68

การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ฟัซซีลอจิก

นาย พิจารณ์ ประกิจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2539

ISBN 974-633-250-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17262677

PID Controller Parameters Tuning Using Fuzzy Logic

Mr. Pijarn Prakij

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

1996

ISBN 974-633-250-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ฟัซซีลอจิก
โดย	นายพิจารณ์ ประกิจ
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ จงชัยกิจ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. จรวย บุญยุบล)

....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ จงชัยกิจ)

....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. วัชรพงษ์ โขวิฑูรกิจ)

....กรรมการ

(คุณ สมนึก ภู่ศิริไพบูลย์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

พิจารณ์ ประกิจ : การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ฟัซซีลอจิก (PID CONTROLLER PARAMETERS TUNING USING FUZZY LOGIC) อ.ที่ปรึกษา : ดร.สมบูรณ์ จงชัยกิจ, 121 หน้า. ISBN 974-633-250-3

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอดี โดยการพิจารณาจากผลตอบสนองของกระบวนการที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงจุดปรับตั้งแบบขั้นบันได การตัดสินใจปรับค่าพารามิเตอร์คำนวณได้จากฐานความรู้และฐานกฎในระบบฟัซซีลอจิกซึ่งสามารถแทนการตัดสินใจของมนุษย์ได้อย่างเหมาะสม ฐานความรู้และฐานกฎได้มาจากผู้มีประสบการณ์ในงานควบคุมกระบวนการอุตสาหกรรม

ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการ และกระบวนการจริงเป็นที่น่าพอใจ งานวิทยานิพนธ์นี้ สามารถนำไปพัฒนาใช้กับระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต (ลายมือชื่อ)
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา (ลายมือชื่อ)
ปีการศึกษา 2538	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C615603 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: PID CONTROLLER TUNING/FUZZY SET/FUZZY LOGIC

PIJARN PRAKIJ : PID CONTROLLER PARAMETERS TUNING USING FUZZY LOGIC. THESIS ADVISOR : SOMBOON CHONGCHAIKIT, D.Ing. 121 pp. ISBN 974-633-250-3

This thesis presents a method for PID controller tuning. The tuning starts from gathering data of process response to step setpoint change. The parameters tuning is based on knowledgebase and rulebase in fuzzy logic system which can appropriately represent the human decision making.
These knowledgebase and rulebase are deduced from experience of industrial process control experts.

Experiments with process simulation software and process plant model show satisfactory result. This thesis can be developed to apply in industrial process control system.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2538

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำอย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ จงชัยกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. จรวย บุญยุบล ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร. วัชรพงษ์ โขวิฑูรกิจ และ คุณสมนึก ภู่ศิริไพบูลย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดต่าง ๆ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. เจษฎา ชินรุ่งเรือง ที่กรุณาให้ผู้วิจัยใช้กระบวนการจำลองในการทดสอบวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้อุปการะให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยเป็นเวลา 1 ปี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณวรรณวิทย์ กมลเดชเดชา และนิสิตปริญญาโทห้องปฏิบัติการวิจัยวัดคุมทางอุตสาหกรรม และห้องปฏิบัติการวิจัยระบบเชิงเลขที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ข้อคิดและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ คุณปู่ คุณย่า บิดา มารดา ซึ่งให้การสนับสนุนด้านการเงิน และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.......... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.......... จ
กิตติกรรมประกาศ.......... ฉ
สารบัญตาราง.......... ฎ
สารบัญรูปภาพ.......... ฏ

บทที่ 1 บทนำ
ความเบื้องต้น.......... 1
แนวคิดและทฤษฎี.......... 1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.......... 2
ขอบเขตของการวิจัย.......... 2
ขั้นตอนการดำเนินงาน.......... 3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.......... 3

บทที่ 2 ตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID
องค์ประกอบของการควบคุม.......... 4
ตัวควบคุมแบบ PID คืออะไร.......... 5
รูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID.......... 5
ผลของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID กับกระบวนการ.......... 7
การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน.......... 10

บทที่ 3 ฟัซซีลอจิก
หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับฟัซซีลอจิก.......... 16
1. ฟัซซีเซต.......... 16
2. การดำเนินการฟัซซี.......... 22
3. ความสัมพันธ์ฟัซซี.......... 25
4. กฎการผสม.......... 27
การให้เหตุผลโดยประมาณ.......... 28
1. การให้เหตุผลโดยประมาณ.......... 29

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2. กฎการนิรนัยฟัซซี 29
3. ฟัซซีอิมพลิเคชันฟังก์ชัน 32
4. ตัวดำเนินการผสม 36
5. กลไกการนิรนัยความจริง 36
ระบบฟัซซีลอจิก 38
1. ประเภทและส่วนประกอบของระบบฟัซซีลอจิก 39
2. การออกแบบระบบฟัซซีลอจิก 41
3. หลักการแปลงฟัซซี 42
4. ฐานข้อมูลและฐานกฎ 43
5. ลอจิกการตัดสินใจ 48
6. หลักการแปลงกลับฟัซซี 49
บทที่ 4 โครงสร้างของโปรแกรมการใช้ระบบฟัซซีปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID
โครงสร้างของโปรแกรม 50
1. การอ่านข้อมูลเข้าเครื่อง 50
2. ตัวควบคุมกระบวนการ 51
3. โครงสร้างโดยรวมของโปรแกรม 51
แนวทางการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID โดยผู้เชี่ยวชาญ 54
1. การพิจารณาปรับค่า PID จากผลตอบของกระบวนการ 54
2. การปรับค่า PID ให้ได้ผลตอบวงปิดตามที่ต้องการ 55
2.1 ผลตอบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 5 10 หรือ 15 เปอร์เซนต์ 55
2.2 ผลตอบที่มีการแกว่งแบบมีค่าอัตราการหน่วงเศษหนึ่งส่วนสี่ 58
การออกแบบการนำเอาระบบฟัซซีเข้ามาแทนการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ 60
1. ระบบฟัซซี 60
2. ตัวแปลงฟัซซี 61
3. ฐานกฎ 64
4. กลไกการนิรนัยความจริง และลอจิกการตัดสินใจ 67
5. ตัวแปลงกลับฟัซซี 68

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การทดสอบโปรแกรม และผลการทดสอบ
ข้อกำหนดสมรรถนะ.. 69
การทดสอบการหาค่าพารามิเตอร์ PID กับโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการ
1. การทดสอบกับกระบวนการกำลังสองที่มีเวลาประวิง.. 70
2. การทดสอบกับกระบวนการกำลังสามที่มีเวลาประวิง.. 75
3. การทดสอบกับกระบวนการกำลังสี่ที่มีเวลาประวิง... 80
การทดสอบการหาค่าพารามิเตอร์ PID กับกระบวนการจริงในห้องปฏิบัติการ........ 85
บทที่ 6 บทสรุป และข้อเสนอแนะ
บทสรุป... 95
ข้อเสนอแนะ... 95
เอกสารอ้างอิง.. 97
ภาคผนวก ก... 99
ภาคผนวก ข... 102
ภาคผนวก ค... 109
ภาคผนวก ง... 119
ประวัติผู้เขียน... 121

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 บรรทัดฐานสำหรับการให้เหตุผลแบบ GMP.................... 32
ตารางที่ 3.2 บรรทัดฐานสำหรับการให้เหตุผลแบบ GMT.................... 32
ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบฟัซซีอิมพลีเคชันแบบต่าง ๆ.................... 34
ตารางที่ 4.1 ฐานกฎที่ใช้ในการปรับค่า Proportional Band ให้ได้ผลตอบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 5, 10, 15 %.................... 65
ตารางที่ 4.2 ฐานกฎที่ใช้ในการปรับค่า Integral Time ให้ได้ผลตอบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 5, 10, 15 %.................... 65
ตารางที่ 4.3 ฐานกฎที่ใช้ในการปรับค่า Proportional Band ให้ได้ผลตอบที่มีการแกว่งแบบมีค่าอัตราการหน่วงเศษหนึ่งส่วนสี่.................... 66
ตารางที่ 4.4 ฐานกฎที่ใช้ในการปรับค่า Integral Time ให้ได้ผลตอบที่มีการแกว่งแบบมีค่าอัตราการหน่วงเศษหนึ่งส่วนสี่.................... 67
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบ กับโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสองที่มีเวลาประวิง.................... 70
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบ กับโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสามที่มีเวลาประวิง.................... 75
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบ กับโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสี่ที่มีเวลาประวิง.................... 80
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบ กับกระบวนการจริงในห้องปฏิบัติการ.................... 86
ตารางที่ 5.5 การเรียงลำดับข้อดีของแต่ละวิธีในแต่ละข้อกำหนดสมรรถนะของผลการทดสอบกับโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสองที่มีเวลาประวิง....... 91
ตารางที่ 5.6 การเรียงลำดับข้อดีของแต่ละวิธีในแต่ละข้อกำหนดสมรรถนะของผลการทดสอบกับโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสามที่มีเวลาประวิง....... 92
ตารางที่ 5.7 การเรียงลำดับข้อดีของแต่ละวิธีในแต่ละข้อกำหนดสมรรถนะของผลการทดสอบกับโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสี่ที่มีเวลาประวิง........... 93
ตารางที่ 5.8 การเรียงลำดับข้อดีของแต่ละวิธีในแต่ละข้อกำหนดสมรรถนะของผลการทดสอบกับกระบวนการจริงในห้องปฏิบัติการ.................... 94

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก.1 ผลลัพธ์ของการให้เหตุผลแบบ GMP สำหรับฟัซซีอิมพลีเคชันฟังก์ชันแบบต่าง ๆ 101
ตารางที่ ก.2 ผลลัพธ์ของการให้เหตุผลแบบ GMT สำหรับฟัซซีอิมพลีเคชันฟังก์ชันแบบต่าง ๆ 101

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 องค์ประกอบสำคัญของระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรม.. 4
รูปที่ 2.2 รูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID.. 6
รูปที่ 2.3 ผลของ Proportional Band ที่มีต่อผลตอบของกระบวนการ
ในการควบคุมแบบ P-only.. 8
รูปที่ 2.4 ผลของ Integral Time ที่มีต่อผลตอบของกระบวนการ
ในการควบคุมแบบ PI.. 9
รูปที่ 2.5 ผลของ Derivative Time ที่มีต่อผลตอบของกระบวนการ
ในการควบคุมแบบ PD.. 10
รูปที่ 2.6 สัญญาณที่มีอัตราส่วนของแอมพลิจูดเท่ากับ 1 และคาบของ
สัญญาณกำหนดตาม Ziegler และ Nichols.. 12
รูปที่ 2.7 พารามิเตอร์ที่หาจาก Process Reaction Curve
ของ Ziegler and Nichols.. 13
รูปที่ 2.8 พารามิเตอร์ที่หาจาก Process Reaction Curve ของ
Cohen and Coon.. 14
รูปที่ 4.1 การพ่วงคอมพิวเตอร์เข้ากับกระบวนการ.. 50
รูปที่ 4.2 ระบบควบคุมแบบกระจาย (DCS) รุ่น μXL ของบริษัท Yokogawa.. 51
รูปที่ 4.3 ผังการทำงานของโปรแกรมทั้งหมด.. 53
รูปที่ 4.4 ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีต่อผลตอบ
สนองแบบวงปิดของกระบวนการในการควบคุมแบบ PI.. 56
รูปที่ 4.5 ผลของการควบคุมแบบ Derivative ในการควบคุมแบบ PID.. 57
รูปที่ 4.6 ลักษณะผลตอบสนองที่มีการแกว่งแบบมีค่าอัตราการหน่วงเศษหนึ่งส่วนสี่.. 59
รูปที่ 4.7 โครงสร้างของระบบฟัซซีที่ใช้ในงานวิจัย.. 60
รูปที่ 4.8 สัญญาณเข้าของตัวแปลงฟัซซี.. 62
รูปที่ 4.9 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตของสัญญาณขาเข้า.. 64
รูปที่ 4.10 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตของสัญญาณขาออก.. 68
รูปที่ 5.1 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสองที่มีเวลา
ประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบปิดของ Ziegler-Nichols.. 71

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสองที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบเปิดของ Ziegler-Nichols.................................. 71
รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสองที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบเปิดของ Cohen-Coon.................................. 72
รูปที่ 5.4 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสองที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 5 %.............. 72
รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสองที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 10 %............ 73
รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสองที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 15 %............ 73
รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสองที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบ Quarter Decay Ratio........................ 74
รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสามที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบปิดของ Ziegler-Nichols.................................. 76
รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสามที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบเปิดของ Ziegler-Nichols.................................. 76
รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสามที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบเปิดของ Cohen-Coon.................................. 77
รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสามที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 5 %............ 77
รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสามที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 10 %.......... 78
รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสามที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 15 %.......... 78
รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสามที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบ Quarter Decay Ratio........................ 79

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสี่ที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบปิดของ Ziegler-Nichols.............................. 81
รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสี่ที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบเปิดของ Ziegler-Nichols.............................. 81
รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสี่ที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบเปิดของ Cohen-Coon.............................. 82
รูปที่ 5.18 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสี่ที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 5 %............. 82
รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสี่ที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 10 %........... 83
รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสี่ที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 15 %........... 83
รูปที่ 5.21 ผลตอบสนองของโปรแกรมจำลองการทำงานของกระบวนการกำลังสี่ที่มีเวลาประวิงในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบ Quarter Decay Ratio.............................. 84
รูปที่ 5.22 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน.............................. 85
รูปที่ 5.23 ระบบควบคุมอุณหภูมิ.............................. 85
รูปที่ 5.24 ผลตอบสนองของกระบวนการจริงในห้องปฏิบัติการ ในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบปิดของ Ziegler-Nichols.............................. 87
รูปที่ 5.25 ผลตอบสนองของกระบวนการจริงในห้องปฏิบัติการ ในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบเปิดของ Ziegler-Nichols.............................. 87
รูปที่ 5.26 ผลตอบสนองของกระบวนการจริงในห้องปฏิบัติการ ในกรณีที่ปรับค่าด้วยวิธีวงรอบเปิดของ Cohen-Coon.............................. 88
รูปที่ 5.27 ผลตอบสนองของกระบวนการจริงในห้องปฏิบัติการ ในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 5 %.............................. 88
รูปที่ 5.28 ผลตอบสนองของกระบวนการจริงในห้องปฏิบัติการ ในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 10 %.............................. 89

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.29 ผลตอบสนองของกระบวนการจริงในห้องปฏิบัติการ ในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบที่มีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุด 15 % 89
รูปที่ 5.30 ผลตอบสนองของกระบวนการจริงในห้องปฏิบัติการ ในกรณีที่ปรับค่าด้วยฟัซซีลอจิกแบบ Quarter Decay Ratio 90
รูปที่ ข.1 การให้เหตุผลโดยการใช้ α^{Λ} และ Rc 105
รูปที่ ข.2 การให้เหตุผลโดยการใช้ $\alpha^{\bullet}$ และ Rc 106
รูปที่ ค.1 การเข้าสู่โปรแกรม MATLAB 110
รูปที่ ค.2 การเข้าสู่โปรแกรมช่วยหาค่า PID 111
รูปที่ ค.3 หน้าจอในการตั้งค่าตัวเลือกของโปรแกรมช่วยหาค่า PID 112
รูปที่ ค.4 หน้าจอแสดงการเริ่มปรับค่า PB ใน New Control Loop Tuning 113
รูปที่ ค.5 หน้าจอการเก็บผลตอบของกระบวนการ 114
รูปที่ ค.6 หน้าจอแสดงค่า PB ในขณะที่ผลตอบยังไม่เริ่มเกิดการแกว่ง 115
รูปที่ ค.7 หน้าจอแสดงค่า PID เริ่มต้นที่คำนวณได้หลังจากผลตอบเริ่มเกิดการแกว่ง 116
รูปที่ ค.8 หน้าจอแสดงค่า PID ในขณะที่มีการปรับละเอียด 117
รูปที่ ค.9 หน้าจอแสดงผลการปรับค่า PID เสร็จสมบูรณ์ 118

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย