การออกแบบตัวควบคุมทาคางิ–ซูเกโนฟัซซีพีไอ + ดี และพีดี + ไอ สำหรับระบบเชิงเส้นที่ไม่แน่นอน

DESIGN OF TAKAGI-SUGENO FUZZY PI+D AND PD+I CONTROLLER FOR UNCERTAIN LINEAR SYSTEMS

อรรถพล กันหเวก

ATTAPON KANHAWEK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-603-9

สำนักหอสมุดกลาง_พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบตัวควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี และพีดี+ไอ สำหรับระบบเชิงเส้นที่ไม่แน่นอน

DESIGN OF TAKAGI-SUGENO FUZZY PI+D AND PD+I CONTROLLER FOR UNCERTAIN LINEAR SYSTEMS

T043277

อรรถพล กัณหวก

ATTAPON KANHAWEK

เลขหมู่
เลขทะเบียน 43277
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2545
b.
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-603-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF TAKAGI-SUGENO FUZZY PI+D AND PD+I CONTROLLER FOR UNCERTAIN LINEAR SYSTEMS

ATTAPON KANHAWEK

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 974-648-603-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี และพีดี+ไอ สำหรับระบบเชิงเส้นที่ไม่แน่นอน

DESIGN OF TAKAGI-SUGENO FUZZY PI+D AND PD+I CONTROLLER FOR UNCERTAIN LINEAR SYSTEMS

ชื่อนักศึกษา นายอรรถพล กัณหเวก

รหัสประจำตัว 42061097

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จงกล งามวิวิทย์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.สุธี ผู้เจริญชนะชัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.วิพันธ์	ปรีชาพานิช	
รศ.สุเธียร	เกียรติสุนทร	
รศ.เกษตร์	ศิริสันติสัมฤทธิ์	
ดร.สุธี	ผู้เจริญชนะชัย	
รศ.ดร.จงกล	งามวิวิทย์	

วัน/เดือนปี ที่สอบ 19 ธันวาคม 2544 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่....7....**เดือน**....กุมภาพันธ์....**พ.ศ.**....2545....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบตัวควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี และ พีดี+ไอ สำหรับระบบเชิงเส้นที่ไม่แน่นอน

นักศึกษา อรรถพล กัณหเวก

รหัสประจำตัว 42061097

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ. 2545

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. จงกล งามวิวิทย์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ดร. สุธี ผู้เจริญชนะชัย

บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันดีว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิมไม่ว่าจะเป็นตัวควบคุมพีไอ พีดี หรือพีไอดี สามารถให้ผลตอบสนองที่ดีสำหรับระบบเชิงเส้นและระบบที่มีอันดับต่ำ แต่ไม่เหมาะกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและระบบที่มีความไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้ ตัวควบคุมฟัซซีจึงถูกนำมาใช้กับระบบเหล่านี้เพื่อแก้ปัญหาของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม แต่ถึงแม้ว่าตัวควบคุมฟัซซีจะให้ผลตอบสนองที่น่าพอใจก็ตาม แต่ผลลัพธ์ของกฎจะอยู่ในรูปของตัวแปรเชิงภาษา ซึ่งมีความยุ่งยากในการพิสูจน์เสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้ ทากางิและซูเกโนจึงได้นำเสนอแนวความคิดในการแก้ปัญหานี้ โดยการกำหนดให้ผลลัพธ์ของกฎอยู่ในรูปของฟังก์ชันของตัวแปรอินพุต

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอการใช้ทฤษฎีบทเกนน้อยในการหาเสถียรภาพแบบบีไอบีโอของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ ที่มีการพิจารณาความไม่แน่นอนในการหาแบบจำลอง โดยแบ่งอินพุตสเปซออกเป็น 12 บริเวณ และถ้าทุกบริเวณสามารถสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพที่ได้จากทฤษฎีบทเกนน้อยแล้ว จะสามารถรับประกันเสถียรภาพระบบควบคุมวงปิดได้

นอกจากนี้ยังได้แสดงการออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ สำหรับควบคุมกระบวนการเชิงเส้นที่มีเวลาไร้ผลตอบสนอง โดยแต่ละตัวควบคุมจะประกอบด้วย 2 อินพุตฟัซซีเซต(บวกและลบ) กฎฟัซซีที่มีผลลัพธ์เป็นสมการเชิงเส้นจำนวน 4 กฎ ปฏิบัติการฟัซซีลอจิกแอนด์ของซาเดห์และวิธีเซ็นทรอยด์ดีฟัซซีฟายเออร์ ผลลัพธ์ของแต่ละตัวควบคุมมีโครงสร้างเชิงเส้น แต่มีค่าเกนของตัวควบคุมไม่คงที่ นั่นคือ เกนพรอพอชันนอล อินทิกรัลและเดอริเวทีฟเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของสัญญาณอินพุต และสุดท้ายได้ทำการหาผลการจำลองการควบคุมและผลการควบคุมจริงของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ เมื่อป้อนสัญญาณอ้างอิงคงที่มีและไม่มีการรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Design of Takagi-Sugeno Fuzzy PI+D and PD+I Controller for Uncertain Linear Systems
Student	Mr. Attapon Kanhawek
Student ID.	42061097
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jongkol Ngamwiwit
Thesis Co-Advisor	Dr. Suthee Phoojaruenchanachai

ABSTRACT

It is known that the conventional PI(proportional-integral), PD(proportional-derivative) or PID(proportional-integral-derivative) controllers with well-tuned parameters give good system performance for low order and linear system. However, the conventional controllers are not proper for the nonlinear or uncertain system. On the other hand, the fuzzy controller has been introduced for nonlinear or uncertain system. Although the fuzzy controller will give satisfied performance, the rule consequent in linguistic variables will make the fuzzy controller be nonlinear. Hence, it is difficult to prove the stability of the closed-loop system. Takagi and Sugeno(TS) have proposed the idea to solve the stability problem by defining the rule consequent in function of input variables.

The bounded-input/bounded-output(BIBO) stability of the TS fuzzy PI+D and PD+I control systems can be analyzed by the small gain theorem considering the uncertainty. By dividing the input space into 12 different input combinations(ICs), the closed-loop system will be BIBO stable if all the 12 ICs are satisfied the defined stability condition of the small gain theorem.

The designing concept of TS fuzzy PI+D and PD+I controllers for the linear process with dead time and the stability analysis of the closed-loop system are also presented. Each controller consists of two linear input fuzzy sets(Positive and Negative), four TS fuzzy rules with linear consequent, the Zadeh fuzzy logic AND and the centroid defuzzifier. The resulting of each controller has linear structure but has nonconstant gains: the proportional, integral and derivative gains are nonlinear function of the input signals. Furthermore, simulation and experimental results of temperature control using the proposed controllers for reference step signal with and without disturbance are shown.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จงกล งามวิวิทย์ เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาทางทฤษฎีต่าง ๆ ในการควบคุม ตลอดจนคำแนะนำในการเขียนบทความและการเขียนวิทยานิพนธ์ ทั้งยังคอยเอาใจใส่ ดูแล ข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ดร. สุธี ผู้เจริญชนะชัย ผู้ให้คำแนะนำทางด้านทฤษฎีต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังให้คำแนะนำทางด้านหัวข้อวิทยานิพนธ์ วัสดุและอุปกรณ์ ตลอดจนดูแลเอาใจใส่ข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ พรสุข รติโรจน์อนันต์ ที่ได้ให้ข้อมูลรายละเอียดและอุปกรณ์ในการทำการทดลอง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ถาวร ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาในทฤษฎีการควบคุม และข้อสงสัยต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่อดิศักดิ์ แข็งสาริกิจ ที่ได้ให้คำแนะนำในทุก ๆ เรื่อง

ขอขอบคุณพี่ ๆ ที่สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ทุกคน ที่ร่วมสนุกสนาน คอยเป็นห่วงเป็นใยตลอดมาและ ขอขอบคุณสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้สถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจให้ตลอดมา โดยเฉพาะคุณตั้มที่ให้ยืมเครื่องพิมพ์ในการพิมพ์วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณผู้อาวุโสที่สถานธรรมทุกท่าน ที่ให้ความกระจ่างทางธรรม ให้ข้าพเจ้าได้รู้สึกถึงความสงบ มีความสุข และอิ่มเอมทางใจในยามที่เหนื่อยล้าจากการเรียน

ขอขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช.) ที่ได้ให้ทุนการศึกษาต่อระดับปริญญาโทภายในประเทศ และขอขอบคุณสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้มอบทุน อุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ของข้าพเจ้า ที่ได้ให้กำเนิด เลี้ยงดู อบรมสั่งสอนและประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า จนเติบโตมาจนมีวันนี้ ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคนที่ช่วยเป็นกำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของข้าพเจ้า

อรรถพล กัณหเวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..II
กิตติกรรมประกาศ..III
สารบัญ...IV
สารบัญรูป...VII
สารบัญตาราง..X
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ปัญหาที่พบในตัวควบคุมดั้งเดิม...1
1.2 แนะนำตัวควบคุมฟัซซีและงานวิจัยที่ผ่านมา................................2
1.3 ประโยชน์ของการใช้ตัวควบคุมฟัซซี..3
1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์...................................3

บทที่ 2 ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์สำหรับการควบคุมฟัซซี.........................6
2.1 เซตดั้งเดิมและฟัซซีเซต..6
2.1.1 ทฤษฎีเซตดั้งเดิม...6
2.1.2 ข้อจำกัดของเซตดั้งเดิม...8
2.1.3 ฟัซซีเซต..9
2.2 การปฏิบัติการฟัซซีลอจิก...12
2.3 ฟัซซิฟิเคชัน...13
2.4 กฎฟัซซี..13
2.4.1 กฎแมมดานิฟัซซี...14
2.4.2 กฎทีเอสฟัซซี...14
2.5 ฟัซซีอินเฟอเรนซ์..14
2.6 ดีฟัซซีฟิเคชัน...16
2.6.1 เจนเนอรอลไลซ์ดีฟัซซีฟายเออร์...16
2.6.2 เซ็นทรอยด์ดีฟัซซีฟายเออร์ มีนออฟแมกซิมัมดีฟัซซีฟายเออร์
และลิเนียร์ดีฟัซซีฟายเออร์..17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7 ตัวควบคุมฟัซซี..17

2.7.1 ตัวควบคุมแมมดานิฟัซซี...18

2.7.2 ตัวควบคุมทีเอสฟัซซี...22

บทที่ 3 การออกแบบตัวควบคุม...24

3.1 การออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี...24

3.1.1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอ+ดีดั้งเดิม...24

3.1.2 โครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี...27

3.2 การออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ..39

3.2.1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีดี+ไอดั้งเดิม...39

3.2.2 โครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี...42

บทที่ 4 การวิเคราะห์เสถียรภาพ..48

4.1 เสถียรภาพแบบโกลบอล โลคอล และบีไอบีโอ...48

4.2 ทฤษฎีบทเกนน้อย..49

4.3 เสถียรภาพแบบบีไอบีโอของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี............................50

4.3.1 เงื่อนไขค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ..50

4.3.2 เงื่อนไขค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี..52

4.3.3 เงื่อนไขค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี...................................54

4.4 เสถียรภาพแบบบีไอบีโอของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ............................55

4.5 เงื่อนไขเสถียรภาพที่พิจารณาความไม่แน่นอน...57

4.5.1 ความไม่แน่นอนเชิงบวก...58

4.5.2 ความไม่แน่นอนเชิงคูณ..59

บทที่ 5 การจำลองการควบคุมและการทดลอง...61

5.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังต้มน้ำ...61

5.2 ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซี..63

5.2.1 การจำลองการควบคุม...63

5.2.2 การควบคุมจริง..73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 ผลการควบคุมของระบบควบคุมฟัซซีเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบดั้งเดิม……79

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ……………………………………………...87

6.1 สรุปผลการทดลอง……………………………………………………………..87

6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย……………………………………………………..…88

6.3 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ไขปัญหา………………………….88

6.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป…………………………………………..…………89

เอกสารอ้างอิง………………………………………………………………………….90

ภาคผนวก ก รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง…………………………………..92

ก.1 ถังน้ำ……………………………………………………………………………92

ก.2 ตัวรับรู้ RTD………………………………………………………………………93

ก.3 วงจรบริดจ์………………………………………………………………………93

ก.4 วงจรขยายผลต่าง………………………………………………………………...94

ก.5 วงจรกรองความถี่………………………………………………………………..96

ก.6 วงจรอินเวอร์ตติ้งแอมปลิไฟเออร์…………………………………………………96

ก.7 การ์ดแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอลและแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอก…………..……...97

ก.8 วงจรแอคทูเอเตอร์………………………………………………………..………98

ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์……………………………………..…………100

ภาคผนวก ค เงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมดั้งเดิม……………………………..………….113

ประวัติผู้เขียน………………………………………………………………………..………..116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ฟังก์ชันคุณลักษณะของคริซป์เซต.......7
2.2 คริซป์เซตของคำว่า "หนุ่ม".......8
2.3 ฟัซซีเซตของคำว่า "หนุ่ม".......9
2.4 ฟัซซีเซตของคำว่า "หนุ่ม" ที่แตกต่างกันสองฟัซซีเซต.......10
2.5 ตัวอย่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของซิงเกิลตันฟัซซีเซต.......10
2.6 กึ่งกลางของฟัซซีเซตของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจำนวน 4 ฟังก์ชัน.......12
2.7 ผลลัพธ์ของฟัซซีอินเฟอเรนซ์ทั้ง 4 วิธี เมื่อแทนผลลัพธ์ของกฎด้วยฟัซซีเซต.......15
2.8 ผลลัพธ์ของฟัซซีอินเฟอเรนซ์ทั้ง 4 วิธี เมื่อแทนผลลัพธ์ของกฎด้วยซิงเกิลตันฟัซซีเซต.......16
2.9 โครงสร้างของระบบควบคุมแมมดานิฟัซซี.......18
2.10 โครงสร้างของระบบควบคุมทีเอสฟัซซี.......22
3.1 ระบบควบคุมพีไอ+ดีดั้งเดิม.......24
3.2 ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี.......27
3.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ.......28
3.4 อินพุตสเปซของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ.......30
3.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี.......34
3.6 บริเวณที่แอคทีฟของแต่ละกฎการควบคุมแต่ละกฎ.......35
3.7 อินพุตสเปซของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี.......36
3.8 ระบบควบคุมพีดี+ไอดั้งเดิม.......40
3.9 ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ.......42
3.10 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี.......42
3.11 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอ.......43
3.12 อินพุตสเปซของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและทีเอสฟัซซีไอ.......44
4.1 ระบบควบคุมทั่ว ๆ ไป.......49
4.2 ระบบที่มีความไม่แน่นอนเชิงบวก.......58
4.3 ระบบที่มีความไม่แน่นอนเชิงคูณ.......59
5.1 กราฟการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังต้มน้ำ.......61
5.2 บล็อคไดอะแกรมการหา $\Delta P(z)$.......62
5.3 การจำลองการควบคุมด้วยตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี.......64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.4 การจำลองการควบคุมด้วยตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ....................................64

5.5 การเปลี่ยนแปลงค่าเกนของตัวควบคุม (ก). $K_p\left(e,r\right)$ (ข). $K_i\left(e,r\right)$ และ (ค). $K_d\left(y_d,\Delta y\right)$....................................66

5.6 ผลตอบสนองของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศา....................................67

5.7 สัญญาณควบคุมของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศา....................................68

5.8 ผลตอบสนองของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 50 องศา....................................69

5.9 สัญญาณควบคุมของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 50 องศา....................................69

5.10 ผลตอบสนองของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 70 องศา....................................70

5.11 สัญญาณควบคุมของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 70 องศา....................................71

5.12 ผลตอบสนองของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศา เมื่อมีการรบกวน....................................72

5.13 สัญญาณควบคุมของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศา เมื่อมีการรบกวน....................................72

5.14 ผลตอบสนองของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา....................................73

5.15 สัญญาณควบคุมของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา....................................74

5.16 ผลตอบสนองของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 50 องศา....................................75

5.17 สัญญาณควบคุมของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 50 องศา....................................75

5.18 ผลตอบสนองของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 70 องศา....................................76

5.19 สัญญาณควบคุมของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 70 องศา....................................77

5.20 ผลตอบสนองของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา เมื่อมีการรบกวน....................................78

5.21 สัญญาณควบคุมของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา เมื่อมีการรบกวน....................................78

5.22 ผลจำลองการควบคุมเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี และตัวควบคุมพีไอ+ดีที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$....................................80

5.23 ผลการควบคุมจริงเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี และตัวควบคุมพีไอ+ดีที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$....................................81

5.24 ผลจำลองการควบคุมเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี และตัวควบคุมพีไอ+ดีที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$....................................82

5.25 ผลการควบคุมจริงเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี และตัวควบคุมพีไอ+ดีที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$....................................82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.26 ผลจำลองการควบคุมเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟีซซีพีดี+ไอ และตัวควบคุมพีดี+ไอที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$ 83

5.27 ผลการควบคุมจริงเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟีซซีพีดี+ไอ และตัวควบคุมพีดี+ไอที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$ 84

5.28 ผลจำลองการควบคุมเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟีซซีพีดี+ไอ และตัวควบคุมพีดี+ไอที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$ 85

5.29 ผลการควบคุมจริงเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟีซซีพีดี+ไอ และตัวควบคุมพีดี+ไอที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$ 85

ก.1 ส่วนประกอบของถังต้มน้ำ..........92

ก.2 ตัวรับรู้ RTD PT 100 ที่ใช้ในการทดลอง..........93

ก.3 วงจรบริดจ์..........93

ก.4 วงจรขยายผลต่าง..........94

ก.5 วงจรจรกรองความถี่..........96

ก.6 วงจรอินเวอร์ตติ้งแอมปลิไฟเออร์..........97

ก.7 วงจรพัลซ์วิดท์มอดูเลชัน..........98

ก.8 วงจรเสมือนของโซลิดสเตทรีเลย์หมายเลข JPS - 2075..........99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 คำจำกัดความวิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์ที่นิยมใช้ในกฎแมมดานิฟัซซี..15
3.1 ค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของกฎการควบคุมที่ 1 ถึง 4 ในบริเวณ IC1 ถึง IC12 31
3.2 ค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ บริเวณ IC1 ถึง IC12 33
3.3 ค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของกฎการควบคุมที่ 5 ถึง 8 ในบริเวณ IC1 ถึง IC12 37
3.4 ค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี บริเวณ IC1 ถึง IC12 39
3.5 ค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี บริเวณ IC1 ถึง IC12 46
3.6 ค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอ บริเวณ IC1 ถึง IC12 47
4.1 ค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอในบริเวณ IC1ถึง IC12 52
4.2 ค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีในบริเวณ IC1ถึง IC12 54
4.3 ค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและทีเอสฟัซซีไอ...56
5.1 ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบ...64
5.2 ค่านอร์มของส่วนการควบคุมในแต่ละบริเวณ..64
5.3 ผลเปรียบเทียบการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศา...67
5.4 ผลเปรียบเทียบการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 50 องศา...70
5.5 ผลเปรียบเทียบการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 70 องศา...71
5.6 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา...74
5.7 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 50 องศา...76
5.8 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 70 องศา...76
5.9 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีกับ
ระบบควบคุมพีไอ+ดีที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$ 81
5.10 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีกับ
ระบบควบคุมพีไอ+ดีที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$ 83
5.11 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอกับ
ระบบควบคุมพีดี+ไอที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$ 84
5.12 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอกับ
ระบบควบคุมพีดี+ไอที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$ 86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่พบในตัวควบคุมดั้งเดิม

ในระบบเชิงเส้นที่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้นั้น ตัวควบคุมที่สามารถออกแบบระบบควบคุมให้มีผลตอบสนองเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็วและไม่มีค่าความผิดพลาด ได้แก่ ตัวควบคุมพีไอ(proportional-integral controller) ตัวควบคุมพีดี(proportional-derivative controller) และตัวควบคุมพีไอดี(proportional-integral-derivative controller) แต่ในกรณีที่กระบวนการเป็นระบบชนิดศูนย์(type 0 system)ที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีดี จะยังคงมีความผิดพลาดที่สถานะคงตัว(steady state error)อยู่ หรือถ้าระบบที่ถูกควบคุมนั้นเป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้น ระบบที่ไม่รู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบอันดับสูง(high order system) ระบบที่มีความไม่แน่นอน (uncertain system) เป็นต้น ตัวควบคุมแบบดั้งเดิมจะให้ผลตอบสนองไม่เป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้

- การควบคุมระบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยตัวควบคุมแบบดั้งเดิมนั้นจะใช้ได้เมื่อสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการหาแบบจำลองของระบบไม่เชิงเส้นนั้นมีความยุ่งยาก อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่ซับซ้อนของระบบไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยเหตุนี้จึงเป็นข้อจำกัดของการควบคุมไม่เชิงเส้นแบบดั้งเดิม(conventional nonlinear control)

- ถ้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมีความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองของระบบจริงมาก ก็จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิดที่ใช้ตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ไม่เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ และจะทำให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพหากความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองมีมากเกินไป

- หากไม่สามารถรู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่จะควบคุม ก็สามารถออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิมให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองที่ดีได้ โดยการปรับเกน(gain)ของตัวควบคุมดั้งเดิมแบบลองผิดลองถูก(trial-and-error) ซึ่งมีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลาไปมาก กว่าจะได้เกนของตัวควบคุมที่ให้ผลการควบคุมตามต้องการ

- สำหรับระบบที่มีความไม่แน่นอนนั้น สามารถควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบดั้งเดิมโดยไม่พิจารณาความไม่แน่นอน เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถให้ผลตอบสนองที่ดีในระดับหนึ่ง แต่ถ้าหากนำความไม่แน่นอนมาพิจารณาด้วย จะทำให้ระบบมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่จะทำให้การออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิมมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นหรือในบางครั้งไม่สามารถออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การควบคุมระบบอันดับสูงด้วยตัวควบคุมดั้งเดิมนั้น สามารถทำได้โดยประมาณระบบอันดับสูงให้เป็นระบบอันดับต่ำ แล้วจึงออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบอันดับต่ำนั้น แต่ผลการควบคุมที่ได้อาจไม่น่าพอใจ

1.2 แนะนำตัวควบคุมฟัซซีและงานวิจัยที่ผ่านมา

ตามปกติความรู้และประสบการณ์ในเรื่องการควบคุมกระบวนการที่มีความซับซ้อนมักจะอยู่ในรูปของภาษามนุษย์ ซึ่งง่ายต่อการทำความเข้าใจและปฏิบัติตาม แต่ยากสำหรับการนำไปออกแบบและสร้างเป็นตัวควบคุมด้วยวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการในการ ควบคุมของผู้ปฏิบัติการจะเป็นกฎซึ่งอยู่ในรูปเงื่อนไข ถ้า .... แล้ว .... โดยตัวแปรที่ใช้ในกฎการควบคุมจะถูกนิยามในเชิงคุณภาพ และค่าของตัวแปรนี้มีความคลุมเครือ(vagueness) จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1965 Professor Lotfy Zadeh จึงนำเสนอฟัซซีเซต(fuzzy set)[1] และฟัซซีลอจิก(fuzzy logic) เพื่อใช้หาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล(approximate reasoning) เมื่อตัวแปรของระบบถูกนิยามในเชิงคุณภาพและมีความคลุมเครือ[2]

ต่อมาในปี ค.ศ. 1974 อี เอ็ช แมมดานิ(E.H. Mamdani) ได้นำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี(fuzzy controller)[3,4] โดยแปลงความรู้ที่ได้จากประสบการณ์การการควบคุมของผู้ปฏิบัติการให้อยู่ในรูปเงื่อนไข ถ้า .... แล้ว .... ให้เป็นกฎการควบคุมที่มีตัวแปรเป็นฟัซซีเซต ซึ่งตัวควบคุมฟัซซีจะเป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงระหว่างสัญญาณที่ใช้งานจริง เช่น สัญญาณในการตรวจวัดจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์และสัญญาณในการควบคุมอุปกรณ์ ซึ่งถูกวัดเป็นตัวแปรเชิงปริมาณกับกฎการควบคุมซึ่งถูกนิยามด้วยตัวแปรฟัซซี ดังนั้น การทำงานของตัวควบคุมฟัซซีจะประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 3 ส่วนคือ

1. การแปลงสัญญาณจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ซึ่งอยู่ในรูปของตัวแปรเชิงปริมาณให้เป็นตัวแปรฟัซซี เรียกขั้นตอนนี้ว่า การฟัซซิฟิเคชัน(fuzzification)
2. การประมวลผลเพื่อหาสัญญาณควบคุมจากกฎการควบคุม โดยใช้วิธีการหาข้อสรุปจากหลักการและเหตุผล ตามอัลกอริทึมแบบฟัซซี เรียกว่า การฟัซซีอินเฟอเรนซ์(fuzzy inference)
3. การหาขนาดของสัญญาณควบคุม โดยการแปลงตัวแปรฟัซซีที่อยู่ในรูปของฟัซซีเซตให้เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ เรียกว่า การดีฟัซซิฟิเคชัน(defuzzifacation)

ตัวควบคุมฟัซซีที่ออกแบบด้วยวิธีการของแมมดานินั้น เรียกกันในภายหลังว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดแมมดานิ(ถ้ากล่าวถึงคำว่า "ตัวควบคุมฟัซซี" ก็จะเป็นที่ทราบกันว่าหมายถึงตัวควบคุมฟัซซีชนิดแมมดานิ) โดยงานวิจัยของระบบควบคุมฟัซซีในช่วงแรก ๆ นั้น จะไม่มีการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรภาพ เนื่องจากผลลัพธ์ของกฎการควบคุมอยู่ในรูปของตัวแปรเชิงภาษาหรือฟัซซีเซต จึงทำให้ไม่สามารถหาเงื่อนไขเสถียรภาพที่อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ได้ ต่อมาจึงได้มีงานวิจัยที่มีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยตัวควบคุมฟัซซีชนิดแมมดานิ ได้แก่ฟัซซีพีไอ[5] ฟัซซีพีดี[6] ฟัซซีพีไอ+ดี[7] ฟัซซีพีดี+ไอ[8] และฟัซซีพีไอดี[9] ซึ่งแก้ปัญหาผลลัพธ์ของกฎการควบคุมที่อยู่ในรูปของตัวแปรเชิงภาษา โดยแทนตัวแปรเชิงภาษาเหล่านี้ด้วยค่าคงที่ จึงจะสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้

ในปี ค.ศ. 1985 ทากางิและซูเกโน(Takagi-Sugeno) ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี โดยแปลงผลลัพธ์ของกฎการควบคุมในรูป ถ้า …. แล้ว …. ที่ได้จากประสบการณ์การควบคุมของผู้ปฏิบัติการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น(linear equation) เรียกตัวควบคุมฟัซซีชนิดนี้ว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดทากางิ-ซูเกโน โดยงานวิจัยของตัวควบคุมฟัซซีชนิดทากางิ-ซูเกโน ได้แก่ทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ[10] และทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี[11]

1.3 ประโยชน์ของการใช้ตัวควบคุมฟัซซี

ตัวควบคุมฟัซซีได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีที่เป็นจุดเด่นหลายประการ ดังนี้

- สามารถออกแบบตัวควบคุมได้ โดยไม่ต้องรู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุม ใช้วิธีแปลงความรู้หรือประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญให้เป็นกฎการควบคุมในรูปของเงื่อนไข

- สามารถควบคุมกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ เนื่องจากตัวควบคุมฟัซซีมีคุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ในตัว โดยสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของกฎการควบคุมให้เป็นแบบไม่เชิงเส้น

- สามารถควบคุมกระบวนการที่มีความไม่แน่นอนได้ เนื่องจากตัวควบคุมฟัซซีมีความคงทน(robust)ต่อการเปลี่ยนแปลง เพราะฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนั้นจะกำหนดเป็นช่วงบริเวณ เช่น กำหนดให้เป็นฟังก์ชันของสามเหลี่ยม ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู เป็นต้น

1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ในวิทยานิพนธ์นี้ จะนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี(เรียกสั้น ๆ ว่าทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี) และระบบควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ(ทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ) ในการหาเงื่อนไขเสถียรภาพแบบบีไอบีโอ(bounded-input bounded-output stability) โดยใช้ทฤษฎีบทเกนน้อย(small gain theorem) เพื่อประกันความมีเสถียรภาพในการจำลองการควบคุมและการควบคุมจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เงื่อนไขเสถียรภาพที่ได้จะพิจารณาความไม่แน่นอนของการหาแบบจำลองของกระบวนการที่ถูกควบคุม ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ความไม่แน่นอนของการหาแบบจำลองนั้น จะพิจารณาในรูปของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการหาแบบจำลอง ที่สามารถอธิบายในรูปของความไม่แน่นอนเชิงบวก(additive uncertainty)

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงปัญหาต่าง ๆ ที่พบของตัวควบคุมดั้งเดิมเมื่อควบคุมกระบวนการที่มีความซับซ้อน แนะนำการใช้ตัวควบคุมฟัซซีเพื่อแก้ปัญหาของตัวควบคุมดั้งเดิม งานวิจัยที่ผ่านมาของตัวควบคุมฟัซซี วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์สำหรับการควบคุมฟัซซี กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เป็นพื้นฐาน ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของเซตดั้งเดิม(classical sets) และข้อจำกัดของเซตดั้งเดิม
- ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของฟัซซี เช่น ทฤษฎีฟัซซีเซต การปฏิบัติการฟัซซีลอจิก(fuzzy logic operations) การฟัซซิฟิเคชัน กฎฟัซซี(fuzzy rules) ฟัซซีอินเฟอเรนซ์ และการดิฟัซซิฟิเคชัน
- หลักการและโครงสร้างของตัวควบคุมแมมดานิฟัซซี(Mamdani fuzzy controller)
- หลักการและโครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซี(TS fuzzy controller)

บทที่ 3 การออกแบบตัวควบคุม กล่าวถึงโครงสร้างของตัวควบคุม 2 ชนิด คือตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี(TS fuzzy PI+D controller)และตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ(TS fuzzy PD+I controller) การออกแบบตัวควบคุมทั้งสอง เช่นการกำหนดจำนวนฟัซซีเซตและฟังก์ชันการเป็นสมาชิก(membership function)ของตัวแปรอินพุต การกำหนดรูปแบบของกฎฟัซซี การเลือกวิธีฟัซซิฟิเคชัน การเลือกวิธีอินเฟอเรนซ์ และการเลือกวิธีดิฟัซซิฟิเคชัน พร้อมทั้งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวควบคุมฟัซซีและตัวควบคุมแบบดั้งเดิม

บทที่ 4 การวิเคราะห์เสถียรภาพ กล่าวถึงการพิสูจน์หาเงื่อนไขเสถียรภาพแบบบีไอบีโอของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและทีเอสฟัซซีพีดี+ไอโดยใช้ทฤษฎีบทเกนน้อย ที่มีการพิจารณาความไม่แน่นอนที่เกิดจากการหาแบบจำลองของกระบวนการที่ถูกควบคุม จะได้เงื่อนไขที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอเพียง(sufficient condition)เพื่อประกันการมีเสถียรภาพ ตลอดจนวิเคราะห์ความเชื่อมโยงกับผลงานวิจัยและทฤษฎีที่มีมาก่อน

บทที่ 5 การจำลองการควบคุมและการทดลอง กล่าวถึงการแสดงผลการจำลองการควบคุมและผลการควบคุมจริง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่นำเสนอ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. เปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีกับระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ
2. เปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างระบบควบคุมฟัซซีที่นำเสนอกับระบบควบคุมแบบดั้งเดิม

โดยจำลองระบบควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์(simulation) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของตัวควบคุม ก่อนนำตัวควบคุมไปควบคุมกระบวนการจริง

บทที่ 6 บทสรุปและแนวทางในการพัฒนา กล่าวถึงการสรุปผลการทดลอง ปัญหาที่พบในการวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการพัฒนาต่อไป

ภาคผนวก ก. กล่าวถึง รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจร ประกอบด้วย

- อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ตัวถังต้มน้ำและเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ
- อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ วงจรบริดจ์(bridge) วงจรขยายผลต่าง(differential amplifier) วงจรกรองความถี่(filter) วงจรอินเวอร์ติงแอมปลิไฟเออร์(inverting amplifier) และวงจรแอคทูเอเตอร์(actuator)

ภาคผนวก ข. กล่าวถึง ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์สำหรับการควบคุมฟัซซี

ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี จะต้องอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซี เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจโครงสร้างและหลักการทำงานของตัวควบคุมฟัซซี และเพื่อใช้ในการกำหนดโครงสร้างและวิธีการออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของเซตดั้งเดิมและข้อจำกัดของเซตดั้งเดิม อันนำไปสู่ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของฟัซซี การปฏิบัติการฟัซซีลอจิก ฟัซซิฟิเคชัน กฎฟัซซี ฟัซซีอินเฟอเรนซ์ ดีฟัซซิฟิเคชัน และเนื้อหาส่วนสุดท้ายกล่าวถึงองค์ประกอบของตัวควบคุมฟัซซี

2.1 เซตดั้งเดิมและฟัซซีเซต

2.1.1 ทฤษฎีเซตดั้งเดิม

นิยาม 1 เอกภพสัมพัทธ์

เอกภพสัมพัทธ์(universe of discourse: U) คือ เซตที่มีสมาชิกเป็นสมาชิกทั้งหมดของขอบเขตที่ทำการพิจารณา

กำหนดให้ u เป็นสมาชิกใดๆของ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $u \in U$

นิยาม 2 คริซป์เซต

คริซป์เซต(crisp set) คือ กลุ่มของสมาชิกที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ซึ่งอาจมีจำนวนจำกัดหรือไม่จำกัดก็ได้

นิยาม 3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก(μ) ของเซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ ถูกนิยามดังนี้

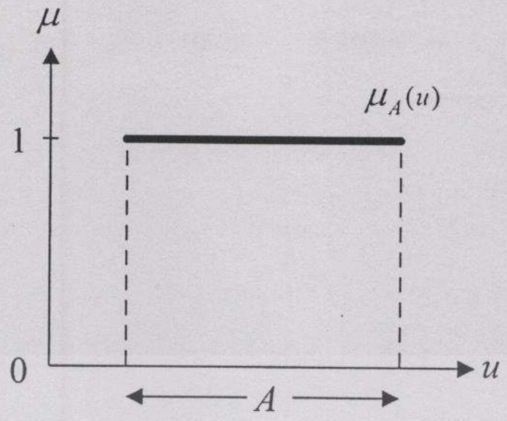
$\mu_A(u)$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ u เป็นสมาชิกของเซต A

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

จะได้ว่า $\mu_A(u) : U \in \{ 0,1 \}$

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 ; & u \in A \\ 0 ; & u \notin A \end{cases} \tag{2.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงฟังก์ชันคุณลักษณะของคริซป์เซต

นิยาม 4 การเท่ากันของเซต

เซต A จะเท่ากับเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสมาชิกของเซต B และสมาชิกทุกตัวของเซต B เป็นสมาชิกของเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A = B$

$$(A = B) \leftrightarrow \left((\forall_a \in B) \wedge (\forall_b \in A) \; ; a \in A \, , \, b \in B\right) \tag{2.2}$$

นิยาม 5 การเป็นสับเซต

เซต A จะเป็นสับเซต(subset) ของเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสมาชิกของเซต B เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \subseteq B$

$$(A \subseteq B) \leftrightarrow (\forall_a \in B \; ; a \in A) \tag{2.3}$$

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

$$(A \subset B) \leftrightarrow \left((\forall_a \in B) \wedge (A \neq B) \; ; a \in A\right) \tag{2.4}$$

นิยาม 6 การปฏิบัติการพื้นฐานของเซต

คอมพลีเมนต์(complement) คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม โดยที่สมาชิกของเซตใหม่คือสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ U ที่ไม่เป็นสมาชิกของเซตเดิม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A' = \{x \mid (x \in U) \wedge (x \notin A)\} \tag{2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยูเนียน(union) คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกของเซตใหม่ได้จากการรวมสมาชิกทั้งหมดที่เป็นสมาชิกของเซตใดเซตหนึ่ง หรือทั้ง 2 เซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

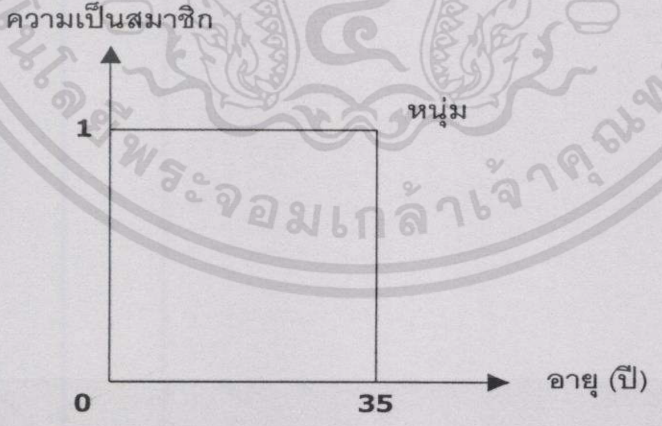
$$A \cup B = \left\{ x \mid (x \in A) \vee (x \in B) \right\} \tag{2.6}$$

อินเตอร์เซคชัน(intersection) คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกของเซตใหม่ได้จากการรวมสมาชิกทั้งหมดที่เป็นสมาชิกของเซตเดิมทั้ง 2 เซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A \cap B = \left\{ x \mid (x \in A) \wedge (x \in B) \right\} \tag{2.7}$$

2.1.2 ข้อจำกัดของเซตดั้งเดิม

ในทฤษฎีเซตดั้งเดิม ค่าความเป็นสมาชิกเซตของเซตนั้นมีค่าไม่เป็นหนึ่ง(1) ก็เป็นศูนย์(0) หมายถึงวัตถุเป็นสมาชิกของเซตอย่างสมบูรณ์หรือไม่มีความเป็นสมาชิกของเซตเลย จะไม่มีการเป็นสมาชิกเซตเพียงบางส่วน โดยเรียกเซตดั้งเดิมเหล่านี้ว่าคริซป์เซต ใช้ได้ดีกับสมาชิกที่ไม่มีความคลุมเครือ หรือมีความคลุมเครือเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงแล้วความคลุมเครือจะเกี่ยวข้องในชีวิตประจำวันของเรามากมาย โดยเฉพาะในการสื่อสารของมนุษย์ เช่นคำว่า "หนุ่ม" เป็นตัวอย่างหนึ่งของความคลุมเครือของอายุ ซึ่งบางครั้งจะสร้างความสับสนว่าอายุเท่าไรจึงจะเรียกว่าหนุ่มและอายุเท่าไรจึงจะเรียกว่าไม่หนุ่ม



รูปที่ 2.2 แสดงคริซป์เซตของคำว่า "หนุ่ม"

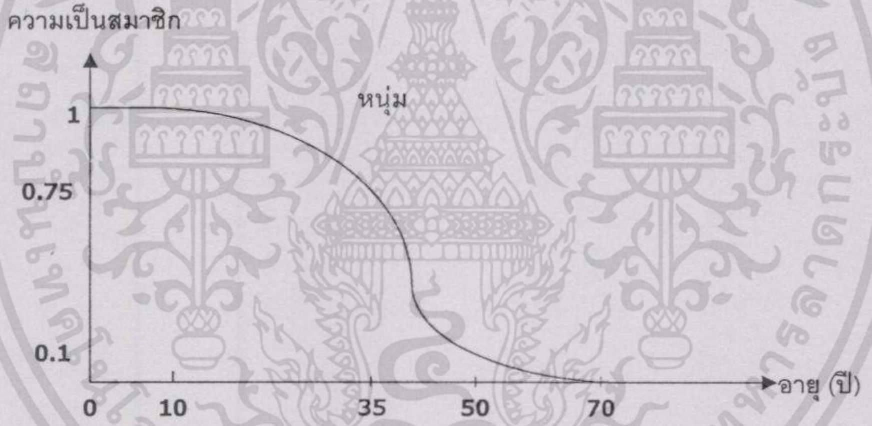
โดยแทนคำว่า "หนุ่ม" ให้เป็นสมาชิกในคริซป์เซต แสดงดังรูปที่ 2.2 พบว่าไม่สมเหตุสมผล เพราะการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของค่าความเป็นสมาชิกจาก 1 ไป 0 ที่อายุ 35 ปี ทำให้เกิดคำถามขึ้นมาว่า ทำไมอายุ 34.9 ปีมีความหนุ่มอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่อายุ 35.1 ปี ไม่มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนุ่มอยู่เลย จึงเป็นข้อจำกัดของการใช้เซตดั้งเดิมกับสมาชิกที่มีความคลุมเครือ ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่ทฤษฎีฟัซซีเซต

2.1.3 ฟัซซีเซต

ทฤษฎีฟัซซีเซต ถูกนำเสนอครั้งแรกโดยศาสตราจารย์ L. A. Zadeh จากมหาวิทยาลัยคาลิฟอร์เนีย ในปี 1965 เพื่อแก้ปัญหาสมาชิกของเซตที่มีความคลุมเครือ เนื่องจากฟัซซีเซตมีค่าความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดย 0 หมายถึงไม่เป็นสมาชิกและ 1 หมายถึงเป็นสมาชิกอย่างสมบูรณ์ ตัวอย่างคำว่า "หนุ่ม" เป็นสมาชิกของฟัซซีเซตแสดงดังรูปที่ 2.3 พบว่าอายุ 35 ปี มีค่าความเป็นสมาชิกของความหนุ่มเท่ากับ 0.75 และอายุ 50 ปี มีค่าความเป็นสมาชิกของความหนุ่มเท่ากับ 0.1 นั่นคือ ทุกค่าอายุจะมีค่าความเป็นสมาชิกของความหนุ่มที่แตกต่างกัน โดยเส้นโค้งในรูปเรียกว่า ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต "หนุ่ม" ช่วงอายุที่เป็นไปได้ตั้งแต่ 0 ถึง 130 ปี เรียกว่า เอกภพสัมพัทธ์



รูปที่ 2.3 แสดงฟัซซีเซตของคำว่า "หนุ่ม"

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้พยัญชนะตัวใหญ่ที่มีเครื่องหมายทิวเดิล (เช่น $\tilde{A}$) แทนฟัซซีเซต สมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์เขียนแทนด้วย $x \in X$ เมื่อ x คือสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ และ X คือเอกภพสัมพัทธ์ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ $\tilde{A}$ เขียนแทนด้วย $\mu_{\tilde{A}}(x)$

คำจำกัดความของฟัซซีเซตมีดังนี้

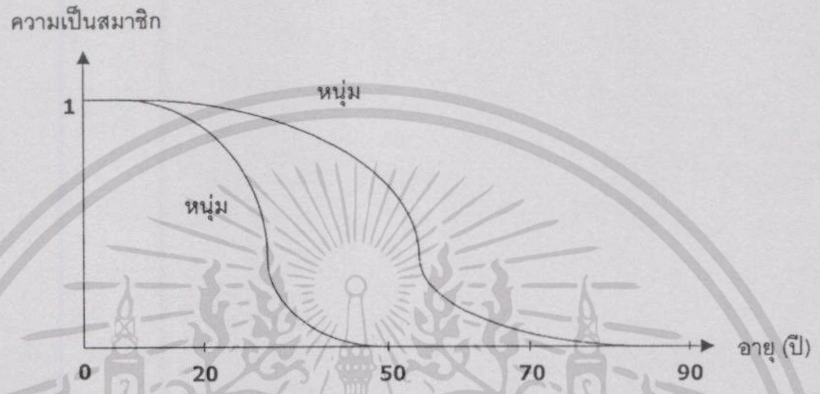
ฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต คือ เซตคู่ลำดับของสมาชิกเอกภพสัมพัทธ์ที่สนใจและค่าความเป็นสมาชิก แสดงดังสมการ

$$\tilde{A} = \left\{ \left(x, \mu_{\tilde{A}}(x) \right) \mid x \in X \right\} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมมองของแต่ละคนอาจมองความหมายของสมาชิกที่คลุมเครือแตกต่างกัน จึงสามารถใช้ฟัซซีเซตในการกำหนดความหมายที่แตกต่างกันได้ เช่นคำว่า "หนุ่ม" บางคนอาจมองว่าอายุ 50 ปี มีค่าความเป็นสมาชิกของ "หนุ่ม" ถึง 0.6 ในขณะที่บางคนอาจมองว่าอายุ 20 ปี มีค่าความเป็นสมาชิกของ "หนุ่ม" เพียง 0.7 เท่านั้น ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่แตกต่างกัน ให้คำจำกัดความของฟัซซีเซต "หนุ่ม" ที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.4



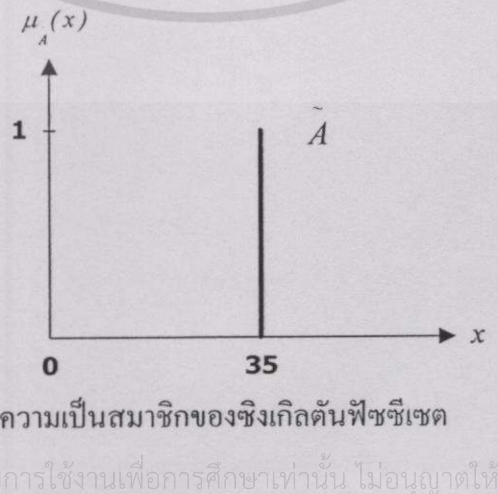
รูปที่ 2.4 แสดงฟัซซีเซตของคำว่า "หนุ่ม" ที่แตกต่างกันสองฟัซซีเซต

ฟัซซีเซตต่อเนื่อง

ฟัซซีเซตถูกเรียกว่าฟัซซีเซตต่อเนื่อง(continuous fuzzy sets) ก็ต่อเมื่อฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความต่อเนื่อง

ซิงเกิลตันฟัซซีเซต

ฟัซซีเซตที่มีค่าความเป็นสมาชิกไม่เป็นศูนย์สำหรับสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์เพียงหนึ่งสมาชิก เรียกว่าซิงเกิลตันฟัซซีเซต(singleton fuzzy sets) จากรูปที่ 2.5 แสดงซิงเกิลตันฟัซซีเซต โดยมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับศูนย์ทุกตำแหน่ง ยกเว้นที่ $x = 35$ มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับหนึ่ง



รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของซิงเกิลตันฟัซซีเซต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับพอร์ตของฟัซซีเซต

สำหรับฟัซซีเซตซึ่งมีเอกภพสัมพัทธ์คือ X สมาชิกทั้งหมดในเอกภพสัมพัทธ์ X ที่มีค่าความเป็นสมาชิกไม่เป็นศูนย์ คือซับพอร์ตของฟัซซีเซต(support of a fuzzy set) ตัวอย่างซับพอร์ตของฟัซซีเซต "หนุ่ม" แสดงในรูปที่ 2.3 คือ $[0,70]$

ความสูงของฟัซซีเซต

ค่าความเป็นสมาชิกที่มีค่ามากที่สุดของฟัซซีเซต เรียกว่า ความสูงของฟัซซีเซต(height of a fuzzy set)

นอร์มอลฟัซซีเซตและสับนอร์มอลฟัซซีเซต

ฟัซซีเซตจะถูกเรียกว่านอร์มอล(normal fuzzy set) ก็ต่อเมื่อมีความสูงเท่ากับหนึ่ง และฟัซซีเซตจะถูกเรียกว่าสับนอร์มอล(subnormal fuzzy set) ก็ต่อเมื่อมีความสูงไม่เท่ากับหนึ่ง

คอนเวกซ์ฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต $\tilde{A}$ เป็นเอกภพสัมพัทธ์ที่มีสมาชิกคือ $[a, b]$ นั้นจะคอนเวกซ์(convex fuzzy sets) ก็ต่อเมื่อ

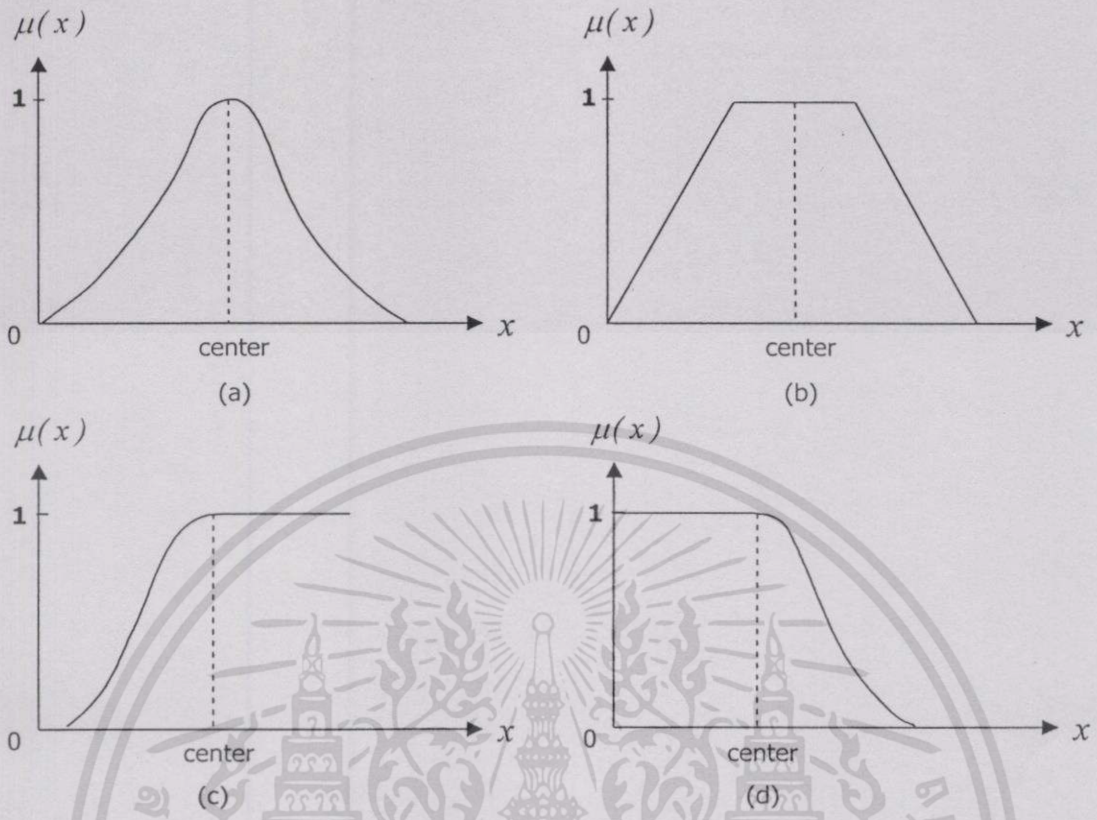
$$\mu_{\tilde{A}}\left(\lambda x_1+(1-\lambda)x_2\right) \geq \min\left(\mu_{\tilde{A}}(x_1),\mu_{\tilde{A}}(x_2)\right) \tag{2.9}$$
$$\forall x_1, x_2 \in [a, b] \text{ และ } \forall \lambda \in [0, 1]$$

เมื่อ $\min(\ )$ คือตัวปฏิบัติการที่ให้ค่าความเป็นสมาชิกที่น้อยกว่า ระหว่าง 2 ค่าความเป็นสมาชิก

กึ่งกลางของฟัซซีเซต

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่มีลักษณะต่างกัน ก็จะมีคำจำกัดความกึ่งกลางของฟัซซีเซต (center of a fuzzy set) แตกต่างกันด้วย ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่นิยมใช้กัน มี 4 ฟังก์ชันดังแสดงในรูปที่ 2.6 นั่นคือ ถ้าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตมีค่ามากที่สุดที่สมาชิกเพียงค่าเดียวของเอกภพสัมพัทธ์ สมาชิกนั้นจะเรียกว่ากึ่งกลางของฟัซซีเซต แสดงดังรูปที่ 2.6(a) ถ้าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตมีค่ามากที่สุดที่สมาชิกมากกว่าหนึ่งสมาชิก ที่สามารถรู้ขอบเขตของเอกภพสัมพัทธ์ จุดกลางของสมาชิกเหล่านี้คือกึ่งกลางฟัซซีเซต แสดงดังรูปที่ 2.6(b) ถ้าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตมีค่ามากที่สุดมากกว่าหนึ่งสมาชิกและค่าของเอกภพสัมพัทธ์ไม่สามารถรู้ขอบเขต กึ่งกลางฟัซซีเซตแสดงได้ดังรูปที่ 2.6(c) และ 2.6(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงกึ่งกลางของฟัซซีเซตของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจำนวน 4 ฟังก์ชัน

2.2 การปฏิบัติการฟัซซีลอจิก

ในทฤษฎีเซตดั้งเดิม มีตัวปฏิบัติการ ไบนารีลอจิก(binary logic operator) อันได้แก่ อินเตอร์เซคชัน(AND) ยูเนี่ยน(OR) และคอมพลีเมนต์(NOT) เป็นต้น ตัวปฏิบัติการเหล่านี้ยังใช้ในทฤษฎีฟัซซีเซต และเรียกตัวปฏิบัติการเหล่านี้ใหม่ว่าตัวปฏิบัติการฟัซซีลอจิก(fuzzy logic operator) โดยเฉพาะอินเตอร์เซคชันและยูเนี่ยนที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่

Zadeh fuzzy logic AND operator: $$\mu_{A\cap B}(x) = \min\left(\mu_A(x),\ \mu_B(x)\right)$$

Product fuzzy logic AND operator: $$\mu_{A\cap B}(x) = \mu_A(x)\times\mu_B(x)$$

Zadeh fuzzy logic OR operator: $$\mu_{A\cup B}(x) = \max\left(\mu_A(x),\ \mu_B(x)\right)$$

Lukasiewicz fuzzy logic OR operator: $$\mu_{A\cup B}(x) = \min\left(\mu_A(x)+\mu_B(x),\ 1\right)$$

(2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ฟัซซิฟิเคชัน

การฟัซซิฟิเคชัน คือ กระบวนการหาค่าฟัซซีเซตบนเอกภพสัมพัทธ์ของอินพุต เพื่อเป็นตัวแทนของอินพุตซึ่งมีค่าเป็นตัวเลข สำหรับใช้เป็นอินพุตของระบบฟัซซี สามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้

1. การฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้ฟัซซีซิงเกิลตัน จะได้ว่า fuzzification(u_0) = A
โดยที่ A คือฟัซซีซิงเกิลตันซึ่งมี $S(A) = \{u_0\}$

หรือ $$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 \ ; & u = u_0 \\ 0 \ ; & u \neq u_0 \end{cases}$$

2. การฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้ฟัซซีนัมเบอร์ จะได้ว่า fuzzification(u_0) = A
โดยที่ A คือฟัซซีนัมเบอร์

$\mu_A(u) = 1$ เมื่อ $u = u_0$
และ $\mu_A(u)$ ลดลง เมื่อ u อยู่ห่างออกไปจาก u_0

ตัวอย่างของการฟัซซิฟิเคชัน โดยใช้ฟัซซีนัมเบอร์ เช่น

$$\mu_A(u) = \exp\left[-\frac{(u-u_0)^T (u-u_0)}{\sigma^2}\right]$$

โดยที่ σ เป็นพารามิเตอร์ในการกำหนดรูปร่างของ $\mu_A(u)$

3. การฟัซซิฟิเคชันโดยใช้ไฮบริดนัมเบอร์(hybrid number) จะได้ว่า fuzzification (u_0) = A โดยที่ A เป็น ไฮบริดนัมเบอร์ (ไฮบริดนัมเบอร์ คือ ฟัซซีนัมเบอร์ที่สมาชิกในเอกภพสัมพัทธ์เป็น random number)

$\mu_A(u) = 1$ เมื่อ $u = u_0$
และ $\mu_A(u)$ ลดลง เมื่อ u อยู่ห่างออกไปจาก u_0

2.4 กฎฟัซซี

กฎฟัซซีหรือกฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซี ทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างตัวแปรอินพุต (input variable) และตัวแปรเอาท์พุต(output variable) ของตัวควบคุมฟัซซี กฎฟัซซีจะอยู่ในรูปของเงื่อนไข IF ... THEN ... ซึ่งเกี่ยวข้องกับฟัซซีเซต ฟัซซีลอจิก และฟัซซีอินเฟอเรนซ์ โดยแปลงความรู้ที่ได้จากประสบการณ์และความชำนาญให้อยู่ในรูปของกฎการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎฟัซซีแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือกฎแมมดานิฟัซซี(Mamdani fuzzy rule) และกฎทากาจิ-ซูเกโนฟัซซี(Takagi-Sugeno fuzzy rule)

2.4.1 กฎแมมดานิฟัซซี

กฎแมมดานิฟัซซี คือกฎการควบคุมที่มีผลลัพธ์เป็นตัวแปรเชิงภาษาอยู่ในรูปของฟัซซีเซต กฎแมมดานิฟัซซีสำหรับตัวควบคุมฟัซซีที่อยู่ในรูปทั่ว ๆ ไปสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}&\text{IF } v_1 \text{ is } \tilde{S}_1 \text{ AND } v_2 \text{ is } \tilde{S}_2 \text{ AND ... AND } v_M \text{ is } \tilde{S}_M\\&\text{THEN } z_1 \text{ is } \tilde{W}_1,\ z_2 \text{ is } \tilde{W}_2, ..., z_P \text{ is } \tilde{W}_P,\end{aligned} \qquad (2.11)$$

เมื่อ $v_1, v_2, ..., v_M$ คือตัวแปรอินพุต และ $z_1, z_2, ..., z_P$ คือตัวแปรเอาท์พุต

ในทางทฤษฎี ตัวแปรเหล่านี้เป็นได้ทั้งต่อเนื่อง(continuous) หรือดีสครีต(discrete) แต่ในทางปฏิบัติแล้วเป็นดีสครีต เพราะตัวควบคุมฟัซซีถูกสร้างด้วยดิจิตอลคอมพิวเตอร์ $\tilde{S}_1, \tilde{S}_2, ..., \tilde{S}_M$ และ $\tilde{W}_1, \tilde{W}_2, ..., \tilde{W}_P$ คือฟัซซีเซต และ AND คือปฏิบัติการฟัซซีลอจิกแอนด์

2.4.2 กฎทีเอสฟัซซี

กฎทากาจิ-ซูเกโนฟัซซี เรียกสั้นๆว่ากฎทีเอสฟัซซี(TS fuzzy rules) มีผลลัพธ์ของกฎการควบคุมเป็นฟังก์ชันของตัวแปรอินพุต กฎทีเอสฟัซซีที่อยู่ในรูปทั่ว ๆ ไป อธิบายได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}&\text{IF } v_1 \text{ is } \tilde{S}_1 \text{ AND } v_2 \text{ is } \tilde{S}_2 \text{ AND ... AND } v_M \text{ is } \tilde{S}_M\\&\text{THEN } z_1 = f_1(v_1, v_2, ..., v_M),\ z_2 = f_2(v_1, v_2, ..., v_M), ...,\ z_P = f_P(v_1, v_2, ..., v_M)\end{aligned} \qquad (2.12)$$

เมื่อ $f_1(), f_2(), ..., f_P()$ เป็นฟังก์ชันใด ๆ ซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น หรือฟังก์ชันไม่เชิงเส้นก็ได้ หากเลือกใช้ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นแล้ว จะทำให้การวิเคราะห์ระบบควบคุมฟัซซีมีความยุ่งยาก ด้วยเหตุนี้ ในทางปฏิบัติจึงนิยมเลือกใช้ฟังก์ชันเชิงเส้น

2.5 ฟัซซีอินเฟอเรนซ์

ฟัซซีอินเฟอเรนซ์ หรือบางครั้งเรียกว่า การหามูลเหตุฟัซซี(fuzzy reasoning) หรือหลักการเหตุผล ใช้ในกฎฟัซซีเพื่อตรวจหาผลลัพธ์ของกฎการควบคุมจากข้อมูลอินพุต กฎแมมดานิฟัซซีและกฎทีเอสฟัซซีใช้วิธีการฟัซซีอินเฟอเรนซ์แตกต่างกัน

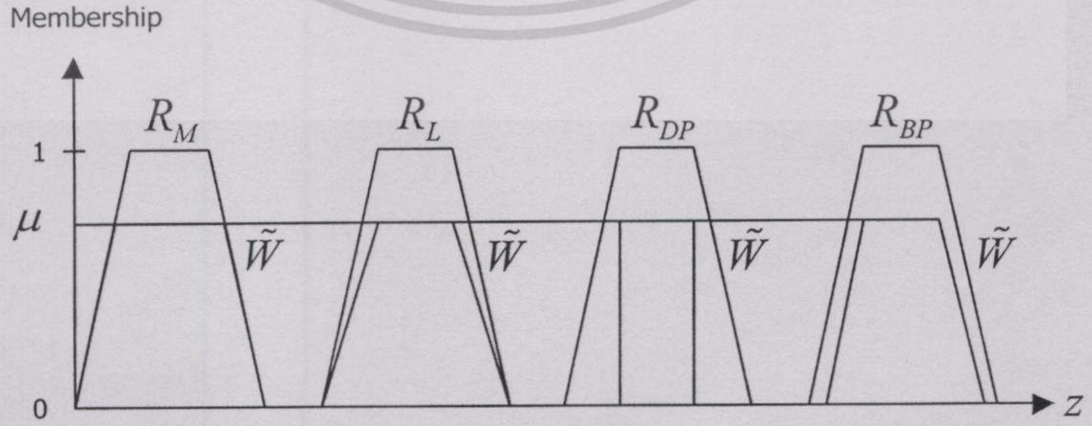
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกฎแมมดานิฟัซซีทั่ว ๆ ไปดังแสดงในสมการที่ (2.11) นิยมใช้วิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์ 4 วิธีแสดงดังตารางที่ 2.1 อันได้แก่ มินิมัมอินเฟอเรนซ์แบบแมมดานิ(Mamdani minimum inference) อินเฟอเรนซ์การคูณแบบลาร์เซน(Larsen product inference) อินเฟอเรนซ์การคูณแบบดราสติก(Drastic product inference) และอินเฟอเรนซ์การคูณที่มีขอบเขต(Bounded product inference) ซึ่งแทนด้วย R_M , R_L , R_{DP} และ R_{BP} ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 คำจำกัดความวิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์ที่นิยมใช้ในกฎแมมดานิฟัซซี

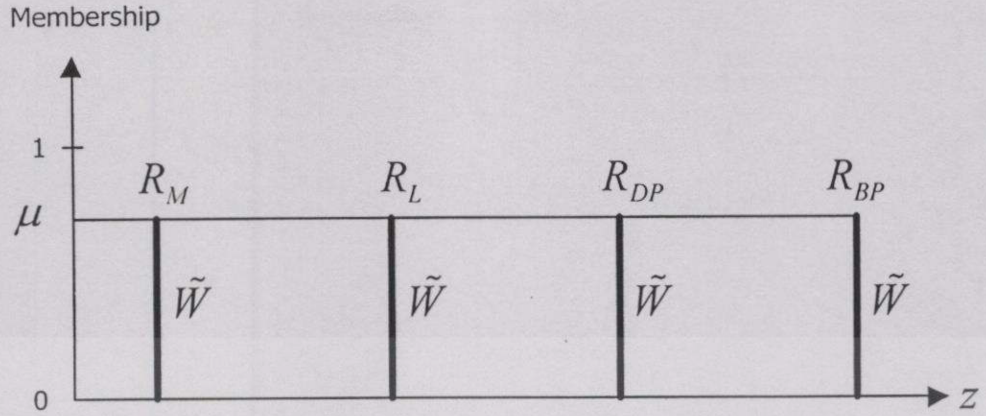
วิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์	คำจำกัดความ
Mamdani minimum inference, R_M	$\min\left(\mu,\ \mu_{\tilde{W}}(z)\right)$, for all z
Larsen product inference, R_L	$\mu \times \mu_{\tilde{W}}(z)$, for all z
Drastic product inference, R_{DP}	$\begin{cases} \mu, & \text{for } \mu_{\tilde{W}}(z)=1 \\ \mu_{\tilde{W}}(z), & \text{for } \mu=1 \\ 0, & \text{for } \mu<1 \text{ and } \mu_{\tilde{W}}(z)<1 \end{cases}$
Bounded product inference, R_{BP}	$\max\left(\mu+\mu_{\tilde{W}}(z)-1,\ 0\right)$

จากคำจำกัดความในตารางที่ 2.1 สามารถแสดงรูปอธิบายคำจำกัดความของวิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์ทั้ง 4 วิธี เมื่อแทนผลลัพธ์ของกฎฟัซซีแมมดานิด้วยฟัซซีเซตและซิงเกิลตันฟัซซีเซตดังแสดงในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ตามลำดับ โดยรูปที่ 2.7 แสดงฟัซซีเซตอยู่ในรูปของพื้นที่ที่แรเงาของแต่ละวิธี สังเกตได้ว่าสามารถเขียนพื้นที่แรเงาให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวควบคุมต่อไปได้ และรูปที่ 2.8 ซิงเกิลตันฟัซซีเซตจะให้ผลลัพธ์ของการอินเฟอเรนซ์เหมือนกันทั้ง 4 วิธี



รูปที่ 2.7 แสดงผลลัพธ์ของฟัซซีอินเฟอเรนซ์ทั้ง 4 วิธี เมื่อแทนผลลัพธ์ของกฎด้วยฟัซซีเซต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงผลลัพธ์ของฟัซซีอินเฟอเรนซ์ทั้ง 4 วิธี เมื่อแทนผลลัพธ์ของกฎด้วยซิงเกิลตันฟัซซีเซต

สำหรับกฎทีเอสฟัซซีในรูปทั่วไปดังแสดงในสมการที่ (2.12) นั้น มีวิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์เพียงวิธีเดียว ซึ่งมีผลลัพธ์คือ $\mu \times f_j(v_1, v_2, \ldots, v_M)$ สำหรับ z_j พบว่าผลลัพธ์ของวิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์สำหรับกฎทีเอสฟัซซีนั้นก็คือการถ่วงน้ำหนัก(weighting) ของผลลัพธ์แต่ละกฎการควบคุมด้วยค่าความเป็นสมาชิก ทำให้สามารถเขียนผลลัพธ์ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ได้ง่ายกว่าวิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์สำหรับกฎแมมดานิฟัซซี

2.6 ดีฟัซซีฟิเคชัน

การดีฟัซซีฟิเคชัน คือกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการเปลี่ยนเอาท์พุตฟัซซีเซตที่ได้จากขั้นตอนฟัซซีอินเฟอเรนซ์ให้เป็นจำนวนจริง เพราะสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ นั้นต้องเป็นเลขจำนวนจริง

2.6.1 เจนเนอรอลไลซ์ดีฟัซซีฟายเออร์

กำหนดตัวแปรเอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซีคือ z ถ้าเลือกกฎแมมดานิฟัซซีจำนวน N กฎการควบคุมที่มีผลลัพธ์อยู่ในรูปของฟัซซีซิงเกิลตันและเลือกใช้วิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์วิธีใดวิธีหนึ่งจะได้ค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละกฎเป็นจำนวน N ค่า $(\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_N)$ นั่นคือ ตัวแปรเอาท์พุตของฟัซซีเซตเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ที่ $z = \beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_N$ วิธีเจนเนอรอลไลซ์ดีฟัซซีฟายเออร์(generalized defuzzifier) ให้ผลลัพธ์เป็นไปตามสมการ

$$z = \frac{\sum_{k=1}^{N} \mu_k^{\alpha} . \beta_k}{\sum_{k=1}^{N} \mu_k^{\alpha}} \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง _ พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เมื่อ α คือ พารามิเตอร์ในการออกแบบ โดยใช้แนวทางเดียวกับข้างต้น แต่เปลี่ยนไปใช้กฎทีเอสฟัซซีที่มีผลลัพธ์ของกฎการควบคุม N กฎการควบคุมคือ $g_k\left(v_1,\ v_2,\ldots,\ v_M\right)$ เมื่อ $k=1,\ldots,N$ ผลลัพธ์ของวิธีเจนเนอรอลไลซ์ ดีฟัซซีฟายเออร์ แสดงได้ดังสมการ

$$z=\frac{\sum_{k=1}^{N}\mu_k^{\alpha}\times g_k\left(v_1,v_2,\ldots,v_M\right)}{\sum_{k=1}^{N}\mu_k^{\alpha}} \tag{2.14}$$

2.6.2 เซ็นทรอยด์ดีฟัซซีฟายเออร์ มีนออฟแมกซิมัมดีฟัซซีฟายเออร์และลิเนียร์ดีฟัซซีฟายเออร์

ค่า α ที่แตกต่างกันสามารถให้วิธีดีฟัซซิฟายเออร์ที่ต่างกัน สำหรับวิธีเจนเนอรอลไลซ์ดีฟัซซีฟายเออร์นั้น ค่า α จะอยู่ในเงื่อนไข $0\leq\alpha+\infty$ เมื่อ $\alpha=1$ เรียกวิธีดีฟัซซิฟายเออร์นี้ว่าเซ็นทรอยด์ดีฟัซซีฟายเออร์(centroid defuzzifier) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยจะเป็นการหาจุดกึ่งกลางถ่วงน้ำหนักของซิงเกิลตันฟัซซีเซตจากกฎต่าง ๆ และในบางครั้งก็อาจใช้วิธีมีนออฟแมกซิมัมดีฟัซซีฟายเออร์(mean of maximum defuzzifier) ซึ่งมีค่า $\alpha=\infty$

วิธีลิเนียร์ดีฟัซซีฟายเออร์(linear defuzzifier) เมื่อใช้กฎแมมดานิฟัซซีและกฎทีเอสฟัซซีแสดงดังสมการที่ 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ

$$z=\sum_{k=1}^{N}\mu_k^{\alpha}\times\beta_k \tag{2.15}$$

$$z=\sum_{k=1}^{N}\mu_k^{\alpha}\times g_k\left(v_1,v_2,\ldots,v_M\right) \tag{2.16}$$

สังเกตได้ว่าวิธีลิเนียร์ดีฟัซซีฟายเออร์นั้นไม่มีตัวส่วน และสำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีเซ็นทรอยด์ดีฟัซซีฟายเออร์เพียงวิธีเดียวเท่านั้น

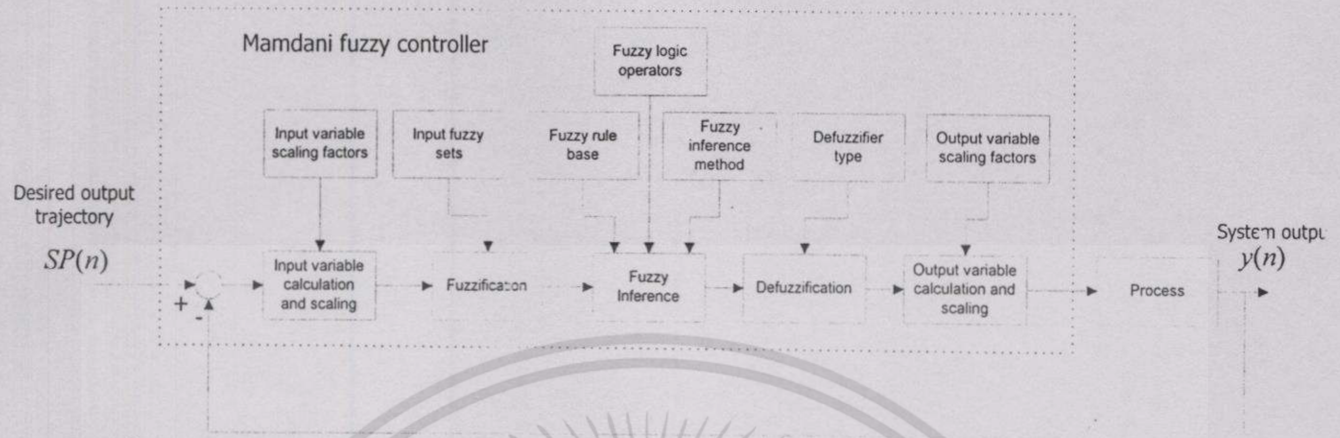
2.7 ตัวควบคุมฟัซซี

ตัวควบคุมฟัซซี สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามกฎฟัซซี คือชนิดแมมดานิ(Mamdani type) และชนิดทีเอส (TS type) โดยเรียกตัวควบคุมฟัซซีที่ใช้กฎทีเอสฟัซซีว่า ตัวควบคุมทีเอสฟัซซี และเรียกตัวควบคุมฟัซซีที่ใช้กฎแมมดานิฟัซซีว่า ตัวควบคุมแมมดานิฟัซซี หรือในบางครั้งเมื่อกล่าวถึงตัวควบคุมฟัซซีทั่ว ๆ ไป ก็จะหมายถึงตัวควบคุมแมมดานิฟัซซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

43277

2.7.1 ตัวควบคุมแมมดานิฟัซซี



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแมมดานิฟัซซี

จากรูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมฟัซซี ซึ่งประกอบด้วย ตัวควบคุมแมมดานิฟัซซีและกระบวนการที่ถูกควบคุม โดยอาจจะเป็นกระบวนการเชิงเส้น กระบวนการไม่เชิงเส้น กระบวนการที่รู้แบบจำลองทองคณิตศาสตร์หรือไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ ในทางปฏิบัติจริงๆแล้ว ตัวควบคุมฟัซซีถูกสร้างจากดิจิตอลคอมพิวเตอร์ ดังนั้น ตัวควบคุมฟัซซีก็คือตัวควบคุมเวลาดีสครีต(discrete-time controller) ส่วนประกอบหลัก ๆ ของตัวควบคุมฟัซซีประกอบด้วย ฟัซซิฟิเคชัน กฎฟัซซี ฟัซซีอินเฟอเรนซ์ และดีฟัซซิฟิเคชัน

การฟัซซิฟิเคชัน

หน่วยฟัซซิฟิเคชันทำหน้าที่แปลงอินพุตของระบบควบคุมที่เป็นเลขจำนวนจริง ให้เป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซีที่อยู่ในรูปของตัวแปรฟัซซีในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด ในรูปที่ 2.9 เอาท์พุตของระบบควบคุมคือ $y(n)$ เมื่อ n คือเลขจำนวนเต็มบวก nT คือเวลาการสุ่ม T คือคาบการสุ่ม (sampling period) โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้สัญลักษณ์ n แทน nT และ $SP(n)$ คือค่าเป้าหมายของระบบควบคุม ซึ่งอาจจะเป็นค่าคงที่หรือเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ณ เวลา n ค่า $y(n)$ และ $SP(n)$ ถูกใช้คำนวณค่าตัวแปรอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี โดยปกติจะเป็นค่าความผิดพลาด (error) และการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด(change of error) เพียง 2 ค่าเท่านั้นที่ให้เป็นตัวแปรอินพุต เพราะหากเพิ่มตัวแปรอินพุตมากขึ้น ก็จะทำให้จำนวนกฎการควบคุมเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ตัวแปรอินพุตของตัวควบคุมแมมดานิฟัซซีได้แก่

$$e(n) = SP(n) - y(n)$$
$$r(n) = e(n) - e(n-1) = y(n-1) - y(n)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $e(n)$ คือค่าความผิดพลาด กำหนดให้อยู่ในช่วง $[a_1, b_1]$ และ $r(n)$ คือการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด กำหนดให้อยู่ในช่วง $[a_2, b_2]$ แต่ละช่วงที่กำหนดก็คือค่าเอกภพสัมพัทธ์ของตัวแปรอินพุตแต่ละตัว ก่อนจะทำการฟัซซิฟิเคชัน ต้องสเกล(scale) ตัวแปรอินพุตที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ $[a_1, b_1]$ และ $[a_2, b_2]$ ให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ของอินพุตฟัซซีเซต(input fuzzy set) แทนเพื่อให้การออกแบบตัวควบคุมแมมดานิฟัซซีง่ายขึ้น โดยใช้อินพุตสเกลลิ่งแฟกเตอร์(input scaling factor) เป็นตัวสเกล กำหนดให้สเกลลิ่งแฟกเตอร์ของค่าความผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด คือ K_e และ K_r ตามลำดับ จะได้

$$E(n) = K_e e(n)$$
$$R(n) = K_r r(n)$$

เมื่อ $E(n)$ คือค่าความผิดพลาดที่ถูกสเกลแล้วให้อยู่ในช่วง $[A_1, B_1]$ และ $R(n)$ คือการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่ถูกสเกลแล้ว และอยู่ในช่วง $[A_2, B_2]$ ตัวแปรอินพุตที่สเกลแล้วนี้ จะถูกฟัซซิฟายด์(fuzzified) ด้วยอินพุตฟัซซีเซตที่อยู่ในช่วง $[A_1, B_1]$ และ $[A_2, B_2]$ ที่ตรงกัน

การเลือกจำนวนและลักษณะรูปร่างของฟัซซีเซตคือพารามิเตอร์หนึ่งในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี ซึ่งขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้ออกแบบ โดยอาศัยหลักเกณฑ์ต่าง ๆ เช่น ความรู้และประสบการณ์ที่มีต่อกระบวนการที่ถูกควบคุมหรือแม้แต่ความชอบส่วนตัว เพราะไม่มีหลักการและขั้นตอนทางคณิตศาสตร์ในการเลือกอินพุตฟัซซีเซต โดยทั่ว ๆ ไปจำนวนฟัซซีเซตสำหรับแต่ละตัวแปรอินพุตอาจจะเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้แต่จะอยู่ในช่วง 2 ถึง 13 ฟัซซีเซต (ไม่ควรมากกว่านี้) และรูปร่างของฟัซซีเซตที่นิยมใช้กันได้แก่ สามเหลี่ยม(triangular) สี่เหลี่ยมคางหมู(trapezoidal) เกาส์เซียน(Gaussian) และระฆังคว่ำ(bell shape)

กฎฟัซซี

ฐานกฎการควบคุมฟัซซี เป็นหน่วยที่รวบรวมกฎการควบคุมแบบฟัซซีซึ่งอยู่ในรูปแบบ IF ... THEN ... ตัวอย่างกฎการควบคุมของตัวควบคุมแมมดานิฟัซซีแสดงดังสมการ

$$\text{IF } E(n) \text{ is Positive Large AND } R(n) \text{ is Negative Small}$$
$$\text{THEN } u(n) \left(\text{or } \Delta u(n)\right) \text{ is Positive Medium} \tag{2.17}$$

เมื่อ Positive Large และ Negative Small คืออินพุตฟัซซีเซต Positive Medium คือเอาท์พุตฟัซซีเซต ตัวแปรเอาท์พุตอาจเป็นได้ทั้งเอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี $(u(n))$ หรือค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาท์พุตที่เพิ่มขึ้นของตัวควบคุมฟัซซี $\left(\Delta u(n)\right)$ $U(n)$ และ $\Delta U(n)$ แทนเอาท์พุตและเอาท์พุตที่เพิ่มขึ้นของตัวควบคุมฟัซซีที่ถูกสเกลกลับมา

ความหมายทางกายภาพของสมการที่ (2.17) คือ ถ้าเอาท์พุตของระบบมีค่าน้อยกว่าค่าเป้าหมายและเอาท์พุตมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างช้า ๆ จะได้เอาท์พุตของตัวควบคุมมีค่า Positive Medium

จำนวนกฎฟัซซีจะสัมพันธ์กับจำนวนอินพุตฟัซซีเซต นั่นคือถ้า $E(n)$ และ $R(n)$ มีจำนวนอินพุตฟัซซีเซตเท่ากับ N_1 และ N_2 แล้ว กฎฟัซซีสามารถมีได้มากที่สุด $N_1 \times N_2$ กฎ ในทางปฏิบัติอาจมีจำนวนน้อยกว่าได้ และในการออกแบบกฎฟัซซีนั้น อาศัยหลักการเดียวกับการออกแบบอินพุตฟัซซีเซตคือใช้ความรู้และประสบการณ์ที่มีต่อกระบวนการที่ถูกควบคุม โดยอยู่บนพื้นฐานของการลองผิดลองถูก จนได้ผลตอบสนองเป็นที่พอใจ แสดงกฎแมมดานิฟัซซีที่อยู่ในรูปทั่วไปดังสมการ

$$\text{IF } E(n) \text{ is } \tilde{A} \text{ AND } R(n) \text{ is } \tilde{B} \text{ THEN } u(n)\left(\text{or } \Delta u(n)\right) \text{ is } \tilde{V} \qquad (2.18)$$

ถ้า $\tilde{V}$ คือ ซิงเกิลตันฟัซซีเซต มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่ง $u(n) = V\left(\text{or } \Delta u(n) = V\right)$ เพียงที่เดียว เมื่อ V คือจำนวนจริง จัดรูปสมการที่ (15) ใหม่จะได้

$$\text{IF } E(n) \text{ is } \tilde{A} \text{ AND } R(n) \text{ is } \tilde{B} \text{ THEN } u(n)\left(\text{or } \Delta u(n)\right) \text{ is } V \qquad (2.19)$$

นอกจากนี้ในการเลือกตัวปฏิบัติการแอนด์นั้น เลือก 2 วิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือ ตัวปฏิบัติการฟัซซีลอจิกแอนด์ของซาเดห์(Zadeh fuzzy logic AND operator) และตัวปฏิบัติการฟัซซีลอจิกแอนด์แบบการคูณ(Product fuzzy logic AND operator) สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแมมดานิฟัซซีใด ๆ นั้นจะใช้ตัวปฏิบัติการแอนด์ชนิดเดียวกันตลอดทุกกฎฟัซซี เพื่อความง่ายในการออกแบบตัวควบคุม

ฟัซซีอินเฟอเรนซ์

หน่วยอินเฟอเรนซ์ ทำหน้าที่หาค่าผลลัพธ์ของกฎการควบคุมจากค่าตัวแปรอินพุตฟัซซีเซต ค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากปฏิบัติการแอนด์ในส่วนมูลเหตุ(antecedent) ของขั้นตอนฟัซซิฟิเคชันสัมพันธ์กับผลลัพธ์กฎการควบคุมด้วยฟัซซีอินเฟอเรนซ์ วิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์ที่นิยมใช้กันมากในตัวควบคุมแมมดานิฟัซซีคือวิธีมินิมัมอินเฟอเรนซ์แบบแมมดานิ แต่ถ้าเลือกเอาท์พุตฟัซซีเซตเป็นฟัซซีซิงเกิลตันแล้ว วิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์ที่แสดงในตารางที่ 1 จะให้ผลลัพธ์ของการอินเฟอเรนซ์ที่เหมือนกันทั้ง 4 วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎแมมดานิฟัซซีที่แสดงดังสมการที่ (2.19) เมื่อเลือกใช้วิธีปฏิบัติการฟัซซีลอจิกแอนด์ของซาเดห์แล้ว จะได้ค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์กฎการควบคุมซึ่งได้จากการฟัซซีอินเฟอเรนซ์ดังสมการ

$$\mu_{u(\mathrm{or}\ \Delta u)} = \min\left(\mu_{\tilde{A}}\left(e\left(n^*\right)\right), \mu_{\tilde{B}}\left(r\left(n^*\right)\right)\right) \tag{2.20}$$

เมื่อ $e\left(n^*\right)$ และ $r\left(n^*\right)$ คือเลขจำนวนจริงของค่าความผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่ได้จากการสุ่มสัญญาณ ณ คาบเวลาการสุ่มหนึ่ง ๆ $\mu_{u(\mathrm{or}\ \Delta u)}$ คือค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์กฎการควบคุม และถ้าเลือกใช้วิธีตัวปฏิบัติการฟัซซีลอจิกแอนด์แบบการคูณแทนที่ตัวปฏิบัติการฟัซซีลอจิกแอนด์ของซาเดห์ในกฎการควบคุมจะได้

$$\mu_{u(\mathrm{or}\ \Delta u)} = \mu_{\tilde{A}}\left(e\left(n^*\right)\right) \times \mu_{\tilde{B}}\left(r\left(n^*\right)\right) \tag{2.21}$$

ค่าความเป็นสมาชิกที่ได้มาคือค่าถ่วงน้ำหนักของเอาท์พุตฟัซซีเซต โดยแต่ละกฎการควบคุมอาจมีค่าเหมือนหรือต่างกันก็ได้

ดีฟัซซิฟิเคชัน

หน่วยดีฟัซซิฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงผลลัพธ์กฎการควบคุมที่อยู่ในรูปตัวแปรฟัซซีให้เป็นค่าซิงเกิลตัน และทำการสเกลกลับมาให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์เดิมก่อนที่จะฟัซซิฟิเคชัน โดยใช้วิธีที่ได้กล่าวไว้ในเรื่องการดีฟัซซิฟิเคชัน วิธีดีฟัซซิฟิเคชันที่นิยมใช้กันในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีคือเซ็นทรอยด์ดีฟัซซีฟายเออร์ แสดงดังสมการ

$$U\left(n\right) = K_u \frac{\sum_{k=1}^{N} \mu_{u_k} . u_k}{\sum_{k=1}^{N} \mu_{u_k}} \tag{2.22}$$

หรือ

$$\Delta U\left(n\right) = \Delta K_u \frac{\sum_{k=1}^{N} \mu_{u_k} . \Delta u_k}{\sum_{k=1}^{N} \mu_{u_k}} \tag{2.23}$$

เมื่อ K_u คือสเกลลิ่งแฟกเตอร์สำหรับเอาท์พุต $u\left(n\right)$ และ ΔK_u คือสเกลลิ่งแฟกเตอร์ของเอาท์พุต $\Delta u\left(n\right)$ N คือจำนวนกฎการควบคุม เมื่อ N และ k คือเลขจำนวนเต็ม $U\left(n\right)$ คือสัญญาณ

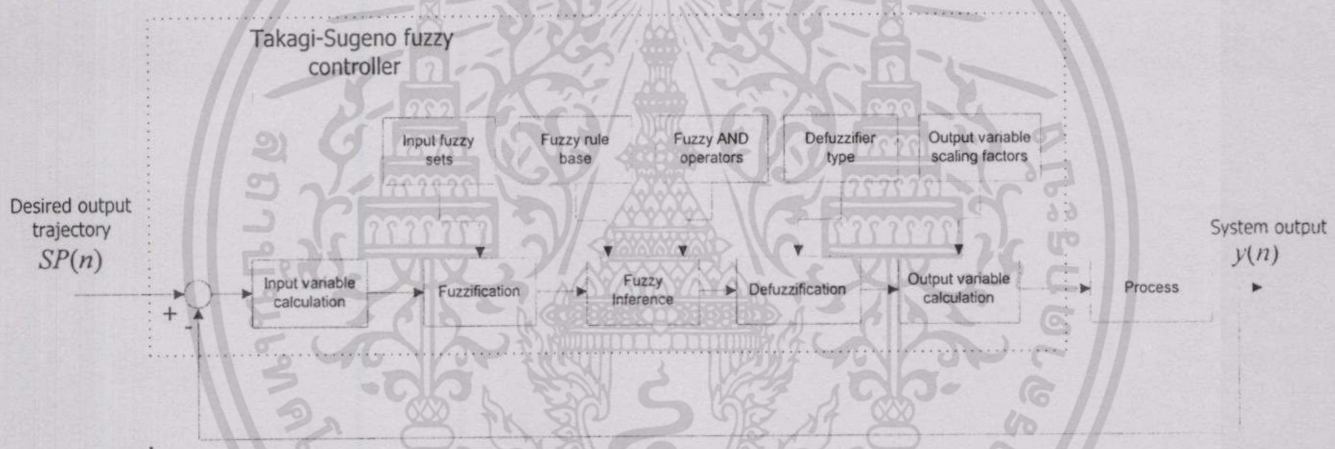
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาท์พุตใหม่ของตัวควบคุมฟัซซีที่เวลา n ใช้ในการควบคุมกระบวนการหรือที่รู้จักกันว่าเป็นสัญญาณควบคุม(control signal) แต่ถ้าผลที่ได้จากดีฟัซซิฟิเคชันคือ $\Delta U(n)$แทน $U(n)$ แล้วสัญญาณเอาท์พุตใหม่ของตัวควบคุมฟัซซีจะเป็นไปตามสมการที่ (2.24)

$$U(n)=U(n-1)+\Delta U(n) \tag{2.24}$$

เมื่อ $U(n-1)$ คือเอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซีที่เวลา $n-1$ การปฏิบัติการฟัซซิฟิเคชัน ฟัซซีอินเฟอเรนซ์ และดีฟัซซิฟิเคชัน ทำทุก ๆ คาบการสุ่ม เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมใหม่ในทุก ๆ คาบการสุ่ม

2.7.2 ตัวควบคุมทีเอสฟัซซี



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมทีเอสฟัซซี

ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีแสดงดังรูปที่ 2.10 โครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีแสดงอยู่ภายในกรอบเส้นประ พบว่ามีโครงสร้างคล้ายคลึงกับตัวควบคุมแมมดานิฟัซซีในรูปที่ 2.9 แต่มีส่วนที่แตกต่างกัน 4 อย่างระหว่างตัวควบคุมทั้งสองคือ

1. ตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาท์พุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไม่ใช้สเกลลิ่งแฟกเตอร์ เพราะสเกลลิ่งแฟกเตอร์ได้ไปรวมอยู่ภายในกฎการควบคุม นั่นคือแต่ละตัวแปรอินพุตจะถูกคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของผลลัพธ์กฎการควบคุมทุกกฎการควบคุม

2. ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีมีผลลัพธ์ของกฎการควบคุมอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นโดยเป็นฟังก์ชันของตัวแปรอินพุต ในขณะที่ผลลัพธ์กฎการควบคุมของตัวควบคุมแมมดานิฟัซซีอยู่ในรูปฟัซซีเซต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กฎการควบคุมของตัวควบคุมแมมดานิฟัซซีที่มีผลลัพธ์เหมือนกันในบางกฎ จะใช้ตัวปฏิบัติการฟัซซีลอจิกออร์(fuzzy logic OR operator) เพื่อรวมกฎที่มีผลลัพธ์ซ้ำกัน ให้เป็นกฎการควบคุมเดียวกัน แต่สำหรับตัวควบคุมทีเอสฟัซซีแล้ว ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ตัวปฏิบัติการฟัซซีลอจิกออร์ในกฎการควบคุม เพราะไม่มีกฎที่มีผลลัพธ์ซ้ำกันเกิดขึ้น

4. ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีใช้วิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์เพียงวิธีเดียวเท่านั้น เพราะมีผลลัพธ์ของกฎการควบคุมอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ในขณะที่ตัวควบคุมแมมดานิฟัซซีมีผลลัพธ์ของกฎการควบคุมอยู่ในรูปฟัซซีเซตจึงสามารถเลือกวิธีฟัซซีอินเฟอเรนซ์ได้หลายวิธี

ทุกคาบการสุ่มสัญญาณของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีต้องทำฟัซซิฟิเคชัน ฟัซซีอินเฟอเรนซ์ และดีฟัซซิฟิเคชัน โดยขั้นตอนฟัซซิฟิเคชันนั้นมีวิธีการเหมือนกับฟัซซิฟิเคชันของตัวควบคุมแมมดานิฟัซซี ถ้าของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีที่มีอินพุตจำนวน M อินพุต สามารถแสดงกฎการควบคุมที่ j ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}&\text{IF } v_1 \text{ is } \tilde{S}_{1,j} \text{ AND } v_2 \text{ is } \tilde{S}_{2,j} \text{ AND ... AND } v_M \text{ is } \tilde{S}_{M,j}\\ &\text{THEN } U(n)\left(\text{or } \Delta U(n)\right) = a_{0,j} + a_{1,j}v_1(n) + \ldots + a_{M,j}v_M(n)\end{aligned} \tag{2.25}$$

เมื่อ $a_{0,j}$, $a_{1,j}$, ..., $a_{M,j}$ คือค่าพารามิเตอร์คงที่ สมมติว่าหลังจากขั้นตอนฟัซซิฟิเคชันและปฏิบัติการฟัซซีลอจิกแอนด์แล้วจะได้ค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์กฎการควบคุมที่ j คือ $\mu_j\left(v,\tilde{S}\right)$ ในขั้นตอนดีฟัซซิฟิเคชัน แทนสมการเชิงเส้นในผลลัพธ์ของกฎและค่าความเป็นสมาชิกลงในสมการเจนเนอรอลไลซ์ดีฟัซซีฟายเออร์ จะได้เอาท์พุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีเป็นไปตามสมการ

$$\begin{aligned}U(n)\left(\text{or } \Delta U(n)\right) &= \frac{\sum_{j=1}^{N}\mu_j^{\alpha}\left(v,\tilde{S}\right)\left(a_{0,j} + a_{1,j}v_1(n) + \ldots + a_{M,j}v_M(n)\right)}{\sum_{j=1}^{N}\mu_j^{\alpha}\left(v,\tilde{S}\right)}\\ &= \frac{\sum_{j=1}^{N}\mu_j^{\alpha}\left(v,\tilde{S}\right)\left(a_{0,j} + \sum_{i=1}^{M}a_{i,j}v_i(n)\right)}{\sum_{j=1}^{N}\mu_j^{\alpha}\left(v,\tilde{S}\right)}\end{aligned} \tag{2.26}$$

เมื่อ N คือจำนวนกฎการควบคุมทั้งหมดของตัวควบคุมทีเอสฟัซซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุม

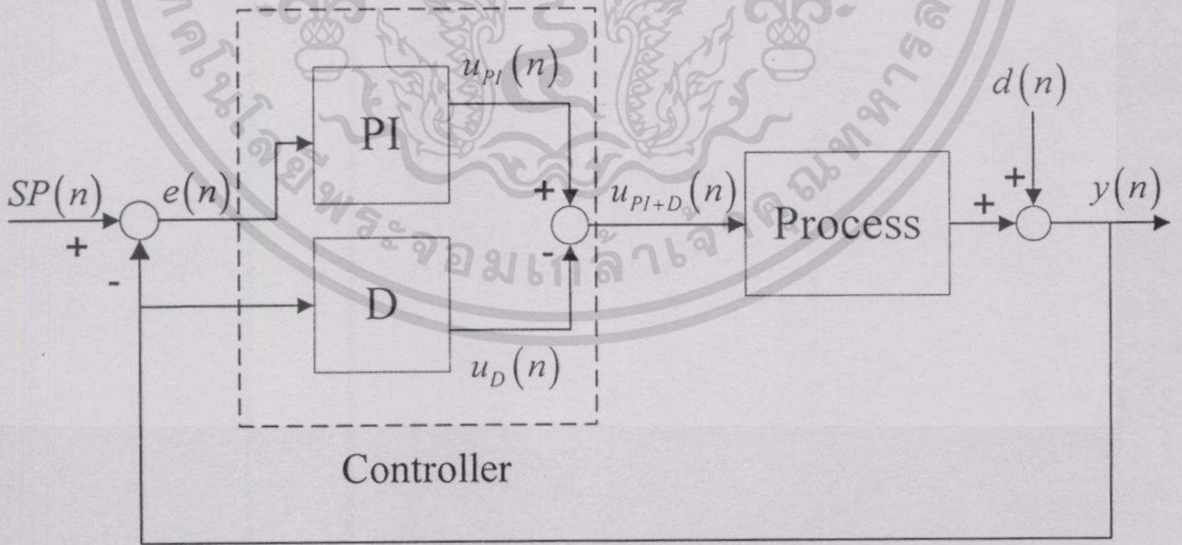
จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการนำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ[10]และทีเอสฟัซซีพีดี[11] ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมเพิ่มเติมจากงานวิจัยเดิม โดยเพิ่มส่วนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีเข้าไปใน[10] และเพิ่มส่วนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอเข้าไปใน[11] จะได้โครงสร้างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอตามลำดับ การเลือกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในขั้นตอนฟัซซิฟิเคชัน การเลือกกฎการควบคุมในขั้นตอนฟัซซีอินเฟอเรนซ์และการดิฟัซซิฟิเคชัน

3.1 การออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอ+ดีดั้งเดิม และโครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี พร้อมทั้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวควบคุมทั้งสอง

3.1.1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอ+ดีดั้งเดิม

พิจารณาระบบควบคุมพีไอ+ดีดั้งเดิม แสดงดังรูปที่ 3.1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอ+ดี ประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมดีดังแสดงในเส้นประ



รูปที่ 3.1 แสดงระบบควบคุมพีไอ+ดีดั้งเดิม

เมื่อ u_{PI+D} คือ สัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุมพีไอ+ดี

u_{PI} คือ สัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุมพีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

u_D คือ สัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุมดี

e คือ สัญญาณค่าความผิดพลาด

y คือ สัญญาณเอาท์พุต

SP คือ สัญญาณอ้างอิง

d คือ สัญญาณรบกวนที่เอาท์พุต(output disturbance)

เอาท์พุตของตัวควบคุมพีไอ+ดีดั้งเดิมสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.1)

$$u_{PI+D}(nT) = u_{PI}(nT) - u_D(nT) \tag{3.1}$$

ในการวิเคราะห์นั้นจะแยกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอและส่วนโครงสร้างของตัวควบคุมดี

โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดั้งเดิม

ตัวควบคุมแอนะล็อก(analog)พีไอดั้งเดิม เป็นดังสมการ

$$U_{PI}(s) = (K_p^c + \frac{K_i^c}{s})E(s) \tag{3.2}$$

เมื่อ K_p^c คือพรอพอชันนอลเกน(proportional gain) และ K_i^c คืออินทิกรัลเกน(integral gain) แปลงไบลิเนียร์(bilinear transform) สมการที่ (3.2) ให้อยู่ในรูปดีสคริตโดยแทน $s = \frac{2}{T}.\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$ ได้

$$\begin{aligned} U_{PI}(z) &= \left(K_p^c + \frac{K_i^c T}{2}.\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}\right)E(z) \\ &= \left(K_p^c + \frac{K_i^c T}{2}\left(-1 + \frac{2}{1-z^{-1}}\right)\right)E(z) \\ &= (K_p^c - \frac{K_i^c T}{2} + \frac{K_i^c T}{1-z^{-1}})E(z) \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้ $K_p = K_p^c - \frac{K_i^c T}{2}$ และ $K_i = K_i^c$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{PI}(z)= (K_p + \frac{K_i T}{1-z^{-1}})E(z) \tag{3.3}$$

แปลงแซดกลับ(inverse z-transform) ของสมการที่ (3.3) จะได้

$$u_{PI}(nT) - u_{PI}(nT-T) = K_p\left[e(nT) - e(nT-T)\right] + K_i Te(nT) \tag{3.4}$$

หารตลอดทั้งสองข้างของสมการที่ (3.4) ด้วย T จะได้

$$\Delta u_{PI}(nT) = K_p r(nT) + K_i e(nT) \tag{3.5}$$

เมื่อ $\Delta u_{PI}(nT) = \dfrac{u_{PI}(nT) - u_{PI}(nT-T)}{T}$ และ $r(nT) = \dfrac{e(nT) - e(nT-T)}{T}$

ค่า $\Delta u_{PI}(nT)$ คือ ค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมพีไอ $r(nT)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น เอาท์พุตของตัวควบคุมพีไอคือ

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT-T) + T\Delta u_{PI}(nT) \tag{3.6}$$

โครงสร้างของตัวควบคุมดีดั้งเดิม

ตัวควบคุมแอนะล็อกดีดั้งเดิมเป็นดังสมการ

$$U_D(s) = (sK_d^c)Y(s) \tag{3.7}$$

เมื่อ K_d^c คือเดอริเวทิฟเกน(derivative gain) แปลงสมการที่ (3.7) ให้อยู่ในรูปดีสครีตโดยการแปลงไบลิเนียร์ ได้

$$\begin{aligned} U_D(z) &= (\frac{2K_d^c}{T}.\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}})Y(z) \\ &= (K_d.\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}})Y(z) \end{aligned}$$

เมื่อกำหนด $K_d = \dfrac{2K_d^c}{T}$ และทำการแปลงแซดกลับ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_D(nT) + u_D(nT-T) = K_d\left[y(nT) - y(nT-T)\right] \tag{3.8}$$

หารสมการที่ (3.8) ด้วย T ตลอดทั้งสองข้างของสมการ ได้

$$\Delta u_D(nT) = K_d \Delta y(nT) \tag{3.9}$$

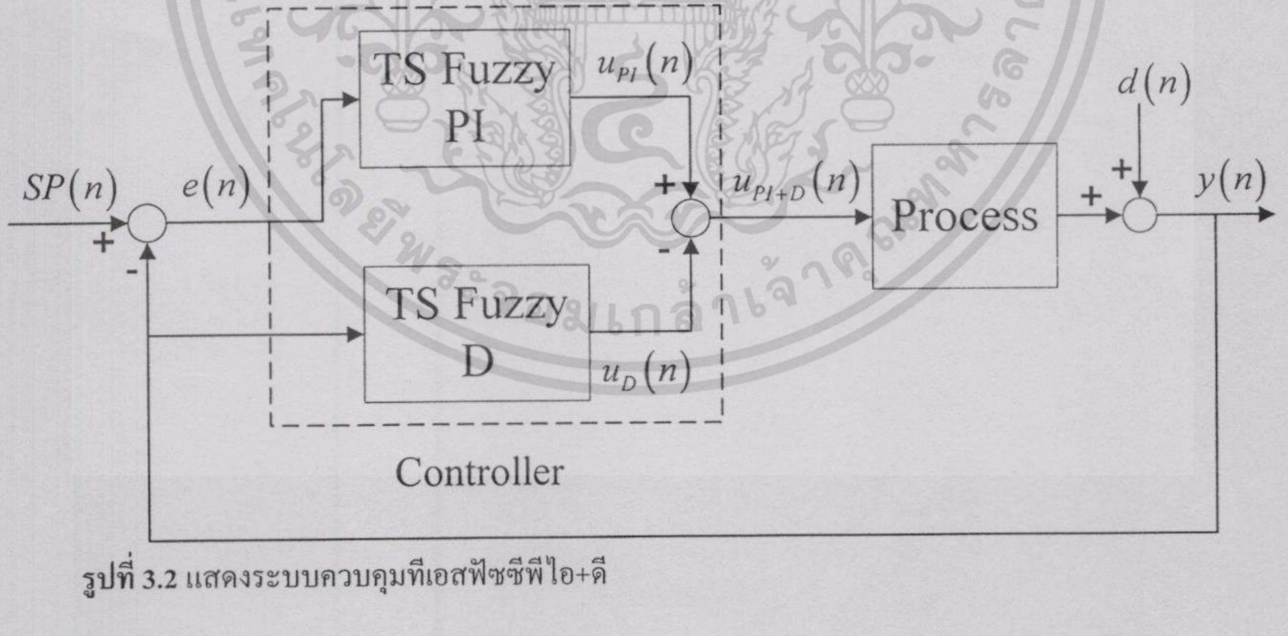
เมื่อ $\Delta u_D(nT) = \dfrac{u_D(nT) + u_D(nT-T)}{T}$ และ $\Delta y(nT) = \dfrac{y(nT) - y(nT-T)}{T}$

ค่า $\Delta u_D(nT)$ คือค่าเอาท์พุตที่เพิ่มขึ้นของตัวควบคุมดี $\Delta y(nT)$ คือ ค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของระบบควบคุม และเอาท์พุตของตัวควบคุมดีได้จากสมการ

$$u_D(nT) = -u_D(nT-T) + T\Delta u_D(nT) \tag{3.10}$$

3.1.2 โครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี

โครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี มีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับตัวควบคุมพีไอ+ดีดั้งเดิม โดยประกอบด้วยตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี ดังแสดงในกรอบเส้นประของรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี

จากรูปที่ 3.2 เอาท์พุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีเป็นไปตามสมการที่ (3.1) เช่นเดียวกับตัวควบคุมพีไอ+ดีดั้งเดิม แต่ในการออกแบบนั้น จะแยกพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ การออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอและการออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี

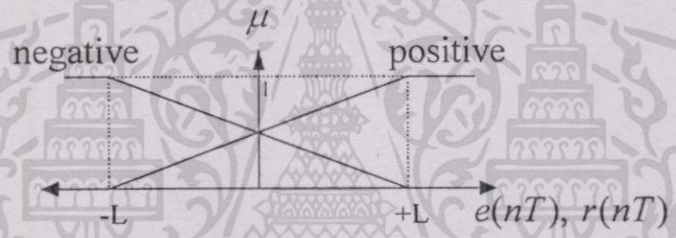
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ

ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอประกอบด้วย 2 อินพุตและ 1 เอาท์พุต ซึ่งสัญญาณอินพุตมีค่าความผิดพลาด $e(nT)$ และการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด $r(nT)$ ดังสมการ

$$e(nT) = SP(nT) - y(nT)$$
$$r(nT) = \frac{e(nT) - e(nT - T)}{T}$$

และมีสัญญาณเอาท์พุต $\Delta u_{PI}(nT)$ คือค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพและหลีกเลี่ยงจำนวนกฎที่มากเกินไป ในขั้นตอนของการฟัซซิฟิเคชัน จึงกำหนดให้ฟัซซีเซตของการฟัซซิไฟด์สัญญาณอินพุตประกอบด้วยสมาชิกเพียง 2 สมาชิก ชื่อ "positive" และ "negative" โดยมี μ เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจากรูปที่ 3.3 สามารถแสดงสมการ ได้ดังนี้

$$\mu_P(e) = \frac{L + e(nT)}{2L} \quad \text{เมื่อค่า } e(nT) \text{ เป็นบวก}$$
$$\mu_N(e) = \frac{L - e(nT)}{2L} \quad \text{เมื่อค่า } e(nT) \text{ เป็นลบ} \qquad (3.11)$$
$$\mu_P(r) = \frac{L + r(nT)}{2L} \quad \text{เมื่อค่า } r(nT) \text{ เป็นบวก}$$
$$\mu_N(r) = \frac{L - r(nT)}{2L} \quad \text{เมื่อค่า } r(nT) \text{ เป็นลบ}$$

เมื่อ μ_P แทน ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต "positive" และ μ_N แทน ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต "negative" ในการกำหนดกฎการควบคุม ผลลัพธ์ของกฎการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมจะมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้น โดยเป็นฟังก์ชันของสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม กฎการควบคุมของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอสามารถแสดงได้ 4 กฎ ดังสมการต่อไปนี้

$(R1)$ IF $e(nT)$ is positive AND $r(nT)$ is positive
THEN PI-output is $\Delta u_{PI_1}(nT) = a_1 e(nT) + b_1 r(nT)$

$(R2)$ IF $e(nT)$ is positive AND $r(nT)$ is negative
THEN PI-output is $\Delta u_{PI_2}(nT) = a_2 e(nT) + b_2 r(nT)$

$(R3)$ IF $e(nT)$ is negative AND $r(nT)$ is positive (3.12)
THEN PI-output is $\Delta u_{PI_3}(nT) = a_3 e(nT) + b_3 r(nT)$

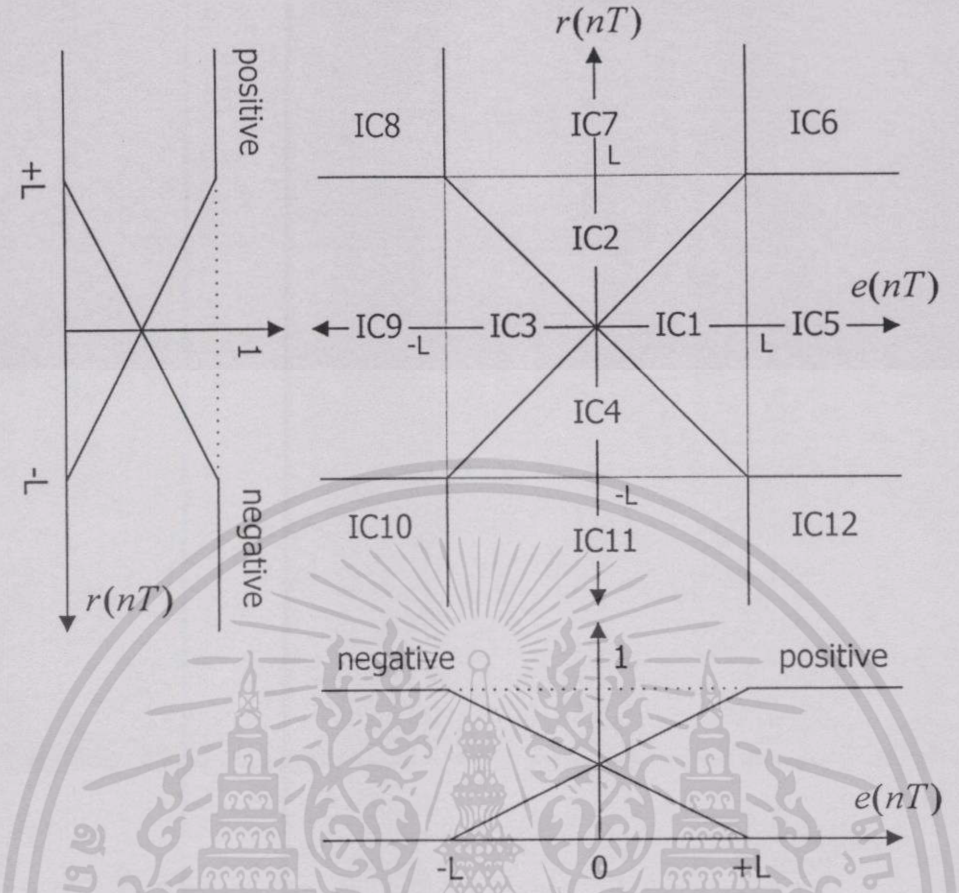
$(R4)$ IF $e(nT)$ is negative AND $r(nT)$ is negative
THEN PI-output is $\Delta u_{PI_4}(nT) = a_4 e(nT) + b_4 r(nT)$

เมื่อ Δu_{PI_i} คือ ค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของกฎการควบคุมที่ i เมื่อ $(i = 1,2,3,4)$ a_i และ b_i คือ พารามิเตอร์ที่จะออกแบบเพื่อให้เกิดผลตอบสนองที่ดีและมีเสถียรภาพ ในแต่ละคาบเวลาการสุ่มนั้น สัญญาณอินพุต $e(nT)$ และ $r(nT)$ ของตัวควบคุมจะแอคทีฟ(active) กฎทั้ง 4 คำนวณค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอด้วยการหาค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์กฎการควบคุมทั้ง 4 ด้วยวิธีเซ็นทรอยด์ดีฟัซซีฟายเออร์ ดังสมการ

$$\Delta u_{PI}(nT) = \frac{\sum_{i=1}^{4} \Delta u_{PI_i} . \mu_{PI_i}}{\sum_{i=1}^{4} \mu_{PI_i}} \tag{3.13}$$

เมื่อ μ_{PI_i} คือ ค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์กฎการควบคุมที่ i แบ่งอินพุตสเปซ(input space) ออกเป็น 12 บริเวณ(input component: IC) เพื่อหาค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ ในแต่ละบริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงอินพุตสเปซของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ

พิจารณาบริเวณ IC1 อันดับแรกหาค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของกฎแต่ละกฎ สำหรับกฎที่ 1 ค่าความเป็นสมาชิกของ $e(nT)$ และ $r(nT)$ คือ $\mu_P(e)=\dfrac{L+e(nT)}{2L}$ และ $\mu_P(r)=\dfrac{L+r(nT)}{2L}$ ตามลำดับ เมื่อ $\mu_P(e)\geq\mu_P(r)$ ในบริเวณ IC1 จะได้ค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของกฎที่ 1 ดังสมการ

$$\mu_1=\min\left(\mu_P(e),\,\mu_P(r)\right)=\frac{L+r(nT)}{2L}$$

เมื่อใช้แนวทางเดียวกับกฎที่1 สามารถหาค่าความเป็นสมาชิกของกฎที่ 2 ถึงกฎที่ 4 ได้ตามลำดับดังนี้

$$\mu_2=\min\left(\mu_P(e),\,\mu_N(r)\right)=\frac{L-r(nT)}{2L}$$

$$\mu_3=\min\left(\mu_N(e),\,\mu_P(r)\right)=\frac{L-e(nT)}{2L}=\frac{L-|e(nT)|}{2L}$$

เนื่องจากค่า $e(nT)$ มีค่าเป็นบวกตลอดในบริเวณ IC1 ของกฎที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $$\mu_4 = \min\left(\mu_N(e),\ \mu_N(r)\right) = \frac{L - e(nT)}{2L} = \frac{L - |e(nT)|}{2L}$$

เนื่องจากค่า $e(nT)$ มีค่าเป็นบวกตลอดในบริเวณ IC1 ของกฎที่ 4

สำหรับในบริเวณอื่นๆ ตั้งแต่ IC2 ถึง IC12 สามารถหาค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์ได้ โดยอาศัยแนวทางเดียวกับ IC1 ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของกฎการควบคุมที่ 1 ถึง 4 ทั้ง 12 บริเวณ

ตารางที่ 3.1 ค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของกฎการควบคุมที่ 1 ถึง 4 ในบริเวณ IC1ถึง IC12

IC No.	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
1	$\frac{L+r(nT)}{2L}$	$\frac{L-r(nT)}{2L}$	$\frac{L-\|e(nT)\|}{2L}$	$\frac{L-\|e(nT)\|}{2L}$
2	$\frac{L+e(nT)}{2L}$	$\frac{L-\|r(nT)\|}{2L}$	$\frac{L-e(nT)}{2L}$	$\frac{L-\|r(nT)\|}{2L}$
3	$\frac{L-\|e(nT)\|}{2L}$	$\frac{L-\|e(nT)\|}{2L}$	$\frac{L+r(nT)}{2L}$	$\frac{L-r(nT)}{2L}$
4	$\frac{L-\|r(nT)\|}{2L}$	$\frac{L+e(nT)}{2L}$	$\frac{L-\|r(nT)\|}{2L}$	$\frac{L-e(nT)}{2L}$
5	$\frac{L+r(nT)}{2L}$	$\frac{L-r(nT)}{2L}$	0	0
7	$\frac{L+e(nT)}{2L}$	0	$\frac{L-e(nT)}{2L}$	0
9	0	0	$\frac{L+r(nT)}{2L}$	$\frac{L-r(nT)}{2L}$
11	0	$\frac{L+e(nT)}{2L}$	0	$\frac{L-e(nT)}{2L}$
6	1	0	0	0
8	0	0	1	0
10	0	0	0	1
12	0	1	0	0

นำกฎการควบคุมในสมการที่ (3.12) และค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของกฎการควบคุมในตารางที่ 3.1 แทนลงในสมการดีฟัซซิฟิเคชันของสมการที่ (3.13) เพื่อหาค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอในแต่ละบริเวณ พิจารณาบริเวณ IC1 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta u_{PI}(nT) = \frac{(L+r(nT))\left(a_1e(nT)+b_1r(nT)\right)+(L-r(nT))\left(a_2e(nT)+b_2r(nT)\right)}{4L-2|e(nT)|}$$

$$\underline{+\left(L-|e(nT))|\left(a_3e(nT)+b_3r(nT)\right)+\left(L-|e(nT)|\right)\left(a_4e(nT)+b_4r(nT)\right)}$$

$$=\left[\frac{\left(L-|e(nT)|\right)\left(a_3+a_4\right)+\left(L+r(nT)\right)a_1+\left(L-r(nT)\right)a_2}{4L-2|e(nT)|}\right]e(nT)$$

$$+\left[\frac{\left(L-|e(nT)|\right)\left(b_3+b_4\right)+\left(L+r(nT)\right)b_1+\left(L-r(nT)\right)b_2}{4L-2|e(nT)|}\right]r(nT)$$

$$= K_i\,(e,r)e(nT)+K_p(e,r)r(nT) \tag{3.14}$$

เมื่อ $K_i(e,r)=\dfrac{\left(L-|e(nT)|\right)\left(a_3+a_4\right)+\left(L+r(nT)\right)a_1+\left(L-r(nT)\right)a_2}{4L-2|e(nT)|}$ และ

$$K_p(e,r)=\frac{\left(L-|e(nT)|\right)\left(b_3+b_4\right)+\left(L+r(nT)\right)b_1+\left(L-r(nT)\right)b_2}{4L-2|e(nT)|}$$

จากสมการที่ (3.14) จะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอจะแสดงลักษณะโครงสร้างคล้ายคลึงกับตัวควบคุมพีไอดั้งเดิมในสมการที่ (3.5) แต่ต่างจากตัวควบคุมพีไอดั้งเดิมตรงที่ค่าเกน $K_i(e,r)$ และ $K_p(e,r)$ ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอมีค่าไม่คงที่ โดยจะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม ในทำนองเดียวกัน บริเวณ IC2 – IC12 ก็สามารถหาเอาท์พุตที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอได้ดังสมการที่ (3.14) เช่นกัน แต่จะมีค่าเกนที่แตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณ แสดงได้ดังตารางที่ 3.2 และหาค่าเอาท์พุต $u_{PI}(nT)$ ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอได้โดยใช้สมการที่ (3.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ บริเวณ IC1 ถึง IC12

IC No.	$K_i(e,r)$	$K_p(e,r)$
1	$\dfrac{\left(L-\lvert e(nT)\rvert\right)(a_3+a_4)+\left(L+r(nT)\right)a_1+\left(L-r(nT)\right)a_2}{4L-2\lvert e(nT)\rvert}$	$\dfrac{\left(L-\lvert e(nT)\rvert\right)(b_3+b_4)+\left(L+r(nT)\right)b_1+\left(L-r(nT)\right)b_2}{4L-2\lvert e(nT)\rvert}$
2	$\dfrac{\left(L-\lvert r(nT)\rvert\right)(a_2+a_4)+\left(L+e(nT)\right)a_1+\left(L-e(nT)\right)a_3}{4L-2\lvert r(nT)\rvert}$	$\dfrac{\left(L-\lvert r(nT)\rvert\right)(b_2+b_4)+\left(L+e(nT)\right)b_1+\left(L-e(nT)\right)b_3}{4L-2\lvert r(nT)\rvert}$
3	$\dfrac{\left(L-\lvert e(nT)\rvert\right)(a_1+a_2)+\left(L+r(nT)\right)a_3+\left(L-r(nT)\right)a_4}{4L-2\lvert e(nT)\rvert}$	$\dfrac{\left(L-\lvert e(nT)\rvert\right)(b_1+b_2)+\left(L+r(nT)\right)b_3+\left(L-r(nT)\right)b_4}{4L-2\lvert e(nT)\rvert}$
4	$\dfrac{\left(L-\lvert r(nT)\rvert\right)(a_1+a_3)+\left(L+e(nT)\right)a_2+\left(L-e(nT)\right)a_4}{4L-2\lvert r(nT)\rvert}$	$\dfrac{\left(L-\lvert r(nT)\rvert\right)(b_1+b_3)+\left(L+e(nT)\right)b_2+\left(L-e(nT)\right)b_4}{4L-2\lvert r(nT)\rvert}$
5	$\dfrac{\left(L+r(nT)\right)a_1+\left(L-r(nT)\right)a_2}{2L}$	$\dfrac{\left(L+r(nT)\right)b_1+\left(L-r(nT)\right)b_2}{2L}$
7	$\dfrac{\left(L+e(nT)\right)a_1+\left(L-e(nT)\right)a_3}{2L}$	$\dfrac{\left(L+e(nT)\right)b_1+\left(L-e(nT)\right)b_3}{2L}$
9	$\dfrac{\left(L+r(nT)\right)a_3+\left(L-r(nT)\right)a_4}{2L}$	$\dfrac{\left(L+r(nT)\right)b_3+\left(L-r(nT)\right)b_4}{2L}$
11	$\dfrac{\left(L+e(nT)\right)a_2+\left(L-e(nT)\right)a_4}{2L}$	$\dfrac{\left(L+e(nT)\right)b_2+\left(L-e(nT)\right)b_4}{2L}$
6	a_1	b_1
8	a_3	b_3
10	a_4	b_4
12	a_2	b_2

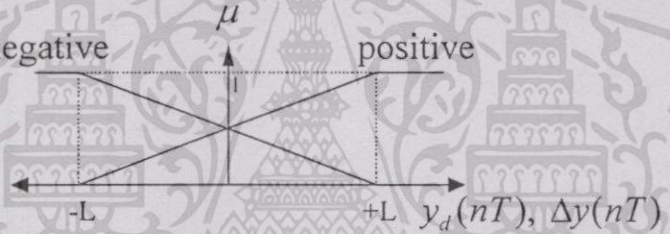
การออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี

มีหลักเกณฑ์การออกแบบตัวควบคุมคล้ายกับการออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ คือมี 2 อินพุตและ 1 เอาท์พุต ซึ่งสัญญาณอินพุตประกอบด้วย $y_d\left(nT\right)$ และ $\Delta y\left(nT\right)$ และมีการเปลี่ยนแปลงของเอาท์พุต $\Delta u_D\left(nT\right)$ เป็นสัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี

เมื่อ $$y_d(nT) = -e(nT)$$

$$\Delta y\left(nT\right) = \frac{y\left(nT\right) - y\left(nT - T\right)}{T}$$

กำหนดฟัซซีเซตของการฟัซซิฟายด์สัญญาณอินพุตในการฟัซซิฟิเคชัน ประกอบด้วยสมาชิก 2 สมาชิก คือ "positive" และ "negative" เช่นเดียวกับตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี

และสามารถแสดงสมการฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจากรูปที่ 3.5 ได้ดังนี้

$$\mu_P(y_d) = \frac{L + y_d(nT)}{2L} \quad \text{เมื่อค่า } y_d(nT) \text{ เป็นบวก}$$
$$\mu_N(y_d) = \frac{L - y_d(nT)}{2L} \quad \text{เมื่อค่า } y_d(nT) \text{ เป็นลบ} \qquad (3.15)$$
$$\mu_P(\Delta y) = \frac{L + \Delta y(nT)}{2L} \quad \text{เมื่อค่า } \Delta y(nT) \text{ เป็นบวก}$$
$$\mu_N(\Delta y) = \frac{L - \Delta y(nT)}{2L} \quad \text{เมื่อค่า } \Delta y(nT) \text{ เป็นลบ}$$

เลือกกฎการควบคุมให้มีผลลัพธ์เป็นฟังก์ชันของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงเอาท์พุต $\Delta y(nT)$ ของระบบควบคุม กฎการควบคุมของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีจำนวน 4 กฎ แสดงได้ในสมการที่ (3.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(R5)$ IF $y_d(nT)$ is negative AND $\Delta y(nT)$ is negative
THEN D-output is $\Delta u_{D_1}(nT) = c_1 \Delta y(nT)$

$(R6)$ IF $y_d(nT)$ is negative AND $\Delta y(nT)$ is positive
THEN D-output is $\Delta u_{D_2}(nT) = c_2 \Delta y(nT)$

$(R7)$ IF $y_d(nT)$ is positive AND $\Delta y(nT)$ is negative (3.16)
THEN D-output is $\Delta u_{D_3}(nT) = c_3 \Delta y(nT)$

$(R8)$ IF $y_d(nT)$ is positive AND $\Delta y(nT)$ is positive
THEN D-output is $\Delta u_{D_4}(nT) = c_4 \Delta y(nT)$

เมื่อ Δu_{D_i} คือ ค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของกฎการควบคุมที่ i ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี เมื่อ $(i = 1,2,3,4)$ และ c_i คือ พารามิเตอร์ที่จะออกแบบเพื่อให้เกิดผลตอบสนองที่ดีและมีเสถียรภาพ กฎการควบคุมแต่ละกฎของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี จะแอคทีฟในบริเวณที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6

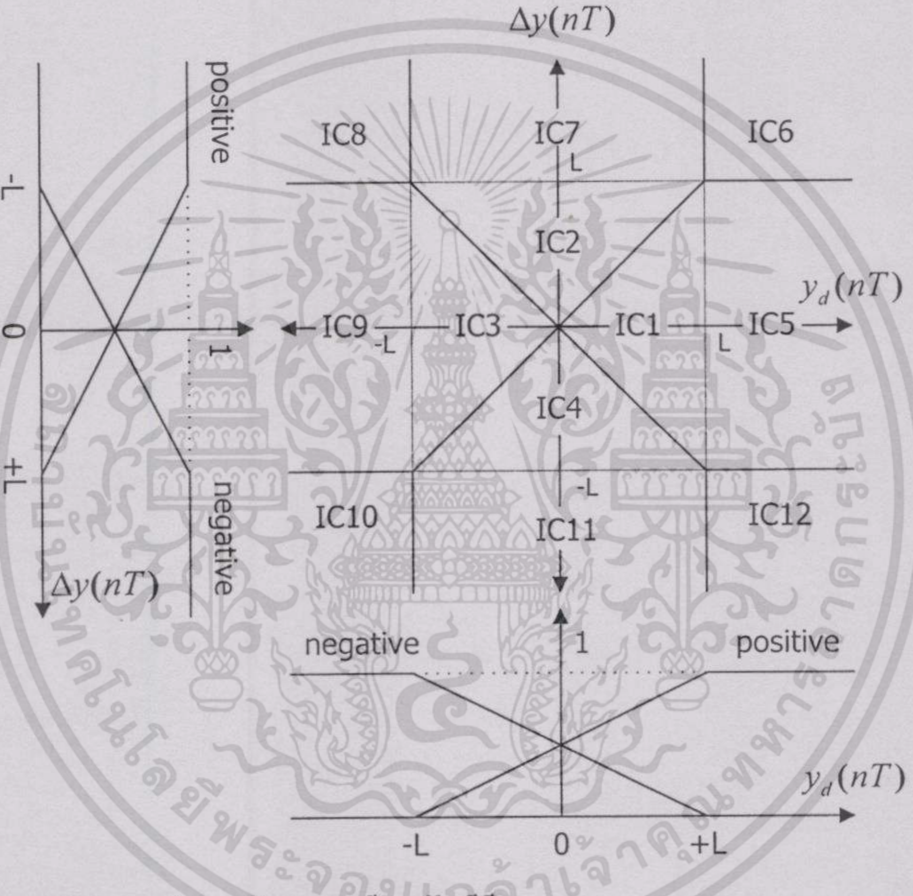
รูปที่ 3.6 แสดงบริเวณที่แอคทีฟของกฎการควบคุมแต่ละกฎ

ใช้วิธีเซ็นทรอยด์ดีฟัซซีฟายเออร์ เพื่อคำนวณหาค่าเอาท์พุทที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมฟัซซีดี ได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta u_D(nT) = \frac{\sum_{i=1}^{4} \Delta u_{D_i} . \mu_{D_i}}{\sum_{i=1}^{4} \mu_{D_i}} \tag{3.17}$$

เมื่อ μ_{D_i} คือ ค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์กฎการควบคุมที่ i แบ่งอินพุตสเปซออกเป็น 12 บริเวณ เช่นเดียวกับตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ เพื่อหาค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีในแต่ละบริเวณ และแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงอินพุตสเปซของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี

อันดับแรกพิจารณาบริเวณ IC1 เพื่อหาค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของกฎแต่ละกฎ สำหรับกฎที่ 5 ค่าความเป็นสมาชิกของสัญญาณ $y_d(nT)$ และ $\Delta y(nT)$ คือ $\mu_N(y_d) = \frac{L - y_d(nT)}{2L}$ และ $\mu_N(\Delta y) = \frac{L - \Delta y(nT)}{2L}$ ตามลำดับ เมื่อ $\mu_N(\Delta y) \geq \mu_N(y_d)$ ในบริเวณ IC1 จะได้ค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของกฎที่ 5 ดังสมการ

$$\mu_5 = \min\left(\mu_N(y_d),\ \mu_N(\Delta y)\right) = \frac{L - y_d(nT)}{2L} = \frac{L - \left|y_d(nT)\right|}{2L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่า $y_d(nT)$ มีค่าเป็นบวกตลอดในบริเวณ IC1 ของกฎนี้
โดยใช้แนวทางเดียวกับกฎที่ 5 สามารถหาค่าความเป็นสมาชิกของกฎที่ 6 ถึงกฎที่ 8 ได้

$$\mu_6 = \min\left(\mu_N\left(y_d\right),\ \mu_P\left(\Delta y\right)\right) = \frac{L - y_d(nT)}{2L} = \frac{L - |\,y_d(nT)\,|}{2L}$$

เนื่องจากค่า $y_d(nT)$ มีค่าเป็นบวกตลอดในบริเวณ IC1 ของกฎนี้

$$\mu_7 = \min\left(\mu_P\left(y_d\right),\ \mu_N\left(\Delta y\right)\right) = \frac{L - \Delta y(nT)}{2L}$$

และ

$$\mu_8 = \min\left(\mu_P\left(y_d\right),\ \mu_P\left(\Delta y\right)\right) = \frac{L + \Delta y(nT)}{2L}$$

ตามลำดับ สำหรับในบริเวณอื่นๆ ตั้งแต่ IC2 ถึง IC12 ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี สามารถหาค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์ได้ โดยอาศัยแนวทางเดียวกับ IC1 แสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของกฎการควบคุมที่ 5 ถึง 8 ในบริเวณ IC1 ถึง IC12

IC No.	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8
1	$\frac{L-\lvert y_d(nT)\rvert}{2L}$	$\frac{L-\lvert y_d(nT)\rvert}{2L}$	$\frac{L-\Delta y(nT)}{2L}$	$\frac{L+\Delta y(nT)}{2L}$
2	$\frac{L-\lvert\Delta y(nT)\rvert}{2L}$	$\frac{L-y_d(nT)}{2L}$	$\frac{L-\lvert\Delta y(nT)\rvert}{2L}$	$\frac{L+y_d(nT)}{2L}$
3	$\frac{L-\Delta y(nT)}{2L}$	$\frac{L+\Delta y(nT)}{2L}$	$\frac{L-\lvert y_d(nT)\rvert}{2L}$	$\frac{L-\lvert y_d(nT)\rvert}{2L}$
4	$\frac{L-y_d(nT)}{2L}$	$\frac{L-\lvert\Delta y(nT)\rvert}{2L}$	$\frac{L+y_d(nT)}{2L}$	$\frac{L-\lvert\Delta y(nT)\rvert}{2L}$
5	0	0	$\frac{L-\Delta y(nT)}{2L}$	$\frac{L+\Delta y(nT)}{2L}$
7	0	$\frac{L-y_d(nT)}{2L}$	0	$\frac{L+y_d(nT)}{2L}$
9	$\frac{L-\Delta y(nT)}{2L}$	$\frac{L+\Delta y(nT)}{2L}$	0	0
11	$\frac{L-y_d(nT)}{2L}$	0	$\frac{L+y_d(nT)}{2L}$	0
6	0	0	0	1
8	0	1	0	0
10	1	0	0	0
12	0	0	1	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมผลลัพธ์ของกฎการควบคุมที่ 5-8 จากสมการที่ (3.16) ด้วยวิธีเซ็นทรอยด์ดีฟัซซีฟายเออร์ โดยใช้แนวทางเดียวกับตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ จะได้เอาท์พุตที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีเป็นไปตามสมการ

$$\Delta u_D(nT) = \frac{\left(L-\left|y_d\left(nT\right)\right|\right)\left(c_1+c_2\right)\Delta y(nT)+\left(L-\Delta y(nT)\right)\left(c_3\Delta y(nT)\right)}{2\left(2L-\left|y_d\left(nT\right)\right|\right)}$$

$$\underline{+\left(L+\Delta y(nT)\right)\left(c_4\Delta y(nT)\right)}$$

$$=\left[\frac{\left(L-\left|y_d\left(nT\right)\right|\right)\left(c_1+c_2\right)+\left(L-\Delta y(nT)\right)c_3+\left(L+\Delta y(nT)\right)c_4}{2\left(2L-\left|y_d\left(nT\right)\right|\right)}\right]\Delta y(nT)$$

$$= K_d(y_d,\Delta y)\Delta y(nT) \qquad (3.18)$$

เมื่อ

$$K_d(y_d,\Delta y)=\frac{\left(L-\left|y_d\left(nT\right)\right|\right)\left(c_1+c_2\right)+\left(L-\Delta y(nT)\right)c_3+\left(L+\Delta y(nT)\right)c_4}{2\left(2L-\left|y_d\left(nT\right)\right|\right)}$$

จากสมการตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีในสมการที่ (3.18) พบว่ามีโครงสร้างคล้ายคลึงกับตัวควบคุมดีดั้งเดิมในสมการที่ (3.9) แต่ต่างจากตัวควบคุมดีดั้งเดิมตรงที่ค่าเกน $K_d(y_d,\Delta y)$ ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีมีค่าไม่คงที่ จะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม สามารถหาเอาท์พุตที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีในบริเวณ IC2 – IC12 โดยใช้แนวทางเดียวกับ IC1 ได้ดังสมการที่ (3.18) เช่นกัน แต่มีค่าเกนที่แตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 และค่าเอาท์พุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีหาได้จากสมการที่ (3.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี บริเวณ IC1 ถึง IC12

IC No.	$K_d(y_d,\Delta y)$
1	$\dfrac{L\sum_{i=1}^{4}c_i-(c_1+c_2)\|y_d(nT)\|+(c_4-c_3)\Delta y(nT)}{4L-2\|y_d(nT)\|}$
2	$\dfrac{L\sum_{i=1}^{4}c_i-(c_1+c_3)\|\Delta y(nT)\|+(c_4-c_2)y_d(nT)}{4L-2\|\Delta y(nT)\|}$
3	$\dfrac{L\sum_{i=1}^{4}c_i-(c_3+c_4)\|y_d(nT)\|+(c_2-c_1)\Delta y(nT)}{4L-2\|y_d(nT)\|}$
4	$\dfrac{L\sum_{i=1}^{4}c_i-(c_2+c_4)\|\Delta y(nT)\|+(c_3-c_1)y_d(nT)}{4L-2\|\Delta y(nT)\|}$
5	$\dfrac{L(c_4+c_3)+(c_4-c_3)\Delta y(nT)}{2L}$
7	$\dfrac{L(c_4+c_2)+(c_4-c_2)y_d(nT)}{2L}$
9	$\dfrac{L(c_2+c_1)+(c_2-c_1)\Delta y(nT)}{2L}$
11	$\dfrac{L(c_3+c_1)+(c_3-c_1)y_d(nT)}{2L}$
6	c_4
8	c_2
10	c_1
12	c_3

3.2 การออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ

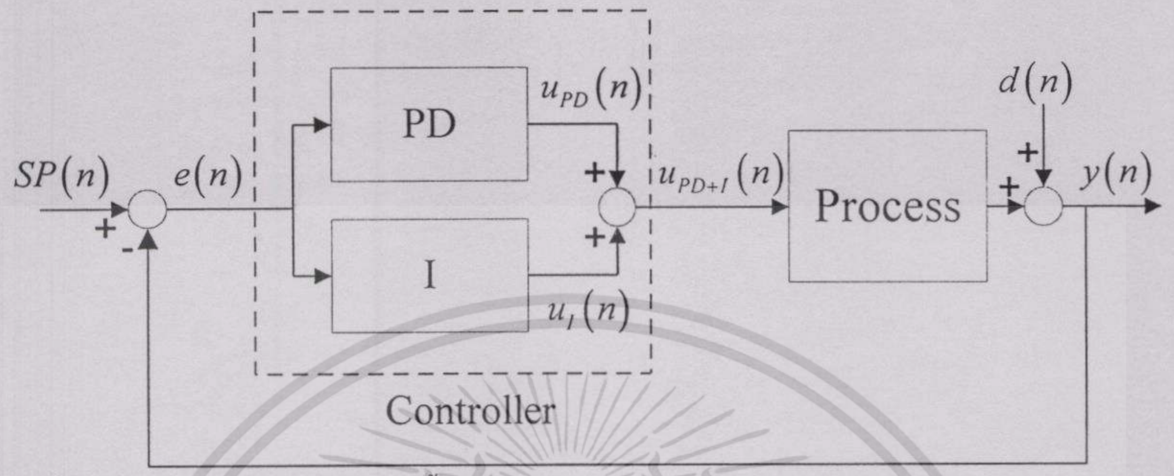
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของตัวควบคุมพีดี+ไอดั้งเดิม และโครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ พร้อมทั้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวควบคุมทั้งสอง

3.2.1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีดี+ไอดั้งเดิม

โครงสร้างของตัวควบคุมพีดี+ไอดั้งเดิมประกอบด้วยตัวควบคุมพีดีและตัวควบคุมไอ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยมีโครงสร้างเหมือนกับตัวควบคุมพีไอดีดั้งเดิม แต่เหตุที่แยกพิจารณาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 2 ตัวควบคุม ก็เพื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ+ดีดั้งเดิมให้เห็นถึงความเหมือนหรือแตกต่างกันได้อย่างชัดเจน และช่วยลดจำนวนกฎการควบคุมเมื่อพัฒนาเป็นตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ



รูปที่ 3.8 แสดงระบบควบคุมพีดี+ไอดั้งเดิม

จากรูปที่ 3.8 เอาท์พุตของตัวควบคุมพีดี+ไอดั้งเดิมสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$u_{PD+I}(nT) = u_{PD}(nT) + u_I(nT) \tag{3.19}$$

โครงสร้างของตัวควบคุมพีดีดั้งเดิม

ตัวควบคุมแอนะล็อกพีดีดั้งเดิม เป็นดังสมการ

$$U_{PD}(s) = (K_p^c + sK_d^c)E(s) \tag{3.20}$$

แปลงไบลิเนียร์สมการที่ (3.20)ให้อยู่ในรูปดีสครีตจะได้

$$U_{PD}(z) = \left(K_p^c + \frac{K_d^c 2}{T} . \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) E(z) \tag{3.21}$$

กำหนดให้ $K_p = K_p^c$ และ $K_d = \dfrac{K_d^c 2}{T}$ แล้วแปลงแซดกลับของสมการที่ (3.21) จะได้

$$u_{PD}(nT) + u_{PD}(nT-T) = K_p\left[e(nT) + e(nT-T)\right] + K_d\left[e(nT) - e(nT-T)\right] \tag{3.22}$$

หารด้วย T ตลอดทั้งสองข้างของสมการที่ (3.22) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta u_{PD}(nT) = K_p v(nT) + K_d r(nT) \tag{3.23}$$

เมื่อ $\Delta u_{PD}(nT) = \dfrac{u_{PD}(nT) + u_{PD}(nT-T)}{T}$, $v(nT) = \dfrac{e(nT) + e(nT-T)}{T}$

และ $r(nT) = \dfrac{e(nT) - e(nT-T)}{T}$ ค่า $\Delta u_{PD}(nT)$ คือค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมพีดี $v(nT)$ คือค่าความผิดพลาดเฉลี่ย และเอาท์พุตของตัวควบคุมพีดีสามารถหาได้จากสมการ

$$u_{PD}(nT) = -u_{PD}(nT-T) + T\Delta u_{PD}(nT) \tag{3.24}$$

โครงสร้างของตัวควบคุมไอดั้งเดิม

ตัวควบคุมแอนะล็อกไอดั้งเดิม เป็นดังสมการ

$$U_I(s) = \frac{K_i^c}{s} E(s) \tag{3.25}$$

หลังจากแปลงไบลิเนียร์ของสมการที่ (3.25) ให้อยู่ในรูปดีสครีตแล้ว จะได้

$$U_I(z) = K_i^c \left(\frac{T}{2} . \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right) E(z) \tag{3.26}$$

แปลงแซดกลับของสมการที่ (3.26) จะได้

$$u_I(nT) - u_I(nT-T) = \frac{K_i^c T}{2} \left[e(nT) + e(nT-T) \right] \tag{3.27}$$

กำหนดให้ $K_i = \dfrac{K_i^c T}{2}$ และหารสมการที่ (3.27) ด้วย T จะได้

$$\Delta u_I(nT) = K_i \, v(nT) \tag{3.28}$$

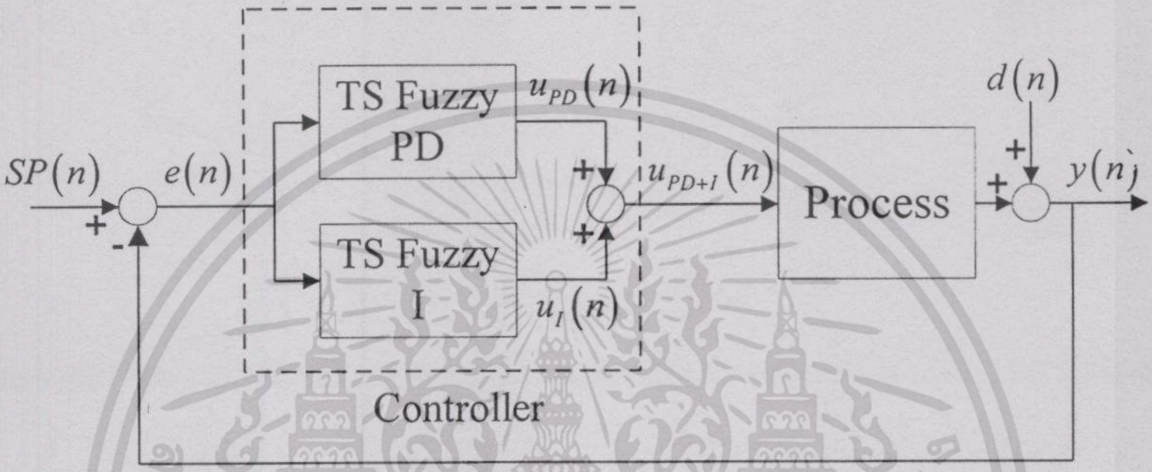
เมื่อ $\Delta u_I(nT) = \dfrac{u_I(nT) - u_I(nT-T)}{T}$ คือค่าเอาท์พุตที่เพิ่มขึ้นของการควบคุมของตัวควบคุมไอ และสามารถหาค่าเอาท์พุตของตัวควบคุมไอ ได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_I(nT) = u_I(nT - T) + T\Delta u_I(nT) \tag{3.29}$$

3.2.2 โครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ

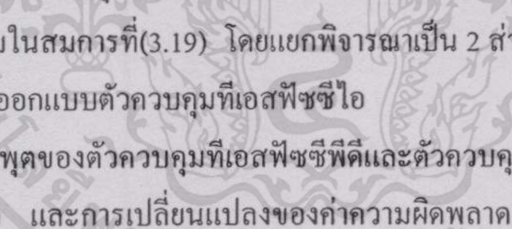
จากโครงสร้างของตัวควบคุมพีดี+ไอดั้งเดิมในรูปที่ 3.8 เมื่อได้ปรับเปลี่ยนจากตัวควบคุมดั้งเดิมให้เป็นตัวควบคุมทีเอสฟัซซี จะได้โครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ แสดงอยู่ภายในกรอบเส้นประดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ

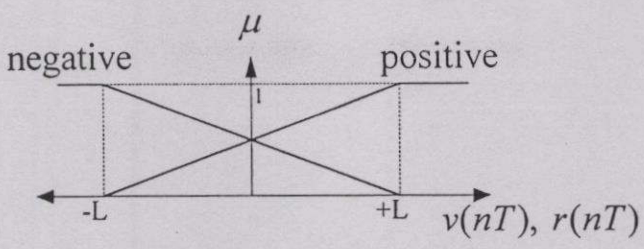
เอาท์พุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอเป็นการรวมกันของเอาท์พุตตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและเอาท์พุตตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอ และจะมีสมการเหมือนกับสมการเอาท์พุตของตัวควบคุมพีดี+ไอดั้งเดิมในสมการที่(3.19) โดยแยกพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ การออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและการออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอ

สัญญาณอินพุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอ คือค่าความผิดพลาดเฉลี่ย $v(nT)$ และการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด $r(nT)$ ในขั้นตอนของการฟัซซิฟิเคชัน กำหนดให้ฟัซซีเซตของการฟัซซิไฟด์สัญญาณอินพุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและทีเอสฟัซซีไอ ประกอบด้วยสมาชิกเพียง 2 สมาชิก ชื่อ “positive” และ “negative” แสดงดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอ

กำหนดกฎการควบคุมของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและทีเอสฟัซซีไอ ให้มีผลลัพธ์ของกฎการควบคุมเป็นฟังก์ชันของสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม โดยอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น แสดงกฎการควบคุมของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี จำนวน 4 กฎ $(R1 - R4)$ ดังสมการที่ (3.30)

$(R1)$ IF $v(nT)$ is positive AND $r(nT)$ is positive
THEN PD-output is $\Delta u_{PD_1}(nT) = b_1 v(nT) + c_1 r(nT)$

$(R2)$ IF $v(nT)$ is positive AND $r(nT)$ is negative
THEN PD-output is $\Delta u_{PD_2}(nT) = b_2 v(nT) + c_2 r(nT)$

$(R3)$ IF $v(nT)$ is negative AND $r(nT)$ is positive (3.30)
THEN PD-output is $\Delta u_{PD_3}(nT) = b_3 v(nT) + c_3 r(nT)$

$(R4)$ IF $v(nT)$ is negative AND $r(nT)$ is negative
THEN PD-output is $\Delta u_{PD_4}(nT) = b_4 v(nT) + c_4 r(nT)$

กฎการควบคุมของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอ จำนวน 4 กฎ $(R5 - R8)$ แสดงดังสมการที่ (3.31)

$(R5)$ IF $v(nT)$ is positive AND $r(nT)$ is positive
THEN I-output is $\Delta u_{I_1}(nT) = a_1 v(nT)$

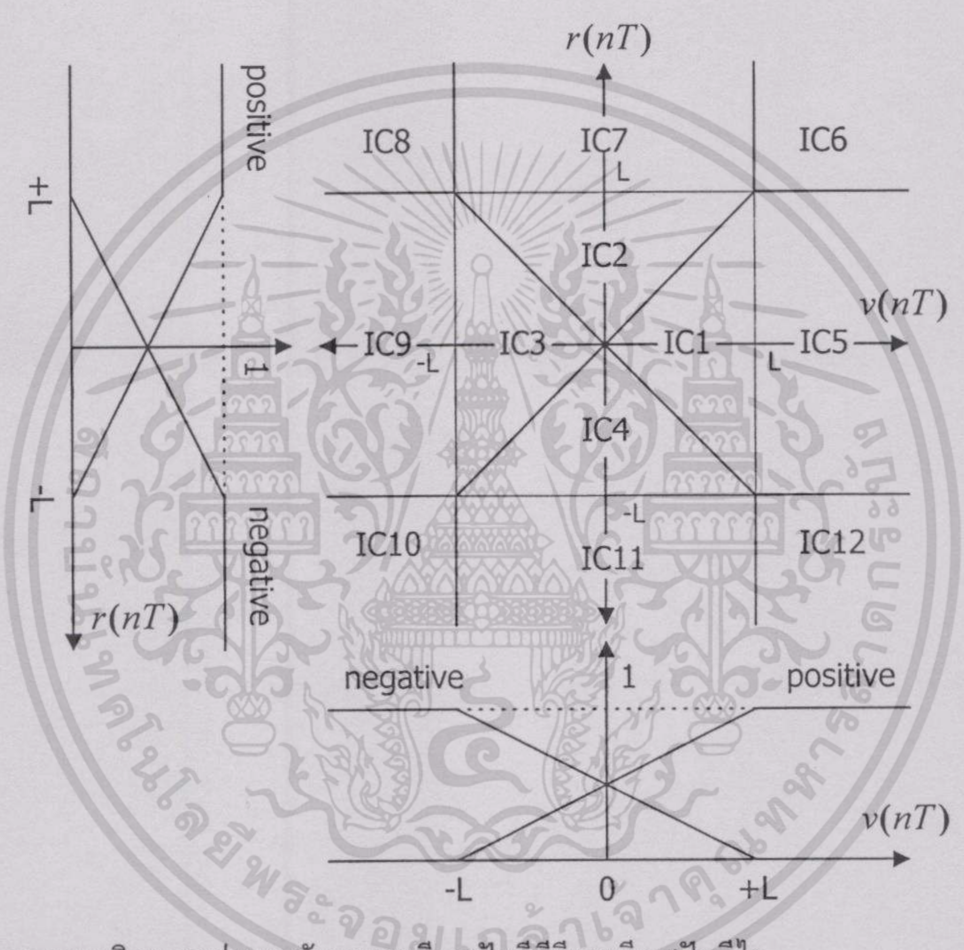
$(R6)$ IF $v(nT)$ is positive AND $r(nT)$ is negative
THEN I-output is $\Delta u_{I_2}(nT) = a_2 v(nT)$

$(R7)$ IF $v(nT)$ is negative AND $r(nT)$ is positive (3.31)
THEN I-output is $\Delta u_{I_3}(nT) = a_3 v(nT)$

$(R8)$ IF $v(nT)$ is negative AND $r(nT)$ is negative
THEN I-output is $\Delta u_{I_4}(nT) = a_4 v(nT)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Δu_{PD_i} และ Δu_{I_i} คือค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของกฎการควบคุมที่ i ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอตามลำดับ เมื่อ $(i = 1,2,3,4)$ a_i, b_i และ c_i คือพารามิเตอร์ที่จะออกแบบเพื่อให้เกิดผลตอบสนองที่ดีและมีเสถียรภาพ แต่ละกฎการควบคุมจะแอคทีฟในบริเวณที่ต่างกัน เช่นเดียวกับตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี ดังรูปที่ 3.4 ในการหาค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมในแต่ละบริเวณ ได้แบ่งอินพุตสเปซของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและทีเอสฟัซซีไอออกเป็น 12 บริเวณที่เหมือนกัน ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงอินพุตสเปซของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและทีเอสฟัซซีไอ

อาศัยแนวทางเดียวกับการหาเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละ IC ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอและทีเอสฟัซซีดี จะได้เอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและทีเอสฟัซซีไอเป็นไปตามสมการที่ (3.32) และ (3.33) ตามลำดับ

$$\Delta u_{PD}(nT) = K_p(v,r)v(nT) + K_d(v,r)r(nT) \tag{3.32}$$

$$\Delta u_I(nT) = K_i(v,r)v(nT) \tag{3.33}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.32) พบว่ามีลักษณะคล้ายกับสมการของตัวควบคุมพีดีดั้งเดิมในสมการที่ (3.23) และสมการที่ (3.33) คล้ายกับสมการของตัวควบคุมไอดั้งเดิมในสมการที่ (3.28) แต่มีความแตกต่างกันตรงค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีมีค่าเกนไม่คงที่ เป็นฟังก์ชันของสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม สำหรับค่าเกน $K_p(v,r)$ และ $K_d(v,r)$ ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและค่าเกน $K_i\,(v,r)$ ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอในบริเวณ IC1 ถึง IC12 แสดงได้ดังตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.6 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี บริเวณ IC1 ถึง IC12

IC No.	$K_p(v,r)$	$K_d(v,r)$
1	$\dfrac{\left(L-\lvert v(nT)\rvert\right)(b_3+b_4)+\left(L+r(nT)\right)b_1+\left(L-r(nT)\right)b_2}{4L-2\lvert v(nT)\rvert}$	$\dfrac{\left(L-\lvert v(nT)\rvert\right)(c_3+c_4)+\left(L+r(nT)\right)c_1+\left(L-r(nT)\right)c_2}{4L-2\lvert v(nT)\rvert}$
2	$\dfrac{\left(L-\lvert r(nT)\rvert\right)(b_2+b_4)+\left(L+v(nT)\right)b_1+\left(L-v(nT)\right)b_3}{4L-2\lvert r(nT)\rvert}$	$\dfrac{\left(L-\lvert r(nT)\rvert\right)(c_2+c_4)+\left(L+v(nT)\right)c_1+\left(L-v(nT)\right)c_3}{4L-2\lvert r(nT)\rvert}$
3	$\dfrac{\left(L-\lvert v(nT)\rvert\right)(b_1+b_2)+\left(L+r(nT)\right)b_3+\left(L-r(nT)\right)b_4}{4L-2\lvert v(nT)\rvert}$	$\dfrac{\left(L-\lvert v(nT)\rvert\right)(c_1+c_2)+\left(L+r(nT)\right)c_3+\left(L-r(nT)\right)c_4}{4L-2\lvert v(nT)\rvert}$
4	$\dfrac{\left(L-\lvert r(nT)\rvert\right)(b_1+b_3)+\left(L+v(nT)\right)b_2+\left(L-v(nT)\right)b_4}{4L-2\lvert r(nT)\rvert}$	$\dfrac{\left(L-\lvert r(nT)\rvert\right)(c_1+c_3)+\left(L+v(nT)\right)c_2+\left(L-v(nT)\right)c_4}{4L-2\lvert r(nT)\rvert}$
5	$\dfrac{\left(L+r(nT)\right)b_1+\left(L-r(nT)\right)b_2}{2L}$	$\dfrac{\left(L+r(nT)\right)c_1+\left(L-r(nT)\right)c_2}{2L}$
7	$\dfrac{\left(L+v(nT)\right)b_1+\left(L-v(nT)\right)b_3}{2L}$	$\dfrac{\left(L+v(nT)\right)c_1+\left(L-v(nT)\right)c_3}{2L}$
9	$\dfrac{\left(L+r(nT)\right)b_3+\left(L-r(nT)\right)b_4}{2L}$	$\dfrac{\left(L+r(nT)\right)c_3+\left(L-r(nT)\right)c_4}{2L}$
11	$\dfrac{\left(L+v(nT)\right)b_2+\left(L-v(nT)\right)b_4}{2L}$	$\dfrac{\left(L+v(nT)\right)c_2+\left(L-v(nT)\right)c_4}{2L}$
6	b_1	c_1
8	b_3	c_3
10	b_4	c_4
12	b_2	c_2

ตารางที่ 3.6 ค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟีซีไอ บริเวณ IC1 ถึง IC12

IC No.	$K_i(v,r)$
1	$\dfrac{L\sum_{i=1}^{4}a_i-(a_3+a_4)\lvert v(nT)\rvert+(a_1-a_2)r(nT)}{4L-2\lvert v(nT)\rvert}$
2	$\dfrac{L\sum_{i=1}^{4}a_i-(a_2+a_4)\lvert r(nT)\rvert+(a_1-a_3)v(nT)}{4L-2\lvert r(nT)\rvert}$
3	$\dfrac{L\sum_{i=1}^{4}a_i-(a_1+a_2)\lvert v(nT)\rvert+(a_3-a_4)r(nT)}{4L-2\lvert v(nT)\rvert}$
4	$\dfrac{L\sum_{i=1}^{4}a_i-(a_1+a_3)\lvert r(nT)\rvert+(a_2-a_4)v(nT)}{4L-2\lvert r(nT)\rvert}$
5	$\dfrac{L(a_1+a_2)+(a_1-a_2)r(nT)}{2L}$
7	$\dfrac{L(a_1+a_3)+(a_1-a_3)v(nT)}{2L}$
9	$\dfrac{L(a_3+a_4)+(a_3-a_4)r(nT)}{2L}$
11	$\dfrac{L(a_2+a_4)+(a_2-a_4)v(nT)}{2L}$
6	a_1
8	a_3
10	a_4
12	a_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การวิเคราะห์เสถียรภาพ

เสถียรภาพเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากประการหนึ่ง ไม่เพียงแต่ในการออกแบบระบบสถิต(static system)เท่านั้น แต่ยังหมายรวมถึงระบบพลวัต(dynamic system)ทั้งหมดด้วย ไม่ว่าเงื่อนไขการทำงานของระบบเป็นอย่างไร ต้องตรวจสอบดูเสมอว่า ระบบเสถียรหรือไม่เมื่อเกิดมีการรบกวนหรือสภาวะเริ่มต้นของระบบเปลี่ยนแปลงไป โดยพื้นฐานแล้วเสถียรภาพหมายความว่า ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยระหว่างสภาวะจริงในการทำงานของระบบควบคุมกับสภาวะที่ระบบได้รับการออกแบบมา ไม่ทำให้พฤติกรรมของระบบเปลี่ยนไปโดยสิ้นเชิง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบนั้น จุดประสงค์หลักก็เพื่อศึกษาดูว่าระบบควบคุมนั้นมีเสถียรภาพหรือไม่ และสามารถออกแบบตัวควบคุมที่ควบคุมให้ระบบนั้นมีเสถียรภาพได้หรือไม่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เมื่อระบบถูกรบกวนหรือสภาวะเริ่มต้นของระบบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมแล้ว ระบบสามารถปรับ/ลู่เข้าสู่สถานะสมดุลย์(equilibrium state) หรือสามารถปรับ/ลู่เข้าใกล้สถานะสมดุลย์ได้หรือไม่

ในบทนี้จะกล่าวถึงความหมายของเสถียรภาพแบบต่าง ๆ รวมทั้งนิยามของทฤษฎีบทเกนน้อย ซึ่งใช้ในการหาเงื่อนไขเสถียรภาพในวิทยานิพนธ์นี้ การหาเงื่อนไขเสถียรภาพแบบบีไอบีโอของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและทีเอสฟัซซีพีดี+ไอที่ได้นำเสนอโครงสร้างในบทที่ 3 โดยอาศัยแนวทางเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอในงานวิจัย [10,15] ซึ่งปรับปรุงเพิ่มเติมจากงานวิจัยเดิมคือ ให้เป็นเงื่อนไขเสถียรภาพที่สามารถใช้ได้กับระบบที่มีความไม่แน่นอน

4.1 เสถียรภาพแบบโกลบอล โลคอลและบีไอบีโอ

เสถียรภาพแบบโกลบอล(global stability)และเสถียรภาพแบบโลคอล(local stability) นั้นจะเกี่ยวข้องกับจุดสมดุลย์ ระบบมีเสถียรภาพแบบโกลบอลเชิงอะซิมโถด(globally asymptotically stable)ก็ต่อเมื่อ ระบบมีเสถียรภาพเชิงอะซิมโถดสำหรับสถานะเริ่มต้น(initial state) ใด ๆ แม้ว่าจะไกลจากจุดสมดุลย์ก็ตาม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ระบบมีเสถียรภาพในสเตทเสปซ(state space) ทั้งหมด ในทางตรงกันข้าม เสถียรภาพแบบโลคอลนั้น จะการันตีเสถียรภาพของระบบเพียงบริเวณรอบ ๆ จุดสมดุลย์เท่านั้น เรียกบริเวณรอบ ๆ จุดสมดุลย์นี้ว่าเบซิน(basin) นั่นคือหากสถานะเริ่มต้นอยู่ภายในเบซิน ระบบก็จะมีเสถียรภาพ แต่ถ้าหากไม่อยู่ภายในเบซิน ระบบก็จะไม่มีเสถียรภาพ สำหรับระบบเชิงเส้นใด ๆ หากระบบมีเสถียรภาพแบบโลคอลก็จะสามารถสรุปได้ว่า ระบบมีเสถียรภาพแบบโกลบอลด้วย และในทางกลับกันหากระบบมีเสถียรภาพแบบโกลบอลก็จะสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

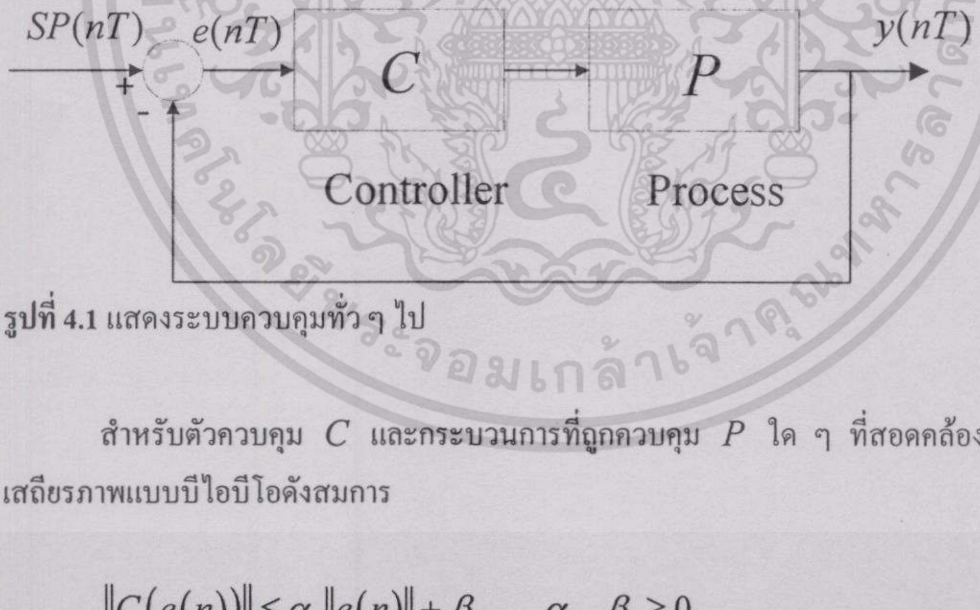
สรุปว่าระบบมีเสถียรภาพแบบโลคอลได้เช่นกัน แต่สำหรับระบบไม่เชิงเส้นแล้วนั้น การมีเสถียรภาพแบบโลคอลไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบมีเสถียรภาพแบบโกลบอล

ในระบบใด ๆ มีสัญญาณอินพุตที่มีขอบเขตแล้ว และให้สัญญาณเอาท์พุตที่มีขอบเขตด้วยตราบเท่าที่สัญญาณอินพุตที่มีขอบเขตจำกัดป้อนเข้ามา เรียกระบบดังกล่าวว่า มีเสถียรภาพแบบบีไอบีโอ(BIBO stability) คำจำกัดความเสถียรภาพของบีไอบีโอนั้น เป็นคำจำกัดความของเสถียรภาพที่ค่อนข้างกว้าง ในกรณีที่มีสัญญาณอินพุตที่เข้ามาในระบบมีขอบเขตจำกัด และเอาท์พุตของระบบเกิดการแกว่ง(oscillate) ด้วยขนาดที่มีขอบเขตแล้ว ระบบมีเสถียรภาพแบบบีไอบีโอ แต่ระบบจะไม่เสถียรเชิงอะซิมโถด

ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ทฤษฎีบทเกนน้อย เพื่อหาเงื่อนไขเสถียรภาพแบบบีไอบีโอ

4.2 ทฤษฎีบทเกนน้อย

ทฤษฎีบทเกนน้อยเป็นวิธีการตรวจสอบเสถียรภาพแบบบีไอบีโอของระบบควบคุมทั่วๆ ไปทั้งที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อ C คือตัวควบคุมฟัซซี และ P คือกระบวนการที่ถูกควบคุม



รูปที่ 4.1 แสดงระบบควบคุมทั่ว ๆ ไป

สำหรับตัวควบคุม C และกระบวนการที่ถูกควบคุม P ใด ๆ ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพแบบบีไอบีโอดังสมการ

$$\left\|C\left(e(n)\right)\right\| \le \alpha_1 \left\|e(n)\right\| + \beta_1, \quad \alpha_1,\ \beta_1 \ge 0, \tag{4.1}$$

และ

$$\left\|P\left(u(n)\right)\right\| \le \alpha_2 \left\|u(n)\right\| + \beta_2, \quad \alpha_2,\ \beta_2 \ge 0, \tag{4.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว จะสามารถหาเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมวงปิดได้โดยใช้ทฤษฎีบทเกนน้อย ซึ่งมีเงื่อนไขคือ

$$\alpha_1.\alpha_2 < 1 \tag{4.3}$$

เมื่อ α_1, α_2, β_1 และ β_2 คือค่าคงที่ $\|\bullet\|$ ในวิทยานิพนธ์นี้หมายถึง $\|\bullet\|_\infty$ และสำหรับกระบวนการ P ใด ๆ ที่ถูกควบคุม สามารถจัดรูปสมการที่ (4.2) ให้อยู่ในรูปของ

$$\left\|P\left(u(n)\right)\right\| \le \|P\|.\left|u(n)\right| \qquad \text{เมื่อ } \|P\| < \infty \tag{4.4}$$

เมื่อ $\|P\|$ คือ นอร์มปฏิบัติการ (operator norm) ของกระบวนการที่ถูกควบคุม หมายถึง ค่าอัตราขยาย(magnitude) ของกระบวนการที่มากที่สุด นั่นคือ สำหรับกระบวนการเชิงเส้นไม่เปลี่ยนตามเวลา(linear time-invariant) อัตราขยายหรือค่านอร์มของกระบวนการมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่สำหรับกระบวนการอื่น ๆ เช่น กระบวนการไม่เป็นเชิงเส้นและกระบวนการเปลี่ยนตามเวลา เป็นต้น ขนาดของอัตราขยายจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับจุดปฏิบัติการ(operating point)

ดังนั้น การพิจารณาหาค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอก็คือการหาค่า α_1 เมื่อรู้ค่า $\alpha_2 = \|P\|$

4.3 เสถียรภาพแบบบีไอบีโอของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี

ในการหาค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีนั้น จะเป็นการหาค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอและนอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี จากนั้นจึงหาเงื่อนไขในการรวมค่านอร์มของตัวควบคุมทั้งสองเข้าเป็นนอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี

4.3.1 เงื่อนไขค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ

จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 เอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอในบริเวณ IC1 ถึง IC12 คือ

$$\Delta u_{PI}(nT) = K_i\,(e,r)e(nT) + K_p(e,r)r(nT) \tag{4.5}$$

ในการหาเงื่อนไขค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอในบริเวณ IC1 จะแทนค่าเกน $K_i\,(e,r)$ และ $K_p(e,r)$ ของบริเวณ IC1 ลงไปในสมการที่ (4.5) แล้วจึงหานอร์มตลอดทั้งสองข้างของสมการจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left\|\Delta u_{PI}(nT)\right\| = \left\| \left[\frac{\left(L-|e(nT)|\right)\left(a_3+a_4\right)+\left(L+r(nT)\right)a_1+\left(L-r(nT)\right)a_2}{4L-2|e(nT)|} \right] e(nT) \right.$$

$$\left. + \left[\frac{\left(L-|e(nT)|\right)\left(b_3+b_4\right)+\left(L+r(nT)\right)b_1+\left(L-r(nT)\right)b_2}{4L-2|e(nT)|} \right] r(nT) \right\|$$

ค่านอร์มจะมีค่ามากที่สุดเมื่อกำหนดให้ $L-|e(nT)|=L$ และ $4L-2|e(nT)|=2L$ จะได้

$$\left\|\Delta u_{PI}(nT)\right\| \le \frac{1}{2L}\left|\left[L\left(a_3+a_4\right)+(L+r(nT))a_1+(L-r(nT))a_2\right]e(nT)\right.$$

$$\left.+\left[L\left(b_3+b_4\right)+(L+r(nT))b_1+(L-r(nT))b_2\right]r(nT)\right|$$

แทนค่า $r(nT)=e\left(nT\right)-e\left(nT-T\right)$ แล้วจัดรูปสมการข้างบนใหม่

$$\left\|\Delta u_{PI}(nT)\right\| \le \frac{1}{2L}\left|\left[L\sum_{i=1}^{4}\left(a_i+b_i\right)+e(nT)\left(a_1-a_2+b_1-b_2\right)\right]e(nT)\right.$$

$$\left.+\left[e(nT-T)\left(b_1-b_2\right)-L\sum_{i=1}^{4}b_i+L\left(a_1-a_2+2b_1-2b_2\right)\right]e(nT-T)\right|$$

แทนค่า $M_e=\sup_{n\ge1}\left|e(nT-T)\right|$ จะได้

$$\left\|\Delta u_{PI}(nT)\right\| \le \alpha_{PI}\left|e(nT)\right|+\beta_{PI} \tag{4.6}$$

โดยที่ $\alpha_{PI}=\frac{1}{2}\left[\sum_{i=1}^{4}\left(a_i+b_i\right)+\left|a_1-a_2+b_1-b_2\right|\right]$ คือค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ และ $\beta_{PI}=\frac{1}{2L}\left[M_e\left|b_1-b_2\right|+L\sum_{i=1}^{4}b_i+L\left|a_1-a_2+b_1-b_2\right|\right]M_e$ คือค่าคงที่ ในทำนองเดียวกัน สามารถหาค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอในบริเวณ IC2 ถึง IC12 และสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอในบริเวณ IC1ถึง IC12

IC No.	α_{PI}
IC 1	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(a_i+b_i)+\lvert a_1-a_2+b_1-b_2\rvert}{2}$
IC 2	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(a_i+b_i)+\lvert a_1-a_3+b_1-b_3\rvert}{2}$
IC 3	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(a_i+b_i)+\lvert a_3-a_4+b_3-b_4\rvert}{2}$
IC 4	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(a_i+b_i)+\lvert a_2-a_4+b_2-b_4\rvert}{2}$
IC 5	$a_1+a_2+b_1+b_2$
IC 7	$a_1+a_3+b_1+b_3$
IC 9	$a_3+a_4+b_3+b_4$
IC 11	$a_2+a_4+b_2+b_4$
IC 6	a_1+b_1
IC 8	a_3+b_3
IC 10	a_4+b_4
IC 12	a_2+b_2

4.3.2 เงื่อนไขค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดี

จากการวิเคราะห์เพื่อหาเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีบริเวณ IC1 ถึง IC12ในบทที่ 3 ได้

$$\Delta u_D(nT)=K_d(y_d,\Delta y)\Delta y(nT) \tag{4.7}$$

เมื่อแทนค่าเกน $K_d(y_d,\Delta y)$ ของบริเวณ IC1ลงไปในสมการที่ (4.7) เพื่อหาเงื่อนไขค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีในบริเวณ IC1จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta u_D(nT) = \left[\frac{L\sum_{i=1}^{4} c_i - (c_1 + c_2)\,|\,y_d(nT)\,| + (c_4 - c_3)\Delta y(nT)}{4L - 2\,|\,y_d(nT)\,|}\right]\Delta y(nT)$$

หานอร์มทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\left\|\Delta u_D(nT)\right\| = \left\|\left[\frac{L\sum_{i=1}^{4} c_i - (c_1 + c_2)\,|\,y_d(nT)\,| + (c_4 - c_3)\Delta y(nT)}{4L - 2\,|\,y_d(nT)\,|}\right]\Delta y(nT)\right\|$$

แทนค่า $\Delta y(nT) = y(nT) - y(nT - T)$ และค่านอร์มจะมีค่ามากที่สุดเมื่อกำหนดให้ $4L - 2\,|\,y_d(nT)\,| = 2L$ นั่นคือ

$$\left\|\Delta u_D(nT)\right\| \le \frac{1}{2L}\left|\left[L\sum_{i=1}^{4} c_i - (c_1 + c_2)\left|y_d(nT)\right| + (c_4 - c_3)\Delta y(nT)\right]\left(y(nT) - y(nT - T)\right)\right|$$

กระจายนอร์มเข้าไปในสมการแล้วแทน $\left|y_d(nT)\right| = \left|\Delta y(nT)\right| = L$ และ $M_y = \sup_{n\ge 1}\left|y(nT - T)\right|$ จะได้

$$\left\|\Delta u_D(nT)\right\| \le \alpha_D\left|y(nT)\right| + \beta_D \tag{4.8}$$

โดยที่ $\alpha_D = \frac{1}{2}\left[\sum_{i=1}^{4} c_i + (c_1 + c_2) + \left|(c_4 - c_3)\right|\right]$ คือนอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีในบริเวณ IC1และ $\beta_D = \frac{1}{2}\left[\sum_{i=1}^{4} c_i + (c_1 + c_2) + \left|(c_4 - c_3)\right|\right]M_y$ คือค่าคงที่ อาศัยแนวทางเดียวกับ IC1 สามารถหาค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีในบริเวณ IC2ถึง IC12 ได้ และสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีในบริเวณ IC1ถึง IC12

IC No.	α_D
IC 1	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4} c_i + (c_1 + c_2) + \lvert (c_4 - c_3) \rvert}{2}$
IC 2	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4} c_i + (c_1 + c_3) + \lvert (c_4 - c_2) \rvert}{2}$
IC 3	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4} c_i + (c_3 + c_4) + \lvert (c_2 - c_1) \rvert}{2}$
IC 4	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4} c_i + (c_2 + c_4) + \lvert (c_3 - c_1) \rvert}{2}$
IC 5	$c_4 + c_3$
IC 7	$c_4 + c_2$
IC 9	$c_2 + c_1$
IC 11	$c_3 + c_1$
IC 6	c_4
IC 8	c_2
IC 10	c_1
IC 12	c_3

4.3.3 เงื่อนไขค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี

เนื่องจาก

$$u_{PI+D}(nT) = u_{PI}(nT) - u_D(nT)$$

$$= \Delta u_{PI}(nT) + u_{PI}(nT-T) - \Delta u_D(nT) + u_D(nT-T)$$

เมื่อหาค่านอร์มของสมการข้างบนจะได้

$$\lVert u_{PI+D}(nT) \rVert = \lVert \Delta u_{PI}(nT) + u_{PI}(nT-T) - \Delta u_D(nT) + u_D(nT-T) \rVert$$

$$\leq \lVert \Delta u_{PI}(nT) \rVert + \lVert \Delta u_D(nT) \rVert + M_{PI} + M_D \tag{4.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $M_{PI} = \sup_{n\geq 1}|u_{PI}(nT-T)|$ และ $M_D = \sup_{n\geq 1}|u_D(nT-T)|$ แทนค่า $\|\Delta u_{PI}(nT)\|$ จากสมการที่ (4.6) และค่า $\|\Delta u_D(nT)\|$ จากสมการที่ (4.8) ลงในสมการที่ (4.9) จะได้

$$\|u_{PI+D}(nT)\| \leq \alpha_{PI}|e(nT)| + \beta_{PI} + \alpha_D|y(nT)| + \beta_D + M_{PI} + M_D$$

แทนค่า $y(nT) = SP(nT) - e(nT)$ ลงในสมการข้างบน จะได้

$$\|u_{PI+D}(nT)\| \leq \alpha_1|e(nT)| + \beta_1 \tag{4.10}$$

โดยที่ $\alpha_1 = \alpha_{PI} + \alpha_D$ และ $\beta_1 = \alpha_D|SP| + \beta_{PI} + \beta_D + M_{PI} + M_D$ เมื่อแทนค่า $\alpha_1 = \alpha_{PI} + \alpha_D$ และ $\alpha_2 = \|P\|$ ลงในสมการที่ (4.3) แล้ว จะได้เงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี ดังนี้

$$(\alpha_{PI} + \alpha_D).\|P\| < 1 \tag{4.11}$$

นั่นคือ ถ้าออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี ให้มีค่าพารามิเตอร์ a_i, b_i และ c_i $(i = 1, 2, 3, 4)$ สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (4.11) แล้ว ก็จะสามารถประกันเสถียรภาพของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีได้ หากตัดเงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีดีออกไป ก็จะเหลือเพียงเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ ซึ่งพบว่าตรงกับเงื่อนไขที่มีการวิเคราะห์มาแล้วในงานวิจัย[10]

4.4 เสถียรภาพแบบบีไอบีโอของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ

อาศัยแนวทางเดียวกับการหาค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี เงื่อนไขค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี คือ

$$\|\Delta u_{PD}(nT)\| \leq \alpha_{PD}|e(nT)| + \beta_{PD} \tag{4.12}$$

และตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอ คือ

$$\|\Delta u_I(nT)\| \leq \alpha_I|e(nT)| + \beta_I \tag{4.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ β_{PD} และ β_I คือค่าคงที่ α_{PD} และ α_I คือนอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอตามลำดับ และสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดีและทีเอสฟัซซีไอ

IC No.	α_{PD}	α_I
IC 1	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(b_i+c_i)+\lvert b_1-b_2+c_1-c_2\rvert}{2}$	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(a_i)+\lvert a_1-a_2\rvert}{2}$
IC 2	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(b_i+c_i)+\lvert b_1-b_3+c_1-c_3\rvert}{2}$	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(a_i)+\lvert a_1-a_3\rvert}{2}$
IC 3	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(b_i+c_i)+\lvert b_3-b_4+c_3-c_4\rvert}{2}$	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(a_i)+\lvert a_3-a_4\rvert}{2}$
IC 4	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(b_i+c_i)+\lvert b_2-b_4+c_2-c_4\rvert}{2}$	$\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(a_i)+\lvert a_2-a_4\rvert}{2}$
IC 5	$b_1+b_2+c_1+c_2$	a_1+a_2
IC 7	$b_1+b_3+c_1+c_3$	a_1+a_3
IC 9	$b_3+b_4+c_3+c_4$	a_3+a_4
IC 11	$b_2+b_4+c_2+c_4$	a_2+a_4
IC 6	b_1+c_1	a_1
IC 8	b_3+c_3	a_3
IC 10	b_4+c_4	a_4
IC 12	b_2+c_2	a_2

ในการหาค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอนั้น หาได้โดยการรวมค่านอร์มของตัวควบคุม ทีเอสฟัซซีพีดีและนอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอ ตามแนวทางดังต่อไปนี้

จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 เอาท์พุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอมีสมการ

$$u_{PD+I}(nT) = u_{PD}(nT) + u_I(nT)$$

$$= \Delta u_{PD}(nT) - u_{PD}(nT-T) + \Delta u_I(nT) + u_I(nT-T)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อหาค่านอร์มของสมการเอาท์พุตของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ จะได้

$$\|u_{PD+I}(nT)\| = \|\Delta u_{PD}(nT) - u_{PD}(nT-T) + \Delta u_I(nT) + u_I(nT-T)\|$$

$$\leq \|\Delta u_{PD}(nT)\| + \|\Delta u_I(nT)\| + M_{PD} + M_I \tag{4.14}$$

เมื่อ $M_{PD} = \sup_{n\geq 1}|u_{PD}(nT-T)|$ และ $M_I = \sup_{n\geq 1}|u_I(nT-T)|$ แทนค่า $\|\Delta u_{PD}(nT)\|$ จากสมการที่ (4.12) และค่า $\|\Delta u_I(nT)\|$ จากสมการที่ (4.13) ลงในสมการที่ (4.14) จะได้

$$\|u_{PD+I}(nT)\| \leq \alpha_1 |e(nT)| + \beta_1 \tag{4.15}$$

โดยที่ $\alpha_1 = \alpha_{PD} + \alpha_I$ และ $\beta_1 = \beta_{PD} + \beta_I + M_{PD} + M_I$ เมื่อแทนค่า $\alpha_1 = \alpha_{PD} + \alpha_I$ และ $\alpha_2 = \|P\|$ ลงในเงื่อนไขเสถียรภาพแบบบีไอบีโอของสมการที่ (4.3) แล้วจะได้เงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ ดังต่อไปนี้

$$(\alpha_{PD} + \alpha_I).\|P\| < 1 \tag{4.16}$$

นั่นคือ ถ้าสามารถออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ ให้มีค่าพารามิเตอร์ a_i, b_i และ c_i $(i = 1, 2, 3, 4)$ สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (4.16) แล้ว ก็จะสามารถประกันเสถียรภาพของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอได้ และหากตัดเงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีไอออกไป ก็จะเหลือเพียงเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี ซึ่งพบว่าตรงกับเงื่อนไขที่มีการวิเคราะห์มาแล้วในงานวิจัย[6]

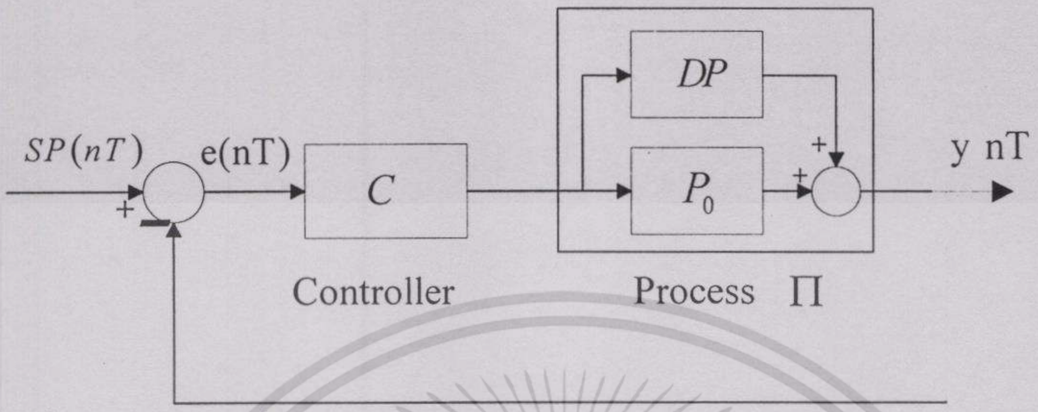
4.5 เงื่อนไขเสถียรภาพที่พิจารณาความไม่แน่นอน

ความไม่แน่นอนของระบบควบคุมสามารถเกิดได้หลายสาเหตุได้แก่ ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการละเลยคุณสมบัติทางพลวัตในการหาแบบจำลองของกระบวนการ เกิดจากคุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้น(nonlinearity)ของระบบควบคุม เกิดจากผลการทำลิเนียร์ไลเซชัน (linearization) เป็นต้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาความไม่แน่นอนที่เกิดจากการหาแบบจำลองของกระบวนการหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นความไม่แน่นอนที่คลาดเคลื่อนจากกระบวนการระบุ(nominal process) โดยสามารถอธิบายขอบเขตของความไม่แน่นอนให้อยู่ในเทอมของนอร์มอินฟินิตี้ ความไม่แน่นอนแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือความไม่แน่นอนเชิงบวกและความไม่แน่นอนเชิงคูณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 ความไม่แน่นอนเชิงบวก

ระบบที่มีความไม่แน่นอนเชิงบวกสามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.2 แสดงระบบที่มีความไม่แน่นอนเชิงบวก

โดยสามารถเขียนกระบวนการ P ให้อยู่ในรูปของสมการ

$$P = P_0 + \Delta P \tag{4.17}$$

เมื่อ P_0 คือกระบวนการระบุที่ถูกควบคุมและ ΔP คือความไม่แน่นอนที่เกิดจากการหาแบบจำลองของกระบวนการ และเมื่อแทน P จากสมการที่ (4.17) ลงในสมการที่ (4.11) ซึ่งเป็นสมการเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี จะได้

$$(\alpha_{PI} + \alpha_D).\|P_0 + \Delta P\| < 1 \tag{4.18}$$

จัดรูปสมการที่ (4.18) ใหม่โดยแทน $\|P_0 + \Delta P\| \le \|P_0\| + \|\Delta P\|$ จะได้

$$(\alpha_{PI} + \alpha_D).(\|P_0\| + \|\Delta P\|) < 1 \tag{4.19}$$

นั่นคือ สำหรับกระบวนการที่พิจารณาความไม่แน่นอนเชิงบวก ถ้าหากค่าความไม่แน่นอนที่อยู่ในรูปนอร์มอินฟินิตี้ $\|\Delta P\|$ สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพในสมการที่ (4.19) แล้ว จะสามารถทำให้ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีมีเสถียรภาพถึงแม้จะมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น โดยขอบเขตของความไม่แน่นอนมากที่สุดที่ยังทำให้มีเสถียรภาพ มีค่าตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\|\Delta P\| < \frac{1}{(\alpha_{PI} + \alpha_D)} - \|P_0\| \tag{4.20}$$

อาศัยแนวทางเดียวกับระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอที่มีการพิจารณาความไม่แน่นอนของกระบวนการที่อยู่ในรูปของความไม่แน่นอนเชิงบวก จะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อค่าของความไม่แน่นอน $\|\Delta P\|$ สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการ

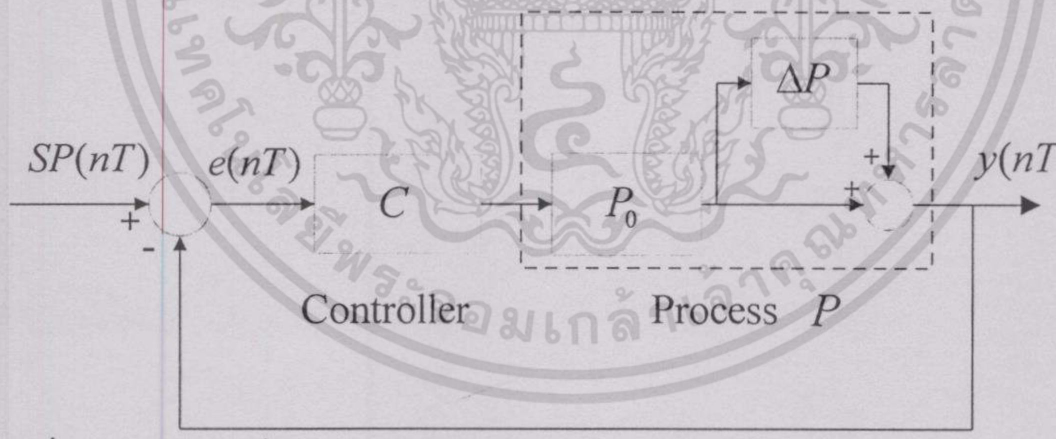
$$(\alpha_{PD} + \alpha_I).(\|P_0\| + \|\Delta P\|) < 1 \tag{4.21}$$

และขอบเขตของค่าความไม่แน่นอนมากที่สุดที่ยังทำให้ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอมีเสถียรภาพ แสดงได้ดังสมการ

$$\|\Delta P\| < \frac{1}{(\alpha_{PD} + \alpha_I)} - \|P_0\| \tag{4.22}$$

4.5.2 ความไม่แน่นอนเชิงคูณ

ระบบที่มีความไม่แน่นอนเชิงคูณ(multiplicative uncertainty)สามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.3 แสดงระบบที่มีความไม่แน่นอนเชิงคูณ

ระบบที่พิจารณาความไม่แน่นอนเชิงคูณ สามารถเขียนกระบวนการให้อยู่ในรูปของสมการ

$$P = P_0(1 + \Delta P) \tag{4.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่านอร์มของสมการที่ (4.23) จะได้

$$\|P\| = \|P_0(1+\Delta P)\|$$

$$= \|P_0\|\|(1+\Delta P)\|$$

$$\leq \|P_0\|(1+\|\Delta P\|) \tag{4.24}$$

แทนค่า $\|P\|$ จากสมการที่ (4.24) ลงในสมการที่ (4.11) และ (4.16) จะได้สมการ

$$(\alpha_{PI} + \alpha_D).\left[\|P_0\|(1+\|\Delta P\|)\right] < 1 \tag{4.25}$$

และ

$$(\alpha_{PD} + \alpha_I).\left[\|P_0\|(1+\|\Delta P\|)\right] < 1 \tag{4.26}$$

ตามลำดับ นั่นคือ สำหรับกระบวนการที่พิจารณาความไม่แน่นอนที่อยู่ในรูปของความไม่แน่นอนเชิงคูณ หากค่าของความไม่แน่นอน $\|\Delta P\|$ สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (4.25) และ (4.26) แล้ว จะสามารถทำให้ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอมีเสถียรภาพตามลำดับ โดยขอบเขตของความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ยังทำให้ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอยังคงมีเสถียรถาพต่อความไม่แน่นอนเชิงคูณ แสดงดังสมการที่ (4.27) และ (4.28) ตามลำดับ

$$\|\Delta P\| < \frac{1}{\|P_0\|(\alpha_{PI} + \alpha_D)} - 1 \tag{4.27}$$

$$\|\Delta P\| < \frac{1}{\|P_0\|(\alpha_{PD} + \alpha_I)} - 1 \tag{4.28}$$

นอกจากการวิเคราะห์หาเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมฟัซซีด้วยวิธีบีไอบีโอดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ยังสามารถใช้วิธีอื่นในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขเสถียรภาพได้อีกด้วย ไม่ว่าจะเป็นการใช้ทฤษฎีเสถียรภาพของลีอาปูนอฟ(Lyapunov stability theory)[17] อสมการเมตริกซ์เชิงเส้น (linear matrix inequalities :LMI)[18] เกณฑ์ของโปปอฟ(Popov criterion)[19] และเกณฑ์วงกลม (circle criterion)[20] เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

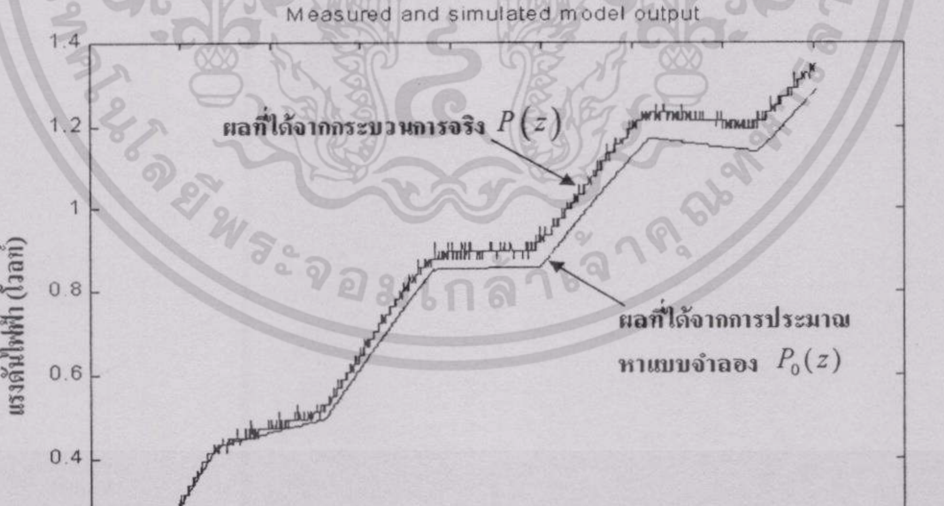
บทที่ 5

การจำลองการควบคุมและการทดลอง

เมื่อได้ออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอในบทที่ 3 พร้อมทั้งหาเงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทั้งสองในบทที่ 4 แล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการที่ถูกควบคุม การจำลองการควบคุมและการควบคุมกระบวนการจริงตามแนวทางที่ได้ออกแบบไว้โดยคำนึงถึงเงื่อนไขเสถียรภาพที่พิจารณาความไม่แน่นอน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะความไม่แน่นอนเชิงบวกที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนในการหาแบบจำลองของกระบวนการที่ถูกควบคุม

5.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังต้มน้ำ

การหาแบบจำลอง(modeling) คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาท์พุตของกระบวนการที่จะถูกควบคุม ในวิทยานิพนธ์นี้จะหาแบบจำลองของถังต้มน้ำ(รายละเอียดของถังและวงจรอยู่ในภาคผนวก ก) ให้อยู่ในรูปของสมการผลต่างเชิงเส้น(linear difference equation) โดยป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณแรงดันที่อยู่ในรูปของสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม(square wave) มีขนาดอยู่ระหว่าง 2 โวลท์และ 7 โวลท์ มีคาบเวลา 20 นาที แล้วทำการเก็บสัญญาณเอาท์พุตเป็นค่าอุณหภูมิของน้ำซึ่งอยู่ในหน่วยโวลท์ แสดงกราฟจริง ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงกราฟการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังต้มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.1 ผลที่ได้จากกระบวนการจริง $P(z)$ เป็นกราฟที่ได้จากการทดลองจริง มีค่าเวลาไร้ผลตอบสนอง 100 วินาที และทำการประมาณหาแบบจำลองของกระบวนการถังต้มน้ำ ให้มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากกระบวนการจริง โดยประมาณแบบจำลองให้มีสมการอันดับ 2 พบว่าสามารถเข้าใกล้กระบวนการจริงในระดับหนึ่ง ดังแสดงในกราฟที่ได้จากการประมาณหาแบบจำลอง ดังนั้นจะได้แบบจำลองอันดับ 2 ของกระบวนการถังต้มน้ำดังสมการ

$$P_0(z) = \frac{0.0002383\text{z} - 0.0001390}{z^{100}\left(\text{z}^2 - 0.4804\text{z} - 0.5193\right)} \tag{5.1}$$

โดยที่ $P_0(z)$ คือกระบวนการระบุ เมื่อหาค่าอินฟินิตี้นอร์มของ $P_0(z)$ จะได้

$$\left\|P_0(z)\right\| = \sup_{|z|=1}\left|P_0(z)\right| = 0.274 \tag{5.2}$$

ค่า $P_0(z)$ ที่หาได้ พบว่า ยังมีความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการจริง $P(z)$ ซึ่งสามารถหาขนาดของความคลาดเคลื่อน $\Delta P(z)$ ที่อยู่ในรูปของอินฟินิตี้นอร์มได้ โดยพิจารณาจากสมการ

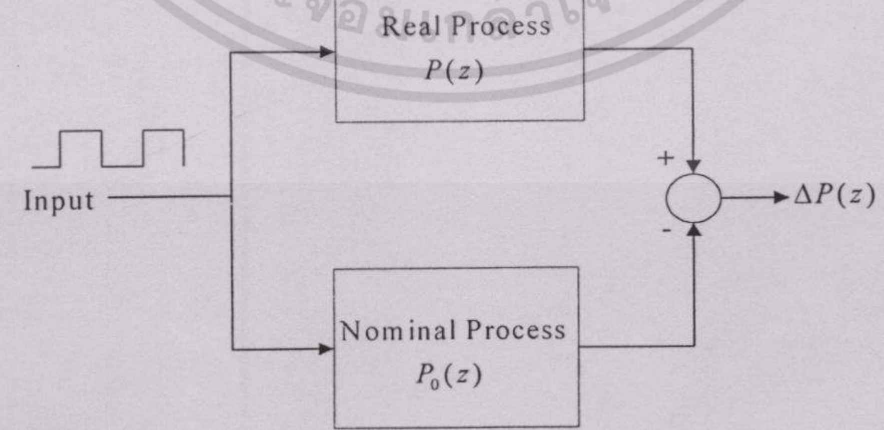
$$P(z) = P_0(z) + \Delta P(z)$$

$$\Delta P(z) = P(z) - P_0(z)$$

ใส่นอร์มทั้งสองข้าง จะได้

$$\left\|\Delta P(z)\right\| = \left\|P(z) - P_0(z)\right\| \tag{5.3}$$

นั่นคือจากสมการที่ (5.3) สามารถอธิบายได้ดังรูป



รูปที่ 5.2 แสดงบล็อคไดอะแกรมการหา $\Delta P(z)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า $\Delta P(z)$ โดยใช้ทูลบอกซ์ไอเด็นทิฟิเคชัน(identification tool box) ในโปรแกรมแมทแลป (matlab) ประมาณให้เป็นสมการอันดับ 5 สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta P(z) = \frac{3.178\times 10^{-5}z^4 - 0.001031z^3 + 0.0008998z^2 - 0.0004923z + 0.0006212}{z^{100}\left(z^5 - 0.1791z^4 - 0.2211z^3 - 0.2092z^2 - 0.1976z - 0.1906\right)} \tag{5.4}$$

จากสมการที่ (5.4) หาค่าความคลาดเคลื่อนของการหาแบบจำลองของถังต้มน้ำ

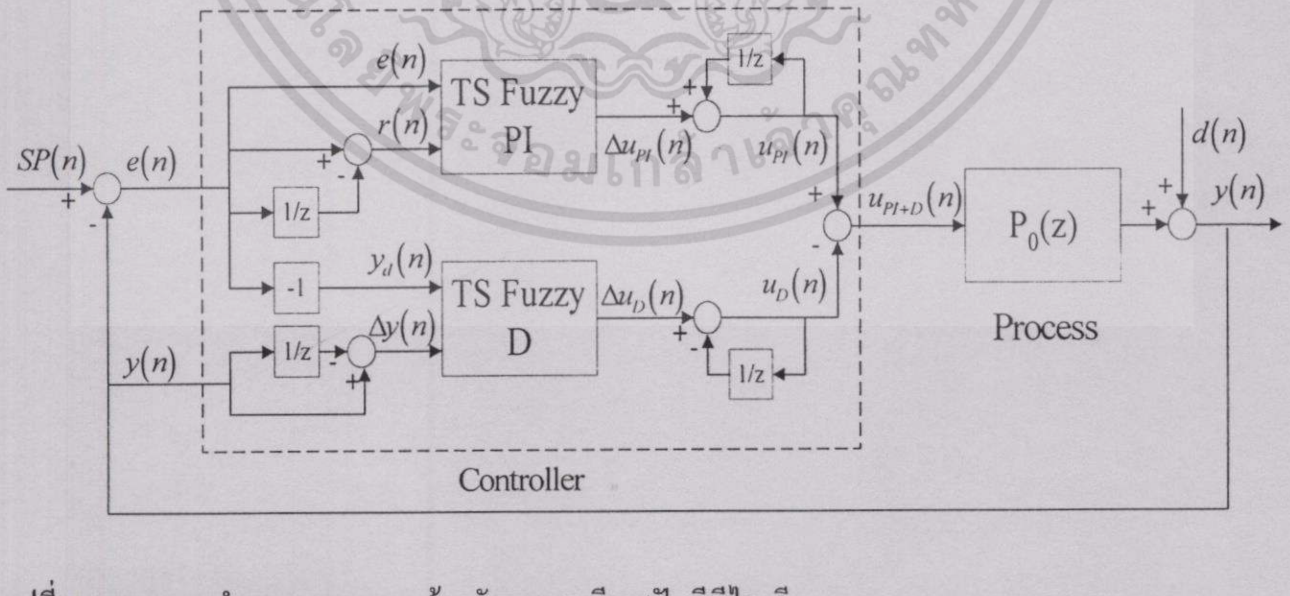
$$\left\|\Delta P(z)\right\| = \sup_{|z|=1}\left|\Delta P(z)\right| = 0.015$$

หลังจากที่ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังต้มน้ำและรู้ขอบเขตของความคลาดเคลื่อนในการหาแบบจำลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการจำลองการควบคุมเพื่อศึกษาผลตอบสนองและลักษณะสัญญาณควบคุม(control signal) ก่อนการควบคุมจริง

5.2 ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซี

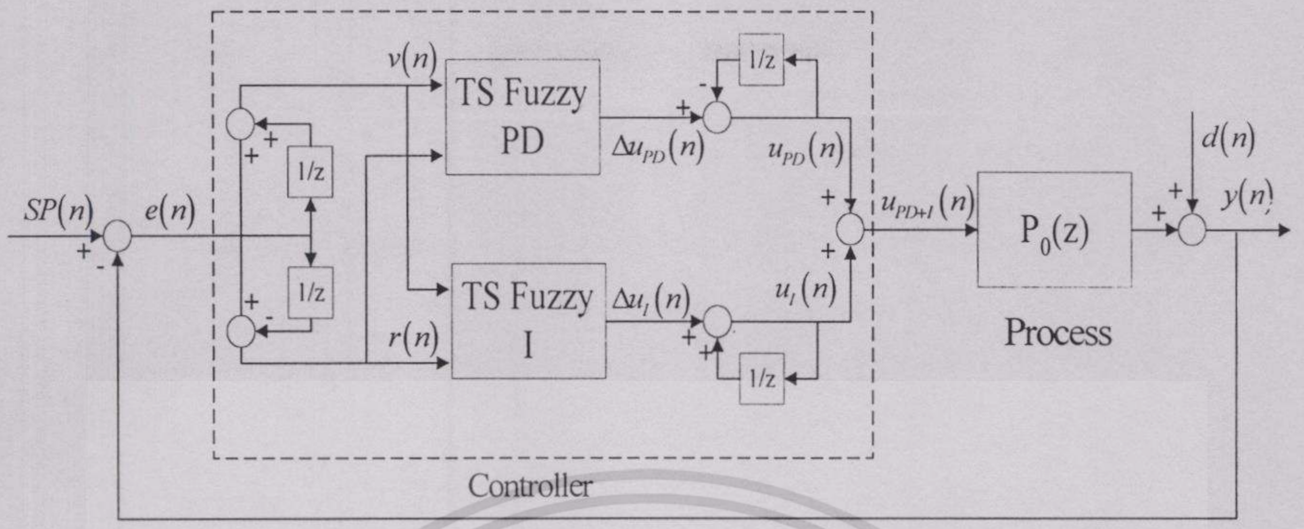
5.2.1 การจำลองการควบคุม

ระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี และทีเอสฟัซซีพีดี+ไอที่จะถูกจำลองการควบคุมนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 ตามลำดับ ในการจำลองการควบคุมได้ใช้คาบเวลาการสุ่ม $T = 1$ วินาที



รูปที่ 5.3 แสดงการจำลองการควบคุมด้วยตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงการจำลองการควบคุมด้วยตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ

ออกแบบตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีเพื่อจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศา โดยเลือกค่าขอบเขตของฟังก์ชันความเป็นสมาคชิก $L = 0.1$ และเลือกพารามิเตอร์ a_i, b_i และ c_i $(i = 1, 2, 3, 4)$ ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพในสมการที่ (4.10) ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบตัวควบคุม

	a_i	b_i	c_i
$i = 1$	0.002	0.1	0.1
$i = 2$	0.002	3	0.001
$i = 3$	0.00001	0.1	0.001
$i = 4$	0.00001	0.1	0.1

อันดับต่อไปจะแสดงว่าค่าพารามิเตอร์ที่เลือกมาสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพจริง โดยแทนค่าพารามิเตอร์ที่เลือกลงในตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ได้ค่านอร์มในแต่ละบริเวณดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.2 ค่านอร์มของส่วนการควบคุมในแต่ละบริเวณ

IC No.	α_{PI}	α_D	α_{PD}	α_I
IC 1	3.102	0.201	3.1515	0.002
IC 2	1.653	0.201	1.8005	0.003
IC 3	1.652	0.201	1.8005	0.002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

IC No.	α_{PI}	α_D	α_{PD}	α_I
IC 4	3.103	0.201	3.1515	0.003
IC 5	3.104	0.101	3.201	0.004
IC 7	0.202	0.101	0.301	0.002
IC 9	0.200	0.101	0.301	0.000
IC 11	3.102	0.101	3.201	0.002
IC 6	0.102	0.100	0.200	0.002
IC 8	0.100	0.001	0.101	0.000
IC 10	0.100	0.100	0.200	0.000
IC 12	3.002	0.001	0.301	0.002

นอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีมีค่ามากที่สุดที่บริเวณ IC 4 คือ $\alpha_{PI}+\alpha_D=3.304$ และจากสมการเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีที่พิจารณาความไม่แน่นอนเชิงบวก ในสมการที่ 4.19 คือ

$$(\alpha_{PI}+\alpha_D).(\|P_0\|+\|\Delta P\|)<1$$

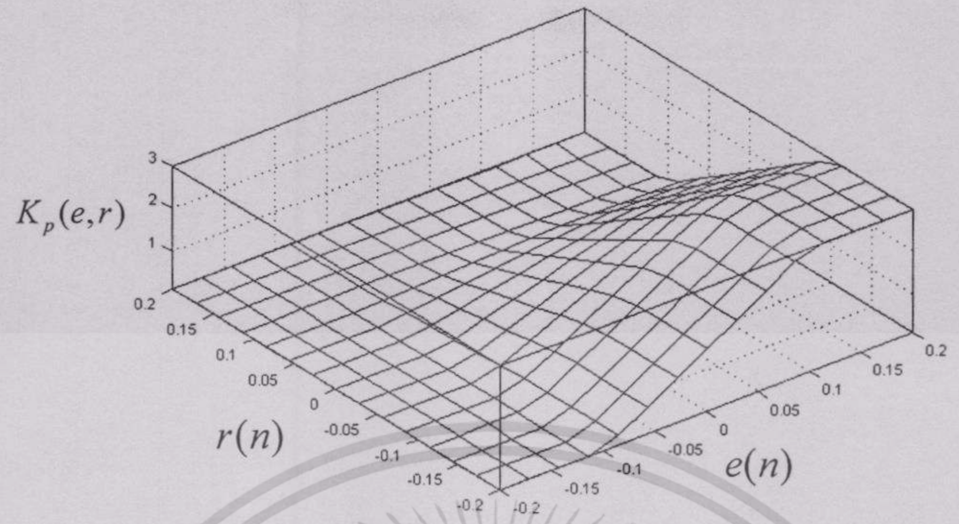
แทนค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีที่บริเวณ IC 4 ค่านอร์มของกระบวนการ $\|P_0(z)\|=0.274$ และค่านอร์มของความคลาดเคลื่อน $\|\Delta P(z)\|=0.015$ ลงในสมการข้างบน จะได้ $3.304\times(0.274+0.015)=0.955<1$ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพ นั่นคือ ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกมาสามารถทำให้ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีมีเสถียรภาพ และในทำนองเดียวกันสำหรับตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอนั้นจะมีค่านอร์มมากที่สุดในบริเวณ IC 5 คือ $\alpha_{PD}+\alpha_I=3.205$ และจากสมการเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีที่พิจารณาความไม่แน่นอนเชิงบวก ในสมการที่ 4.20 คือ

$$(\alpha_{PD}+\alpha_I).(\|P_0\|+\|\Delta P\|)<1$$

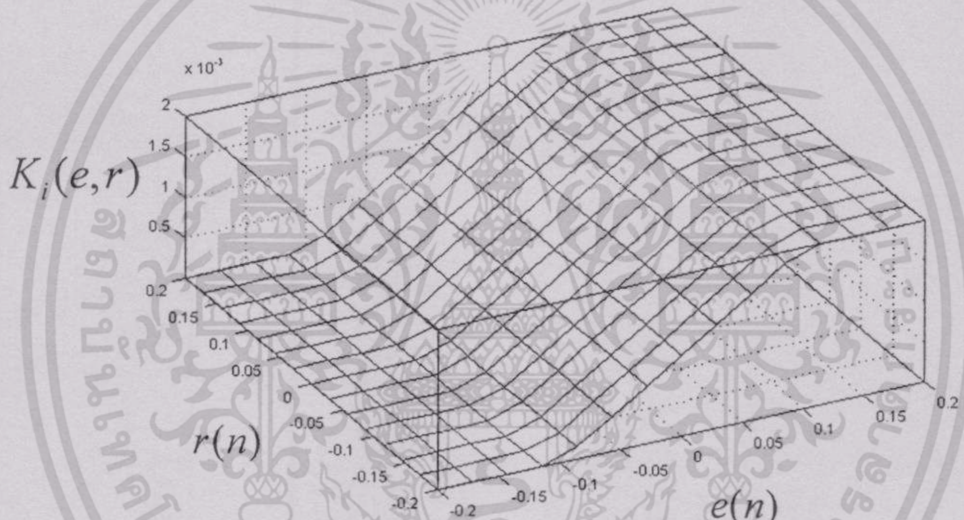
แทนค่านอร์มของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอในบริเวณ IC 5 ค่านอร์มของกระบวนการและค่านอร์มของความคลาดเคลื่อนลงในสมการข้างบน จะได้ $3.205\times(0.274+0.015)=0.926<1$ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพเช่นกัน นั่นคือ ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกมาสามารถทำให้ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอมีเสถียรภาพด้วย

ในการจำลองการควบคุม ค่าเกน $K_p(e,r)$ $K_i(e,r)$ และ $K_d(y_d,\Delta y)$ ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีมีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม แสดงดังรูปที่ 5.5

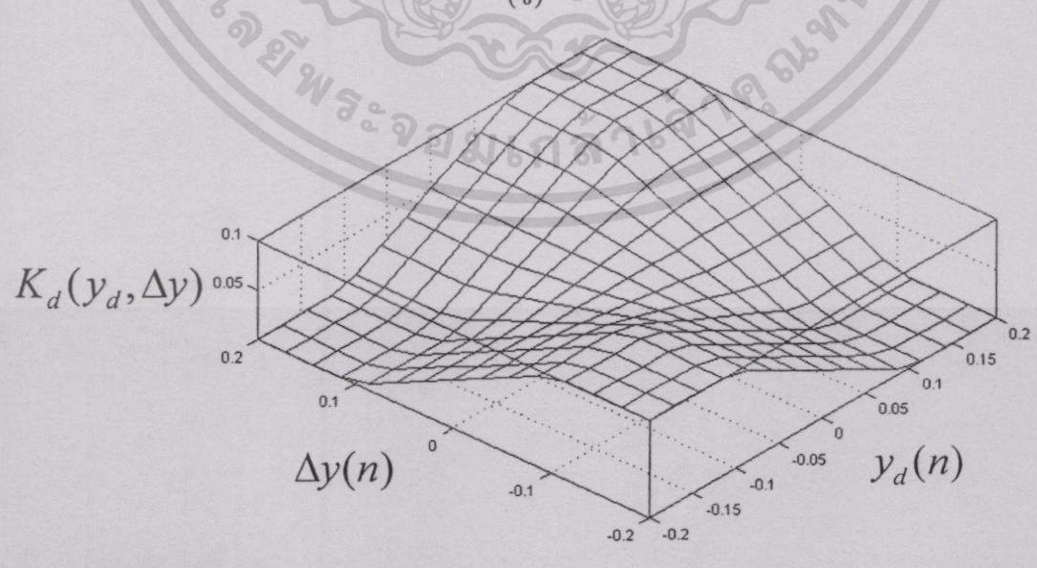
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

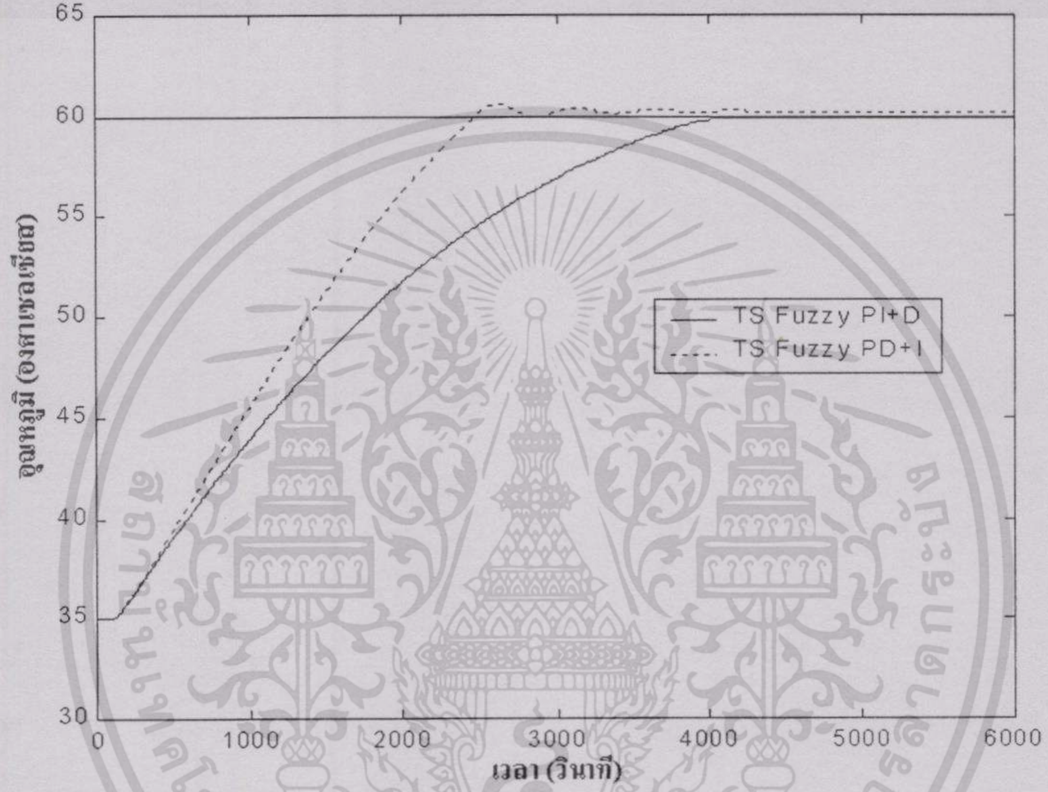


(ค)

รูปที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงค่าเกนของตัวควบคุม (ก) $K_p(e,r)$ (ข) $K_i(e,r)$ และ (ค) $K_d(y_d,\Delta y)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอนั้น ใช้ค่าเดียวกับตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างกันได้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอมีลักษณะเดียวกับรูปที่ 5.5 และแสดงผลการจำลองการควบคุมเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ ที่อุณหภูมิ 60 องศา ได้ดังรูปที่ 5.6



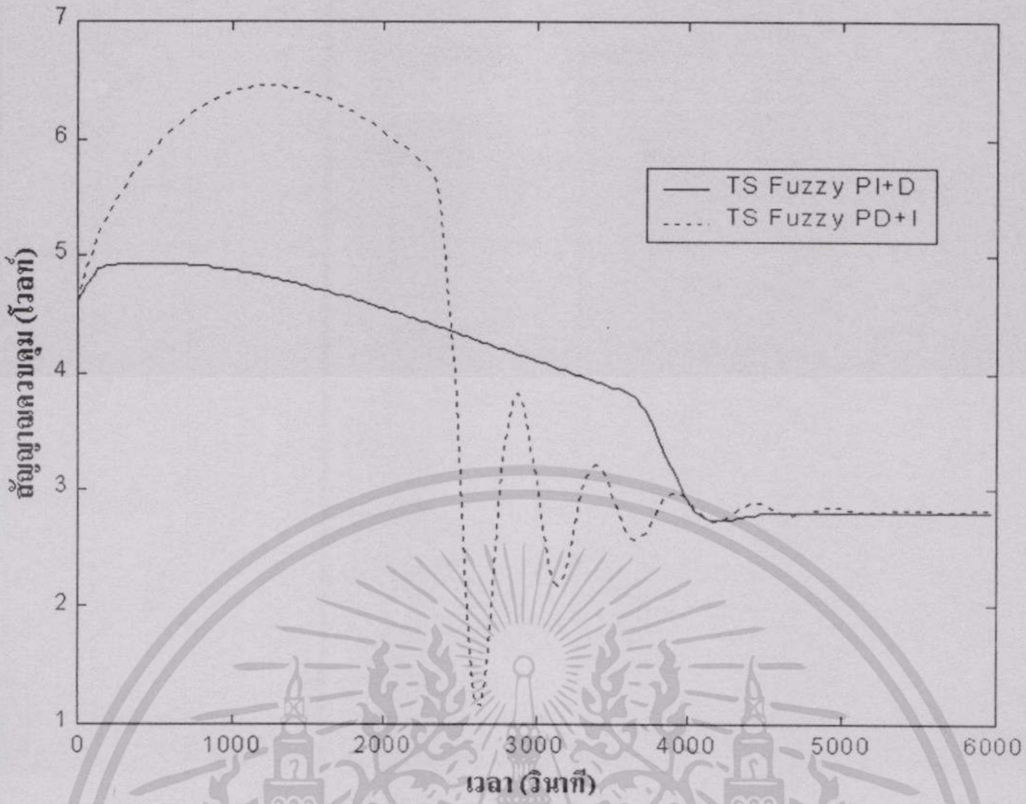
รูปที่ 5.6 แสดงผลตอบสนองของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศา

ตารางที่ 5.3 ผลเปรียบเทียบการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศา

Controller	t_r (s)	%overshoot	t_s (s)	$\%_{Ess}$
TS Fuzzy PI+D	2814	0.00	3559.0	0.00
TS Fuzzy PD+I	1800	0.96	2304.3	0.00

จากตารางที่ 5.3 พบว่า ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอให้ผลตอบสนองลู่เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี แต่มีค่าพุ่งเกิน(overshoot) และความผิดพลาดที่สถานะคงตัวเกิดขึ้น ในขณะที่ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีไม่มีค่าเหล่านี้เกิดขึ้นแต่จะเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ช้ากว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

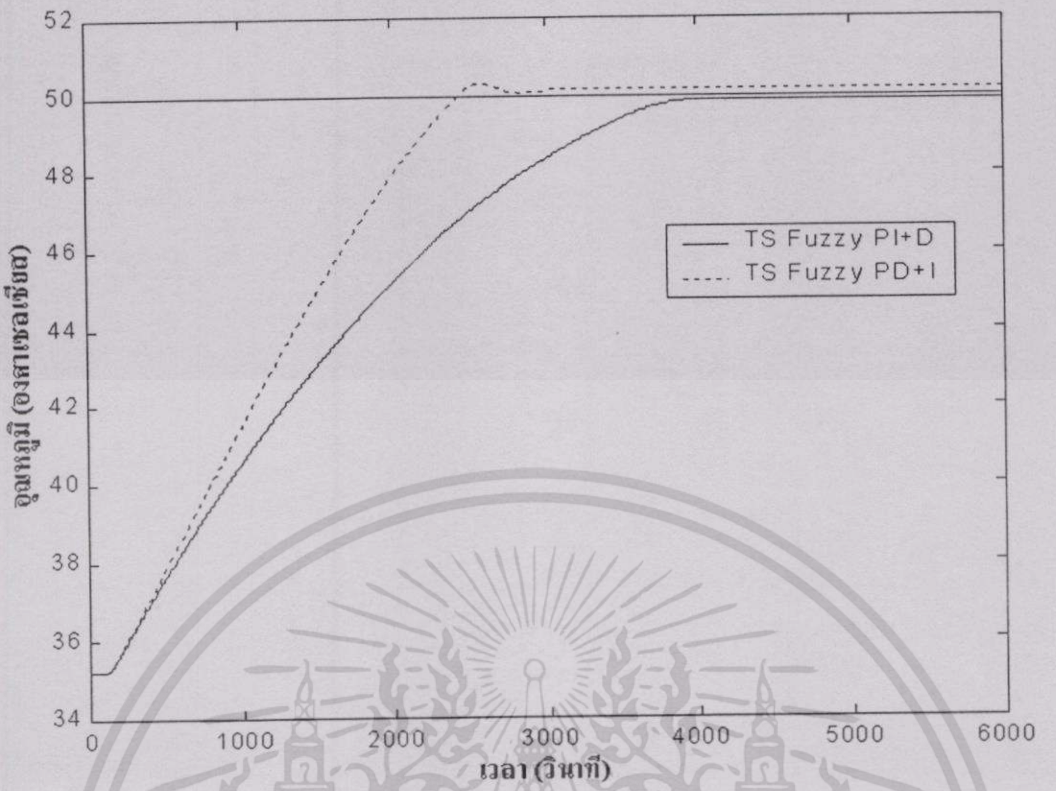


รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณควบคุมของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศา

จากรูปที่ 5.7 พบว่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอจะมีขนาดมากกว่าสัญญาณควบคุมตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีในตอนเริ่มต้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอสามารถเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่า แต่เมื่อเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงแล้ว ต้องลดสัญญาณควบคุมลงอย่างรวดเร็วจึงทำให้เกิดการแกว่ง ผลตอบสนองจึงมีค่าพุ่งเกิน ในขณะที่สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีไม่มีการแกว่ง

เมื่อทำการเปลี่ยนค่าสัญญาณอ้างอิงจาก 60 องศา โดยลดลงและเพิ่มขึ้น 10 องศา เป็น 50 องศาและ 70 องศาตามลำดับ เพื่อศึกษาดูความสามารถของตัวควบคุมว่า เมื่อไปควบคุมยังระดับสัญญาณอ้างอิงอื่นจะยังสามารถควบคุมได้อยู่หรือไม่ โดยใช้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมค่าเดิม แสดงผลตอบสนองของการจำลองการควบคุมเปรียบเทียบกันของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและทีเอสฟัซซีพีดี+ไอที่อุณหภูมิ 50 องศา ดังรูปที่ 5.8 และสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงผลตอบสนองของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 50 องศา

รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณควบคุมของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 50 องศา

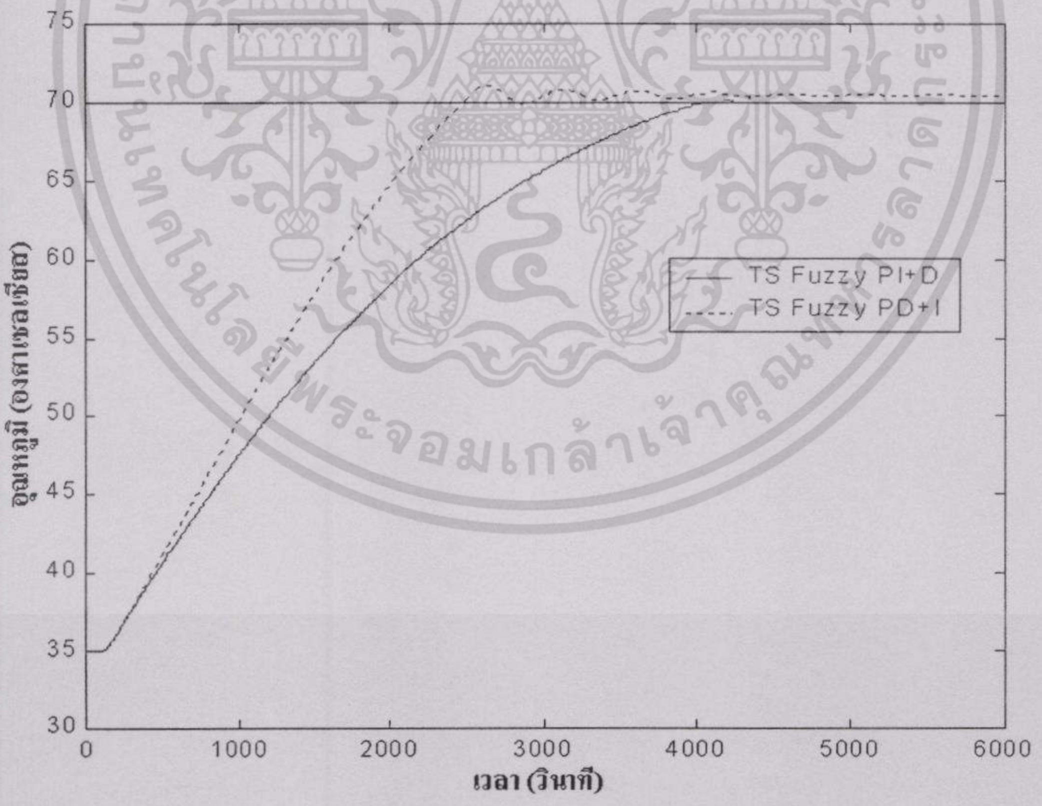
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ผลเปรียบเทียบการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 50 องศา

Controller	t_r (s)	%overshoot	t_s (s)	$\%_{Ess}$
TS Fuzzy PI+D	2756.6	0.00	3303.9	0.00
TS Fuzzy PD+I	1791.2	0.62	2200.6	0.00

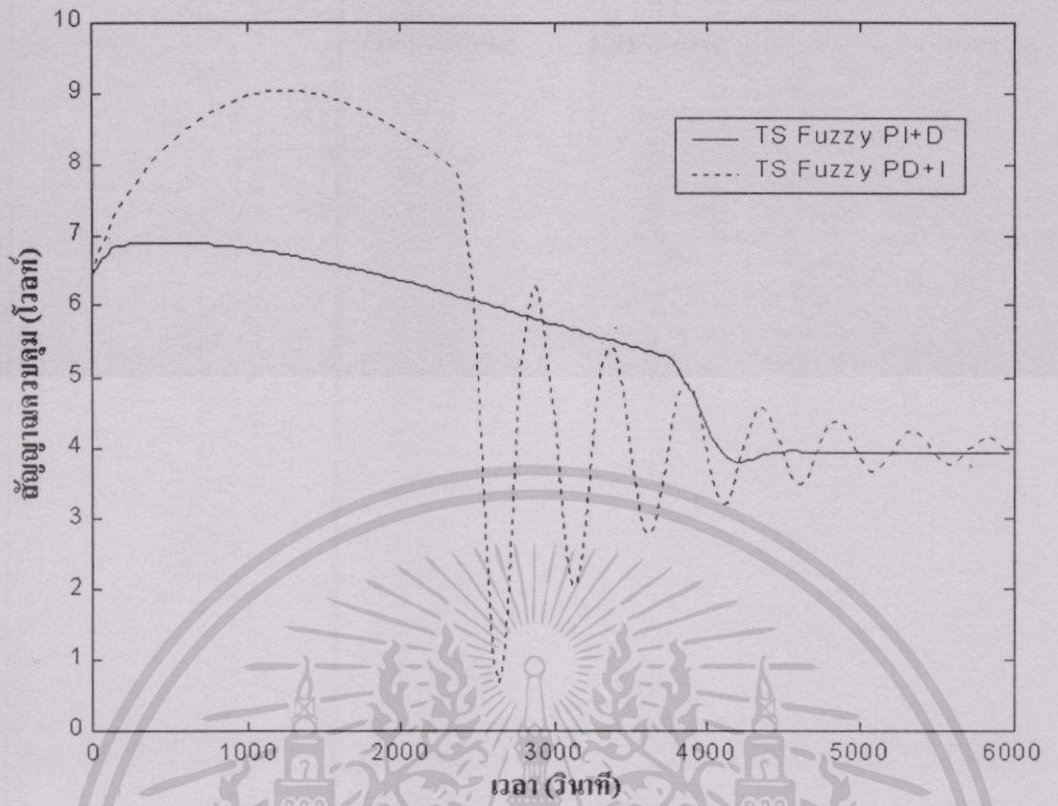
จากผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 50 องศา พบว่าคล้ายคลึงกับที่อุณหภูมิ 60 องศา คือตัว ควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอจะเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี และมีค่าพุ่งเกินเกิดขึ้น แต่มีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 60 องศา เพราะสัญญาณควบคุมมีขนาดน้อยกว่า และมีการแกว่งน้อยกว่า ในขณะที่ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีจะไม่มีค่าพุ่งเกินและสัญญาณควบคุมไม่แกว่ง แต่การนำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีที่ออกแบบที่อุณหภูมิ 60 องศามาควบคุมที่อุณหภูมิ 50 องศา จะทำให้เกิดความผิดพลาดที่สถานะคงตัวขึ้นเล็กน้อย

เมื่อเปลี่ยนระดับสัญญาณควบคุมจาก 50 องศาเป็น 70 องศา สามารถแสดงผลตอบสนองของการจำลองการควบคุมเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทั้งสองและสัญญาณการควบคุม ได้ดังรูปที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 แสดงผลตอบสนองของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 70 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณควบคุมของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 70 องศา

ตารางที่ 5.5 ผลเปรียบเทียบการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 70 องศา

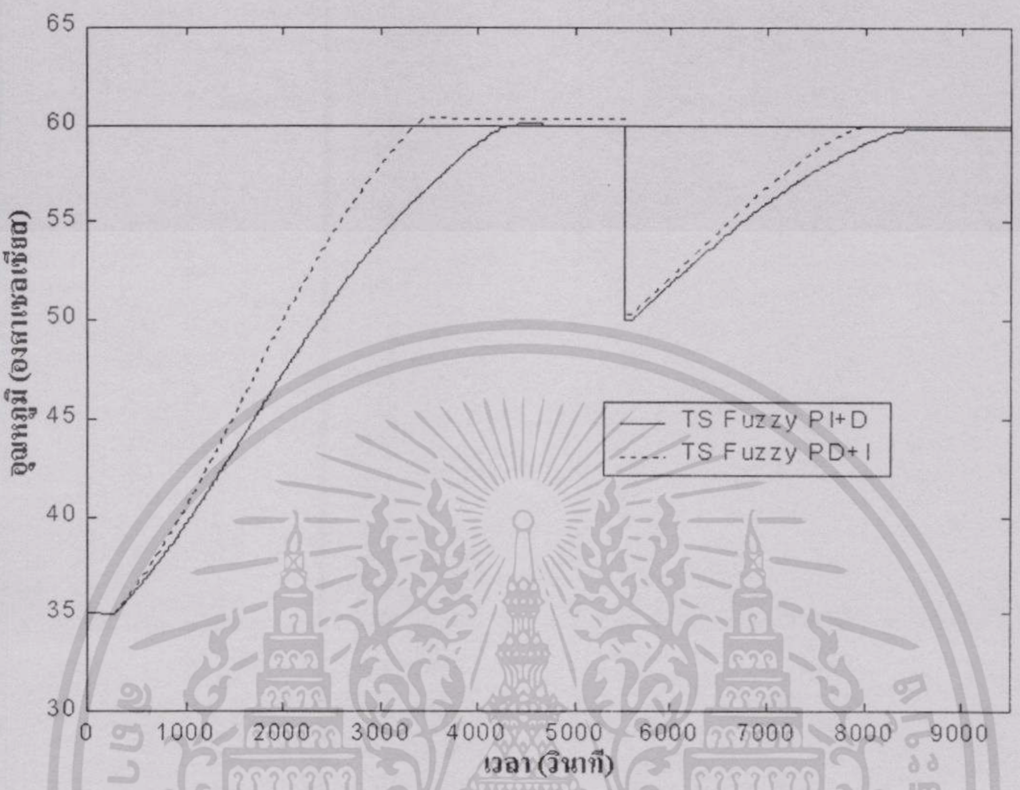
Controller	t_r (s)	%overshoot	t_s (s)	$\%_{Ess}$
TS Fuzzy PI+D	2815.0	0.00	3629.4	0.00
TS Fuzzy PD+I	1803.5	1.43	2331.2	0.00

ผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 70 องศาพบว่า ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ จะมีการแกว่งของสัญญาณควบคุมมากขึ้น ทำให้ผลตอบสนองมีการแกว่งมากกว่าอุณหภูมิ 50 และ 60 องศา รวมทั้งมีค่าพุ่งเกินและความผิดพลาดที่สถานะคงตัวมากกว่าอุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเช่นกัน ส่วนตัว ควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีจะไม่มีการแกว่งของสัญญาณควบคุม ไม่มีค่าพุ่งเกิน และไม่มีความผิดพลาดที่สถานะคงตัวที่อุณหภูมิ 70 องศา

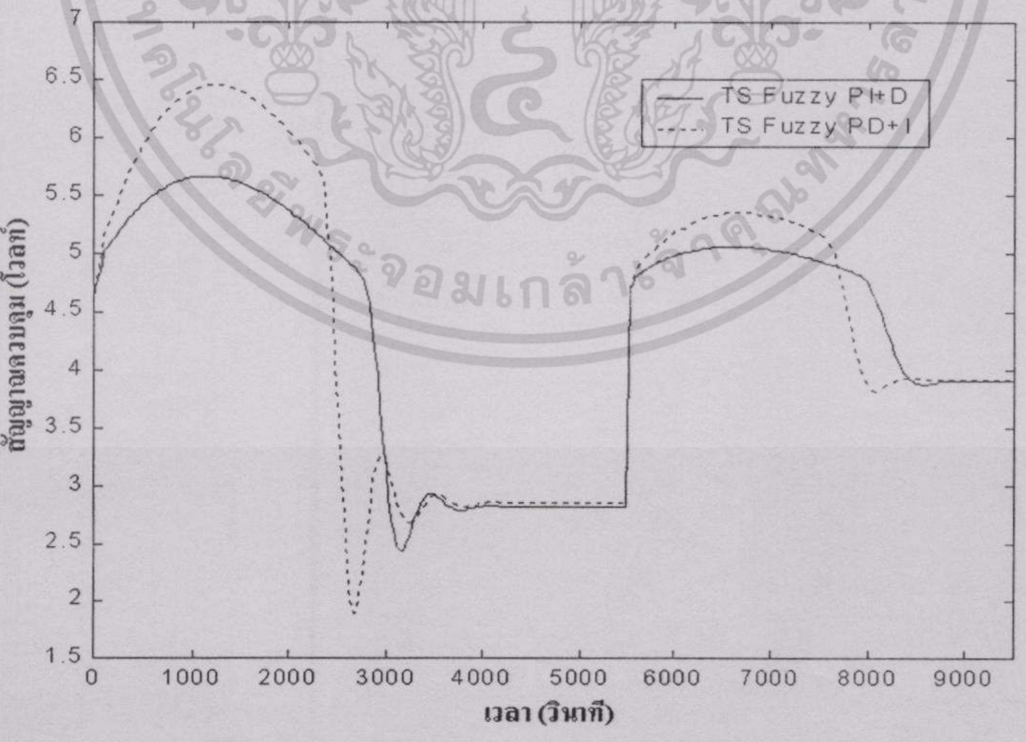
จากผลการจำลองการควบคุม พบว่าตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ ที่ออกแบบเพื่อทำการควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 60 องศา สามารถให้ผลตอบสนองที่ดีเมื่อนำไปควบคุมที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศา โดยตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอจะให้ผลตอบสนองที่เร็วกว่าตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี ทั้งสามค่าสัญญาณอ้างอิง และในการจำลองการควบคุมเพื่อทดสอบความมีเสถียรภาพของระบบควบคุม เมื่อมีสัญญาณรบกวนที่เอาท์พุต ในวิทยานิพนธ์นี้ทำการลดอุณหภูมิลง 10 องศาที่เวลา 5500 วินาที จะได้ผลตอบสนองของการจำลองการควบคุมที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 60 องศา โดยมีการรบกวนและสัญญาณควบคุมของการจำลองการควบคุมที่มีการรบกวน แสดงดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศา เมื่อมีการรบกวน



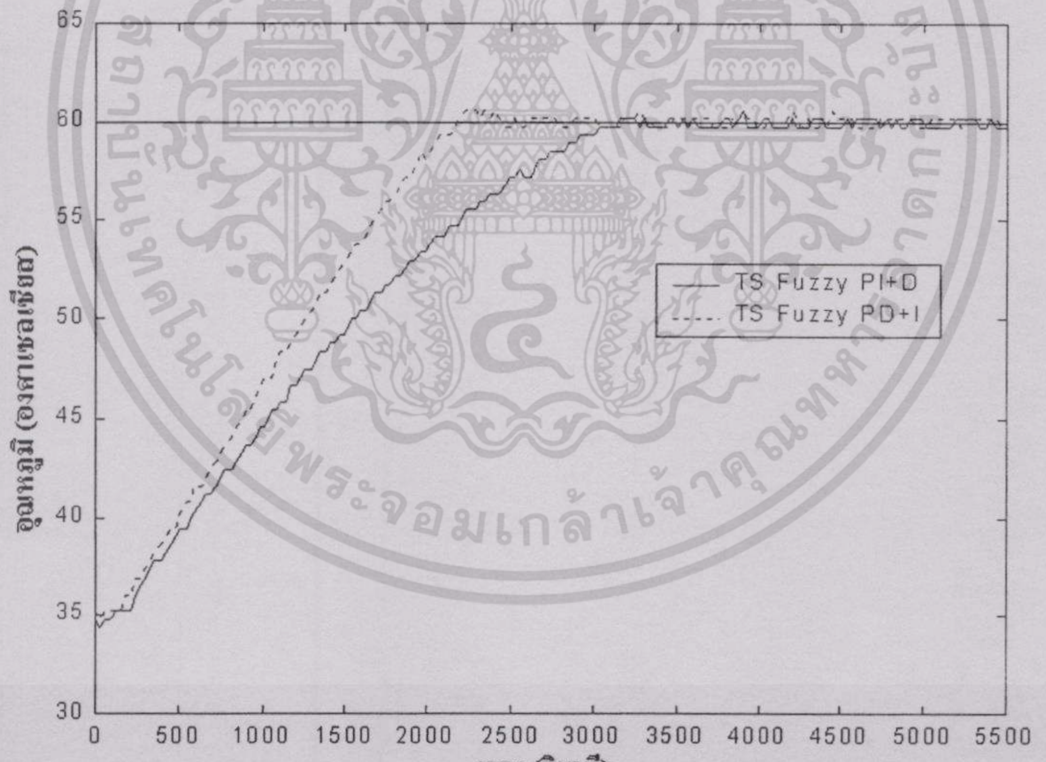
รูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณควบคุมของผลการจำลองการควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศา เมื่อมีการรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป พบว่าตัวควบคุมทั้ง 2 สามารถทำให้ผลตอบสนองลู่กลับเข้าสัญญาณอ้างอิงได้ เมื่ออุณหภูมิลดลง โดยตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอจะทำให้ผลตอบสนองลู่เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี เนื่องจากขนาดสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอมีค่ามากกว่าขนาดสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีเมื่อเกิดการรบกวน แต่ถ้าต้องการให้ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี มีผลตอบสนองเร็วเท่าตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ ก็สามารถทำได้โดยปรับค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีให้มีค่าเพิ่มขึ้น หรือปรับค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอให้มีค่าลดลงเมื่อต้องการไม่ให้มีค่าพุ่งเกินเกิดขึ้น

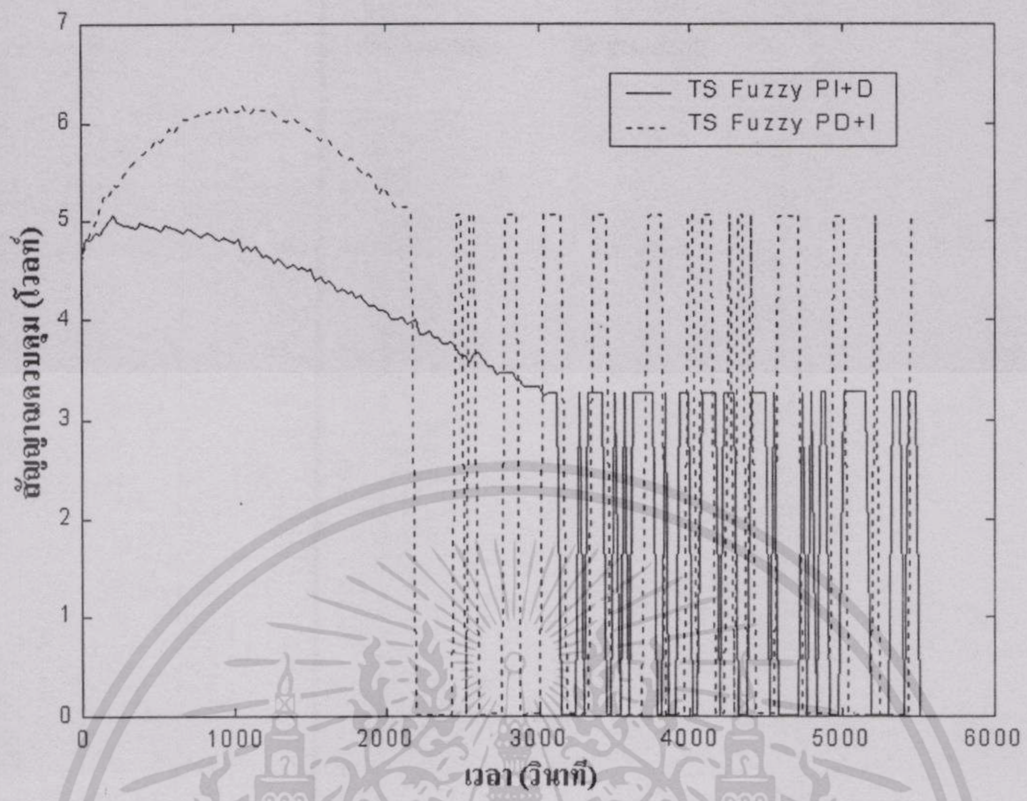
5.2.2 การควบคุมจริง

หลังจากได้จำลองการควบคุมแล้ว อันดับต่อไปจะทำการควบคุมจริง โดยทำการควบคุมอุณหภูมิของถังต้มน้ำที่อุณภูมิ 60 องศา และใช้ค่าพารามิเตอร์เดียวกับการจำลองการควบคุม โดยใช้คาบการสุ่ม 1 วินาที สามารถแสดงผลตอบสนองของการควบคุมจริงได้ดังรูปที่ 5.14 และแสดงสัญญาณการควบคุมจริงได้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.14 แสดงผลตอบสนองของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 แสดงสัญญาณควบคุมของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา

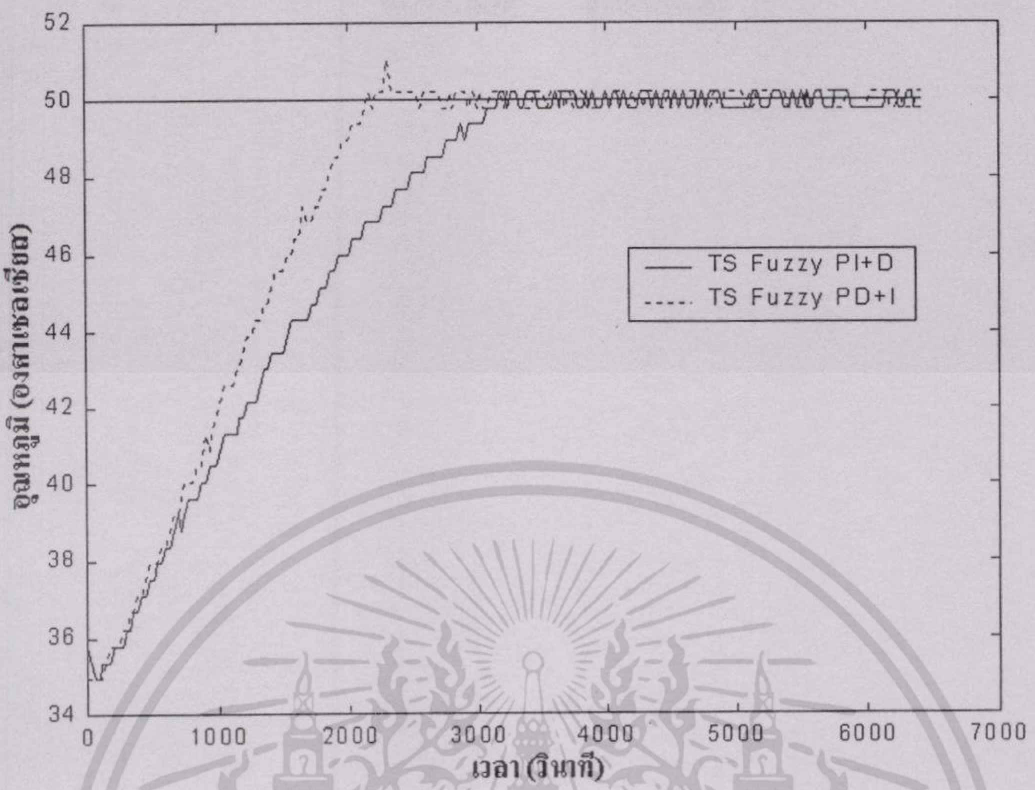
ตารางที่ 5.6 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา

Controller	t_r (s)	%overshoot	t_s (s)	Ess ($^{\circ}C$)
TS Fuzzy PI+D	2297.3	0.00	3031.0	±0.2
TS Fuzzy PD+I	1597.5	1.03	2430.8	±0.2

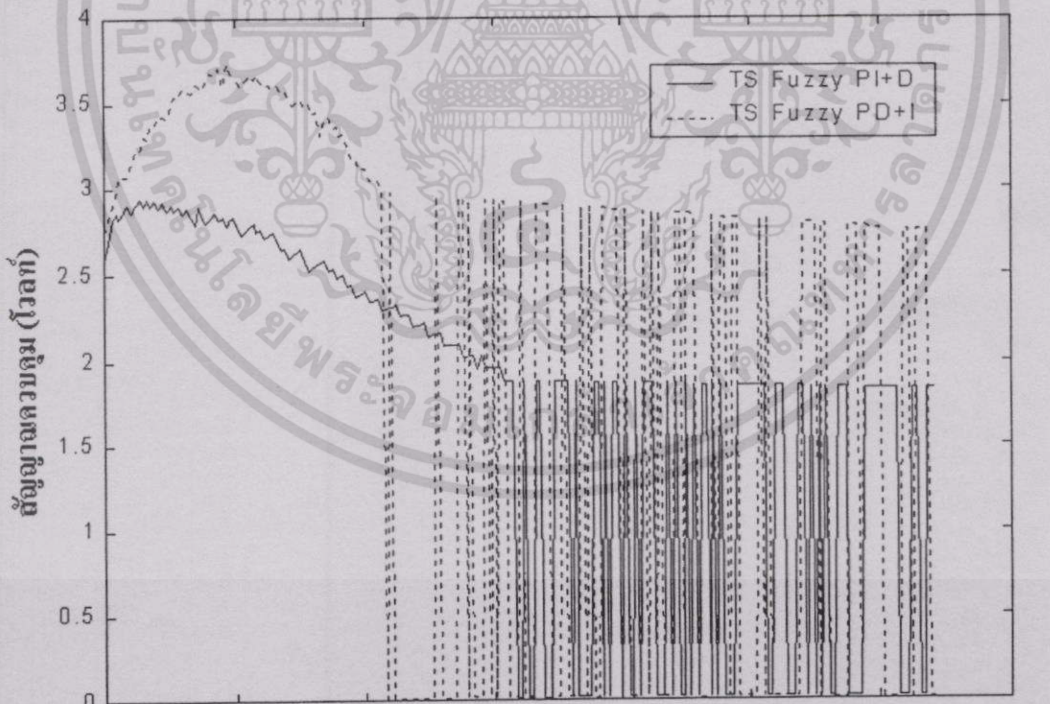
จากการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา พบว่าตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอควบคุมให้ผลตอบสนองเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าและมีค่าพุ่งเกินมากกว่าตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี ตัวควบคุมทั้ง 2 ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวเท่ากันคือจะแกว่งอยู่ในช่วง ±0.2 องศาเซลเซียส และสัญญาณควบคุมในการควบคุมจริงจะแกว่งเพื่อพยายามรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ด้วยขนาดมากกว่าสัญญาณควบคุมที่ได้จากการจำลองการควบคุม

ทดสอบความสามารถของตัวควบคุมทั้ง 2 ในการควบคุมจริง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอ้างอิง โดยลดอุณหภูมิลง 10 องศา จากสัญญาณอ้างอิงเดิมที่ 60 องศา เมื่อใช้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมค่าเดิม สามารถแสดงผลตอบสนองของการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 50 องศาและสัญญาณการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 50 องศาได้ดังรูปที่ 5.16 และ 5.17 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 แสดงผลตอบสนองของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 50 องศา



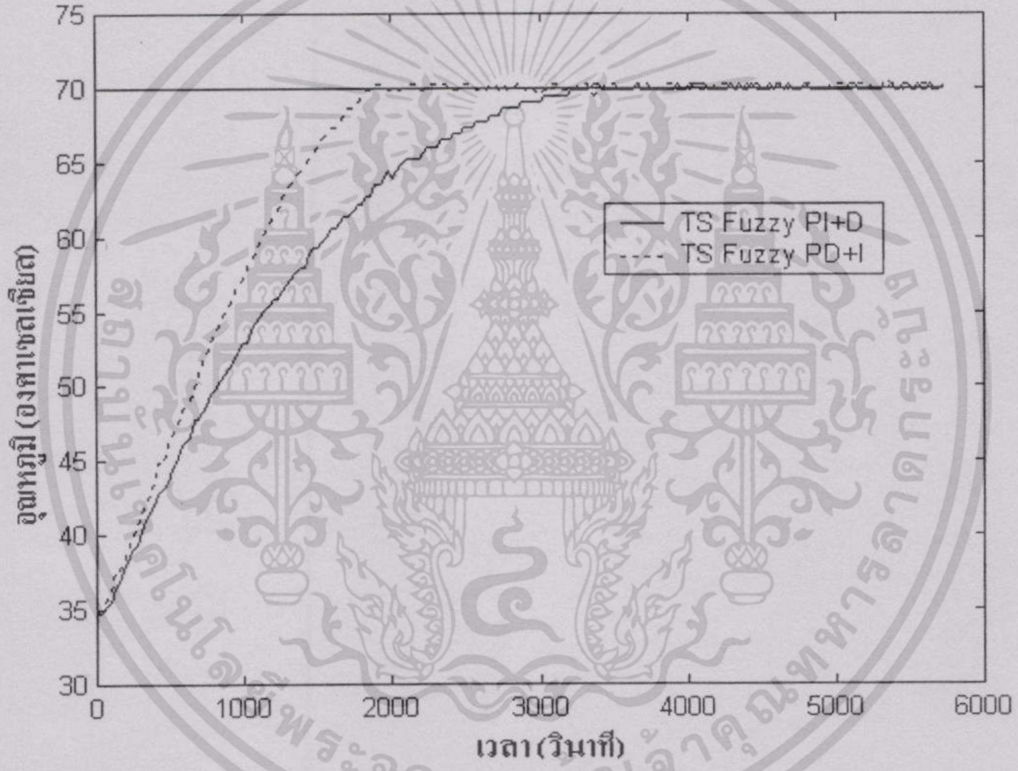
รูปที่ 5.17 แสดงสัญญาณควบคุมของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 50 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 50 องศา

Controller	t_r (s)	%overshoot	t_s (s)	Ess ($^{\circ}C$)
TS Fuzzy PI+D	2260.5	0.00	3091	$\pm$ 0.2
TS Fuzzy PD+I	1540.4	2.10	2341	$\pm$ 0.2

เมื่อเปลี่ยนแปลงสัญญาณอ้างอิง โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้น 10 องศาจากสัญญาณอ้างอิงเดิมที่ 60 องศา จะได้ผลตอบสนองของการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 70 องศาและสัญญาณการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 70 องศา แสดงดังรูปที่ 5.18 และ 5.19 ตามลำดับ

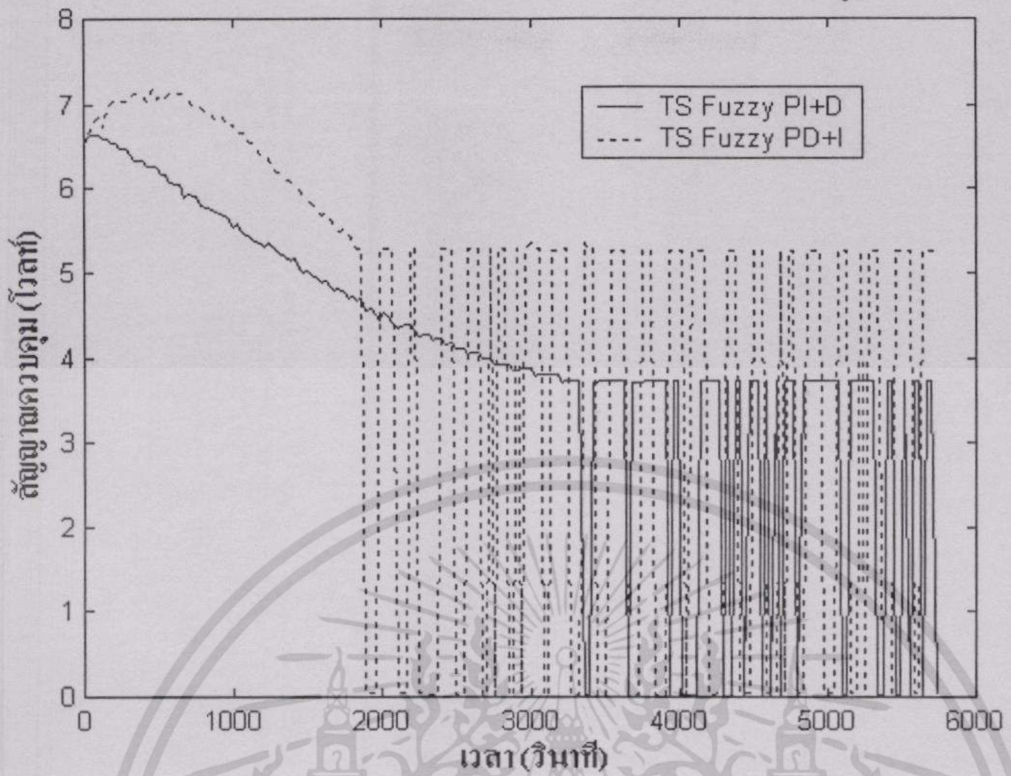


รูปที่ 5.18 แสดงผลตอบสนองของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 70 องศา

ตารางที่ 5.8 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 70 องศา

Controller	t_r (s)	%overshoot	t_s (s)	Ess ($^{\circ}C$)
TS Fuzzy PI+D	1976.5	0.00	2881	$\pm$ 0.2
TS Fuzzy PD+I	1337.4	0.86	1831	$\pm$ 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

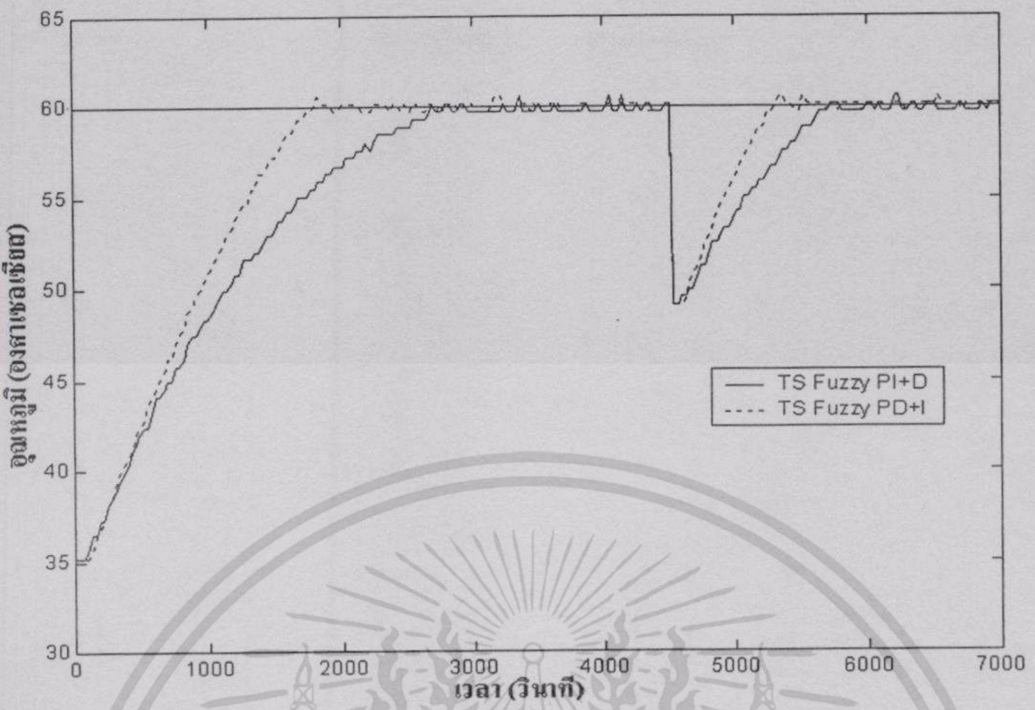


รูปที่ 5.19 แสดงสัญญาณควบคุมของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 70 องศา

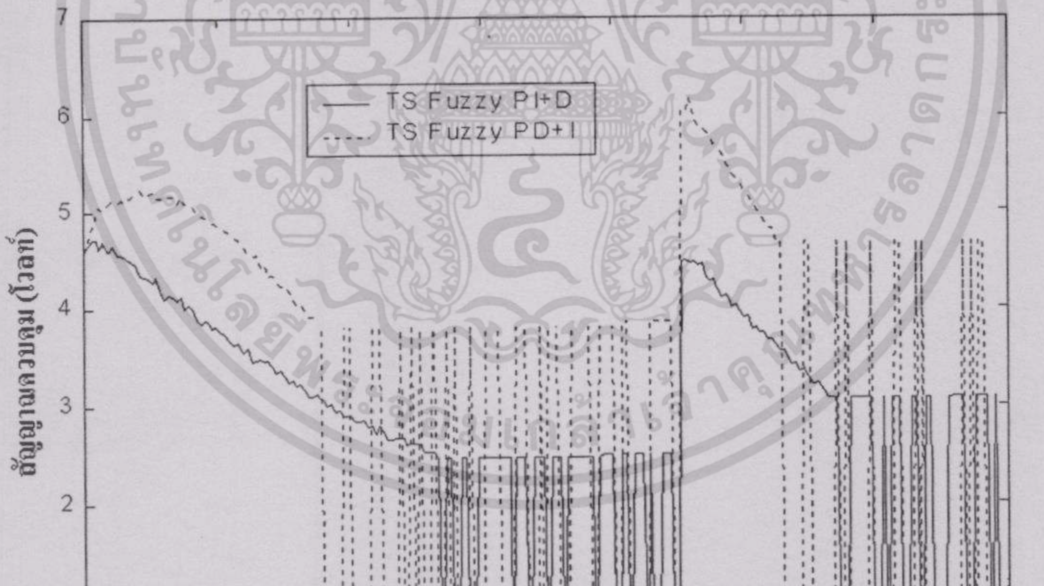
จากการควบคุมจริงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอ้างอิงเป็น 50 และ 70 องศา พบว่าตัวควบคุมทั้ง 2 สามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้สามารถเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ พิจารณาที่สถานะคงตัวพบว่าจะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น ± 0.2 องศา ทุกค่าสัญญาณอ้างอิง เนื่องจากข้อจำกัดของการ์ดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลที่ใช้ในการทดลอง ที่จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าทุก ๆ 0.4 องศา จึงทำให้เกิดผลตอบสนองมีการแกว่งอยู่ในช่วง 0.4 องศา รอบ ๆ สัญญาณอ้างอิง ซึ่งการแกว่งนี้ทำให้กฎการควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเช่นกัน จึงทำให้สัญญาณควบคุมมีการแกว่งเพื่อรักษาระดับสัญญาณอ้างอิง โดยที่อุณหภูมิ 70 องศาจะมีการแกว่งของสัญญาณรบกวนมากกว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 50 องศา

ในการทดสอบความมีเสถียรภาพของการควบคุมจริงนั้น จะให้มีการรบกวนที่เอาท์พุต โดยลดอุณหภูมิลง 10 องศาที่เวลา 4500 วินาที สามารถแสดงผลตอบสนองของการควบคุมจริงที่มีการรบกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาดังรูปที่ 5.20 และแสดงสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 แสดงผลตอบสนองของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา เมื่อมีการรบกวน



รูปที่ 5.21 แสดงสัญญาณควบคุมของผลการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา เมื่อมีการรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการควบคุมจริงพบว่า เมื่อลดอุณหภูมิลง ตัวควบคุมทั้ง 2 สามารถควบคุมให้ผลตอบสนองกลับเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ โดยตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอจะให้ผลตอบสนองลู่เข้าเร็วกว่าตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี

ในการออกแบบตัวควบคุมนั้น จากเดิมนั้นต้องรู้ค่าของความคลาดเคลื่อนของกระบวนการก่อน แล้วจึงออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพื่อให้มีค่านอร์มสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพ แต่ในทางกลับกันหากเริ่มต้นจากการเลือกพารามิเตอร์ของตัวควบคุมก่อนแล้วหาค่าของความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุด ดังนั้น จากสมการ

$$\|\Delta P\| < \frac{1}{(\alpha_{PI} + \alpha_D)} - \|P_0\|$$

จะได้

$$\|\Delta P\| < 0.0287$$

นั่นคือ สำหรับตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกมานี้สามารถควบคุมกระบวนการที่มีความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.0287 จึงจะสามารถรับประกันการมีเสถียรภาพได้ และในทำนองเดียวกัน ค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด สำหรับตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอนั้น หาได้จากสมการ

$$\|\Delta P\| < \frac{1}{(\alpha_{PD} + \alpha_I)} - \|P_0\|$$

จะได้

$$\|\Delta P\| < 0.0380$$

ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ ที่เลือกมานี้สามารถควบคุมกระบวนการที่มีความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.0380 จึงจะสามารถรับประกันการมีเสถียรภาพได้

5.3 ผลการควบคุมของระบบควบคุมฟัซซีเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบดั้งเดิม

เปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีกับระบบควบคุมพีไอ+ดีและระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอกับระบบควบคุมพีดี+ไอ โดยเป็นการเปรียบเทียบที่ต้องสอดคล้องเงื่อนไขเงื่อนไขเสถียรภาพของทฤษฎีบทเกนน้อยเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการเงื่อนไขเสถียรภาพที่พิจารณาความไม่แน่นอนเชิงบวกในสมการที่ (4.19)

$$\left(\alpha_{PI}+\alpha_{D}\right).\left(\|P_0\|+\|\Delta P\|\right)<1$$

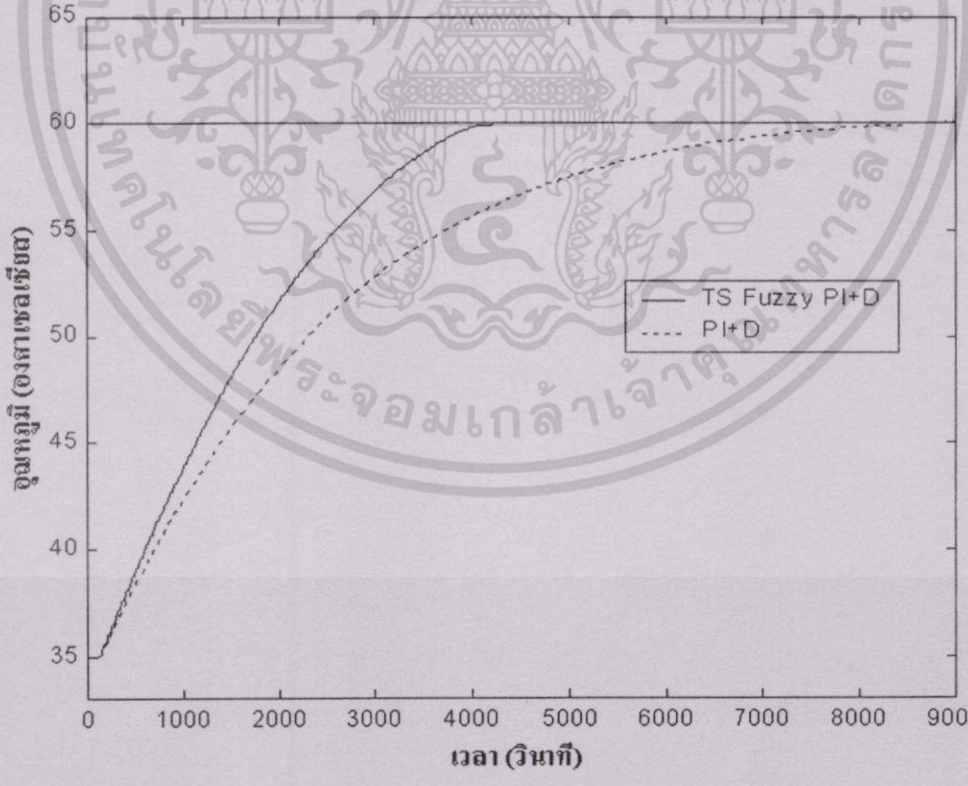
สำหรับตัวควบคุมพีไอ+ดีที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.1 มีค่า $\alpha_{PI}=K_p+K_i$ และ $\alpha_D=K_d$ (บทพิสูจน์แสดงดังในภาคผนวก ค.) แทนลงในสมการข้างบน จะได้

$$\left(K_p+K_i+K_d\right).\left(\|P_0\|+\|\Delta P\|\right)<1 \tag{5.5}$$

แทนค่า $\|P_0(z)\|=0.274$ และ $\|\Delta P(z)\|=0.015$ ลงในสมการที่ (5.5) จะได้

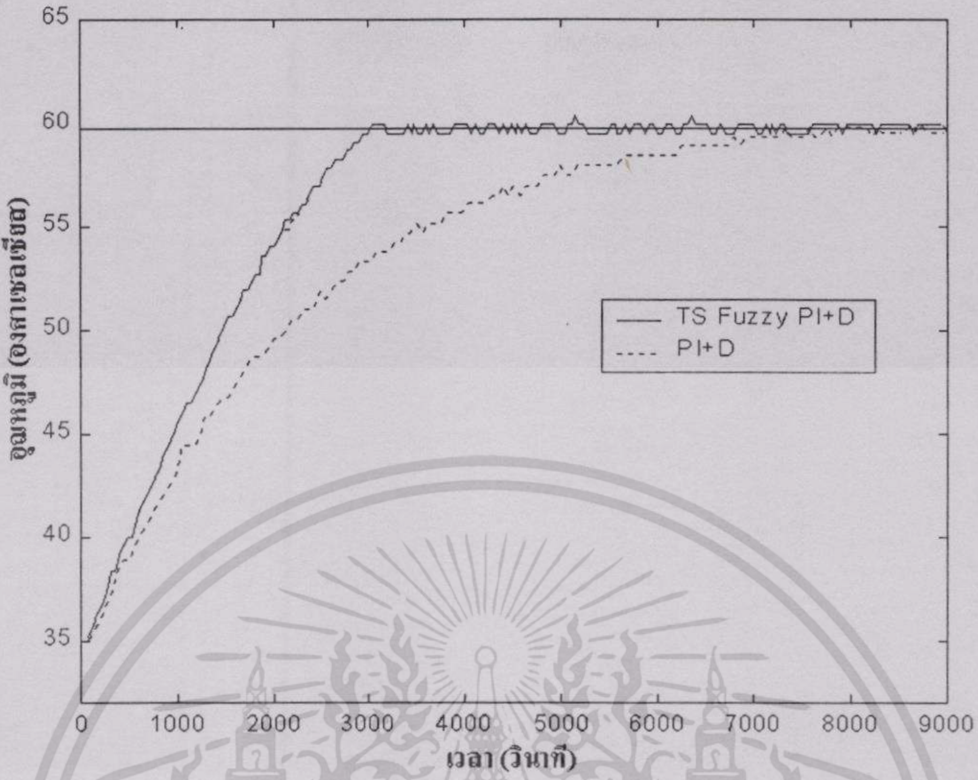
$$K_p+K_i+K_d<3.4602 \tag{5.6}$$

เลือกค่าเกนของตัวควบคุมพีไอ+ดี ให้สอดคล้องกับสมการที่ (5.6) โดยเลือก $K_p=3.0$ $K_i=0.001$ และ $K_d=0.004$ แล้วจำลองผลการควบคุมเปรียบเทียบกับตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์เดิม แสดงผลการจำลองการควบคุมและการควบคุมจริงที่อุณหภูมิ 60 องศา ดังรูปที่ 5.22 และ 5.23 ตามลำดับ



รูปที่ 5.22 แสดงผลจำลองการควบคุมเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและตัวควบคุมพีไอ+ดีที่มีค่าเกน $K_p=3.0$ $K_i=0.001$ และ $K_d=0.004$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



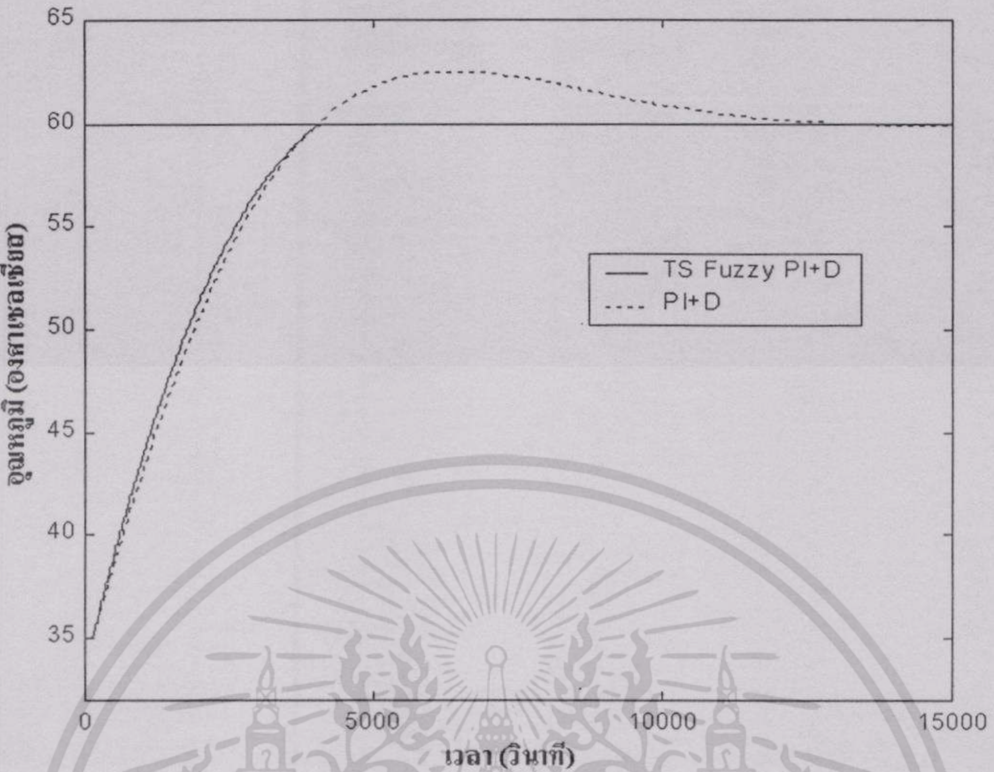
รูปที่ 5.23 แสดงผลการควบคุมจริงเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและตัวควบคุมพีไอ+ดีที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$

ตารางที่ 5.9 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีกับระบบควบคุมพีไอ+ดี ที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$

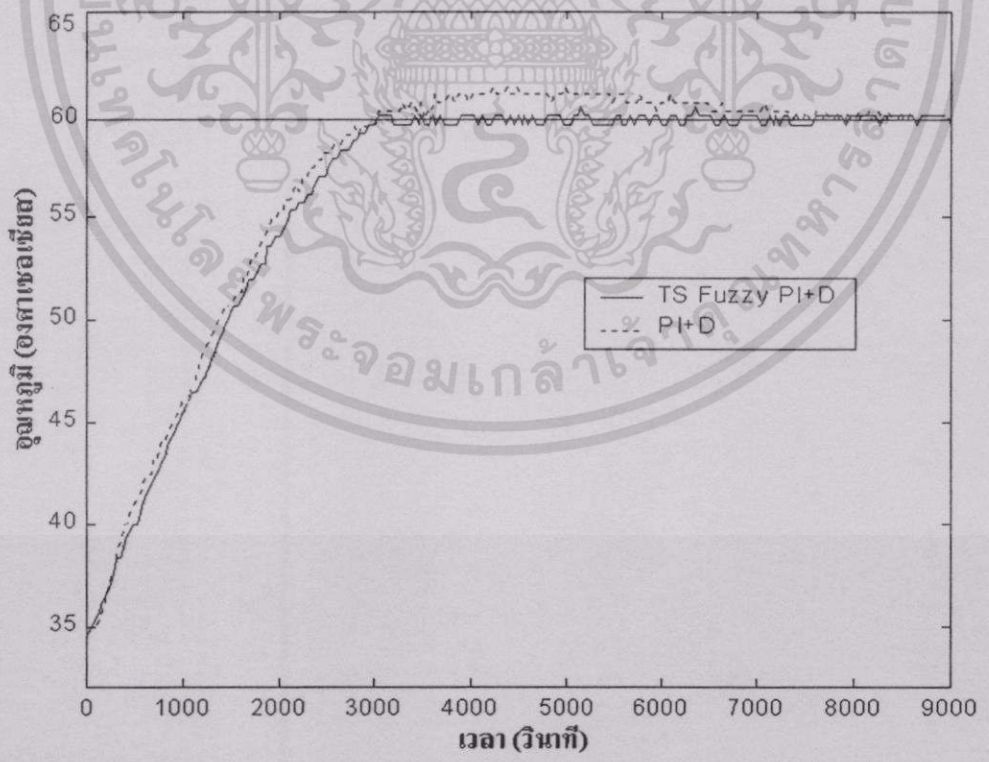
Controller	t_r (s)	%overshoot	t_s (s)	Ess ($^{\circ}C$)
TS Fuzzy PI+D	2297.3	0.00	3031	$\pm$0.2
PI+D	5818	0.00	6628	$\pm$0.2

จากรูปที่ 5.22 และ 5.23 พบว่าตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีให้ผลตอบสนองที่เร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ+ดี โดยไม่มีค่าพุ่งเกินเหมือนกัน เมื่อเพิ่มค่าเกน K_i ของตัวควบคุมพีไอ+ดีให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $K_i = 0.002$ เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมพีไอ+ดีเร็วขึ้น สามารถแสดงผลการจำลองการควบคุมและการควบคุมจริง ดังรูปที่ 5.24 และ 5.25 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 แสดงผลจำลองการควบคุมเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและตัวควบคุมพีไอ+ดีที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$



รูปที่ 5.25 แสดงผลการควบคุมจริงเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและตัวควบคุมพีไอ+ดีที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$

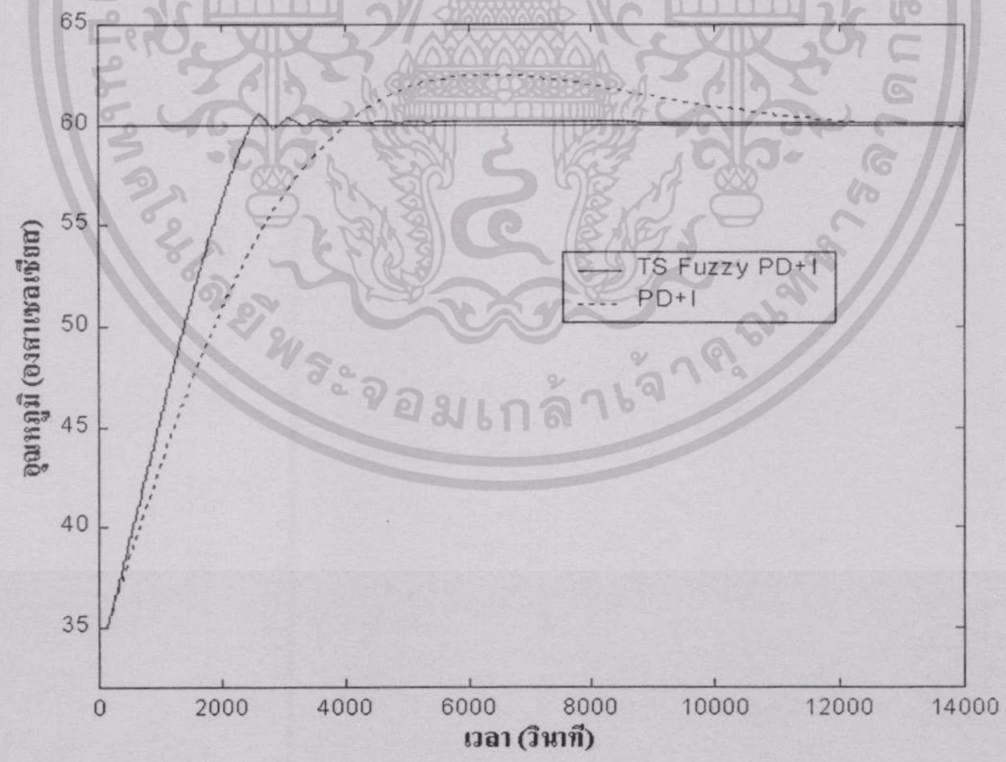
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีกับระบบควบคุมพีไอ+ดี ที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$

Controller	t_r (s)	%overshoot	t_s (s)	Ess ($^{\circ}C$)
TS Fuzzy PI+D	2297.3	0.00	3031	± 0.2
PI+D	2311.8	2.83	7141	± 0.2

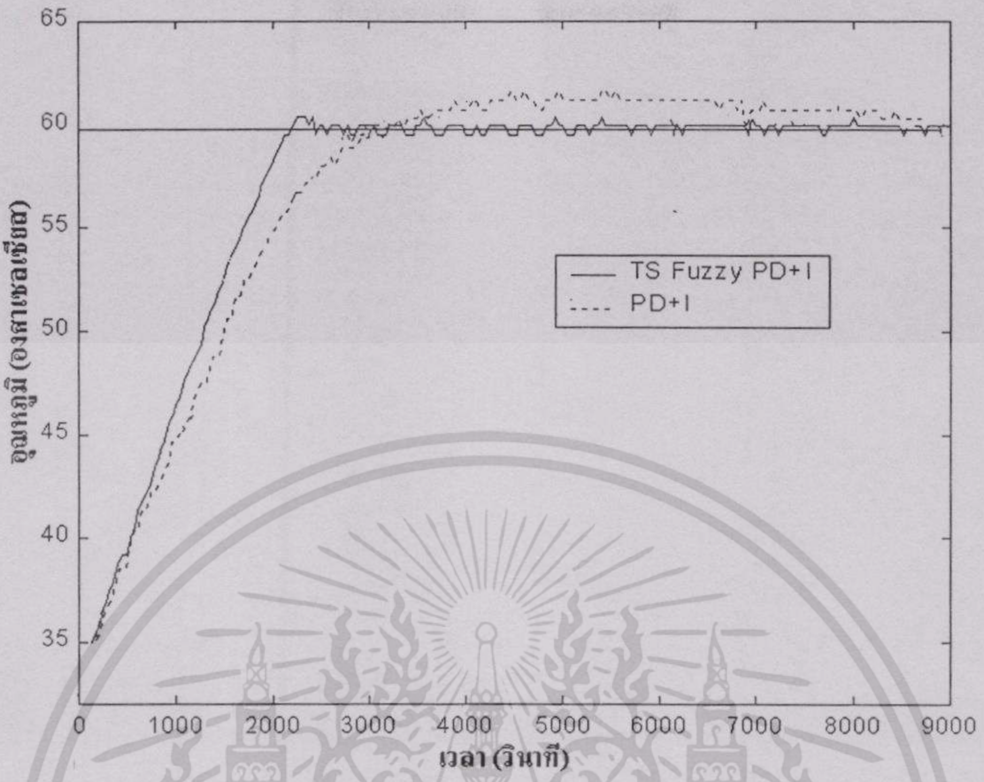
เมื่อผลตอบสนองเร็วเท่ากันแล้ว ระบบควบคุมพีไอ+ดีจะมีค่าพุ่งเกินเกิดขึ้นและเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงช้า ในขณะที่ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีไม่มีค่าพุ่งเกินและสามารถเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่า เพราะเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี สามารถลดลงเมื่อผลตอบสนองเข้าใกล้สัญญาณอ้างอิง ในขณะที่เกนของตัวควบคุมพีไอ+ดีมีค่าคงที่ตลอดการควบคุม

สำหรับผลตอบสนองเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอที่ใช้ค่าพารามิเตอร์เดิมกับระบบควบคุมพีดี+ไอ ที่เลือกค่าเกนของตัวควบคุม $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$ ให้สอดคล้องเงื่อนไขเดียวกับระบบควบคุมพีไอ+ดีในสมการที่ (5.6) พบว่าระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอสามารถให้ผลตอบสนองที่เร็วกว่าและมีค่าพุ่งเกินน้อยกว่าระบบควบคุมพีดี+ไอ ดังแสดงการจำลองการควบคุมในรูปที่ 5.26 และผลการควบคุมจริงดังรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.26 แสดงผลจำลองการควบคุมเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอและตัวควบคุมพีดี+ไอที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



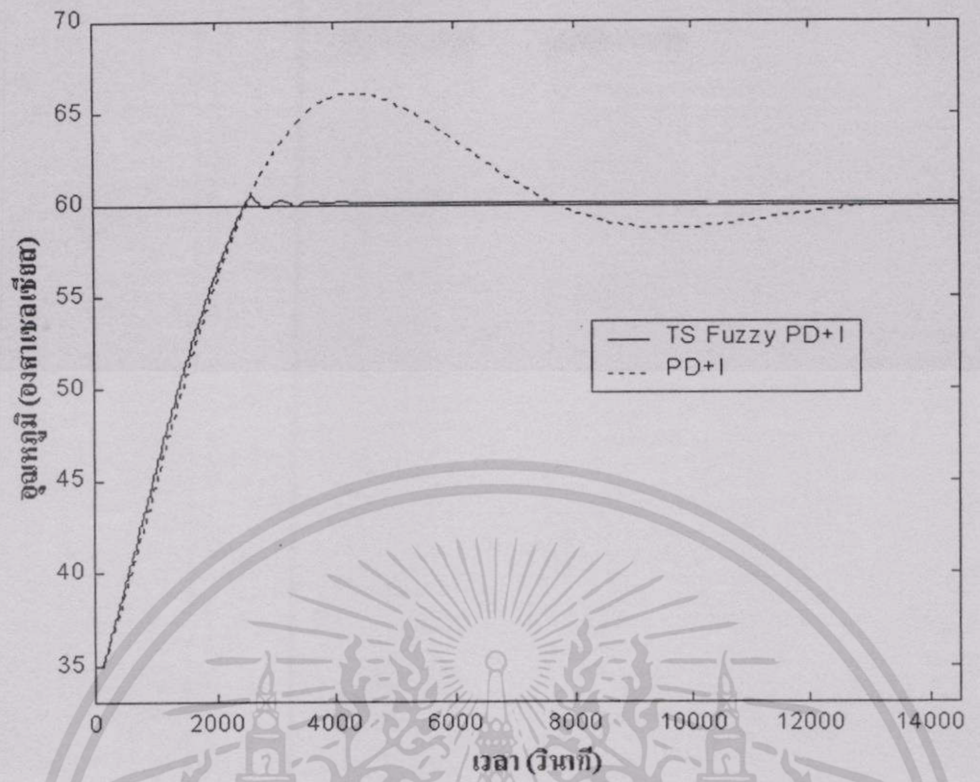
รูปที่ 5.27 แสดงการควบคุมจริงเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอและตัวควบคุมพีดี+ไอที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$

ตารางที่ 5.11 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอกับระบบควบคุมพีดี+ไอ ที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.001$ และ $K_d = 0.004$

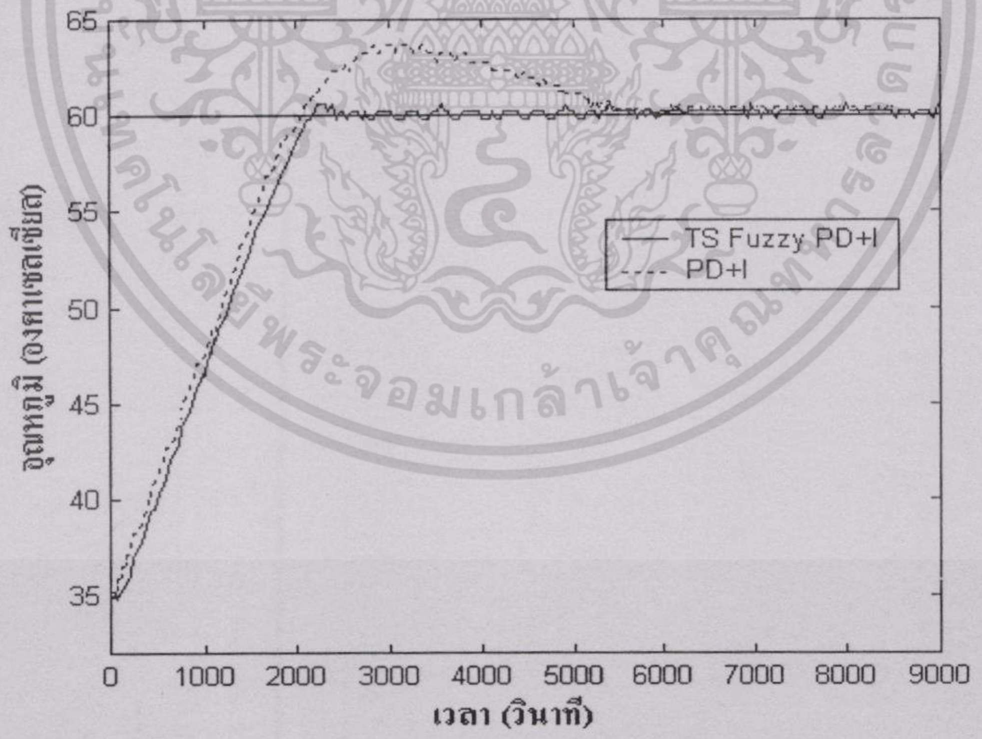
Controller	t_r (s)	%overshoot	t_s (s)	Ess ($^{\circ}C$)
TS Fuzzy PD+I	2297	1.03	2430	$\pm$0.2
PD+I	3059	2.85	8140	$\pm$0.2

เมื่อปรับค่าเกน K_i ของตัวควบคุมพีดี+ไอให้มีค่าเพิ่มเป็น $K_i = 0.002$ เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมพีดี+ไอเร็วเท่ากับระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ สามารถแสดงการจำลองการ ควบคุมและผลการควบคุมจริงดังรูปที่ 5.28 และ 5.29 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 แสดงผลจำลองการควบคุมเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอและตัวควบคุมพีดี+ไอที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$



รูปที่ 5.29 แสดงผลการควบคุมจริงเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอและตัวควบคุมพีดี+ไอที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 ผลเปรียบเทียบการควบคุมจริงของระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอกับระบบควบคุมพีดี+ไอ ที่มีค่าเกน $K_p = 3.0$ $K_i = 0.002$ และ $K_d = 0.004$

Controller	t_r(s)	%overshoot	t_s(s)	Ess ($^{\circ}C$)
TS Fuzzy PD+I	2297	1.03	2430	± 0.2
PD+I	2259	7.08	5140	± 0.2

จากรูปที่ 5.28 และ 5.29 พบว่า เมื่อผลตอบสนองเร็วเท่ากันแล้ว ระบบควบคุมพีดี+ไอจะมีค่าพุ่งเกินและเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงช้า ในขณะที่ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอไม่มีค่าพุ่งเกินและเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงเร็วกว่า ด้วยเหตุผลเดียวกับตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี คือค่าเกนของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามการเปลี่ยนของสัญญาณอินพุต นั่นคือเมื่อผลตอบสนองเข้าใกล้สัญญาณอ้างอิงแล้ว ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอสามารถลดค่าเกนของตัวควบคุมลงเพื่อไม่ให้เกิดค่าพุ่งเกิน ในขณะที่ตัวควบคุมพีดี+ไอไม่สามารถลดค่าเกนลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยของระบบควบคุมฟัซซีได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อชดเชยข้อเสียของการใช้ตัวควบคุมดั้งเดิม โดยงานวิจัยช่วงแรก ๆ นั้นไม่ได้มีการวิเคราะห์เสถียรภาพ เพราะใช้กับระบบที่มีเสถียรภาพอยู่แล้ว แต่ปัจจุบัน ระบบควบคุมฟัซซีได้ขยายไปใช้ในทางการแพทย์ จึงจำเป็นต้องมีเสถียรภาพมายืนยันในการนำไปใช้จริง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ สำหรับควบคุมกระบวนการเชิงเส้นที่มีเวลาไร้ผลตอบสนอง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการควบคุมอุณหภูมิน้ำ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอพบว่ามีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงเส้นคล้ายตัวควบคุมพีไอ+ดีและพีดี+ไอดั้งเดิมตามลำดับ แต่แตกต่างกันตรงค่าเกน K_p K_i และ K_d ของตัวควบคุมคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอมีค่าไม่คงที่ จะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 ในขณะที่ค่าเกนของตัวควบคุมดั้งเดิมจะมีค่าคงที่

จากผลการจำลองผลการควบคุมในรูปที่ 5.5 ถึง 5.10 และผลการควบคุมจริงในรูปที่ 5.13 ถึง 5.18 พบว่าระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าอ้างอิงได้ และถึงแม้จะมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณอ้างอิง โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เดิมก็ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าอ้างอิงใหม่ได้เช่นกัน โดยระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอจะเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี แต่จะมีค่าสัญญาณพุ่งเกินมากกว่า และสัญญาณควบคุมจะมีการแกว่งด้วยขนาดที่มากกว่าระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดี ซึ่งหากต้องการให้ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีมีผลตอบสนองที่เร็วกว่านี้ก็สามารถทำได้โดยปรับเพิ่มค่าเกนของตัวควบคุมให้มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ตัวควบคุมทั้ง 2 ยังมีลักษณะที่แตกต่างกันในการนำไปใช้คือ ตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีมีโครงสร้างที่แยกส่วนการควบคุมดีออกมาทำให้สามารถลดผลของสัญญาณรบกวนได้ และโครงสร้างของตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอที่มีการแยกส่วนไอออกมานั้นจะสามารถช่วยลดผลของอินทิกรัลวายด์อัพ(integral windup)

เมื่อเกิดการรบกวนขณะควบคุมโดยการลดอุณหภูมิ จากผลการจำลองการควบคุมและการควบคุมจริงในรูปที่ 5.11 5.12 และ 5.19 5.20 ตามลำดับ พบว่าระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและทีเอสฟัซซีพีดี+ไอ สามารถกำจัดผลการรบกวนนั้นและทำให้ผลตอบสนองกลับเข้าสู่ค่าสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ้างอิงได้ ทั้งนี้เพราะพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนั้น ถูกเลือกให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพ ที่พิจารณาความคลาดเคลื่อนของการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมฟัซซีกับระบบควบคุมดั้งเดิม โดยออกแบบตัวควบคุมให้สอดคล้องเงื่อนไขเสถียรภาพของทฤษฎีบทเกนน้อยเหมือนกัน จากรูปที่ 5.22 ถึง 5.29 พบว่า เมื่อออกแบบระบบควบคุมให้ไม่มีค่าพุ่งเกินเหมือนกัน ระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอ+ดีและระบบควบคุมทีเอสฟัซซีพีดี+ไอให้ผลตอบสนองเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าระบบควบคุมพีไอ+ดีและพีดี+ไอ เมื่อออกแบบระบบควบคุมให้เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงพร้อมกัน พบว่าระบบควบคุมดั้งเดิมมีค่าพุ่งเกินมากกว่าและเข้าสู่ค่าสัญญาณอ้างอิงช้ากว่าระบบควบคุมฟัซซี

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า หากออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพแล้ว จะสามารถรับประกันความมีเสถียรภาพของระบบควบคุมที่มีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้ โดยค่าพารามิเตอร์ที่เลือกมา นอกจากจะทำให้มีเสถียรภาพแล้วยังให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมดั้งเดิมอีกด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

1. การใช้ทฤษฎีบทเกนน้อยในการหาเงื่อนไขเสถียรภาพนั้นจะได้เงื่อนไขเสถียรภาพที่เผื่อมากเกินไป(conservative) จึงเป็นเงื่อนไขที่พอเพียงเท่านั้น นั่นคือ ถ้าสอดคล้องกับเงื่อนไขนี้แล้วก็สามารถประกันการมีเสถียรภาพได้ แต่ถ้าไม่สอดคล้องก็ไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพ

2. ทฤษฎีบทเกนน้อยเป็นทฤษฎีที่เน้นทางด้านเสถียรภาพเท่านั้น โดยไม่เกี่ยวกับสมรรถนะ(performance) ซึ่งหมายความว่าสามารถประกันการมีเสถียรภาพได้ แต่อาจจะให้สมรรถนะที่ไม่ดีนัก แต่ถ้าจำเป็นต้องการให้ได้สมรรถนะที่ดีก็สามารถทำได้โดย

- ทำการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอย่างอิสระ โดยไม่สนใจเสถียรภาพ
- ในกรณีที่ต้องการเสถียรภาพด้วย ต้องปรับแต่งกระบวนการที่จะควบคุมแทน เพื่อให้มีค่าอินฟินิตี้นอร์มน้อย ๆ เพื่อจะสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้มีค่ามาก ๆ ได้

3. สัญญาณควบคุมในการควบคุมจริง จะมีการแกว่งมากกว่าสัญญาณควบคุมที่ได้จากการจำลองการควบคุม ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้สัญญาณควบคุมในการจ่ายแรงดันให้กับฮีทเตอร์จึงไม่มีปัญหาในการแกว่งของสัญญาณควบคุม แต่หากต้องนำไปใช้กับอุปกรณ์ที่มีการเปิดปิดเช่นวาล์ว (valve) จะมีผลทำให้อายุการทำงานของวาล์วสั้นลง ดังนั้น สามารถลดผลของการแกว่งของสัญญาณควบคุมในทางปฏิบัติได้โดยการเพิ่มค่าขอบเขต L ให้มีค่ามากขึ้น แต่จะมีผลให้ผลตอบสนองสู่เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ช้าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ไขปัญหา

1. น้ำที่ใช้ทำการทดลองในแต่ละครั้งมีอุณหภูมิเริ่มต้นไม่เท่ากัน จึงต้องปรับอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำให้เท่ากันก่อนจึงจะทำการทดลองเปรียบเทียบกันได้

2. จากการทดลองจริงพบว่าที่สถานะคงตัว จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ± 0.2 องศาจากค่าสัญญาณอ้างอิง ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเอทูดีคอนเวอร์เตอร์(A/D Converter) 8 บิต โดยสามารถลดผลของความผิดพลาดนี้ได้โดยการเปลี่ยนไปใช้เอทูดีคอนเวอร์เตอร์ 12 บิตแทน จะทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงเหลือ ± 0.05 องศาจากค่าสัญญาณอ้างอิง

3. ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนั้น จะใช้วิธีหาแบบลองผิดลองถูก จึงทำให้ต้องใช้เวลาไปพอสมควรกว่าจะได้ค่าพารามิเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองที่น่าพอใจและสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพ

6.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

พัฒนาเป็นตัวควบคุมทีเอสฟัซซีพีไอดีที่มีสัญญาณอินพุต 3 ค่าคือ ค่าความผิดพลาด การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด และค่าความผิดพลาดสะสม โดยไม่ต้องแยกตัวควบคุมออกเป็น 2 ส่วนเหมือนในวิทยานิพนธ์นี้ แต่เนื่องจากโครงสร้างแบบ 3 อินพุตนี้ จะทำให้มีจำนวนกฎการควบคุมมากขึ้นและมีจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องปรับเพิ่มมากขึ้น มากกว่าโครงสร้างแบบ 2 อินพุต ดังนั้นจะสามารถลดจำนวนการปรับพารามิเตอร์ได้โดยใช้แนวทางที่ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัย[12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets," Information & Control, Vol. 8, 1965, pp. 338-353.

[2] L.A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes," IEEE Trans. Syst., Man & Ccbern., Vol. SMC-3, 1973, pp. 28-44.

[3] E.H. Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant," Proc. IEEE, Vol. 121, No 12, 1974, pp. 1585-1588.

[4] P.J. King and E.H. Mamdani, "The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial Processes," Automatica, Vol. 13, 1977, pp. 235-242.

[5] G. -R. Chen and H. Ying, "BIBO Stability of Nonlinear Fuzzy PI Control System," J. Intelligent & Fuzzy System, Vol.5, 1997, pp. 245-256.

[6] H.A. Malki and G. -R Chen, "New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional-Derivative Control Systems," IEEE Trans. Fuzzy Systems, 1994, pp.245-254.

[7] D. Misir, H. A. Malki and G Chen, "Design and Analysis of a Fuzzy Proportional-Integral-Derivative Controller," Fuzzy Sets and Systems, Vol.79, 1996, pp.297-314.

[8] H.A. Malki, D. Misir, D. Feigenspan and G. –R Chen, "Fuzzy PID Control of a Flexible-Joint Robot Arm with Uncertainties from Time-Varying Loads," IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol.5, 1997, pp.371-378.

[9] J. Carvajal, G. -R Chen and H. Ogmen, "Fuzzy PID Controller: Design, Performance Evaluation, and Stability Analysis," Information Sciences, Vol. 123, 2000, pp. 249-270.

[10] Y. Ding, H. Ying and S. Shao, "Theoretical Analysis of a Takagi-Sugeno Fuzzy PI Controller with Application to Tissue Hyperthermia Therapy," IEEE Trans. on Fuzzy System, Vol.1, 1998, pp.252 –257.

[11] H. Ying, "An Analytical Study on Structure, Stability and Design of General Nonlinear Takagi-Sugeno Fuzzy Control Systems," Automatica, Vol. 34, No. 12, 1998, pp. 1617-1623.

[12] H. Ying, "Theory and Application of a Novel Fuzzy PID Controller using a Simplified Takagi-Sugeno Rule Scheme," Information Sciences, Vol. 123, 2000, pp. 281-293.

[13] Leonid Reznik **Fuzzy Controllers.** Newnes, 1997.

[14] Rainer Palm, Dimiter Driankov and Hans Hellendoorn **Model Based Fuzzy Control: Fuzzy Gain Schedulers and Sliding Mode Fuzzy Controllers.** Springer, 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[15] Hao Ying **Fuzzy Control and Modeling: Analytical Foundations and Applications.** IEEE Press, 2000.

[16] S. P. Bhattacharyya, H. Chapellat and L. H. Keel **Robust Control: The Parametric Approach.** Prentice Hall, 1995.

[17] สุรกิจ เลิศอุดมสุข และจงกล งามวิวิทย์, "การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอ้อมโดยวิธิวางโพล." หน้า 587-592. ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24.** กรุงเทพฯ : 22-23 พฤศจิกายน 2544

[18] Euntai Kim and Dongyon Kim, "Stability Analysis and Synthesis for an Affine Fuzzy System via LMI and ILMI: Discrete Case," IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics Part B: Cybernetics, Vol. 31, No. 1, 2001, pp. 132-140.

[19] Byung-Jae Choi, Seong-Woo Kwak, and Byung Kook Kim, "Design and Stability Analysis of Aingle-Input Fuzzy Logic Controller," IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics Part B: Cybernetics, Vol. 30, No. 2, 2000, pp. 303-309.

[20] Federico Cuesta, Francisco Gordillo, Javier Aracil and Anibal Ollero, "Stability Analysis of Nonlinear Multivariable Takagi–Sugeno Fuzzy Control Systems," IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 7, No. 5, 1999, pp. 508-520.

[21] ธิดาพร พิทักษ์พรพันธุ์. "ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2539.

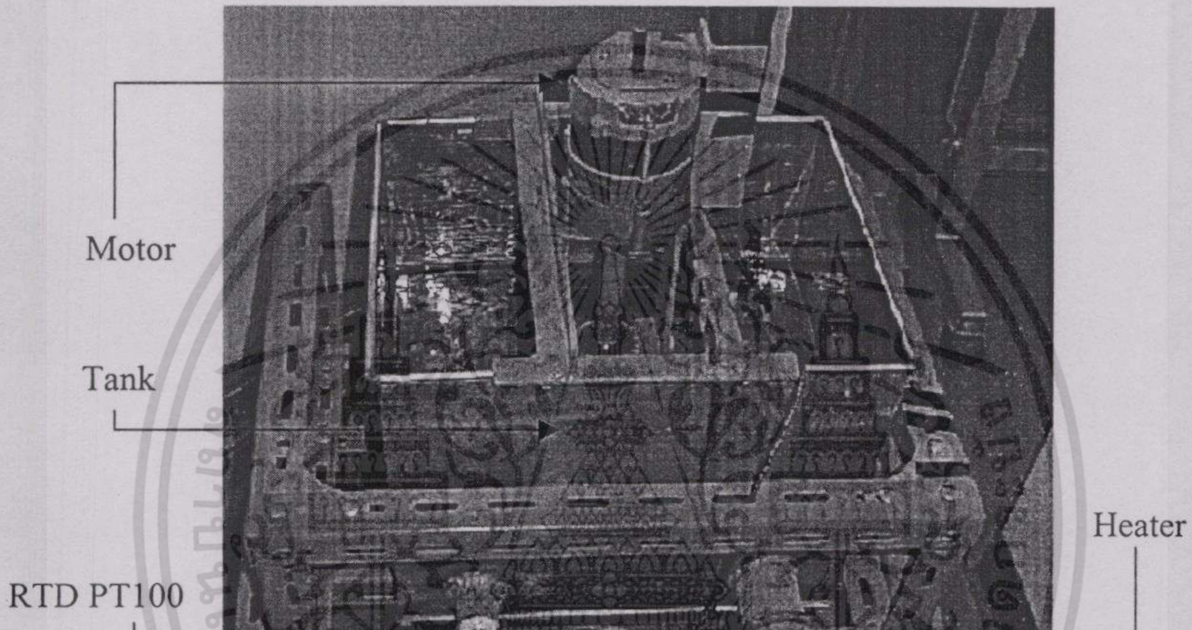
[22] อรอุมา ทองคงอ่วม และเอกลักษณ์ ตรีวิมล. "การควบคุมอุณหภูมิน้ำโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี" ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง

ในภาคผนวก ก. จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง แสดงดังรูปที่ ก.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ ก.1 แสดงส่วนประกอบของถังต้มน้ำ

ก.1 ถังน้ำ มีขนาด $30cm.\times 35cm.\times 30cm.$ ทำจากเสตนเลส โดยตัวถังน้ำส่วนบนจะติดมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดแรงดัน 100 Volt ทำหน้าที่หมุนใบพัดกวนน้ำให้เกิดการไหลวน เพื่อให้ความร้อนสามารถถ่ายเทได้อย่างทั่วถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ตัวรับรู้ RTD คืออุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ มีลักษณะเป็นแท่งโลหะ มีส่วนประกอบของทองแดง นิกเกิลและแพลตินัม โดยแท่งโลหะนี้มีความต้านทานที่เปลี่ยนค่าตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นไปตามสมการ

$$R_t = R_0\left(1+\alpha T\right)$$

เมื่อ

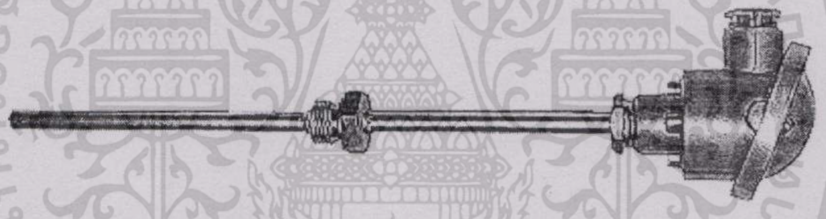
R_t คือความต้านทานที่อุณหภูมิ $t\ ^{\circ}C$

R_0 คือความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง(Reference Temperature: t_0) โดยปกติจะเป็นค่าอุณหภูมิห้อง

α คือค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ออุณหภูมิของโลหะแต่ละชนิด

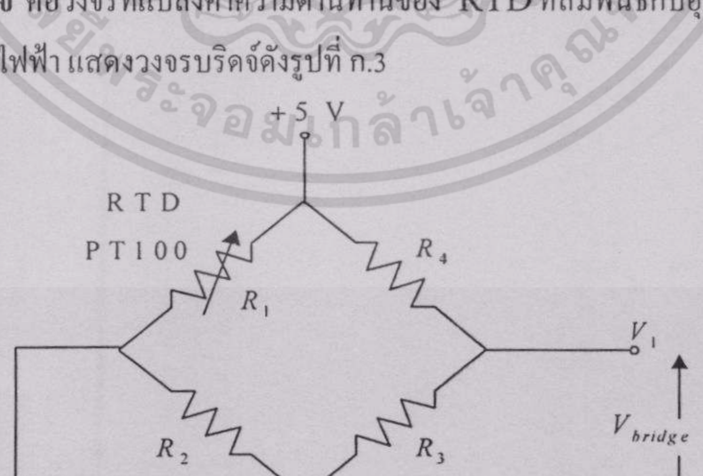
T คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิอ้างอิง มีค่าเท่ากับ $t - t_0$

ในการทดลองนี้ใช้ RTD PT100 แสดงดังรูปที่ ก.2 มีความต้านทาน $100\ \Omega$ ที่ $0\ ^{\circ}C$ และมีค่า $\alpha = 0.004$



รูปที่ ก.2 แสดงตัวรับรู้ RTD PT 100 ที่ใช้ในการทดลอง

ก.3 วงจรบริดจ์ คือวงจรที่แปลงค่าความต้านทานของ RTD ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่วัดได้ ให้เป็นสัญญาณศักย์ไฟฟ้า แสดงวงจรบริดจ์ดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 แสดงวงจรบริดจ์

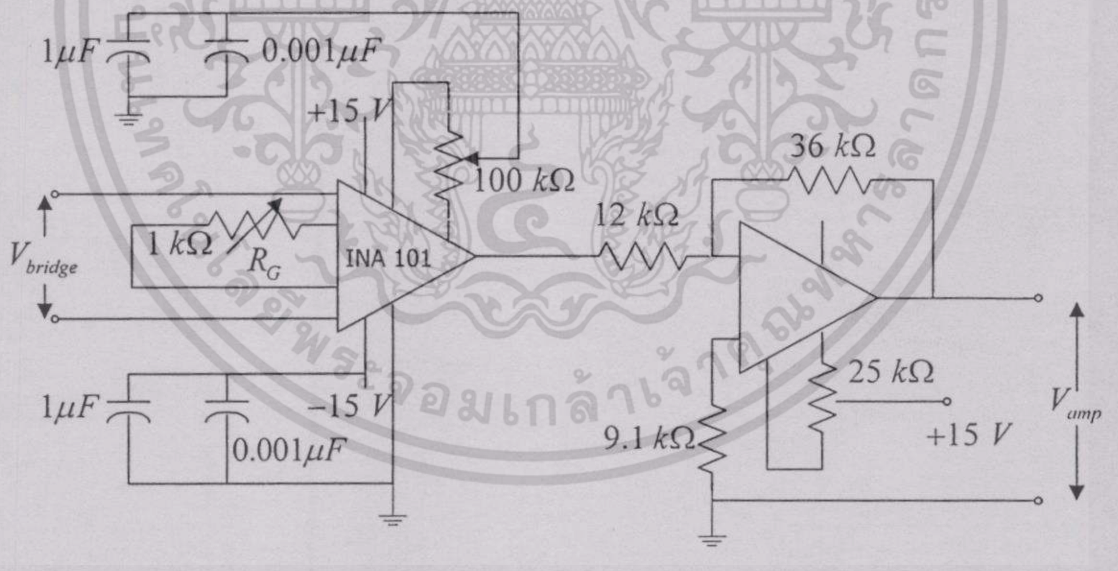
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป V_{bridge} คือศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากวงจรบริดจ์ R_1 คือความต้านทานที่ได้จาก RTD PT100 สัมพันธ์กับอุณหภูมิของน้ำ ในการทดลองนั้นเลือกค่า $R_2 = R_3 = 10\ \text{k}\Omega$ เพื่อให้มีกระแสไหลในวงจรบริดจ์มีค่าน้อย ทำให้พลังงานที่สูญเสียใน RTD มีค่าน้อยด้วย ค่าที่วัดได้จึงไม่เกิดการผิดพลาด และความต้านทานของ RTD ที่อุณหภูมิ 25 $^\circ C$ มีค่า

$$\begin{aligned} R_1 &= R_0\left(1+\alpha T\right) \\ &= 100\left[1+0.04\left(25\text{-}0\right)\right] \\ &= 110\ \Omega \end{aligned}$$

ต้องการให้วงจรบริดจ์สมดุล เมื่อน้ำมีอุณหภูมิ 25 $^\circ C$ เลือกใช้ $R_4 = R_1 = 110\ \Omega$ เพื่อให้วงจรบริดจ์จ่ายศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ที่อุณหภูมินี้ และสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากวงจรบริดจ์ จะเข้าสู่วงจรขยายและปรับปรุงสัญญาณต่อไป

ก.4 วงจรขยายผลต่าง ทำหน้าที่ขยายผลต่างของสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากวงจรบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 แสดงวงจรขยายผลต่าง

โดยมีอัตราขยายเป็นไปตามสมการ

$$V_{amp} = KV_{bridge}$$

เมื่อ V_{amp} คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านการขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K คือ อัตราขยาย

นั่นคือที่อุณหภูมิของน้ำ $25\ ^{\circ}C$ ค่า V_{amp} มีค่าเท่ากับศูนย์เพราะ V_{bridge} มีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมินี้

วงจรขยายผลต่างสัญญาณจะใช้ไอซีเบอร์ของ BURR-BROWN เป็นไอซีขยายผลต่างที่สัญญาณค่าน้อย ๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการดังนี้

- มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณตามอุณหภูมิต่ำมาก คือ $0.25\mu V/^{\circ}C$
- มีค่าออฟเซตของสัญญาณต่ำ(low offset voltage) คือ $0.25\mu V$
- มีคุณสมบัติเชิงเส้นหรือช่วงทำงานสูง(high - linearity)
- มีค่าซีเอ็มอาร์(high CMR) คือ 106 dB ที่ 60 Hz
- มีค่าความต้านทานที่ด้านรับสัญญาณสูง(high input impedance) คือ $10^{10}\ \Omega$

สำหรับอัตราขยายของไอซีเบอร์นี้มีค่าเท่ากับ $\left[1+\frac{40\times10^{3}}{R_G}\right]$ และได้ต่อชุดยกระดับสัญญาณจากวงจรขยายผลต่างสัญญาณด้วย เพื่อใช้งานในกรณีที่มีสัญญาณเริ่มต้นน้อยกว่าศูนย์โวลท์ โดยชุดยกระดับสัญญาณนี้ใช้ไอซีออปแอมป์เบอร์ 356 ซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ 3 เนื่องจากต้องการให้สัญญาณที่ออกจากวงจรขยายและยกระดับสัญญาณมีค่าอยู่ในช่วง $0-5\ V$ จึงต้องทำการปรับปรุงสัญญาณดังนี้

หาค่าสัญญาณที่อุณหภูมิ $100\ ^{\circ}C$ จะได้

$$V_1=\frac{5(10k)}{10k+110}=4.9456\ V \quad \text{และ} \quad V_2=\frac{5(10k)}{10k+140}=4.9310\ V$$

ผลต่างของสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ $100\ ^{\circ}C$ คือ $V_1-V_2=1.46\times10^{-2}\ V$ แต่ที่อุณหภูมินี้ต้องการให้มีศักย์ไฟฟ้า $5\ V$ จึงต้องมีอัตราขยาย $K=5/1.46\times10^{-2}=342$ แต่ชุดยกระดับสัญญาณมีอัตราขยายเป็น 3 เท่าอยู่แล้ว ดังนั้นเราจะได้ค่าอัตราขยายของ INA 101 เป็น $342/3=114$ แทนค่าลงในสมการอัตราขยายของ INA 101 จะได้

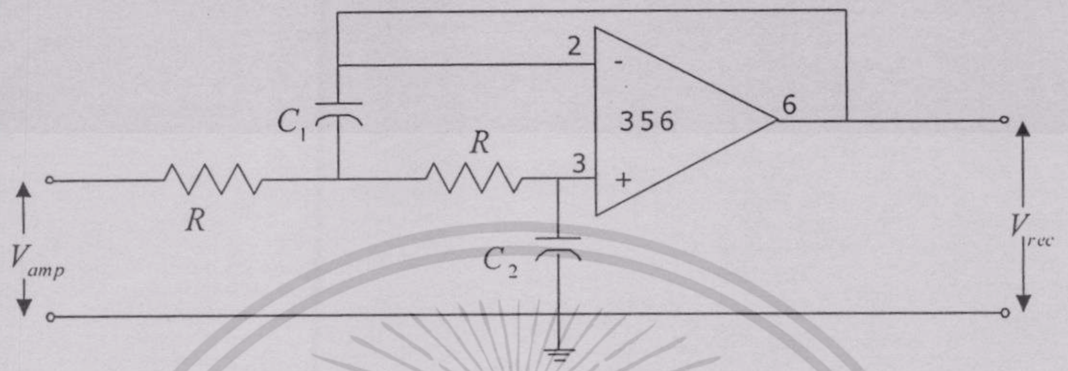
$$R_G=\frac{40k}{(114-1)}=354\ \Omega$$

นั่นคือ เมื่อปรับค่าต่าง ๆ ตามที่ได้คำนวณแล้ว จะได้ค่าสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $25-100\ ^{\circ}C$ อยู่ในช่วง $0-5\ V$ ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.5 วงจรกรองความถี่

สัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่อยู่ในช่วง $0-5\ V$ จะผ่านวงจรกรองความถี่เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน แสดงวงจรกรองความถี่ดังในรูปที่ ก 5



รูปที่ ก.5 แสดงวงจรจรกรองความถี่

จากรูป หาฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้

$$\frac{V_{rec}}{V_{amp}} = \frac{\left(\dfrac{1}{C_1C_2R^2}\right)}{s^2+\left(\dfrac{2s}{C_1R}\right)+\left(\dfrac{1}{C_1C_2R^2}\right)} = \frac{w_n^{\ 2}}{s^2+2\xi w_n s+w_n^{\ 2}}$$

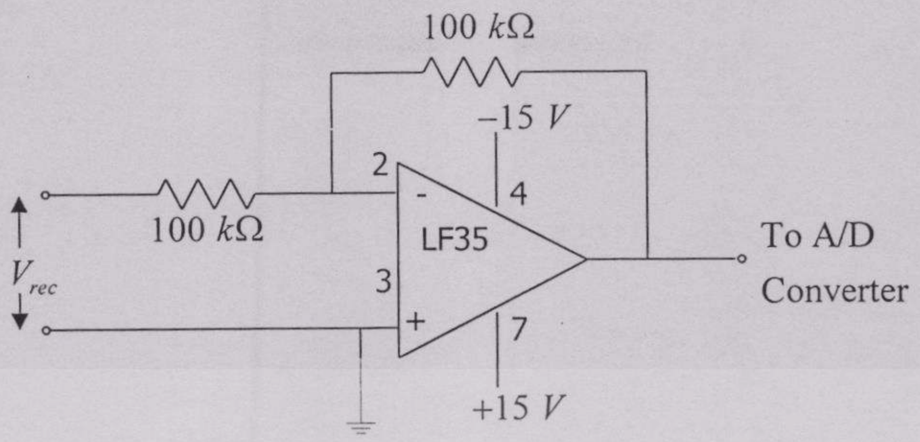
นั่นคือ จะได้ $w_n = \dfrac{1}{\sqrt{C_1C_2R^2}}$ และ $\xi = \sqrt{\dfrac{C_2}{C_1}}$

ในการทดลองนั้นต้องการค่า $w_n = 6.3$ และ $\xi = 0.707$ จึงเลือกค่า $R = 510\ K\Omega$ $C_1 = 0.44\ \mu F$ และ $C_2 = 0.22\ \mu F$ และเมื่อนำฟังก์ชันถ่ายโอนมาพล๊อตผลตอบสนองเชิงความถี่ จะพบว่าเป็นวงจรกรองความถี่สูง คือกำจัดสัญญาณรบกวนทิ้งไปเพื่อให้วงจรทำงานได้อย่างถูกต้อง

ก.6 วงจรอินเวอร์ตติ้งแอมปลิไฟเออร์

สัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากวงจรกรองความถี่มีค่าเป็นลบ จึงต้องกลับเฟสของสัญญาณก่อนเข้าการ์ดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล(Analog to Digital Converter:ADC) แสดงวงจรดังรูปที่ ก 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.6 แสดงวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมปลิไฟเออร์

ก.7 การ์ดแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอลและแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอก

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ PCDIO CARD เป็นลักษณะของ PC CARD ที่ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างสัญญาณดิจิตอลที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์กับสัญญาณอนาลอกที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน

ก.7.1 ส่วนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

ในส่วนนี้ใช้ไอซีเบอร์ ADC0804 ขนาด 8 บิต ทำหน้าที่รับสัญญาณอินพุตที่อยู่ในรูปของสัญญาณ อนาลอกแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณดิจิตอล เพื่อทำการประมวลผล ซึ่งใช้ในการเชื่อมต่อ(Interface) กับอุปกรณ์ภายนอกที่ให้สัญญาณเป็นอนาลอก โดยรับสัญญาณอนาลอกที่มีขนาดของสัญญาณอยู่ในช่วง $0-5V$

ก.7.2 ส่วนแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก

ส่วนนี้ใช้ไอซีเบอร์ DAC0832 ขนาด 8 บิต ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณอนาลอก ซึ่งการควบคุมขนาดของสัญญาณเอาท์พุตที่เป็นอนาลอกนั้น ทำได้โดยการส่งค่าออกไปยังพอร์ตควบคุมของไอซี ซึ่งขนาดของสัญญาณเอาท์พุตที่ได้นั้น จะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้น นั่นคือ

ถ้าส่งค่า FFH จะได้ค่าสัญญาณเอาท์พุตขนาดสูงสุด

ถ้าส่งค่า 7FH จะได้ค่าสัญญาณเอาท์พุตขนาดครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด

ถ้าส่งค่า FFH จะได้ค่าสัญญาณเอาท์พุตขนาดต่ำสุด

เนื่องจากไอซีเบอร์ DAC0832 มีขนาด 8 บิต จึงมีความละเอียด 256 ค่าจากย่านความกว้างของสัญญาณทั้งหมด ในที่นี้ต้องการส่งค่าสัญญาณอนาลอกออกไปควบคุมให้อยู่ในช่วง $0-10V$ ดังนั้นจะได้ความละเอียดของสัญญาณแต่ละค่ามีขนาเท่ากับ $10/256=0.039V$

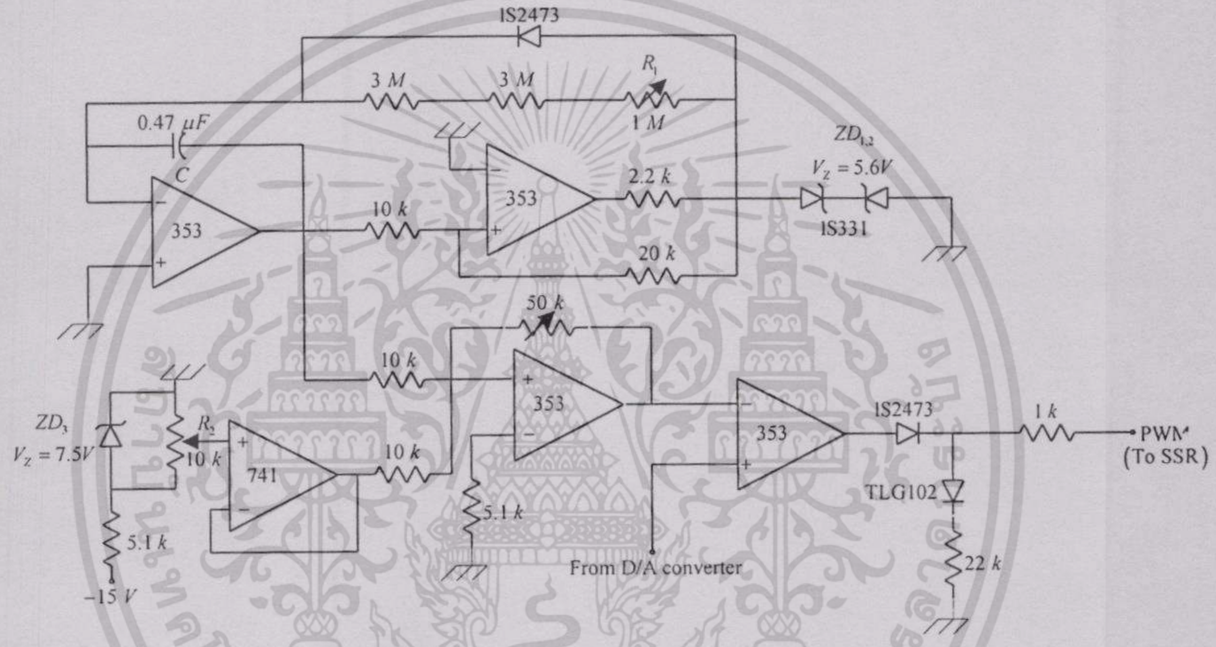
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.8 วงจรแอคทูเอเตอร์

เป็นวงจรที่ควบคุมการทำงานของขดลวดความร้อน ให้สามารถจ่ายพลังงานเป็นเปอร์เซนต์มากหรือน้อยตามสัญญาณควบคุมที่ได้คำนวณมาแล้วด้วยตัวควบคุม โดยประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

ก.8.1 วงจรพัลซ์วิดท์มอดูเลชัน

วงจรพัลซ์วิดท์มอดูเลชัน(pulse width modulation) เป็นวงจรที่จ่ายสัญญาณพัลซ์โดยมีขนาดของพัลซ์สัมพันธ์กับขนาดของสัญญาณควบคุม แสดงลักษณะวงจรดังรูปที่ ก 7



รูปที่ ก.7 แสดงวงจรพัลซ์วิดท์มอดูเลชัน

สามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 4 ส่วนย่อยดังนี้

- ส่วนกำเนิดสัญญาณฟันปลา(saw-tooth generator) จากรูป ก 7 ซีเนอร์ไดโอด ZD_1 และ ZD_2 จะทำหน้าที่เป็นออสซิเลเตอร์(oscillator) ให้สัญญาณผ่านวงจรความต้านทานและตัวเก็บประจุ ซึ่งจะให้ค่าคงที่เวลาเท่ากับ R_1C โดยผลที่ได้จากวงจรส่วนนี้จะเป็นสัญญาณฟันปลาที่มีขนาดเท่ากับค่าเบรคดาวน์(break down) ของ ZD_1 และ ZD_2 คือ $5.6V$ และมีขนาดของคาบเวลาเท่ากับค่าคงที่ R_1C (R_1 อยู่ในช่วง $6-7M$ และ C มีค่า $0.47\mu F$) หรือมีค่าประมาณ 3 วินาที
- ส่วนยกระดับสัญญาณฟันปลา ประกอบด้วยบัฟเฟอร์แอมปลิไฟเออร์ที่ใช้ไอซีเบอร์ 741 ประกอบขึ้นมา ซึ่งจะให้ศักย์ไฟฟ้าตามค่าเบรคดาวน์ของ ZD_3 คือ $7.5V$ และสามารถเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยการปรับค่า R_2 โดยวงจรส่วนนี้จะรวมกับสัญญาณฟันปลาทำให้เกิดสัญญาณที่เป็นค่าลบ เพื่อเตรียมเข้าสู่วงจรขยายแบบอินเวอร์ติงต่อไป

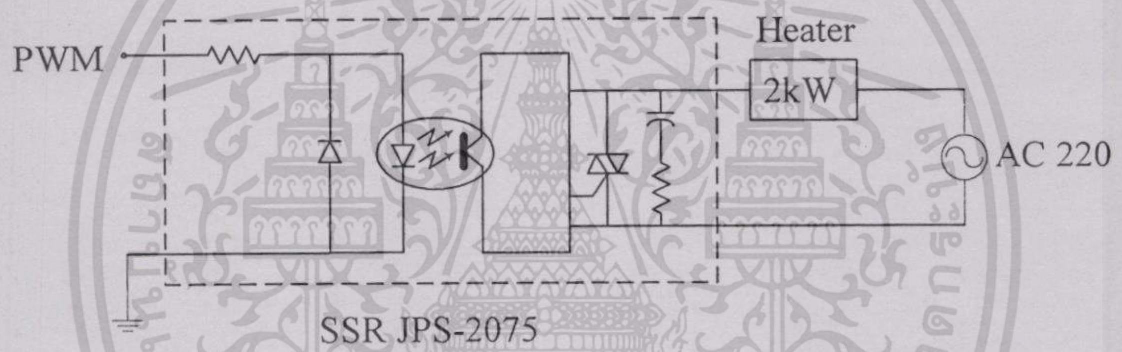
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วงจรขยายแบบอินเวอร์ติง ทำหน้าที่ขยายสัญญาณฟันปลาให้มีขนาดอยู่ในช่วง $0-10V$ เพื่อเข้าสู่วงจรคอมพาราเตอร์(comparator) ต่อไป

- วงจรคอมพาราเตอร์ จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมกับสัญญาณฟันปลา ทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณพัลซ์ที่มีขนาดของคาบกว้างหรือแคบตามขนาดของสัญญาณควบคุม โดยมีแอมปลิจูดคงที่

ก.8.2 โซลิตสเตทรีเลย์

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โซลิตสเตทรีเลย์(solid state relay) หมายเลข JPS - 2075 ซึ่งมีวงจรเสมือนแสดงดังรูปที่ ก.8 มีหลักการทำงานคือ สัญญาณพัลซ์วิดท์มอดูเลชัน(PWM)จะมากระตุ้นให้ออปโตทรานซิสเตอร์(optertransister) ไปกระตุ้นวงจรสวิตซ์ให้จ่ายพลังงานตามคาบของสัญญาณพัลซ์วิดท์มอดูเลชันนั้น



รูปที่ ก.8 แสดงวงจรเสมือนของโซลิดสเตทรีเลย์หมายเลข JPS - 2075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความที่ 1 ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร วิศวสารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2544 ในชื่อเรื่อง

การออกแบบตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี สำหรับกระบวนการเชิงเส้นที่อยู่ในช่วง

Design of a Takagi-Sugeno Fuzzy PI+D Controller for Linear Interval Process

บทความที่ 2 ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 วันที่ 22-23 พฤศจิกายน 2544 ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในชื่อเรื่อง

การออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพระบบควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ

Design and Stability Analysis of a Takagi-Sugeno Fuzzy PD+I Control System

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี สำหรับกระบวนการเชิงเส้นที่อยู่ในช่วง

Design of a Takagi-Sugeno Fuzzy PI+D Controller for Linear Interval Process

อรรถพล กัณหเวก จงกล งามวิวิทย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุธี ผู้เจริญชนะชัย

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และระบบอัตโนมัติ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

บทคัดย่อ

ในบทความนี้จะนำเสนอการควบคุมกระบวนการเชิงเส้นที่เกนมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง โดยใช้ตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี ซึ่งจะแสดงการวิเคราะห์โครงสร้างและแสดงเงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมชนิดนี้โดยใช้ทฤษฎีบทเกนน้อย ผลการจำลองการควบคุมกระบวนการที่เกนมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่ทราบขอบเขตโดยใช้ตัวควบคุมนี้พบว่า ผลตอบสนองเร็วและมีเสถียรภาพ นอกจากนี้ผลตอบสนองจะลู่เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วเมื่อมีตัวรบกวนคงที่เข้ามาที่เอาท์พุต

Abstract

This paper proposes a method of controlling linear, interval gain process by using Takagi-Sugeno fuzzy PI+D controller. Analytical structure and stability condition guaranteed by Small Gain Theorem of the Takagi-Sugeno fuzzy PI+D controller are shown. The simulation results demonstrate that the response of the proposed control system is fast and stable for known boundary of the interval gain, and the effect of constant output disturbance is fast rejected.

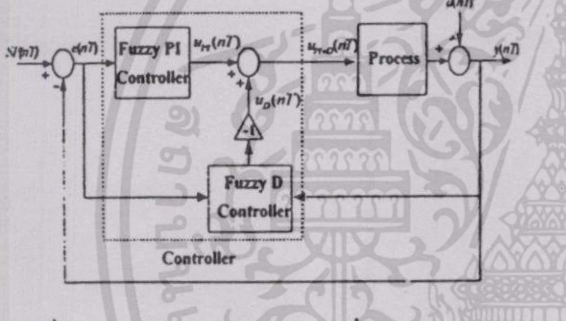
1. บทนำ

ตัวควบคุมฟัซซีเป็นตัวควบคุมหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายปัจจุบัน เนื่องจากสามารถชดเชยข้อเสียของตัวควบคุมดั้งเดิมที่ไม่สามารถควบคุมระบบให้มีผลตอบสนองที่ดีกับระบบที่ไม่สามารถรู้ค่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แน่นอนรวมทั้งระบบที่มีความซับซ้อนได้ ซึ่งตัวควบคุมฟัซซีแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือชนิดแมมดานิ (Mamdani type) ซึ่งอธิบายผลลัพธ์ของกฎการควบคุมในรูปตัวแปรเชิงภาษา(lingustic value) และชนิดทากาจิ-ซูเกโน(Takagi-Sugeno type)[1] ซึ่งอธิบายผลลัพธ์ของกฎการควบคุมในรูปของสมการเชิงเส้น(linear equation) เนื่องจากตัวควบคุมฟัซซีชนิดหลัง สามารถเขียนกฎในรูปของสมการเชิงเส้นได้ จึงสะดวกต่อการหาเงื่อนไขเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความแรกๆของตัวควบคุมฟัซซีจะใช้กฎการควบคุมชนิดแมมดานิ เช่นฟัซซีพีไอ[2]หรือฟัซซีพีดี[3] และได้ปรับปรุงมาจนเป็นฟัซซีพีไอ+ดี[4] ต่อมาได้มีบทความเกี่ยวกับตัวควบคุมฟัซซีที่ใช้กฎการควบคุมชนิดทากาจิ-ซูเกโน โดยได้ออกแบบตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ (Takagi-Sugeno fuzzy PI controller)[5] เพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อทางการแพทย์

บทความนี้จะประยุกต์ใช้ตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี ในการควบคุมกระบวนการเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 1 โดยค่าเกนของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วง และหาเงื่อนไขการมีเสถียรภาพของระบบควบคุมโดยใช้ทฤษฎีบทเกนน้อย(small gain theorem) พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองระบบควบคุม



รูปที่1 โครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี

2. โครงสร้างตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี

จากรูปที่ 1 เป็นโครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี ซึ่งโครงสร้างของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดีแสดงอยู่ภายในกรอบเส้นประ ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนของตัวควบคุมฟัซซีพีไอและส่วนของตัวควบคุมฟัซซีดี โดยได้ปรับปรุงเพิ่มเติมมาจากตัวควบคุมฟัซซีพีไอ+ดีชนิดแมมดานิ (Mamdani type)[4] ดังนั้น กฎการควบคุมตัวควบคุมทากาจิ- ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี แสดงได้ดังสมการที่(1)

$$u_{PI+D}(nT) = u_{PI}(nT) + u_D(nT) \quad (1)$$

เมื่อ $u_{PI+D}(nT)$ คือสัญญาณเอาท์พุดของส่วนการควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี $u_{PI}(nT)$ คือสัญญาณเอาท์พุดของส่วนการควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ และ $u_D(nT)$ คือสัญญาณเอาท์พุดของส่วนการควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีดี

สำหรับตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอจะมีสัญญาณอินพุดคือค่าความผิดพลาด($e(nT)$) และการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด($\Delta e(nT)$) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$e(nT) = SP(nT) - y(nT)$$

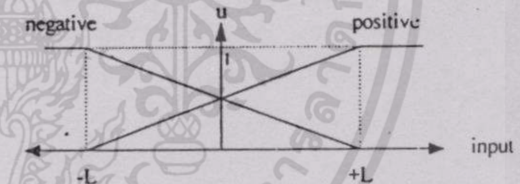
$$\Delta e(nT) = \frac{e(nT) - e(nT-T)}{T}$$

และตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีดีจะมีสัญญาณอินพุดคือค่าความผิดพลาด($e(nT)$) และค่าเฉลี่ยของสัญญาณเอาท์พุด($\Delta y_D(nT)$) นั่นคือ

$$e(nT) = SP(nT) - y(nT)$$

$$\Delta y_D(nT) = \frac{y(nT) - y(nT-T)}{T}$$

เมื่อ n คือเลขจำนวนจริงบวก T คือคาบการสุ่ม SP คือสัญญาณอ้างอิง $d(nT)$ คือสัญญาณรบกวนที่เอาท์พุด (output disturbance) ซึ่ง $d(nT)$ ในบทความนี้จะพิจารณาเป็นสัญญาณค่าคงที่ และอินพุดแต่ละค่าจะถูกฟัซซิไฟด์ (fuzzified)ด้วยฟัซซีเซ็ตที่ประกอบด้วยสมาชิกที่ชื่อ "positive" และ "negative" แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของสัญญาณอินพุด

นอกขอบเขต [-L +L] ค่าความเป็นสมาชิกมีค่าไม่เป็นศูนย์ก็เป็นหนึ่งและกฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีพีไอสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีพีไอ

		$\Delta e(nT)$	
		Positive	Negative
$e(nT)$	Positive	$\Delta u_{PI_1}(nT)$	$\Delta u_{PI_2}(nT)$
	Negative	$\Delta u_{PI_3}(nT)$	$\Delta u_{PI_4}(nT)$

เมื่อ $\Delta u_{PI_1}(nT) = a_1 e(nT) + b_1 \Delta e(nT)$

$$\Delta u_{PI_2}(nT) = a_2 e(nT) + b_2 \Delta e(nT) \quad (2)$$

$$\Delta u_{PI_3}(nT) = a_3 e(nT) + b_3 \Delta e(nT)$$

$$\Delta u_{PI_4}(nT) = a_4 e(nT) + b_4 \Delta e(nT)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ladkrabang Engineering Journal, Vol.18, No. 1; March 2001

โดยที่ค่า a_i และ b_i คือ พารามิเตอร์ที่จะออกแบบ เมื่อ $i = 1,2,3,4$ μ_{PI_i} คือ ค่าความเป็นสมาชิกผลลัพธ์ของกฎที่ i โดยใช้วิธีเซ็นทรอยด์ดิฟัซซิไฟด์(centroid defuzzified) คำนวณค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมฟัซซีพีไอได้ดังนี้

$$\Delta u_{PI}(nT) = \frac{\sum_{i=1}^{4} \Delta u_{PI_i}\mu_{PI_i}}{\sum_{i=1}^{4} \mu_{PI_i}} \quad (3)$$

แทนค่า Δu_{PI_i} จากสมการที่ (2) ลงในสมการที่ (3) จะได้

$$\Delta u_{PI}(nT) = K_I(e,\Delta e).e(nT) + K_P(e,\Delta e).\Delta e(nT)$$

เมื่อ $K_I(e,\Delta e) = \frac{\sum_{i=1}^{4} b_i\mu_{PI_i}}{\sum_{i=1}^{4} \mu_{PI_i}}$, $K_P(e,\Delta e) = \frac{\sum_{i=1}^{4} a_i\mu_{PI_i}}{\sum_{i=1}^{4} \mu_{PI_i}}$

แปลงไบลิเนียร์(bilinear transform) ของสมการตัวควบคุมพีไอ[4] จะได้เอาท์พุตใหม่ของตัวควบคุมฟัซซีพีไอที่เวลา nT + T คือ

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT - T) + T.\Delta u_{PI}(nT) \quad (4)$$

ในส่วนของฟัซซีดีจะมีกฎการควบคุมแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีดี

		$\Delta y_D(nT)$	
		Positive	Negative
$e(nT)$	Positive	$\Delta u_{D_1}(nT)$	$\Delta u_{D_2}(nT)$
	Negative	$\Delta u_{D_3}(nT)$	$\Delta u_{D_4}(nT)$

โดยที่

$$\Delta u_{D_1}(nT) = c_1\Delta y_D(nT)$$
$$\Delta u_{D_2}(nT) = c_2\Delta y_D(nT) \quad (5)$$
$$\Delta u_{D_3}(nT) = c_3\Delta y_D(nT)$$
$$\Delta u_{D_4}(nT) = c_4\Delta y_D(nT)$$

และค่า c_i คือ พารามิเตอร์ที่จะออกแบบ เมื่อ $i = 1,2,3,4$ μ_{D_i} คือ ค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์ของกฎที่ i โดยใช้วิธีเซ็นทรอยด์ดิฟัซซิไฟด์คำนวณค่าเอาท์พุตที่เปลี่ยนไปของตัวควบคุมฟัซซีดีได้

$$\Delta u_D(nT) = \frac{\sum_{i=1}^{4} \Delta u_{D_i}\mu_{D_i}}{\sum_{i=1}^{4} \mu_{D_i}} \quad (6)$$

แทนค่า Δu_{D_i} จากสมการที่ (5) ลงในสมการที่ (6) จะได้

$$\Delta u_D(nT) = K_D(e,\Delta y_D).\Delta y_D(nT)$$

เมื่อ $K_D(e,\Delta y_D) = \frac{\sum_{i=1}^{4} c_i\mu_{D_i}}{\sum_{i=1}^{4} \mu_{D_i}}$

แปลงไบลิเนียร์ของสมการตัวควบคุมดี[4] จะได้เอาท์พุตใหม่ของตัวควบคุมฟัซซีดี ที่เวลา nT + T คือ

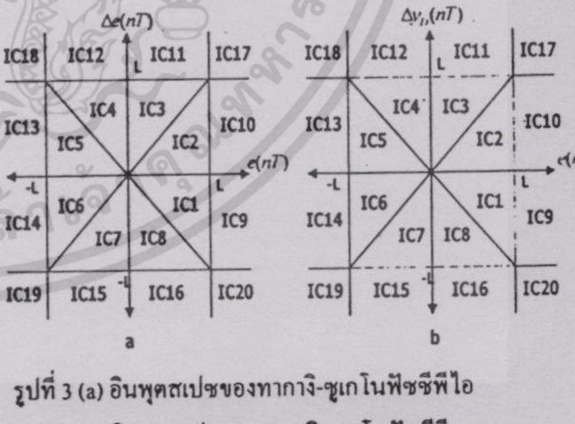
$$u\ (nT) = -u_D(nT - T) + T.\Delta u_D(nT)$$

หรือ $u_D(nT) = u_D(nT - T) - T.\Delta u_D(nT)$ (7)

เมื่อให้ $u_D(nT) = -u\ (nT)$

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพนั้นจะใช้ทฤษฎีบทเกนน้อย[6] โดยแบ่งอินพุตสเปซ(input space) ของส่วนฟัซซีพีไอและฟัซซีดีเป็น 20 ส่วน(Input Component:IC) ดังรูปที่ 3 และในที่นี้จะแสดงเงื่อนไขค่า $K_I^{max}(e,\Delta e)$ $K_P^{max}(e,\Delta e)$ และ $K_D^{max}(e,\Delta y_D)$ ที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพเพียง 8 ส่วน(IC1-IC8) โดยที่ค่า $K_I^{max}(e,\Delta e)$ $K_P^{max}(e,\Delta e)$ และ $K_D^{max}(e,\Delta y_D)$ คือค่าเกนภายในตัวควบคุมที่มีค่ามากที่สุด ทั้งนี้ถ้าหากสามารถออกแบบระบบการควบคุมให้สอดคล้องเงื่อนไขที่หามาเพียง 8 ส่วนแล้วก็จะสามารถมีเสถียรภาพทั้งหมด20ส่วน[2,3,4]



รูปที่ 3 (a) อินพุตสเปซของทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ

(b) อินพุตสเปซของทากากิ-ซูเกโนฟัซซีดี

3.1 เงื่อนไขเสถียรภาพตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ[5] สามารถแสดงเงื่อนไขในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 เงื่อนไขค่า $K_I^{max}(e.\Delta e)$ $K_P^{max}(e.\Delta e)$ และ $K_D^{max}(e.\Delta y_D)$ ที่ทำให้ระบบเสถียร

IC#	$K_I^{max}(e.\Delta e)$	$K_P^{max}(e.\Delta e)$	$K_D^{max}(e.\Delta y_D)$
IC1 & IC8	$\frac{a_1+2a_2+a_3+a_4}{2}$	$\frac{b_1+2b_2+b_3+b_4}{2}$	$\frac{c_5+2c_6+c_7+c_8}{2}$
IC2 & IC3	$\frac{2a_1+a_2+a_3+a_4}{2}$	$\frac{2b_1+b_2+b_3+b_4}{2}$	$\frac{2c_5+c_6+c_7+c_8}{2}$
IC4 & IC5	$\frac{a_1+a_2+2a_3+a_4}{2}$	$\frac{b_1+b_2+2b_3+b_4}{2}$	$\frac{c_5+c_6+2c_7+c_8}{2}$
IC6 & IC7	$\frac{a_1+a_2+a_3+2a_4}{2}$	$\frac{b_1+b_2+b_3+2b_4}{2}$	$\frac{c_5+c_6+c_7+2c_8}{2}$

$$\left(TK_I^{max}(e.\Delta e)+K_P^{max}(e.\Delta e)\right)\|P\|\leq 1 \qquad (8)$$

โดยที่ P คือกระบวนการที่จะถูกควบคุม มีค่า $\|P\|<\infty$ และเงื่อนไขค่า $K_I^{max}(e.\Delta e)$ และ $K_P^{max}(e.\Delta e)$ ที่ทำให้ระบบเสถียรแสดงได้ดังตารางที่3

3.2 เงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีดี

หาเงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี โดยใช้แนวทางเดียวกับการหาเงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ แล้วกำหนดค่าแกน $K_P^{max}(e.\Delta e)$ ให้เป็นศูนย์ จะได้เงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีดีดังสมการ

$$K_D^{max}(e.\Delta e)\|P\|\leq 1 \qquad (9)$$

โดยค่า $\|P\|<\infty$ และเงื่อนไขค่า $K_D^{max}(e.\Delta y_D)$ แสดงในตารางที่ 3

3.3 เงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี

เงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดีนั้น จะรวมเงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอและเงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีดีเข้าด้วยกัน ดังสมการ

$$\left\{\left(TK_I^{max}(e.\Delta e)+K_P^{max}(e.\Delta e)\right)+K_D^{max}(e.\Delta y_D)\right\}\|P\|\leq 1 \qquad (10)$$

หากออกแบบค่า $K_I^{max}(e.\Delta e)$ $K_P^{max}(e.\Delta e)$ และ $K_D^{max}(e.\Delta y_D)$ ให้สอดคล้องกับสมการที่ (10) แล้วจะสามารถประกันเสถียรภาพของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดีได้

เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบเสถียรภาพของระบบในกรณีที่กระบวนการ P มีค่าอยู่ในช่วงนั้น จะใช้เงื่อนไขทฤษฎีบทเกนน้อยสำหรับระบบที่เป็นช่วง[6] ซึ่งกล่าวว่าสำหรับระบบที่กระบวนการมีค่าเกนอยู่ในช่วงนั้น ถ้าหากเกนมากที่สุดของกระบวนการสามารถการันตีเสถียรภาพตามทฤษฎีบทเกนน้อยแล้ว ระบบที่กระบวนการมีค่าเกนอยู่ในช่วงทั้งหมดก็จะสามารถการันตีเสถียรภาพตามทฤษฎีบทเกนน้อยด้วย นั่นคือจะได้เงื่อนไขเสถียรภาพตามทฤษฎีบทเกนน้อยดังนี้

$$\|C\|.\|P\|_{max}\leq 1$$

โดยที่ $\|C\|$ และ $\|P\|_{max}$ คือนอร์มของตัวควบคุมและของกระบวนการเชิงเส้นที่เกนมีค่าอยู่ในช่วงตามลำดับ ดังนั้นจากเงื่อนไขในสมการ(10) จะได้

$$\left\{\left(TK_I^{max}(e.\Delta e)+K_P^{max}(e.\Delta e)\right)+K_D^{max}(e.\Delta y_D)\right\}\|P(z)\|_{max}\leq 1 \qquad (11)$$

ซึ่งค่าเกนตัวควบคุมที่สอดคล้องกับสมการที่ (11) จะทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพ

4. การจำลองการควบคุม

ในการจำลองระบบควบคุมนั้นจะใช้กระบวนการเชิงเส้นที่เกิดเวลาหน่วง(time delay)[5] ดังสมการ

$$P(s)=\frac{K}{250s+1}e^{-15s} \qquad (12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ladkrabang Engineering Journal, Vol.18, No. 1, March 2001

กระบวนการนี้มีค่าคงที่เวลา(time constant) เท่ากับ 250 วินาที และเวลาหน่วง 45 วินาที เกน **K** นั้นอ้างอิงจาก[5] จะมีค่าคงที่เท่ากับ 1.1 แต่ในความเป็นจริงค่าเกน **K** เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นในที่นี้จึงพิจารณาให้ **K** เท่านั้นมีขอบเขตการเปลี่ยนแปลงไป $\pm 25\%$ นั่นคือเมื่อค่า **K** เท่ากับ 1.1 แล้ว **K** อยู่ในช่วง [0.825 1.375]

เมื่อประมาณเทอมที่เกิดการหน่วง e^{-45s} ของสมการที่(12)เป็นอันดับ4 ด้วยวิธีพาเด(Pade approximation)ตาม [5] และทำการแปลงแซด(Z-transform) โดยใช้คาบการสุ่ม 1 วินาทีและใช้ค่า **K** =1.1 จะได้

$$P(z)=\frac{0.0027z^{4}-0.012z^{3}+0.0203z^{2}-0.0152z+0.0043}{z^{5}-4.5619z^{4}+8.3324z^{3}-7.6173z^{2}+3.4855z-0.6386} \qquad (13)$$

เพื่อใช้ออกแบบตัวควบคุมทาคากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพสมการ(11) ซึ่งจะคิดเงื่อนไขในกรณีที่แย่ที่สุด(worst case condition) นั่นคือค่าเกน **K** มากที่สุดเพื่อให้กระบวนการมีค่านอร์มมากที่สุด ถ้าในกรณีที่แย่ที่สุดนี้ระบบยังมีเสถียรภาพอยู่ได้แล้ว แม้ว่าค่าเกน **K** ของกระบวนการจะเปลี่ยนไป ระบบก็จะยังคงรักษาเสถียรภาพไว้ได้ เมื่อค่า **K** =1.375 จะได้ $\|P(z)\|_{max}=$ 0.0691 และแทนค่า $\|P(z)\|_{max}$ ลงในสมการที่ (11) ได้

$$\left\{\left(TK_I^{max}(e,\Delta e)+K_P^{max}(e,\Delta e)\right)+K_D^{max}(e,\Delta y_D)\right\}(0.0691)\leq 1 \qquad (14)$$

เลือกค่า $K_I^{max}(e,\Delta e)$ $K_P^{max}(e,\Delta e)$ และ $K_D^{max}(e,\Delta y_D)$ ให้สอดคล้องกับสมการที่(14) ซึ่งจะได้ a_i b_i และ c_i $(i=1,2,3,4)$ เป็นพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการออกแบบกฎการควบคุมในสมการที่(2)และ(5) ตารางที่ 4 แสดงถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

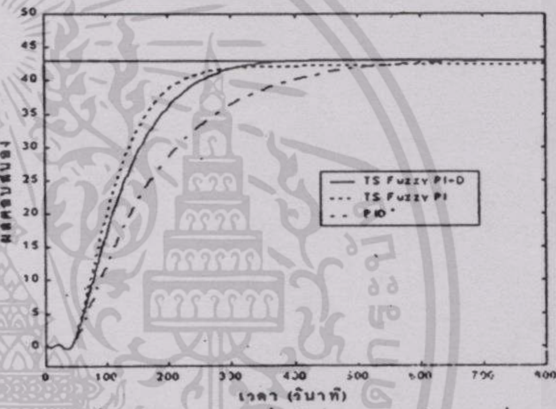
ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบ

	a_i	b_i	c_i
$i=1$	0.0047	2	0.01
$i=2$	0.0060	1.5	0.02
$i=3$	0.0010	2	0.04
$i=4$	0.0010	2	0.04

ในหัวข้อต่อไปจะแสดงผลการจำลองการควบคุมระบบที่ใช้ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบตามที่กล่าวไว้ข้างต้นดังนี้

4.1 ผลตอบสนองเมื่อป้อนสัญญาณอ้างอิงคงที่

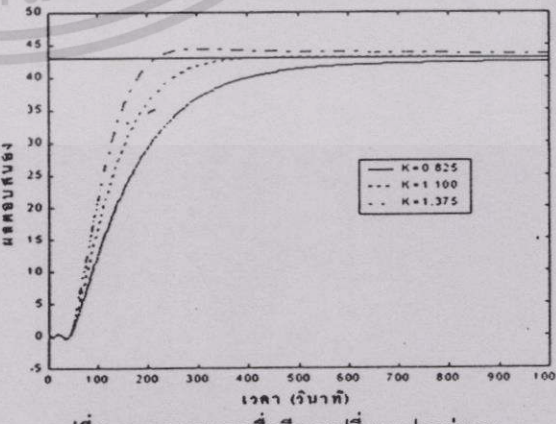
เมื่อป้อนสัญญาณอ้างอิงคงที่ขนาด 43 จะได้ผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมทาคากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี ตัวควบคุมทาคากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอและระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีซึ่งออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีเริ่มต้นโดยใช้วิธีที่ 2 ของซีเกลอร์-นิโคล(Ziegler-Nichols) และทำการปรับแต่งต่อไปจนได้ผลตอบสนองที่ไม่มีค่าพุ่งเกิน(overshoot) จะได้Kp=1.2 Ki=0.005 และ Kd=0.06 จากรูปที่ 4 พบว่าตัวควบคุมทาคากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดีจะให้ผลตอบสนองเข้าสู่สถานะคงตัวได้เร็วกว่าตัวควบคุมทาคากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอและตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 4 ผลตอบสนองเมื่อป้อนสัญญาณอ้างอิงคงที่

4.2 ผลตอบสนองเมื่อเปลี่ยนค่าเกนของกระบวนการ

เมื่อนำตัวควบคุมทาคากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดีที่ออกแบบโดยใช้ค่าเกน **K** =1.1 ไปใช้ควบคุมกระบวนการที่ค่าเกน **K** =0.825 และ **K** =1.375 พบว่าตัวควบคุมยังสามารถควบคุมให้ระบบเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเกน

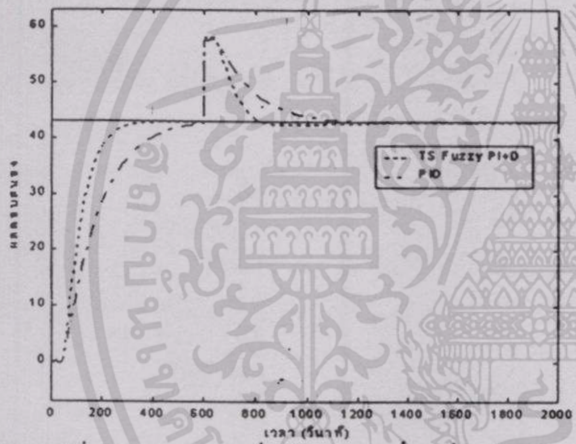
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบด้วย K =1.1 ไปควบคุมกระบวนการที่ค่าเกน K =0.825 และ K =1.375 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม

K	Controller	t_r (s)	$\%P_O$	t_s (s)	$\%Ess$
0.825	TS Fuzzy PI+D	266.49	0.00	683.77	0.00
	PID	421.48	0.00	762.94	0.00
1.100	TS Fuzzy PI+D	146.11	0.00	312.46	0.00
	PID	288.45	0.00	528.98	0.00
1.375	TS Fuzzy PI+D	95.05	2.69	274.71	0.00
	PID	207.17	0.36	386.71	0.00

4.3 ผลตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 6 ผลตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนที่เอาท์พุต

เมื่อมีสัญญาณรบกวนคงที่(output disturbance) $d(nT)$ ขนาด 15 เข้ามาที่เอาท์พุตของระบบ โดยใช้ตัวควบคุมที่ถูกออกแบบภายใต้ค่า K =1.1 จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดีจะเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอดี

5. สรุปและแนวทางพัฒนา

ในการควบคุมระบบเชิงเส้นที่อยู่ในช่วงด้วยการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดีให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพของกระบวนการที่อยู่ในช่วง(โดยพิจารณาค่าอินฟินิตี้นอร์มที่มากที่สุดของกระบวนการ) ก็จะสามารถประกันเสถียรภาพของระบบควบคุมทุกค่าการเปลี่ยนแปลงของเกนกระบวนการที่อยู่ในช่วงได้ ซึ่งจากผลการจำลองการควบคุมพบว่า ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดีจะมีผลตอบสนองเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอดี และระบบยังคงเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงของเกนกระบวนการที่อยู่ในช่วง นอกจากนี้ ระบบควบคุมยังสามารถกำจัดอิทธิพลของตัวรบกวนที่เข้ามาที่เอาท์พุตได้เร็ว

สามารถพัฒนาให้เป็นตัวควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอดีต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช.) ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] R. Palm, D. Driankov, H. Hellendoorn, Model based fuzzy control:fuzzy gain schedulers and sliding mode fuzzy controllers, Berlin:Springer, 1997.

[2] G. -R. Chen and H. Ying, "BIBO stability of nonlinear fuzzy PI control system," J. Intelligent & Fuzzy System, Vol.5, pp. 245-256, 1997.

[3] H.A. Malki, G. -R Chen, "New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems," IEEE Trans. Fuzzy Systems, pp.245-254, 1994.

[4] D. Misir, H. A. Malki, G.Chen, "Design and analysis of a fuzzy proportional-integral-derivative controller." Fuzzy Sets and Systems, Vol.79, pp.297-314, 1996.

[5] Y. Ding, H. Ying and S. Shao, "Theoretical Analysis of a Takagi-Sugeno Fuzzy PI Controller with Application to Tissue Hyperthermia Therapy," IEEE Trans. on Fuzzy System, Vol.1, pp.252 –257, 1998.

[6] S. P. Bhattacharyya, H. Chapellat, Robust Control:The Parametric Approach, Prentice Hall, pp.387-394, 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพระบบควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ

Design and Stability Analysis of a Takagi-Sugeno Fuzzy PD+I Control System

อรรถพล กัณหวก   จงกล งามวิวิทย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทร : (02)326-9989   E-mail : knjongko@kmitl.ac.th

สุธี ผู้เจริญชนะชัย

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และระบบอัตโนมัติ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ   โทร : (02)942-6028 ต่อ 531   E-mail : suthee@notes.nectec.or.th

บทคัดย่อ

บทความนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอที่มีค่าเกนของตัวควบคุมถูกปรับแต่งตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม และมีโครงสร้างเชิงเส้นเช่นเดียวกับตัวควบคุมพีไอดีดั้งเดิม ในการออกแบบตัวควบคุมนี้ จะกล่าวถึงการฟัซซิฟิเคชัน กฎการควบคุมและการดีฟัซซิฟิเคชัน รวมทั้งการใช้ทฤษฎีบทเกนน้อยเพื่อหาเงื่อนไขที่เพียงพอในการวิเคราะห์เสถียรภาพ สุดท้ายจะประยุกต์ใช้ตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ ที่ได้ออกแบบไปจำลองการควบคุมกระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนองสั้นและเวลาไร้ผลตอบสนองยาว ผลการจำลองพบว่า ระบบควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอให้ผลตอบสนองเป็นที่น่าพอใจและมีเสถียรภาพ ถึงแม้จะมีสัญญาณรบกวนที่เอาท์พุต

Abstract

This paper proposes the design of a Takagi-Sugeno(TS) fuzzy PD+I controller with gains varied according to its input signals, having linear structure as conventional PID controller. The fuzzification, control-rule base and defuzzification in designing TS fuzzy PD+I controller are discussed in detail. The Small Gain Theorem is utilized to derive the sufficient conditions for stability. Finally the TS fuzzy PD+I controller is applied to control a process with small and long dead time. The simulation results have shown that the TS fuzzy PD+I control system achieves satisfactory performance and is stable even in the presence of output disturbance.

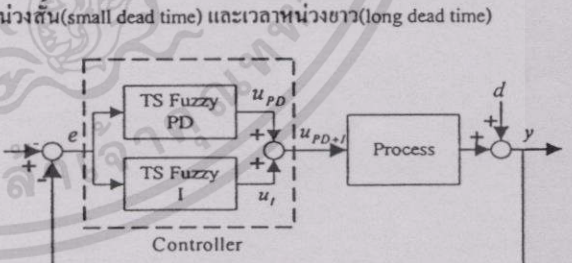
Keywords: Fuzzy control system, Takagi-Sugeno fuzzy control, Dead time, Small gain theorem, PID control

1. บทนำ

ตัวควบคุมฟัซซีเป็นตัวควบคุมหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถชดเชยข้อเสียของตัวควบคุมพีไอดีดั้งเดิมที่ไม่สามารถควบคุมระบบให้มีผลตอบสนองที่ดีสำหรับกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น มีความซับซ้อน หรือมีเวลาไร้ผลตอบสนอง เป็นต้น ซึ่งตัวควบคุมฟัซซีแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือชนิดแมมดานิ(Mamdani type) ซึ่งอธิบายผลลัพธ์ของกฎการควบคุมในรูปตัวแปรเชิงภาษา(lingustic value) และชนิดทากาจิ-ซูเกโน(Takagi-Sugeno type)[1] ซึ่งอธิบายผลลัพธ์ของกฎการควบคุมในรูปของสมการเชิงเส้น(linear equation) เนื่องจากตัวควบคุมฟัซซีชนิดหลังสามารถเขียนกฎในรูปของสมการเชิงเส้นได้ จึงสะดวกต่อการหาเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุม

บทความแรกๆของตัวควบคุมฟัซซีที่ใช้กฎการควบคุมชนิดแมมดานิ ได้แก่ ฟัซซีพีไอ[2] ฟัซซีพีดี[3] ฟัซซีพีไอ+ดี[4] และฟัซซีพีดี+ไอ[5] ต่อมาได้มีบทความเกี่ยวกับตัวควบคุมฟัซซีที่ใช้กฎการควบคุมชนิดทากาจิ-ซูเกโนได้แก่ ทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ[6] และทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดี[7]

บทความนี้จะนำเสนอการประยุกต์โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีดั้งเดิม ให้เป็นตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยใช้แนวทางเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมแมมดานิฟัซซีพีดี+ไอ[5] และหาเงื่อนไขการมีเสถียรภาพโดยใช้ทฤษฎีบทเกนน้อย(small gain theorem) พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองการควบคุมกระบวนการที่มีเวลาหน่วงสั้น(small dead time) และเวลาหน่วงยาว(long dead time)



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ

2. การออกแบบตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงหลักการทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ รวมทั้งการฟัซซิฟิเคชัน กฎการควบคุมและการดีฟัซซิฟิเคชัน จากรูปที่ 1 เป็นโครงสร้างของระบบ

CT10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ ซึ่งโครงสร้างของตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอแสดงอยู่ภายในกรอบเส้นประ ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนของตัวควบคุมฟัซซีพีดีและส่วนของตัวควบคุมฟัซซีไอ

2.1 โครงสร้างตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี

ตัวควบคุมอนาลอก PD ดั้งเดิม เป็นดังสมการ

$$U_{PD}(s) = (K_p^c + sK_d^c)E(s) \tag{1}$$

เมื่อ K_p^c คือ พรอพอชันนัลเกน(proportional gain) K_d^c คือ เดริเวอร์ทีฟเกน(derivative gain) $E(s) = SP - Y(s)$ คือค่าความผิดพลาดในการติดตามสัญญาณ SP คือสัญญาณอ้างอิง และ $Y(s)$ คือเอาท์พุต แปลงสมการที่ (1) โดยใช้การแปลงไบลิเนียร์(bilinear transform) $s = \frac{2}{T}.\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$ ให้อยู่ในรูปดีสครีต จะได้

$$U_{PD}(z) = \left(K_p^c + \frac{K_d^c 2}{T}.\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)E(z)$$

เมื่อให้ $K_p = K_p^c$ และ $K_d = \frac{K_d^c 2}{T}$ และทำการแปลงแซดกลับ(inverse z-transform) จะได้

$$\begin{aligned} u_{PD}(nT) + u_{PD}(nT-T) = K_p\left[e(nT) + e(nT-T)\right] \\ + K_d\left[e(nT) - e(nT-T)\right] \end{aligned} \tag{2}$$

หลังจากหารสมการที่(2) ตลอดทั้งสองข้างด้วย T แล้วจะได้

$$\Delta u_{PD}(nT) = K_p \gamma(nT) + K_d \upsilon(nT) \tag{3}$$

เมื่อ $\Delta u_{PD}(nT) = \frac{u_{PD}(nT) + u_{PD}(nT-T)}{T}$,

$\gamma(nT) = \frac{e(nT) + e(nT-T)}{T}$ และ $\upsilon(nT) = \frac{e(nT) - e(nT-T)}{T}$

ค่า $\Delta u_{PD}(nT)$ คือค่าเอาท์พุตที่เพิ่มขึ้นของการควบคุมของตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี $\gamma(nT)$ คือค่าความผิดพลาดเฉลี่ย $\upsilon(nT)$ คือการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด n คือเลขจำนวนเต็ม T คือคาบการสุ่ม และ $d(nT)$ เป็นสัญญาณรบกวนที่เอาท์พุต(output disturbance) ซึ่งค่าเอาท์พุตของตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดีจะหาได้จากสมการ

$$u_{PD}(nT) = -u_{PD}(nT-T) + T\Delta u_{PD}(nT) \tag{4}$$

2.2 โครงสร้างตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีไอ

ตัวควบคุมอนาลอก I ดั้งเดิม เป็นดังสมการ

$$U_I(s) = \frac{K_i^c}{s}E(s) \tag{5}$$

เมื่อ K_i^c คือ อินทิกรัลเกน(integral gain) และทำการแปลงไบลิเนียร์ของสมการที่ (5) ให้อยู่ในรูปดีสครีตจะได้

$$U_I(z) = K_i^c\left(\frac{T}{2}.\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}\right)E(z)$$

ทำการแปลงแซดกลับได้

$$u_I(nT) - u_I(nT-T) = \frac{K_i^c T}{2}\left[e(nT) + e(nT-T)\right] \tag{6}$$

ให้ $K_i = \frac{K_i^c T}{2}$ และหารสมการที่ (6) ด้วย T จะได้

$$\Delta u_I(nT) = K_i \gamma(nT) \tag{7}$$

เมื่อ $\Delta u_I(nT) = \frac{u_I(nT) - u_I(nT-T)}{T}$ ค่า $\Delta u_I(nT)$ คือค่าเอาท์พุตที่เพิ่มขึ้นของตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีไอ ซึ่งค่าเอาท์พุตของตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีไอจะหาได้จากสมการ

$$u_I(nT) = u_I(nT-T) + T\Delta u_I(nT) \tag{8}$$

2.3 โครงสร้างตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ

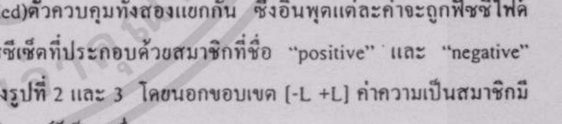
กฎการควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ ได้จากการรวมกันของกฎการควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี(4) และกฎการควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีไอ(8) ดังสมการ

$$\begin{aligned} u_{PD+I}(nT) &= u_{PD}(nT) + u_I(nT) \\ &= -u_{PD}(nT-T) + T\Delta u_{PD}(nT) \\ &\quad + u_I(nT-T) + T\Delta u_I(nT) \end{aligned} \tag{9}$$

2.4 ฟัซซิฟิเคชัน กฎการควบคุม และดีฟัซซิฟิเคชัน

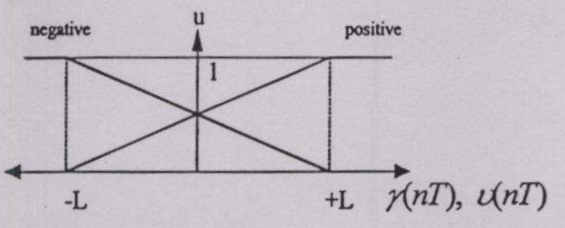
2.4.1 ฟัซซิฟิเคชัน

ตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดีและตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีไอมีสัญญาณอินพุตคือ $\gamma(nT)$ และ $\upsilon(nT)$ โดยทำฟัซซิไฟด์(fuzzified)ตัวควบคุมทั้งสองแยกกัน ซึ่งอินพุตแต่ละค่าจะถูกฟัซซิไฟด์ด้วยฟัซซีเซ็ตที่ประกอบด้วยสมาชิกที่ชื่อ "positive" และ "negative" แสดงดังรูปที่ 2 และ 3 โดยนอกขอบเขต [-L +L] ค่าความเป็นสมาชิกมีค่าไม่เป็นศูนย์ก็เป็นหนึ่ง



รูปที่ 2 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวควบคุมทากาจิ- ซูเกโนฟัซซีไอ

2.4.2 กฎการควบคุม

ในตารางที่ 1 แสดงกฎการควบคุมของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดีที่อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น

ตารางที่ 1 กฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีพีดี

		$\upsilon(nT)$	
		Positive	Negative
$\gamma(nT)$	Positive	$\Delta u_{PD_1}(nT)$	$\Delta u_{PD_2}(nT)$
	Negative	$\Delta u_{PD_3}(nT)$	$\Delta u_{PD_4}(nT)$

เมื่อ
$$\begin{aligned}\Delta u_{PD_1}(nT) &= a_1\gamma(nT) + b_1\upsilon(nT)\\ \Delta u_{PD_2}(nT) &= a_2\gamma(nT) + b_2\upsilon(nT)\\ \Delta u_{PD_3}(nT) &= a_3\gamma(nT) + b_3\upsilon(nT)\\ \Delta u_{PD_4}(nT) &= a_4\gamma(nT) + b_4\upsilon(nT)\end{aligned} \quad (10)$$

โดย a_i และ b_i คือพารามิเตอร์ที่จะออกแบบ เมื่อ $i = 1,2,3,4$ และตารางที่ 2 แสดงถึงกฎการควบคุมที่อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีไอ

ตารางที่ 2 กฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีไอ

		$\upsilon(nT)$	
		Positive	Negative
$\gamma(nT)$	Positive	$\Delta u_{I_1}(nT)$	$\Delta u_{I_2}(nT)$
	Negative	$\Delta u_{I_3}(nT)$	$\Delta u_{I_4}(nT)$

โดยที่
$$\begin{aligned}\Delta u_{I_1}(nT) &= c_1\gamma(nT)\\ \Delta u_{I_2}(nT) &= c_2\gamma(nT)\\ \Delta u_{I_3}(nT) &= c_3\gamma(nT)\\ \Delta u_{I_4}(nT) &= c_4\gamma(nT)\end{aligned} \quad (11)$$

และ c_i คือ พารามิเตอร์ที่จะออกแบบ เมื่อ $i = 1,2,3,4$

2.4.3 การดีฟัซซิฟิเคชัน

วิธีเซ็นทรอยด์ดีฟัซซิไฟด์(centroid defuzzified) เป็นวิธีที่นำมาใช้คำนวณหาค่าเอาท์พุดที่เปลี่ยนไปซึ่งจะได้

$$\Delta u(nT) = \frac{\sum_{i=1}^{4}\Delta u_i \mu_i}{\sum_{i=1}^{4}\mu_i} \quad (12)$$

เมื่อ Δu_i คือผลลัพธ์ของกฎการควบคุมที่ i และ μ_i คือค่าความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์กฎการควบคุมที่ i แทนกฎการควบคุมของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดีสมการที่(10) ลงในสมการที่(12) จะได้

$$\Delta u_{PD}(nT) = K_p(\gamma,\upsilon)\gamma(nT) + K_d(\gamma,\upsilon)b_1\upsilon(nT) \quad (13)$$

เมื่อ $K_p(\gamma,\upsilon) = \frac{\sum_{i=1}^{4}\mu_i a_i}{\sum_{i=1}^{4}\mu_i}$ และ $K_d(\gamma,\upsilon) = \frac{\sum_{i=1}^{4}\mu_i b_i}{\sum_{i=1}^{4}\mu_i}$ คือค่าเกนที่ถูกปรับแต่งตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ $\gamma(nT)$ และ $\upsilon(nT)$ ในทำนองเดียวกัน เมื่อแทนกฎการควบคุมของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีไอสมการที่ (11) ลงในสมการที่ (12) จะได้

$$\Delta u_I(nT) = K_i(\gamma,\upsilon)\gamma(nT) \quad (14)$$

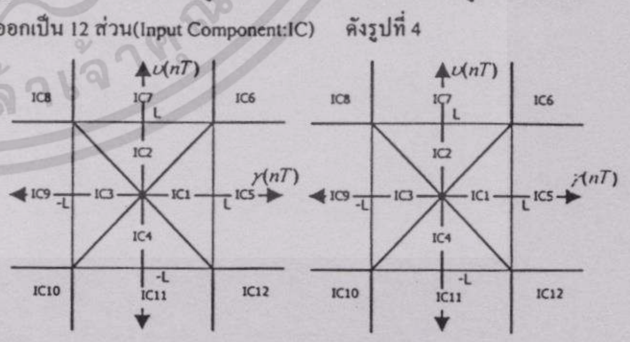
โดยที่ $K_i(\gamma,\upsilon) = \frac{\sum_{i=1}^{4}\mu_i c_i}{\sum_{i=1}^{4}\mu_i}$ คือค่าเกนที่ถูกปรับแต่งตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ $\gamma(nT)$ และ $\upsilon(nT)$

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมจะใช้ทฤษฎีบทเกนน้อย [1] ซึ่งมีเงื่อนไขคือ

$$\|C\|.\|P\| \le 1$$

เมื่อ $\|C\|$ คือนอร์มของตัวควบคุม และ $\|P\|$ คือนอร์มของกระบวนการ โดยในบทความนี้ $\|\cdot\|$ จะหมายถึง $\|\cdot\|_\infty$ แบ่งอินพุตสเปซ(input space) ของส่วนทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดีและส่วนทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีไอออกเป็น 12 ส่วน(Input Component:IC) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 (a) อินพุตสเปซของทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี
(b) อินพุตสเปซของทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 เงื่อนไขเสถียรภาพตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ใช้ตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี จะใช้แนวทางเดียวกับการวิเคราะห์หาเสถียรภาพของระบบที่ใช้ตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ[1] ดังนั้น เงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมแสดงได้ดังสมการ

$$\|C_{PD}\|.\|P\|<1 \tag{15}$$

เมื่อ $\|C_{PD}\|$ คือนอร์มของตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดีและมีค่าแสดงดังตารางที่ 3

3.2 เงื่อนไขเสถียรภาพตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีไอ

เมื่อใช้แนวทางเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ใช้ตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี ดังแสดงในหัวข้อ 3.1 เงื่อนไขเสถียรภาพของระบบที่ใช้ตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีไอคือ

$$\|C_I\|.\|P\|<1 \tag{16}$$

เมื่อ $\|C_I\|$ คือนอร์มของตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีไอและมีค่าแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่านอร์มของตัวควบคุม

$IC\#$	$\|C_{PD}\|$	$\|C_I\|$
$IC\ 1$	$\frac{\sum_{i=1}^{4}(a_i+b_i)+\|a_1-a_2+b_1-b_2\|}{2}$	$\frac{\sum_{i=1}^{4}(c_i)+\|c_1-c_2\|}{2}$
$IC\ 2$	$\frac{\sum_{i=1}^{4}(a_i+b_i)+\|a_1-a_3+b_1-b_3\|}{2}$	$\frac{\sum_{i=1}^{4}(c_i)+\|c_1-c_3\|}{2}$
$IC\ 3$	$\frac{\sum_{i=1}^{4}(a_i+b_i)+\|a_3-a_4+b_3-b_4\|}{2}$	$\frac{\sum_{i=1}^{4}(c_i)+\|c_3-c_4\|}{2}$
$IC\ 4$	$\frac{\sum_{i=1}^{4}(a_i+b_i)+\|a_2-a_4+b_2-b_4\|}{2}$	$\frac{\sum_{i=1}^{4}(c_i)+\|c_2-c_4\|}{2}$
$IC\ 5$	$a_1+a_2+b_1+b_2$	c_1+c_2
$IC\ 7$	$a_1+a_3+b_1+b_3$	c_1+c_3
$IC\ 9$	$a_3+a_4+b_3+b_4$	c_3+c_4
$IC\ 11$	$a_2+a_4+b_2+b_4$	c_2+c_4
$IC\ 6$	a_1+b_1	c_1
$IC\ 8$	a_3+b_3	c_3
$IC10$	a_4+b_4	c_4
$IC12$	[illegible]	[illegible]

3.3 เงื่อนไขเสถียรภาพตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ

เมื่อรวมเงื่อนไขเสถียรภาพของสมการที่(15) และสมการที่(16) เข้าด้วยกัน จะได้ $\|C_{PD}+C_I\|.\|P\|<1$ และเมื่อจัดรูปใหม่แล้วจะได้เงื่อนไขเสถียรภาพที่พอเพียง(sufficient condition) ของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ ดังสมการ

$$(\ \|C_{PD}\|+\|C_I\|\ ).\|P\|<1 \tag{17}$$

นั่นคือ ถ้าออกแบบระบบควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอให้สอดคล้องกับเงื่อนไขสมการที่(17)นี้แล้ว ก็จะสามารถประกันเสถียรภาพของระบบควบคุมได้

4. การจำลองการควบคุม

ในหัวข้อนี้ จะแสดงผลการจำลองการควบคุมกระบวนการเชิงเส้นที่มีเวลาไร้ผลตอบสนองสั้นและยาว โดยใช้ตัวควบคุมทากากิ- ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ

4.1 การควบคุมกระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนองสั้น

กระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนองสั้น[2] ที่นำมาจำลองการควบคุมคือ

$$P(s)=\frac{1}{250s+1}e^{-45s} \tag{18}$$

กระบวนการนี้มีค่าคงที่เวลา(time constant) เท่ากับ 250 วินาที เวลาหน่วง 45 วินาที เลือกคาบการสุ่ม 1 วินาที ทำการประมาณ e^{-45s} ในสมการที่(18)ด้วยการประมาณพาเดเป็นอันดับ 5 แล้วแปลงให้อยู่ในรูปดิสครีต ได้

$$P(z)=\frac{-0.0019\,z^5+0.0107\,z^4-0.0245\,z^3+0.0282\,z^2-0.0162\,z+0.0038}{z^6-5.345\,z^5+11.92\,z^4-14.2\,z^3+9.534\,z^2-3.418\,z+0.5114}$$

หานอร์มของกระบวนการคือ $\|P\|=\sup_{|z|=1}|P(z)|=0.001$

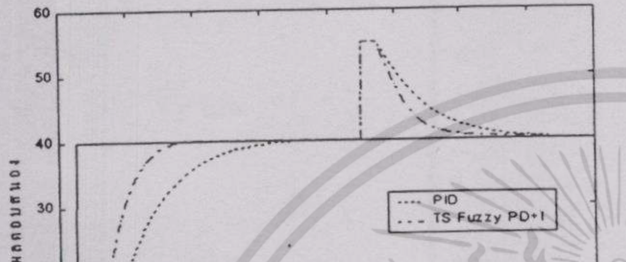
เลือก a_i, b_i และ c_i $(i=1,2,3,4)$ ดังแสดงในตารางที่ 4 แทนลงในสมการที่(17) จะได้ $(\ \|C_{PD}\|+\|C_I\|\ ).\|P\|=0.052<1$ เมื่อค่า $\|C_{PD}\|=5.10$ และ $\|C_I\|=0.02$ คือค่านอร์มที่มากที่สุด ดังนั้น ถ้าค่านอร์มที่มากที่สุดสอดคล้องเงื่อนไขในสมการที่ (17) แล้ว ค่านอร์มอื่นๆที่น้อยกว่าก็ย่อมสอดคล้องเงื่อนไขสมการที่ (17) ด้วย เพราะฉนั้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทากากิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอที่เลือกมา จะทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพ

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบ

	a_i	b_i	c_i
$i=1$	3	0.06	0.009
$i=2$	2	0.01	0.009
$i=3$	2	0.01	0.01
$i=4$	2	0.06	0.006

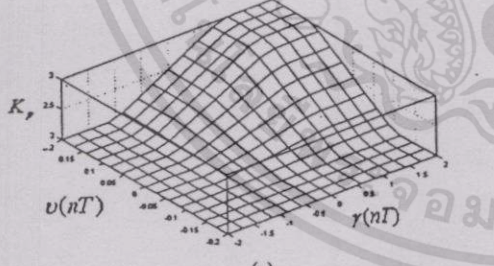
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองการควบคุมนั้น จะให้สัญญาณคงที่ขนาด 40 เป็นสัญญาณอ้างอิง ให้สัญญาณรบกวนที่เอาท์พุตขนาด 15 ณ เวลา 900 วินาที และเลือกคาบการสุ่ม T เท่ากับ 1 วินาที จะได้ผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอ เปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีดั้งเดิมซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีเริ่มต้นโดยวิธีที่ 2 ของซีเกลอร์-นิโคล(Ziegler-Nichols) และปรับแต่งจนได้ $K_p = 1.2$ $K_d = 0.06$ และ $K_i = 0.005$ เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่มีค่าพุ่งเกิน(overshoot) ดังรูปที่ 5

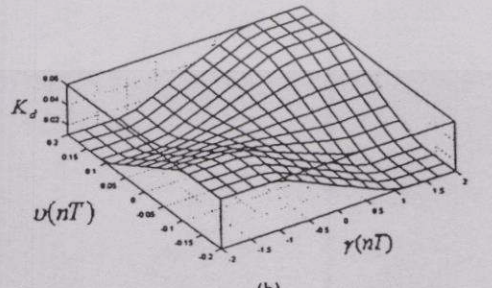


รูปที่ 5 ผลตอบสนองเมื่อมีการรบกวนของระบบ

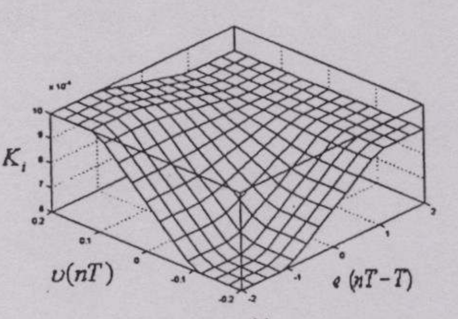
จากรูปผลการจำลองการควบคุมพบว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าระบบควบคุมพีดี+ไอ และเมื่อมีการรบกวนที่เอาท์พุตก็สามารถกำจัดอิทธิพลของการรบกวนได้เร็ว เนื่องจากค่าเกน K_p K_d และ K_i มีค่าไม่คงที่ สามารถเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต แสดงดังรูปที่ 6



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 6 ค่าเกนของตัวควบคุมที่เปลี่ยนตามสัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลง (a) K_p (b) K_d และ (c) K_i

4.2 การควบคุมกระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนองยาว

เมื่อกระบวนการมีเวลาไร้ผลตอบสนองยาว[8] ดังสมการ

$$P(s) = \frac{1}{(1+s)(1+0.5s)(1+0.25s)(1+0.125s)} e^{-10s} \qquad (19)$$

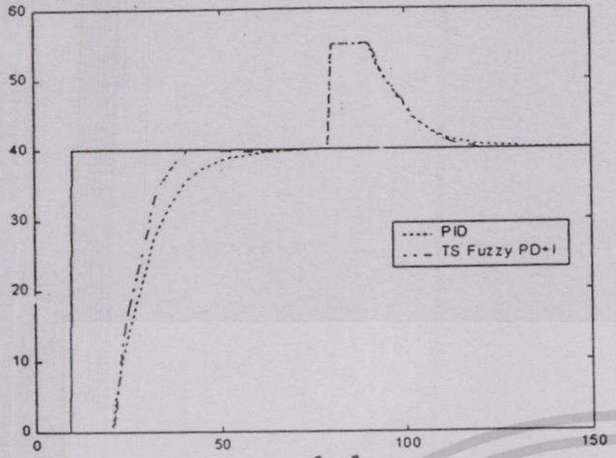
กระบวนการนี้มีค่าคงที่เวลาเท่ากับ 1 วินาที เวลาหน่วง 10 วินาที และหาค่านอร์มของกระบวนการโดยอาศัยแนวทางเดียวกับกระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนองสั้น ได้ $\|P\| = 0.1$ เลือก a_i b_i และ c_i $(i = 1,2,3,4)$ ดังแสดงในตารางที่ 5 จะได้ $\|C_{PD}\| = 0.58$ และ $\|C_I\| = 0.11$ เป็นค่านอร์มที่มากที่สุด และเมื่อแทนค่านอร์มลงในสมการที่(17) จะได้ $(\|C_{PD}\| + \|C_I\|).\|P\| = 0.069 < 1$ นั่นคือ ถ้าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอที่เลือกมาควบคุมกระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนองยาวนั้น ทำให้ค่านอร์มที่มากที่สุดสอดคล้องกับเงื่อนไขสมการที่(17) แล้ว ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพ

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบ

	a_i	b_i	c_i
$i=1$	0.3	0.01	0.05
$i=2$	0.3	0.02	0.06
$i=3$	0.2	0.01	0.05
$i=4$	0.1	0.01	0.05

รูปที่ 7 แสดงถึงผลการจำลองการควบคุมระบบที่ใช้ตัวควบคุมทากางิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอเมื่อป้อนสัญญาณอ้างอิงคงที่ขนาด 40 ให้มีสัญญาณรบกวนที่เอาท์พุตขนาด 15 ณ เวลา 80 วินาที และเลือกคาบการสุ่ม T เท่ากับ 1 วินาที โดยเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีดั้งเดิมที่มี $K_p = 0.25$ $K_d = 0.01$ และ $K_i = 0.06$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ผลตอบสนองเมื่อมีการรบกวนของระบบ

จากรูปพบว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าระบบควบคุมพีไอดี แต่เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงพร้อมกันเมื่อมีการรบกวนที่เอาท์พุต และค่าเกน K_p K_d และ K_i ของตัวควบคุมเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตในทำนองเดียวกับรูปที่ 6 แต่ค่าเกนแต่ละตัวจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างจากค่าเกนในรูปที่ 6 เนื่องมาจากการควบคุมกระบวนการที่ต่างกัน

การเลือกค่าเกนการควบคุมของตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอนั้น เริ่มจากการนำเกนของตัวควบคุมพีไอดีมาปรับเปลี่ยนโดยวิธีลองผิดลองถูก ซึ่งค่าเกนที่ได้อาจจะยังไม่ใช่ค่าเกนที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด แต่เป็นค่าเกนที่ให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอดีดั้งเดิม

5. สรุปและแนวทางพัฒนา

ในระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีดี+ไอนั้น ถ้าออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพแล้วจะสามารถประกันเสถียรภาพของระบบควบคุมได้ ซึ่งจากผลการจำลองการควบคุมกระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนองสั้นและยาวพบว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เลือกมานั้น นอกจากจะให้ผลตอบสนองเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอดีดั้งเดิมแล้ว ยังเสถียรต่อสัญญาณรบกวนที่เข้ามาที่เอาท์พุต

แนวทางในการพัฒนา คือพัฒนาให้เป็นตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอดี

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย สวทช. ที่ได้สนับสนุนเงินทุนวิจัย และ JICA ที่สนับสนุนอุปกรณ์ในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] H. Ying "Fuzzy Control and Modeling:Analytical Foundations and Applications" IEEE Press, 2000.

[2] G. -R. Chen and H. Ying "BIBO stability of nonlinear fuzzy PI control system" J. Intelligent & Fuzzy System, Vol.5, 1997. pp. 245-256.

[3] H.A. Malki, G. -R Chen "New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems" IEEE Trans. Fuzzy Systems, 1994, pp.245-254.

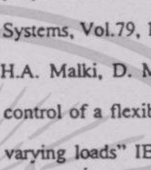
[4] D. Misir, H. A. Malki, G Chen "Design and analysis of a fuzzy proportional-integral-derivative controller" Fuzzy Sets and Systems, Vol.79, 1996, pp.297-314.

[5] H.A. Malki, D. Misir, D. Feigenspan, G. –R Chen "Fuzzy PID control of a flexible-joint robot arm with uncertainties from time-varying loads" IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol.5, 1997, pp.371-378.

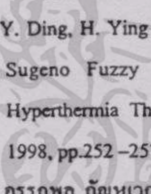
[6] Y. Ding, H. Ying and S. Shao "Theoretical Analysis of a Takagi-Sugeno Fuzzy PI Controller with Application to Tissue Hyperthermia Therapy," IEEE Trans. on Fuzzy System, Vol.1, 1998, pp.252 –257.

[7] อรรถพล กัณหเวก จงกล งามวิวิทย์ สุธี ผู้เจริญชนะชัย "การออกแบบตัวควบคุมทากาจิ-ซูเกโนฟัซซีพีไอ+ดีสำหรับกระบวนการเชิงเส้นที่อยู่ในช่วง" วิศวสารลาดกระบังปีที่ 18 ฉบับที่ 1 เดือน มีนาคม 2544 หน้า 7-12

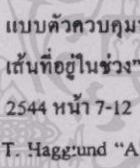
[8] T. Hagglund "A Predictive PI Controller for Processes with Long Dead Times" IEEE Control Systems Magazine, Vol. 12, 1992, pp.57-60.



อรรถพล กัณหเวก ปริญญาตรี ระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ปัจจุบันศึกษาปริญญาโท วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. งานวิจัย การออกแบบระบบควบคุมฟัซซี



จงกล งามวิวิทย์ ปริญญาเอก อิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยโตไก ประเทศญี่ปุ่น รองศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. งานวิจัย การควบคุมแบบออฟติมัล โรบัสต์ และฟัซซี



สุธี ผู้เจริญชนะชัย ปริญญาเอก วิศวกรรมควบคุมจาก Tokyo Institute of Technology ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันเป็นนักวิจัย NECTEC งานวิจัยทางด้าน CNC simulation และmedical image converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมดั้งเดิม

ในส่วนนี้จะทำการหาเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมพีไอ+ดีและพีดี+ไอ เมื่อใช้ทฤษฎีบทเกนน้อย

ค.1 เงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมพีไอ+ดี

จากสมการเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมพีไอ สมการที่ (3.5)

$$\Delta u_{PI}(nT) = K_i e(nT) + K_p r(nT)$$

แทนค่า $r(nT) = e(nT) - e(nT - T)$ ลงในสมการข้างบน แล้วหาค่านอร์มทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\left\|\Delta u_{PI}(nT)\right\| = \left|K_i e(nT) + K_p\left[e(nT) - e(nT-T)\right]\right|$$

$$= \left|\left(K_i + K_p\right)e(nT) + K_p e(nT-T)\right|$$

เมื่อ $M_e = \sup_{n\geq 1}\left|e(nT-T)\right|$ จะได้

$$\left\|\Delta u_{PI}(nT)\right\| \leq \alpha_{PI}\left|e(nT)\right| + \beta_{PI} \qquad (ค.1)$$

โดยที่ $\alpha_{PI} = K_i + K_p$ คือค่านอร์มของตัวควบคุมพีไอและ $\beta_{PI} = K_p M_e$ คือค่าคงที่ ในทำนองเดียวกัน จากสมการเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมดี สมการที่ (3.9)

$$\Delta u_D(nT) = K_d \Delta y(nT)$$

แทนค่า $\Delta y(nT) = y(nT) - y(nT - T)$ ลงในสมการข้างบน แล้วหาค่านอร์ม จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left\|\Delta u_D(nT)\right\| = \left|K_d\left(y(nT) - y(nT-T)\right)\right|$$

เมื่อ $M_y = \sup_{n\geq 1}\left|y(nT-T)\right|$ จะได้

$$\left\|\Delta u_D(nT)\right\| \leq K_d\left|y(nT)\right| + K_d M_y$$

แทนค่า $y(nT) = SP(nT) - e(nT)$ ลงในสมการข้างบน จะได้

$$\left\|\Delta u_D(nT)\right\| \leq \alpha_d\left|e(nT)\right| + \beta_d \qquad \text{(ค.2)}$$

เมื่อ $\alpha_d = K_d$ คือค่านอร์มของตัวควบคุมดีและ $\beta_D = K_d M_y + \alpha_d SP(nT)$ คือค่าคงที่

แทนค่า $\alpha_{PI} = K_i + K_p$ และ $\alpha_d = K_d$ ลงในสมการเงื่อนไขเสถียรภาพ สมการที่ (4.11) จะได้

$$\left(K_i + K_p + K_d\right).\left\|P\right\| < 1 \qquad \text{(ค.3)}$$

นั่นคือหากเลือกค่าเกน K_i, K_p และ K_d ของตัวควบคุมพีไอ+ดี ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (ค.3) ก็จะสามารถประกันเสถียรภาพของระบบควบคุมพีไอ+ดีได้

ค.2 เงื่อนไขเสถียรภาพของตัวควบคุมพีดี+ไอ

จากสมการเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมพีไอ สมการที่ (3.23)

$$\Delta u_{PD}(nT) = K_p v(nT) + K_d r(nT)$$

แทนค่า $v(nT) = e(nT) + e(nT-T)$ และ $r(nT) = e(nT) - e(nT-T)$ ลงในสมการข้างบนแล้วหานอร์มทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\left\|\Delta u_{PD}(nT)\right\| = \left|K_p\left[e(nT) + e(nT-T)\right] + K_d\left[e(nT) - e(nT-T)\right]\right|$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $M_e = \sup_{n\geq 1}\left|e(nT-T)\right|$ จะได้

$$\left\|\Delta u_{PD}(nT)\right\| \leq \alpha_{PD}\left|e(nT)\right| + \beta_{PD} \qquad \text{(ค.4)}$$

โดยที่ $\alpha_{PD} = K_p + K_d$ คือค่านอร์มของตัวควบคุมพีดีและ $\beta_{PD} = \left|\left(K_p - K_d\right)\right| M_e$ คือค่าคงที่

จากสมการเอาท์พุตที่เปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมไอ สมการที่ (3.28)

$$\Delta u_I(nT) = K_i v(nT)$$

$$= K_i\left[e(nT) + e(nT-T)\right]$$

หานอร์มตลอดทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\left\|\Delta u_I(nT)\right\| = \left|K_i\left[e(nT) + e(nT-T)\right]\right|$$

$$\left\|\Delta u_I(nT)\right\| \leq \alpha_I\left|e(nT)\right| + \beta_I \qquad \text{(ค.5)}$$

เมื่อ $\alpha_I = K_i$ คือค่านอร์มของตัวควบคุมไอและ $\beta_I = K_i M_e$ คือค่าคงที่ เมื่อแทนค่า α_{PD} และ α_I ลงในสมการที่ (4.16) จะได้เงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมพีดี+ไอ แสดงดังสมการ

$$\left(K_i + K_p + K_d\right).\left\|P\right\| < 1 \qquad \text{(ค.6)}$$

นั่นคือหากเลือกค่าเกน K_i, K_p และ K_d ของตัวควบคุมพีดี+ไอ ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (ค.6) ก็จะสามารถประกันเสถียรภาพของระบบควบคุมพีดี+ไอได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายอรรถพล กัณหเวก เกิดเมื่อวันพุธ ที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2519 ที่ตำบลสะเตง อำเภอเมือง จังหวัดยะลา สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนคณะราษฎรบำรุง จังหวัดยะลา ในปี พ.ศ. 2535 และปี พ.ศ. 2538 ตามลำดับ หลังจากนั้น เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรีที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยผ่านโครงการรับนักศึกษาจากต่างจังหวัดเข้าศึกษาต่อในกรณีพิเศษ(โควต้า) และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุมในปี พ.ศ. 2542 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยได้รับทุนจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้