

ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้สำหรับระบบที่ประกอบด้วยเซตไร้ผลสนองไม่ทราบค่าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

นาย ธนา เต็มกลิ่นจันทร์



ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

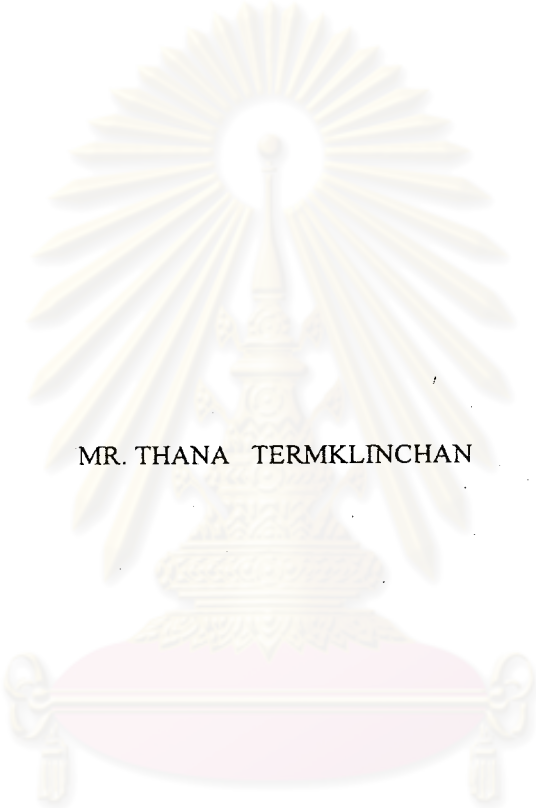
ISBN 974-636-535-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 1733 2205

AN ADAPTIVE CONTROLLER FOR SYSTEMS WITH UNKNOWN  
TIME-VARYING DEADZONES

MR. THANA TERMKLINCHAN



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1996

ISBN 974-636-535-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์      ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้สำหรับระบบที่ประกอบด้วยเซตไร้ผลสนองไม่  
ทราบค่าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา  
โดย                              นาย ธนา เต็มกลิ่นจันทร์  
ภาควิชา                         วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา            อ. ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ

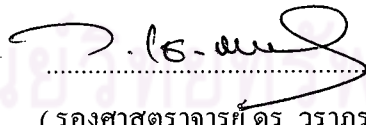
---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์สุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

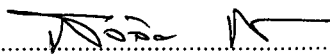
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ เขาว์วิศิษฏ์)

.....  
.....

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ)



.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวลัย กลั่นความดี)

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิจัยวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ธนา เต็มกลิ่นจันทร์ : ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้สำหรับระบบที่ประกอบด้วยเขตไร้ผลสนองไม่ทราบค่าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (AN ADAPTIVE CONTROLLER FOR SYSTEMS WITH UNKNOWN TIME-VARYING DEADZONES) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ, 109 หน้า. ISBN 974-636-535-5.

ในวิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการควบคุมกระบวนการที่ประกอบด้วยเขตไร้ผลสนองไม่ทราบค่าที่แปรตามเวลา งานวิจัยที่ผ่านมาพิจารณาเฉพาะกรณีที่เขตไร้ผลสนองเป็นแบบคงที่โดยใช้ส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเองเพื่อลดผลกระทบจากเขตไร้ผลสนอง แนวคิดหลักของวิธีดังกล่าวคือการคาดเดาพารามิเตอร์ของเขตไร้ผลสนองแล้วนำพารามิเตอร์นั้นมาสร้างส่วนผกผันของมัน แต่วิธีการนี้จะมีปัญหาถ้าพารามิเตอร์ที่จะต้องคาดเดาแปรตามเวลาและพารามิเตอร์คาดเดาที่ได้อาจจะไม่ใช่ค่าจริงก็ได้

ในวิทยานิพนธ์ปัญหาดังกล่าวถูกพิจารณาให้เป็นกรณีหนึ่งของการควบคุมระบบที่แปรตามเวลา ซึ่งมีการรบกวนทางเข้า (Input disturbances) โดยพารามิเตอร์ที่แปรตามเวลาจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ได้ในเซตกระชับ (Compact set) สัญญาควบคุมที่ใช้แบ่งเป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะเหมือนกับการควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดแบบจำลองอ้างอิงธรรมดา (simple MRAC) ซึ่งนำมาใช้สำหรับจุดทำงานในนาม (Nominal operating point) และอีกส่วนหนึ่งเป็นสัญญาสวิตชิงซึ่งใช้จัดการกับ พารามิเตอร์ที่แปรตามเวลา การรบกวนทางเข้า และเขตไร้ผลสนอง ในกรณีที่เหมาะสมเราจะสามารถรับประกันได้ว่าความคลาดเคลื่อนต่างๆจะลู่เข้าหาค่าเล็กๆซึ่งขนาดของค่านี้นั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรในการออกแบบ ในตอนท้ายของวิทยานิพนธ์ได้แสดงตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีที่นำเสนอ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอทำงานได้เป็นอย่างดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา ..... ระบบควบคุม  
ปีการศึกษา ..... 2539

ลายมือชื่อนิสิต ..... ธนา เต็มกลิ่นจันทร์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... อ.ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C815815 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ADAPTIVE CONTROL / DEADZONES / TIME-VARYING SYSTEMS / NONLINEAR-CONTROL / UNMATCHED PARAMETRIC PROBLEMS

THANA TERMKLINCHAN : AN ADAPTIVE CONTROLLER FOR SYSTEMS WITH UNKNOWN TIME-VARYING DEADZONES. . THESIS ADVISOR : MANOP WONGSAISUWAN, D.Eng. 109 pp. ISBN 947-636-535-5.

This thesis considers the control problem of plants with unknown time-varying deadzones. The adaptive control laws available in the literature for controlling the systems with unknown fixed deadzones use adaptive deadzone inverse (ADI). The main idea of ADI is to identify parameters of the deadzones, then an inverse function is constructed by these parameters. However, it is very difficult to identify it directly especially for time-varying parameters and parameters achieved may not be the correct values.

In our thesis, this problem is considered as a special case of the control problem of time-varying plants with bounded input disturbances where unknown time-varying parameters vary arbitrarily in compact sets. A simple model reference adaptive control (simple MRAC) is used to find the nominal operating point and a switching scheme is used to treat uncertainty effects such as time-varying parameters, input disturbances and deadzones. The tracking errors are guaranteed to converge to the small values in some certain cases. Finally, several illustrative examples are designed by using our method. Simulation results reveal the efficiency of the proposed methods.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา.....ระบบควบคุม

ปีการศึกษา..... 2539

ลายมือชื่อนิสิต..... ธนา เทมกลิ่นจันทร์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สวัสดิ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้คอยเอาใจใส่และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการวิจัย จนสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

ขอกราบขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ รศ. ดร. สุวลัย กลั่นความดี และ รศ. ดร. วราภรณ์ เชาววิศิษฏ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำต่างๆในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆและน้องๆในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งนิตินในสังกัด ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมทุกคนที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือให้การทำวิทยานิพนธ์นี้ลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยต้องขอบคุณน้องๆทุกคนที่บ้าน และกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน ให้ความรักความห่วงใย และกำลังใจอย่างเต็มเปี่ยมแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศุภณีย์วิทย์ทรัพย์ากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ณ
<b>บทที่ 1. บทนำ.....</b>	<b>1</b>
วัตถุประสงค์.....	4
ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>บทที่ 2. การควบคุมแบบปรับตัวเอง.....</b>	<b>6</b>
2.1 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการควบคุมแบบปรับตัวเอง.....	6
2.2 ปรัชญาการนำคาสเตียรภาพในระบบปรับตัวเอง.....	8
2.2.1 การเลื่อนของพารามิเตอร์.....	8
2.2.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์.....	9
2.3 การปรับปรุงเพื่อเพิ่มความมั่นคง.....	11
2.3.1 การรั่ว.....	12
2.3.2 การใช้เขตไร้ผลสนอง.....	15
2.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดแบบจำลองอ้างอิง.....	16
<b>บทที่ 3. เขตไร้ผลสนองในระบบควบคุม.....</b>	<b>19</b>
3.1 เขตไร้ผลสนอง.....	20
3.2 ส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเอง.....	23
3.2.1 กำหนดปัญหา.....	23
3.2.2 การออกแบบส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเอง.....	25
<b>บทที่ 4. โครงสร้างที่นำเสนอ.....</b>	<b>32</b>
4.1 พารามิเตอร์พลาตันในนามและระบบอันดับหนึ่ง.....	33
4.2 การควบคุมแบบปรับตัวเองสำหรับระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลา.....	39

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การควบคุมแบบปรับตัวเองสำหรับระบบที่ประกอบด้วยเขตไว้ ผลสนอง ไม่ทราบค่าที่แปรตามเวลา.....	45
<b>บทที่ 5. ตัวอย่างการออกแบบและผลการจำลอง.....</b>	<b>53</b>
ตัวอย่างที่ 5.1.....	53
ตัวอย่างที่ 5.2.....	64
ตัวอย่างที่ 5.3.....	67
ตัวอย่างที่ 5.4.....	69
<b>บทที่ 6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>79</b>
ข้อดีของวิธีที่นำเสนอ.....	80
ข้อด้อยของวิธีที่นำเสนอ.....	80
ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	81
<b>ภาคผนวก</b>	
<b>ก. การควบคุมแบบโครงสร้างแปรผัน.....</b>	<b>83</b>
ก.1 แนวคิดพื้นฐาน.....	84
ก.2 ขั้นตอนการออกแบบ.....	86
<b>ข. เสถียรภาพ.....</b>	<b>91</b>
ข.1 พื้นฐานเบื้องต้น.....	91
ข.1.1 ค่าประจำและปริภูมิ $L_p$ .....	91
ข.1.2 คุณสมบัติของฟังก์ชัน.....	94
ข.1.3 เมทริกซ์บวกแน่นอน.....	96
ข.2 เสถียรภาพเลียปูนอฟ.....	97
ข.2.1 นิยามของเสถียรภาพ.....	97
ข.3 วิธีตรงของเลียปูนอฟ.....	100
ข.4 ฟังก์ชันคล้ายเลียปูนอฟ.....	106
ข.5 เสถียรภาพของระบบเชิงเส้น.....	107
ประวัติผู้วิจัย.....	109



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	การควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดแบบจำลองอ้างอิง.....8
รูปที่ 3.1	แผนภูมิก่อร่างแสดงการควบคุมทางอุตสาหกรรมทั่วไป.....19
รูปที่ 3.2	ความไม่เป็นเชิงเส้นในกระบวนการ.....19
รูปที่ 3.3	การประมาณความไม่เป็นเชิงเส้น $u = f(v) = v^4$ ด้วยเส้นตรงสองเส้นที่มี มีความชัน $k_1, k_2$ .....20
รูปที่ 3.4	(ซ้าย) แทนวาล์วที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องทางเข้า (ขวา) แทนวาล์วที่มีขนาดเล็กกว่าช่องทางเข้า.....21
รูปที่ 3.5	(ซ้าย) แทนกราฟที่ได้จากวาล์วที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องทางเข้า (ขวา) แทนกราฟที่ได้จากวาล์วที่มีขนาดเล็กกว่าช่องทางเข้า.....21
รูปที่ 3.6	แผนภูมิก่อร่างแทนมอเตอร์กระแสตรงที่คำนึงถึงผลของความเสียดทาน.....22
รูปที่ 3.7	ลักษณะเขตไร้ผลสนองสำหรับแบบจำลองที่ความถี่ต่ำ.....22
รูปที่ 3.8	ระบบไฮดรอลิกไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมแกสสปริง.....22
รูปที่ 3.9	เขตไร้ผลสนองกับฮิสเทอรีซิส.....23
รูปที่ 3.10	แบบจำลองของระบบเชิงเส้นและเขตไร้ผลสนอง.....23
รูปที่ 3.11	(ซ้าย) ส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบไม่ต่อเนื่อง (ขวา) แบบประมาณต่อเนื่อง.....24
รูปที่ 3.12	แสดงสัญญาณอ้างอิง (เส้นประ) สัญญาณออกจากตัวอย่างที่ 3.1 (เส้นจาง) สัญญาณออกจากตัวอย่างที่ 3.2 (เส้นเข้ม).....30
รูปที่ 3.13	แสดงสัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวอย่างที่ 3.1 (เส้นจาง) สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวอย่างที่ 3.2 (เส้นเข้ม).....31
รูปที่ 4.1	(บน) เส้นโค้งของพารามิเตอร์ $\alpha(t)$ (ล่าง) ระบบที่มีจุดทำงานสองจุด.....33
รูปที่ 4.2	ระบบที่ประกอบด้วยเขตไร้ผลสนอง.....45
รูปที่ 5.1	ระบบที่พิจารณา.....53
รูปที่ 5.2	ผลที่ได้จากตัวควบคุมครั้งที่ (5.1.2) (บน) $y(t)$ (เส้นเข้ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) $u_d^*(t)$ .....55
รูปที่ 5.3	ผลที่ได้จากส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเองเมื่อใช้ สัญญาณอ้างอิงไซน์ (บน) $y(t)$ (เส้นเข้ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.1.1).....56

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.4	พารามิเตอร์ที่ใช้สร้างส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเองใน (5.1.1) (เส้นเข็ม) $\hat{m}(t)$ (เส้นจาง) $\hat{m}_b(t)$ (เส้นประ) $\hat{m}_l(t)$ .....	56
รูปที่ 5.5	ผลที่ได้จากวิธีที่นำเสนอเมื่อใช้สัญญาณอ้างอิงไซน์ (บน) $y(t)$ (เส้นเข็ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.1.7).....	57
รูปที่ 5.6	พารามิเตอร์ของตัวควบคุม (5.1.7) (เส้นเข็ม) $k(t)$ (เส้นจาง) $l(t)$ (เส้นประ) $\alpha(t)$ .....	57
รูปที่ 5.7	ผลที่ได้จากส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเอง เมื่อใช้สัญญาณอ้างอิงพัลส์ (บน) $y(t)$ (เส้นเข็ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.1.1).....	58
รูปที่ 5.8	พารามิเตอร์ที่ใช้สร้างส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเองใน (5.1.1) (เส้นเข็ม) $\hat{m}(t)$ (เส้นจาง) $\hat{m}_b(t)$ (เส้นประ) $\hat{m}_l(t)$ .....	58
รูปที่ 5.9	ผลที่ได้จากวิธีที่นำเสนอเมื่อใช้สัญญาณอ้างอิงพัลส์ (บน) $y(t)$ (เส้นเข็ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.1.7).....	59
รูปที่ 5.10	พารามิเตอร์ของตัวควบคุม (5.1.7) (เส้นเข็ม) $k(t)$ (เส้นจาง) $l(t)$ (เส้นประ) $\alpha(t)$ .....	59
รูปที่ 5.11	ผลที่ได้จากส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเองเมื่อ แถบไร้ผลสนองเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา (บน) $y(t)$ (เส้นเข็ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.1.1).....	60
รูปที่ 5.12	เขตไร้ผลสนองที่มีแถบไร้ผลสนองเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา.....	61
รูปที่ 5.13	ผลที่ได้จากวิธีที่นำเสนอเมื่อแถบไร้ผลสนองเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา (บน) $y(t)$ (เส้นเข็ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.1.7).....	61
รูปที่ 5.14	ผลที่ได้จากเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเองเมื่อความชันของ เขตไร้ผลสนองไม่เท่ากัน (บน) $y(t)$ (เส้นเข็ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.1.1).....	62
รูปที่ 5.15	ผลที่ได้จากวิธีที่นำเสนอเมื่อความชันของเขตไร้ผลสนองไม่เท่ากัน (บน) $y(t)$ (เส้นเข็ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.1.7).....	62
รูปที่ 5.16	(บน) สัญญาณรบกวนทางออก (ล่าง) สัญญาณรบกวนทางเข้า.....	63

## สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.17	ผลที่ได้จากส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเอง เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก (บน) $y(t)$ (เส้นเข้ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.1.1).....	63
รูปที่ 5.18	ผลที่ได้จากวิธีที่นำเสนอเมื่อมีการรบกวนจากภายนอก (บน) $y(t)$ (เส้นเข้ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.1.7).....	64
รูปที่ 5.19	ผลการจำลองที่ได้จากการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม (5.2.1) (บน) $y(t)$ (เส้นเข้ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม.....	65
รูปที่ 5.20	ผลการจำลองที่ได้จากการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม (5.2.1) (บน) พารามิเตอร์ $k_1(t)$ (เส้นเข้ม) $k_2(t)$ (เส้นจาง) และ $l(t)$ (เส้นประ) (ล่าง) พารามิเตอร์ $\alpha(t)$ .....	65
รูปที่ 5.21	ผลการจำลองที่ได้จากการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม (5.2.2) (บน) $y(t)$ (เส้นเข้ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม.....	66
รูปที่ 5.22	ผลการจำลองที่ได้จากการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม (5.2.2) (บน) พารามิเตอร์ $k_1(t)$ (เส้นเข้ม) $k_2(t)$ (เส้นจาง) และ $l(t)$ (เส้นประ) (ล่าง) พารามิเตอร์ $\delta(t) = \Delta m(t)$ .....	66
รูปที่ 5.23	(บน) $y(t)$ (เส้นเข้ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) $u_{11}(t) = u_{12}(t)$ .....	68
รูปที่ 5.24	(บน) $k_1(t) = k_2(t)$ (เส้นทึบ) $l_1(t) = l_3(t)$ (เส้นขีดยาว) $l_2(t) = l_4(t)$ (เส้นขีดสั้น) (ล่าง) $\Delta a(t)$ (เส้นทึบ) และ $\Delta b(t)$ .....	68
รูปที่ 5.25	ผลการจำลองที่ได้จากตัวควบคุม (5.4.1) เมื่อเลือกค่า $g_1 = 10$ , $g_2 = 10$ (บน) $y(t)$ (เส้นเข้ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.4.1).....	70
รูปที่ 5.26	ผลการจำลองที่ได้จากตัวควบคุม (5.4.1) เมื่อเลือกค่า $g_1 = 100$ , $g_2 = 100$ (บน) $y(t)$ (เส้นเข้ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.4.1).....	71
รูปที่ 5.27	ผลการจำลองที่ได้จากตัวควบคุม (5.4.2) เมื่อเลือกค่า $\delta^* = 0.2$ (บน) $y(t)$ (เส้นเข้ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.4.2).....	71
รูปที่ 5.28	ผลการจำลองที่ได้จากตัวควบคุม (5.4.2) เมื่อเลือกค่า $\delta^* = 1$ (บน) $y(t)$ (เส้นเข้ม) และ $y_m(t)$ (ล่าง) สัญญาณควบคุม $v(t)$ จาก (5.4.2).....	72

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.29 ผลการจำลองที่ได้จากตัวควบคุม (5.4.1) ( $g_1 = 100, g_2 = 100$ )  
เมื่อมีการรบกวน  $d(t)$   
(บน)  $y(t)$  (เส้นเข้ม) และ  $y_m(t)$  (ล่าง) สัญญาณควบคุม  $v(t)$  จาก (5.4.1).....74

รูปที่ 5.30 ผลการจำลองที่ได้จากตัวควบคุม (5.4.2) ( $\delta^* = 1$ ) เมื่อมีการรบกวน  $d(t)$   
(บน)  $y(t)$  (เส้นเข้ม) และ  $y_m(t)$  (ล่าง) สัญญาณควบคุม  $v(t)$  จาก (5.4.2).....74

รูปที่ 5.31 ผลการจำลองที่ได้จากตัวควบคุม (5.4.1) ( $g_1 = 100, g_2 = 100$ )  
เมื่อสัญญาณควบคุมถูกประวิงเวลาไป 0.1 วินาที  
(บน)  $y(t)$  (เส้นเข้ม) และ  $y_m(t)$  (ล่าง) สัญญาณควบคุม  $v(t)$  จาก (5.4.1).....75

รูปที่ 5.32 ผลการจำลองที่ได้จากตัวควบคุม (5.4.2) ( $\delta^* = 1$ )  
เมื่อสัญญาณควบคุมถูกประวิงเวลาไป 0.1 วินาที  
(บน)  $y(t)$  (เส้นเข้ม) และ  $y_m(t)$  (ล่าง) สัญญาณควบคุม  $v(t)$  จาก (5.4.2).....75

รูปที่ 5.33 ผลการจำลองที่ได้จากตัวควบคุม (5.4.3)  
(บน)  $y(t)$  (เส้นเข้ม) และ  $y_m(t)$  (ล่าง) สัญญาณควบคุม  $v(t)$  จาก (5.4.3).....76

รูปที่ 5.34 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม (5.4.3)  
(ล่าง)  $k_1(t)$  (เส้นเข้ม),  $k_2(t)$  (เส้นจาง) และ  $l(t)$  (เส้นประ).....77

รูปที่ 5.35 ผลการจำลองที่ได้จากตัวควบคุม (5.4.4)  
(บน)  $y(t)$  (เส้นเข้ม) และ  $y_m(t)$  (ล่าง) สัญญาณควบคุม  $v(t)$  จาก (5.4.4).....77

รูปที่ 5.36 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม (5.4.4)  
(จากบน→ล่าง)  $\alpha(t), l(t), k_2(t)$  และ  $k_1(t)$ .....78

รูปที่ ก.1 แสดงสถานะเริ่มต้นที่ถูกพาให้เข้าสู่พื้นผิวสวิตชิงด้วยสัญญาณควบคุม  
ที่สวิตซ์ด้วยความเร็วต่ำ.....83

รูปที่ ก.2 การควบคุมดาวเทียมโดยใช้การเปิด-ปิดทรัสเตอร์.....84

รูปที่ ก.3 ระบบอันดับสองที่บรรยายได้ด้วยสมการ (ก.1.1).....84

รูปที่ ก.4 ระบบวงปิดสำหรับ (ก.1.1) ที่ใช้สัญญาณควบคุม (ก.1.2).....85

รูปที่ ก.5 ระนาบเฟสของระบบวงปิด (ก.1.1) และ (ก.1.2) เมื่อ  $g_1 > 0$  มีค่าน้อย.....85

รูปที่ ก.6 ระนาบเฟสของระบบวงปิด (ก.1.1) และ (ก.1.2) เมื่อ  $g_1 > 0$  มีค่ามาก.....86