบเปิดที่มีความชันมากที่สุด เพื่อหาค่า T นั้น อาจมีค่าผิดพลาด หรืออาจเกิดจากการใช้สเกลแสดงผลการทดลองเพื่อหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดในย่านที่ไม่เหมาะสม เช่น ช่วงเวลาการแสดงผลนานเกินไป เป็นต้น จึงทำให้ค่าคงตัวเวลา T และเวลาไร้ผลสนอง L ที่อ่านได้จึงมีค่าผิดพลาดจากความเป็นจริง

ในการทดสอบประสิทธิภาพในการลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอก พบว่า เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก ระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ สามารถควบคุมให้ผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าระบบควบคุมแบบ PI ส่วนการทดสอบประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเซนเซอร์นั้น ได้ทดสอบกับโปรแกรม Simulink ซึ่งจะเป็นการจำลองการทำงานของระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก จ. จะเห็นว่า ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเซนเซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ สำหรับระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัว ระบบที่มีการรบกวนจากภายนอกหรือสัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์นอยส์และระบบที่มีปัญหาเรื่องออฟเซต นอกจากนี้แล้ว ได้พัฒนาโปรแกรมควบคุมระบบบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลด้วยภาษาซี ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบทั้งหมดและโปรแกรมควบคุมกระบวนการในเวลาจริง การจำลองระบบทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง ซึ่งจะลดความเสี่ยงที่จะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเสียหาย โปรแกรมนี้มีให้เลือกทั้งตัวควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ และตัวควบคุมแบบ PI เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมควบคุมกันไปได้ ผลการตอบสนองของระบบสามารถเก็บไว้ในแผ่นบันทึกและสามารถเรียกข้อมูลมาดูในอนาคตได้

ในการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ที่นำเสนอนี้ ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการควบคุมแบบโรบัสต์ ในส่วนนี้จะทำหน้าที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัว ส่วนที่สองเป็นการควบคุมแบบ H_∞ ส่วนนี้เกี่ยวกับสัญญาณรบกวนจากภายนอกและเซนเซอร์นอยส์ โดยการออกแบบจะพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการรบกวนเหล่านี้ และส่วนสุดท้ายเป็นการควบคุมแบบอินทิกรัลเซอร์โว เป็นส่วนที่สร้างขึ้นสำหรับระบบที่มีปัญหาเรื่องออฟเซตหรือระบบชนิด 0 หลักการควบคุมในส่วนนี้จะต้องเพิ่มอินทิเกรเตอร์เข้าไปในระบบ เพื่อให้โครงสร้างของระบบเป็นระบบที่เรียกว่า อินทิกรัลเซอร์โวหรือเซอร์โวชนิด 1 ซึ่งจะมีผลทำให้การตอบสนองที่สภาวะคงตัวมีออฟเซตเป็นศูนย์หรือทำให้เอาต์พุตของระบบเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงโดยอัตโนมัติ

การทดลองควบคุมระดับน้ำกรณีถึงเดียวและกรณีสองถึงในเวลาจริง พบว่า ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ที่ได้จากการออกแบบไว้ สามารถควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งเกิดจากการกำหนดให้อินพุตอ้างอิงเปลี่ยนแปลงจากระดับน้ำ 35 เซนติเมตร ถึง ระดับน้ำ 45 เซนติเมตร ได้โดยไม่ต้องปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมระบบมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดี และมีออฟเซตเป็นศูนย์ แต่เมื่อใช้ตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า ค่าที่คำนวณได้ ยังไม่สามารถควบคุมให้ระบบมีผลการตอบสนองที่ดี จะต้องปรับแต่ง K_p และ K_i ให้มีค่าเหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI สำหรับกระบวนการอันดับสอง เป็นเรื่องที่ยุ่งยากมาก

การทดสอบประสิทธิภาพในการลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอก และลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเซนเซอร์นอยส์ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ จะเห็นว่า เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก ผลการตอบสนองของระบบจะเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็ว แต่เมื่อพิจารณาการรบกวนที่เกิดจากเซนเซอร์นอยส์ จะเห็นว่า ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเซนเซอร์นอยส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาให้ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ มีประสิทธิภาพมากขึ้น คือการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ให้กับระบบที่มีเวลาไร้ผลสนอง (*dead time*) และศึกษากรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ใช้ทดลองมีขอบเขตกว้างขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] G. Zames, "Feedback and Optimal Sensivity : Model Reference Transformations, Multiplicative Seminorms and Approximate Inverse," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-26, pp. 301-320, 1989.
- [2] B. A. Francis, "A Course in H_∞ Control Theory," Berlin: Springer-Verlag, 1987.
- [3] J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonegar and B. A. Francis, "State-Space solutions to Standard H_2 and H_∞ Control problems," IEEE Trans. Automat. Contr., vol.34, pp. 831-847, 1989.
- [4] X. P. Li and B. C. Chang, "On Convexity of H_∞ Riccati Solutions and its Applications," IEEE Trans. Automat. Contr., vol.38, pp. 963-966, 1993.
- [5] P. P. Khargonegar, I. R. Petersen and K. Zhou, "Robust Stabilization of Uncertain Linear Systems : Quadratic Stabilizability and H_∞ Control Theory," IEEE Trans. Automat. Contr., vol.35, pp. 356 - 361, 1990.
- [6] L. Xie, M. Fu and C. E. de Souza, " H_∞ Control and Quadratic Stabilization of Systems with Parameter Uncertainty Via Output Feedback," IEEE Trans. Automat. Contr., vol.37, pp. 1253 - 1256, 1992.
- [7] K. Gu, " H_∞ Control of Systems Under Norm Bounded Uncertainties in all System Matrices," IEEE Trans. Automat. Contr., vol.39, pp.1320 - 1322, 1994.
- [8] J. Ngamwiwit, N. Komine and M. Iida, "Robust Integral Servo Problem in Uncertain Linear Systems", Regional Symposium on Telecommunications Electronics Circuit and Systems, Faculty of Engineering KMITL, pp. E-17 - E-22, 1996.
- [9] สุเมธ เขาวนไวย, จงกล งามวิวิทย์, N. Komine และ M. Iida, "การควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ สำหรับระบบเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัวด้วยอินทริกัลเซอร์โว" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า CT-21 - CT-25 พ.ศ.2539.
- [10] M. G. Safonov and D. J. N. Limebeer, "Simplifying the H_∞ theory via loop shifting," in Proc. 27th IEEE Trans. Conf. Decision Contr., Austin, TX, 1988.
- [11] M. Green and D. J. N. Limbeer, "Linear Robust Control," New Jersey : Printice Hall Inc., 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] สุเมธ เซาว์นไวย , จงกล งามวิวิทย์ และ Michihiko Iida. “การออกแบบตัวควบคุม H_{∞} สำหรับเชิงเส้น” วิศวสารลาดกระบัง ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 หน้า 50-52 พ.ศ. 2538
- [13] D. M. Etter, “Engineering Problem Solving with Matlab,” New Jersey : Printice Hall, Inc., 1993.
- [14] B. Shahiam and M. Hassul, “Control System design Using Matlab,” New Jersey : Printice Hall Inc., 1993.
- [15] สมพัฒน์ รุ่งตะวันเรืองศรี, “เรียนรู้คอมพิวเตอร์กราฟิกส์ 2 มิติ ด้วยภาษา C” กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น พ.ศ. 2535
- [16] กิตติ ตีระเศรษฐ, “อุปกรณ์วัดและควบคุมในกระบวนการ” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2535





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

โปรแกรมสำหรับออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมสำหรับออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

โปรแกรม SSG2GD.M

โปรแกรมสำหรับแปลงระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงที่อยู่ในรูปโซโรเกต หรือระบบที่แยกพารามิเตอร์ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงและส่วนที่พารามิเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงออกจากกัน เป็นระบบมาตรฐาน GD โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาเป็น toolbox สำหรับโปรแกรม MATLAB มีชื่อโปรแกรมว่า SSG2GD.M จะใช้โปรแกรมนี้ได้จะต้องป้อนอินพุต A, B1, B2, C1, C2, D11, D12, D21, D22, H1, H2, H3, E1, E2 และ E3

```
% <<<<<<- Transfer Original System to Sorogate System ->>>>>>
clc;
disp(' ');
disp(' ');
disp(' <<<<<<- Transfer Original System to Sorogate System ->>>>>>');
disp(' ');
disp(' ');
EP = input('Please Enter Epselon Value : ');
Rho = input('Please Enter Rho Value : ');
gam = input('Please Enter Gamma Value : ');
sa=size(A);
sa=sa(1);
A_=[A zeros(sa,1); -C2 0];
B1_ = [sqrt(EP)*H1*Rho B1/gam zeros(sa,1) zeros(sa,1) ; -sqrt(EP)*H3*Rho -
D21/gam 0 1/gam];
B2_=[B2 ; -D22];
se1=size(E1);
se1=se1(1);
C1_ = [E1/sqrt(EP) zeros(se1,1); C1 Cp];
sh = size(H2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sh2 = sh(2);
se2 = size(E2);
se2 = se2(1);
sd11 = size(D11);
sd11 = sd11(1);
D11_ = [zeros(se2,sh2) E2/sqrt(EP) zeros(se2,1) zeros(se2,1)
        sqrt(EP)*H2*Rho D11/gam zeros(sd11,1) zeros(sd11,1) ];
D12_ = [E3/sqrt(EP) ; D12] ;
sc2 = size(C2);
sc2 = sc2(2);
C2_ = [zeros(1,sc2) 1];
sh1 = size(H1);
sh1 = sh1(2);
sb1 = size(B1);
sb1 = sb1(2);
D21_ = [zeros(1,sh1) zeros(1,sb1) Dp/gam 0];
D22_ = 0;
% <<<<<<<- Transfer Sorogate System to GD Standard Form ->>>>>>>
clc;
disp(' ');
disp(' ');
disp(' <<<<<<<- Transfer Sorogate System to GD Standard Form ->>>>>>>');
disp(' ');
disp(' ');
[u12,s12,v12] = svd(D12_);
U12 = fliplr(u12);
S12 = flipud(s12);
V12 = v12;
[u21,s21,v21] = svd(D21_);
U21 = u21;
S21 = fliplr(s21);
V21 = fliplr(v21);
S12 = s12(1,1);
S21 = s21(1,1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Agd = A_;
B1gd = B1_*V21;
B2gd = B2_*V12*(1/S12);
C1gd = U12'*C1_ ;
D11gd = U12'*D11_*V21 ;
D12gd = U12'*D12_*(1/S12);
C2gd = (1/S21)*U21*C2_ ;
D21gd = (1/S21)*U21'*D21_*V21 ;
D22gd = 0;
a = Agd ;
b1 = B1gd ;
b2 = B2gd ;
c1 = C1gd ;
d11 = D11gd ;
d12 = D12gd ;
c2 = C2gd ;
d21 = D21gd ;
d22 = D22gd ;

```

โปรแกรม RHICON.M

โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมสำหรับออกแบบตัวควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาเป็น toolbox สำหรับโปรแกรม MATLAB มีชื่อโปรแกรมว่า RHICON.M จะใช้โปรแกรมนี้ได้จะต้องป้อนอินพุต a,b1,b2,c1,c2,d11,d12,d21 และ d22 ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากโปรแกรม SSG2GD

```

% <<<<<<<<<< checking conditions >>>>>>>>
n=size(a) ; n=n(1) ; m1=size(b1) ; m1 = m1(2) ; m2=size(b2) ;m2=m2(2);
p1=size(c1) ; p1=p1(1) ;p2=size(c2) ; p2=p2(1) ; gam2=1/(gam*gam);
rank1=rank([a b2;c1 d12]);
if rank1~=n+m2, disp('rank1 fails :no solution'),end
rank2=rank([a b1;c2 d21]);
if rank1~=n+p2, disp('rank2 fails :no solution'),end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยทางศูนย์วิจัยและพัฒนาปัญญาประดิษฐ์และระบบอัตโนมัติของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
 ไม่ว่าการณีใดที่ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clc;
disp('Forming the Hamiltonian matrix and solving the Riccati equation')
disp('')
disp('')
a1 = a - b2*d12'*c1;
c1_ = c1 - d12*d12'*c1;
a2 = a - b1*d21'*c2;
b1_ = b1 - b1*d21'*d21;
ahx = a1;
bhx = gam2*b1*b1' - b2*b2';
chx = -c1_'*c1_;
dhx = -a1';
ahy = a2';
bhy = gam2*c1'*c1 - c2'*c2;
chy = -b1_*b1_';
dhy = -a2;
xi = are(ahx,-bhx,-chx)
disp(' ')
disp(' ')
yi = are(ahy,-bhy,-chy)
% <<<<<<<<< checking conditions >>>>>>>>
xeig = min(real(eig(xi)));
if xeig < 0 , disp('x < 0 no solution'),end
yeig = min(real(eig(yi)));
if yeig < 0 , disp('y < 0 no solution') ,end
rho = max(real(eig(xi*yi)));
if rho > (gam*gam),disp('rho fails : no solution') ,end
disp(' ')
disp(' ')
disp('          (strike a key to continue ...)')
pause;clc;
% <<<<<<<<< compute gain and compensator >>>>>>>>
disp('          compute gain and compensator')
fi = -b2'*xi;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

li = -yi*c2';
zi = inv(eye(n) - gam2*yi*xi);
ai = a + gam2*b1*b1'*xi + b2*fi + zi*li*c2;
ak = ai
bk = -zi*li;
ck = fi;
dk = zeros(m2,p2);
ak
bk
ck
dk
disp('      (strike a key to continue ...)')
pause;clc
disp('      compute gain and compensator K2(s)')
disp(' ')
disp(' ')
[num,den] = ss2tf(ak,bk,ck,dk,1);
num
den
disp(' ')
disp(' ')
disp('      compute gain and compensator K(s)')
disp(' ')
disp(' ')
num=(1/S12)*num*(1/S21)
den=den

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞

กระบวนการอันดับหนึ่ง

กระบวนการอันดับหนึ่งที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ขอบเขตต่ำสุดของพลาเน็ต} \quad G_{\min}(s) &= \frac{1.42}{100s+1} \\ \text{พลาเน็ตที่ระบุ} \quad G_{\text{nom}}(s) &= \frac{1.85}{140s+1} \\ \text{ขอบเขตสูงสุดของพลาเน็ต} \quad G_{\max}(s) &= \frac{2.15}{200s+1} \end{aligned}$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสเตตสเปซที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -ax(t) + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \end{bmatrix} w(t) + b_2 u(t) \\ z(t) &= \begin{bmatrix} c_1 \\ 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & d_{11} \\ d_{11} & 0 \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ d_{12} \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= c_2 x(t) + \begin{bmatrix} 0 & d_{21} \end{bmatrix} w(t) + d_{22} u(t) \end{aligned}$$

กำหนดให้พารามิเตอร์ทุกตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงของระบบข้างต้น มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} a &= 0.0071 + 0.01f(t) \\ b_1 &= 0.001 + 0.01f(t) \\ b_2 &= 1 + f(t) \\ c_1 &= 0.1 + 0.5f(t) \\ d_{11} &= 0 + 0.5f(t) \\ d_{12} &= 1 + 0.5f(t) \\ c_2 &= 0.0132 + 0.005f(t) \\ d_{21} &= 0.001 + 0.005f(t) \\ d_{22} &= 0 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วจะเขียนสัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์แต่ละตัวของระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงได้ดังนี้

$$A + \Delta A = [-0.0071] + [0.01f(t)]$$

$$B_1 + \Delta B_1 = [0.001 \ 0] + [0.01f(t) \ 0]$$

$$B_2 + \Delta B_2 = [1] + [f(t)]$$

$$C_1 + \Delta C_1 = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5f(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{11} + \Delta D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0.5f(t) \\ 0.5f(t) & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{12} + \Delta D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5f(t) \end{bmatrix}$$

$$C_2 + \Delta C_2 = [0.0132] + [0.005f(t)]$$

$$D_{21} + \Delta D_{21} = [0 \ 0.001] + [0 \ 0.005f(t)]$$

$$D_{22} + \Delta D_{22} = [0] + [0]$$

โดยเทอมที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้น สามารถแยกเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta A = [0.01f(t)] = [1]f(t)[0.01]$$

$$\Delta B_1 = [0.01f(t) \ 0] = [1]f(t)[0.005 \ 0]$$

$$\Delta B_2 = [f(t)] = [1]f(t)[1]$$

$$\Delta C_1 = \begin{bmatrix} 0.5f(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(t) & 0 \\ 0 & f(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5f(t) \\ 0.5f(t) & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(t) & 0 \\ 0 & f(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5f(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(t) & 0 \\ 0 & f(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta C_2 = [0.005f(t)] = [0.005]f(t)[1]$$

$$\Delta D_{21} = [0 \ 0.005f(t)] = [0.005]f(t)[0 \ 1]$$

$$\Delta D_{22} = [0] = [0.005]f(t)[0]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่าของ ΔA , ΔB_1 , ΔB_2 , ΔC_1 , ΔD_{11} , ΔD_{12} , ΔC_2 , ΔD_{21} และ ΔD_{22} มาเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.005 \end{bmatrix} F(t) \begin{bmatrix} 0.01 & 0.005 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

นำเอาค่า $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}, H_1, H_2, H_3, E_1, E_2, E_3$ ที่หามาได้ และให้ $C_1 = 0.1, D_1 = 0.01$ เมื่อใช้โปรแกรม SSG2GD.M แปลงระบบโซโรเกตในรูปอินทิกรัลเซอร์โวเป็นระบบมาตรฐาน GD โดยกำหนดให้ $\varepsilon = 10, \gamma = 10, \rho = 0.2$ เมื่อระบบอยู่ในรูปมาตรฐาน GD แล้ว ก็สามารถออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ได้จากโปรแกรม RHICON.M ได้ดังนี้

$$K(s) = \frac{213.44s + 1.62}{s(s^2 + 100.46s + 40.59)}$$

กระบวนการอันดับสอง

กระบวนการอันดับสองที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

ขอบเขตต่ำสุดของพลาเน็ต $G_{\min}(s) = \frac{1.48}{1500s^2 + 115s + 1}$

เมื่อ $\tau_1 = 100$ วินาที และ $\tau_2 = 15$ วินาที

พลาเน็ตที่ระบุ $G_{\text{nom}}(s) = \frac{1.58}{3300s^2 + 140s + 1}$

เมื่อ $\tau_1 = 110$ วินาที และ $\tau_2 = 30$ วินาที

ขอบเขตสูงสุดของพลาเน็ต $G_{\max}(s) = \frac{1.9}{3900s^2 + 160s + 1}$

เมื่อ $\tau_1 = 130$ วินาที และ $\tau_2 = 30$ วินาที

จากฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสเตตสเปซที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัวได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & d_{11} \\ d_{11} & 0 \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ d_{12} \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = c_2(t) + \begin{bmatrix} 0 & d_{21} \end{bmatrix} w(t) + d_{22} u(t)$$

กำหนดให้พารามิเตอร์ทุกตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงของระบบข้างต้น มีค่าดังนี้

$$a_1 = 0.042 + 0.05f(t)$$

$$a_2 = 0.0003 + 0.005f(t)$$

$$b_1 = 0.001 + 0.01f(t)$$

$$b_2 = 1 + f(t)$$

$$c_1 = 0.1 + 0.05f(t)$$

$$d_{11} = 0 + 0.5f(t)$$

$$d_{12} = 1 + 0.5f(t)$$

$$c_2 = 0.0048 + 0.001f(t)$$

$$d_{21} = 0.001 + 0.005f(t)$$

$$d_{22} = 0$$

แล้วจะเขียนสัมประสิทธิ์ของเมทริกซ์แต่ละตัวของระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงได้ดังนี้

$$A + \Delta A = \begin{bmatrix} -0.042 & 0.0003 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.05f(t) & 0.005f(t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 + \Delta B_1 = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.01f(t) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_2 + \Delta B_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 + \Delta C_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.05f(t) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{11} + \Delta D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0.5f(t) \\ 0.5f(t) & 0 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{12} + \Delta D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5f(t) \end{bmatrix}$$

$$C_2 + \Delta C_2 = [0 \ 0.0048] + [0 \ 0.001f(t)]$$

$$D_{21} + \Delta D_{21} = [0 \ 0.001] + [0 \ 0.005f(t)]$$

$$D_{22} + \Delta D_{22} = [0] + [0]$$

โดยเทอมที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้น สามารถแยกเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0.05f(t) & 0.005f(t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} f(t) \begin{bmatrix} 0.05 & 0.005 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta B_1 = \begin{bmatrix} 0.01f(t) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} f(t) \begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta B_2 = \begin{bmatrix} f(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} f(t) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta C_1 = \begin{bmatrix} 0.05f(t) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} f(t) \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5f(t) \\ 0.5f(t) & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} f(t) \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5f(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} f(t) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta C_2 = [0 \ 0.001f(t)] = [0 \ 0.001] f(t) \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta D_{21} = [0 \ 0.005f(t)] = [0 \ 0.001] f(t) \begin{bmatrix} 0 & 5 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta D_{22} = [0] = [0 \ 0.001] f(t) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

จากนั้นนำค่าของ ΔA , ΔB_1 , ΔB_2 , ΔC_1 , ΔD_{11} , ΔD_{12} , ΔC_2 , ΔD_{21} และ ΔD_{22} มาเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix} \cdot f(t) \cdot \begin{bmatrix} 0.05 & 0.005 & 0.01 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเอาค่า $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}, H_1, H_2, H_3, E_1, E_2, E_3$ ที่หามาได้ และให้ $C_+ = 0.1, D_+ = 0.01$ เมื่อใช้โปรแกรม SSG2GD.M แปลงระบบโซ่โรเกตในรูปอินทิกรัล เซอร์โวเป็นระบบมาตรฐาน GD โดยกำหนดให้ $\epsilon = 10, \gamma = 30, \rho = 0.5$ เมื่อระบบอยู่ในรูปมาตรฐาน GD แล้ว ก็สามารถออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ได้จากโปรแกรม RHICON.M ได้ดังนี้

$$K(s) = \frac{47780s^2 + 5577s + 2}{s^3 + 100.57s^2 + 146.66s + 89.15}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

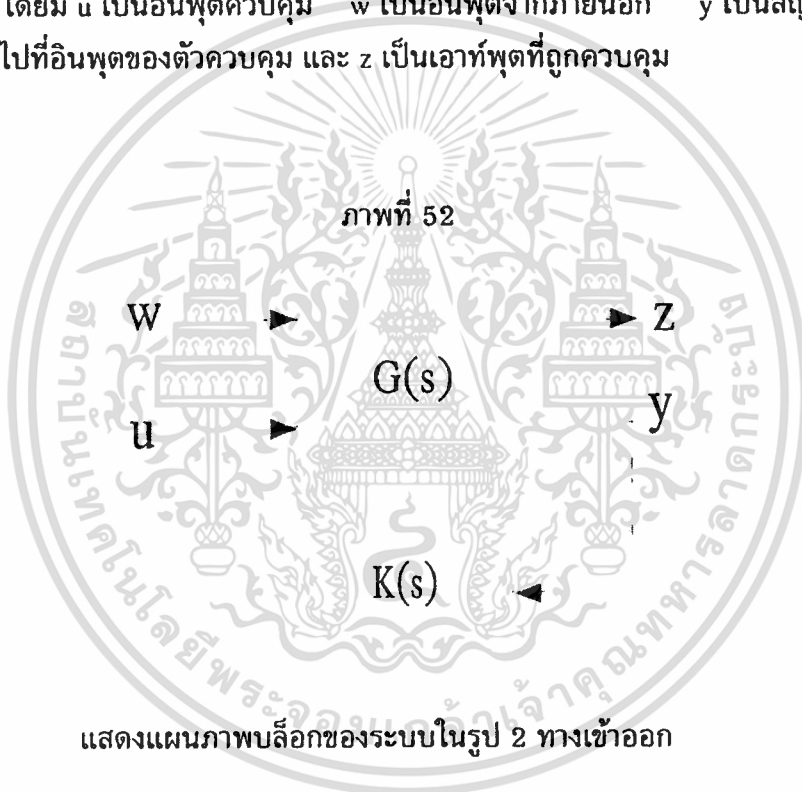
ภาคผนวก ค.

โครงสร้างของระบบควบคุมแบบ H_∞
ขณะที่พารามิเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ภาคผนวก ค.

โครงสร้างของระบบควบคุมแบบ H_∞ ขณะที่พารามิเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

แผนภาพบล็อกดังภาพที่ 52 แสดงระบบควบคุมในรูป 2 ทางเข้าออก ประกอบด้วย แผนภาพบล็อก 2 บล็อกคือ ฟลานต์และตัวควบคุม ในส่วนของฟลานต์ $G(s)$ มี 2 อินพุต และ 2 เอาท์พุต โดยมี u เป็นอินพุตควบคุม w เป็นอินพุตจากภายนอก y เป็นสัญญาณที่วัดได้ และป้อนกลับไปอินพุตของตัวควบคุม และ z เป็นเอาท์พุตที่ถูกควบคุม



ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบหาได้ดังนี้

$$z = P_{zw} w + P_{zu} u \quad (\text{A-1})$$

$$y = P_{yw} w + P_{yu} u \quad (\text{A-2})$$

$$z = T_{zw} = [P_{zw} + P_{zu} K(1 - P_{yu} K)^{-1} P_{yw}] w \quad (\text{A-3})$$

เทอม T_{zw} เรียกว่า *Linear Fractional Transformation (LFT)* ในส่วนของฟลานต์

สามารถเขียนสมการในรูปสเตตสเปซได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \quad (\text{A-4})$$

$$z(t) = C_1 x(t) + C_1 w(t) + C_2 u(t) \quad (\text{A-5})$$

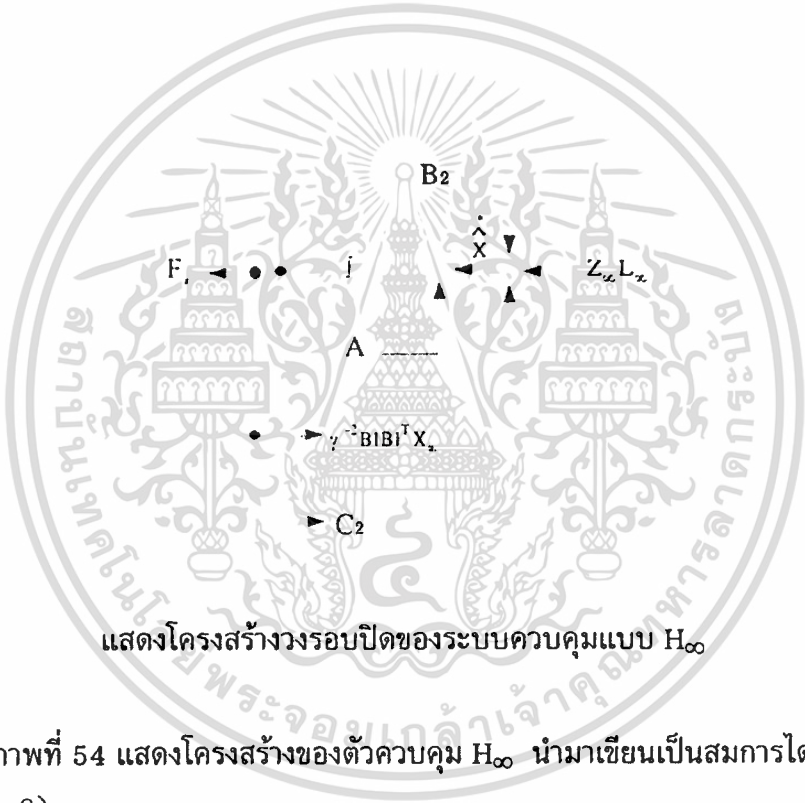
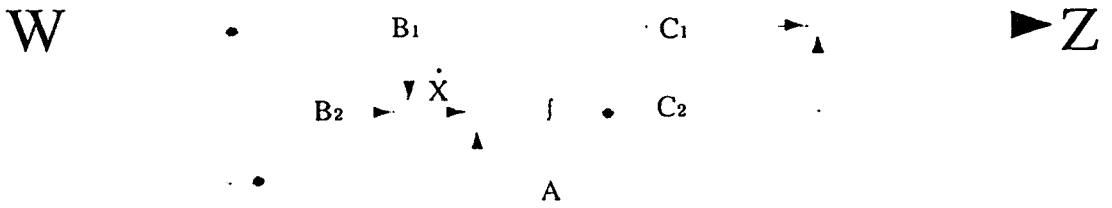
$$y(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t) \quad (\text{A-6})$$

ภาพที่ 53

แสดงโครงสร้างของตัวควบคุม H_∞

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 55



แสดงโครงสร้างวงรอบปิดของระบบควบคุมแบบ H_∞

จากภาพที่ 54 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุม H_∞ นำมาเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (A-7) - (A-8)

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_\infty \hat{x}(t) - Z_\infty L_\infty y(t) \tag{A-7}$$

$$u(t) = F_\infty \hat{x}(t) \tag{A-8}$$

ส่วนภาพที่ 55 แสดงโครงสร้างวงรอบปิดของระบบควบคุมแบบ H_∞ นำมาเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (A-9) - (A-12)

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_2 F_\infty \hat{x}(t) + B_1 w(t) \tag{A-9}$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = -Z_\infty L_\infty C_2 x(t) + \{A + B_2 F_\infty + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_\infty + Z_\infty L_\infty C_2\} \hat{x}(t) - Z_\infty L_\infty D_{21} w(t) \tag{A-10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$z(t) = C_1 x(t) + D_{12} F_{\infty} \hat{x}(t) \quad (\text{A-11})$$

$$y(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t) \quad (\text{A-12})$$

จากสมการที่ (A-9) - (A-12) นำมาเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \hat{x}(t) \\ x(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_2 F_{\infty} \\ -Z_{\infty} L_{\infty} C_2 & A + B_2 F_{\infty} + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_{\infty} + Z_{\infty} L_{\infty} C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \\ x(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ -Z_{\infty} L_{\infty} D_{21} \end{bmatrix} w(t) \quad (\text{A-13})$$

$$\begin{bmatrix} z(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & D_{12} F_{\infty} \\ C_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \\ x(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D_{21} \end{bmatrix} w(t) \quad (\text{A-14})$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวควบคุม H_∞ สำหรับระบบเชิงเส้น

H_∞ Controller Design for Linear Systems

สุเมธ เชาวนไว

จงกล งามวิวิทย์

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Michihiko Iida

Department of Control Engineering, School of Engineering, Tokai University

บทคัดย่อ

ในบทความนี้เป็นกรนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม H_∞ สำหรับระบบเชิงเส้นทั่วไปที่มีการรบกวนจากภายนอกและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์ตรวจวัด นอกจากนี้แล้วยังกล่าวถึงวิธีการหาค่า γ_{\min} ซึ่งเป็นค่า γ ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ระบบยังคงเสถียรภาพ สามารถหาค่าตอบได้อย่างรวดเร็วโดยการแก้สมการ Riccati

Abstract

This paper presents a method for designing H_∞ controllers for linear systems which are disturbed by constant disturbances and measurement noise. The paper also describes the problem of computing γ_{\min} using a very fast algorithm which proceeds by solving Riccati equation.

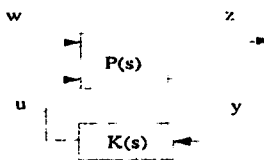
1. บทนำ

การออกแบบตัวควบคุม H_∞ ได้เริ่มต้นเกิดขึ้นมาในระหว่างปี 1980 โดย G. Zames ซึ่งคิดค้นขึ้นมาเพื่อนำไปออกแบบการควบคุมแบบโรบัสต์ วิธีการที่มีชื่อเสียงในการออกแบบระบบควบคุมแบบนี้ คือวิธีการของ DKF [1] บทความนี้จะนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม H_∞ สำหรับระบบเชิงเส้นที่มีการรบกวนแบบคงที่จากภายนอก (constant disturbance) และสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์ตรวจวัด (measurement noise) ซึ่งการออกแบบจะเริ่มต้นจากการหาค่า γ ที่มีค่าน้อยที่สุด เป็นค่าที่ทำให้การรบกวนจากภายนอกมีค่าน้อยที่สุดด้วยอัลกอริทึมที่มีความเร็วสูง [2],[3] หลังจากได้ค่า γ ที่น้อยที่สุด จึงนำไปออกแบบตัวควบคุม

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การควบคุมแบบ H_∞

ไดอะแกรมดังรูปที่ 1 แสดงระบบควบคุมในรูปแบบ 2 พอร์ต ประกอบด้วยบล็อกไดอะแกรม 2 บล็อก คือ แพล้นท์ (plant) $P(s)$ และตัวควบคุม $K(s)$ ในส่วนของแพล้นท์มีอินพุต 2 อินพุต คือ u เป็นอินพุตควบคุม (control input) และ w เป็นอินพุตจากภายนอก (exogenous inputs) และมีเอาต์พุต 2 เอาต์พุต คือ y เป็นสัญญาณที่ป้อนกลับไปอินพุตของตัวควบคุม และ z เป็นเอาต์พุตที่ถูกควบคุม



รูปที่ 1 แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบในรูปแบบ 2 พอร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบที่ยังไม่ต่อตัวควบคุม

K(s) หาได้ดังนี้

$$z = P_{zw}w + P_{zu}u \quad (1)$$

$$y = P_{yw}w + P_{yu}u \quad (2)$$

และเมื่อต่อตัวควบคุม K(s) เข้ากับระบบ จะหา z ได้ดังนี้

$$z = T_{zw} = \{P_{zw} + P_{zu}K(I - P_{yu}K)^{-1}P_{yw}\}w \quad (3)$$

โดยที่ T_{zw} ซึ่งเรียกว่า Linear Fractional Transformation (LFT) เป็นทรานสเฟอร์ฟังก์ชันจาก w ไปยัง z ส่วนแพธล้นท์ P(s) ซึ่งเป็นแพธล้นท์ที่คำนึงถึงการรบกวนจากภายนอก และสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์ตรวจวัด จะเขียนเป็นรูปเศษส่วนได้ดังนี้

$$\dot{x} = Ax + B_1w + B_2u \quad (4)$$

$$z = C_1x + D_{11}w + D_{12}u \quad (5)$$

$$y = C_2x + D_{21}w + D_{22}u \quad (6)$$

จากสมการ (4) - (6) สามารถนำมาเขียนรวมเป็นเมตริกซ์

P(s) ได้เป็น

$$P(s) = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

เมื่อแพธล้นท์ P(s) ไม่คำนึงถึงการรบกวนจากภายนอกและสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ตรวจวัด (w=0) แล้ว จะเขียน P(s) เป็น G(s)

2.2 การหาค่า γ_{inf}

จุดประสงค์ของการควบคุมแบบ H_∞ คือการออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้ค่า $\|T_{zw}\|_\infty$ มีค่าน้อยที่สุด หรือน้อยกว่า γ_{inf} ซึ่งหมายถึงสภาวะของ G(s) และ K(s) เข้าหาศูนย์ทุกๆ ค่าเริ่มต้น และหมายถึงตัวควบคุมที่จะออกแบบจะต้องทำให้ $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$ ได้ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$1) H_x \in \text{dom}(\text{Ric}) \quad (8)$$

$$X_x = \text{Ric}(H_x) \geq 0 \quad (9)$$

$$2) J_u \in \text{dom}(\text{Ric}) \quad (10)$$

$$Y_u = \text{Ric}(J_u) \geq 0 \quad (11)$$

$$3) \rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2 \quad (12)$$

ในส่วนนี้เราจะหาค่า γ ที่มีค่าน้อยที่สุด ที่จะทำให้ผ่านเงื่อนไข (8) - (12) อัลกอริทึมที่ใช้หาค่า γ นี้เป็นการหาค่า γ บนฟังก์ชันความโค้งของฟังก์ชัน γ^2 [3] ซึ่งสามารถหาผลลัพธ์ได้อย่างรวดเร็ว

ข้อสมมติ

$$1. D_{11} = 0, D_{12} = [0 \ I]^T$$

$$D_{21} = [0 \ I], D_{22} = 0$$

เมื่อ I เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ (unity matrix) และ T เป็นเครื่องหมายทรานสโพส

2. (C_1, A) เป็นโหมดที่สังเกตไม่ได้ (unobservable - modes) อยู่ที่แกน $j\omega$

3. (A, B_1) เป็นโหมดที่ควบคุมไม่ได้ (uncontrollable - modes) อยู่ที่แกน $j\omega$

$$\hat{A} = A - B_2 D_{12}^T C_1 \quad (13)$$

$$\hat{C}_1 = C_1 - D_{12} D_{12}^T C_1 \quad (14)$$

$$\tilde{A} = A - B_1 D_{21}^T C_2 \quad (15)$$

$$\tilde{B}_1 = B_1 - B_1 D_{21}^T D_{21} \quad (16)$$

4. (A, B_2) เสถียรภาพ (stabilizable)

(C_2, A) ตรวจสอบได้ (detectable)

ขั้นตอนการหาค่า γ

ขั้นตอนที่ 1 เลือกค่าเริ่มต้น γ โดยเลือกค่าสูงๆ

ขั้นตอนที่ 2 หาค่า $\rho(\gamma)$ จากการแก้สมการ(17), (18)

$$\begin{aligned} \dot{A} X_x + X_x \dot{A} + X_x (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_x + \\ \hat{C}_1^T \hat{C}_1 = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{A} Y_u + Y_u \dot{A}^T + Y_u (\gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2) Y_u + \\ B_1 B_1^T = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

ค่า $\rho(\gamma)$ เป็นค่าไอเก้น (eigenvalues) ที่มีค่ามากที่สุด ของ $X_\infty Y_\infty$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า $\rho(\gamma)$ ที่ $\gamma = \gamma_n$ โดยใช้สมการ(19)

$$\rho(\gamma) = \frac{V^T (\dot{X}_\infty Y_\infty + X_\infty \dot{Y}_\infty) W}{V^T W} \quad (19)$$

เมื่อ V เป็นไอเกนเวกเตอร์ (eigenvector) ข้างซ้ายของ $X_\infty Y_\infty$ และ W เป็นไอเกนเวกเตอร์ข้างขวาของ $X_\infty Y_\infty$ ที่มีความสัมพันธ์กับค่าไอเกนสูงสุดของ $X_\infty Y_\infty$ \dot{X}_∞ และ \dot{Y}_∞ หาได้จากการแก้สมการ Lyapunov

$$\hat{A}_x^T \dot{X}_\infty + \dot{X}_\infty \hat{A}_x - 2\gamma^{-1} X_\infty B_1 B_1^T X_\infty = 0 \quad (20)$$

$$\hat{A}_y^T \dot{Y}_\infty + \dot{Y}_\infty \hat{A}_y - 2\gamma^{-1} Y_\infty C_1^T C_1 Y_\infty = 0 \quad (21)$$

โดยที่ \hat{A}_x และ \hat{A}_y หาได้จากสมการ (22) และ (23)

$$\hat{A}_x = A - B_2 D_{12}^T C_1 + (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty \quad (22)$$

$$\hat{A}_y = A - B_1 D_{21}^T C_2 + Y_\infty (\gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2) \quad (23)$$

ขั้นตอนที่ 4 หากค่า γ_{n+1} ซึ่งเป็นจุดตัดของเส้นสัมผัส $\rho(\gamma)$ ที่จุด γ_n กับเส้นโค้ง γ^2

$$\rho_{n+1}(\gamma) = \rho(\gamma) (\gamma_{n+1} - \gamma_n) + \rho_n(\gamma) \quad (24)$$

$$\rho_{n+1}(\gamma) = \gamma^2 \quad (25)$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบว่าค่า $|\gamma_{n+1} - \gamma_n|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความผิดพลาดที่เราเลือกไว้หรือไม่ ถ้ามากกว่ากลับไปทำขั้นตอนที่ 2 ใหม่ โดยให้ $\gamma = \gamma_{n+1}$ ทำซ้ำจนกว่าได้ค่าที่ต้องการ

2.3 การออกแบบตัวควบคุม H_∞

เมื่อได้ค่า γ ตามที่ต้องการแล้ว ให้เอาค่า γ ที่ได้ไปแทนในสมการ (17) และ (18) อีกครั้งหนึ่ง เพื่อหาค่า X_∞ และ Y_∞ มาแทนในสมการ (26) - (30)

$$\hat{A}_\infty = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_\infty + B_2 F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2 \quad (26)$$

$$F_\infty = -B_2^T X_\infty \quad (27)$$

$$L_\infty = -Y_\infty C_1^T \quad (28)$$

$$Z_\infty = (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1} \quad (29)$$

$$K_{sup}(s) = \begin{bmatrix} \hat{A}_\infty & -Z_\infty L_\infty \\ F_\infty & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

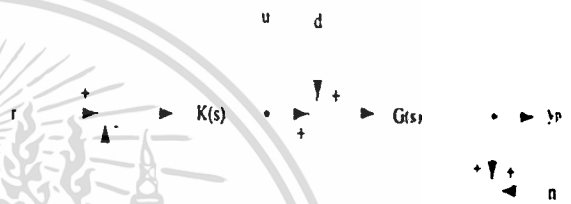
3. ผลการทดลอง

ผลการทดลองเป็นการออกแบบตัวควบคุม ให้กับระบบที่มี $G(s) = 1/s^2$ แล้วพิจารณาถึงการรบกวนจากภายนอก และสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ตรวจวัด แสดงดังรูปที่ 2 สามารถเขียนในรูปสเตตสเปซได้เป็น

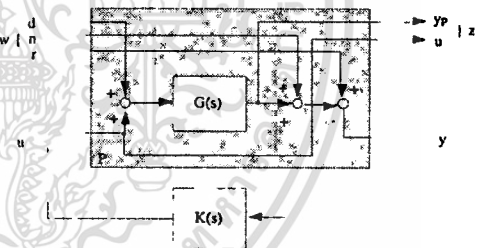
$$\dot{x}_1 = d + u$$

$$\dot{x}_2 = x_1$$

$$y = r - x_2 - n$$



รูปที่ 2 ระบบควบคุมแบบคลาสสิกคอลล 1-DOF



รูปที่ 3 ระบบควบคุม 1-DOF ในรูป 2 พอร์ต

ระบบควบคุม 1 - DOF ในรูป 2 พอร์ตในรูปที่ 3 เมื่อให้

$$w = \begin{bmatrix} d \\ n \\ r \end{bmatrix} \text{ และ } z = \begin{bmatrix} x_2 \\ u \end{bmatrix}$$

แล้ว รูปแบบมาตรฐาน GD ดังสมการ (4) - (6) ของระบบนี้จะเขียนได้เป็น

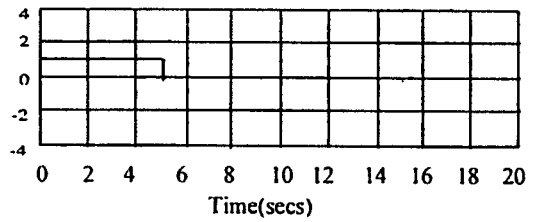
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ n \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ n \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

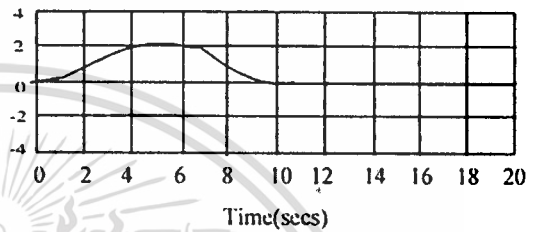
$$y = \begin{bmatrix} 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -F & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ n \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \cdot u$$

ตารางที่ 1

iter	γ	$ \sqrt{\gamma} - \rho(\gamma) $	$\dot{\rho}(\gamma)$
1	100	95.58567	-0.136594
2	4.346809	1.866056	-3.488405
3	3.191363	0.649119	-5.21987
4	2.861195	0.284479	-6.130824
5	2.729214	0.134555	-6.600509
6	2.669514	0.065708	-6.839698



a) การรบกวนจากภายนอก

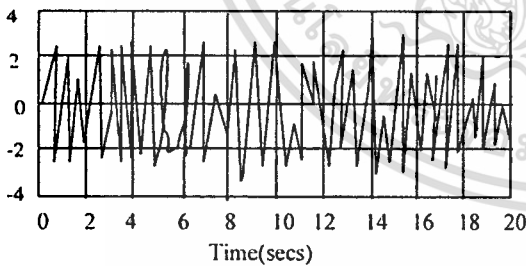


b) เอาท์พุทที่ถูกควบคุม

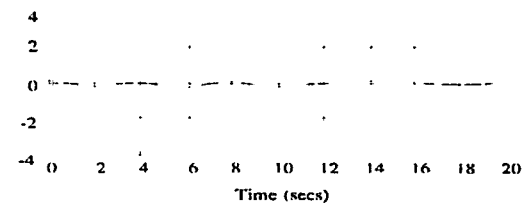
รูปที่ 4 ผลการตอบสนองการรบกวนจากภายนอก

นำข้อมูลในเมทริกซ์ไปป้อนให้กับโปรแกรม ที่เขียนขึ้นมาด้วยโปรแกรม MATLAB จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 1 และในที่สุดก็จะได้ตัวควบคุม H_{∞} ดังนี้

$$K(s) = \frac{-578.3(s + 0.39)}{(s + 2.33)(s + 220.72)}$$



a) สัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์ตรวจวัด



b) เอาท์พุทที่ถูกควบคุม

4. สรุปผล

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า γ หาได้ง่าย เพียงแค่กำหนดค่า γ เริ่มต้นให้มีค่าสูงๆ อัลกอริทึมก็จะทำงานคำนวณให้อย่างรวดเร็ว ส่วนผลการทดลองที่เป็นกราฟการตอบสนองสัญญาณรบกวนจากภายนอกและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์ตรวจวัด เป็นการทดสอบกับระบบควบคุมแบบคลาสสิก 1-DOF ที่มีอินพุตเท่ากับศูนย์ ($r=0$) แสดงผลดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5

เอกสารอ้างอิง

[1] John C. Doyle, Keith Glover P. Khargonekar, Bruce a. Francis, "State Space Solutions to Standard H_2 and H_{∞} Control" IEEE Trans. Automat. Contr.; Vol. 34, No. 8, pp. 838-847, Aug., 1989

[2] Carten Scherer, " H_{∞} Control by State Feedback and Fast Algorithms for the Computation of Optimal H_{∞} Norms " IEEE Trans. Automat. Contr. Vol. 35, No. 10, pp. 1090-1099, Oct., 1990

[3] X.P. Li and B.C. Chang, " On Convexity of H_{∞} Riccati Solutions and its Applitions", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 38, No. 6, pp. 963-966, Jun, 1993

รูปที่ 4 ผลการตอบสนองสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์วัด

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19

The 19th Conference of Electrical Engineering



ดำเนินการจัดการประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สาขาวิศวกรรมระบบควบคุมและวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ สำหรับระบบเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์ เปลี่ยนแปลงทุกตัวด้วยอินทิกรัลเซอร์โว

Robust H_∞ Control for Linear Systems with All Parameter Uncertainties by Integral Servo

สมุสร ชาวน์ไว * รศ.ดร.จงกล งามวิวิทย์ ** Assoc. Prof. Noriyuki Komine *** Prof. Michihiko Iida ***

* นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ** อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

ทฤษฎีวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

*** School of Engineering, Tokai University, Japan

บทคัดย่อ - บทความนี้ เสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ สำหรับระบบเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลง ตัวควบคุมนี้ถูกออกแบบให้กับระบบที่ทำให้มีโครงสร้างเป็นอินทิกรัลเซอร์โวโดยใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ ระบบป้อนกลับจะมีเสถียรภาพควอดเรติกและลดทอนการรบกวนจากภายนอกให้อยู่ในระดับที่กำหนดสำหรับทุกค่าของพารามิเตอร์ที่ขอมให้มีการเปลี่ยนแปลง และทำให้ออฟเซตเป็นศูนย์

Abstract - This paper presents a design method of robust H_∞ controller for linear systems with all parameter uncertainties. The controller is designed for the system which is given to be an integral servo system by robust H_∞ control theory. The feedback system is quadratically stable and achieves a prescribed level of disturbance attenuation for all admissible parameter uncertainties with zero offset.

1. บทนำ

การศึกษาขั้นต้นเกี่ยวกับ การออกแบบตัวควบคุมแบบ H_∞ ได้มีการพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง ในบทความ [1] ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุมแบบ H_∞ และเสถียรภาพโรบัสต์ ต่อมาบทความ [2] ได้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมแบบ H_∞ สำหรับระบบที่มีพารามิเตอร์บางตัวเปลี่ยนแปลง และลดทอนการรบกวนจากภายนอกอยู่ในระดับที่กำหนดโดยการป้อนกลับแบบเอาท์พุท หลังจากนั้นไม่นานก็มี [3] นำเสนอการควบคุมแบบ H_∞ สำหรับระบบที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวมีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อเร็ว ๆ นี้ [4] ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ (robust H_∞) และอินทิกรัลเซอร์โว (integral servo) ซึ่งทำได้โดยการนำเอาอินทิเกรเตอร์เพิ่มเข้าไปในระบบที่มีพารามิเตอร์บางตัวเปลี่ยนแปลงและมีการรบกวนจากภายนอก

บทความที่นำเสนอในที่นี้ จะกล่าวถึง การออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ สำหรับระบบเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลงและลดทอนการรบกวนจากภายนอกให้อยู่ในระดับที่กำหนดสำหรับทุกค่าของพารามิเตอร์ที่ขอมให้มีการเปลี่ยนแปลง โดยกรณีเอาท์พุทของระบบในรูปอินทิกรัลเซอร์โวออกแบบตัวควบคุมเพื่อที่จะทำให้เอาท์พุทของระบบเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงขั้นบันได (step signal) โดยที่ไม่มีออฟเซต (offset) โครงสร้างของระบบอินทิกรัลเซอร์โวที่พารามิเตอร์ทุกตัวมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งเขียนในรูประบบไซโรเกต (surrogate) จะยังไม่สามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมแบบ H_∞ ได้โดยตรง แต่จะต้องแปลงให้อยู่ในระบบมาตรฐาน GD [5] ก่อน แล้วจึงออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี DGKF [5], [6] เมื่อได้ตัวควบคุมสำหรับระบบมาตรฐาน GD แล้วจะต้องแปลงตัวควบคุมกลับ เพื่อนำไปใช้กับระบบเดิมด้วยวิธีลูปลิฟต์ (loop shifting) [7]

2. ทฤษฎีและหลักการ

ระบบเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกค่า สามารถเขียนสมการได้ดังนี้ [3]

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A(t))x(t) + (B_1 + \Delta B_1(t))w(t) + (B_2 + \Delta B_2(t))v(t) \quad (1)$$

$$z(t) = (C_1 + \Delta C_1(t))x(t) + (D_{11} + \Delta D_{11}(t))w(t) + (D_{12} + \Delta D_{12}(t))v(t) \quad (2)$$

$$y(t) = (C_2 + \Delta C_2(t))x(t) + (D_{21} + \Delta D_{21}(t))w(t) + (D_{22} + \Delta D_{22}(t))v(t) \quad (3)$$

เมื่อ $x(t) \in \mathbb{R}^n$ เป็นเวกเตอร์ของสถานะ

$u(t) \in \mathbb{R}^m$ เป็นเวกเตอร์ของอินพุตควบคุม

$w(t) \in \mathbb{R}^l$ เป็นเวกเตอร์ของการรบกวนจากภายนอก

$y(t) \in \mathbb{R}^p$ เป็นเวกเตอร์ของเอาท์พุทที่ถูกสังเกต

$z(t) \in \mathbb{R}^q$ เป็นเวกเตอร์ของเอาท์พุทที่ถูกควบคุม

$A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}$ และ D_{22} เป็นเมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนจริงที่เป็นค่าคงที่ ที่มีมิติเหมาะสม และเรื่อกะบบนี้ว่าระบบ นอมินอล (nominal system) ส่วน $\Delta A(t), \Delta B_1(t), \Delta B_2(t), \Delta C_1(t), \Delta D_{11}(t), \Delta D_{12}(t), \Delta C_2(t), \Delta D_{21}(t)$ และ $\Delta D_{22}(t)$ เป็นฟังก์ชันของ เมตริกซ์จำนวนจริง ที่มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงตามเวลาและ กำหนดให้มีโครงสร้างดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta A(t) & \Delta B_1(t) & \Delta B_2(t) \\ \Delta C_1(t) & \Delta D_{11}(t) & \Delta D_{12}(t) \\ \Delta C_2(t) & \Delta D_{21}(t) & \Delta D_{22}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} F(t) \begin{bmatrix} E_1 & E_2 & E_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

เมื่อ $H_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}, H_2 \in \mathbb{R}^{m \times n}, H_3 \in \mathbb{R}^{r \times n}, E_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}, E_2 \in \mathbb{R}^{n \times m}$ และ $E_3 \in \mathbb{R}^{n \times r}$ เป็นเมตริกซ์ค่าคงที่ที่รู้ค่า แสดงในรูปของเมทริกซ์และ $F(t) \in \mathbb{R}^{(n+m+r) \times (n+m+r)}$ เป็นฟังก์ชันเมตริกซ์ที่ไม่รู้ค่า [2] ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ภายใต้ เงื่อนไข

$$F^T(t) \cdot F(t) \leq \rho^2 I \quad (5)$$

ระบบที่กล่าวมาในสมการ (1) - (3) จะต้องมีเงื่อนไขดังนี้

ก. (A, B_2) มีเสถียรภาพ (stabilizable) และ (C_2, A) ตรวจ สอบได้ (detectable)

ข. แรงค์ $D_{12} = m$ และแรงค์ $D_{21} = r$

ค. แรงค์ $\begin{bmatrix} A - j\omega I & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{bmatrix} = n + m$

ง. แรงค์ $\begin{bmatrix} A - j\omega I & B_1 \\ C_2 & D_{21} \end{bmatrix} = n + r$

และสามารถแปลงเป็นระบบโจโรเกต [2], [3] ได้เป็น

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \begin{bmatrix} \sqrt{\varepsilon} \rho H_1 & \gamma^{-1} B_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + B_2 u(t) \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} z(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ \sqrt{\varepsilon} C_1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & E_2 \\ \sqrt{\varepsilon} \rho H_2 & \gamma^{-1} D_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_3 \\ D_{12} \end{bmatrix} u(t) \quad (7)$$

$$y(t) = C_2 x(t) + \begin{bmatrix} \sqrt{\varepsilon} \rho H_3 & \gamma^{-1} D_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + D_{22} u(t) \quad (8)$$

โดยที่

- $\gamma > 0$ เป็นสมรรถนะในการลดทอนการรบกวนจากภายนอก
- $\varepsilon > 0$ เป็นพารามิเตอร์ที่เลือกเพื่อให้ระบบเสถียรภาพทวนเคลื่อน
- $\rho > 0$ เป็นค่าที่ต้องกำหนดเพื่อให้ได้ค่า γ เฉลยที่ดีที่สุด
- $w_0(t) = \Delta \cdot z_0(t)$ เป็นการรบกวนจากภายนอกที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงในรูปการป้อนกลับ

การออกแบบตัวควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ จะต้องทำให้ระบบ (1) - (3) มีโครงสร้างเป็นอินทิกรัลเซอร์โวดังนี้ [4]

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + \Delta A(t) & 0 \\ -(C_2 + \Delta C_2(t)) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 + \Delta B_1(t) \\ -[D_{21} + \Delta D_{21}(t)] \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} B_2 + \Delta B_2(t) \\ -[D_{22} + \Delta D_{22}(t)] \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \quad (9)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} C_1 + \Delta C_1(t) & C_+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}$$

$$+ \{D_{11} + \Delta D_{11}(t)\} \cdot w(t) + \{D_{12} + \Delta D_{12}(t)\} \cdot u(t) \quad (10)$$

$$y_+(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + D_+ w_+(t) \quad (11)$$

เมื่อให้ $\dot{y}(t) = y_+(t) = D_+(t) \cdot w_+(t) + e(t)$ ระบบโจโรเกตของสมการที่ (9) - (11) จะได้

$$\dot{x}^*(t) = A^* x^*(t) + B_1^* w^*(t) + B_2^* u(t) \quad (12)$$

$$z^*(t) = C_1^* x^*(t) + D_{11}^* w^*(t) + D_{12}^* u(t) \quad (13)$$

$$y^*(t) = C_2^* x^*(t) + D_{21}^* w^*(t) + D_{22}^* u(t) \quad (14)$$

โดยที่ตัวแปรและสัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์มีค่าดังนี้

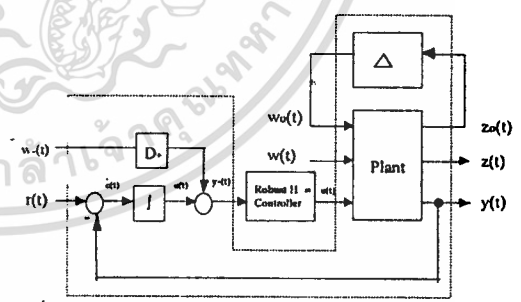
$$x^*(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}; z^*(t) = \begin{bmatrix} z_0(t) \\ z(t) \end{bmatrix}; w^*(t) = \begin{bmatrix} w_0(t) \\ w(t) \\ w_+(t) \\ r(t) \end{bmatrix}$$

$$A^* = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C_2 & 0 \end{bmatrix}; B_1^* = \begin{bmatrix} \sqrt{\varepsilon} \rho H_1 & \gamma^{-1} B_1 & 0 & 0 \\ -\sqrt{\varepsilon} \rho H_3 & -\gamma^{-1} D_{21} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_2^* = \begin{bmatrix} B_2 \\ -D_{22} \end{bmatrix}; C_1^* = \begin{bmatrix} E_1 \\ \sqrt{\varepsilon} C_1 \\ C_+ \end{bmatrix}$$

$$D_{11}^* = \begin{bmatrix} E_2 \\ 0 & \frac{E_2}{\sqrt{\varepsilon}} & 0 & 0 \\ \sqrt{\varepsilon} \rho H_2 & \gamma^{-1} D_{11} & 0 & 0 \end{bmatrix}; D_{12}^* = \begin{bmatrix} E_3 \\ \sqrt{\varepsilon} D_{12} \end{bmatrix}$$

$$C_2^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}; D_{21}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & D_+ & 0 \end{bmatrix}; D_{22}^* = 0$$



รูปที่ 1 ระบบอินทิกรัลเซอร์โวดำเนินการร่วมกับตัวควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞

นิยามที่ 2.1 ระบบที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลงดังสมการที่ (1) - (3) จะมีเสถียรภาพทวนเคลื่อน (quadratically) และลดทอนการรบกวนจากภายนอกน้อยกว่า γ เมื่อ

ก. มีเมตริกซ์ P สอดคล้องกับเงื่อนไข $[A + \Delta A(t)]^T P + P [A + \Delta A(t)] < 0$

โดยที่ P สมมาตรและเป็นบวก (symmetric positive definite)

ข. $\| (C_1 + \Delta C_1(t)) (sI - (A + \Delta A(t)))^{-1} (B_1 + \Delta B_1(t)) \|_\infty < \gamma$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวควบคุม $K(s)$ ให้กับระบบไฮโรเกต (12) - (14) ซึ่งแทนด้วยสัญญาณ Σ จะทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพทอเวอริคและลดทอนการรบกวนจากภายนอก $FI(\Sigma, K; z, w) < \gamma$ คังนิยามข้างต้นและยังทำให้ระบบวงปิดมีออฟเซตเป็นศูนย์ ดังนั้นตัวควบคุม $K(s)$ ที่หามาได้ก็จะทำให้ระบบ(1)-(3) มีเสถียรภาพทอเวอริคและลดทอนการรบกวนจากภายนอก w ไปยัง z หรือ $FI(\Sigma, K; z, w) < \gamma$ สำหรับทุก ๆ ค่าของพารามิเตอร์ที่ยอมให้มีการเปลี่ยนแปลง ภายใต้ง่อนไขสมการที่ (5) ค้าง

เนื่องจากระบบไฮโรเกต (12) - (14) ยังไม่เป็นระบบมาตรฐาน GD จึงต้องแปลงระบบให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน GD ด้วยวิธีการอุปจิตติง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. แปลง D_{12}^* และ D_{21}^* ให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน GD ทำได้

โดยแยกค่าเชิงมุม λ (singular value decomposition)

$$D_{12}^* = U_{12} \begin{bmatrix} 0 & \\ & \Sigma_{12} \end{bmatrix} V_{12}^T; U_{12}^T U_{12} = I; V_{12}^T V_{12} = I$$

$$D_{21}^* = U_{21} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \Sigma_{21} \end{bmatrix} V_{21}^T; U_{21}^T U_{21} = I; V_{21}^T V_{21} = I$$

2. แปลงคัวแปรทั้งหมดให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน GD

$$w^*(t) = V_{21}^{-1} w_2^*(t) \tag{15}$$

$$u(t) = V_{12} \Sigma_{12}^{-1} u_2(t) \tag{16}$$

$$z_2^*(t) = U_{12}^T z^*(t) \tag{17}$$

$$y_2^*(t) = \Sigma_{21}^{-1} U_{21}^T y_1(t) \tag{18}$$

จากขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นระบบมาตรฐาน GD จึงเขียนได้เป็น

$$\dot{x}^*(t) = A^* x^*(t) + B_1^# w_2^*(t) + B_2^# u_2(t) \tag{20}$$

$$z_2^*(t) = C_1^# x^*(t) + D_{11}^# w_2^*(t) + D_{12}^# u_2(t) \tag{21}$$

$$y_2^*(t) = C_2^# x^*(t) + D_{21}^# w_2^*(t) \tag{22}$$

โดยที่

$$B_1^# = B_1^* V_{21}^{-1}; B_2^# = B_2^* V_{12} \Sigma_{12}^{-1};$$

$$C_1^# = U_{12}^T C_1^*;$$

$$C_2^# = \Sigma_{21}^{-1} U_{21}^T C_2^*; D_{11}^# = U_{12}^T D_{11}^* V_{21}^{-1}$$

$$D_{12}^# = U_{12}^T D_{12}^* \Sigma_{12}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix};$$

$$D_{21}^# = \Sigma_{21}^{-1} U_{21}^T D_{21}^* V_{21}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I \end{bmatrix}$$

หลังจากแปลงระบบเป็นระบบมาตรฐาน GD แล้วก็สามารถนำไป

ออกแบบตัวควบคุม $K_1(s)$ ด้วยวิธี DGKF [5], [6]

$$K_1(s) = \left[\begin{array}{c|c} \hat{A}_\infty & -Z_\infty L_\infty \\ \hline F_\infty & 0 \end{array} \right] \tag{23}$$

โดยที่

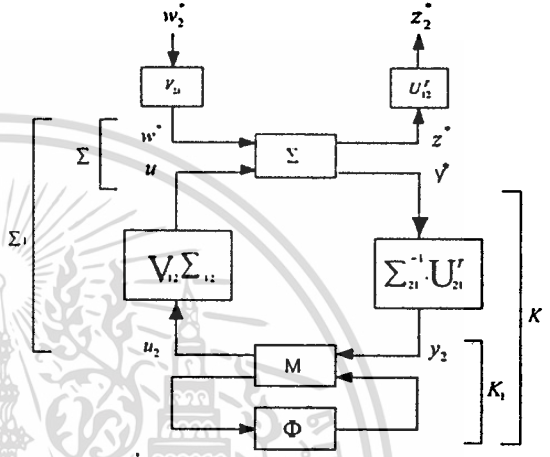
$$\hat{A}_\infty = A^* + \gamma^{-2} B_1^# B_1^{#T} X_\infty + B_2^# F_\infty + Z_\infty L_\infty C_\infty^#$$

$$F_\infty = -B_2^{#T} X_\infty$$

$$L_\infty = -\gamma_\infty C_\infty^{#T}$$

$$Z_\infty = (I + \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1}$$

และ X_∞, Y_∞ เป็นค่าที่ได้จากการแก้สมการ Riccati



รูปที่ 2 บล็อกโคเออร์เนทของวิธีการอุปจิตติง

ตัวควบคุม $K_1(s)$ จะถูกแปลงให้เป็นตัวควบคุม $K(s)$ โดยสมการ (24)

$$K(s) = V_{12} \Sigma_{12}^{-1} K_1(s) \Sigma_{21}^{-1} U_{21}^T \tag{24}$$

ซึ่งตัวควบคุม $K(s)$ จะเป็นตัวควบคุมของระบบ Σ ตัวควบคุม $K(s)$ ที่ได้นี้จะเป็นตัวควบคุมสำหรับระบบไฮโรเกต (12) - (14) อันจะทำให้ระบบป้อนกลับมีเสถียรภาพทอเวอริค ลดทอนการรบกวนจากภายนอกให้อยู่ในระดับที่กำหนดสำหรับทุก ๆ ค่าของพารามิเตอร์ที่ยอมให้มีการเปลี่ยนแปลง และทำให้ออฟเซตของระบบเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงขั้นบันได โดยที่ออฟเซตเป็นศูนย์

3. ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ จะออกแบบตัวควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ ให้กับระบบที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีโครงสร้างดังนี้

$$\dot{x}(t) = -ax(t) + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \end{bmatrix} v(t) + b_2 u(t)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} c \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & d_{11} \\ d_{11} & 0 \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ d_{12} \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = c_2(t) + \begin{bmatrix} 0 & d_{21} \end{bmatrix} w(t) + d_{22} u(t)$$

โดยที่มีนอมินอลแพลนท์ (nominal plant) เป็น $G(s) = 1 / (100s + 1)$ กำหนดให้พารามิเตอร์ทุกตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงของระบบข้างต้นนี้เป็น

$$a = 0.01 + 0.01f(t); b_1 = 0.001 + 0.01f(t); b_2 = 1 + f(t)$$

$$c_1 = 1 + 0.5f(t); d_{11} = 0 + 0.5f(t); d_{12} = 1 + 0.5f(t)$$

$c_2 = 0.01 + 0.005f(t)$; $d_{21} = 0.01 + 0.005f(t)$; $d_{22} = 0 + 0.005f(t)$
 แล้วจะเขียนสัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์แต่ละตัวของระบบ (1) - (3) ดังนี้

$$\begin{aligned} A + \Delta A &= [-0.01] + [0.01f(t)] \\ B_1 + \Delta B_1 &= [0.001 \ 0] + [0.01f(t) \ 0] \\ B_2 + \Delta B_2 &= [1] + [f(t)] \\ C_1 + \Delta C_1 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.05f(t) \\ 0 \end{bmatrix} \\ D_{11} + \Delta D_{11} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0.5f(t) \\ 0.5f(t) & 0 \end{bmatrix} \\ D_{12} + \Delta D_{12} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5f(t) \end{bmatrix} \\ C_2 + \Delta C_2 &= [0.01] + [0.005f(t)] \\ D_{21} + \Delta D_{21} &= [0 \ 0.001] + [0 \ 0.005f(t)] \\ D_{22} + \Delta D_{22} &= [0] + [0.005f(t)] \end{aligned}$$

โดยเทอมที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้น สามารถแยกเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} \Delta A &= [0.01f(t)] = [1] \cdot f(t) \cdot [0.01] \\ \Delta B_1 &= [0.01f(t) \ 0] = [1] \cdot f(t) \cdot [0.01 \ 0] \\ \Delta B_2 &= [f(t)] = [1] \cdot f(t) \cdot [1] \\ \Delta C_1 &= \begin{bmatrix} 0.05f(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(t) & 0 \\ 0 & f(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \Delta D_{11} &= \begin{bmatrix} 0 & 0.5f(t) \\ 0.5f(t) & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(t) & 0 \\ 0 & f(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\ \Delta D_{12} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5f(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(t) & 0 \\ 0 & f(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \Delta C_2 &= [0.005f(t)] = [0.005] \cdot f(t) \cdot [1] \\ \Delta D_{21} &= [0 \ 0.005f(t)] = [0.005] \cdot f(t) \cdot [0 \ 1] \\ \Delta D_{22} &= [0.005f(t)] = [0.005] \cdot f(t) \cdot [1] \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่าของ ΔA , ΔB_1 , ΔB_2 , ΔC_1 , ΔD_{11} , ΔD_{12} , ΔC_2 , ΔD_{21} และ ΔD_{22} แทนค่าลงในสมการที่ (4) จะได้

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.005 \end{bmatrix} \cdot F(t) \cdot \begin{bmatrix} 0.01 & 0.01 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

นำอาค่า $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}, H_1, H_2, H_3, E_1, E_2, E_3$ ที่หามาได้และให้ $C = 0.1, D = 0.01, E = 10, \gamma = 10, \rho = 0.2$ แทนค่าลงในสมการที่ (12) - (14) แล้วจะได้รับการระบบไฮโรเกต หลังจากนั้นก็แปลงระบบไฮโรเกตเป็นระบบมาตรฐาน GD ด้วยสมการที่ (20) - (22) เมื่อระบบอยู่ในรูปมาตรฐาน GD แล้ว ก็สามารถออกแบบตัวควบคุม $K_1(s)$ ได้จากสมการที่ (23)

$$K_1(s) = \begin{bmatrix} -1.01 & 854.19 & -8.51 \\ -0.01 & -10.92 & 0.11 \\ -1.05 & 3.86 & 0 \end{bmatrix}$$

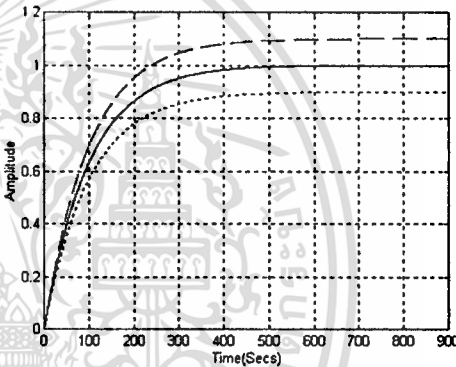
หรือสามารถเขียนในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$K_1(s) = \frac{9.32s + 0.13}{s^2 + 11.93s + 12.81}$$

เมื่อ $\sum_{12} = 1.0149$, $\sum_{21} = 0.01$ และ $v_{12} = u_{21} = 1$ ก็สามารถหา $K(s)$ ได้จากสมการ (24)

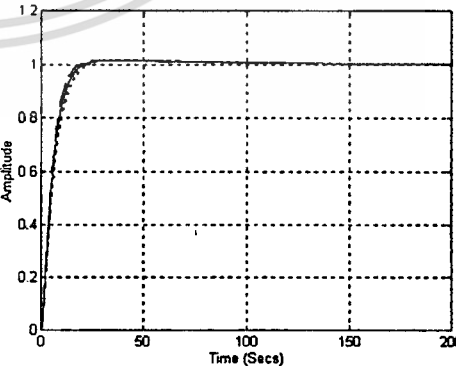
$$K(s) = \frac{918.46s + 13}{s^2 + 11.93s + 19.81}$$

เมื่อได้ตัวควบคุม $K(s)$ แล้วนำไปควบคุมระบบที่อัตราขยาย (gain) และโพลของแพลนท์ที่เปลี่ยนแปลงจากอนินอดแพลนท์ $\pm 10\%$ ซึ่งจะได้ผลการตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 4 และ 6 ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 3 และ 5 เป็นผลการตอบสนองของระบบเมื่อไม่มีการป้อนกลับของแพลนท์ที่มีอัตราขยายและโพลเปลี่ยนแปลงจากอนินอดแพลนท์ $\pm 10\%$ ตามลำดับ



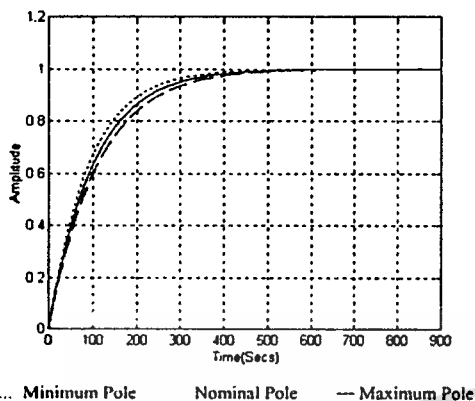
... Minimum Gain Nominal Gain — Maximum Gain

รูปที่ 3 ผลการตอบสนองของระบบขณะที่ไม่มีการป้อนกลับ เมื่อแพลนท์มีอัตราขยายเปลี่ยนแปลงจากอนินอดแพลนท์ $\pm 10\%$

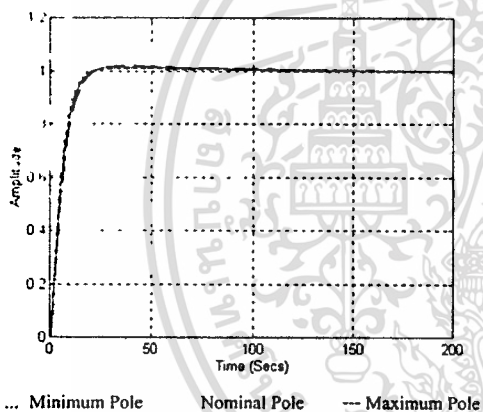


... Minimum Gain Nominal Gain — Maximum Gain

รูปที่ 4 ผลการตอบสนองของระบบป้อนกลับเมื่อแพลนท์มีอัตราขยายเปลี่ยนแปลงจากอนินอดแพลนท์ $\pm 10\%$



รูปที่ 5 ผลการตอบสนองของระบบขณะที่ไม่มีการป้อนกลับเมื่อ แพล้นท์มีโพลเปลี่ยนแปลงจากนอมินอลแพล้นท์ $\pm 10\%$



รูปที่ 6 ผลการตอบสนองของระบบป้อนกลับเมื่อแพล้นท์ มีโพลเปลี่ยนแปลงจากนอมินอลแพล้นท์ $\pm 10\%$

4. สรุปผล

จากรูปที่ 4 เมื่อนำตัวควบคุมแบบโรบัสต์ H_∞ มาใช้ ตัวควบคุมยังควบคุมให้ระบบป้อนกลับมีอัตราทุกโด่งเคียงกับนอมินอลแพล้นท์ และออฟเซตเป็นศูนย์ เมื่ออัตราขยายของแพล้นท์เปลี่ยนแปลงจากนอมินอลแพล้นท์ $\pm 10\%$ ในทำนองเดียวกันเมื่อโพลของแพล้นท์เปลี่ยนแปลง $\pm 10\%$ จากนอมินอลแพล้นท์ ผลการตอบสนองของระบบป้อนกลับเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลยดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีนี้จะทำให้ระบบป้อนกลับเสถียรและมีออฟเซตเป็นศูนย์เมื่อพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนไปในขอบเขตที่กำหนดไว้

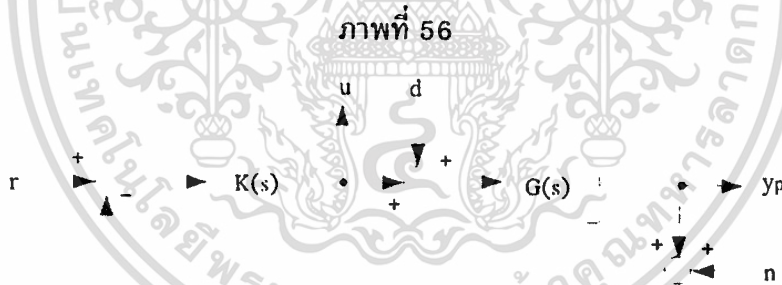
5. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.P. Khargonekar, I.R. Petersen and K. Zhou, "Robust stabilization of uncertain linear systems: Quadratic stabilizability and H_∞ control theory," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.35, No.3, pp.356-361, 1990
- [2] L. Xie, M. Fu and C.E. de Souza, " H_∞ control and quadratic stabilization of uncertain linear systems: Quadratic of parameter uncertainty via output feedback," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.37, No.8, pp.1253 - 1256, 1992
- [3] K. Gu, " H_∞ control of systems under norm bounded uncertainties in all system matrix," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.39, No.6, pp.1320 - 1322, 1994
- [4] J. Ngamwiwit, N. Komine and M. Iida, "Robust integral servo problem in uncertain linear systems," *RESTECS'96 at the KMITL exhibition '96: In Honor of H.M. The King*, pp. E-17 - E-22, 1996
- [5] J.C. Doyle, K. Glover, P.P. Khargonekar and B. Francis, "State space solutions to the H_2 and H_∞ control problem," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.34, No.8, pp.831-847, 1989
- [6] สุเมธ เชาวน์ไวษ, จงกล งามวิวิทย์ และ Michihiko Iida, "การออกแบบตัวควบคุม H_∞ สำหรับระบบเชิงเส้น," *วิศวกรรมศาสตร์*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 1, หน้า 49 - 52, มิถุนายน 2538
- [7] M.G. Safonov, "Simplifying the H_∞ theory via loop shifting," *Int. J. Control*, vol.50, No.6, pp. 2467 - 2488, 1989
- [8] I.R. Petersen, "Disturbance attenuation and H_∞ optimization: A design method based on the algebraic riccati equation," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.AC-32, No.5, pp.427 - 429, 1987
- [9] L. Xie and C.E. de Souza, "Robust H_∞ control for linear systems with norm bound time varying uncertainty," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.37, No.8, pp.1188 - 1191, 1992

ภาคผนวก จ.

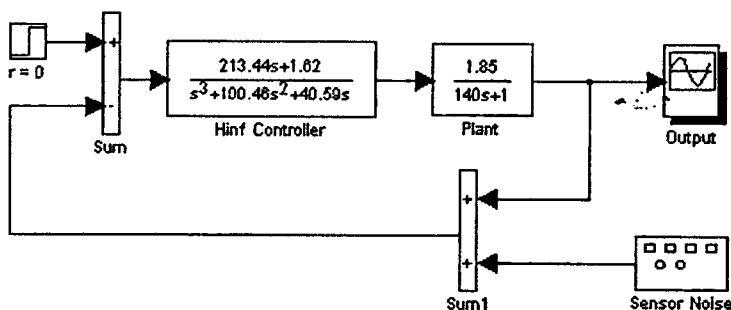
การทดสอบประสิทธิภาพในการลดทอนเซนเซอร์นอยส์

การทดสอบประสิทธิภาพในการลดทอนเซนเซอร์นอยส์ด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ นั้น จะทดลองกับระบบที่มีแผนภาพบล็อกดังแสดงในภาพที่ 56 ในการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ ในการลดทอนเซนเซอร์นอยส์ที่มีแอมพลิจูดระดับต่างกัน โดยกำหนดให้อินพุตอ้างอิง $r = 0$ และอินพุตจากภายนอก $d = 0$ แล้วป้อนอินพุต n ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนแบบสุ่มที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.1 ดังแสดงในภาพที่ 58 และแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.5 แสดงดังภาพที่ 60 ตามลำดับ การทดลองในภาพที่ 56 จะใช้โปรแกรม Simulink จำลองการทำงานของระบบควบคุม ซึ่งการต่ออุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 57 ส่วนเอาต์พุตของระบบแสดงดังภาพที่ 59 และ 61 ส่วนที่สองจะเป็นการทดสอบผลกระทบที่เกิดจากเซนเซอร์นอยส์ต่อเอาต์พุตของระบบโดยป้อนอินพุตอ้างอิงที่เป็นอินพุตขั้นบันไดแอมพลิจูด $r = 40$ และป้อนสัญญาณรบกวนแบบสุ่มที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 20 ให้กับระบบดังภาพที่ 56



แสดงแผนภาพบล็อกที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการลดทอนเซนเซอร์นอยส์

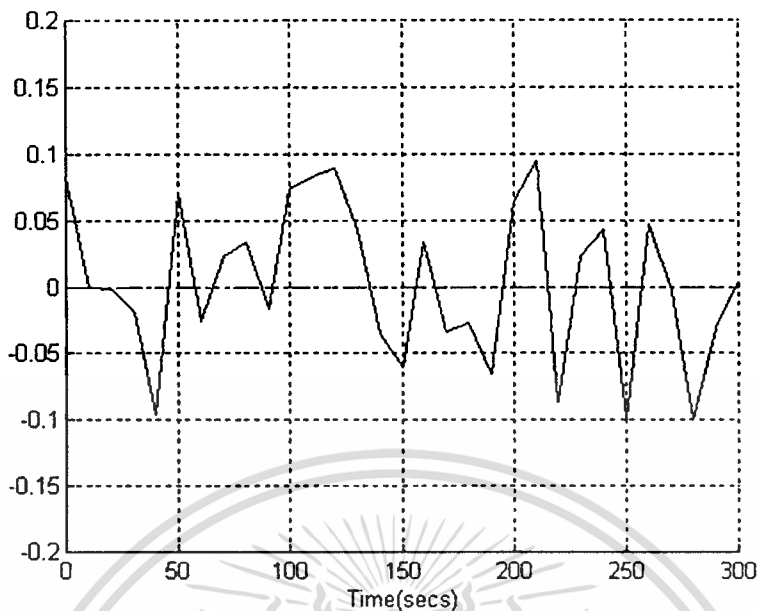
ภาพที่ 57



แสดงการต่ออุปกรณ์ในโปรแกรม Simulink

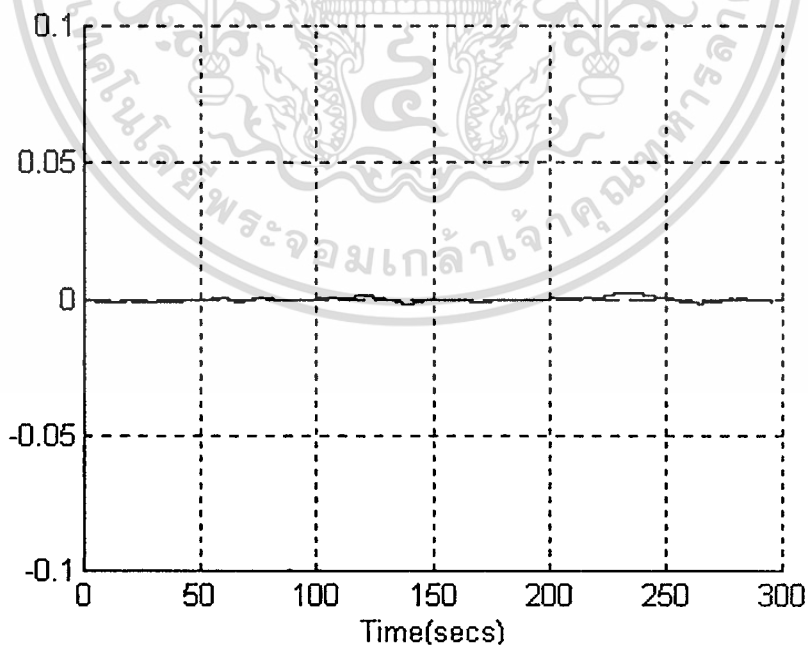
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 58



แสดงเซนเซอร์นอยส์ n ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.1

ภาพที่ 59

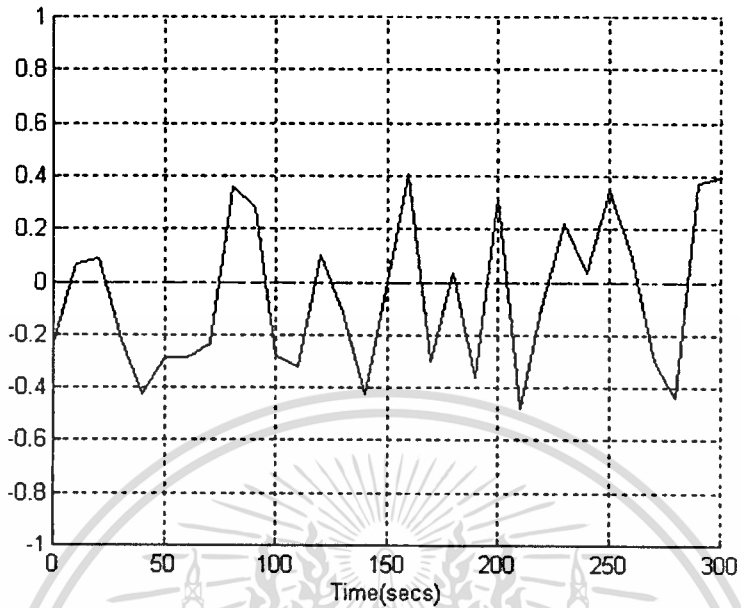


แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞

เมื่อป้อนอินพุต n ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.1

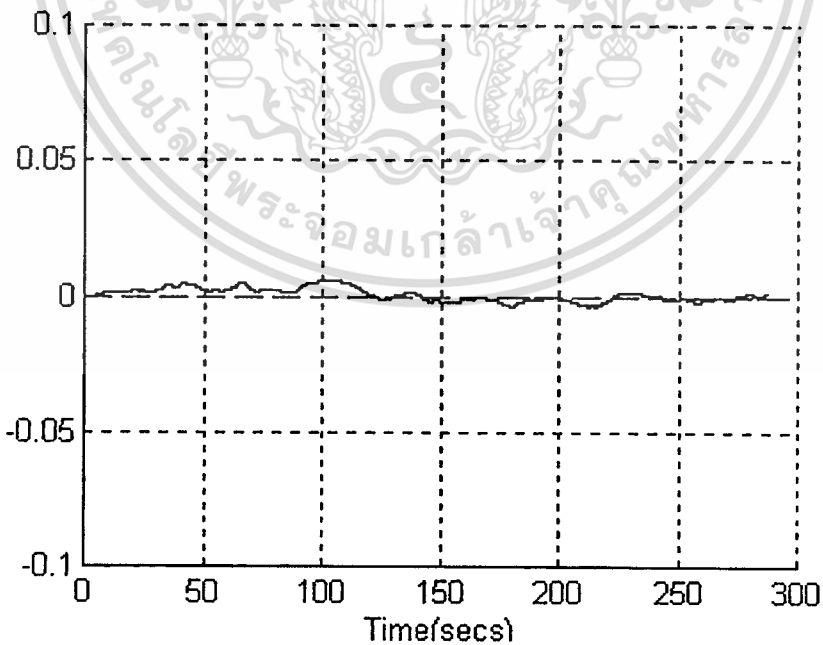
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 60



แสดงเซนเซอร์นอยส์ n ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.5

ภาพที่ 61

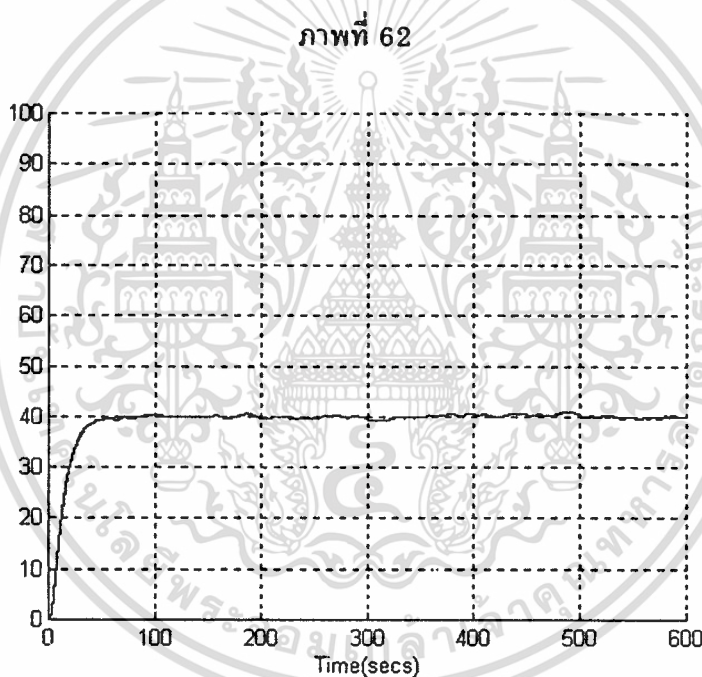


แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมโรบัสต์ H_{∞}

เมื่อป้อนอินพุต n ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.5

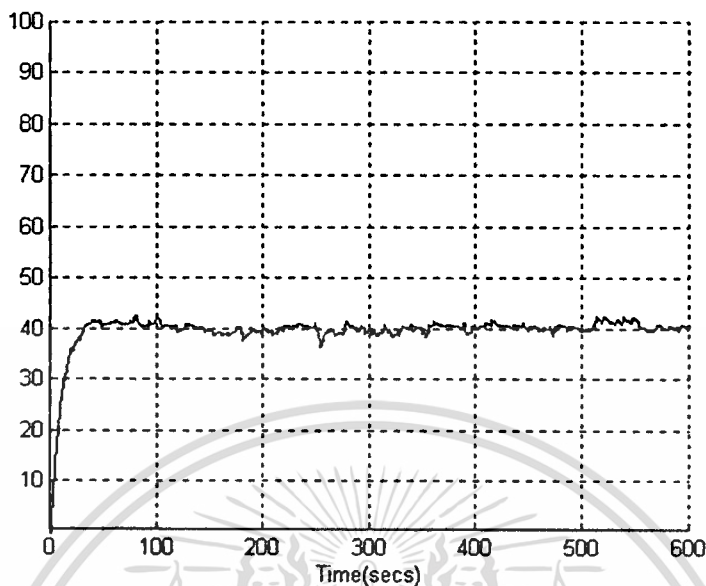
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในส่วนที่สอง จะนำเอาตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ ที่ออกแบบไว้สำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีถังเดียวและกรณีสองถัง มาจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม Simulink ดังภาพที่ 57 โดยเปลี่ยนให้อินพุตอ้างอิงที่เป็นอินพุตขั้นบันไดที่มีแอมพลิจูด $r = 40$ และมีเซนเซอร์รบกวนซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนแบบสุ่มที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 20 โดยเริ่มจากจำลองควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งด้วยตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ และตัวควบคุม PI ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 62 และ 63 ตามลำดับ และสุดท้ายจำลองการทำงานของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ และระบบควบคุม PI ในการควบคุมกระบวนการอันดับสอง ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 64 และ 65 ตามลำดับ



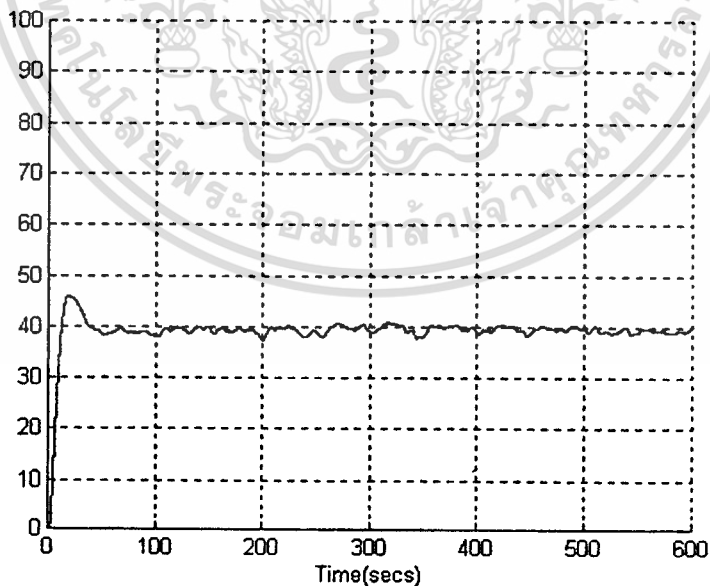
แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ ในการจำลองการทำงานของกระบวนการอันดับหนึ่งเมื่อมีการรบกวนจากเซนเซอร์รบกวนที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 20

ภาพที่ 63



แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุม PI ในการจำลองการทำงานของกระบวนการ
อันดับหนึ่งเมื่อมีการรบกวนจากเซนเซอร์นอยส์ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 20

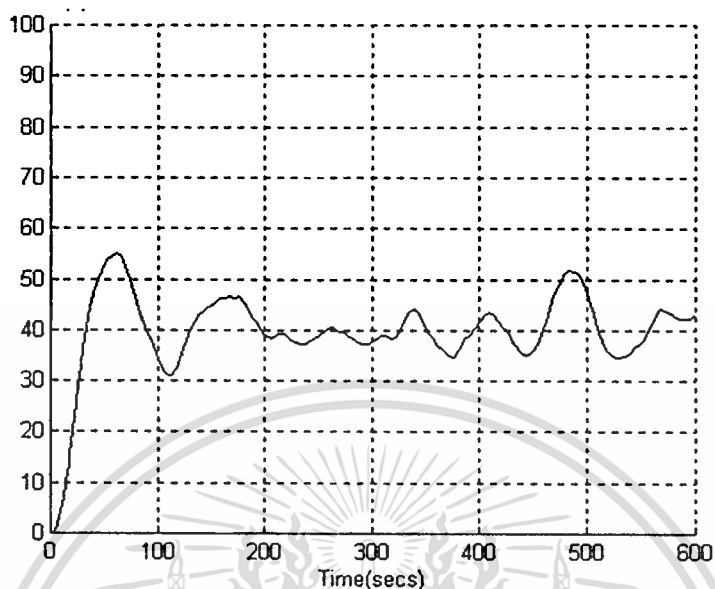
ภาพที่ 64



แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมโรบัสต์ H_∞ ในการจำลองการทำงานของ
กระบวนการอันดับสองเมื่อมีการรบกวนจากเซนเซอร์นอยส์ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 65



แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุม PI ในการจำลองการทำงานของกระบวนการ
อันดับสองเมื่อมีการรบกวนจากเซนเซอร์นอยส์ที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 20

จากผลการตอบสนองของระบบในการทดลองส่วนแรก เมื่อทดสอบป้อนอินพุต n ซึ่งเป็น
เซนเซอร์นอยส์มีลักษณะเป็นสัญญาณรบกวนแบบสุ่มแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.1 ให้กับระบบใน
ภาพที่ 57 จะเห็นว่า ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้เกือบเป็นศูนย์
แต่เมื่อเพิ่ม n ให้มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง ± 0.5 จะเห็นว่า ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ สามารถลดทอน
สัญญาณรบกวนให้มีแอมพลิจูดได้น้อยกว่า ± 0.01 จากการทดลองป้อนอินพุต n ทั้งสองระดับ
จะเห็นว่า เซนเซอร์นอยส์ถูกลดทอนให้มีแอมพลิจูดน้อยลงมาก ส่วนผลการทดลองส่วนที่สอง
ซึ่งเป็นการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบคุมโรบัสต์ H_∞ และระบบควบคุมแบบ PI ใน
การควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งและอันดับสอง จะเห็นว่า ตัวควบคุมโรบัสต์ H_∞ สามารถ
ลดทอนเซนเซอร์นอยส์ได้ดีกว่าตัวควบคุม PI

ประวัติผู้เขียน

นาย สุเมธ เขาวนไวย เกิดเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2513 ที่จังหวัดภูเก็ต สำเร็จการศึกษา
 อดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2534 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญา
 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ
 จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2535 มีผลงานทางวิชาการที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่
 จำนวน 2 เรื่อง คือ การออกแบบตัวควบคุม H_∞ สำหรับระบบเชิงเส้นและการควบคุมแบบโรบัสต์
 H_∞ สำหรับระบบเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงทุกตัวด้วยอินทริกัลเซอร์โว ประสบการณ์
 ในการทำงาน ในปี พ.ศ. 2535 เริ่มทำงานเป็นวิศวกร แผนกเครื่องมือแพทย์ บริษัทเบอร์ลี
 ยุคเกอร์ จำกัด (มหาชน) ปัจจุบันเป็นหัวหน้าวิศวกร แผนกเครื่องมือแพทย์ บริษัท เบอร์ลียุคเกอร์
 จำกัด (มหาชน)