

ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวเองโดยอ้อมสำหรับถังควบคุมระดับน้ำ

INDIRECT ADAPTIVE FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR
WATER LEVEL CONTROL

สุรกิจ เลิศอุดมสุข
SURAKIT LERTUDOMSUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-118-3

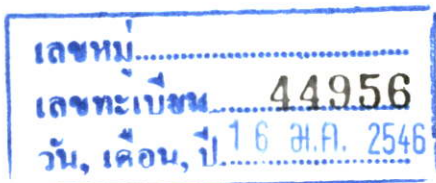
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวเองโดยอ้อมสำหรับถังควบคุมระดับน้ำ

INDIRECT ADAPTIVE FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR
WATER LEVEL CONTROL

สุรกิจ เลิศอุดมสุข

SURAKIT LERTUDOMSUK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-118-3

**INDIRECT ADAPTIVE FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR
WATER LEVEL CONTROL**

SURAKIT LERTUDOMSUK

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

2002

ISBN 974-324-118-3

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ตัวควบคุมพืชซีลोजิกแบบปรับตัวเองโดยอ้อมสำหรับถั่ง ควบคุมระดับน้ำ |
| นักศึกษา | นาย สุรกิจ เลิศอุดมสุข |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า |
| พ.ศ. | 2545 |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร. จงกล งามวิวิทย์ |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพืชซีลोजิกแบบปรับตัวเองโดยอ้อม เพื่อควบคุมระบบพืชขยายให้มีสมรรถนะและไม่มีออฟเซตเมื่อมีสัญญาณอินพุตอ้างอิงเป็น สัญญาณขั้นโดยวิธีวางโพล การออกแบบตัวควบคุมนี้ ออกแบบจากแบบจำลองพืชซึ่งกว้างที่ได้เพิ่มตัวอินทิเกรต โดยที่แบบจำลองพืชซึ่งกว้างจะถูกสร้างจากแบบจำลองพืชซีลोजิกและ ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแบบจำลองพืชซีลोजิก

ผลการทดลองกับถั่งควบคุมระดับน้ำในห้องปฏิบัติการ พบว่า ผลตอบสนองของระบบ ควบคุมมีค่าพุ่งเกินน้อยและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็ว ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ที่ระดับ 40 ซม. ยังสามารถควบคุมที่ระดับ 35 ซม. และ 45 ซม. ได้ นอกจากนี้ ระบบพืชซึ่งปิดที่ใช้ตัวควบคุม พืชซีลोजิกแบบปรับตัวเองโดยอ้อมยังสามารถควบคุมติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงที่เปลี่ยนไป โดยไม่มีออฟเซตและยังสามารถลดผลการรบกวนจากภายนอกได้

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis Title | Indirect Adaptive Fuzzy Logic Controller for Water Level Control |
| Student | Mr. Surakit Lertudomsuk. |
| Student ID. | 39061069 |
| Degree | Master of Engineering |
| Programme | Electrical Engineering |
| Year | 2002 |
| Thesis Advisor | Assoc. Prof. Dr. Jongkol Ngamwiwit |

ABSTRACT

This thesis presents an indirect adaptive fuzzy logic controller designed by pole placement so that the desired system performance can be achieved without offset. The proposed controller is designed from the global fuzzy model with an integrator added. The global fuzzy model is constructed from the local fuzzy model and its membership function. The experimental results show that the controller gives the system response as desired. The results also show the efficiency of the controller that the system response can track the changed reference signal without error at the steady state. Furthermore, the controlled system can also reject the effect of the output disturbance.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี เพราะว่าผู้วิจัยได้รับความเมตตาและกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. จงกล งามวิวิทย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้การแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ รศ.สุเชียร เกียรติสุนทร ที่ได้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาในการเขียนโปรแกรม

ขอขอบคุณ อ.ถาวร เบญจนาสุทธิ ที่ได้ให้คำปรึกษาทฤษฎีการควบคุม รวมทั้งให้ความสะดวกในการใช้อุปกรณ์การทดลองและแนะนำเกี่ยวกับการใช้งาน

ขอขอบคุณ อ.เสถียร ธีญะศรีรัตน์ ภาควิชาการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ได้ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือตลอดจนสถานที่

ขอขอบคุณ Japan International Cooperation Agency (JICA) ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ ของภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่ให้ความสะดวก

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องๆ ที่ได้ให้กำลังใจต่อผู้วิจัย

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่เคยอบรมสั่งสอน และขอบคุณพี่ชายและพี่สาว ที่ให้กำลังใจเสมอมา

สุรภิจ เลิศอุดมสุข

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญรูป..... | VI |
| สารบัญตาราง..... | VIII |
| คำย่อและสัญลักษณ์..... | IX |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 กล่าวนำ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์..... | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของพีชชี..... | 4 |
| 2.1 พีชชีเซต..... | 4 |
| 2.1.1 ทฤษฎีเซตแบบเดิม..... | 4 |
| 2.1.2 ทฤษฎีพีชชีเซต..... | 5 |
| 2.2 พีชชีลอจิก..... | 9 |
| 2.2.1 ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิม..... | 9 |
| 2.2.2 ทฤษฎีพีชชีลอจิก..... | 10 |
| 2.2.3 การพีชชีพีเคชัน..... | 16 |
| 2.2.4 การอินเฟอเรนซ์แบบพีชชี..... | 16 |
| 2.2.5 การตีพีชชีพีเคชัน..... | 17 |
| บทที่ 3 การออกแบบตัวควบคุม IAFLC..... | 20 |
| 3.1 กล่าวนำ..... | 20 |
| 3.2 การออกแบบแบบจำลองพีชชีท้องถิ่น..... | 20 |
| 3.2.1 แบบจำลองพีชชีท้องถิ่น..... | 20 |
| 3.2.2 แบบจำลองพีชชีวงกว้าง..... | 22 |
| 3.2.3 ระบบพีชชีขยาย..... | 23 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 3.3 การออกแบบตัวควบคุม | 24 |
| 3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพ | 25 |
| บทที่ 4 การสร้างตัวควบคุม IAFLC..... | 27 |
| 4.1 กล่าวนำ..... | 27 |
| 4.2 ส่วนฮาร์ดแวร์..... | 27 |
| 4.2.1 วงจรการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม..... | 27 |
| 4.2.2 I ² C โพลโทคอล..... | 27 |
| 4.2.3 วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอลและวงจรแปลงดิจิตอลเป็นแอนะล็อก.. | 28 |
| 4.2.4 วงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า..... | 29 |
| 4.3 ส่วนซอฟต์แวร์..... | 31 |
| บทที่ 5 การทดลอง..... | 39 |
| 5.1 กล่าวนำ..... | 39 |
| 5.2 การหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิด..... | 42 |
| 5.3 การควบคุมระดับน้ำของถังควบคุมระดับน้ำในเวลาจริง..... | 43 |
| 5.3.1 การควบคุมกระบวนที่ระบุด้วยตัวควบคุม IAFLC และตัวควบคุมพีไอดี | 43 |
| 5.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุม..... | 45 |
| 5.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุม เมื่อมีการรบกวน จากภายนอกและเปลี่ยนระดับอ้างอิง..... | 50 |
| 5.4 สรุปผลการทดลอง..... | 52 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 53 |
| 6.1 สรุปผลการทดลอง..... | 53 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย..... | 53 |
| 6.3 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ไขปัญหา..... | 53 |
| 6.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป..... | 54 |
| บรรณานุกรม..... | 55 |
| ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีของเลียปูนอฟ | 57 |
| ภาคผนวก ข. การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีวางโพล | 64 |
| ภาคผนวก ค. การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี..... | 67 |
| ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์..... | 71 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 84 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติก “Probability”..... | 10 |
| 2.2 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเทอม “true” และ “false” ตามนิยาม Zadeh..... | 12 |
| 2.3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” ตามนิยาม Balwin..... | 12 |
| 3.1 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับตัวแปรฟuzzy..... | 23 |
| 3.2 ระบบฟuzzyวงปิดที่ใช้ตัวควบคุม IAFLC..... | 25 |
| 4.1 วงจรการสร้างสัญญาณ SDA และ SCL..... | 28 |
| 4.2 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลและดิจิตอลเป็นแอนะล็อก..... | 28 |
| 4.3 อุปกรณ์บนการ์ดอินเตอร์เฟส..... | 29 |
| 4.4 การต่ออุปกรณ์การแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันเพื่อควบคุมวาล์ว..... | 29 |
| 4.5 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า..... | 30 |
| 4.6 การทำงานของตัวแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดัน..... | 31 |
| 4.7 การทำงานของโปรแกรมย่อย Main_Form..... | 32 |
| 4.8 การทำงานของโปรแกรมย่อย Main_Save..... | 32 |
| 4.9 การทำงานของโปรแกรมย่อย Main_Start..... | 33 |
| 4.10 การทำงานของโปรแกรมย่อย Main_Controller..... | 33 |
| 4.11 ตำแหน่งไบต์สำหรับแอดเดรสไบต์ของ PCF8591..... | 34 |
| 4.12 ตำแหน่งไบต์สำหรับควบคุมของ PCF8591..... | 35 |
| 4.13 การทำงานของโปรแกรมย่อย Main_AD_I2C..... | 36 |
| 4.14 ตำแหน่งไบต์สำหรับแอดเดรสของ MAX520..... | 37 |
| 4.15 ตำแหน่งไบต์สำหรับควบคุมของ MAX520..... | 37 |
| 4.16 การทำงานของโปรแกรมย่อย Main_DA_I2C..... | 38 |
| 5.1 กระบวนการถึงควบคุมระดับน้ำ..... | 39 |
| 5.2 ผลตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของถึงควบคุมระดับน้ำ เมื่อเปิดวาล์ว 35 40 และ 45 ซม..... | 41 |
| 5.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 40 ซม. ด้วยตัวควบคุม IAFLC..... | 43 |
| 5.4 สัญญาณควบคุม..... | 43 |
| 5.5 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 40 ซม. ด้วยตัวควบคุมพีไอดี ที่มีเกน $K_P = 2.2$ $K_I = 0.011$ และ $K_D = 1$ | 44 |
| 5.6 สัญญาณควบคุม..... | 45 |

สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.7 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 35 ซม. ด้วยตัวควบคุม IAFLC..... | 46 |
| 5.8 สัญญาณควบคุม..... | 46 |
| 5.9 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 35 ซม. ด้วยตัวควบคุมพีไอดี ที่มีเกน $K_P = 2.2$ $K_I = 0.011$ และ $K_D = 1$ | 47 |
| 5.10 สัญญาณควบคุม..... | 47 |
| 5.11 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 45 ซม. ด้วยตัวควบคุม IAFLC..... | 48 |
| 5.12 สัญญาณควบคุม..... | 48 |
| 5.13 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 45 ซม. ด้วยตัวควบคุมพีไอดี ที่มีเกน $K_P = 2.2$ $K_I = 0.011$ และ $K_D = 1$ | 49 |
| 5.14 สัญญาณควบคุม..... | 49 |
| 5.15 ผลตอบสนองของระบบควบคุม ด้วยตัวควบคุม IAFLC เมื่อมีการรบกวน จากภายนอกที่เวลา 300 วินาที..... | 50 |
| 5.16 สัญญาณควบคุม..... | 51 |
| 5.17 ผลตอบสนองของระบบควบคุม ด้วยตัวควบคุม IAFLC เมื่อเปลี่ยนระดับ อ้างอิงที่เวลา 300 วินาที..... | 51 |
| 5.18 สัญญาณควบคุม..... | 52 |
| ก.1 เสถียรภาพในแง่ของลียาปูนอฟ..... | 58 |
| ก.2 รูปคำตอบ..... | 58 |
| ก.3 เสถียรเชิงอะซิมโทต..... | 59 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน..... | 9 |
| 2.2 แสดงความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการพีชชีลอจิก ตามนิยาม Zadeh | 13 |
| 2.3 แสดงความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการพีชชีลอจิก ตามนิยาม Zadeh | 14 |
| 5.1 ความสัมพันธ์ของโพลวงรอบเปิดของแบบจำลองพีชชีท้องถิ่นกับตัวแปรพีชชี..... | 42 |
| 5.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรพีชชีกับค่าเมตริกซ์ A, B, C และ D | 42 |
| 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพีชชีกับอัตราขยายป้อนกลับสถานะ..... | 43 |
| 5.4 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับน้ำ 40 ซม..... | 45 |
| 5.5 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม ที่ระดับอ้างอิง 35 ซม. และ 45 ซม..... | 45 |

คำย่อและสัญลักษณ์

IAFLC (Indirect Adaptive Fuzzy Logic Controller) หมายถึง ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวเองโดยอัตโนมัติ

O_s (overshoot) หมายถึง ค่าพุ่งเกิน

t_r (rise time) หมายถึง ช่วงเวลาขึ้น

t_s (settling time) หมายถึง ช่วงเวลาเข้าที่

E_{SS} (steady state error) หมายถึง ค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว

G_{Pmin} หมายถึง ขอบเขตด้านล่างของกระบวนการ

G_{Pmax} หมายถึง ขอบเขตด้านบนของกระบวนการ

G_{Pnom} หมายถึง กระบวนการระบุ

PT (Pressure Transmitter) หมายถึง ตัวตรวจวัดและแปลงความดันให้เป็นกระแสไฟฟ้า

FT (Flow Transmitter) หมายถึง ตัวตรวจวัดและแปลงอัตราการไหลให้เป็นกระแสไฟฟ้า

LT (Level Transmitter) หมายถึง ตัวตรวจวัดและแปลงระดับให้เป็นกระแสไฟฟ้า

CV (Control Valve) หมายถึง วาล์วที่สามารถควบคุมอัตราการเปิดของหน้าสัมผัสได้ด้วยกระแสไฟฟ้า

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

มีการนำตัวควบคุมฟัซซีลอจิกไปควบคุมกระบวนการหรือใช้ควบคุมเครื่องจักรกลในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น การรักษาระดับความสูงของสารประกอบในกระบวนการกลั่นแยกของโรงกลั่นน้ำมัน[1] การควบคุมระดับน้ำ เพื่อระบายความร้อนสำหรับเครื่องกำเนิดไอร้อนพลังงานนิวเคลียร์ [2] และในโรงไฟฟ้า [3] เป็นต้น มักพบว่ากระบวนการเหล่านี้ เป็นระบบไม่เชิงเส้น(non-linear) และใช้งานในภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง มีการรบกวนจากภายนอก(disturbance) และมีสัญญาณรบกวน(noise) ทำให้การออกแบบตัวควบคุมทำได้ยาก ส่งผลให้ได้สมรรถนะของระบบควบคุมไม่ดี ตามปกติความรู้และประสบการณ์ในการควบคุมกระบวนการเหล่านี้ มักจะอยู่ในรูปภาษามนุษย์ ซึ่งง่ายต่อการทำความเข้าใจและปฏิบัติตาม แต่ยากในการนำไปออกแบบและสร้างเป็นตัวควบคุมโดยใช้วิธีดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการในการควบคุมของผู้ปฏิบัติการจะเป็นกฎซึ่งอยู่ในรูปเงื่อนไข ถ้า...แล้ว โดยตัวแปรของระบบถูกนิยามในเชิงคุณภาพและค่าของตัวแปรนี้มีความคลุมเครือ (vagueness)

ในปี ค.ศ.1965 Lofti Zadeh จึงนำเสนอฟัซซีเซต(fuzzy set)[4] และฟัซซีลอจิก(fuzzy logic) เพื่อใช้หาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล(approximate reasoning) เมื่อตัวแปรของระบบถูกนิยามในเชิงคุณภาพและมีความคลุมเครือ[5]

ต่อมา ในปี ค.ศ. 1974 Ebrahim Mamdani ได้นำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมของปฏิบัติการที่อยู่ในรูปเงื่อนไข ถ้า...แล้ว.... ให้เป็นกฎการควบคุมที่มีตัวแปรเป็นฟัซซีเซต[6,7] ตัวควบคุมฟัซซีจะเป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงระหว่างสัญญาณที่ใช้งานจริง เช่น สัญญาณในการตรวจวัดจากตัวตรวจรู้(Sensor) และสัญญาณในการควบคุมอุปกรณ์ซึ่งถูกวัดเป็นตัวแปรเชิงปริมาณกับกฎการควบคุมซึ่งถูกนิยามด้วยตัวแปรฟัซซี ดังนั้น การทำงานของตัวควบคุมฟัซซี จะประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 3 ส่วน คือ

1. การแปลงสัญญาณจากตัวตรวจรู้ ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงปริมาณให้เป็นตัวแปรฟัซซีเรียกว่า การฟัซซีฟิเคชัน(fuzzification)
2. การประมวลผลเพื่อหาสัญญาณควบคุมจากกฎการควบคุม โดยใช้วิธีการหาข้อสรุปจากหลักการเหตุผล ตามอัลกอริทึมแบบฟัซซี เรียกว่า การฟัซซีอินเฟอเรนซ์(fuzzy inference)
3. การหาขนาดของสัญญาณควบคุม โดยการแปลงตัวแปรฟัซซีให้เป็นตัวแปรเชิงปริมาณเรียกว่าการดีฟัซซีฟิเคชัน(defuzzification)

ในปี ค.ศ.1985 Tomohiro Takagi และ Michio Sugeno ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี โดยแปลงผลลัพธ์ของกฎการควบคุมในรูป ถ้า แล้ว ที่ได้จากประสบการณ์การควบคุมของผู้ปฏิบัติการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น(linear equation) เรียกตัวควบคุมฟัซซีชนิดนี้ว่า ตัวควบคุมฟัซซีชนิดทากากิ-ซูเกโน[8]

ในปี ค.ศ. 1995 Kazuo Tanaka และคณะ ได้นำเสนอแบบจำลองของฟัซซีที่อยู่ในรูปปริภูมิสถานะ(state space) [9-12] ต่อมา Gang Feng และคณะ ได้พิจารณาแบ่งระบบฟัซซีที่ออกเป็นแบบจำลองฟัซซีท้องถิ่น(local fuzzy model) และแบบจำลองฟัซซีวงกว้าง(global fuzzy model) [13]

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก โดยวิธีวางโพล

1.2.2 เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้ระบบฟัซซีวงปิดมีสมรรถนะที่ดีและไม่มีออฟเซต

1.2.3 เพื่อนำเสนอการทดสอบเสถียรภาพของระบบฟัซซีวงปิดด้วยวิธีของลียาปูนอฟ (Lyapunov)

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวเองโดยอ้อม(IAFLC)

1.3.2 ออกแบบโปรแกรมควบคุมเพื่อใช้ควบคุมในกระบวนการจริง

1.3.3 เปรียบเทียบผลการทดลองควบคุมกระบวนการจริง ในห้องปฏิบัติการด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวเองโดยอ้อม กับตัวควบคุมพีไอดี(PID) ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์ - นิโคลส์(Ziegler-Nichols)

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งสิ้น 6 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวนำถึงวัตถุประสงค์และหลักการใหม่ในการนำเสนอ พร้อมทั้งรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ของแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของฟัซซี กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของเซตดั้งเดิม ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของฟัซซี

บทที่ 3 การออกแบบตัวควบคุม IAFLC กล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุม IAFLC ซึ่งประกอบด้วย การสร้างแบบจำลองฟัซซีท้องถิ่น การสร้างแบบจำลองฟัซซีวงกว้าง ระบบฟัซซีขยาย (augmented fuzzy system) และเสถียรภาพของระบบฟัซซีวงปิด

บทที่ 4 การสร้างตัวควบคุม IAFLC ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะกล่าวถึง ส่วนของฮาร์ดแวร์ ซึ่งใช้เชื่อมต่อสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ กับกระบวนการที่จะถูกควบคุม และส่วนที่สองเป็นส่วนซอฟต์แวร์ เป็นส่วนที่จะส่งการควบคุมไปยังส่วนฮาร์ดแวร์

บทที่ 5 การทดลอง กล่าวถึงการนำตัวควบคุม IAFLC ที่ได้ออกแบบและสร้างแล้วนั้น ไปควบคุมระดับของถังควบคุมระดับน้ำ นอกจากนี้ ยังทำการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุม IAFLC โดยนำตัวควบคุมที่ออกแบบสำหรับควบคุมระดับ 40 ซม. ไปควบคุมที่ระดับ 35 และ 45 ซม. ตามลำดับ พร้อมทั้งทดสอบผลการตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อมีการรบกวนจากภายนอก และเมื่อมีระดับอ้างอิงเปลี่ยน ไปด้วย

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปการทดลอง ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางการพัฒนาต่อไป

ภาคผนวก ก. กล่าวถึง การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีลียาปูนอฟ

ภาคผนวก ข. กล่าวถึง การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีวางโพล

ภาคผนวก ค. กล่าวถึง งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ประวัติผู้เขียน

บทที่ 2

ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของฟัซซี

2.1 ฟัซซีเซต

2.1.1 ทฤษฎีเซตแบบเดิม(Crisp Set Theory)

2.1.1.1 คลิซป์เซต

คลิซป์เซต หมายถึง กลุ่มของสมาชิกที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ซึ่งอาจจะมีจำนวนจำกัดหรือไม่จำกัดก็ได้

2.1.1.2 เอกภพสัมพัทธ์(Universe of Discourse: U)

เอกภพสัมพัทธ์ คือ เซตที่มีสมาชิกเป็นสมาชิกทั้งหมดของขอบเขตที่ทำการพิจารณา กำหนดให้ u เป็นสมาชิกใด ๆ ของ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $u \in U$

2.1.1.3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก(Membership Function: μ)

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ มีนิยามดังนี้

$\mu_A(u)$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ u เป็นสมาชิกของเซต A

$\mu_A(u)$ มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ u ไม่เป็นสมาชิกของเซต A

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \mu_A(u) &: U \in \{0,1\} \\ \mu_A(u) &= \begin{cases} 1 & ; u \in A \\ 0 & ; u \notin A \end{cases} \end{aligned} \quad (2.1)$$

2.1.1.4 การเท่ากันของเซต

เซต A และ เซต B จะเท่ากันก็ต่อเมื่อ สมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสมาชิกของเซต B และสมาชิกทุกตัวของเซต B เป็นสมาชิกของเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A=B$

$$(A=B) \leftrightarrow ((\forall a \in B) \wedge (\forall b \in A); a \in A, b \in B) \quad (2.2)$$

2.1.1.5 การเป็นสับเซต (Subset)

เซต A จะเป็นสับเซตของเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสมาชิกของเซต B เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \subseteq B$

$$(A \subseteq B) \leftrightarrow (\forall a \in B; a \in A) \quad (2.3)$$

เซต A จะเป็นสับเซตแท้ของเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสมาชิกของเซต B และเซต A ไม่เท่ากับเซต B เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \subset B$

$$(A \subset B) \leftrightarrow ((\forall a \in B) \wedge (A \neq B); a \in A) \quad (2.4)$$

2.1.1.6 ปฏิบัติการพื้นฐานของเซต

คอมพลีเมนต์(Complement) คือตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม โดยที่สมาชิกของเซตใหม่คือสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ U ที่ไม่เป็นสมาชิกของเซตเดิม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A' = \{x | (x \in U) \wedge (x \notin A)\} \quad (2.5)$$

ยูเนียน(Union) คือปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกของเซตใหม่ได้มาจากการรวมสมาชิกทั้งหมดที่เป็นสมาชิกของเซตใดเซตหนึ่งหรือทั้ง 2 เซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A \cup B = \{x | (x \in A) \vee (x \in B)\} \quad (2.6)$$

อินเตอร์เซกชัน(Intersection) คือตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกของเซตใหม่ได้มาจากการรวมสมาชิกทั้งหมดที่เป็นสมาชิกของเซตเดิมทั้ง 2 เซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A \cap B = \{x | (x \in A) \wedge (x \in B)\} \quad (2.7)$$

2.1.2 ทฤษฎีฟัซซีเซต

2.1.2.1 ฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต คือเซตของคู่ลำดับ u และฟังก์ชันการเป็นสมาชิก $\mu_A(u)$ โดยที่ u เป็นสมาชิกใด ๆ ของ เอกภพสัมพัทธ์ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A = \{(u, \mu_A(u)) | u \in U\} \quad (2.8)$$

2.1.2.2 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A ถูกนิยามให้มีค่าอยู่ภายในช่วง 0 ถึง 1 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\mu_A(u)$

โดยที่ ค่า $\mu_A(u)$ เป็นค่าที่ระบุถึงระดับความเป็นสมาชิกของ u ในฟัซซีเซต A
 ถ้า $\mu_A(u)$ มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า u ไม่มีความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A
 ถ้า $\mu_A(u)$ มีค่าน้อย หมายความว่า u ไม่มีความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A น้อย
 ถ้า $\mu_A(u)$ มีค่ามาก หมายความว่า u ไม่มีความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A มาก
 ถ้า $\mu_A(u)$ มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า u มีความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A
 อย่างสมบูรณ์ จากข้อความข้างต้น จะได้ว่า

$$\mu_A(u): U \rightarrow [0,1] \quad (2.9)$$

2.1.2.3 การเท่ากันของฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B จะเท่ากัน ก็ต่อเมื่อ สมาชิก u ทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์ U มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A เท่ากับค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต B เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A = B$

$$(A = B) \leftrightarrow (\mu_A(u) = \mu_B(u); \forall u \in U) \quad (2.10)$$

2.1.2.4 การเป็นสับเซตของฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต A จะเป็นสับเซตของฟัซซีเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิก u ทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์ U มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต B ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \subset B$

$$(A \subset B) \leftrightarrow (\mu_A(u) \leq \mu_B(u); \forall u \in U) \quad (2.11)$$

2.1.2.5 ซัพพอร์ตของฟัซซีเซต(Support : S(A))

ซัพพอร์ตของฟัซซีเซต คือ เซตของสมาชิก u ในเอกภพสัมพัทธ์ U ที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตมากกว่า 0 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$S(A) = \{u \in U | \mu_A(u) > 0\} \quad (2.12)$$

2.1.2.6 ฟัซซีซิงเกิลตัน(Fuzzy Singleton)

ฟัซซีซิงเกิลตัน คือ ฟัซซีเซตที่มีซัพพอร์ตของเซตมีสมาชิกเพียงตัวเดียวและมีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเท่ากับ 1

2.1.2.7 α Level Set ของฟัซซีเซต(A_α)

α Level set ของฟัซซีเซต A คือ เซตของสมาชิก u ในเอกภพสัมพัทธ์ U ที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A มากกว่าหรือเท่ากับ α เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A_\alpha = \{u \in U \mid \mu_A(u) \geq \alpha\} \quad (2.13)$$

2.1.2.8 ความสูงของฟัซซีเซต(Height of Fuzzy Set)

ความสูงของฟัซซีเซต A คือค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดของฟัซซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $hgt(A)$

$$hgt(A) = \max_{u \in U} \mu_A(u) \quad (2.14)$$

2.1.2.9 นอมอลไลซ์ของฟัซซีเซต(Normalization of Fuzzy Set)

ฟัซซีเซต A จะนอมอลไลซ์ก็ต่อเมื่อฟัซซีเซต A มีความสูงของฟัซซีเซตเท่ากับ 1

$$A \text{ is normalized} \leftrightarrow hgt \mu = 1 \quad (2.15)$$

2.1.2.10 คอนเวกซ์ฟัซซีเซต(Convexity of Fuzzy Set)

ฟัซซีเซต A จะคอนเวกซ์ก็ต่อเมื่อ ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ A สอดคล้องตามเงื่อนไข ดังนี้

$$A \text{ is convex} \leftrightarrow \mu_A(\lambda u_1 + (1-\lambda)u_2) \geq \min\{\mu_A(u_1), \mu_A(u_2)\} \\ u_1, u_2 \in U, \lambda \in [0,1] \quad (2.16)$$

2.1.2.11 ฟัซซีนัมเบอร์(Fuzzy Number)

ฟัซซีนัมเบอร์ คือ ฟัซซีเซตที่มีคุณสมบัติการนอมอลไลซ์และการคอนเวกซ์

2.1.2.12 Cardinality ของฟัซซีเซต (Cardinality of Fuzzy Set)

สกาลาร์คาร์ดินาลิตี(Scalar Cardinality) ของฟัซซีเซต A บนเอกภพสัมพัทธ์ U คือผลบวกของค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ u ทุกตัวในฟัซซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$|A| = \sum_{u \in U} \mu_A(u) \quad (2.17)$$

คาร์ดินาลิตีสัมพัทธ์(Relative Cardinality) ของฟัซซีเซต A บนเอกภพสัมพัทธ์ U คือ อัตราส่วนระหว่างสกาลาร์คาร์ดินาลิตีของฟัซซีเซต A กับสกาลาร์คาร์ดินาลิตีของเอกภพสัมพัทธ์ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$\|A\| = \frac{|A|}{|U|} \quad (2.18)$$

2.1.2.13 ปฏิบัติการพื้นฐานของฟัซซีเซต

คอมพลีเมนต์ของฟัซซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ A' ถูกนิยามในรูปฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A'}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (2.19)$$

ยูเนียนของฟัซซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \cup B$ ถูกนิยามในรูปฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A \cup B}(u) = s(\mu_A(u), \mu_B(u) \geq \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\}) \quad (2.20)$$

โดยที่ S คือตัวปฏิบัติการ Triangular co-norms

อินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \cap B$ ถูกนิยามในรูปฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A \cap B}(u) = t(\mu_A(u), \mu_B(u)) \leq \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (2.21)$$

โดยที่ t คือ ตัวปฏิบัติการ Triangular co-norms

2.1.2.14 Triangular norms หรือ t-norm

t-norm คือฟังก์ชัน $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. $t(\mu_A(u), 0) = 0, t(\mu_A(u), 1) = t(1, \mu_A(u)) = \mu_A(u)$ (boundary condition)
2. $t(\mu_A(u), \mu_B(u)) = t(\mu_B(u), \mu_A(u))$ (commutativity)
3. $t(\mu_A(u), t(\mu_B(u), \mu_C(u))) = t(t(\mu_A(u), \mu_B(u)), \mu_C(u))$ (associativity)
4. if $\mu_A(u) \leq \mu_C(u)$ and $\mu_B(u) \leq \mu_D(u)$
then $t(\mu_A(u), \mu_B(u)) \leq t(\mu_C(u), \mu_D(u))$ (monotonicity)

2.1.2.15 Triangular co-norms หรือ s-norm

s-norm คือฟังก์ชัน $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. $s(\mu_A(u), 1) = 0, s(\mu_A(u), 1) = s(0, \mu_A(u)) = \mu_A(u)$ (boundary condition)
2. $s(\mu_A(u), \mu_B(u)) = s(\mu_B(u), \mu_A(u))$ (commutativity)
3. $s(\mu_A(u), s(\mu_B(u), \mu_C(u))) = s(s(\mu_A(u), \mu_B(u)), \mu_C(u))$ (associativity)
4. if $\mu_A(u) \leq \mu_C(u)$ and $\mu_B(u) \leq \mu_D(u)$
then $s(\mu_A(u), \mu_B(u)) \leq s(\mu_C(u), \mu_D(u))$ (monotonicity)

2.2 พีชชีลอจิก

2.2.1 ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิม

ทฤษฎีตรรกศาสตร์คือหลักการพื้นฐานของการหาข้อสรุปโดยประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ค่าความจริง(truth value) การปฏิบัติการ(vocabulary) และวิธีการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล(reasoning procedure) ในตรรกศาสตร์บูลีน ได้นิยามส่วนประกอบแต่ละส่วนดังนี้

(1) ค่าความจริงของประพจน์ในตรรกศาสตร์บูลีน

ประพจน์ในตรรกศาสตร์บูลีน จะมีค่าความจริงเท่ากับ 0 เมื่อประพจน์เป็นเท็จและจะมีความจริงเท่ากับ 1 เมื่อประพจน์เป็นจริง

(2) ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน

ตารางที่ 2.1 ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน

| A | B | \wedge | \vee | \vee | \rightarrow | \leftrightarrow |
|-----|-----|----------|--------|--------|---------------|-------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

(3) การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล

การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล โดยใช้ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิมจะใช้สัจนิรันดร์(tautology) สำหรับเป็นพื้นฐานในการหาข้อสรุป ตัวอย่างสัจนิรันดร์ที่ใช้เป็นพื้นฐานในการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล แสดงดังนี้

$$\text{modus ponens : } (A \wedge (A \rightarrow B)) \rightarrow B$$

$$\text{modus tollens : } ((A \rightarrow B) \wedge (\neg B)) \rightarrow (\neg A)$$

$$\text{syllogism : } ((A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow C)) \rightarrow (A \rightarrow C)$$

$$\text{contraposition : } (A \rightarrow B) \rightarrow ((\neg B) \rightarrow (\neg A))$$

2.2.2 ทฤษฎีฟัซซีลอจิก

ฟัซซีลอจิกเป็นทฤษฎีทางตรรกศาสตร์ที่ขยายมาจากทฤษฎีตรรกศาสตร์หลายค่า (multi-valued logic) โดยนิยามค่าความจริงของประพจน์เป็นตัวแปรลึงกวิสติก ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนเหมือนทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิมคือ ค่าความจริง การปฏิบัติการ และวิธีการหาข้อสรุป ตามหลักการเหตุผล

ตัวแปรลึงกวิสติก (Linguistic Variable)

ตัวแปรลึงกวิสติก ถูกนิยามด้วยฟังก์ชัน 5 เทอมคือ $(x, T(x), U, G, M)$

โดยที่ x คือชื่อของตัวแปร (label)

$T(x)$ คือเซตของค่าลึงกวิสติกของ x

U คือเอกภพสัมพัทธ์ โดยที่ $u \in U$

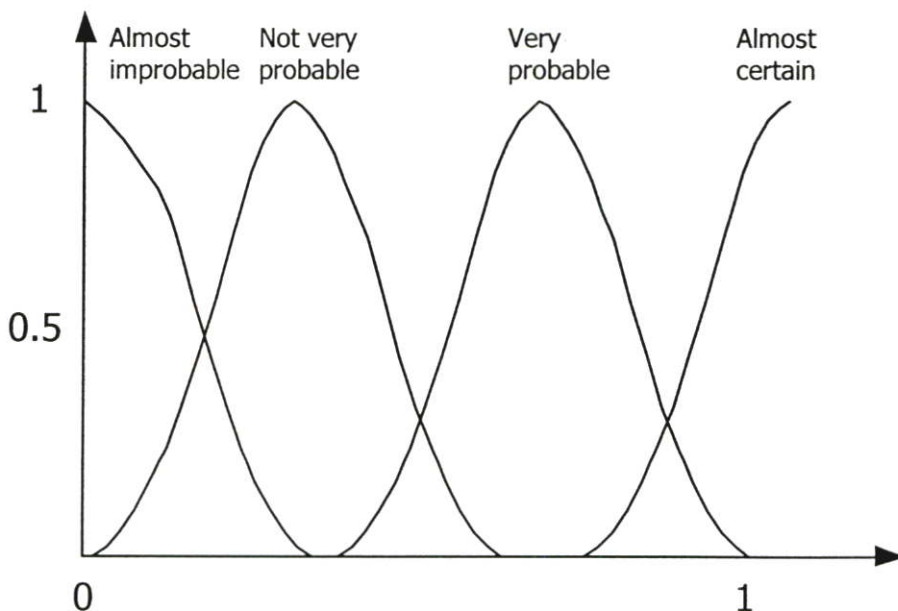
X คือชื่อของค่าลึงกวิสติกของ x ที่ถูกสร้างตามกฎ G เรียกว่า เทอม (term)

G คือ Syntactic rule ในการกำหนดชื่อของเทอม X

M คือ Semantic rule ในการนิยามคุณสมบัติของเทอม X

$M(x)$ คือฟัซซีสับเซตของเอกภพสัมพัทธ์ U

ตัวแปรลึงกวิสติกที่สำคัญในฟัซซีลอจิก ได้แก่ ตัวแปร “Probability” และ “Truth” ซึ่งตัวอย่างการนิยามค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเทอมของตัวแปรลึงกวิสติก “Probability” แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลึงกวิสติก “Probability”

ในส่วนนิยามตัวแปรลิงกวิสติก “*Truth*” ได้มีผู้นิยามไว้คือ Zadeh และ Baldwin โดย Zadeh ได้นิยามเซตของเทอมของตัวแปรลิงกวิสติก “*Truth*” ดังนี้

$$T(\text{truth}) = \{\text{true, not true, very true, not very true, ... , false, not false, very false, ... , not very true and not very false, ...}\}$$

และได้นิยามเทอมปฐม(primary term) ของตัวแปรลิงกวิสติก “*Truth*” คือ “*true*” และ “*false*” และกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมไว้ดังนี้

$$\mu_{\text{true}}(v) = \begin{cases} 0 & ; 0 \leq v \leq a \\ 2\left(\frac{v-a}{1-a}\right)^2 & ; a \leq v \leq \frac{a+1}{2} \\ 1-2\left(\frac{v-1}{1-a}\right)^2 & ; \frac{a+1}{2} \leq v \leq 1 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{false}}(v) = \mu_{\text{true}}(1-v); 0 \leq v \leq 1$$

เมื่อ $v = \frac{(1+a)}{2}$ คือจุดตัดข้าม(crossover)

$a \in [0,1]$ คือพารามิเตอร์ที่บอกถึงค่าต่ำสุดของ v ในการตัดสินใจถูกต้องของประพจน์ ซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 2.2 ต่อมา Baldwin ได้นิยามเซตของตัวแปรลิงกวิสติก “*Truth*” ไว้ดังนี้

$$T(\text{Truth}) = \{\text{true, very true, fairly true, false, very false, fairly, false}\}$$

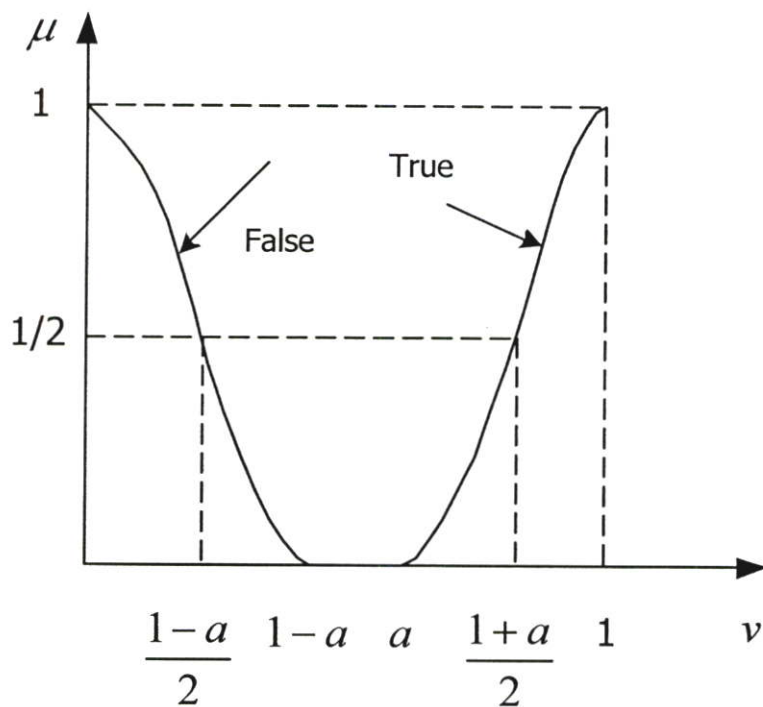
โดยกำหนดให้ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมเป็นไปตามสมการที่ต่อไปนี้

$$\mu_{\text{very true}}(v) = (\mu_{\text{true}}(v))^2 ; v \in [0,1] \quad (2.22)$$

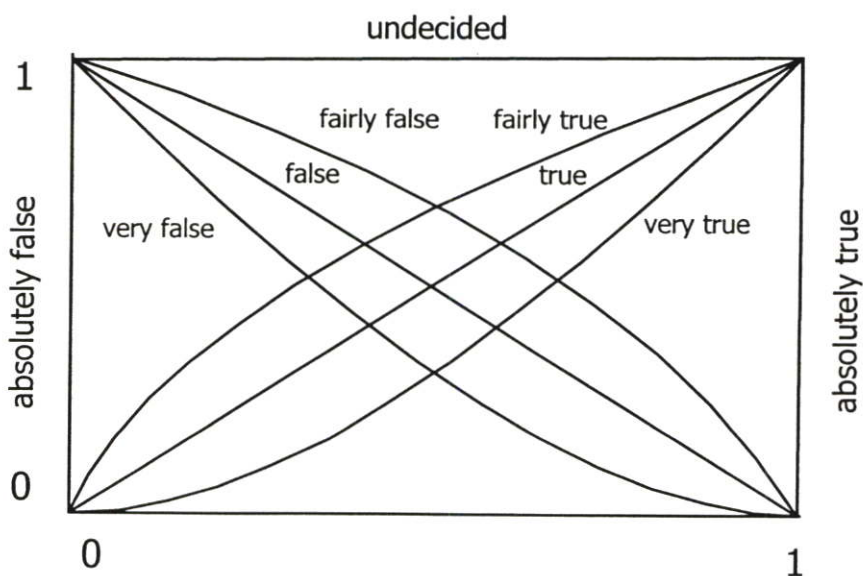
$$\mu_{\text{fairly true}}(v) = (\mu_{\text{true}}(v))^{1/2} ; v \in [0,1] \quad (2.23)$$

$$\mu_{\text{very false}}(v) = (\mu_{\text{false}}(v))^2 ; v \in [0,1] \quad (2.24)$$

$$\mu_{\text{fairly false}}(v) = (\mu_{\text{false}}(v))^{1/2} ; v \in [0,1] \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.2 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเทอม “true” และ “false” ตามนิยาม Zadeh



รูปที่ 2.3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” ตามนิยามของ Balwin

ฟัซซีลอจิกเป็นทฤษฎีตรรกศาสตร์ที่นิยามค่าความจริงของประพจน์เป็นตัวแปรลิงกวิสติก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นิยามการปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์สำหรับฟัซซีลอจิก จากนิยามดั้งเดิมของ Zadeh โดยส่วนประกอบของฟัซซีลอจิกมีด้วยกัน 3 ส่วนดังนี้

- (1) ค่าความจริงของประพจน์ในทฤษฎีฟัซซีลอจิก

กำหนดให้ $v(A)$ เป็นฟังก์ชันเซตในเอกภาพสัมพัทธ์ $V=[0,1]$ ซึ่งแทนค่าความจริงของประพจน์ A จะได้ว่า

$$v(A) = \{(v_i, \mu_i) | i=1,2,\dots,n: v_i \in [0,1]\} \quad (2.26)$$

$$v(\text{not } A) = 1 - v(A) = \{(1 - v_i, \mu_i) | i=1,2,\dots,n: v_i \in [0,1]\} \quad (2.27)$$

(2) ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์ในทฤษฎีฟังก์ชันลอจิก
กำหนดให้

$$v(A) = \{(v, \mu_A(v)) | \mu_A(v) \in [0,1]; v \in [0,1]\} \quad (2.28)$$

$$v(B) = \{(v, \mu_B(v)) | \mu_B(v) \in [0,1]; v \in [0,1]\} \quad (2.29)$$

จะได้ว่า

$$v(A) \wedge v(B) = v(A \text{ and } B) = \{(v, \min\{\mu_A(v), \mu_B(v)\})\} \quad (2.30)$$

$$v(A) \vee v(B) = v(A \text{ or } B) = \{(v, \max\{\mu_A(v), \mu_B(v)\})\} \quad (2.31)$$

$$\neg v(A) = \text{not}(v(A)) = \{(v, 1 - \mu_A(v))\} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} v(A) \rightarrow v(B) &= v(A \rightarrow B) = \neg v(A) \vee v(B) \\ &= \{(v, \max\{(1 - \mu_A(v)), \mu_B(v)\})\} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Zadeh ได้เสนอตารางความจริง สำหรับพิจารณาค่าความจริงในทางปฏิบัติของฟังก์ชันลอจิก โดยการขยายจากตรรกศาสตร์บูลีน มาเป็นตรรกะ 3 ค่าคือ true(T), false(F) และ unknown (T+F) ได้ดังตาราง ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการฟังก์ชันลอจิก ตามนิยาม Zadeh

| A | B | \wedge | \vee | $\neg A$ |
|-----|-----|----------|--------|----------|
| T | T | T | T | F |
| T | F | F | T | F |
| T | T+F | T+F | T | F |
| F | T | F | T | T |
| F | F | F | F | T |
| F | T+F | F | T+F | T |
| T+F | T | T+F | T | T+F |
| T+F | F | F | T+F | T+F |
| T+F | T+F | T+F | T+F | T+F |

นอกจาก Zadeh แล้ว Balwin ยังได้นิยามทอมและฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลึงกิว สติค "Truth" ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.3

$$\begin{aligned}
\text{true} &= \left\{ \left(v, \mu_{\text{true}}(v) = v \mid v \in [0,1] \right) \right\} \\
\text{false} &= \left\{ \left(v, \mu_{\text{false}}(v) = 1 - \mu_{\text{true}}(v) \mid v \in [0,1] \right) \right\} \\
\text{very true} &= \left\{ \left(v, (\mu_{\text{true}}(v))^2 \mid v \in [0,1] \right) \right\} \\
\text{very false} &= \left\{ \left(v, (1 - \mu_{\text{true}}(v))^2 \mid v \in [0,1] \right) \right\} \\
\text{fairly true} &= \left\{ \left(v, (\mu_{\text{true}}(v))^{1/2} \mid v \in [0,1] \right) \right\} \\
\text{fairly false} &= \left\{ \left(v, (1 - \mu_{\text{true}}(v))^{1/2} \mid v \in [0,1] \right) \right\} \\
\text{undecided} &= \left\{ (v, 1) \mid v \in [0,1] \right\} \\
\text{absolute true} &= \left\{ (v, \mu_{\text{at}}(v)) \mid v \in [0,1] \right\}; \mu_{\text{at}}(v) = \begin{cases} 1 & ; v = 1 \\ 0 & ; v \neq 1 \end{cases} \\
\text{absolute false} &= \left\{ (v, \mu_{\text{af}}(v)) \mid v \in [0,1] \right\}; \mu_{\text{af}}(v) = \begin{cases} 1 & ; v = 0 \\ 0 & ; v \neq 0 \end{cases}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{ดังนั้น } (\text{very})^k \text{ true} &\rightarrow \text{absolutely true} && \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty \\
(\text{very})^k \text{ false} &\rightarrow \text{absolutely false} && \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty \\
(\text{fairly})^k \text{ true} &\rightarrow \text{undecided} && \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty \\
(\text{fairly})^k \text{ false} &\rightarrow \text{undecided} && \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty
\end{aligned}$$

นอกจากนี้ Balwin ยังได้นิยามตัวปฏิบัติการ “and” และ “or” ด้วย minimum และ maximum ตามลำดับและสร้างตารางความจริงสำหรับฟัซซีลอจิกของการปฏิบัติการฟัซซีลอจิกไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.3 แสดงความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการฟัซซีลอจิก ตามนิยามของ Balwin

| (P) | (Q) | $(P \text{ and } Q)$ | $(P \text{ and } Q)$ |
|-----------|-------------|----------------------|----------------------|
| false | false | false | False |
| true | false | false | True |
| true | true | true | true |
| undecided | false | false | true |
| undecided | true | undecided | true |
| undecided | undecided | undecided | undecided |
| true | very true | true | very true |
| true | fairly true | fairly true | true |

(3) การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีฟัซซีลอจิก

การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีฟัซซีลอจิก จะเป็นการขยายนิยามของ สัจจนิรันดร์ที่ใช้ในตรรกศาสตร์แบบเดิม เพื่อใช้หาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลของประพจน์ที่เป็นฟัซซีเซต โดยทำการขยายนิยามของ Modus Ponens และ Modus Tollens สำหรับฟัซซีลอจิกเรียกว่า Generalized Modus Ponens : GMP และ Generalized Modus Tollens: GMT โดยแสดงตามลำดับดังนี้ เมื่อ Generalized Modus Ponens: GMP คือการหาข้อสรุปจากเหตุไปหาผล (forward data-driven)

GMP:

| | |
|--------------------|------------------------------|
| <i>Premise</i> | <i>u is A'</i> |
| <i>Implication</i> | <i>if u is A then v is B</i> |
| <i>Conclusion</i> | <i>v is B'</i> |

โดยที่ GMP Implication มีนิยามดังนี้

$$A \rightarrow B = \max \{c \in \{0,1\}, t(A, c) \leq B\} \quad (2.34)$$

Generalized Modus Tollens : GMT คือการหาข้อมูลสรุปจากผลไปหาเหตุ(backward goal-driven)

GMT :

| | |
|--------------------|------------------------------|
| <i>Premise</i> | <i>u is B'</i> |
| <i>Implication</i> | <i>if u is A then v is B</i> |
| <i>Conclusion</i> | <i>v is A'</i> |

โดยที่ GMT Implication มีนิยามดังนี้

$$A \rightarrow B = \max \{c \in \{0,1\}, t(B, c) \leq A\} \quad (2.35)$$

ฟัซซีอิมพลิเคชัน(Fuzzy Implication)

คือเงื่อนไขความสัมพันธ์แบบฟัซซีระหว่างส่วนเหตุ(antecedent) และผล(consequence) ที่ใช้ในการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล

จากนิยามของ GMP Implication ตามสมการและนิยามของ GMT Implication ตามสมการ จะเห็นได้ว่าฟัซซีอิมพลิเคชันจะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ตัวปฏิบัติการ t-norm และ s-norm

2.2.3 การฟัซซีฟิเคชัน

ฟัซซีฟิเคชันคือ กระบวนการหาค่าฟัซซีเซตบนเอกภาพสัมพันธ์ U ของอินพุต เพื่อใช้เป็นอินพุต ของระบบฟัซซี กระบวนการฟัซซีฟิเคชันสามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้

(1) วิธีฟัซซีซิงเกิลตัน จะได้ว่า Fuzzification (u_0) = A

โดยที่ A เป็นฟัซซีซิงเกิลตัน เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการควบคุมในเวลาจริง (Real time control) โดยอินพุตได้จากการวัดของเซนเซอร์

(2) วิธีฟัซซีนัมเบอร์ จะได้ว่า Fuzzification (u_0) = A

โดยที่ A เป็นฟัซซีนัมเบอร์

$$\begin{array}{ll} \text{ซึ่ง } \mu_A(u) = 1 & \text{เมื่อ } u = u_0 \\ \text{และ } \mu_A(u) \text{ ลดลง} & \text{เมื่อ } u \text{ อยู่ห่างออกไปจาก } u_0 \end{array}$$

ฟัซซีนัมเบอร์ เป็นวิธีที่เหมาะสมกับอินพุตที่มีสัญญาณรบกวนสูงซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการควบคุม

(3) วิธีไฮบริดนัมเบอร์(Hybrid number) จะได้ว่า Fuzzification(u_0) = A

โดยที่ A เป็นไฮบริดนัมเบอร์ ซึ่งไฮบริดนัมเบอร์คือ ฟัซซีนัมเบอร์ที่สมาชิกในเอกภาพสัมพันธ์เป็น random number

$$\begin{array}{ll} \text{ซึ่ง } \mu_A(u) = 1 & \text{เมื่อ } u = u_0 \\ \text{และ } \mu_A(u) \text{ ลดลง} & \text{เมื่อ } u \text{ อยู่ห่างออกไปจาก } u_0 \end{array}$$

ไฮบริดนัมเบอร์ เป็นวิธีการที่มีแนวความคิดแบบน่าจะเป็นและความเป็นไปได้ ดังนั้นจึงเหมาะกับสัญญาณอินพุตที่อยู่ในรูปของการกระจายทางสถิติ

2.2.4 การอินเฟอเรนซ์แบบฟัซซี

การอินเฟอเรนซ์คือกระบวนการในการหาข้อสรุป(conclusion) จากหลักฐาน(premise) โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุผล

กฎการคอมโพสิชันของการอินเฟอเรนซ์(Compositional Rule of Inference: CRI) กำหนดให้

| | |
|-------------|--|
| Premise | $u \text{ is } A'$ |
| Implication | $\text{if } u \text{ is } A \text{ then } v \text{ is } B$ |
| Conclusion | $v \text{ is } B'$ |

เมื่อ A, A' เป็นฟัซซีเซตในเอกภาพสัมพันธ์ U โดยที่ $u \in U$
 B, B' เป็นฟัซซีเซตในเอกภาพสัมพันธ์ V โดยที่ $v \in V$

ทำการแปลงอิมพลีเคชันเป็นความสัมพันธ์ฟัซซี R ใน $U \times V$ ดังนั้นจะหา B' ได้ดังนี้

$$B' = \begin{cases} A' \circ R & \text{max-min composition} \\ A' * R & \text{max-product composition} \\ A' \text{ av } R & \text{max-average composition} \\ A' \cdot R & \text{min-max composition} \end{cases}$$

Max-Min Composition

$$R_3 = R_1 \circ R_2 = \left\{ \left((u, w), \max_{v \in V} \left\{ \min \left[\mu_{R_1}(u, v), \mu_{R_2}(v, w) \right] \right\} \right) \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad (2.36)$$

Max-Product Composition

$$R_3 = R_1 * R_2 = \left\{ \left((u, w), \max_{v \in V} \left\{ \mu_{R_1}(u, v), \mu_{R_2}(v, w) \right\} \right) \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad (2.37)$$

Max-Average composition

$$R_3 = R_1 \text{ av } R_2 = \left\{ \left((u, w), \max_{v \in V} \left\{ \frac{\mu_{R_1}(u, v) + \mu_{R_2}(v, w)}{2} \right\} \right) \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad (2.38)$$

Min-Max composition

$$R_3 = R_1 \cdot R_2 = \left\{ \left((u, w), \min_{v \in V} \left\{ \max \left[\mu_{R_1}(u, v), \mu_{R_2}(v, w) \right] \right\} \right) \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad (2.39)$$

วิธีการคอมโพสิชันที่นิยมใช้มากที่สุดในการอินเฟอเรนซ์คือ CRI ของ Zadeh ซึ่งจะใช้ตัวปฏิบัติการ max และ min ในการปฏิบัติการ s-norm และ t-norm ตามลำดับสามารถหา B' ได้ดังสมการนี้

$$B' = A' \circ R = \left\{ \left(v, \max_{A' \in U} \left\{ \min \left[\mu_{A'}(u), \mu_R(u, v) \right] \right\} \right) \mid u \in U, v \in V \right\} \quad (2.40)$$

2.2.5 การดีฟัซซิฟิเคชัน

การดีฟัซซิฟิเคชัน คือกระบวนการหาค่าเอาต์พุตเพียงค่าเดียวที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นเอาต์พุตของฟัซซีที่มีค่าความเป็นไปได้กระจายอยู่บนเอกภพสัมพัทธ์ U ของเอาต์พุต การดีฟัซซิฟิเคชันมีหลายวิธีด้วยกัน ดังนี้

(1) Max Procedure เป็นวิธีการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยเลือกค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมากที่สุด เพื่อใช้เป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุต สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$u_o = \max_{u \in U} U(u)$$

วิธีนี้เป็นวิธีการที่สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็วที่สุด

(2) Mean of Maxima(MOM) เป็นวิธีที่ขยายมาจากวิธี max procedure เพื่อใช้ในกรณีที่มีค่าเอาต์พุตมีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากันหลายค่า ให้ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน โดยใช้สมการดังนี้

$$u_o = MOM(A) = \sum_{j=1}^J \frac{u_j}{j}$$

เมื่อ u_j คือค่าเอาต์พุตแต่ละค่าที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากันและ j คือจำนวนเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน MOM เป็นวิธีการที่สามารถทำได้รวดเร็ว เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการใช้เวลาในการคำนวณน้อยและไม่ต้องการความถูกต้องมากนัก

(3) Center of Area(COA) หรือ Center of Gravity(COG) เป็นวิธีหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก เพื่อใช้เป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุต วิธีการของ COA ทำได้โดยการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกัน และค่า u_o จะหาได้จากค่าของ u ที่ตำแหน่งของเส้นแบ่งครึ่ง สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$\int_{-\infty}^{COA} U(u)du = \int_{COA(A)}^{\infty} U(u)du$$

ในทางปฏิบัติการคำนวณโดยใช้สมการข้างต้นทำได้ยาก จึงประมาณการคำนวณวิธี COA ด้วย COG ซึ่งเป็นการหาจุดศูนย์กลางการถ่วงน้ำหนักแทนการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ใต้กราฟ การตีฟัซซีฟิเคชันโดยวิธี COG สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$u_o = COG(A) = \frac{\int uU(u)du}{\int U(u)du}$$

(4) Fuzzy Mean Method(FM) เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธี COG เพื่อลดเวลาในการคำนวณ โดยการลดระดับการควอนไทซ์ลงให้เท่ากับจำนวนเทอมของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภพสัมพัทธ์ U และใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละเทอมเป็นตัวแทนของค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าการควอนไทซ์ สมการของการตีฟัซซีฟิเคชัน โดยวิธี FM แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$u_o = FM(A) = \frac{\sum_{k=1}^{N_U} \gamma_k u_k}{\sum_{k=1}^{N_U} \gamma_k}$$

เมื่อ N_U คือจำนวนพีชชีเซตของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภาพสัมพัทธ์ U และ γ_k คือค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนของพีชชีเซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอมบนเอกภาพสัมพัทธ์ U และ u_k คือค่าระดับการเป็นสมาชิกของพีชชีเซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอม บนเอกภาพสัมพัทธ์ U

วิธี FM เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธี COG โดยใช้ระดับควอนไตซ์ที่น้อยกว่าเพื่อลดเวลาในการคำนวณ

บทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุม IAFLC

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุม IAFLC โดยแยกพิจารณาออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกจะแสดงการออกแบบแบบจำลองระบบฟัซซี ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองฟัซซีท้องถิ่น แบบจำลองฟัซซีวงกว้าง และระบบฟัซซีขยาย ส่วนที่สองจะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุม IAFLC และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบฟัซซีวงปิด

3.2 การออกแบบแบบจำลองฟัซซีท้องถิ่น

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบฟัซซี ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองฟัซซีท้องถิ่นและแบบจำลองฟัซซีแบบวงกว้าง[13]

3.2.1 แบบจำลองฟัซซีท้องถิ่น

แบบจำลองฟัซซีท้องถิ่นสร้างจากความสัมพันธ์ของระบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตหลายตัว แล้วรวมกันด้วยกฎการอินเฟอเรนซ์ของฟัซซีระหว่างตัวแปรระบบที่วัดและฟัซซีเซต

IF

$$R^i : IF z_1 \text{ is } F_1^i \text{ AND } \dots z_n \text{ is } F_n^i$$

THEN

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_i x(t) + B_i u(t) \\ y_i(t) &= C_i x(t) + D_i u(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} A_i &= \begin{bmatrix} a_{11}^i & a_{12}^i & \dots & a_{1n}^i \\ a_{21}^i & a_{22}^i & \dots & a_{2n}^i \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1}^i & a_{n2}^i & \dots & a_{nm}^i \end{bmatrix} \\ B_i &= \begin{bmatrix} b_1^i \\ b_2^i \\ \vdots \\ b_n^i \end{bmatrix} ; C_i = [c_1^i \quad c_2^i \quad \dots \quad c_n^i] \end{aligned} \quad (3.2)$$

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, m$, R^i คือกฎการอินเฟอเรนซ์ของฟัซซีที่ i , m คือ จำนวนของกฎการ

อินเฟอเรนซ์, $F_j^i (j=1,2,\dots,n)$ คือฟัซซีเซต, $x(t)$ คือตัวแปรสถานะของระบบ, $u(t)$ คือตัวแปรอินพุตของระบบ, $y_i(t)$ คือเอาต์พุตที่ i , A_i, B_i, C_i คือเมตริกซ์ค่าคงที่ที่ i และ D_i คือค่าคงที่ที่ i เอาต์พุตของระบบฟัซซีจะหาได้จากการอินเฟอเรนซ์ โดยการหาค่าเฉลี่ยของเอาต์พุต $y_i(t)$ ดังนี้

$$y(t) = \sum_{i=1}^m \mu_i y_i(t) \quad (3.3)$$

เมื่อ $\mu_i(z(t))$ เป็นค่านอร์มอลไลซ์ของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต F^i โดยที่

$$F^i = \bigcap_{j=1}^n F_j^i \quad (3.4)$$

และ

$$\sum_{i=1}^m \mu_i = 1 \quad (3.5)$$

กำหนดให้ความสัมพันธ์ของกฎการอินเฟอเรนซ์ของตัวแปรฟัซซีกับค่าผิดพลาดของระดับความสูงของน้ำ มีทั้งสิ้น 7 กฎ ดังนี้

R^1 : if error is NB
then

$$\dot{x} = A_1 x(t) + B_1 u(t)$$

$$y_1 = C_1 x(t)$$

R^2 : if error is NM
then

$$\dot{x} = A_2 x(t) + B_2 u(t)$$

$$y_2 = C_2 x(t)$$

R^3 : if error is NS
then

$$\dot{x} = A_3 x(t) + B_3 u(t)$$

$$y_3 = C_3 x(t)$$

R^4 : if error is AZ
then

$$\dot{x} = A_4 x(t) + B_4 u(t)$$

$$y_4 = C_4 x(t)$$

R^5 : if error is PS
then

$$\dot{x} = A_5x(t) + B_5u(t)$$

$$y_5 = C_5x(t)$$

R^6 : if error is PM
then

$$\dot{x} = A_6x(t) + B_6u(t)$$

$$y_6 = C_6x(t)$$

R^7 : if error is PB
then

$$\dot{x} = A_7x(t) + B_7u(t)$$

$$y_7 = C_7x(t)$$

แบบจำลองพีชชีท้องถิ่น จะสร้างได้จากการวางตำแหน่งโพลให้มีระยะห่างจากโพลวงเปิดของกระบวนการที่ระบุ $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ และ $\pm 25\%$ ดังนั้น แบบจำลองพีชชีท้องถิ่นจะมีจำนวน 6 แบบ เมื่อรวมกับแบบจำลองพีชชีท้องถิ่นของกระบวนการที่ระบุด้วยแล้วจะมีทั้งหมด 7 แบบ

3.2.2 แบบจำลองพีชชีวงกว้าง

แบบจำลองพีชชีวงกว้างซึ่งหาได้จากวิธีการอินเฟอเรนซ์มาตรฐาน [13] สามารถเขียนได้ดังนี้

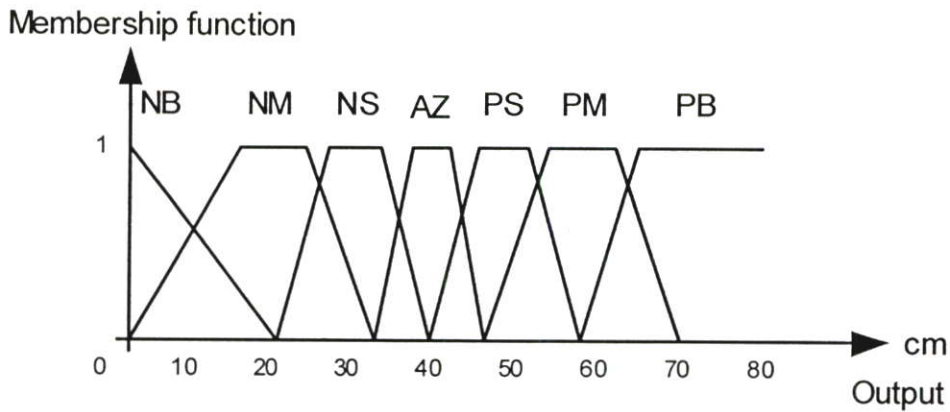
$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\tag{3.6}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}A &= \sum_{i=1}^m \mu_i A_i ; \quad B = \sum_{i=1}^m \mu_i B_i \\ C &= \sum_{i=1}^m \mu_i C_i ; \quad D = \sum_{i=1}^m \mu_i D_i\end{aligned}\tag{3.7}$$

ถ้าคู่ของ (A_i, B_i) , $i = 1, 2, \dots, m$, สามารถควบคุมได้ จะทำให้ระบบพีชชี(3.6) สามารถควบคุมแบบท้องถิ่นได้(locally controllable)และถ้าคู่ของ (A_i, C_i) , $i = 1, 2, \dots, m$, สามารถสังเกตได้ จะทำให้ระบบพีชชี(3.6) สามารถสังเกตแบบท้องถิ่นได้(locally observable)

แบบจำลองพีชชีวงกว้างจะถูกสร้างจากแบบจำลองพีชชีท้องถิ่นกับฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแบบจำลองพีชชีท้องถิ่น ดังนั้น ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแบบจำลองพีชชีท้องถิ่นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของระดับน้ำในถังกระบวนการกับตัวแปรพีชชี แสดงดังในรูปที่



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับตัวแปรฟัซซี่

3.2.3 ระบบฟัซซี่ขยาย

ระบบป้อนกลับของแบบจำลองฟัซซี่ท้องถิ่นท้องถิ่นที่มีออฟเซตเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณขั้นนั้น ระบบป้อนกลับของแบบจำลองฟัซซี่วงกว้างก็จะมีออฟเซตเช่นกันดังนั้นจึงเพิ่มตัวอินทิเกรตให้กับแบบจำลองฟัซซี่ท้องถิ่น

กำหนดให้

$$\dot{\xi}(t) = r(t) - y(t) = r(t) - Cx(t) \quad (3.8)$$

โดยที่ $\xi(t)$ คือสัญญาณผลต่างของ $r(t) - y(t)$ เมื่อ $r(t)$ คือสัญญาณอ้างอิง ดังนั้น ระบบฟัซซี่ขยายของแบบจำลองฟัซซี่วงกว้าง(3.6) เมื่อให้ค่าคงที่ D เท่ากับศูนย์ คือ

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \quad (3.9)$$

$$y(t) = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

เมื่อ A, B, C มีนิยามตามสมการที่ (3.7) และเมื่อ

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A & B \\ -C & 0 \end{bmatrix} = n+1 \quad (3.11)$$

แล้ว[14] จะสามารถออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ให้กับระบบฟัซซี่ขยายแบบวงกว้าง(3.9) และ (3.10) ให้มีเสถียรภาพและออฟเซตเป็นศูนย์ได้

3.3 การออกแบบตัวควบคุม

ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า จะใช้วิธีการวางโพลเพื่อออกแบบตัวควบคุม IAFLC สำหรับการควบคุมระบบฟัซซีขยาย ในการออกแบบตัวควบคุม IAFLC จะเริ่มจากการที่กำหนดให้

$$u_i(t) = -[K_k \quad -K_I] \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

เป็นตัวควบคุมฟัซซีของแบบจำลองฟัซซีท้องถิ่นขยาย(augmented local fuzzy model) โดยที่ K_I คืออัตราขยายป้อนกลับของตัวอินทิเกรเตอร์และ K_k คืออัตราขยายป้อนกลับสถานะ(state feedback gain) ของแบบจำลองฟัซซีท้องถิ่นอันดับที่ k ที่หาจาก[13] ดังนั้น ตัวควบคุมฟัซซีของแบบจำลองฟัซซีรวมท้องถิ่น จะหาได้จาก

$$\begin{aligned} C^i : & \text{IF } z_1 \text{ is } F_1^i \text{ AND } \dots z_n \text{ is } F_n^i \\ & \text{THEN} \\ & u_i(t) = -K_k x(t) + K_I \xi(t) \end{aligned} \quad (3.13)$$

โดยที่ C^i คือกฎการควบคุมอันดับที่ i และ k หาได้จาก

$$k = \arg \text{MAX} \{ \mu_i, i = 1, 2, \dots, m \} \quad (3.14)$$

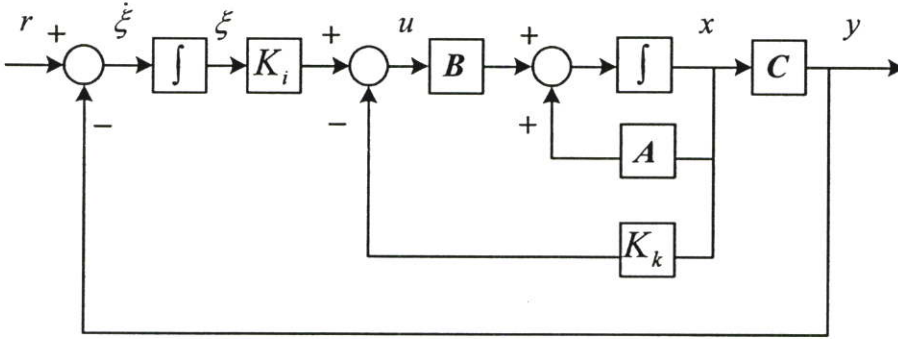
ดังนั้น ตัวควบคุม IAFLC สำหรับควบคุมระบบฟัซซีขยาย จะหาจากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(t) &= \sum_{i=1}^m \mu_i u_i(t) = - \sum_{i=1}^m \mu_i \left\{ [K_k \quad -K_I] \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \right\} \\ &= -[K_k \quad -K_I] \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.15)$$

โดยที่ $\mu_i (i = 1, 2, \dots, m)$ ถูกนิยามโดย(3.5)

ระบบฟัซซีวงปิดที่ใช้ตัวควบคุม IAFLC ที่หาได้จากสมการที่(3.15) นั้น มีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.2 และมีสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A - BK_k & BK_l \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \\ y(t) &= [C \ 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.16)$$



รูปที่ 3.2 ระบบพีชซึ่งวงปิดที่ใช้ตัวควบคุม IAFLC

3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

จาก[13] สามารถกล่าวได้ว่า เมื่อระบบพีชซึ่งขยายตามสมการที่ (3.9) สามารถควบคุมแบบทอ้งถิ่นได้แล้ว ระบบพีชซึ่งวงปิดของสมการที่(3.16) จะเสถียรแบบอะซิมโทต(asymptotically stable) ถ้า

$$\sum_{i=1}^m \mu_i \lambda_{ki} < 0 \quad (3.17)$$

หรือ

$$\sum_{i=1, i \neq k}^m \mu_i \lambda_{ki} < -\mu_k \lambda_{kk} \quad (3.18)$$

เมื่อ $k=1, 2, \dots, m$ และ λ_{ki} ถูกนิยามด้วย

$$\lambda_{ki} = \lambda_{\max}(Q_{ki}) \quad (3.19)$$

เมื่อ

$$P = \sum_{i=1}^m \beta_i P_i \quad \beta_i > 0$$

หรือ

$$P = \sum_{i=1}^m P_i \quad (3.20)$$

และ

$$-Q_{ki} = \begin{bmatrix} A - BK_k & BK_I \\ -C & 0 \end{bmatrix}^T P + P \begin{bmatrix} A - BK_k & BK_I \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

โดยที่ β_i คือค่าคงที่ที่ i , λ_{ki} คือค่าไอเกน P_i คือเมตริกซ์ค่าคงที่ i ที่มีค่าจำกัดบวก (positive definite) และ Q_{ki} คือเมตริกซ์ค่าคงที่มีค่าจำกัดบวก

ดังนั้น เสถียรภาพแบบลียาปูนอฟของระบบพีชเชิงปิดจะแสดงได้จากฟังก์ชันของลียาปูนอฟในสมการที่ (3.22)

$$V = \alpha(t)^T P \alpha(t) \quad (3.22)$$

โดยที่ $\alpha = [x \quad \xi]^T$ เมื่อหาอนุพันธ์ของ V จะได้

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\alpha}(t)^T P \alpha(t) + \alpha(t)^T P \dot{\alpha}(t) \\ &= \alpha(t)^T \left\{ \begin{bmatrix} A - BK_K & BK_I \\ -C & 0 \end{bmatrix}^T P + P \begin{bmatrix} A - BK_K & BK_I \\ -C & 0 \end{bmatrix} \right\} \alpha(t) \\ &= \alpha(t)^T \left\{ \sum_{i=1}^m \mu_i Q_{ki} \right\} \alpha(t) \end{aligned} \quad (3.23)$$

จากสมการที่ (3.17) และ (3.18) จะทำให้ $\dot{V} < 0$ เป็นจริง ดังนั้น สรุปได้ว่าระบบพีชเชิงปิดจะเสถียรแบบอะซิมโทต

บทที่ 4

การสร้างตัวควบคุม IAFLC

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นการสร้างตัวควบคุม IAFLC เพื่อควบคุมกระบวนการในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนฮาร์ดแวร์และส่วนซอฟต์แวร์ ในส่วนฮาร์ดแวร์ประกอบไปด้วยการสื่อสารแบบอนุกรม I^2C โพรโทคอล วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอล(Analog to digital converter:A/D) วงจรแปลงดิจิตอลเป็นแอนะล็อก(Digital to analog converter:D/A) และ วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสไฟฟ้า(Voltage to current converter:V/I) ส่วนของซอฟต์แวร์จะประกอบไปด้วยส่วนของโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่แสดงรายการต่างๆและรอรับคำสั่งการเลือกคำสั่งจากผู้ใช้ ส่วนของโปรแกรมย่อยในการเก็บข้อมูลและส่วนของโปรแกรมย่อยในการสร้างสัญญาณของ A/D และ D/A

4.2 ส่วนฮาร์ดแวร์

ส่วนฮาร์ดแวร์เป็นส่วนที่ใช้กำหนดชนิดและระดับของสัญญาณการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ที่จะควบคุมหรือจากทรานส์ดีวเซอร์ ให้มีความเหมาะสมและสะดวกในการวัดหรือประมวลผล

4.2.1 วงจรการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม

การติดต่อสื่อสารข้อมูลของเครื่องคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก มีด้วยกันหลายแบบ เช่น แบบขนาน แบบอนุกรม เป็นต้น ซึ่งการติดต่อสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม โดยติดต่อผ่านพอร์ตแบบอนุกรมนั้น กำลังได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากใช้สายสัญญาณและอุปกรณ์จำนวนน้อยกว่าการติดต่อแบบขนาน จึงทำให้ในการต่อวงจรเพื่อเชื่อมสัญญาณกับอุปกรณ์ภายนอกสามารถทำได้โดยไม่ยุ่งยาก ระดับลอจิกของการสื่อสารแบบอนุกรมจะกำหนดได้ดังนี้

ลอจิก "1" จะมีระดับแรงดันตั้งแต่ -3 V ถึง -15 V

ลอจิก "0" จะมีระดับแรงดันตั้งแต่ +3 V ถึง +15 V

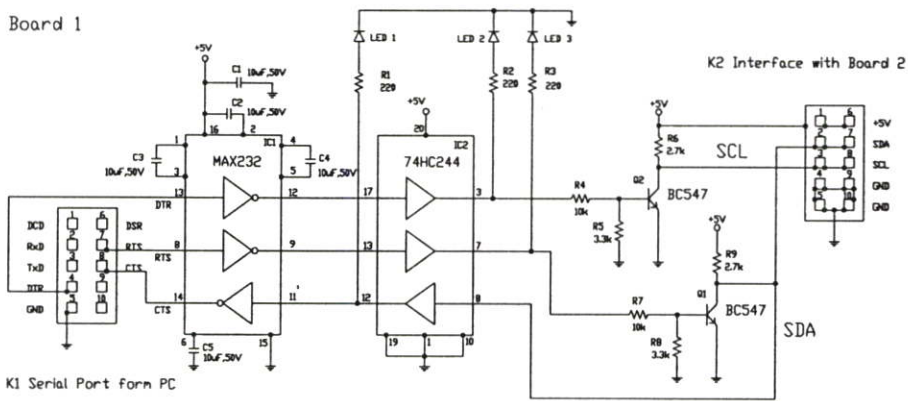
ซึ่งรูปแบบการส่งข้อมูลแบบอนุกรมจะประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

1. บิตเริ่มต้น เพื่อบอกให้อุปกรณ์ปลายทางทราบว่าอุปกรณ์ต้นทางต้องการส่งข้อมูล
2. บิตข้อมูล เป็นข้อมูลที่ส่งออกไปมีขนาดตั้งแต่ 5 – 8 บิต
3. บิตตรวจสอบพาริตี เป็นบิตเพื่อใช้ในการตรวจสอบความผิดพลาดของการส่งข้อมูล
4. บิตปิดท้าย ใช้เพื่อบอกให้ปลายทางทราบว่าข้อมูลที่ส่งในไบต์นั้นหมดเรียบร้อยแล้ว

4.2.2 I^2C โพรโทคอล

จากข้อดีของการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมด้วยคอมพิวเตอร์ติดต่อผ่านพอร์ตแบบอนุกรม ซึ่งมีขาสัญญาณเพียง 9 เส้น จึงได้เลือกใช้ I^2C โพรโทคอล ของบริษัท Philips ที่ได้พัฒนาการติดต่อระหว่างวงจรรวม(Integrated Circuit: IC) เพื่อจะสั่งงานและควบคุมภายใต้สัญญาณเพียง 2 เส้นเท่านั้น สายสัญญาณมีชื่อเรียกว่าสายสัญญาณ Serial Data line หรือ SDA และสายสัญญาณ Serial Clock Line หรือ SCL

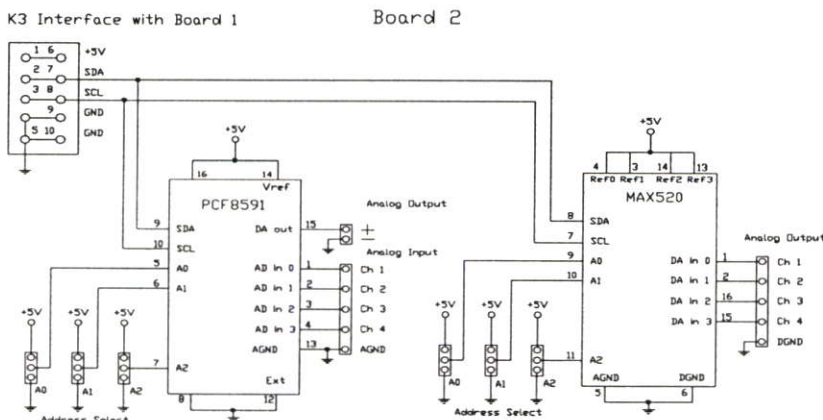
ในการสร้างสัญญาณสื่อสาร I^2C โพรโทคอล จะใช้สัญญาณที่มาจากพอร์ตแบบอนุกรมของคอมพิวเตอร์มาใช้สร้างสัญญาณ SDA และ SCL โดยที่ SDA ใช้สายสัญญาณ RTS เป็นตัวส่งและ CTS เป็นตัวรับ ส่วน SCL จะใช้ DTR เป็นตัวสร้างสัญญาณนาฬิกา แสดงวงจรดังรูป



รูป 4.1 วงจรการสร้างสัญญาณ SDA และ SCL

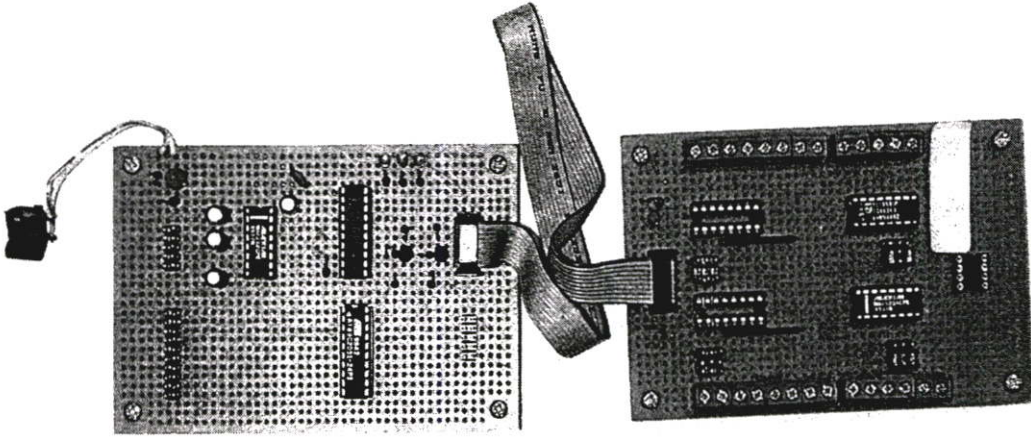
4.2.3 วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอล และวงจรแปลงดิจิตอลเป็นแอนะล็อก

วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอล จะทำหน้าที่ในการเป็นตัวรับสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นแอนะล็อกจากทรานส์ดิวเซอร์ ของกระบวนการควบคุมซึ่งมีค่าระหว่าง 1-5 V ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นดิจิตอล เพื่อใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วนวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อกนั้น จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นดิจิตอลจากเครื่องคอมพิวเตอร์เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีช่วงระหว่าง 0-5 V จะแสดงวงจรแปลงสัญญาณ ทั้ง 2 ได้ดังรูป



รูปที่ 4.2 วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอลและดิจิตอลเป็นแอนะล็อก

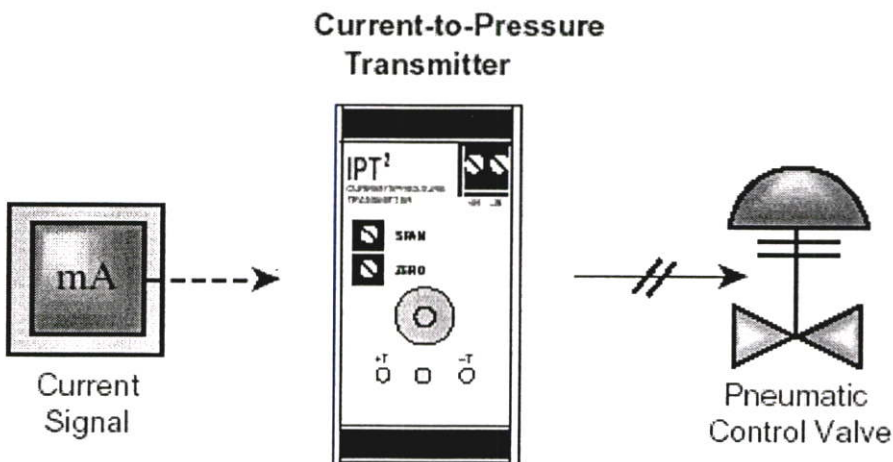
วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนของการสร้างสัญญาณ I^2C โพรโทคอล ส่วนของการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและดิจิทัลเป็นแอนะล็อก จะประกอบบนการ์ดอินเตอร์เฟซ (Interface card) แสดงดังรูป 4.3



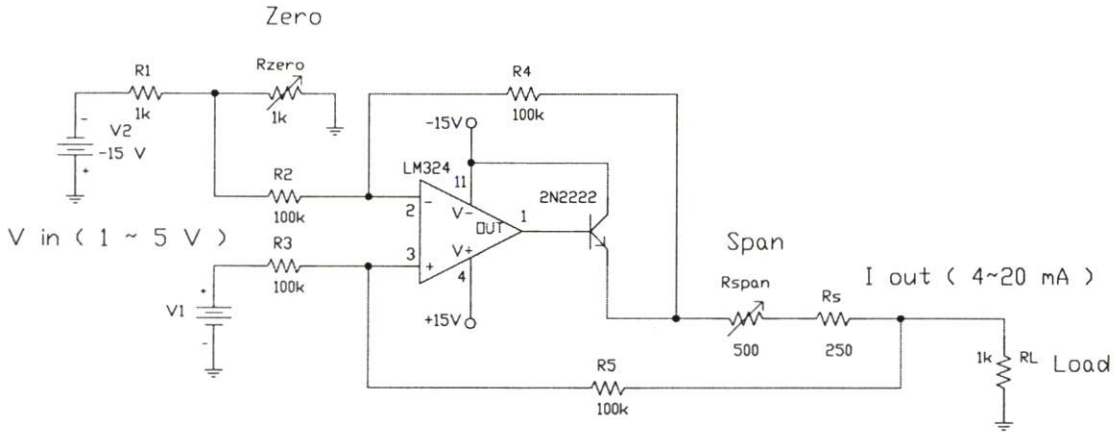
รูป 4.3 แสดงอุปกรณ์บนการ์ดอินเตอร์เฟซ

4.2.4 วงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า

จากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ที่มีค่าระหว่าง 1–5 V จะทำการเปลี่ยนให้เป็นกระแสไฟฟ้าที่มีค่าระหว่าง 4–20 mA เพื่อส่งสัญญาณเข้าสู่ตัวแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดัน ต่อไป



รูป 4.4 แสดงการต่ออุปกรณ์การแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันเพื่อควบคุมวาล์ว



รูปที่ 4.5 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า

เมื่อมีแรงดันด้านเข้า 1-5 V ต้องการเปลี่ยนให้เป็นกระแสไฟฟ้า 4-20 mA จึงหาขนาดอุปกรณ์ต่างๆ ได้ดังนี้

จาก KVL's จะได้สมการ

$$I_L = \frac{v_2 - v_1}{R_s}$$

กำหนดให้

$$v_2 = v_{in}$$

$$i_L R_s = v_{in} - v_1$$

ที่ $v_{in} = 1 \text{ V}$ จะได้ $i_L = 4 \text{ mA}$

$$(4 \text{ mA}) R_s = 1 \text{ V} - v_1$$

ที่ $v_{in} = 5 \text{ V}$ จะได้ $i_L = 20 \text{ mA}$

$$(20 \text{ mA}) R_s = 5 \text{ V} - v_1$$

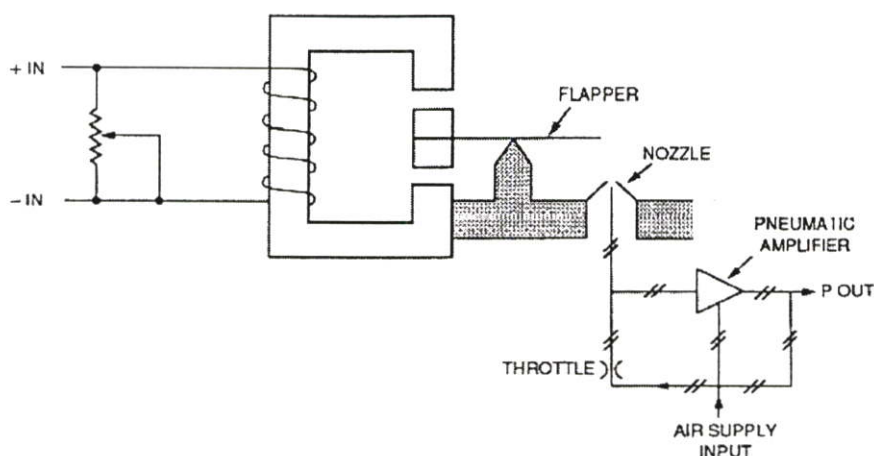
แทนค่า ในสมการ

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

$$R_s = 250 \text{ } \Omega$$

ดังนั้นจะได้ ค่า R_s ที่ใช้ในวงจรมีค่าเป็น 250 Ω

ตัวแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดัน จะใช้หลักการว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่จะดึง flapper เคลื่อนไปทำให้แรงดันลมเปลี่ยน ซึ่งจะแปรผันตามกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามา วงจรการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.6



รูป 4.6 การทำงานของตัวแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดัน

4.3 ส่วนซอฟต์แวร์

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างจากโปรแกรมวิซวลเบสิก (Visual Basic) V.6 เพื่อควบคุมกระบวนการด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยจะแบ่งออกเป็นโปรแกรมย่อยได้ดังนี้

Subroutine Main_Form

ส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นส่วนหลักของการแสดงรายการต่างๆและรอรับคำสั่งการเลือกคำสั่งจากผู้ใช้ เมื่อเข้ามาที่ Main_Form ผู้ใช้งานจะต้องกำหนดตำแหน่งของพอร์ตแบบอนุกรม ที่ต่ออยู่กับการ์ดอินเตอร์เฟสและกำหนดค่าเวลาชักตัวอย่าง (sampling time) ซึ่งเป็นค่าเวลาการชักตัวอย่างในการควบคุม มีค่าเบื้องต้นเป็น 10 ms นอกจากนี้ โปรแกรมย่อยนี้จะรอรับคำสั่งการเก็บข้อมูลที่ได้จากการ ควบคุมแล้วจึงส่งให้ออกจากโปรแกรม หลักการทำงานจะแสดงในรูปที่ 4.7

Subroutine Main_Save

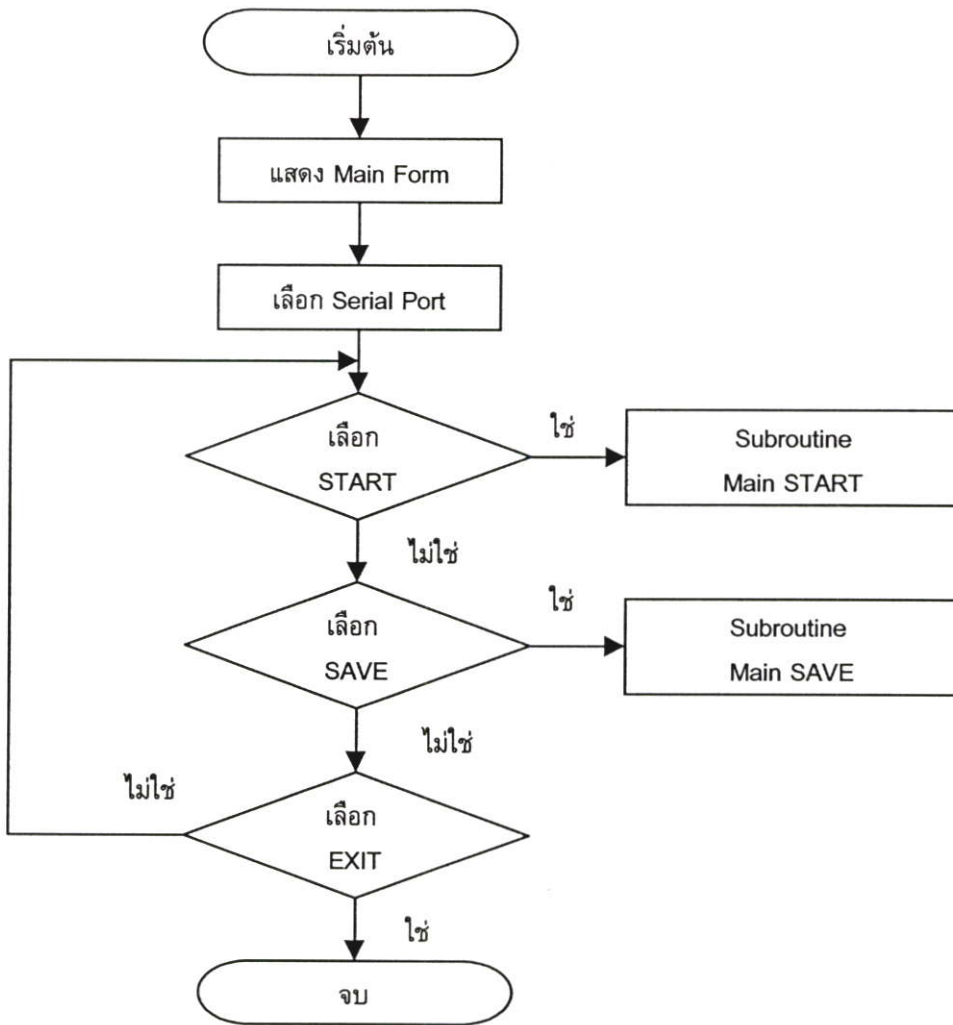
โปรแกรมย่อย Main_Save จะทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูลที่ได้จากการควบคุม มีตัวแปรที่จัดเก็บทั้งสิ้น 3 ตัวแปรคือ เวลาที่ใช้ในการควบคุม สัญญาณการควบคุม และสัญญาณตอบสนองของระบบควบคุม โดยจะเก็บในแบบตัวอักษรในรูปแบบของรหัส ASCII (American Standard Code Information Interchange) ซึ่งเป็นเท็กซ์ไฟล์ที่เราสามารถเปิดได้โดยใช้โปรแกรมอิตีเตอร์ ทั่วไปได้ แสดงในรูปที่ 4.8

Subroutine Main_Start

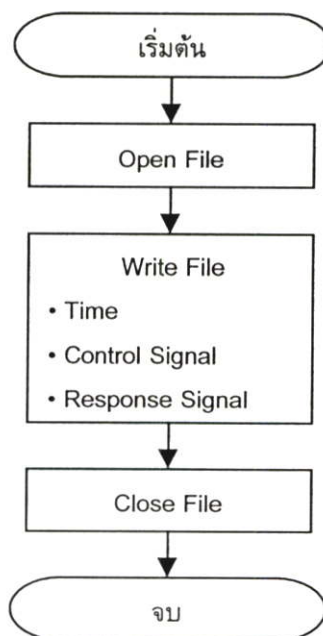
โปรแกรมย่อย Main_Start จะทำหน้าที่เริ่มการทำงานโปรแกรมควบคุม ซึ่งในการทำงานแล้ว ยังจะต้องเรียกโปรแกรมย่อยอื่นๆ เพื่อช่วยในการทำหน้าที่ต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9

Subroutine Main_Controller

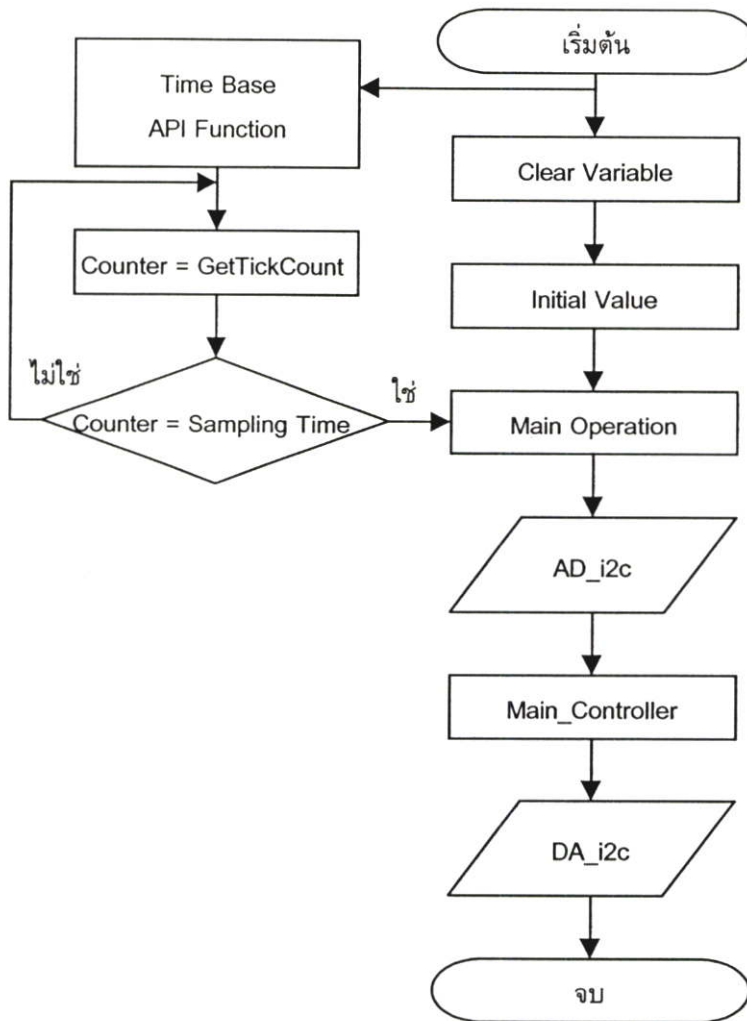
โปรแกรมย่อย Main_Controller จะทำหน้าที่ในการสร้างตัวควบคุม IAFLC ซึ่งมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 4.10



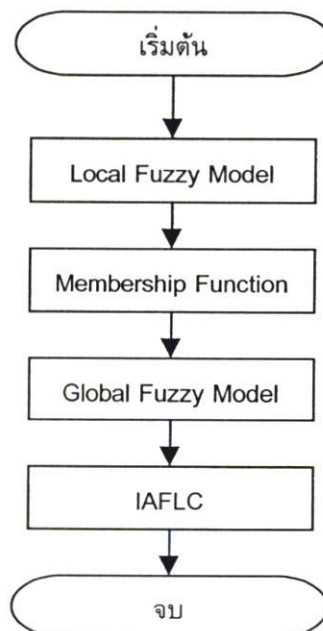
รูปที่ 4.7 แสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย Main_Form



รูปที่ 4.8 แสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย Main_Save



รูปที่ 4.9 แสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย Main_Start



รูปที่ 4.10 แสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย Main_Controller

เนื่องจากอุปกรณ์ในการแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอลและดิจิตอลเป็นแอนะล็อกใช้พรโทคอล ที่มีรูปแบบการติดต่อเป็นแบบ I^2C ดังนั้นโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงต้องสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมให้อุปกรณ์เหล่านี้ ทำหน้าที่อย่างถูกต้อง สำหรับการควบคุมสัญญาณจะผ่านสายสัญญาณ SDA และ SCL โดยจะเรียกว่าบัส I^2C ซึ่งจะมีด้วยกัน 5 สถานะคือ

บัสว่าง(bus not busy) สถานะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสถานะลอจิกบนสาย SDA และ SCL เป็นลอจิกสูงทั้งคู่ ซึ่งจะหมายถึงการถ่ายทอดข้อมูลเริ่มต้นขึ้นได้

เริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูล(start data transfer) จะเกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจากสูงไปต่ำ ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง จะเรียกสถานะที่เกิดขึ้นนี้ว่า สถานะเริ่มต้น(start)

หยุดการถ่ายทอดข้อมูล(stop data transfer)เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจากสูงไปต่ำ ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง จะเรียกสถานะที่เกิดขึ้นนี้ว่า สถานะหยุด(Stop)

ข้อมูลดำรงอยู่บนบัส(data valid) สถานะนี้เกิดขึ้นถัดจากสถานะเริ่มต้นโดยสถานะลอจิก ที่เกิดขึ้นบนสาย SDA ก็คือข้อมูลที่ทำการถ่ายทอด เมื่อสาย SCL เป็นลอจิกสูง สถานะที่สาย SDA ต้องคงที่ เพื่อให้อุปกรณ์รับรู้ข้อมูลในจังหวะนั้นว่าเป็น "0" หรือ "1" ข้อมูลอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะที่สาย SCL เป็นลอจิกต่ำ แต่เมื่อใดก็ตามที่ต้องการให้เกิดการถ่ายทอดข้อมูลอย่างสมบูรณ์ สถานะลอจิกที่ขา SDA ต้องคงที่ตลอดเวลาที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง หากเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะลอจิกในขณะที่สาย SCL มีลอจิกสูงอยู่นั้น อุปกรณ์หลัก (Master) ที่ทำการควบคุมการถ่ายทอดข้อมูลจะแปลความหมายเป็นสถานะหยุดหรือสถานะเริ่มต้นก็ได้ ทำให้ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอดนั้นเกิดความผิดพลาดขึ้นได้

รับรู้ข้อมูล(acknowledge) เกิดขึ้นหลังจากที่การถ่ายทอดข้อมูลจากตัวส่งมายังตัวรับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยตัวส่งจะทำการส่งข้อมูลมา 1 บิตเรียกว่าบิตรับรู้ มีสถานะเป็นลอจิกสูง หลังจากส่งข้อมูลมาครบถ้วน ส่วนอุปกรณ์หลักจะทำการส่งสัญญาณรับรู้พิเศษซึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกา เพื่อตอบสนองบิตรับรู้ที่ส่งมาจากตัวส่ง ทางด้านตัวรับจะส่งบิตรับรู้ที่มีสถานะลอจิกต่ำลงบนบัส อุปกรณ์ที่ถูกอ้างถึงในการติดต่อหรือกำลังติดต่ออยู่ในขณะนั้นก็จะกำหนดบิตรับรู้เพื่อตอบสนองให้ทราบว่าได้รับข้อมูลในแต่ละไบต์เรียบร้อยแล้ว

ไบต์สำหรับแอดเดรส

| บิต 7 | บิต 6 | บิต 5 | บิต 4 | บิต 3 | บิต 2 | บิต 1 | บิต 0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 1 | 0 | 0 | 1 | A2 | A1 | A0 | R/ \bar{W} |

รูปที่ 4.11 แสดงตำแหน่งไบต์สำหรับแอดเดรส ของ PCF8591

ก่อนที่จะเริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่ออยู่บนบัส ต้องมีการอ้างถึงตัว IC ที่ติดต่อด้วยก่อน โดยการอ้างถึงอุปกรณ์บนบัส I^2C นั้นจะใช้การอ้างถึงแบบ 7 บิตหรือ 10 บิต ในที่นี้จะใช้การอ้างถึงแบบ 7 บิตก็เพียงพอ หลังจากที่ติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัวได้เรียบร้อยแล้ว ก็จะเริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูลต่อไป ไบต์สำหรับแอดเดรส จะมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับไอซี PCF8591 นั้น ตำแหน่งแอดเดรสจะอ้างถึง 4 บิตบนมีค่าเท่ากับ 1001_2

ข้อมูล 3 บิตถัดมาจะเป็นค่าของแอดเดรส ที่ผู้ใช้งานสามารถกำหนดได้ทางฮาร์ดแวร์เพื่อเลือก IC PCF8591 ที่ต้องการติดต่อด้วยในกรณีที่มีการต่อใช้งาน PCF8591 มากกว่า 1 ตัว ส่วนบิต LSB ใช้ในการกำหนดว่าต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับ IC ตัวนั้นๆ

ไบต์สำหรับควบคุม

| บิต 7 | บิต 6 | บิต 5 | บิต 4 | บิต 3 | บิต 2 | บิต 1 | บิต 0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | X | X | X | 0 | X | X | X |

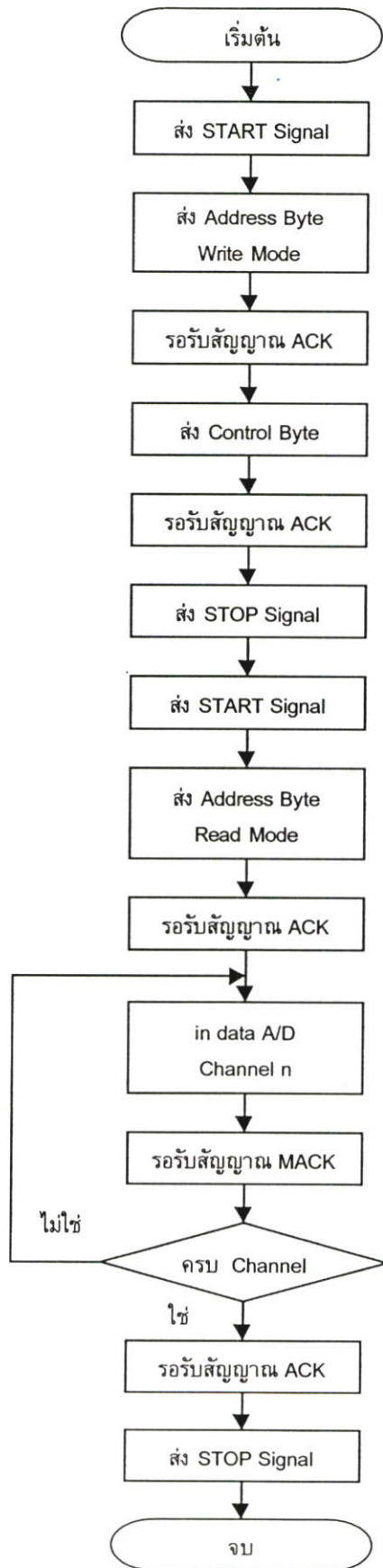
รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งไบต์สำหรับควบคุม ของ PCF8591

หลังจากส่งข้อมูลกำหนดแอดเดรส ให้แก่ PCF8591 แล้ว ต้องส่งข้อมูลควบคุมตามไปด้วย เพื่อกำหนดคุณสมบัติของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ภายใน PCF8591 โดยมีรายละเอียดของข้อมูลในแต่ละบิตดังนี้

1. บิต 7 และ บิต 3 กำหนดให้เป็น "0"
2. บิต 6 ของข้อมูลควบคุมใช้สำหรับการทำให้ขาแอนะล็อกเอาต์พุตทำงาน เมื่อต้องการให้ขาทำงานต้องกำหนดให้ขาเป็น "1"
3. บิต 5 และ บิต 4 ของข้อมูลควบคุมใช้สำหรับการกำหนดรูปแบบของสัญญาณแอนะล็อกอินพุต ที่ป้อนให้แก่ PCF8591
4. บิต 2 ใช้สำหรับเลือกรูปแบบการอ่านข้อมูลจากขาแอนะล็อกอินพุต จะเป็นการอ่านจากเพียงอินพุตเดียวหรืออ่านแบบเรียงลำดับทุกอินพุต ถ้าต้องการเลือกให้อ่านแบบเรียง ลำดับต้องกำหนดให้บิตนี้เป็น "1"
5. บิต 0 และ บิต 1 ใช้สำหรับกำหนดช่องของแอนะล็อกอินพุตที่ต้องการอ่าน

Subroutine AD_I2C

อุปกรณ์ในการแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ได้เลือกใช้ IC เบอร์ PCF 8591 ของบริษัท Philips มีความละเอียด 8 บิต(256 ระดับ) 4 ช่อง แยกได้อิสระ และมีภาคแปลงดิจิตอลเป็นแอนะล็อก ความละเอียด 8 บิต อีก 1 ช่อง แสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย AD_I2C ในรูป 4.12



รูปที่ 4.13 แสดงการทำงานของโปรแกรมน้อย Main_AD_I2C

ส่วนอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นแปลงดิจิตอลเป็นแอนะล็อก ได้เลือกใช้ IC เบอร์ MAX520 : ซึ่งมีจำนวนช่องส่งสัญญาณแอนะล็อก จำนวน 4 ช่องแยกอิสระ มีความละเอียด 8 บิต ในการกำหนดสัญญาณควบคุม MAX520 จะต้องมีการอ้างถึงและกำหนดการทำงานเช่นเดียวกับ PCF8591 ซึ่งมีรายละเอียดของไบต์สำหรับแอดเดรส และไบต์สำหรับควบคุม ดังนี้

ไบต์สำหรับแอดเดรส

| บิต 7 | บิต 6 | บิต 5 | บิต 4 | บิต 3 | บิต 2 | บิต 1 | บิต 0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 1 | 0 | 1 | A2 | A1 | A0 | 0 |

รูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งไบต์สำหรับแอดเดรส ของ MAX520

ตำแหน่งแอดเดรส ที่อ้างถึง 4 บิตบนคือบิตที่ 4 ถึงบิตที่ 7 จะต้องมีค่าเท่ากับ 0101_2 สำหรับ MAX520

บิต 3 และ บิต 0 กำหนดให้มีค่า "0"

บิต 1 ถึง บิต 3 ใช้สำหรับเลือก MAX520 ในกรณีที่ต่อบนบัสไว้มากกว่า 1 ตัว

ไบต์สำหรับควบคุม

| บิต 7 | บิต 6 | บิต 5 | บิต 4 | บิต 3 | บิต 2 | บิต 1 | บิต 0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0 | 0 | X | X | 0 | A1 | A0 |

รูปที่ 4.15 แสดงตำแหน่งไบต์สำหรับควบคุม ของ MAX520

บิต 5 ถึง บิต 7 และบิต 2 กำหนดให้มีค่าเป็น "0"

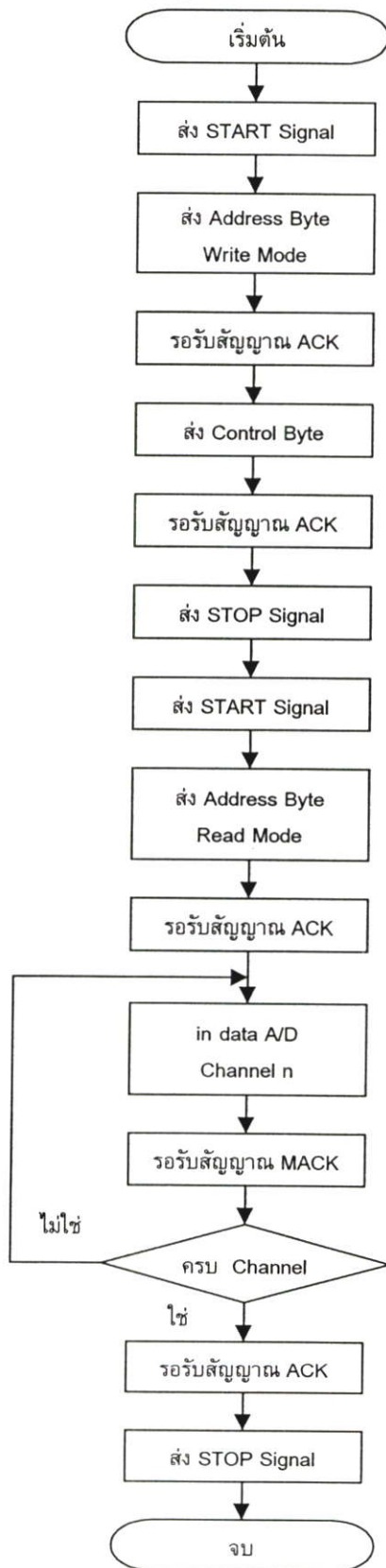
บิต 4 ของไบต์สำหรับควบคุม ใช้สำหรับการ reset ช่องส่งสัญญาณแอนะล็อก ในการ reset ให้กำหนดบิต 4 เป็น "1"

บิต 3 เป็นบิต power down mode ถ้ากำหนดให้บิต 2 เป็น "1" MAX520 จะเข้าสู่ shutdown mode ซึ่งจะใช้กระแสไฟฟ้าเพียง $4\mu\text{A}$ ถ้ากำหนดให้บิต 2 เป็น "0" แล้ว MAX520 จะกลับสู่สถานะการทำงานปกติ

บิต 1 ถึงบิต 0 เป็นบิตที่ระบุช่องสัญญาณแอนะล็อก ซึ่งใน MAX520 จะมีช่องสัญญาณแอนะล็อกอยู่ 4 ช่อง

Subroutine DA_I2C

แสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย DA_I2C ในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย Main_DA_I2C

บทที่ 5

การทดลอง

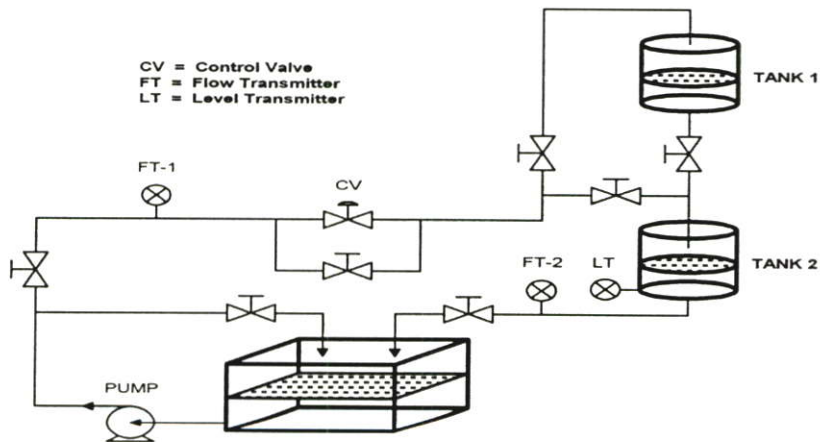
5.1 กล่าวนำ

ในการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ของถังควบคุมระดับน้ำและการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม IAFLC นี้ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองของการควบคุมแบบวงเปิด ส่วนที่สองจะใช้ตัวควบคุม IAFLC ที่สร้างขึ้นควบคุมระดับน้ำของในถังควบคุมระดับน้ำ ซึ่งจะเปรียบเทียบกับสมรรถนะกับตัวควบคุมพีไอดี และส่วนสุดท้ายเป็นการทดสอบการควบคุมระดับน้ำที่เปลี่ยนไปและการควบคุมติดตามระดับน้ำที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมที่นำเสนอ

การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิด เพื่อนำผลการตอบสนองนี้มาหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของถังควบคุมระดับน้ำแล้วนำไปออกแบบ แบบจำลองพีซีซีท้อ่งถึน

การทดลองส่วนที่ 2 จะใช้ตัวควบคุม IAFLC ที่สร้างขึ้นควบคุมระดับน้ำของถังควบคุมระดับน้ำ การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมนี้ จะเปรียบเทียบกับระบบควบคุมพีไอดี

การทดลองส่วนที่ 3 เป็นการทดสอบความประสิทธิภาพของตัวควบคุม IAFLC โดยใช้โครงสร้างของตัวควบคุมที่ควบคุมระดับน้ำ 40 ซม. ไปควบคุมระดับน้ำ ระดับ 35 ซม. และ 45 ซม. ของถังควบคุมระดับน้ำโดยไม่เปลี่ยนพารามิเตอร์ นอกจากนี้ ยังทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม เมื่อ ระบบควบคุมมีการรบกวนจากภายนอกและเมื่อระดับอ้างอิงเปลี่ยนไป



รูปที่ 5.1 แสดงกระบวนการถังควบคุมระดับน้ำ

5.2 การหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิด

การทดลองหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้หาพารามิเตอร์ของกระบวนการถึงควบคุมระดับน้ำ แล้วนำค่าที่ได้นี้ไปออกแบบแบบจำลองพีซีซีทองถิ่น การทดลองจะกำหนดให้ขอบเขตต่ำสุดของกระบวนการ(minimum) เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีต่อระดับอ้างอิงที่ระดับ 35 ซม. กระบวนการระบุ(nominal) เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีต่อระดับอ้างอิงที่ระดับ 40 ซม. และขอบเขตสูงสุดของกระบวนการ(maximum) เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีต่อระดับอ้างอิงที่ระดับ 45 ซม.

จากรูปที่ 5.1 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการถึงควบคุมระดับน้ำกรณีสองถังได้ดังสมการที่(5.1)

$$\frac{H_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{R_1 R_2}{R_1 C_1 R_2 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2) s + 1} \quad (5.1)$$

โดยที่ $Q_1(s)$ คือ อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าใน TANK-1

$H_2(s)$ คือ ความสูงของระดับน้ำใน TANK-2

R_1 คือ ความต้านทานการไหลใน TANK-1

C_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของ TANK-1

R_2 คือ ความต้านทานการไหลใน TANK-2

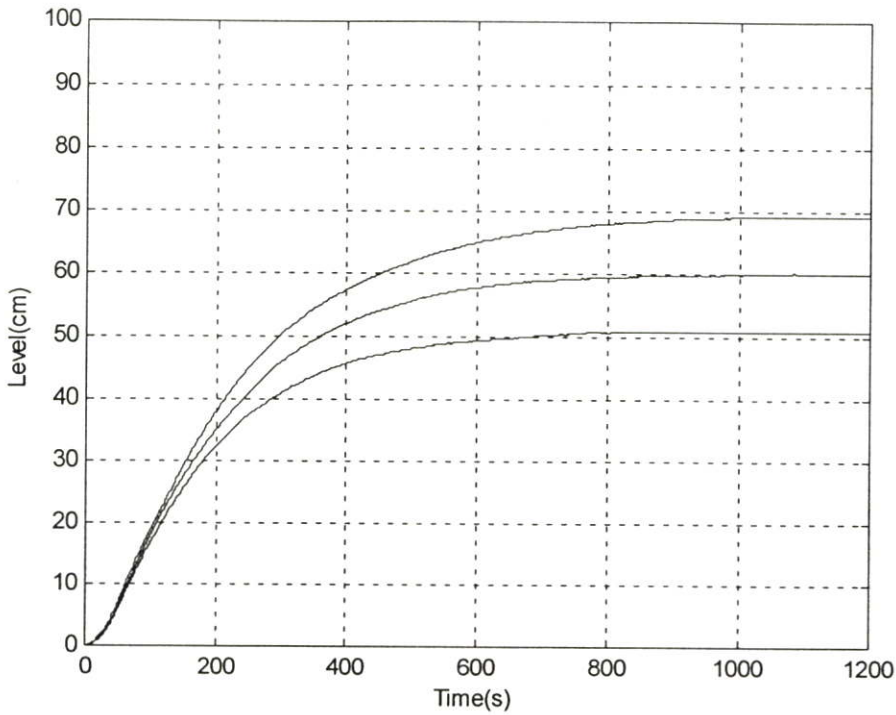
C_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของ TANK-2

อัตราการไหลเข้า $Q_1(s)$ ของน้ำใน TANK-1 จะมีค่าต่างกัน เมื่อกำหนดให้ระดับอ้างอิงอยู่ที่ระดับต่างกัน อัตราการไหลเข้าที่ต่างกันเช่นนี้มีผลให้ระดับความสูงของน้ำ $H_2(s)$ ใน TANK-2 มีความสูงต่างกันด้วย เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของ $H_2(s)/Q_1(s)$ จะเห็นว่าค่าคงตัวของเวลาขึ้นอยู่กับค่า R_1 , C_1 , R_2 และ C_2 โดยที่ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่หาได้จากพื้นที่หน้าตัดของ TANK-1 และ TANK-2 ตามลำดับ ค่าความต้านทานการไหล R_1 และ R_2 เป็นพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำและความสูงของระดับน้ำ ส่วนค่าอัตราขยายของกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับค่า R_1 และ R_2

ผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดดังรูปที่ 5.2 เป็นผลการตอบสนองของกระบวนการอันดับสอง ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการจะเขียนได้ดังสมการ (5.2)

$$G_p(s) = \frac{K_C}{\tau_1 \tau_2 s^2 + (\tau_1 + \tau_2) s + 1} \quad (5.2)$$

โดยที่ $\tau_1 = R_1 C_1$ และ $\tau_2 = R_2 C_2$ เมื่อ τ_1 และ τ_2 เป็นค่าคงตัวเวลาที่หาได้จากวิธีการ percent-incomplete method[16] และ K_C ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายของกระบวนการ ที่หาได้จากการหารเอาต์พุตค่าสุดท้ายด้วยระดับอ้างอิง



รูปที่ 5.2 แสดงผลตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของถังควบคุมระดับน้ำ เมื่อเปิดวาล์ว 35, 40, 45 ซม.

ดังนั้น จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของ $G_p(s)$ คือ

$$\text{ขอบเขตต่ำสุดของกระบวนการ} \quad G_{P_{\min}}(s) = \frac{1.45}{6400s^2 + 200s + 1} \quad (5.3)$$

$$\text{กระบวนการที่ระบุ} \quad G_{P_{\text{nom}}}(s) = \frac{1.5}{5400s^2 + 210s + 1} \quad (5.4)$$

$$\text{ขอบเขตสูงสุดของกระบวนการ} \quad G_{P_{\max}}(s) = \frac{1.533}{5375s^2 + 240s + 1} \quad (5.5)$$

จาก (5.4) ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการวงรอบเปิดที่ระบุ จะมีตำแหน่งโพลวงรอบเปิดอยู่ที่ $s = -3.33 \times 10^{-2}$ และ $s = -5.54 \times 10^{-2}$ จากวิธีการสร้างแบบจำลองพีชซีท้องถิ่นที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 จะได้ความสัมพันธ์ของโพลวงรอบเปิดของแบบจำลองพีชซีท้องถิ่นกับตัวแปรพีชซี ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของโพลวงรอบเปิดของแบบจำลองพีชชีท้องถิ่นกับตัวแปรพีชชี

| ลำดับ | ตัวแปรพีชชี | โพลของแบบจำลองพีชชีท้องถิ่น | |
|-------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | ตัวที่ 1 | ตัวที่ 2 |
| 1 | NB | -3.07×10^{-2} | -5.10×10^{-3} |
| 2 | NM | -3.27×10^{-2} | -5.32×10^{-3} |
| 3 | NS | -3.26×10^{-2} | -5.44×10^{-3} |
| 4 | AZ | -3.33×10^{-2} | -5.54×10^{-3} |
| 5 | PS | -3.40×10^{-2} | -5.66×10^{-3} |
| 6 | PM | -3.47×10^{-2} | -5.77×10^{-3} |
| 7 | PB | -3.60×10^{-2} | -5.99×10^{-3} |

หลังจากที่ตัวแปรพีชชีได้เลือกค่าโพลวงรอบเปิดของแบบจำลองพีชชีท้องถิ่นแล้ว จึงจัดแบบจำลองพีชชีท้องถิ่นให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะตาม(3.1) และมีค่าเมตริกซ์ A , B , C และ D ซึ่งเป็นค่าคงที่แสดงได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรพีชชีกับค่าเมตริกซ์ A , B , C และ D

| ตัวแปรพีชชี | เมตริกซ์ A | เมตริกซ์ B | เมตริกซ์ C | เมตริกซ์ D |
|-------------|---|--|--|--------------|
| NB | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.2 \times 10^{-3} & -35.8 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.277 \times 10^{-3} & 0 \end{bmatrix}$ | 0 |
| NM | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.2 \times 10^{-3} & -37.2 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.277 \times 10^{-3} & 0 \end{bmatrix}$ | 0 |
| NS | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.2 \times 10^{-3} & -38.0 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.277 \times 10^{-3} & 0 \end{bmatrix}$ | 0 |
| AZ | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.2 \times 10^{-3} & -38.8 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.277 \times 10^{-3} & 0 \end{bmatrix}$ | 0 |
| PS | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.2 \times 10^{-3} & -39.7 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.277 \times 10^{-3} & 0 \end{bmatrix}$ | 0 |
| PM | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.2 \times 10^{-3} & -40.4 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.277 \times 10^{-3} & 0 \end{bmatrix}$ | 0 |
| PB | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.2 \times 10^{-3} & -42.0 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.277 \times 10^{-3} & 0 \end{bmatrix}$ | 0 |

ในการทดลองควบคุมถึงควบคุมระดับน้ำนั้น ได้กำหนดให้ระบบพีชชีวงปิดมีโพลวงปิดเด่น (dominant closed-loop pole) อยู่ที่ $s = -0.0504 \pm j0.051$ ซึ่งจะทำให้มีอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) ของระบบวงปิดเป็น 0.72 และมีเปอร์เซ็นต์ของค่าพุ่งเกิน (P_o) เท่ากับ 4%

ส่วนโพลวงปิดด้อย(non-dominant closed-loop pole) ได้กำหนดให้อยู่ที่ $s = -1$ ทำการหาอัตราขยายป้อนกลับสถานะด้วยวิธีการวางโพล แสดงค่าในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพีซีกับอัตราขยายป้อนกลับสถานะ

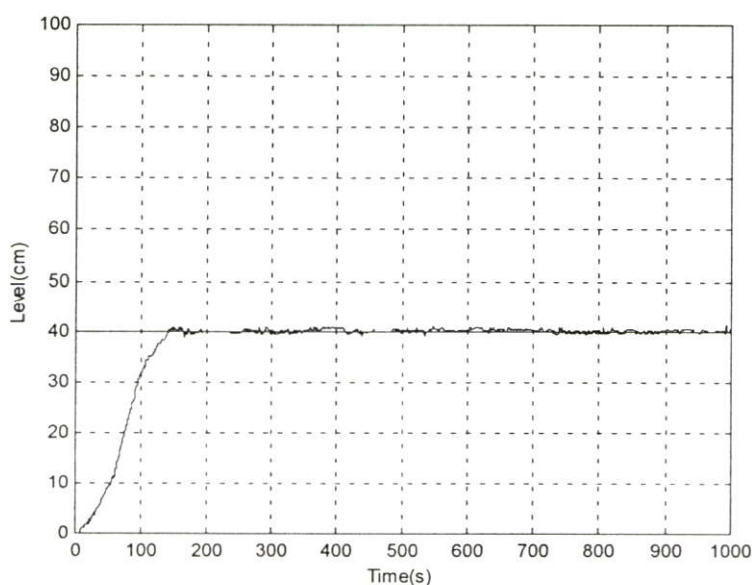
| ตัวแปรพีซี | K_1 | K_2 | K_3 |
|------------|-------|-------|-------|
| NB | 1.001 | 0.041 | 1.634 |
| NM | 0.999 | 0.041 | 1.634 |
| NS | 0.998 | 0.041 | 1.634 |
| AZ | 0.998 | 0.041 | 1.634 |
| PS | 0.997 | 0.041 | 1.634 |
| PM | 0.996 | 0.041 | 1.634 |
| PB | 0.994 | 0.041 | 1.634 |

5.3 การควบคุมระดับน้ำของถังควบคุมระดับน้ำในเวลาจริง

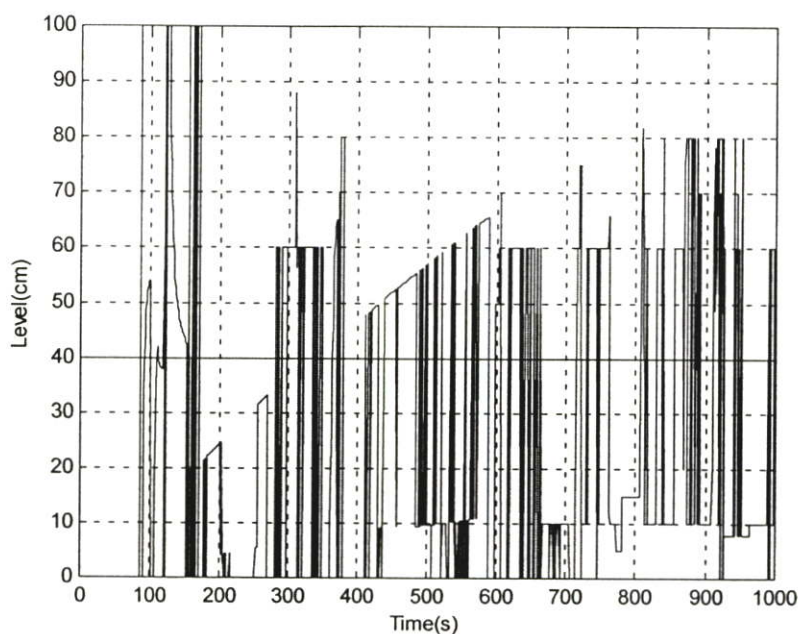
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการควบคุมระดับน้ำของถังควบคุมระดับน้ำในเวลาจริง และแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอนคือ การควบคุมกระบวนการที่ระบุด้วยตัวควบคุม IAFLC และตัวควบคุมพีไอดี การทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุม IAFLC โดยการนำตัวควบคุมที่ออกแบบไว้สำหรับควบคุมระดับน้ำ 40 ซม. ไปควบคุมระดับน้ำที่ 35 ซม. และ 45 ซม.และส่วนสุดท้าย จะทดสอบประสิทธิภาพในการปรับตัวของระบบควบคุม ที่ระดับน้ำ 40 ซม.เมื่อมีการรบกวนจากภายนอกและเมื่อมีการเปลี่ยนระดับของสัญญาณอ้างอิง

5.3.1 การควบคุมกระบวนการที่ระบุด้วยตัวควบคุม IAFLC และตัวควบคุมพีไอดี

นำตัวควบคุม IAFLC ที่ออกแบบแล้ว ไปควบคุมกระบวนการที่ระบุ ผลการตอบสนองและสัญญาณควบคุมแสดงในรูปที่ 5.3 – 5.4

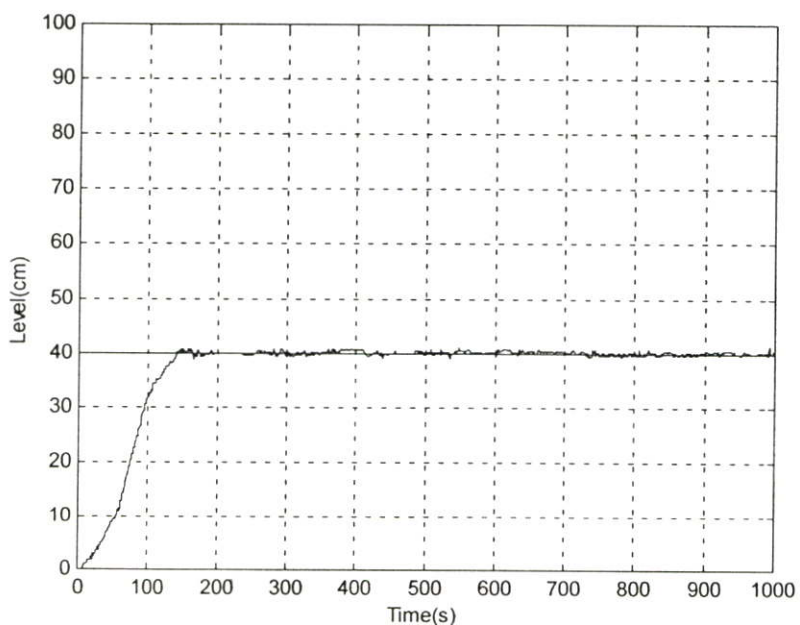


รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 40 ซม. ด้วยตัวควบคุม IAFLC

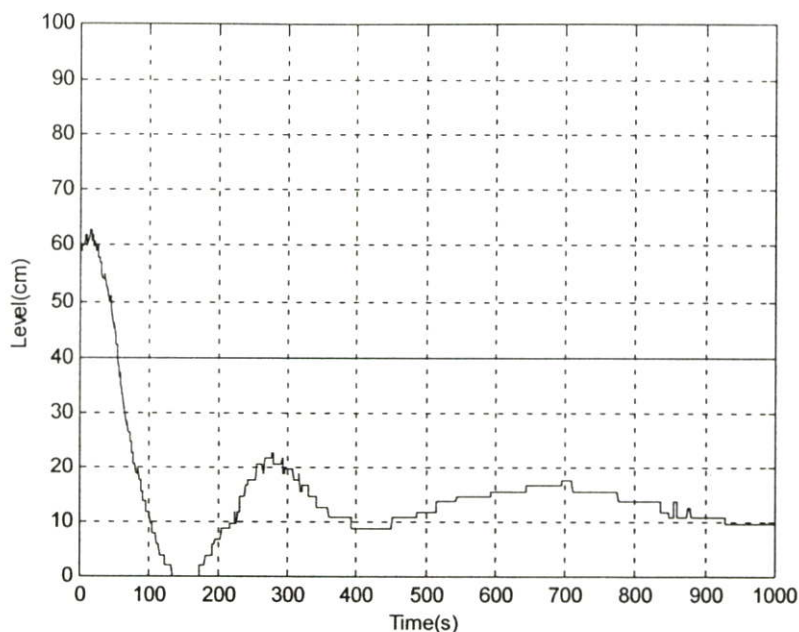


รูปที่ 5.4 สัญญาณควบคุม

ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ใช้วิธีของซีเกลอร์-นิโคลส์แล้วปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว จะได้ค่าเกน $K_P = 2.2$ $K_I = 0.011$ และ $K_D = 1$ แล้วทำการควบคุมถึงควบคุมระดับน้ำ จะได้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมแสดงในรูปที่ 5.5 – 5.6



รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 40 ซม. ด้วยตัวควบคุมพีไอดี ที่มีเกน $K_P = 2.2$ $K_I = 0.011$ และ $K_D = 1$



รูปที่ 5.6 สัญญาณควบคุม

จากผลการทดลองของระบบควบคุม จากรูปที่ 5.3 และ 5.5 พบว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม IAFLC มีสมรรถนะที่ดีคือมีช่วงเวลาขึ้นน้อย (rise time) มีค่าเปอร์เซ็นต์ของฟุงเกิน เป็นไปตามที่ออกแบบไว้และสามารถลู่เข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้เร็ว ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับน้ำ 40 ซม. แสดงได้ดังตารางที่ 5.4

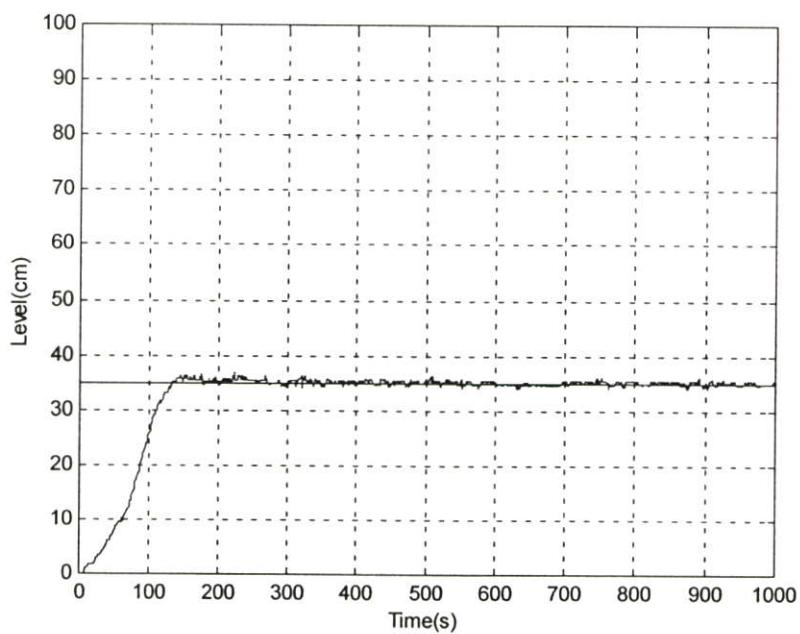
ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับน้ำ 40 ซม.

| ตัวควบคุม | T_r (วินาที) | P_o (%) | $T_s(2\%)$ (วินาที) |
|-----------|-------------------|--------------|------------------------|
| IAFLC | 141 | 1 | 188 |
| พีไอดี | 132 | 2.93 | 710 |

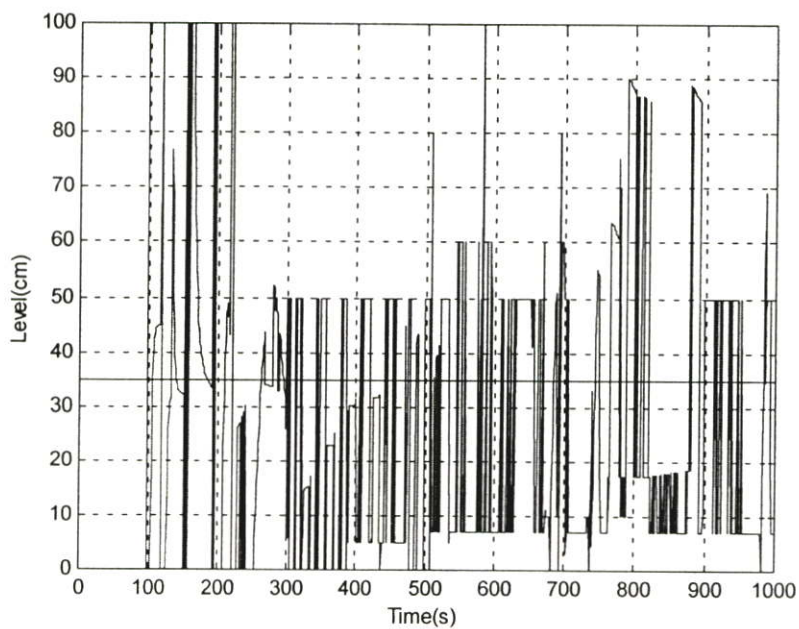
ต่อไปเป็นการนำตัวควบคุม IAFLC ที่ออกแบบเพื่อรักษาระดับน้ำของถังควบคุมระดับน้ำที่ 40 ซม. ไปควบคุมถังควบคุมระดับน้ำที่ระดับ 35 ซม. และ 45 ซม. โดยไม่เปลี่ยนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

5.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุม

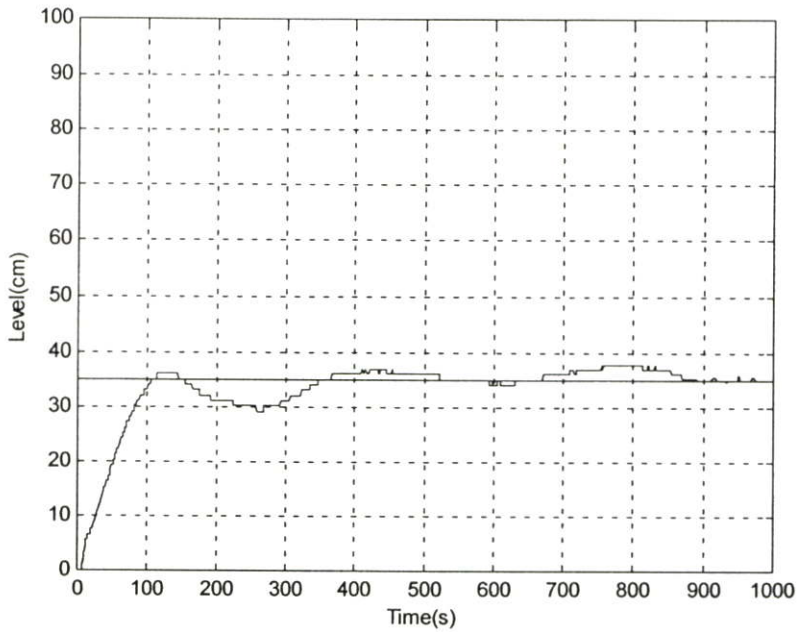
ในการทดลองในตอนนี้ จะเป็นการทดสอบความสามารถของตัวควบคุม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับอ้างอิง โดยลดระดับลง 5 ซม. จากระดับอ้างอิงเดิม 40 ซม. เมื่อใช้โครงสร้างของตัวควบคุม IAFLC ที่ควบคุมระดับน้ำ 40 ซม. และเปรียบเทียบกับเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดีจะได้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุม แสดงในรูปที่ 5.7 – 5.10



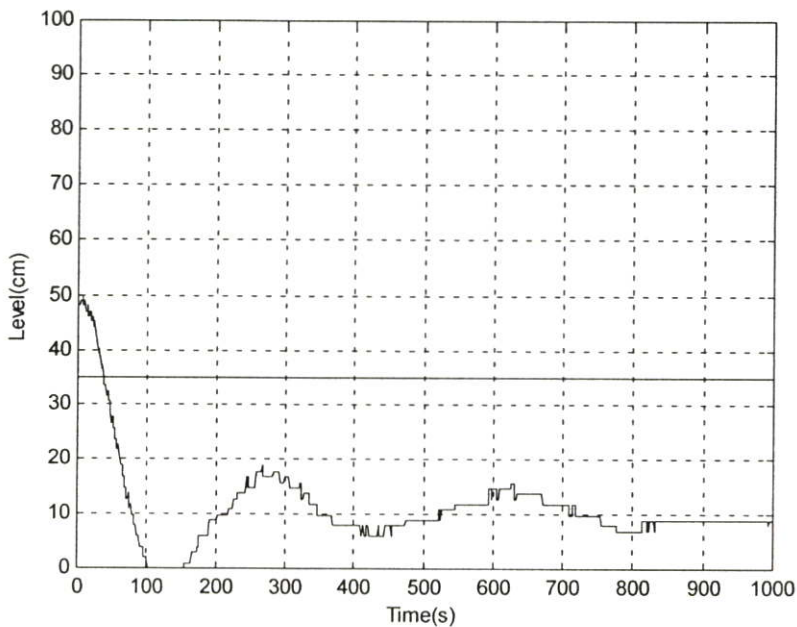
รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 35 ซม. ด้วยตัวควบคุม IAFLC



รูปที่ 5.8 สัญญาณควบคุม

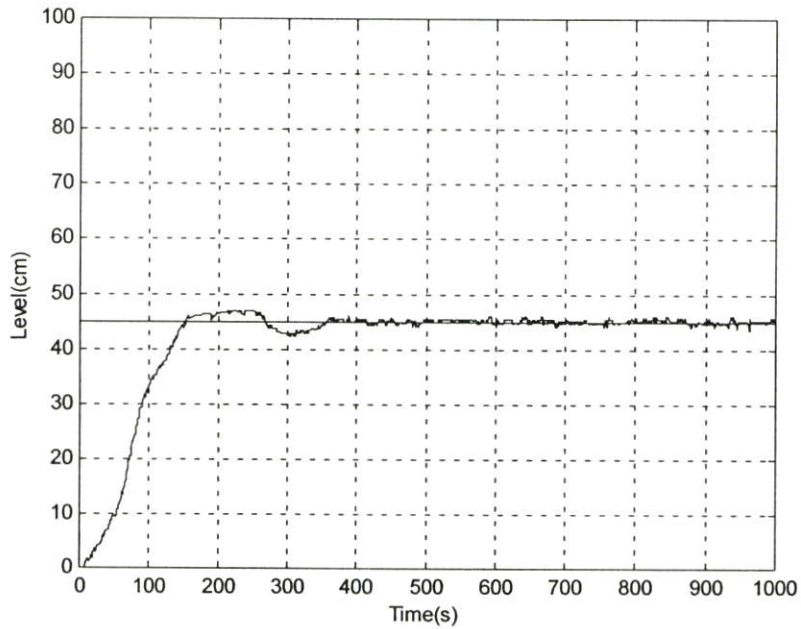


รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 35 ซม. ด้วยตัวควบคุมพีไอดี ที่มีเกน $K_P = 2.2$ $K_I = 0.011$ และ $K_D = 1$

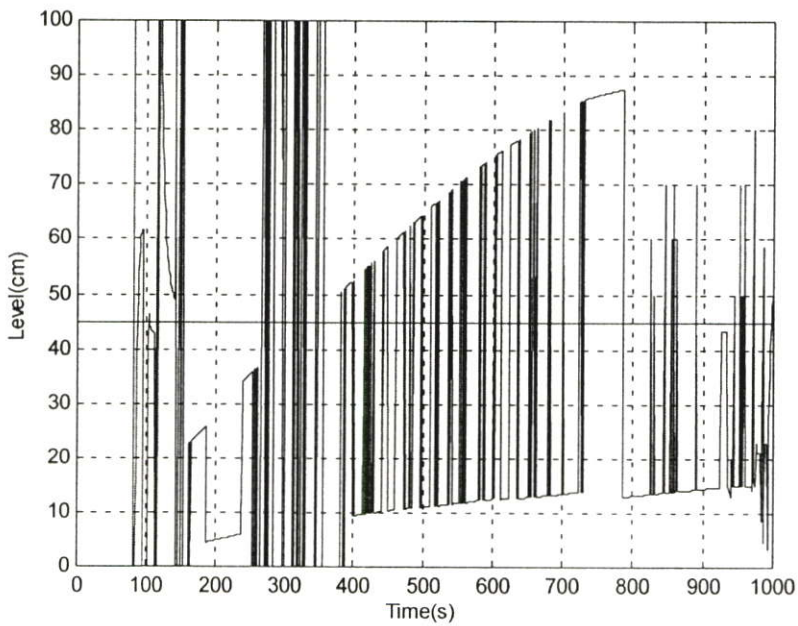


รูปที่ 5.10 สัญญาณควบคุม

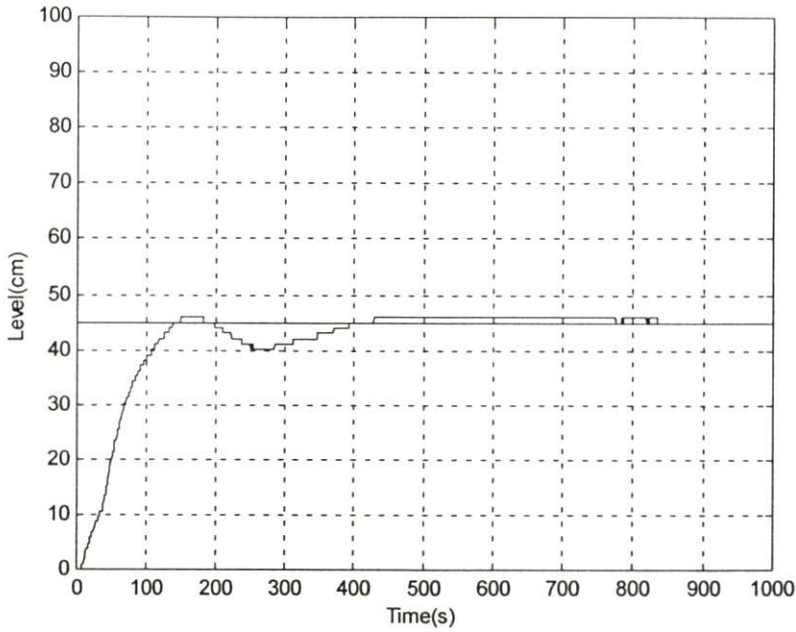
ต่อไป จะใช้โครงสร้างของตัวควบคุม IAFLC ที่ควบคุมระดับน้ำ 40 ซม. มาควบคุมระดับน้ำที่ 45 ซม. และเปรียบเทียบกับเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดีจะได้ผลการตอบสนองของระบบควบคุม และสัญญาณควบคุม แสดงในรูปที่ 5.11 – 5.14



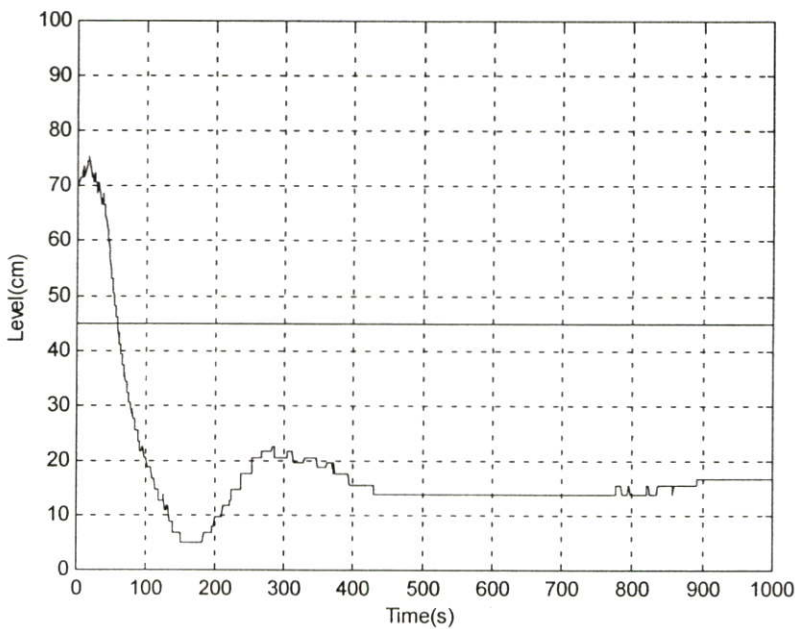
รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 45 ซม. ด้วยตัวควบคุม IAFLC



รูปที่ 5.12 สัญญาณควบคุม



รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ระดับ 45 ซม.ด้วยตัวควบคุมพีไอดี ที่มีเกน $K_P = 2.2$ $K_I = 0.011$ และ $K_D = 1$



รูปที่ 5.14 สัญญาณควบคุม

จากผลการทดลองเมื่อนำตัวควบคุม IAFLC ที่ออกแบบไว้สำหรับควบคุมระดับน้ำ 40 ซม. ไปทำการควบคุมระดับน้ำของถังควบคุมระดับน้ำที่ 35 ซม. และ 45 ซม. ตามลำดับ โดยไม่มีการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พบว่าระบบควบคุมที่ระดับ 35 ซม. จะลู่เข้าสู่ระดับอ้างอิงเร็ว มีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุ้งเกินและช่วงเวลาเข้าที่น้อยกว่าเมื่อควบคุมระดับน้ำที่ระดับ 45 ซม.

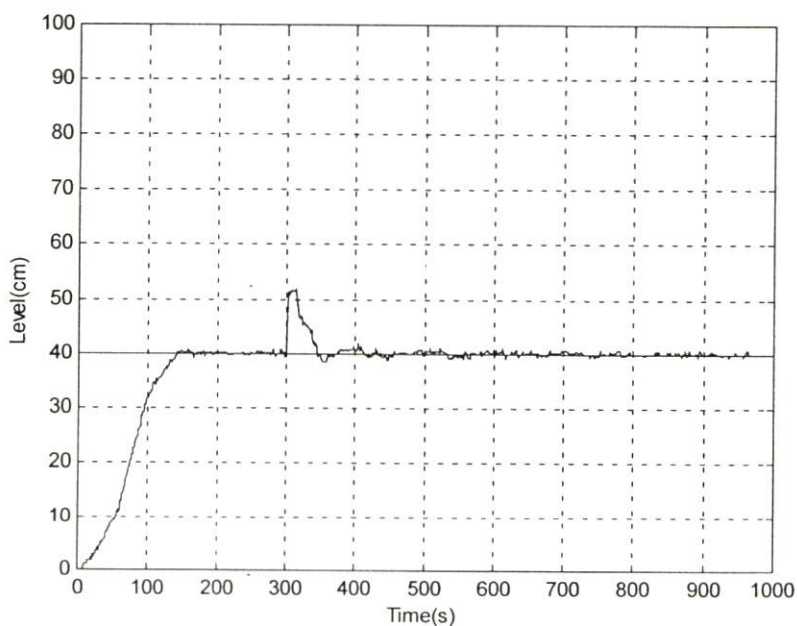
และเมื่อพิจารณาช่วงสถานะอยู่ตัว พบว่าตัวควบคุม IAFLC ก็สามารถควบคุมให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมมีความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์ สมรรถนะของระบบควบคุมแสดงได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม ที่ระดับอ้างอิง 35 ซม. และ 45 ซม.

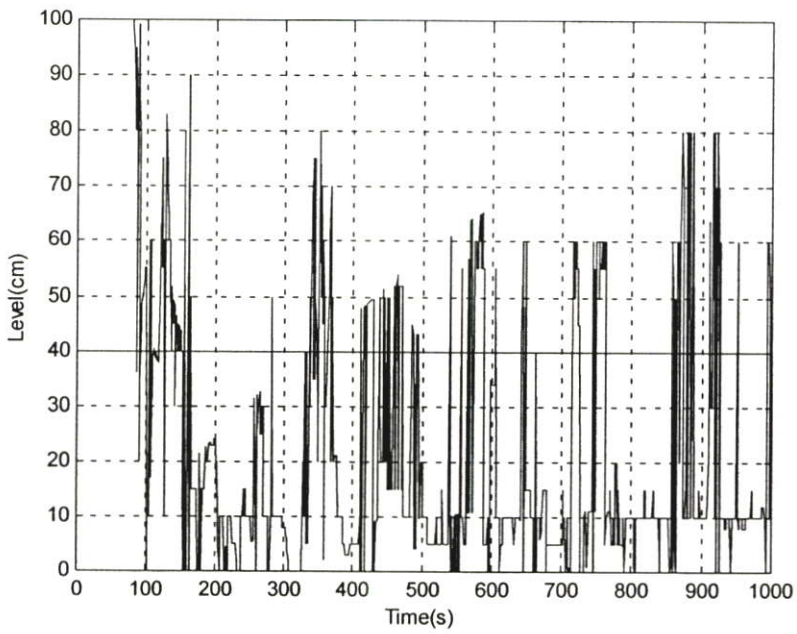
| ระดับน้ำ (ซม.) | ตัวควบคุม | T_r (วินาที) | P_o (%) | $T_s(2\%)$ (วินาที) |
|-------------------|-----------|-------------------|--------------|------------------------|
| 35 | IAFLC | 135 | 4 | 220 |
| | พีไอดี | 106 | 2.57 | 869 |
| 45 | IAFLC | 155 | 4.44 | 352 |
| | พีไอดี | 139 | 2.22 | 835 |

5.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพระบบควบคุม เมื่อมีการรบกวนจากภายนอกและเปลี่ยนระดับอ้างอิง

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม IAFLC เมื่อมีการรบกวนจากภายนอกและทดสอบการติดตามเมื่อระดับอ้างอิงเปลี่ยนไป โดยในตอนแรก จะทำการควบคุมระดับน้ำ ที่ระดับ 40 ซม. แล้วเติมน้ำ ปริมาตร 1.5 ลิตร ที่เวลา 300 วินาที เพื่อรบกวนระบบควบคุม ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 – 5.16

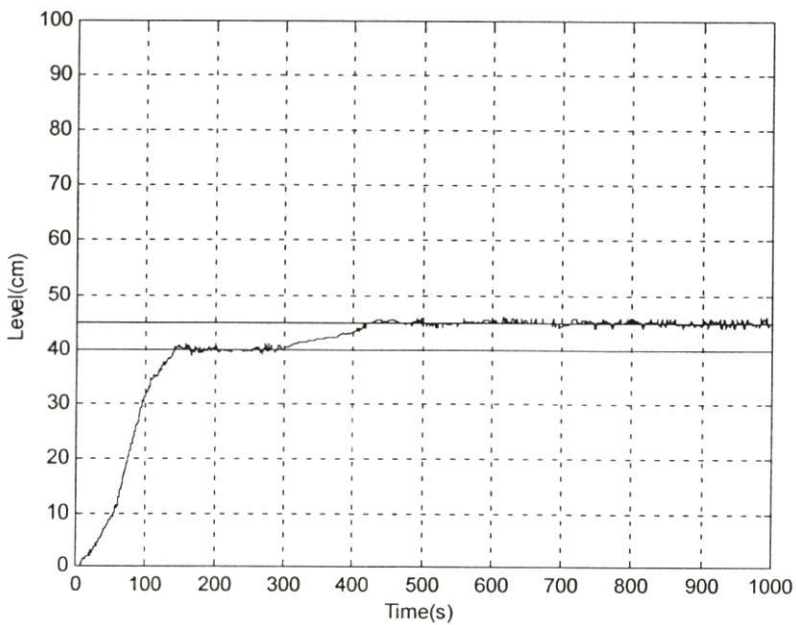


รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองของระบบควบคุม ด้วยตัวควบคุม IAFLC เมื่อมีการรบกวนจากภายนอกที่เวลา 300 วินาที

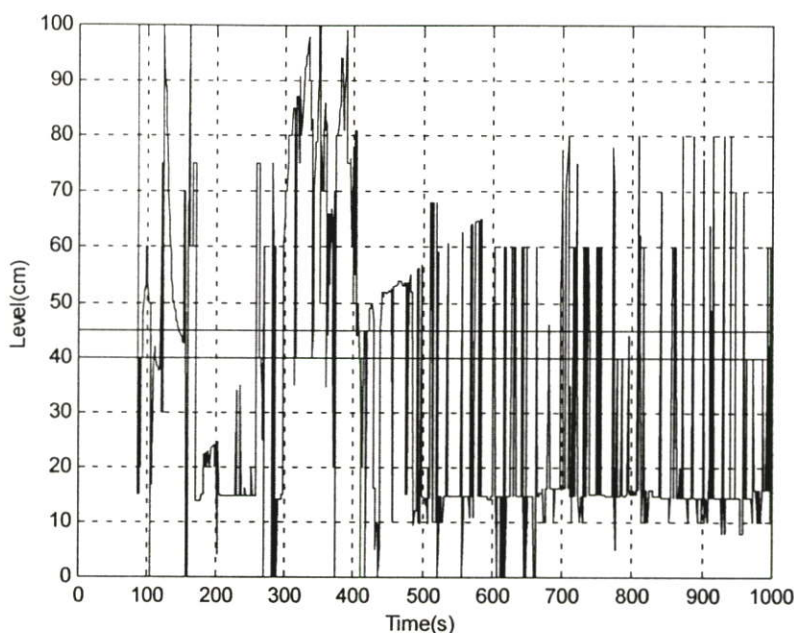


รูปที่ 5.16 สัญญาณควบคุม

การทดลองในตอนนี้ จะทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุม เมื่อมีการเปลี่ยนระดับอ้างอิง ผลการทดลองและสัญญาณควบคุม แสดงดังรูปที่ 5.17 – 5.18



รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองของระบบควบคุม ด้วยตัวควบคุม IAFLC เมื่อเปลี่ยนระดับอ้างอิงที่ เวลา 300 วินาที



รูปที่ 5.18 สัญญาณควบคุม

จากผลตอบสนองจากทั้งสองกรณี พบว่าตัวควบคุม IAFLC จะยังสามารถควบคุมให้ระบบควบคุมเข้าสู่ระดับอ้างอิงได้โดยที่สถานะอยู่ตัวไม่มีออฟเซต

5.4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองควบคุมระดับน้ำของถังควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุม IAFLC และ ตัวควบคุมพีไอดี ที่ระดับ 40 ซม. พบว่าตัวควบคุม IAFLC สามารถควบคุมระบบได้ดี มีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินน้อย มีช่วงเวลาขึ้นที่เร็ว เมื่อพิจารณาที่สถานะอยู่ตัวของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุม IAFLC จะมีช่วงเวลาเข้าที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี โดยที่ช่วงสถานะอยู่ตัวนี้ ไม่มีออฟเซตทั้งที่ใช้ตัวควบคุม IAFLC และตัวควบคุมพีไอดี

เมื่อนำตัวควบคุม IAFLC ที่ออกแบบไว้สำหรับควบคุมระดับน้ำ 40 ซม.ไปทำการควบคุมระดับน้ำ 35 และ 45 ซม. โดยไม่มีการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พบว่าเมื่อทำการควบคุมที่ระดับ 35 ซม. จะมีช่วงเวลาขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินและช่วงเวลาเข้าที่น้อยกว่า เมื่อควบคุมระดับน้ำที่ระดับ 45 ซม. และเมื่อพิจารณาช่วงสถานะอยู่ตัว พบว่าตัวควบคุม IAFLC ก็สามารถควบคุมให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมมีความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวเข้าใกล้ศูนย์

นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนจากภายนอก ตัวควบคุม IAFLC จะสามารถควบคุมให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว ส่วนเมื่อทำการทดลองเปลี่ยนระดับอ้างอิงนั้น ตัวควบคุม IAFLC ก็สามารถติดตามควบคุมระดับน้ำที่เปลี่ยนไปให้เข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้อย่างรวดเร็วและไม่มีออฟเซตอีกด้วย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม IAFLC สำหรับการควบคุมระดับน้ำให้มีสมรรถนะตามที่ได้กำหนดไว้โดยวิธีวางโพลและไม่มีออฟเซตที่สถานะอยู่ตัว ตัวควบคุม IAFLC ได้ออกแบบจากแบบจำลองพีชชิ่งวงกว้างที่เพิ่มตัวอินทิเกรต โดยที่แบบจำลองพีชชิ่งวงกว้างถูกสร้างจากแบบจำลองพีชชิ่งท้องถิ่นและฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแบบจำลองพีชชิ่งท้องถิ่น นอกจากนี้ ได้ทดสอบเสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชิ่งขยายด้วยวิธีลียาปูนอฟ

ผลการทดลองควบคุมกระบวนการระดับน้ำในห้องปฏิบัติการ พบว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมมีค่าพุ่งเกินน้อยและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็ว ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบยังมีประสิทธิภาพควบคุมระดับที่ต่างจากระดับ 40 ซม. และระบบยังมีสมรรถนะดี นอกจากนี้ ระบบพีชชิ่งรอบปิดที่ใช้ตัวควบคุม IAFLC ยังสามารถควบคุมติดตามระดับอ้างอิงที่เปลี่ยนไป และเมื่อมีการรบกวนกระบวนการได้โดยไม่มีออฟเซต เมื่อมีการรบกวนขณะควบคุม จากการทดลอง ได้ผลการตอบสนองและสัญญาณควบคุม ตามรูปที่ 5.15 - 5.16 นั้น พบว่าระบบควบคุมพีชชิ่งสามารถปรับให้ระบบเข้าสู่ระดับอ้างอิงได้ ส่วนในกรณีที่ทำการทดลองเปลี่ยนระดับอ้างอิงหลังจากที่ระบบเข้าสู่ระดับอ้างอิงที่กำหนดเดิมแล้วนั้น ตัวควบคุม IAFLC จะยังสามารถควบคุมติดตามการเปลี่ยนแปลงระดับอ้างอิงให้เข้าสู่จุดอ้างอิงใหม่ได้โดยไม่มีออฟเซต แต่ต้องใช้เวลาในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวมากกว่าเดิม สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุม IAFLC และตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้การปรับพารามิเตอร์ตามวิธีของซีเกลอร์-นิโคลส์ พบว่า ระบบควบคุม IAFLC มีค่าเปอร์เซ็นต์พุ่งเกินน้อยและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้เร็ว แต่ระบบควบคุมพีไอดี จะมีช่วงเวลาขึ้นที่น้อยกว่า

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า เมื่อออกแบบตัวควบคุม IAFLC ตามเงื่อนไขที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว ระบบควบคุมพีชชิ่งจะมีสมรรถนะตามที่ได้ออกแบบและไม่มีออฟเซตที่สถานะอยู่ตัวและมีเสถียรภาพตามเงื่อนไขของลียาปูนอฟ

6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการจะต้องใช้ความระมัดระวังเนื่องจากจะต้องใช้ค่าโพลของกระบวนการที่ระบุวงรอบเปิดแล้วใช้วิธีวางโพล เพื่อควบคุมระบบพีชชิ่งปิดให้มีสมรรถนะตามที่กำหนด

6.3 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ไขปัญหา

ปัญหาที่พบในงานวิจัยนี้ จะอยู่ในส่วนของการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแต่ละแบบจำลองพีชชิ่งท้องถิ่น แนวทางในการแก้ไขปัญหาก็ต้องทำการทดลองหลายๆครั้ง เพื่อปรับ

แต่งความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการเป็นสมาชิกกับแบบจำลองฟuzzyท้องถิ่น โดยตำแหน่งของกฎข้างเคียงกับกฎที่ระดับอ้างอิง ควรจะต้องทำให้มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมีค่าใกล้เคียงกัน

6.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

ในกรณีที่กระบวนการมีโครงสร้างที่ไม่แน่นอนหรือมีเวลาไร้ผลตอบสนองมาก อาจทำการศึกษาโดยใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม(neural network) ก็เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในการพัฒนาต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] T. Tani et al., "Neuro-Fuzzy Hybrid Control System of Tank Level in Petroleum Plant," *IEEE Tans. Fuzzy System*, vol. 4, no. 3, pp. 360-368, August 1996.
- [2] M. G. Na, "Design of a Genetic Fuzzy Controller for the Nuclear Steam Generator Water Level Control," *IEEE Tans. Nuclear Science*, vol. 45, no. 4, pp. 2261-2271, August 1998.
- [3] W. Wang et al., "Intelligence-Based Hybrid Control for Power Plant Boiler," *IEEE Tans. Control Syst.*, vol.10, no. 2, pp. 280-287, March 2002.
- [4] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information & Control*, Vol. 8, 1965, pp. 338-353.
- [5] L.A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes," *IEEE Trans. Syst., Man & Cybern.*, Vol. SMC-3, 1973, pp. 28-44.
- [6] E.H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant," *Proc. IEEE*, Vol. 121, No 12, 1974, pp. 1585-1588.
- [7] P.J. King and E.H. Mamdani, "The application of fuzzy control systems to industrial processes," *Automatica*, Vol. 13, 1977, pp. 235-242.
- [8] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol., SMC-15, no. 1, 1985, pp. 116-132, January – February.
- [9] K. Tanaka and M. Sano, "A Robust Stabilization Problem of Fuzzy Control Systems and Its Application to Backing up Control of a Truck-Trailer," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 2 , no. 2, pp. 119-134, May 1994.
- [10] K. Tanaka, "Stability and Stabilizability of Fuzzy Neural Linear Control Systems," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 3, no. 4, pp. 438-447, November 1995.
- [11] K. Tanaka et. al., "Robust Stabilization of a Class of Uncertain Nonlinear Systems via Fuzzy Control: Quadratic Stabilizability , H^∞ Control Theory, and Linear Matrix Inequalities," *Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 1-13, February 1996.
- [12] H. O. Wang et. al., "An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems: Stability and Design Issues," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 14-23, February 1996.
- [13] G. Feng et al., "Design of Fuzzy Control Systems with Guaranteed Stability," *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, pp. 1-10.

- [14] H. W. Smith and E. J. Davison, "Design of Industrial Regulator," in *Proc.IEE*, 119-128, 1972 , pp. 1210 – 1216.
- [15] K. Ogata, "Modern Control Engineering" *Prentice-Hall*, 2nd Edition, 1990.
- [16] กิตติ ตีระเศรษฐ, "อุปกรณ์วัดและควบคุมในระบบวนการ," ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดทางอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [17] อรรถพล กัณหา, "การออกแบบตัวควบคุมทางจิง-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดีและพีดี+ไอสำหรับระบบเชิงเส้นที่ไม่แน่นอน," *วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545
- [18] K. Tanaka et. al., "Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers: Relaxed Stability Conditions and LMI-Based Designs," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 250-265, May 1998.
- [19] J. Yun et al., "Using Fuzzy Logic," *Prentice-Hall International, Inc.*, 1994.
- [20] D. Driankov, "An Introduction to Fuzzy Control," *Springer-Verlag*, 1993.
- [21] วิพันธ์ ปรีชาพานิช, "การวิเคราะห์ระบบแนวใหม่," ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [22] อนุชิต จารุณาวังษ์, "การออกแบบตัวควบคุม PID X (n-2) Stage PD สำหรับระบบวนการอันดับ n," *วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดทางอุตสาหกรรม*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีลียาปูนอฟ

เสถียรภาพนับว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง ในการออกแบบระบบควบคุมไม่ว่าเงื่อนไขการทำงานของระบบเป็นอย่างไร จำเป็นต้องตรวจสอบเสมอว่าระบบควบคุมมีเสถียรภาพหรือไม่เมื่อเกิดการรบกวนหรือเมื่อสภาวะเริ่มต้นเปลี่ยนไป เสถียรภาพจึงอาจจะหมายถึงความแตกต่างของระบบที่ได้ออกแบบกับสภาวะจริงในการทำงานของระบบควบคุม ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเสถียรภาพของระบบควบคุมด้วยทฤษฎีของลียาปูนอฟ[21]

พิจารณาระบบอินพุตเป็นศูนย์กำหนดด้วยสมการสถานะ

$$\dot{x}(t) = f(x, t) \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ x คือ สเตทเวกเตอร์ ($n \times 1$) และสมมติว่าระบบมีจุดสมดุลจุดเดียวและอยู่ที่จุดกำเนิดของ state space

ระบบตาม(ก.1) จะเรียกว่าเสถียรในแง่ของลียาปูนอฟ ที่จุดกำเนิด หากทุกค่าสเตทเริ่มต้น $x(t_0)$ ซึ่งอยู่ใกล้จุดกำเนิดพอ ทำให้ $x(t)$ ยังคงอยู่ใกล้จุดกำเนิด ตลอดเวลา t จะเรียกว่าเสถียรเชิงอะซิมโทติก(asymptotically stable)

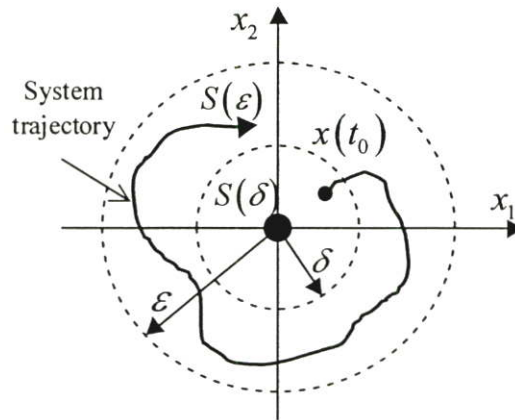
หาก $x(t)$ จริงๆ แล้วเข้าสู่ จุดกำเนิด เมื่อ $t \rightarrow \infty$ แล้วจะเรียกว่าเสถียรภาพเชิงอะซิมโทติกในขอบเขตกว้าง(asymptotically stable in the large) หากระบบเสถียรเชิงอะซิมโทติกทุกค่าสเตทเริ่มต้นไม่ว่าสเตทเริ่มต้นนั้น จะอยู่ใกล้หรือไกลจากจุดกำเนิด

นิยามที่ 1 ระบบตาม(ก.1) จะเสถียรในแง่ของลียาปูนอฟ ที่จุดกำเนิด หากทุกค่าจำนวนจริง $\varepsilon > 0$ มีจำนวนจริง $\delta(\varepsilon) > 0$ โดยที่ $\|x(t_0)\| \leq \delta$ แล้วจะได้ $\|x(t)\| \leq \varepsilon$ ทุกค่า $t \geq t_0$

นิยามนี้ใช้แนวคิด vector norm เช่น euclidean norm สำหรับเวกเตอร์ x ซึ่งมี n ส่วนประกอบ x_1, x_2, \dots, x_n คือ

$$\|x\| = (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)^{1/2}$$

$\|x\| \leq R$ หมายถึง hyper-spherical region $S(R)$ รัศมี R ล้อมรอบจุดสมดุล $x = 0$ ในเทอมของ Euclidean norm นิยามที่ 1 หมายความว่าสำหรับอาณาเขต $S(\varepsilon)$ ที่กำหนดให้ใดๆ เราต้องออกแบบระบบให้มีอาณาเขต $S(\delta)$ จะไม่ออกนอก $S(\varepsilon)$ เลย ดังในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 เสถียรภาพในแง่ของลียาปูนอฟ

ตัวอย่างที่ 1 พิจารณาออสซิลเลเตอร์เชิงเส้นกำหนดโดยสมการอนุพันธ์

$$\ddot{y}(t) + \omega^2 y(t) = 0 \quad (\text{ก.2})$$

นิยามตัวแปรสแตท

$$x_1(t) = y(t), x_2(t) = \dot{y}(t) \quad (\text{ก.3})$$

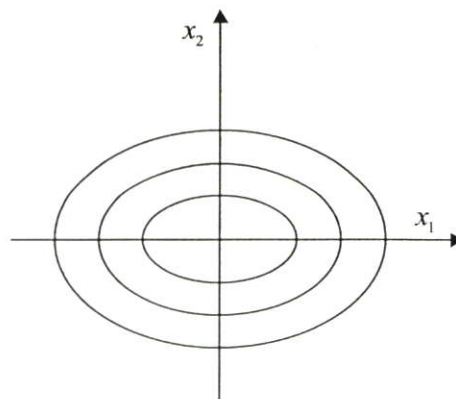
$$\dot{x}_1(t) = x_2(t)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\omega^2 x_1(t)$$

นั่นคือ

$$x_2^2 + \omega^2 x_1^2 = c^2 \quad \text{เมื่อกำหนดให้ } c \text{ เป็นค่าคงที่}$$

คำตอบของสมการนี้สำหรับค่า c ต่างๆ ซึ่งสมนัยกับเงื่อนไขเริ่มต้นของ x_1, x_2 ต่างๆกันนั้น แสดงในรูปที่ ก.2 สำหรับค่า ε ที่กำหนดให้ เราสามารถหา closed phase trajectory ซึ่งมีระยะทางไกลสุดจาก จุดกำเนิด เท่ากับ ε จากนั้นเลือก δ ให้น้อยกว่าระยะทางไกลที่สุดของ trajectory นั้น จากจุดกำเนิด ค่า $\delta(\varepsilon)$ ที่เลือกจะสอดคล้องเงื่อนไขและรับรองเสถียรภาพในแง่ของลียาปูนอฟ



รูปที่ ก.2 รูปคำตอบ

นิยามที่ 2 ระบบ (ก.1) เรียกว่าเสถียรภาพในขอบเขตเล็กๆ (locally stable หรือ stable in the small) ที่จุดกำเนิด หากอาณาเขต $S(\varepsilon)$ ในนิยามที่ 1 มีขนาดเล็ก

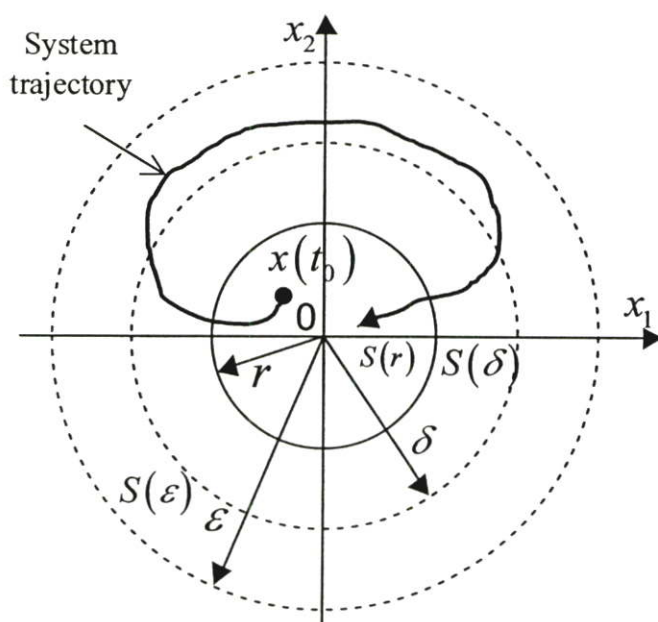
นิยามที่ 3 ระบบ (ก.1) เสถียรเชิงอะซิมโทติก ที่ จุดกำเนิด หาก

(ก) ระบบเสถียรในแง่ของลียาปูนอฟ

(ข) มีจำนวนเลขจริง $r > 0$ โดยที่

$$\|x(t_0)\| \leq r \text{ มีผลให้ } x(t) \rightarrow 0 \text{ เมื่อ } t \rightarrow \infty$$

เงื่อนไข (ข) แสดงว่าการเคลื่อนที่ใดๆ ที่เริ่มใน $S(r)$ จะลู่เข้าจุดกำเนิด เมื่อ $t \rightarrow \infty$ ดังแสดงในรูปที่ (ก.3)



รูปที่ ก.3 เสถียรเชิงอะซิมโทติก

นิยามที่ 4 ระบบ (ก.1) เสถียรเชิงอะซิมโทติก ในขอบเขตกว้างที่จุดกำเนิด หาก

(ก) ระบบเสถียรในแง่ของลียาปูนอฟ

(ข) สเตทเริ่มต้น $x(t_0)$ ทุกสเตทจะให้ผล $x(t) \rightarrow 0$ เมื่อ $t \rightarrow \infty$

เสถียรภาพนิยามนี้รับรองว่าการเคลื่อนที่ใดๆ จะเข้าสู่จุดกำเนิด เสมอ

เสถียรภาพของระบบไม่ใช้เชิงเส้นเวลาต่อเนื่อง

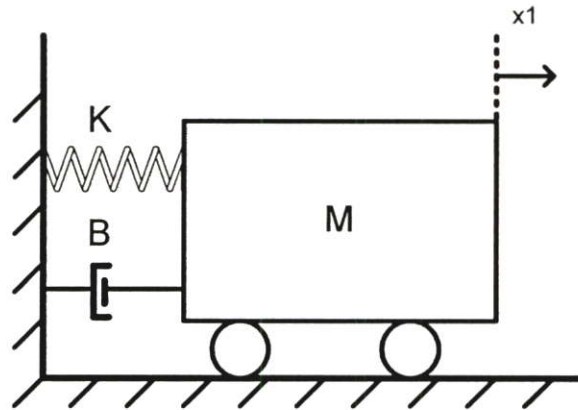
รูปแบบสมการสเตทโดยทั่วไปสำหรับระบบไม่ใช้เชิงเส้น เขียนไว้ว่า

$$\dot{x} = f(x(t), u(t), t); \quad x(t_0) = x_0 \quad (\text{ก.4})$$

ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของสมการไม่ใช่เชิงเส้นไม่ค่อยมี แต่มีวิธีการต่างๆกัน เพื่อบอกให้ทราบถึงเสถียรภาพและขอบเขตของเสถียรภาพ โดยไม่ต้องใช้ผลเฉลยอย่างสมบูรณ์ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีที่เรียกว่า "second method of Lyapunov" หรือ "direct method of Lyapunov"

ซึ่งทฤษฎีนี้มีพื้นฐานบนแนวความคิดเรื่องพลังงาน และความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสะสมกับเสถียรภาพของระบบ

ตัวอย่างที่ 2 พิจารณาจากระบบ spring-mass-damper กำหนดให้ $M = 1$



สมการของระบบคือ

$$\ddot{x}_1 + B\dot{x}_1 + Kx_1 = 0 \quad (\text{ก.5})$$

เมื่อเขียนในรูปสมการสแตทจะได้อ

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -Kx_1 - Bx_2 \end{aligned} \quad (\text{ก.6})$$

ณ เวลาใดๆ พลังงาน V ทั้งหมดในระบบประกอบด้วยพลังงานจลน์ของมวลที่กำลังเคลื่อนที่ กับพลังงานศักย์ที่สะสมในสปริง

$$V(x_1, x_2) = \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}Kx_1^2 \quad (\text{ก.7})$$

ดังนั้น $V(x) > 0$ เมื่อ $x \neq 0$ และ $V(0) = 0$ แสดงว่าพลังงานทั้งหมดเป็นบวก ยกเว้นเมื่อระบบอยู่หนึ่งที่จุดสมดุล $x_c = 0$ ที่ซึ่งพลังงานเป็นศูนย์ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานคือ

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}V(x_1, x_2) &= \frac{\partial V}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dt} \\ &= -Bx_2^2\end{aligned}\quad (ก.8)$$

จึงเห็นว่าพลังงานเป็นลบทุกจุดยกเว้นเมื่อ x_2 เป็นศูนย์ พลังงานจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นหาก damping เป็นบวกพลังงานของระบบไม่อาจเพิ่มขึ้นได้ และจาก (ก.4) เราสังเกตว่า $\dot{x}_2 = -Kx_1$ ที่ $x_2 = 0$ แสดงว่าเมื่อความเร็วเป็นศูนย์ความเร่งจะเป็นลบดึงให้มวลเข้าสู่จุดสมดุล พลังงานไม่อาจมีค่าคงที่แต่ลดไปสู่ศูนย์ที่จุดสมดุล

ทฤษฎีบทที่ 1 Lyapunov's stability theorem

พิจารณาระบบ autonomous หรือระบบที่มีอินพุตเป็นศูนย์และระบบไม่แปรค่าตามเวลา

$$\dot{x} = f(x); \quad f(0) = 0 \quad (ก.9)$$

สมมติว่ามีฟังก์ชันสเกลาร์ $V(x)$ สำหรับจำนวนจริงบางค่าที่ $\varepsilon > 0$ สอดคล้องคุณสมบัติต่อไปนี้ ทุกค่า x ในบริเวณ $\|x\| \leq \varepsilon$

(1) $V(x) > 0; \quad x \neq 0$

(2) $V(0) = 0$ จาก (1) และ (2) สมการ $V(x)$ เป็นฟังก์ชัน positive definite

(3) $V(x)$ มีอนุพันธ์ย่อยต่อเนื่องโดยค่านิ่งจากทุกส่วนประกอบของ x แล้วจุดสมดุล $x = 0$ ของระบบ (ก.9) จะได้ว่า

(ก) stable in the sense of Lyapunov หากอนุพันธ์ $\frac{dV}{dt} \leq 0$ คือ $\frac{dV}{dt}$ เป็นฟังก์ชัน

สเกลาร์ negative semidefinite

(ข) asymptotically stable หากอนุพันธ์ $\frac{dV}{dt} < 0, \quad x \neq 0$ คือ $\frac{dV}{dt}$ เป็นฟังก์ชัน

สเกลาร์ negative semidefinite

(ค) asymptotically stable in the large หากสอดคล้องเงื่อนไข asymptotically stable ทุกค่า x และ $V(x) \rightarrow \infty$ เมื่อ $\|x\| \rightarrow \infty$ หรือที่เรียกว่า $V(x)$ มีลักษณะ radially unbounded

ทฤษฎีบทที่ 2 Lyapunov's Instability theorem

พิจารณาระบบ autonomous (3.19) สมมติว่ามีฟังก์ชันสเกลาร์ $W(x)$ สำหรับจำนวนจริงบางค่า $\varepsilon > 0$ สอดคล้องคุณสมบัติต่อไปนี้ทุกค่า x ในบริเวณ $\|x\| < \varepsilon$

(1) $W(x) > 0; x \neq 0$

(2) $W(x) = 0$

(3) $W(x)$ มีอนุพันธ์ย่อยต่อเนื่องโดยค่านึงจากทุกส่วนประกอบของ x

$$(4) \frac{dW}{dt} \geq 0$$

แล้วระบบจะไม่เสถียรที่จุดกำเนิด

ตัวอย่างที่ 3 พิจารณาระบบ autonomous ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -x_1 + 2x_1^2x_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_2\end{aligned}$$

เลือก $V(x) = x_1^2 + x_2^2$

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dt} &= \frac{\partial V}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dt} \\ &= -2x_1^2(1 - 2x_1x_2) - 2x_2^2\end{aligned}$$

ดังนั้น $\frac{dV}{dt}$ จะเป็น negative definite หาก $1 - 2x_1x_2 > 0$

วิธีโดยตรงของลียาพูนอฟกับระบบเชิงเส้น

ทฤษฎีบทที่ 3 ระบบ autonomous เชิงเส้น

$$\dot{x} = Ax$$

จะ asymptotically stable in the large ที่ จุดกำเนิด หากและถ้าหากกำหนด positive definite symmetric matrix Q ให้ ย่อมมี positive definite symmetric matrix P คำตอบเดียวสอดคล้องสมการ

$$A^T P + PA = -Q$$

พิสูจน์ กรณี sufficiency สมมติว่า มี matrix P ดังกล่าว พิจารณาฟังก์ชัน positive definite

$$\begin{aligned}V(x) &= x^T P x \\ \dot{V}(x) &= \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \\ &= x^T A^T P x + x^T P A x \\ &= x^T (A^T P + PA) x \\ &= -x^T Q x\end{aligned}$$

แต่ Q เป็น positive definite ดังนั้น $V(x)$ เป็น negative definite นอกจากนี้ให้ norm ของ x คือ $\|x\| = (x^T P x)^{1/2}$

$$\text{ดังนั้น} \quad V(x) = \|x\|^2$$

$$\text{จึงได้} \quad V(x) \rightarrow \infty \text{ เมื่อ } \|x\| \rightarrow \infty$$

ระบบจึงเสถียรในขอบเขตกว้างที่ จุดกำเนิด ตามทฤษฎีบทที่ 1(ค)

พิสูจน์ กรณี necessary สมมติระบบเสถียรเชิงอะซิมโทติก แต่ P เป็น negative definite

$$V(x) = -x^T P x$$

$$\dot{V}(x) = -[\dot{x}^T P x + x^T P \dot{x}]$$

$$= x^T Q x$$

$$> 0$$

เนื่องจาก Q เป็น positive definite ระบบจึงไม่เสถียรตามทฤษฎีบทที่ 2 ซึ่งขัดแย้งกับที่กำหนดไว้เบื้องต้น ดังนั้น P จึงเป็น positive definite และสรุปได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพเชิงอะซิมโทติกในขอบเขตกว้างที่จุดกำเนิด

ภาคผนวก ข

การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีวางโพล

พิจารณาระบบต่อไปนี้

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{ข.1})$$

กำหนดให้สัญญาณควบคุมเป็น

$$u = -Kx \quad (\text{ข.2})$$

จะมีขั้นตอนการหา feedback gain matrix K ที่จะทำให้ค่า eigenvalue ของ $A - BK$ มีค่าเป็น $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ มีดังนี้[15]

ขั้นตอนที่ 1. ตรวจสอบ controllability condition ของระบบถ้าระบบเป็น complete state controllable แล้วจึงทำขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 2. กำหนด closed-loop poles ให้อยู่ในรูป desired characteristic polynomial

$$(s - \mu_1)(s - \mu_2) \dots (s - \mu_n) = s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n$$

ขั้นตอนที่ 3. กำหนดให้ state feedback gain matrix K

$$K = [k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n]$$

แทนลงในสมการ $|sI - A + BK|$ จะได้เป็น

$$|sI - A + BK| = (s - \mu_1)(s - \mu_2) \dots (s - \mu_n)$$

ขั้นตอนที่ 4. นำสมการจากขั้นตอนที่ 2 และ 3 มาเทียบสัมประสิทธิ์ ก็จะได้ค่า state feedback gain matrix K

ตัวอย่างที่ 1 พิจารณาระบบ $\dot{x} = Ax + Bu$

$$\text{กำหนดให้} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 20.6 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

มี characteristic equation ของระบบเป็น

$$|sI - A| = \begin{vmatrix} s & -1 \\ -20.6 & s \end{vmatrix} = s^2 - 20.6 = 0$$

จะได้คำตอบ $s = \pm 4.539$ ระบบนี้จึงไม่มีเสถียรภาพ จึงใส่ตัวควบคุม $u = -Kx$ ที่มีตำแหน่ง closed-loop poles อยู่ที่ $s = -1.8 \pm j2.4$ และหาค่า state feedback gain K ระบบควบคุมมีเสถียรภาพตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. ตรวจสอบ controllability matrix

$$M = [B : AB] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ค่า rank ของ matrix M เป็น 2 ดังนั้น สามารถใช้วิธีวางตำแหน่งโพลได้

ขั้นตอนที่ 2. เขียน characteristic polynomial

$$\begin{aligned} (s + \mu_1)(s + \mu_2) &= (s + 1.8 - j2.4)(s + 1.8 + j2.4) \\ &= s^2 + 3.6s + 9 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3. หา desired characteristic equation

$$\begin{aligned} |sI - A + BK| &= \left| \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 20.6 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} [k_1 \quad k_2] \right| \\ &= \begin{vmatrix} s & -1 \\ -20.6 + k_1 & s + k_2 \end{vmatrix} \\ &= s^2 + k_2s - 20.6 + k_1 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 4. เทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 และ 3
 $-20.6 + k_1 = 9, \quad k_1 = 29.6$ และ $k_2 = 3.6$
ดังนั้น

$$\begin{aligned} K &= [k_1 \quad k_2] \\ &= [29.6 \quad 3.6] \end{aligned}$$

จะได้ค่า state feedback gain เพื่อใช้ในการสร้างตัวควบคุมต่อไป

ภาคผนวก ค

การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี

การคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าการตอบสนองของกระบวนการที่ถูกควบคุมนั้นทำได้ยากเนื่องจากการหาสมการทางคณิตศาสตร์หรือฟังก์ชันถ่ายโอนที่เหมาะสมและเที่ยงตรงสำหรับแทนกระบวนการที่ถูกควบคุมนั้นเป็นไปได้ยากนั่นเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการที่มีลำดับสูง[22]

ในการออกแบบตัวควบคุมมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้การตอบสนองพลวัตของกระบวนการก่อน ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน โดยสามารถหาได้จากโครงสร้างทางกายภาพของกระบวนการ แต่ในบางกรณีที่กระบวนการมีความซับซ้อนการทราบค่าทางกายภาพอาจไม่เพียงพอที่จะหาสมการทางคณิตศาสตร์มาแทนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ แต่ก็สามารถใช้วิธีการทดสอบกระบวนการ เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาทำการออกแบบตัวควบคุมได้ วิธีที่นิยมอย่างแพร่หลายคือวิธีการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดีของ ซีเกลอร์ – นิโคลส์

หลักการประมาณค่าของซีเกลอร์ – นิโคลส์ ใช้สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คือค่า K_P T_I และ T_D ให้ได้ประสิทธิภาพดีที่สุด เพื่อให้ผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุตแบบขั้นบันได มีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินสูงสุดไม่เกิน 25% วิธีการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธีของซีเกลอร์ – นิโคลส์ มีด้วยกันสองแบบคือ

ค.1 Quarter decay ration response by ultimate gain

วิธีนี้จะทำการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากผลการตอบสนองของระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุมต่อการปรับค่าของอัตราขยายของตัวควบคุมชนิดพี เมื่อมีการป้อนสัญญาณเข้าเป็นแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ดังนั้นวิธีนี้ต้องมีตัวควบคุมแบบพี ต่ออยู่เพื่อให้สามารถปรับอัตราขยายได้

คุณสมบัติของ ultimate gain และ ultimate period ของระบบถูกนำมาทำการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งเป็นวิธีที่กระทำกับระบบโดยตรงและไม่จำเป็นต้องทราบค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ มีขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ดังนี้

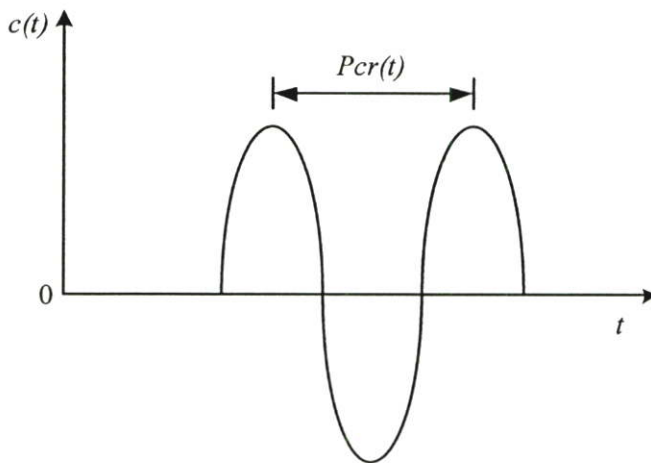
ขั้นตอนที่ 1 ปรับค่าอัตราขยาย K_P ของตัวควบคุมแบบพี ให้มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนผลการตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องและมีขนาดของการแกว่งคงที่เรียกอัตราขยายที่ทำให้เกิดการแกว่งนี้ว่า ultimate gain(K_{cr}) และเรียกค่าคาบของการแกว่งนี้ว่า ultimate period(P_{cr})

ขั้นตอนที่ 2 นำค่า K_{cr} และ P_{cr} ที่ได้ ไปปรับเทียบกับตาราง ค.1 เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามเงื่อนไขที่ให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินสูงสุดไม่เกิน 25%

วิธี Quarter decay ratio response by ultimate gain นี้ มีข้อจำกัดคือต้องใช้กับระบบที่มีผลการตอบสนองต่อเวลาที่มีการแกว่งเท่านั้นหรือใช้กับกระบวนการที่มีรากของสมการคุณลักษณะ เป็นจำนวนเชิงซ้อนสังยุค เมื่อมีการปรับค่าอัตราขยายของกระบวนการ

ตารางที่ ค.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ตามวิธีของซีเกลอร์ – นิโคลส์

| ชนิดของตัวควบคุม | K_P | T_I | T_D |
|------------------|--------------|--------------|---------------|
| พี | $0.5K_{cr}$ | ∞ | 0 |
| พีไอ | $0.45K_{cr}$ | $P_{cr}/1.2$ | 0 |
| พีไอดี | $0.6K_{cr}$ | $0.5 P_{cr}$ | $0.125P_{cr}$ |



รูปที่ ค.1 แสดงการหาค่า P_{cr} จากผลการตอบสนองของระบบที่มีการแกว่งอย่างต่อเนื่อง เมื่อมีการปรับค่าอัตราขยายเป็น K_{cr}

ค.2 Process reaction

เป็นวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยตรง ซึ่งไม่ต้องมีตัวควบคุมต่อร่วมอยู่ด้วย แต่จะใช้ได้กับกระบวนการที่มีผลการตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยเป็นรูปตัว S เท่านั้น ซึ่งก็คือกระบวนการที่ไม่มีโพลอยู่ที่จุดกำเนิด(กระบวนการ Type 0) หรือไม่มีโพลเด่นที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนสังยุค โดยขั้นแรกจะทำการประมาณให้กระบวนการเป็นแบบใดแบบหนึ่งก่อนคือ

ค.2.1 กระบวนการอันดับหนึ่งแบบมีเวลาไร้ผลสนอง(first order plus dead time) โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

ค.2.2 กระบวนการอันดับสองแบบมีเวลาไร้ผลสนอง(second order plus dead time) โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{(\tau_1s+1)(\tau_2s+1)}$$

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{\tau^2 + 2\zeta\tau s + 1} \quad 0 < \zeta < 1$$

โดยที่

- K คือค่าอัตราขยายของระบบที่สถานะอยู่ตัว
 L คือค่าเวลาไร้ผลสนองของกระบวนการ
 τ, τ_1, τ_2 คือค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ
 ζ คือค่าอัตราการหน่วงของกระบวนการ

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยวิธี process reaction มีขั้นตอนการหาดังนี้
ขั้นตอนที่ 1 ป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นขั้นบันไดหนึ่งหน่วย แล้วบันทึกผลการตอบสนองของกระบวนการ ซึ่งจะได้เป็นกราฟรูปตัว S

ขั้นตอนที่ 2 จากกราฟ ให้ลากเส้นสัมผัสกับจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด โดยเส้นที่ลากนี้จะตัดกับแกนเวลา แล้วหาค่า K L และ T ดังแสดงในรูปที่ ค.2

เมื่อใช้การประมาณค่าให้ระบบเป็นแบบ first order plus dead time จะได้ผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย เป็น

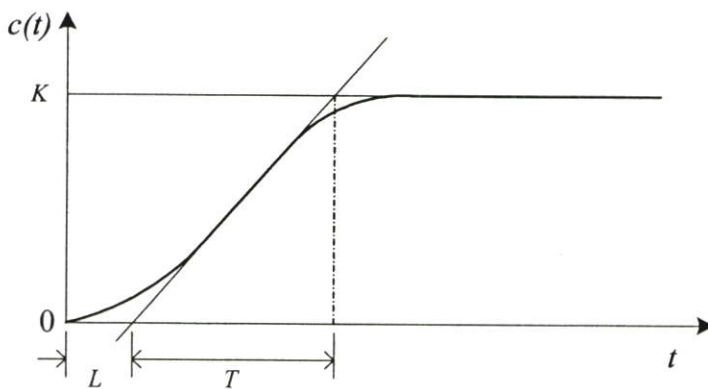
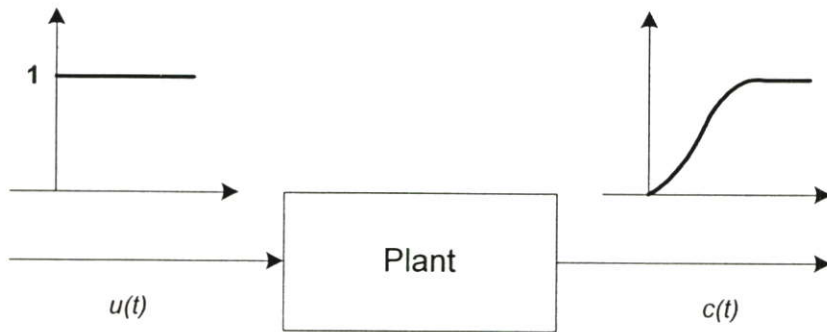
$$C(s) = \left(\frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \right) \left(\frac{1}{s} \right)$$

$$c(t) = Ku(t-L) \left(1 - e^{-(t-L)/T} \right)$$

สำหรับค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอดี จะหาได้จากค่าในตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ตามวิธีของซีเกอร์-นิโคลส์

| ชนิดของตัวควบคุม | K_P | T_I | T_D |
|------------------|----------|----------|--------|
| พี | T/L | ∞ | 0 |
| พีไอ | $0.9T/L$ | $L/0.3$ | 0 |
| พีไอดี | $1.2T/L$ | $2L$ | $0.5L$ |



รูปที่ ค.2 แสดงผลการตอบสนองของระบบ แบบรูปตัว S และการหาค่าพารามิเตอร์ ของตัวควบคุมพีไอดีโดยวิธี process reaction

การหาค่าพารามิเตอร์โดยวิธีของซีเกอร์-นิโคลส์ นั้นเป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องทำการปรับโดยละเอียดอีกครั้ง เมื่อนำไปใช้กับกระบวนการจริง

ภาคผนวก ง.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความที่ 1 ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ International Symposium of Communication and Information Technology (ISCIT 2001) จัดขึ้นระหว่างวันที่ 14 - 16 พฤศจิกายน 2544 ณ เชียงใหม่ออคิด จังหวัดเชียงใหม่ ในชื่อเรื่อง

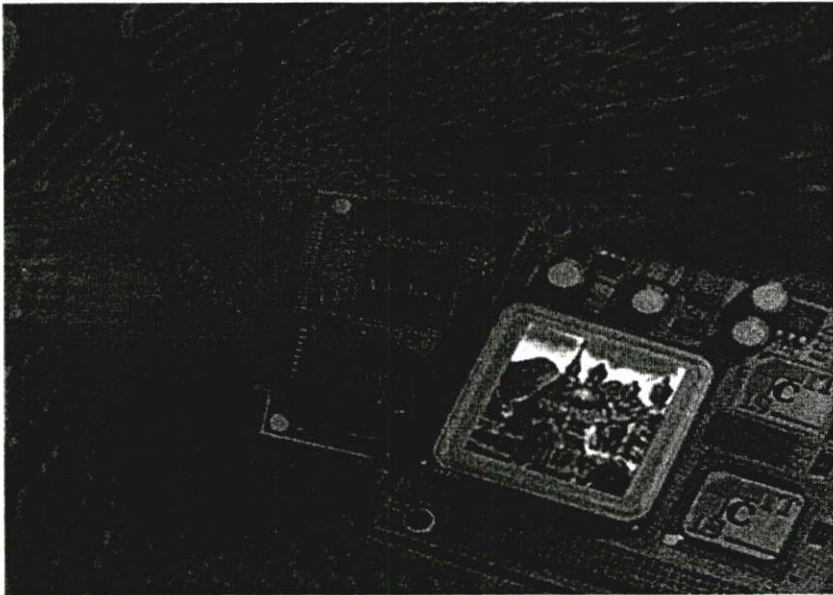
Design of Indirect Fuzzy Controller for Augmented Fuzzy System

บทความที่ 2 ได้รับการตีพิมพ์ในวิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 กรกฎาคม 2539
ในชื่อเรื่อง

การประยุกต์ตัวควบคุม HNSOFLC ในขบวนการ MIMO
Application of HNSOFLC to MIMO Processes

PROCEEDINGS

2001 International Symposium on Communications and Information Technology ISCIT 2001



*The Merging Decade of
Communication Systems and Information Technology*

November 14 - 16, 2001

Chiang Mai Orchid Hotel, Chiang Mai, Thailand



DESIGN OF INDIRECT FUZZY CONTROLLER FOR AUGMENTED FUZZY SYSTEM

*S. Lertudomsuk**, *J. Ngamwiwit** and *N. Komine****

*Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology KMITL, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Phone:+66-2-326-9989, Fax:+66-2-326-9989
E-mail: knjongko@kmitl.ac.th

**School of Engineering Tokai University
Hiratsuka-Shi, Kanagawa-Ken 259-1292, Japan
Phone:+81-463-58-1211, Fax:+81-463-50-2240
E-mail: komine@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

ABSTRACT

This paper presents the design of indirect fuzzy controller for an augmented fuzzy system constituted from the global fuzzy model with an added integrator by pole placement method. The global fuzzy model is constructed from the local fuzzy model and its membership function. The simulation results of the closed-loop fuzzy system using the proposed controller show that the system performance without offset and the tracking property can be achieved.

1. INTRODUCTION

Recently, fuzzy control has been applied to many industrial applications and fuzzy control rule create from human knowledge and experience in the process of control. Takagi and Sugeno[1] represented fuzzy system model with a linear input-output relation that had easy controller design and stability analysis for fuzzy model. Feng et al.[2] presented fuzzy system by separating into local fuzzy model and global fuzzy model. Local fuzzy controller can be created from local fuzzy model by pole placement method. The global fuzzy system is constructed from local fuzzy model and its membership function. This controller made the closed-loop fuzzy system which has sufficient condition for the stability.

The offset of a closed-system will occur if type of the plant is zero. Hence, this paper proposes an indirect fuzzy controller design for an augmented fuzzy system constructed from the global fuzzy model with an added integrator. The simulation results of the proposed closed-loop fuzzy system show that the system performance with zero offset can be achieved. The proposed controller that can track the changed reference signal efficiently is also shown.

2. FUZZY SYSTEM MODELING

In this section, the fuzzy system modeling that can be divided into local fuzzy modeling and global fuzzy modeling will be described respectively[2].

2.1 Local fuzzy model

The fuzzy model that represents a complex single-input-output system which includes both fuzzy inference rule and local analytic linear model can be given by

$$R^i : \text{IF } z_1 \text{ is } F_1^i \text{ AND } \dots z_n \text{ is } F_n^i$$

Then

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t)$$

$$y_i(t) = C_i x(t) \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

where R_i denotes the i th inference rule, m is the number of inference rules, $F_j^i (j=1, 2, \dots, n)$ are the fuzzy sets, $x(t)$ is the system state variables, $u(t)$ is the input variable, $y_i(t)$ is the output, (A_i, B_i, C_i) is the matrix triple of the i th subsystem, and $z(t) = [z_1, z_2, \dots, z_n]$ is some measurable system variables, and where

$$A_i = \begin{bmatrix} a_{11}^i & a_{12}^i & \dots & a_{1n}^i \\ a_{21}^i & a_{22}^i & \dots & a_{2n}^i \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1}^i & a_{n2}^i & \dots & a_{nn}^i \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} b_1^i \\ b_2^i \\ \vdots \\ b_n^i \end{bmatrix},$$

$$C_i = [c_1^i \quad c_2^i \quad \dots \quad c_n^i]. \quad (2)$$

The final system output

$$y(t) = \sum_{i=1}^m \mu_i y_i(t) \quad (3)$$

is inferred by taking the weighted average of the outputs $y_i(t)$ of all the subsystems, where $\mu_i(z(t))$ be the normalized membership function of the inferred fuzzy set F^i , and where

$$F^i = \bigcap_{j=1}^n F_j^i \quad (4)$$

and

$$\sum_{i=1}^m \mu_i = 1. \quad (5)$$

2.2 Global fuzzy model

By using a standard fuzzy inference method and using a singleton fuzzifier, product fuzzy inference and center-average defuzzifier, the global fuzzy model can be obtained as [2]

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \tag{6}$$

where

$$A = \sum_{i=1}^m \mu_i A_i ; B = \sum_{i=1}^m \mu_i B_i ; C = \sum_{i=1}^m \mu_i C_i . \tag{7}$$

If the pairs $(A_i, B_i), i=1,2,\dots,m$ are controllable, the fuzzy system (6) is called locally controllable and if the pairs $(A_i, C_i), i=1,2,\dots,m$ are observable, the fuzzy system (6) is called locally observable.

3. AUGMENTED FUZZY SYSTEM

In case of closed-loop fuzzy system has offset when the reference signal is a step function, an integrator is added to the global fuzzy model for rejecting this offset. The global fuzzy model added an integrator is called augmented fuzzy system. Let

$$\dot{\xi}(t) = r(t) - y(t) = r(t) - Cx(t) \tag{8}$$

where $r(t)$ is the reference signal and ξ is the output of the integrator. Then the augmented fuzzy model is

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \tag{9}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \tag{10}$$

When A, B and C are defined by (7) and when [3]

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A & B \\ -C & 0 \end{bmatrix} = n+1 \tag{11}$$

then a controller that controls the augmented fuzzy system to be stable can be designed.

4. INDIRECT FUZZY CONTROLLER

The indirect fuzzy controller designed for the given augmented fuzzy system described in (9) is presented in this section. The local controller $u_i(t)$ is first designed based on the local models by

$$\begin{aligned} C^i : IF z_1 \text{ is } F_1^i \text{ AND } \dots z_n \text{ is } F_n^i \\ \text{Then} \\ u_i(t) = -K_k x(t) + K_i \xi(t) \end{aligned} \tag{12}$$

where C^i is the i th control rule, K_i is the integral gain and K_k is the state feedback gain at k such that

$$k = \text{arg MAX} \{ \mu_i, i=1,2,\dots,m \} . \tag{13}$$

Hence the indirect fuzzy controller $u(t)$ can be defined as

$$\begin{aligned} u(t) &= \sum_{i=1}^m \mu_i u_i(t) = - \sum_{i=1}^m \mu_i \left\{ \begin{bmatrix} K_k & -K_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \right\} \\ &= - \begin{bmatrix} K_k & -K_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{14}$$

where $\mu_i (i=1,2,\dots,m)$ are defined in (4) and (5). Substituting (14) into (9) yields

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A - BK_k & BK_i \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{15}$$

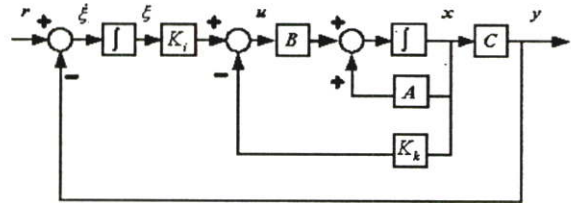


Fig.1 Closed-loop fuzzy system

5. SYSTEM STABILITY

When the augmented fuzzy system (9) is locally controllable and the condition (11) is satisfied then closed-loop fuzzy system (15) is asymptotically stable [2] if

$$\sum_{i=1}^m \mu_i \lambda_{ki} < 0 \tag{16}$$

or

$$\sum_{i=1, i \neq k}^m \mu_i \lambda_{ki} < -\mu_k \lambda_{kk} \tag{17}$$

where $k=1,2,\dots,m$ and where λ_{ki} is defined by

$$\lambda_{ki} = \lambda_{\max}(Q_{ki}) \tag{18}$$

with

$$P = \sum_{i=1}^m \beta_i P_i \quad \beta_i > 0$$

or

$$P = \sum_{i=1}^m P_i \tag{19}$$

and

$$Q_{ki} = \begin{bmatrix} A - BK_k & BK_i \\ -C & 0 \end{bmatrix}^T P + P \begin{bmatrix} A - BK_k & BK_i \\ -C & 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

where β_i is the constant and λ_{ki} is the eigenvalues.

Choosing as a Lyapunov function candidate

$$V = \alpha(t)^T P \alpha(t) \tag{21}$$

where $\alpha = [x \ \xi]^T$, then its derivative along the solution of (16) is

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\alpha}(t)^T P \alpha(t) + \alpha(t)^T P \dot{\alpha}(t) \\ &= \alpha(t)^T \left\{ \begin{bmatrix} A - BK_K & BK_I \\ -C & 0 \end{bmatrix}^T P \right. \\ &\quad \left. + P \begin{bmatrix} A - BK_K & BK_I \\ -C & 0 \end{bmatrix} \right\} \alpha(t) \\ &= \alpha(t)^T \left\{ \sum_{i=1}^m \mu_i Q_i \right\} \alpha(t) \end{aligned} \tag{22}$$

It can be seen that if (16) or (17) are satisfied, then $\dot{V} < 0$.

6. SIMULATION RESULTS

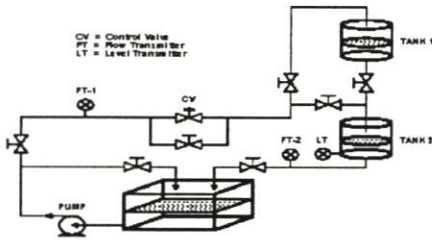


Fig. 2 Level process

The open-loop transfer function of the nominal level process at the level of 40 cm. is given by [4]

$$G(s) = \frac{1.58}{3300s^2 + 140s + 1} \tag{23}$$

and the nominal open-loop poles are $s = -0.0333$ and $s = -0.0091$.

Let the inference rules of the fuzzy variable and the error of water level are defined by 7 rules as

- R^1 : if error is NB
then
 $\dot{x} = A_1x(t) + B_1u(t)$
 $y_1 = C_1x(t)$
- R^2 : if error is NM
then
 $\dot{x} = A_2x(t) + B_2u(t)$
 $y_2 = C_2x(t)$
- R^3 : if error is NS
then
 $\dot{x} = A_3x(t) + B_3u(t)$
 $y_3 = C_3x(t)$
- R^4 : if error is AZ
then
 $\dot{x} = A_4x(t) + B_4u(t)$

- $y_4 = C_4x(t)$
- R^5 : if error is PS
then
 $\dot{x} = A_5x(t) + B_5u(t)$
 $y_5 = C_5x(t)$
- R^6 : if error is PM
then
 $\dot{x} = A_6x(t) + B_6u(t)$
 $y_6 = C_6x(t)$
- R^7 : if error is PB
then
 $\dot{x} = A_7x(t) + B_7u(t)$
 $y_7 = C_7x(t)$

Then local fuzzy models are constructed by placing their open-loop poles at $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 25\%$ apart from the nominal open-loop poles. Hence A_i , B_i and C_i of the local fuzzy models including the nominal one are obtained as follows:

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1.7075 \times 10^{-4} & -3.1831 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \\ A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2.1904 \times 10^{-4} & -3.6042 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \\ A_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2.7334 \times 10^{-4} & -4.0250 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \\ A_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3.0303 \times 10^{-4} & -4.2424 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \\ A_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3.3460 \times 10^{-4} & -4.4560 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \\ A_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -4.0215 \times 10^{-4} & -4.8823 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \\ A_7 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -4.7424 \times 10^{-4} & -5.3212 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_1 = B_2 = B_3 = \dots = B_7 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ and } C_1 = C_2 = \dots \\ &= C_7 = \begin{bmatrix} 4.7821 \times 10^{-4} & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

The global fuzzy model can be constructed from local fuzzy models and their membership functions. The membership functions are found from the relation between the level process and fuzzy variable as shown in Fig. 3. An augmented fuzzy system will be obtained by adding an integrator to the global fuzzy model.

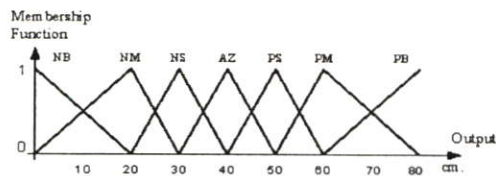


Fig. 3 Relation between membership function and fuzzy variable

6.1 Closed-loop fuzzy system performance

The indirect fuzzy controller is designed for controlling an augmented fuzzy system whose process is the process at the level of 40 cm. by placing the dominant closed-loop poles at $s = -0.0504 \pm j0.051$ and the non-dominant closed-loop pole at $s = -1$. The damping ratio ξ and percent overshoot P_o at the dominant closed-loop poles are 0.7 and 4% respectively.

Figure 4 shows the step response of the proposed closed-loop fuzzy system. It can be observed that the speed of the response is fast with percent overshoot of 4.575%. The values of the rise time t_r and the settling time $t_s(2\%)$ are also shown in Table 1.

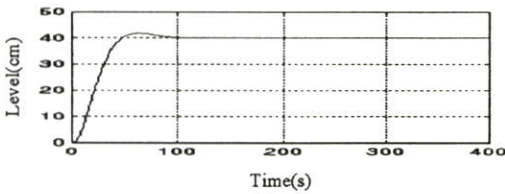


Fig. 4 System response at the level of 40 cm

6.2 System performance when the level is changed

The indirect fuzzy controller designed for controlling the level process at 40 cm. is also directly applied to control the process at the level of 20 and 60 cm. without adjusting its parameters. The step responses are shown in Fig. 5 and Fig. 6 respectively. The system performances of the three levels of the process are summarized in Table 1. It is seen that the system performances, do not remarkably change from the system performance at the level of 40 cm. This shows the efficiency of the proposed indirect fuzzy controller.

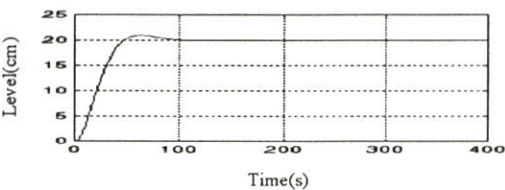


Fig. 5 System response at the level of 20 cm

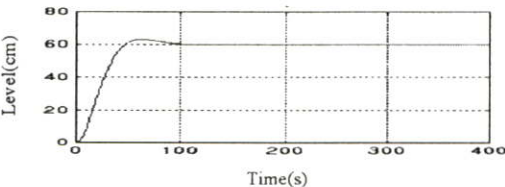


Fig. 6 System response at the level of 60 cm

Table 1 System performance

| Level (cm) | t_r (s) | P_o (%) | $t_s(2\%)$ (s) |
|------------|-----------|-----------|----------------|
| 60 | 47 | 4.583 | 84.7 |
| 40 | 43 | 4.575 | 84.7 |
| 20 | 47 | 5.575 | 85 |

6.3 Tracking problem

When the reference signal is changed from the level of 40 cm. to the level of 60 cm. at 200 seconds, it is found from Fig. 7 that the system response tracks the reference signal properly. The control signal is also shown in Fig. 8.

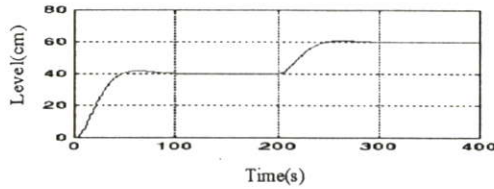


Fig. 7 System response

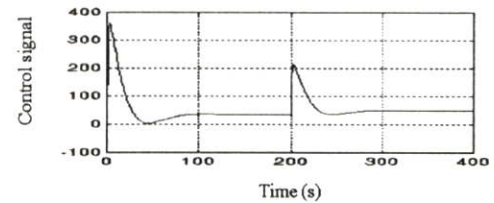


Fig. 8 Control signal

7. CONCLUSIONS

The indirect fuzzy controller that can reject the offset of the closed-loop fuzzy system has been presented. It has been shown that the controller gives the system responses as desired. It has been also shown the efficiency of the controller that the system response can track the changed reference signal without error at the steady state.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Japan International Cooperation Agency (JICA) in supporting this research paper partially.

REFERENCES

- [1] T. Takagi and M. Sugeno: "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," IEEE Trans. Syst., Man and Cyber., Vol. SMC-15, No. 1, pp.116-132, January-February 1985.
- [2] G. Feng et al.: "Design of Fuzzy Control Systems with Guaranteed Stability," Fuzzy Sets and Systems, pp.1-10, 1997.
- [3] H. W. Smith and E. J. Davison: "Design of Industrial Regulator," Proc.IEE, pp.1210-1216, 1972.
- [4] S. Chaowai: "Robust H_∞ Controller Design," Master Thesis M.Eng., Dept. Control Eng., KMITL, 1997.



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

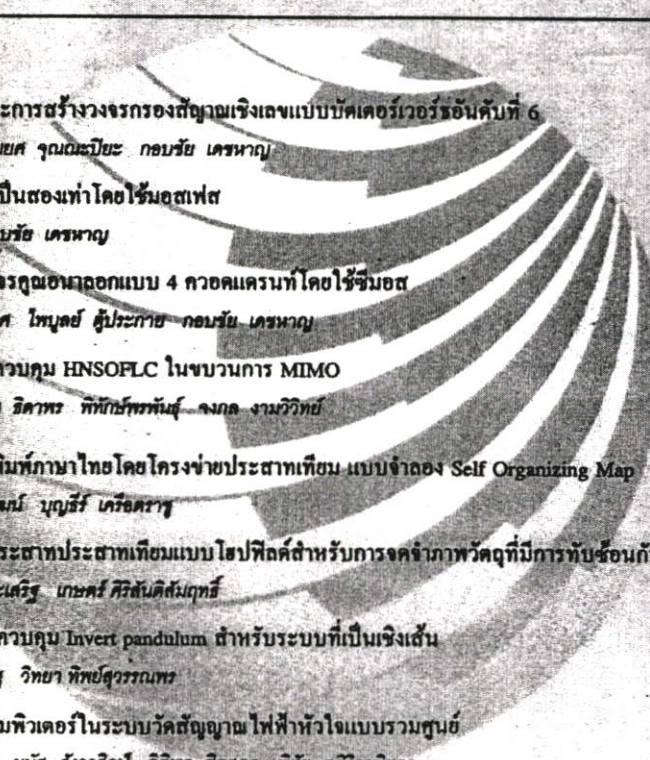
ลาดกระบัง

กน-วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

Volume 13 Number 1

July, 1996

- 
- | | |
|---|-----|
| 11. การออกแบบและการสร้างวงจรรองสัญญาณเชิงเลขแบบขนานด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์รุ่นที่ 6 วินัย ทองคัน สมยศ จุณณะวิยะ กอมรชัย เศรษฐาญ | 78 |
| 12. วงจรทวิความถี่เป็นสองเท่าโดยใช้มอดูเลต ทวิฐ ชูเมือง กอมรชัย เศรษฐาญ | 91 |
| 13. การออกแบบวงจรมอดูเลตแบบ 4 ควอดแรนทโดยใช้มอดูเลต ฐิติพงศ์ บุคณกรศ โทบุญย์ สุประภาส กอมรชัย เศรษฐาญ | 95 |
| 14. การประยุกต์ตัวควบคุม HNSOFLC ในขบวนการ MIMO สุรภิก เลิศอุดมสุข อิศาทรร พัทธินทรพันธ์ จงกล งามวิวิท | 101 |
| 15. การจดจำอักษรพิมพ์ภาษาไทยโดยโครงข่ายประสาทเทียม แบบจำลอง Self Organizing Map อัญญ์ลี วานิชทวีวัฒน์ บุญธีร์ เจริญตราวุ | 107 |
| 16. โครงข่ายเซลล์ประสาทประสาทเทียมแบบไฮปัลด์สำหรับการจดจำภาพวัตถุที่มีการทับซ้อนกันบางส่วน พารา ลิมนะณิประเสริฐ เกษศรี ศิริสันติสัมฤทธิ์ | 119 |
| 17. การออกแบบตัวควบคุม Invert pandulum สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้น เกียรติอนันท์ สุรชู วิทยา ทิพย์สุวรรณพร | 131 |
| 18. การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ในระบบวัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจแบบรวมศูนย์ วัฒน์นา โทษุเจริญ มนต์ สว่างศิลป์ กิตติพล ชิตสกุล ทิพย์ สุศิริวานิชกร | 137 |
| 19. การออกแบบเครื่องขึ้นน้ำส้นแบบต่อเนื่อง พิชญ์ ศิริวานิชย์วงศ์ ราชัน ชุตกิจ ปานณนัต ศิริสมบูรณ์ พิจิต กิตติมนตรี | 143 |

ฉบับพิเศษ

พระจอมเกล้าลาดกระบังฉบับพิเศษ

ฉบับพิเศษฉบับแรก

4-8 กรกฎาคม 2539

การประยุกต์ตัวควบคุม HNSOFLC ในกระบวนการ MIMO

Application of HNSOFLC to MIMO Processes

ศุภกิจ เลิศอุดมสุข ธิคาพร พิทักษ์พรพันธุ์ จงกต งามวิวิท

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซีที่ปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตัวเองแบบ hybrid-nested กับกระบวนการหลายอินพุตหลายเอาต์พุต โดยปรับปรุงโปรแกรมในส่วนของการควบคุมให้สามารถใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมแบบหลายช่องควบคุมด้วยวิธีแบ่งเวลาการทำงานของคอมพิวเตอร์ ตัวควบคุมในแต่ละช่องควบคุมจะเป็นชนิดอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียวที่ทำงานและปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอย่างเป็นอิสระต่อกัน ในการประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมแบบหลายช่องควบคุมกับกระบวนการหลายอินพุตหลายเอาต์พุต จะต้องแบ่งกระบวนการออกเป็นวงควบคุมย่อยที่มีอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียว แล้วจึงควบคุมแต่ละวงควบคุมย่อยเหล่านั้น ตัวควบคุมฟัซซีนีจะช่วยลดความยุ่งยากในการควบคุมกระบวนการในกรณีที่คุณไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการหรือไม่มีความรู้เกี่ยวกับวิธีการควบคุม จากการทดลองกับกระบวนการถึงผสมถ่ายเทความร้อน ปรากฏว่าตัวควบคุมในแต่ละช่องควบคุมสามารถเรียนรู้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมกระบวนการ และสามารถลดผลกระทบจากการเกิดปฏิกริยาระหว่างกันของแต่ละวงควบคุมในกระบวนการเดียวกัน

Abstract

This paper describes the application of hybrid-nested self-organising fuzzy logic controllers to MIMO processes. The program computer is developed to work as a multi-channel controller by using the concept time-sharing, in which the controller of each channel can tune its own parameters and work separately as a SISO controller. In order to apply a multi-channel controller to a MIMO process, the process have been divided into SISO partial loops, and the controller of each channel is then applied to control each partial loop of the process. The objective of this proposed method is to avoid the difficulties in model approximation of the unknown parameter or no knowledge-base processes. The experimental results show that the controller of each channel can organise its proper parameters in obtaining the acceptable performances and reducing the effects of the interaction between each control loop.

1. บทนำ

กระบวนการควบคุมทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักจะมีโครงสร้างซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้การออกแบบ

ตัวควบคุมอัตโนมัติโดยใช้วิธีการแบบดั้งเดิมทำได้ยาก และในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี (fuzzy controller) จะพบปัญหาในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม เนื่องจากไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการหรือไม่

ในช่วง ± 1 และทำการควอนไทซ์ (quantize) แบบเชิงเส้น โดยใช้ระดับการควอนไทซ์เท่ากับ 300 และทำฟัซซีฟิเคชันโดยใช้ฟัซซีซิงเกิลตัน (fuzzy singleton) ในการกำหนดจำนวนฟัซซีเซตของตัวแปรอินพุตจะกำหนดให้เท่ากับ 7 เซต และกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกให้มีการกระจายแบบสมมาตร โดยมีการซ้อนทับกันของฟัซซีเซตที่อยู่ติดกันเท่ากับ 25% ในส่วนของกรอินเฟอเรนซ์ (inference) จะใช้กฎการคอมโพสิชัน (compositional rule of inference) ของ Zadeh ซึ่งใช้ตัวปฏิบัติการ max-min ในการทำคอมโพสิชันและในส่วนของการดีฟัซซีฟิเคชัน (defuzzification) ได้เลือกใช้วิธี fuzzy mean ซึ่งเป็นวิธีที่คิดแปลงมาจากวิธีการหาจุดศูนย์กลางน้ำหนัก (center of gravity) แต่ใช้ระดับการควอนไทซ์น้อยกว่า เพื่อประหยัดเวลาและลดขั้นตอนในการคำนวณ

2.1.2 การควบคุมระดับละเอียด

ในการควบคุมระดับละเอียด ใช้โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบ PD ค่อนข้างกับตัวควบคุมแบบ P (proportional controller) โดยที่ตัวควบคุมแบบ P จะมีอัตราการขยายเท่ากับส่วนกลับของค่าอัตราการขยายที่สถานะอยู่ตัวของกระบวนการ [4.5] เพื่อแก้ไขค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวของระบบ โดยที่ค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมแบบ P นี้จะได้ออกมาจากการเรียนรู้ของโครงสร้างส่วนการปรับแต่งพารามิเตอร์

2.2 โครงสร้างส่วนการปรับแต่งพารามิเตอร์

การปรับแต่งพารามิเตอร์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามจุดประสงค์ในการปรับแต่ง คือการแก้ไขสมรรถนะระยะสั้น และการแก้ไขสมรรถนะระยะยาว

2.2.1 การแก้ไขสมรรถนะระยะสั้น

การแก้ไขสมรรถนะระยะสั้น มีจุดประสงค์เพื่อบังคับให้ค่าตัวแปรสถานะ e และ Δe เข้าสู่ศูนย์อย่างรวดเร็ว โดยปรับแต่งฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตในส่วนผลของกฎที่ใช้ในการควบคุมที่เวลา $nT-mT$ จากสมการต่อไปนี้

$$NU^k = U^k + (SPM(nT) \times \mu_U^k(u))$$

โดยที่

NU^k คือฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตในส่วนผลของกฎการควบคุมที่ปรับแต่งแล้ว

U^k คือฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตในส่วนผลของกฎการควบคุมที่เวลา $nT-mT$

$\mu_U^k(u)$ คือฟังก์ชันการเป็นสมาชิก

$SPM(nT)$ คือการวัดสมรรถนะระยะสั้นที่เวลา nT ซึ่งหาได้จาก

$$SPM(nT) = (G_e \times e(nT)) + (G_{\Delta e} \times \Delta e(nT))$$

เมื่อ

G_e คืออัตราขยายของตัวแปรสถานะอินพุต e

$G_{\Delta e}$ คืออัตราขยายของตัวแปรสถานะ Δe

$e(nT)$ คือค่าผิดพลาดของเอาต์พุตที่เวลา nT

$\Delta e(nT)$ คือค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดที่เวลา nT

2.2.2 การแก้ไขสมรรถนะระยะยาว

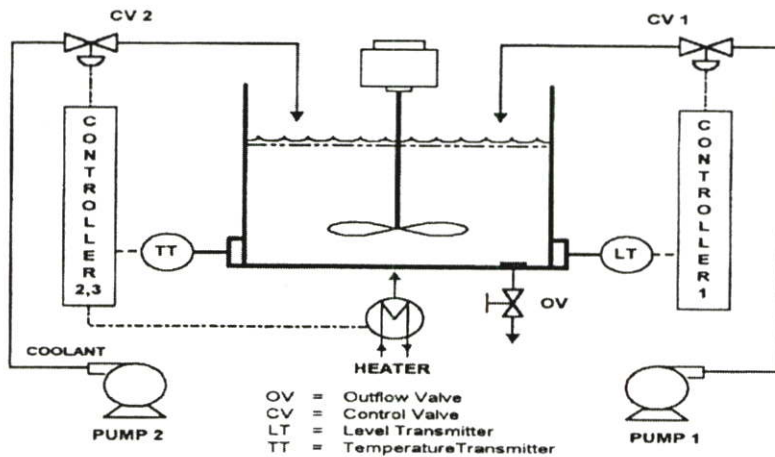
การแก้ไขสมรรถนะระยะยาวของระบบควบคุมประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. วัดค่าโอเวอร์ชูตและช่วงเวลานขึ้น (rise time : Tr) แล้วนำมาคำนวณหาค่าสมรรถนะที่สถานะชั่วคราว (transient state) โดยใช้วิธีการแบบฟัซซี แล้วจึงนำค่าที่คำนวณได้มาปรับแต่งค่าอัตราการขยายของตัวแปรสถานะ Δe ที่ใช้ในการควบคุมระดับหยาบ เพื่อแก้ไขสมรรถนะที่สถานะชั่วคราว
2. วัดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (steady-state error : Ess) แล้วนำค่าที่ได้มาใช้ในการปรับแต่งตัวควบคุมแบบ P ในการควบคุมระดับละเอียด เพื่อแก้ไขค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว
3. วัดค่าเปอร์เซ็นต์การแกว่ง (percent oscillation : %Osc) แล้วนำค่าที่ได้มาใช้ในการปรับแต่งค่าอัตราการขยายของตัวแปร u ที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด เพื่อแก้ไขการแกว่งของเอาต์พุตที่สถานะอยู่ตัว
4. วัดค่าช่วงเวลาเข้าที่ (settling time : Ts) แล้วนำค่าที่ได้มาใช้ในการปรับแต่งค่าอัตราการขยายของตัวแปร Δe ที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด เพื่อแก้ไขค่าเวลาในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัว

3. การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบ HNSOFLC กับกระบวนการดังผสมด้วยความร้อน

ในการควบคุมกระบวนการดังผสมด้วยความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2 จะมีตัวแปรที่ต้องการควบคุม 2 ตัวแปร คืออุณหภูมิของน้ำและความสูงของระดับน้ำในถัง โดยให้

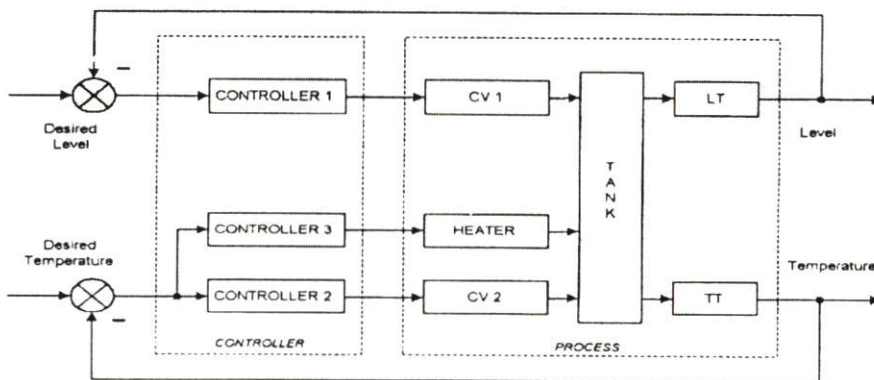
วาล์วทางออก (OV) เปิดคงที่ และมีส่วนที่ใช้ควบคุมสุดท้าย (final controlling element) อยู่ 3 อุปกรณ์ คือวาล์วควบคุมทางเข้าของน้ำที่อุณหภูมิห้อง (CV1) วาล์วควบคุมทางเข้าของน้ำเย็น (CV2) และอุปกรณ์ทำความร้อน (HEATER)



รูปที่ 2 กระบวนการดังผสมด้วยความร้อน

ดังนั้น จึงแบ่งวงควบคุมของกระบวนการออกเป็น 3 วงควบคุมตามจำนวนของอุปกรณ์ ดังนี้
 วงควบคุมที่ 1 การควบคุมระดับน้ำ โดยควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วทางเข้าของน้ำที่อุณหภูมิห้อง
 วงควบคุมที่ 2 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำ โดยควบคุม

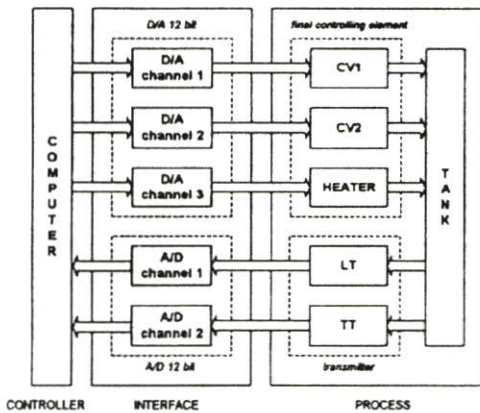
การเปิด-ปิดวาล์วทางเข้าของน้ำเย็น
 วงควบคุมที่ 3 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำ โดยควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อุปกรณ์ทำความร้อน
 ซึ่งสามารถแสดงการแบ่งวงควบคุมออกได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การแบ่งวงควบคุมของกระบวนการดังผสมด้วยความร้อน

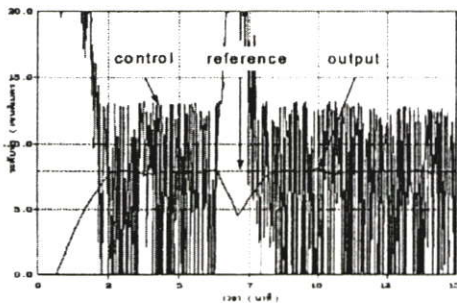
4. ผลการทดลอง

ทำการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม HNSOFLC แบบหลายช่องควบคุม ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาซีบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ (CPU 486 DX2-66 RAM 8 MB) ควบคุมกระบวนการผสมถ่ายเทความร้อน โดยใช้ความถี่ในการสุ่มสัญญาณเท่ากับ 0.55 เฮิรตซ์ แผนภาพแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงในรูปที่ 4

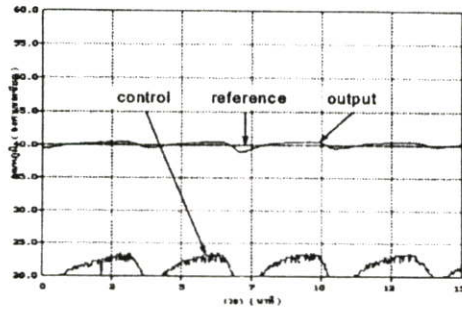


รูปที่ 4 การต่อเชื่อมอุปกรณ์

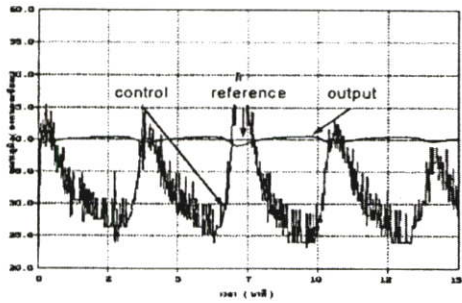
ในการทดลองนี้ ได้กำหนดค่าให้ค่าระดับน้ำอ้างอิงของวงควบคุมที่ 1 เท่ากับ 8 เซนติเมตร และอุณหภูมิน้ำอ้างอิงของวงควบคุมที่ 2 และ 3 เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส และได้ทดลองทำการรบกวนระดับน้ำของวงควบคุมที่ 1 เป็นเวลา 40 วินาที ที่เวลา 6 นาที ผลตอบสนองของระบบควบคุมในแต่ละวงควบคุม แสดงได้ดังในรูปที่ 5-7 ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 5 ผลตอบสนองของวงควบคุมที่ 1



รูปที่ 6 ผลตอบสนองของวงควบคุมที่ 2



รูปที่ 7 ผลตอบสนองของวงควบคุมที่ 3

5. สรุปการทดลอง

จากผลการทดลองในหัวข้อที่แล้ว ปรากฏว่าตัวควบคุมที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถควบคุมกระบวนการในแต่ละวงควบคุมได้

ในส่วนของ การควบคุมระดับน้ำ เาต์พุทของระบบสามารถเข้าสู่จุดอ้างอิงได้เร็ว มีโอเวอร์ชูน้อยมาก และเกิดการแกว่งรอบจุดอ้างอิงที่สถานะอยู่ตัวน้อย จากรูปที่ 5 และ 6 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำภายในถังสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส วาล์ว CV2 จะทำงานโดยเพิ่มน้ำเย็นในถัง ส่งผลให้ระดับของน้ำในถังสูงขึ้น ถ้าระดับน้ำสูงกว่า 8 เซนติเมตร วาล์ว CV1 จะถูกควบคุมให้เปิดน้อยลง เพื่อรักษาระดับความสูงของน้ำ และเมื่อมีการรบกวนจากภายนอก วงควบคุมที่ 1 สามารถทำงานปรับระดับความสูงของน้ำในถังให้เข้าสู่จุดอ้างอิงได้เร็วและไม่มีการแกว่งรอบจุดอ้างอิง

ในส่วนของ การควบคุมอุณหภูมิของน้ำ ตัวควบคุมในวงควบคุมที่ 2 และ 3 จะควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้เข้าสู่จุด

อ้างอิงได้และมีการแกว่งของเอาต์พุตรอบสัญญาณอ้างอิงน้อย จากรูปที่ 6 เมื่ออุณหภูมิของน้ำในถังสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส วาล์ว CV2 จะเปิด และจะปิดเมื่ออุณหภูมิต่ำลง และจากรูปที่ 7 HEATER จะทำงานน้อยลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำในถังสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส และจะทำงานมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะเห็นว่า วงควบคุมที่ 2 และ 3 ทำงานในลักษณะตรงข้ามกัน เพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ตามที่กำหนดไว้ และเมื่อมีการรบกวนจากภายนอก วงควบคุมที่ 2 และ 3 สามารถทำงานเพื่อปรับอุณหภูมิให้เข้าสู่จุดอ้างอิงและมีการแกว่งน้อย

จากผลสรุปข้างต้นจะเห็นว่า ตัวควบคุม HNSOFLC แบบหลายช่องการควบคุมที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถควบคุมกระบวนการหลายอินพุตหลายเอาต์พุตได้และทำให้ระบบที่ควบคุมมีความคงทน (robust) โดยสามารถลดผลกระทบที่เกิดปฏิริยาระหว่างกัน (interaction) ของแต่ละวงควบคุมในกระบวนการเดียวกันและสามารถลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวน (disturbance) จากภายนอก

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ebrahim H. Mamdani, "Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis," IEEE Transactions on computer, Vol. C-26, No.12, December 1977.
- [2] ธิดาพร พิทักษ์พรพันธุ์ รศ.ดร.จกมล งามวิวิทย์ "ตัวควบคุมที่ซับซ้อนแบบสร้างและปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเองแบบ Hybrid-nested" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18 ปี 2538
- [3] Y. F. Li and C. C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," IEEE Control Systems Magazine, pp. 65-71, April 1989.
- [4] D. P. Kwok, D. Tam, C. K. Li and P. Wang, "Linguistic PID Controllers," Proc. 11th IFAC World Congress, Tallin, USSR, pp.192-197, 1990.
- [5] D. P. Kwok, D. Tam and C. K. Li, "Analysis and Design of Fuzzy PID Control Systems," Proc. IEE 'Control 91' Conference, Heriot Watt Univ., Edinberg, 1991.
- [6] C. J. Harris, C. G. Moore & M. Brown, "Intelligent Control Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets," World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1993.

ประวัติผู้เขียน

นายสุรกิจ เลิศอุดมสุข เกิดเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2514 ที่ อ.ชุมแพ จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาและมัธยมปลาย จากโรงเรียนชุมแพศึกษาและโรงเรียนขอนแก่นวิทยายน จังหวัดขอนแก่น ตามลำดับ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ ในปีการศึกษา 2535 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2539

เริ่มทำงานเป็นวิศวกรไฟฟ้าบริษัท W&W Engineering จำกัด และชงชัยพาณิชย์ก่อสร้าง หลังจากนั้นเป็นอาจารย์ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิตและคณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี จนถึงปี 2545 เคยได้รับเงินสนับสนุนการวิจัย จากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ