

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยฟัซซีซึ่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง

D.C. MOTOR CONTROL BY SELF-ORGANIZING FUZZY LOGIC



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

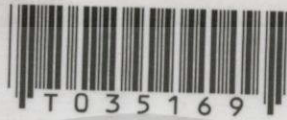
พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-662-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยฟuzzy logic ที่ปรับกฎด้วยตัวเอง

D.C. MOTOR CONTROL BY SELF-ORGANIZING FUZZY LOGIC



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

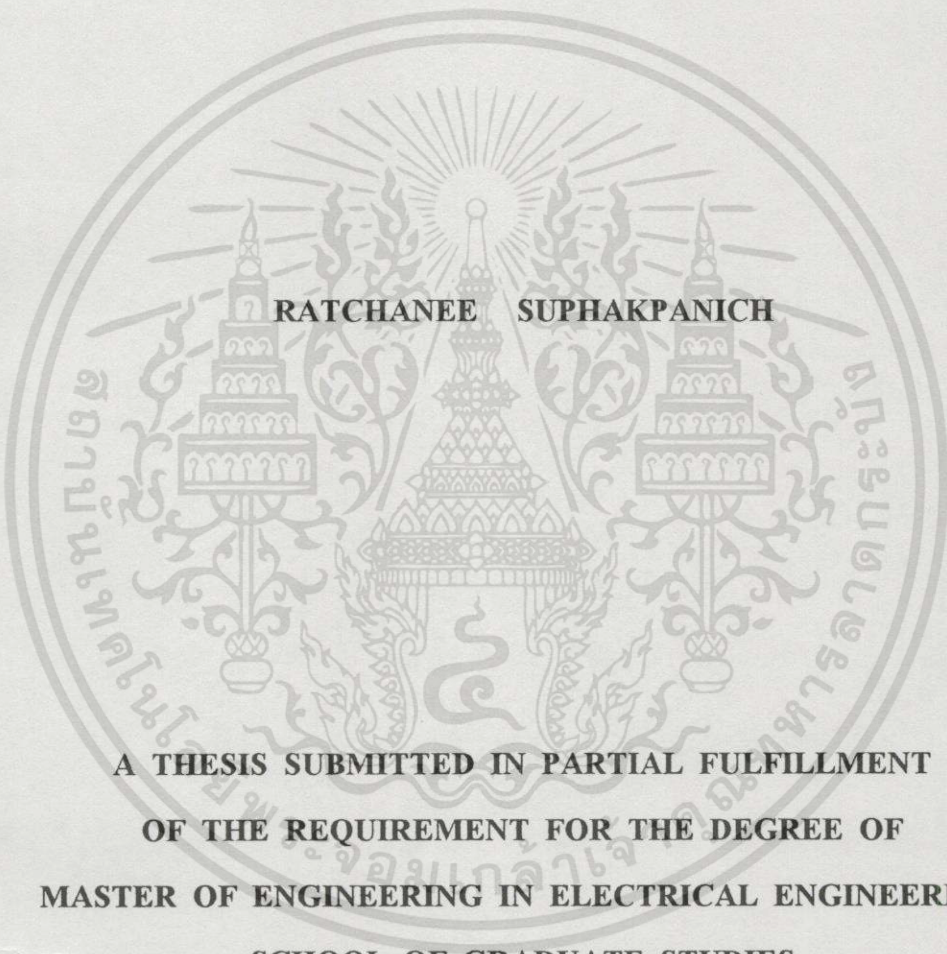
พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-662-2

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 35169
วัน, เดือน, ปี 2 3 ค.ศ. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D.C. MOTOR CONTROL BY SELF-ORGANIZING FUZZY LOGIC

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are three tiered, pagoda-like structures. The entire emblem is surrounded by a decorative border with Thai script. The text 'RATCHANEE SUPHAKPANICH' is printed across the middle of the seal.

RATCHANEE SUPHAKPANICH

**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**

2000

ISBN 974-622-662-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2000

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยฟัซซี่ซึ่งนิคปรับกฎด้วยตัวเอง
D.C. MOTOR CONTROL BY SELF-ORGANIZING FUZZY LOGIC


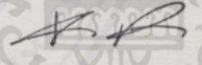
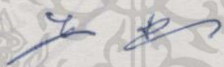


ชื่อนักศึกษา นางสาวรัชณี สุภักพานิช

รหัสประจำตัว 37061185

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วันชัย	ธีรวิรุจ	
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
รศ.ดร.จنگกล	งามวิวิทย์	
รศ.ดร.จเร	สุรวัดน์ปัญญา	
รศ.ดร.กิตติ	ไพฑูรย์วัฒนกิจ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 11 มกราคม 2543 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ. ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น 4 ห้อง (E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.มนัส สัจวรศิลป์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ๒๕๔๓

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยฟิซซี่
ชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง

นักศึกษา

นางสาว รัชณี สุภัคพาณิช

รหัสประจำตัว

37061185

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2543

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร. กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอ ตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยฟิซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง จุดประสงค์เพื่อทำให้ระบบสามารถเรียนรู้ เพิ่ม ลด และแก้ไขกฎในฐานความรู้ให้เหมาะสมกับสถานการณ์และให้ผลการตอบสนองที่อยู่ภายในขอบเขตที่ยอมรับได้ โดยใช้แนวความคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางเดินสถานะและสมรรถนะของระบบมาใช้พิจารณาแก้ไขกฎในฐานความรู้ โครงสร้างของระบบควบคุมจะประกอบด้วยตัวควบคุมฟิซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองผ่านไมโครคอมพิวเตอร์ ตัวควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแบบ D.C. chopper และตัวตรวจจับความเร็วรอบ การควบคุมจะควบคุมลูบความเร็ว ในการทดสอบอัลกอริทึมของฟิซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองใช้ทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบสนามแม่เหล็กแยกส่วนขนาด 1 กิโลวัตต์ 220 โวลต์ ความเร็วพิกัด 2000 รอบต่อนาที เพื่อดูการตอบสนองในระดับความเร็วและการตอบสนองเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง

Thesis Title	D.C. motor control by self-organizing fuzzy logic
Student	Miss Ratchanee Suphakpanich
Student ID.	37061185
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2000
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kitti Paitoonwatanakij

ABSTRACT

This thesis presents the algorithm for speed control of d.c. motor with self-organizing fuzzy logic controller . The objective is to design the system that can learn, increase, reduce and modify the rules in rulesbase and provide the response that to be within the accepted bound. The concept about state analyze and performance measure are used to determine the modification rule in the rulebase. The structure of self-organizing fuzzy logic controller consist of self-organizing control, d.c. chopper, and speed sensor devices. For the control method. The closed loop speed techniques are applied. The self-organizing fuzzy logic algorithm is experimentted by controlling the speed of separate excited D.C. motor , 1 KW 220 volts. The results of the fuzzy self-organizing with separate excited d.c. motor for both step response and step load are shown.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ดี โดยได้รับความรู้และความเมตตาจาก รองศาสตราจารย์
ดร. กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ ที่ได้แนะนำ สั่งสอน ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ
เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ นิमित บุญภิรมย์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรี
พระทุม ที่ได้สอนและให้ความกรุณา สนับสนุนด้านเครื่องมือ และคำแนะนำอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ร่วมห้องวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ทำให้
กำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ คุณอันไคที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ทำวิจัย ขออุทิศให้กับ บุพการี และ บุรพ
คณาจารย์ต่อไป



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวคิดในการนำเสนอวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	5
2.1 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	5
2.2.1 วงจรสมมูลย์อาร์เมเจอร์.....	6
2.2.2 วงจรสมมูลย์ของวงจรถ่วงสนามแม่เหล็ก.....	6
2.2.3 สมการการสร้างแรงบิด.....	6
2.2.4 การเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้าเป็นกำลังงานกล.....	7
2.3 ระบบควบคุมความเร็ววมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกระตุ้นแยกแบบลูปปิด.....	7
2.3.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก.....	7
2.3.2 การควบคุมความเร็วแบบลูปปิด.....	11
บทที่ 3 ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟuzzy.....	13
3.1 ทฤษฎีเซตแบบเดิม.....	13
3.2 ทฤษฎีฟuzzy.....	13
3.3 การปฏิบัติการบนฟuzzyเซต.....	15
3.4 ความสัมพันธ์ของฟuzzy.....	16
3.5 การปฏิบัติการบนความสัมพันธ์ของฟuzzy.....	16
3.6 การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟuzzy.....	18
3.7 คิวแปรลิงคัจัสติก.....	19
3.8 ประพจน์แบบฟuzzy.....	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.9 กฎของฟิชชี	21
3.10 ตัวควบคุมฟิชชี.....	22
3.10.1 โครงสร้างของตัวควบคุมฟิชชีแบบฐานความรู้.....	22
3.10.1.1 ฟิชชีพีเคชั้น โมดูล.....	23
3.10.1.2 ฐานความรู้ฟิชชี.....	23
3.10.1.3 กลไกการอนุมาน.....	23
3.10.1.4 คีฟิชชีพีเคชั้น.....	25
3.11 ชนิดของตัวควบคุมฟิชชีแบบฐานความรู้.....	28
3.11.1 ตัวควบคุมฟิชชีแบบ Proportional.....	29
3.11.2 ตัวควบคุมฟิชชีแบบ Proportional-Derivative.....	29
3.11.3 ตัวควบคุมฟิชชีแบบ Proportional-Integral.....	29
3.11.3 ตัวควบคุมฟิชชีแบบ Proportional-Integral-Derivative.....	30
3.12 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในตัวควบคุมฟิชชี.....	31
3.13 พารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก.....	32
3.14 หลักเกณฑ์ในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก.....	33
3.15 แนวทางการออกแบบกฎ.....	33
3.16 ตัวควบคุมฟิชชีแบบปรับกฎด้วยตัวเอง.....	36
บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก โดยใช้ตัวควบคุมฟิชชี ชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง.....	38
4.1 โครงสร้างของตัวควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก โดยใช้ตัวควบคุม ฟิชชี	38
4.2.1 ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	38
4.2.2 ตัวควบคุมฟิชชี.....	38
4.2 การออกแบบตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบฟิชชี.....	39
4.2.1 ภาคฟิชชีพีเคชั้น.....	39
4.2.1.1 นอมอล ไลซ์เซชั่น.....	39
4.2.1.2 ฟิชชีพีเคชั้น.....	40
4.2.2 ภาคฐานความรู้.....	41

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.2.1 ฐานข้อมูล.....	41
4.2.2.2 ฐานกฎ.....	42
4.2.3 ส่วนของการอินเฟอเรนซ์.....	42
4.2.4 แนวทางการออกแบบกฎ.....	43
4.2.5 ลิฟฟิชซิทีเคชั่น.....	44
4.2.6 ดินอร์มอลไลซ์เซชัน.....	44
4.3 โครงสร้างของตัวควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุม ฟิชซิทีทีปรับกฎด้วยตัวเอง โดยวิธีการเกรเดียนท์เดสเซนท์.....	45
4.3.1 ตัวควบคุมฟิชซิ.....	45
4.3.2 ตัวเลือกกฎที่ควรถูกแก้ไข.....	45
4.3.3 ส่วนของการวัดค่าสมรรถนะ.....	48
4.3.3 ส่วนของการปรับกฎโดยวิธีการเกรเดียนท์เดสเซนท์.....	48
4.4 โครงสร้างของตัวควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุม ฟิชซิทีทีปรับกฎด้วยตัวเอง โดยวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะ.....	50
4.4.1 โครงสร้างตัวควบคุมฟิชซิแบบปรับกฎด้วยตัวเอง.....	51
4.4.1.1 ตัวควบคุมฟิชซิ.....	51
4.4.1.2 ตัวเลือกกฎที่ควรถูกแก้ไข.....	54
4.4.1.3 การแก้ไขกฎ.....	55
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	58
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง.....	58
5.1.1 D.C. shunt wound motor separately excited.....	58
5.1.2 เครื่องมือวัดความเร็วรอบ.....	58
5.1.3 เครื่องจำลองโหลดทางกล.....	58
5.1.4 เครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง.....	58
5.1.5 เครื่องมือวัดไฟฟ้า.....	58
5.2 โครงสร้างของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกด้วยตัวควบคุมฟิชซิ ฟิชซิทีทีปรับกฎด้วยตัวเอง.....	59

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3 การทดลองที่ 1 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุม พีชชีแบบปรับกฏด้วยตัวเอง โดยวิธีเกรเดียนท์เดสเซนท์.....	60
5.3.1 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฏด้วยตัวเอง ความเร็ว 800 r.p.m. ที่ค่าสมรรถนะต่างๆ.....	61
5.3.2 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฏด้วยตัวเอง ความเร็วรอบ 1000 r.p.m. ที่ค่าสมรรถนะต่างๆ.....	65
5.3.3 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฏด้วยตัวเอง ความเร็วรอบ 1200 r.p.m. ที่ค่าสมรรถนะต่างๆ.....	69
5.3.4 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฏด้วยตัวเอง โดยการใส่ภาระ ให้กับมอเตอร์ด้วยระดับต่างๆ.....	75
5.4 การทดลองที่ 2 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุม พีชชีแบบปรับกฏด้วยตัวเอง โดยวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะ.....	77
5.4.1 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฏด้วยตัวเอง โดยกำหนดค่าความเร็ว รอบที่ต้องการเป็น 1000 r.p.m.....	78
5.4.2 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฏด้วยตัวเอง โดยวิธีการวิเคราะห์ทาง เดินสถานะ โดยการใส่ภาระให้กับมอเตอร์ที่ระดับต่างๆ.....	79
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	82
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก ก.....	86
ภาคผนวก ข.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุทและเอาต์พุทของการออกแบบกฎ.....	34
4.1 กฎความสัมพันธ์ของอินพุทและเอาต์พุทของตัวควบคุมความเร็ว.....	43
5.1 ขนาคอมพิวเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง.....	58
5.2 การกำหนดค่าความเร็วรอบค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลองใน การทดลองที่ 1.1.....	61
5.3 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบการทำงาน ในการทดลองที่ 1.1.....	62
5.4 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ ทดลองในการทดลองที่ 1.2.....	63
5.5 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบ การทำงานในการทดลองที่ 1.2.....	63
5.6 การกำหนดค่าความเร็วรอบค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ทดลองในการทดลองที่ 1.3.....	64
5.7 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละ รอบการทำงานในการทดลองที่ 1.3.....	65
5.8 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ทดลองในการทดลองที่ 1.4.....	65
5.9 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละ รอบการทำงานในการทดลองที่ 1.4.....	66
5.10 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ทดลองในการทดลองที่ 1.5.....	67
5.11 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละ รอบการทำงานในการทดลองที่ 1.5.....	67
5.12 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ทดลองในการทดลองที่ 1.6.....	68
5.13 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบ การทำงานในการทดลองที่ 1.6.....	69
5.14 การกำหนดค่าความเร็วรอบค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ทดลองในการทดลองที่ 1.7.....	69

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.15 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบ การทำงานในการทดลองที่ 1.7.....	70
5.16 การกำหนดค่าความเร็วรอบค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ทดลองในการทดลองที่ 1.8.....	71
5.17 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละ รอบการทำงานในการทดลองที่ 1.8.....	71
5.18 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ทดลองในการทดลองที่ 1.9.....	72
5.19 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบ การทำงานในการทดลองที่ 1.9.....	73
5.20 เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบเมื่อจ่ายโหลดและปลดโหลด.....	76
5.21 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ทดลองในการทดลองที่ 2.1.....	78
5.22 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละ รอบการทำงานในการทดลองที่ 2.1.....	78
5.23 เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบเมื่อจ่ายโหลดและปลดโหลด.....	81

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลซ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	5
2.2 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	9
2.3 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย.....	11
2.4 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบ PI.....	11
3.1 การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์พีชชี.....	18
3.2 โครงสร้างของตัวควบคุมพีชชี.....	23
3.3 การอินเฟอเรนซ์แบบ Max-min.....	25
3.4 การอินเฟอเรนซ์แบบ Max-product.....	25
3.5 การคิพีชชีพีเค้นวีธี Center of Gravity.....	26
3.6 การคิพีชชีพีเค้นวีธี Center of Sums.....	26
3.7 การคิพีชชีพีเค้นวีธี Mean of Maxima.....	27
3.8 การคิพีชชีพีเค้นวีธี Height.....	27
3.9 รูปฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปตัว S.....	31
3.10 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูประฆังคว่ำ.....	31
3.11 ค่าสูงสุดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม.....	32
3.12 ความกว้างของฟังก์ชันสามเหลี่ยม.....	32
3.13 จุดตัดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม.....	33
3.14 ผลการตอบสนองของการเปลี่ยนระดับและการแบ่งช่วงของการตอบสนองเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด.....	34
3.15 กลุ่มของกฎทั้ง 5 ที่ได้จากการออกแบบกฎของตัวควบคุมแบบฮิวริสติก.....	36
3.16 โครงสร้างของตัวควบคุมพีชชีแบบปรับกฎด้วยตัวเอง.....	37
4.1 โครงสร้างของตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง.....	38
4.2 โครงสร้างตัวควบคุมพีชชี PI.....	39
4.3 ฟังก์ชันสามเหลี่ยมซึ่งเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของพีชชีเซต.....	41
4.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าผิดพลาด (e) และการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด (ce).....	42
4.5 โครงสร้างของตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โคชวีธีเกรเดียนเตสเซ็นท์.....	46
4.6 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบและความเร่งของการหมุนของมอเตอร์.....	47

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7(ก) ฐานความรู้และกฎที่ถูกกระตุ้นที่คาบเวลา nT ในการเรีขนรู้อรอบที่ k.....	47
4.7(ข) ระดับความเข้มของกฎที่ถูกกระตุ้นในการเรีขนรู้อรอบที่ k.....	48
4.8 กฎที่คาบเวลา nT หลังจากการแก้ไขกฎแล้วซึ่งจะนำไปใช้ในรอบการเรีขนรู้อที่ k+1.....	50
4.9 โครงสร้างของตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดย การวิเคราะห์ทางเดินสถานะ.....	53
4.10 การเปลี่ยนจากค่า α_1 เป็น ค่า n_1 และ n_2	52
4.11 กราฟทางเดินสถานะ.....	54
4.12 กฎที่ควรได้รับการแก้ไข.....	55
4.13 การเลื่อนกฎในกระบวนการปรับกฎ.....	56
4.14 การขยายกฎในกระบวนการปรับกฎ.....	57
5.1 โครงสร้างของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ ชนิดปรับ กฎด้วยตัวเอง.....	59
5.2 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 800 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 4.0 % ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เดสเซ็นต์.....	62
5.3 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 800 r.p.m โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 5.0 % ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เดสเซ็นต์.....	63
5.4 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 800 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 7.0 % ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เดสเซ็นต์.....	64
5.5 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1000 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 4.0 % ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เดสเซ็นต์.....	66
5.6 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1000 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 5.0 % ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เดสเซ็นต์แต่ ละรอบการทำงาน.....	67
5.7 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1000 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 7.0 % ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เดสเซ็นต์.....	68
5.8 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1200 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 4.0 % ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เดสเซ็นต์.....	70
5.9 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1200 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 5.0 % ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เดสเซ็นต์.....	71

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.10 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1200 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 7.0 % ด้วยตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับภคด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เคสเซ็นท์.....	72
5.11 จำนวนรอบการเรี่ยนรู้ของตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับภคด้วยตัวเอง โดยวิธีเกรเดียนท์เคสเซ็นท์ ที่ ความเร็ว800 รอบ เมื่อกำหนดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ 4.0% 5.0% และ 7.0%.....	73
5.12 จำนวนรอบการเรี่ยนรู้ของตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับภคด้วยตัวเอง โดยวิธีเกรเดียนท์เคสเซ็นท์ ที่ ความเร็ว 1000 รอบ เมื่อกำหนดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ 4.0% 5.0% และ 7.0%.....	74
5.13 จำนวนรอบการเรี่ยนรู้ของตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับภคด้วยตัวเอง โดยวิธีเกรเดียนท์เคสเซ็นท์ ที่ ความเร็ว 1200 รอบ เมื่อกำหนดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ 4.0% 5.0% และ 7.0%.....	74
5.14 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่าย โหลด 50 % ของพิกัดมอเตอร์ ที่ บันทึก จากตัว ควบคุมพีชซีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.	75
5.15 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่าย โหลด 75 % ของพิกัดมอเตอร์ ที่บันทึก จากตัวควบคุมพีชซีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.	75
5.16 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่าย โหลด 100 % ของพิกัดมอเตอร์ ที่บันทึก จากตัว ควบคุมพีชซีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.	76
5.17 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1000 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 5.0 % ด้วยตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับภคด้วยตัวเองด้วยวิธีวิเคราะห์ทางคินสถานะ..	78
5.18 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่าย โหลด 50 % ของพิกัดมอเตอร์ ที่บันทึก จากตัว ควบคุมพีชซีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.....	79
5.19 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่าย โหลด 75 % ของพิกัดมอเตอร์ที่บันทึกจาก ตัว ควบคุมพีชซีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.....	80
5.20 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่าย โหลด 100 % ของพิกัดมอเตอร์ ที่บันทึก จากตัวควบคุมพีชซีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดในการนำเสนอวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันระบบควบคุมอัตโนมัติโดยใช้คอมพิวเตอร์มีบทบาทสำคัญในงานทางด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น เช่น ระบบควบคุมของรถยนต์ ระบบควบคุมการผลิต ระบบควบคุมการทำปฏิกิริยาเคมี ระบบแขนกล ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ เป็นต้น และด้วยคุณสมบัติของกระบวนการบางกระบวนการที่มีคุณสมบัติทางพลวัตความไม่เป็นเชิงเส้นความซับซ้อนของระบบ ประกอบกับความไม่สมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และข้อมูล เช่นการไม่ทราบค่าของพารามิเตอร์ บางตัวทำให้การออกแบบการควบคุมแบบดั้งเดิมซึ่งต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และต้องทราบพารามิเตอร์ของระบบทำได้ยาก [1] อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมเช่นการมีข้อมูลไม่เพียงพอ ซึ่งสำหรับผู้เชี่ยวชาญแล้วสามารถจะนำความรู้และประสบการณ์ที่มีอยู่มาประกอบกับข้อมูลที่มีอยู่และคิดหาเหตุผลเพื่อที่จะหาข้อสรุปสำหรับแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้และความรู้ต่างๆของผู้เชี่ยวชาญมักจะอยู่ในลักษณะของการประมาณมากกว่าในลักษณะของค่าที่แน่นอน

ในปี ค.ศ. 1965 Professor Lotfy Zadeh ได้นำเสนอฟัซซี่เซต [2, 3] และฟัซซี่ลอจิก เพื่อใช้ในการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลแบบประมาณ (approximate reasoning) เมื่อข้อมูลที่มีอยู่นั้นอยู่ในรูปแบบเชิงคุณสมบัติ และมีความคลุมเคลือ ต่อมา Professor E.H. Mamdani ได้นำฟัซซี่ลอจิกมาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุม (fuzzy controller) เป็นครั้งแรก [4] โดยประยุกต์ใช้กับการควบคุมเครื่องจักรไอน้ำหลังจากนั้น ได้มีผู้นำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆมากมาย [5, 6] สาเหตุที่ทำให้ตัวควบคุมฟัซซี่เข้ามามีบทบาทในการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมมากขึ้นคงเนื่องมาจากข้อดีต่างๆของฟัซซี่ดังนี้

- สามารถออกแบบตัวควบคุมได้โดยไม่ต้องรู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมใช้วิธีการนำความรู้และประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญมาสร้างกฎที่ใช้ควบคุมกระบวนการ
- สามารถควบคุมกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน
- มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้ดี นั่นคือสามารถรักษาสมรรถนะได้ในช่วงที่มีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น

จากการที่มีผู้นำตัวควบคุมฟัซซี่มาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆทำให้พบปัญหาในการออกแบบ ดังนี้คือ ในกรณีที่ไม่มีฐานความรู้ หรือการดึงความรู้จากผู้เชี่ยวชาญออกมาสร้างเป็นกฎทำได้ไม่

สมบูรณ์อาจจะทำให้ระบบทำงานล้มเหลวหรือไม่ได้สมรรถนะตามที่ต้องการได้ ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 1977 Professor Mamdani ได้เสนอแนวความคิดเกี่ยวกับการสร้างตัวควบคุมแบบปรับกฎด้วยตัวเอง (self-organizing controller) [7] เพื่อทำให้ระบบสามารถเรียนรู้และแก้ไขกฎได้อย่างอัตโนมัติเพื่อควบคุมให้ระบบทำงานได้อย่างเหมาะสมโดยการเรียนรู้จะเรียนรู้จากการวัดค่าสมรรถนะ ซึ่งต่อมาได้มีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆมากมาย [8-11]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีซซีแบบปรับกฎด้วยตัวเองมาใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยการขับเคลื่อนจะใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาทดแทนการใช้อุปกรณ์แบบเกาผลที่ได้จาก วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น วงจรอินเวอร์เตอร์หรือคอนเวอร์เตอร์จะทำให้กระบวนการไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความเบี่ยงเบนของสนามแม่เหล็กขึ้นที่อาร์เมเจอร์เมื่อมีโหลด (Armature Reaction) การใช้ตัวควบคุมแบบพีซซีมาควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อช่วยลดงานในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์ และ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในส่วนของการเรียนรู้ของระบบเพื่อช่วยให้กฎในฐานความรู้มีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขให้เหมาะสมกับสถานการณ์ไม่ว่าจะในกรณีที่เกิดกฎในฐานความรู้เริ่มแรกไม่สมบูรณ์หรือกรณีที่ทราบข้อมูลเกี่ยวกับระบบน้อยมาก โดยจะให้ตัวควบคุมเรียนรู้และหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ โดยการเรียนรู้แบบทำซ้ำจนได้สมรรถนะของการตอบสนองในระดับที่กำหนดให้จำนวนรอบเร็วที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อสร้างตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยพีซซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยไม่ต้องรู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
2. เพื่อศึกษาและออกแบบอัลกอริทึมการเรียนรู้ของตัวควบคุมพีซซีแบบปรับกฎด้วยตัวเอง โดยวิธีการวิเคราะห์ทางเดินสถานะเพื่อปรับกฎในฐานความรู้
3. เพื่อศึกษาและออกแบบอัลกอริทึมการเรียนรู้ของตัวควบคุมพีซซีแบบปรับกฎด้วยตัวเอง โดยวิธีของเกรเดียนต์เดสเซนท์เพื่อปรับกฎในฐานความรู้ให้รอบในการเรียนรู้เร็วขึ้น
4. เพื่อหาค่าตัวประกอบพีซซีที่มีความเหมาะสมกับการควบคุมความเร็วมอเตอร์ ในกรณีที่ไมทราบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนออัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้เพื่อปรับกฎด้วยตัวเองของตัวควบคุมพีซซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยการประยุกต์ใช้กับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง แนวคิดในการนำเสนอวิทยานิพนธ์ จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รายละเอียดโดยรวมของบทต่างๆที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

บทที่ 3 กล่าวถึง ทฤษฎีฟิซซ์และการควบคุมแบบฟิซซ์ ประกอบด้วย นิยามพื้นฐานของฟิซซ์เซต การปฏิบัติการบนฟิซซ์เซต ความสัมพันธ์ฟิซซ์และการคอมโพสิชัน ตัวแปรลัจฉิตติค ประพจน์แบบฟิซซ์ ตัวควบคุมฟิซซ์ โครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟิซซ์ และ โครงสร้างของตัวควบคุมฟิซซ์ชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง

บทที่ 4 กล่าวถึง การออกแบบตัวควบคุมฟิซซ์ชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบตัวควบคุมแบบฟิซซ์ ส่วนประกอบของตัวควบคุมมอเตอร์แบบฟิซซ์ การออกแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุทและเอาต์พุท การอินเฟอเรนซ์และการออกแบบกฎ แนวทางการออกแบบกฎ การดีฟิซซิฟิเคชัน การคินอมอลไลซ์เซชัน การออกแบบตัวควบคุมฟิซซ์ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีการเกรเดียนท์เดสเซนซ์และการออกแบบตัวควบคุมฟิซซ์ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีการวิเคราะห์ทางดินสถานะ

บทที่ 5 กล่าวถึง การทดลองและผลการทดลอง ซึ่งแบ่งเป็นส่วนย่อยดังนี้

- ทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกด้วยตัวควบคุมฟิซซ์แบบปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีของเกรเดียนท์เดสเซนซ์ โดยทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆกัน
- ทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกด้วยตัวควบคุมฟิซซ์แบบปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีของเกรเดียนท์เดสเซนซ์ โดยทดลองในกรณีมีการใส่ภาระให้กับมอเตอร์
- ทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกด้วยตัวควบคุมฟิซซ์แบบปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางดินสถานะ
- ทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกด้วยตัวควบคุมฟิซซ์แบบปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางดินสถานะในกรณีใส่ภาระให้กับมอเตอร์

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

กล่าวถึงผลการทดลอง ข้อดีของตัวควบคุมพืชชี้ชนิดปรับภูด้วยตัวเอง โดยวิธีเกรเดียนท์เคส
เซ็นท์และวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะ และกล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำวิจัยและแนวทางในการ
พัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

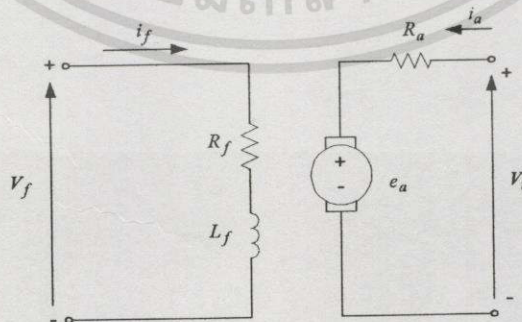
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนซึ่งจุดประสงค์ส่วนใหญ่จะใช้มอเตอร์เป็นตัวสร้างแรงบิดและมีความเร็วคงที่แม้ว่าปัจจุบันจะมีการพัฒนาเทคโนโลยีของตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้มีคุณสมบัติคล้ายมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแต่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็ยังคงมีความสำคัญและยังมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกเป็นแบบที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและสำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้วิธีควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์มีความยืดหยุ่นที่สุดเนื่องจากวงจรของอาร์เมเจอร์และสนามแม่เหล็กแยกจากกันอย่างอิสระ ซึ่งทำให้การควบคุมตามคุณลักษณะของมอเตอร์แรงบิดและความเร็วใกล้เคียงกับคุณลักษณะทางอุดมคติมาก [12]

คุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกมีความสำคัญในการออกแบบระบบควบคุม ดังนั้นในบทนี้จะขอก้าวถึงวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ฟังก์ชันถ่ายโอนและระบบควบคุมความเร็วแบบลูบปิด เพื่อแสดงให้เห็นถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม

2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงส่วนประกอบทางวงจรไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก จากรูปที่ 2.1 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ วงจรอาร์เมเจอร์ วงจรสร้างสนามแม่เหล็ก และส่วนที่เปลี่ยนเป็นพลังงานกล [13]



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

2.2.1 วงจรสมมูลอาร์เมเจอร์

ในวงจรอาร์เมเจอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกป้อนให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์โดยผ่านแปรงถ่านเพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าในวงจรอาร์เมเจอร์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรจะขึ้นอยู่กับ แหล่งจ่ายแรงดัน แรงดันย้อนกลับ ค่าความต้านทานและ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$v_t = e_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2.1)$$

$$e_a = k_e \phi_f \omega_m \quad (2.2)$$

กำหนดให้

- R_a = ค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์
- L_a = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์
- e_a = แรงดันต้านกลับที่สร้างขึ้นที่วงจรอาร์เมเจอร์
- i_a = กระแสที่ไหลในวงจรอาร์เมเจอร์
- v_t = แรงดันที่ขั้วของอาร์เมเจอร์
- ϕ_e = เส้นแรงแม่เหล็กจากวงจรสร้างสนามแม่เหล็ก
- k_e = ค่าคงที่ของมอเตอร์
- ω = ความเร็วเชิงมุมที่เพลลาของมอเตอร์

2.2.2 วงจรสมมูลของวงจรสร้างสนามแม่เหล็ก

วงจรสร้างสนามแม่เหล็ก ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอก ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กพันอยู่บนขั้วแม่เหล็ก ดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$v_f = R_f i_f + N_f \frac{d\phi_f}{dt} \quad (2.3)$$

กำหนดให้

- v_f = แรงดันที่จ่ายให้กับวงจรสนามแม่เหล็ก
- R_f = ค่าความต้านทานของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก
- i_f = กระแสที่ไหลในวงจรสร้างสนามแม่เหล็ก
- N_f = จำนวนรอบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

2.2.3 สมการการสร้างแรงบิด

การสร้างแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้มอเตอร์หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{em} = k_t \phi_f i_a \quad (2.4)$$

กำหนดให้

k_t = ค่าคงที่ของมอเตอร์

T_{em} = แรงบิดที่เพลามอเตอร์

จากกฎของนิวตันจะหาสมการแรงบิดของมอเตอร์ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$T_{em} = T_L + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.5)$$

กำหนดให้

J = ค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยของอาร์เมเจอร์

ω = ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

T_{em} = แรงบิดที่เพลามอเตอร์

T_L = แรงบิดของโหลด

2.2.4 การเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้าเป็นกำลังงานกล

จากสมการที่ (2.2) และ (2.4) จะได้

$$e_a i_a = \frac{k_e}{k_t} T_{em} \omega \quad (2.6)$$

กำหนดให้

$e_a i_a$ = กำลังไฟฟ้า (electrical power) ที่จ่ายให้มอเตอร์

$T_{em} \omega$ = กำลังงานกลที่มอเตอร์สร้างขึ้นที่เพลามอเตอร์

(mechanical power develop)

2.3 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกระตุ้นแยกแบบรูปปิด

ในระบบควบคุมความเร็วแบบรูปปิดมีข้อดีในเรื่องของการรักษาระดับของเอาต์พุต เช่นควบคุมความเร็วรอบได้ดีและสามารถปรับปรุงผลการตอบสนองของเอาต์พุตทางไดนามิกส์ของมอเตอร์จากผลกระทบของตัวรบกวน เช่น โหลดทางกล เป็นต้น โดยผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบรูปปิดสามารถศึกษาโดยการพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ซึ่งจะกล่าวต่อไป

2.3.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

จากสมการ (2.1) - (2.6) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้โดยใส่ลาปลาซทรานฟอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้

$$L(v_t) = V_t(s)$$

$$L(e_a) = E_a(s)$$

$$L(i_a) = I_a(s)$$

$$L(\omega) = \omega(s)$$

$$L(T_{em}) = T_{em}(s)$$

$$L(T_L) = T_L(s)$$

$$K_t = \text{ค่าคงที่มอเตอร์}$$

$$K_e = \text{ค่าคงที่มอเตอร์}$$

$$B = \text{สัมประสิทธิ์ของวิสกอสฟริกชันของมอเตอร์และโหลดที่ต่ออยู่กับเพลาของมอเตอร์}$$

$$J = \text{โมเมนต์แรงเฉื่อยของโรเตอร์และโหลดที่ต่ออยู่ที่เพลาของมอเตอร์}$$

$$V_t(s) - E_a(s) = (R_a + sL_a)I_a(s) \quad (2.7)$$

$$E_a(s) = K_e \phi \omega(s) \quad (2.8)$$

$$T_{em}(s) = K_t \phi I_a(s) \quad (2.9)$$

$$T_{em}(s) - T_L(s) = (B + sJ)\omega(s) \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.7) จะได้

$$I_a(s) = \frac{V_t(s) - E_a(s)}{(R_a + sL_a)} = \frac{[V_t(s) - E_a(s)]1/R_a}{1 + \tau_a s} \quad (2.11)$$

โดยที่ $\tau_a = L_a/R_a$ คือ electrical time constant ของวงจรอาร์เมเจอร์

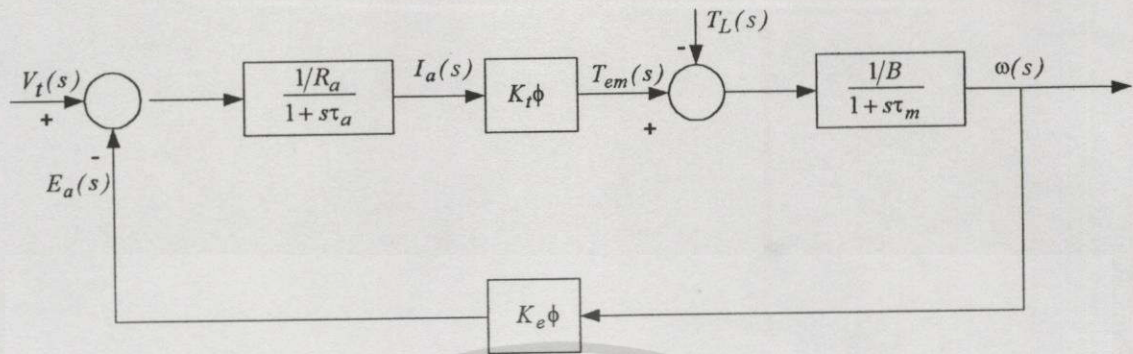
จากสมการ (2.10) จะได้

$$\omega(s) = \frac{T_{em}(s) - T_L(s)}{(B + sJ)} = \frac{[T_{em}(s) - T_L(s)]1/B}{1 + \tau_m s} \quad (2.12)$$

โดยที่ $\tau_m = J/B$ คือ mechanical time constant ของวงจรอาร์เมเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ(2.7) - (2.11) สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.2 สังเกตว่า มีแรงดันย้อนกลับ (back emf.) แสดงในส่วนป้อนกลับ ซึ่งแรงดันย้อนกลับนี้เป็นคุณลักษณะประจำตัวของมอเตอร์ที่จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นของความเร็วและแรงบิดคงที่ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว $\omega(s)$ เนื่องจากแรงดันที่ป้อนให้ $V_t(s)$ และแรงบิดของโหลด $T_L(s)$ ดังสมการ

$$\omega(s) = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)H_1(s)} E_a(s) + \frac{G_2(s)}{1 + G_2(s)H_2(s)} T_L(s) \tag{2.13}$$

เมื่อ

$$G_1(s) = \frac{(1/R_a)(K_t\phi)(1/B)}{1 + s\tau_a} \tag{2.13a}$$

$$H_1(s) = K_e\phi \tag{2.13b}$$

$$G_2(s) = \frac{-(1/B)}{1 + s\tau_m} \tag{2.13c}$$

$$H_2(s) = \frac{-K_t K_e \phi^2 / R_a}{1 + s\tau_a} \tag{2.13d}$$

จากสมการ (2.13) ถ้าไม่คิดส่วนแรงบิดของโหลด $T_L(s)$ จะได้

$$\frac{\omega(s)}{V_t(s)} = \frac{K_t\phi}{K_t K_e \phi^2 + R_a B(1 + s\tau_a)(1 + s\tau_m)} \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ $\tau_a \ll \tau_m$ เสมอ เราจึงตัดส่วนของ τ_a ได้ นั่นคือ

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{\omega(s)}{V_i(s)} = \frac{K_t \phi}{K_t K_e \phi^2 + R_a B + s R_a B \tau_m} \\ &= \frac{k_m}{1 + s \tau_{m1}} \end{aligned} \quad (2.14 a)$$

เมื่อ k_m เป็นอัตราขยายสถานะคงตัว (steady state gain)

τ_{m1} ค่าเวลาคงที่สมมูล (equivalent constant)

และ

$$\tau_{m1} = \frac{R_a B}{K_t K_e \phi^2 + R_a B} \tau_m \quad (2.14b)$$

$$k_m = \frac{K_t \phi / B}{K_t K_e \phi^2 + R_a B} \quad (2.14c)$$

จะเห็นว่า $\tau_{m1} \ll \tau_m$

จากรูปที่ 2.2 เมื่อ $T_L(s) = 0$ จะได้ว่า

$$\frac{\omega(s)}{I_a(s)} = \frac{K_t \phi / B}{1 + s \tau_m} = \frac{k_{m2}}{1 + s \tau_m} \quad (2.15)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.14a) และ (2.15) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{I_a(s)}{V_i(s)} &= \frac{I_a(s) \omega(s)}{\omega(s) V_i(s)} \\ &= \frac{1 + s \tau_m}{K_t \phi / B} \frac{k_m}{(1 + s \tau_{m1})} \\ &= \frac{k_{m1} (1 + s \tau_m)}{1 + s \tau_{m1}} \end{aligned} \quad (2.16)$$

กำหนดให้

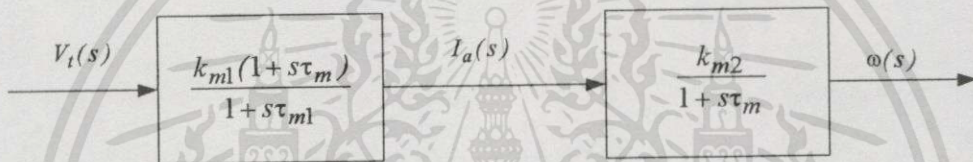
$$k_{m1} = \frac{k_m}{K_t \phi / B} \tag{2.16a}$$

$$k_{m2} = \frac{K_t \phi}{B} \tag{2.16b}$$

$$k_m = k_{m1} k_{m2} \tag{2.16c}$$

โดยที่ k_{m1}, k_{m2}, k_m เป็นค่าคงที่สมมูลย์

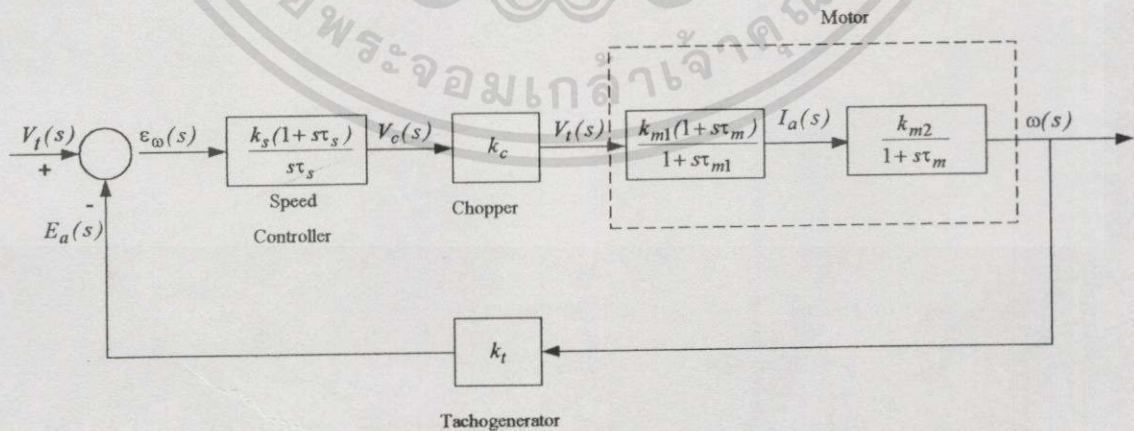
ดังนั้นสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย

2.3.2 การควบคุมความเร็วแบบลูปปิด (Close-Loop Speed Control)

ตัวควบคุมความเร็วแบบลูปปิดมีหลายแบบที่ใช้กัน ที่นิยมใช้กันมี 3 แบบ คือ แบบ Proportional (P) แบบ Proportional-Integral (PI) และ แบบ Proportional-Integral-Derivative ซึ่งในที่นี้ใช้แบบพีไอ มีฟังก์ชันถ่ายโอน คือ $(1+s\tau_s)/s\tau_s$ และบล็อกไดอะแกรมแสดงลูปควบคุมความเร็วแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI

จากรายละเอียดที่นำเสนอในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงโครงสร้างและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก และตัวอย่างของตัวควบคุมแบบอะนาล็อกที่นิยมใช้กันแบบดั้งเดิม ซึ่งจะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ทุกค่าของมอเตอร์เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบตัวควบคุม ในบทต่อไปจะกล่าวถึงทฤษฎีของพีซีซีเพื่อที่จะนำมาประยุกต์สร้างตัวควบคุมพีซีซีแทนตัวควบคุมแบบดั้งเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสาระสำคัญ 3 ส่วนใหญ่ คือ ทฤษฎีพื้นฐานของฟัซซี่ [14-16] ตัวควบคุมฟัซซี่แบบปกติ และตัวควบคุมแบบฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง

3.1 ทฤษฎีเซตแบบเดิม

นิยาม 1 เอกภพสัมพัทธ์ U

เอกภพสัมพัทธ์ คือ เซตของสมาชิกทั้งหมดของขอบเขตที่ทำการพิจารณา

นิยาม 2 คลิซซ์เซต (Crisp Set)

คลิซซ์เซต คือ กลุ่มของสมาชิกที่มีคุณสมบัติตามที่กำหนด ซึ่งสำหรับสมาชิกใด ๆ ในเอกภพสัมพัทธ์สามารถกำหนดได้ว่าเป็นสมาชิกภายในเซตที่กำหนดขึ้นหรือไม่

นิยาม 3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก $\mu_A : X \rightarrow [0,1]$ เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซต A ก็ต่อเมื่อ

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & ; x \in A \\ 0 & ; x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

3.2 ทฤษฎีฟัซซี่

นิยาม 4 ฟัซซี่เซต

ฟัซซี่เซต คือ เซตของคู่อันดับ x และระดับความเป็นสมาชิกแทนด้วย $\mu_A(x)$ โดยที่ x เป็นสมาชิกใดๆในเอกภพสัมพัทธ์ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (3.2)$$

ถ้า U เป็นค่าต่อเนื่อง ฟัซซี่เซต A สามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (3.3)

$$A = \int_U \mu_A(x) / x \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ \int_U แทนด้วย สมาชิกทั้งหมดในเอกภพสัมพัทธ์

ถ้า เป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่อง ฟัชชีเซต A สามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (3.4)

$$A = \sum_U \mu_A(x)/x \quad (3.4)$$

โดยที่ \sum_U แทนด้วยสมาชิกทั้งหมดในเอกภพสัมพัทธ์

นิยาม 5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัชชีเซต (Membership Function of Fuzzy Set)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัชชีเซต A เป็นฟังก์ชันจากเอกภพสัมพัทธ์ U ไปยังช่วงปิดระหว่าง 0 ถึง 1 เขียนแทนด้วยสมการ

$$\mu_A : U \rightarrow [0,1] \quad (3.5)$$

นิยาม 6 ซัพพอร์ตของฟัชชีเซต (Support of fuzzy set)

ซัพพอร์ตของฟัชชีเซต A ในเอกภพสัมพัทธ์ U คือ ฟัชชีเซตที่มีสมาชิกเป็นสมาชิกทั้งหมดในเอกภพสัมพัทธ์ที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกในฟัชชีเซต A มากกว่าศูนย์ เขียนแทนด้วยสมการที่ (3.6)

$$\text{supp}(A) = \{x \in U \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (3.6)$$

A = ฟัชชีเซตใดๆ
 $\text{supp}(A)$ = ซัพพอร์ตของฟัชชีเซต

นิยาม 7 ศูนย์กลางของฟัชชี (Center of fuzzy)

ศูนย์กลางของฟัชชี คือ ค่ากึ่งกลางของฟัชชีเซต หรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก

นิยาม 8 จุดแบ่งของฟัชชีเซต (Crossover of fuzzy set)

จุดแบ่งของฟัชชีเซต คือ จุดใดๆในเอกภพสัมพัทธ์ที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.5

นิยาม 9 ความสูงของฟัชชีเซต (Height of fuzzy set)

ความสูงของฟัชชีเซต คือ ระดับความเป็นสมาชิกที่มีค่าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม10 α -cutเซตของฟัซซี่เซต (α -cut set of fuzzy set)

α -cut เซตของฟัซซี่เซต A คือ ฟัซซี่เซต A_α ซึ่งสมาชิกในเซตคือสมาชิกในเอกภพสัมพัทธ์ที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกมากกว่าหรือเท่ากับ α เขียนแทนด้วยสมการที่ (3.7)

$$A_\alpha = \{x \in U \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (3.7)$$

3.3 การปฏิบัติการบนฟัซซี่เซต

นิยาม11 การเท่ากันของฟัซซี่เซต (Equality)

ฟัซซี่เซต A เท่ากับ ฟัซซี่เซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิกทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์ มีค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต A เท่ากับค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต B เขียนแทนด้วย สมการ (3.8)

$$A = B \leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (3.8)$$

นิยาม12 การเป็นเซตย่อยของฟัซซี่เซต

ฟัซซี่เซต A เป็นเซตย่อยของ ฟัซซี่เซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิกทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์ มีค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต A น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต B เขียนแทนด้วย สมการ (3.9)

$$A \subset B \leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (3.9)$$

นิยาม13 คอมพลีเมนต์ของฟัซซี่เซต (Complement)

คอมพลีเมนต์ของฟัซซี่เซต A คือ ฟัซซี่เซต \bar{A} ในเอกภพสัมพัทธ์ซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.10)$$

นิยาม14 ยูเนียน (Union)

ฟัซซี่เซต A ยูเนียน ฟัซซี่เซต B เขียนแทนด้วย $A \cup B$ คือ ฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์ซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.11)$$

นิยาม 15 อินเตอร์เซคชัน (Intersection)

ฟัซซีเซต A อินเตอร์เซค ฟัซซีเซต B เขียนแทนด้วย $A \cap B$ คือ ฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.12)$$

3.4 ความสัมพันธ์ของฟัซซี (Fuzzy Relation)

นิยาม 16 ความสัมพันธ์ของฟัซซี

ความสัมพันธ์ของฟัซซี คือ ฟัซซีเซตของคู่อันดับ โดยที่แต่ละคู่อันดับมีค่าระดับความเป็นสมาชิกอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เขียนแทนได้ดังนี้

ถ้า U และ V เป็นเอกภพสัมพัทธ์ที่ต่อเนื่อง (Continuous) และ $\mu_R: U \times V \rightarrow [0,1]$ จะได้ว่า

$$R = \int_{U \times V} \mu_R(u,v)/(u,v) \quad (3.13)$$

ถ้า U และ V เป็นเอกภพสัมพัทธ์ที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete) และ $\mu_R: U \times V \rightarrow [0,1]$ จะได้ว่า

$$R = \sum_{U \times V} \mu_R(u,v)/(u,v) \quad (3.14)$$

3.5 การปฏิบัติการบนความสัมพันธ์ของฟัซซี (Fuzzy Relation)

นิยาม 17 อินเตอร์เซคชัน (Intersection)

กำหนดให้ R และ S เป็นความสัมพันธ์ของฟัซซี บนเอกภพสัมพัทธ์ $X \times Y$ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของการอินเตอร์เซคชันระหว่าง R และ S คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกที่น้อยที่สุดระหว่าง R และ S เขียนแทนด้วยสมการ (3.15)

$$\forall (x,y) \in X \times Y : \mu_{R \cap S}(x,y) = \min(\mu_R(x,y), \mu_S(x,y)) \quad (3.15)$$

นิยาม 18 ยูเนียน (Union)

กำหนดให้ R และ S เป็นความสัมพันธ์ของฟัซซีบนเอกภพสัมพัทธ์ $X \times Y$ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของการยูเนียนระหว่าง R และ S คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกที่มากที่สุดระหว่าง R และ S เขียนแทนด้วยสมการ (3.16)

นิยาม 18 ยูเนียน (Union)

กำหนดให้ R และ S เป็นความสัมพันธ์ของฟัซซี่บนเอกภพสัมพัทธ์ $X \times Y$ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของการยูเนียนระหว่าง R และ S คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกที่มากที่สุดระหว่าง R และ S เขียนแทนด้วยสมการ (3.16)

$$\forall (x, y) \in X \times Y : \mu_{R \cup S}(x, y) = \max(\mu_R(x, y), \mu_S(x, y)) \quad (3.16)$$

นิยาม 19 โปรเจกชันของความสัมพันธ์ ฟัซซี่ (Fuzzy Relation Projection)

กำหนดให้ $R = \{(x, y), \mu_R(x, y) \mid (x, y) \in X \times Y\}$ เมื่อ X, Y เป็นค่าต่อเนื่อง โปรเจกชันของ R บน Y ถูกนิยามดังนี้

$$\text{proj } R \text{ on } Y = \int_Y \sup_x \mu_R(x, y) / y \quad (3.17)$$

sup คือ supremum เป็นการหาค่าสูงสุดเมื่อ X, Y เป็นค่าที่ต่อเนื่อง เมื่อ X, Y เป็นค่าไม่ต่อเนื่อง ใช้ตัวปฏิบัติการ MAX แทน supremum

นิยาม 20 Total Projection บนความสัมพันธ์ R

กำหนดให้ $R = \{(x, y), \mu_R(x, y) \mid (x, y) \in X \times Y\}$ total projection บน R คือ อัตราความเป็นสมาชิกสูงสุดของความสัมพันธ์ R

$$\begin{aligned} \text{proj } R \text{ on } X &= \{x, \max_y \mu_R(x, y) \mid (x, y) \in X \times Y\} \\ \text{proj } R \text{ on } Y &= \{y, \max_x \mu_R(x, y) \mid (x, y) \in X \times Y\} \\ \text{total.proj} &= \{x, y, \max_x \max_y \mu_R(x, y) \mid (x, y) \in X \times Y\} \end{aligned} \quad (3.18)$$

นิยาม 21 การขยายเป็นทรงกระบอก (Cylindrical extension)

การขยายเป็นทรงกระบอก คือ การขยายฟัซซี่เซตไปสู่ความสัมพันธ์ฟัซซี่

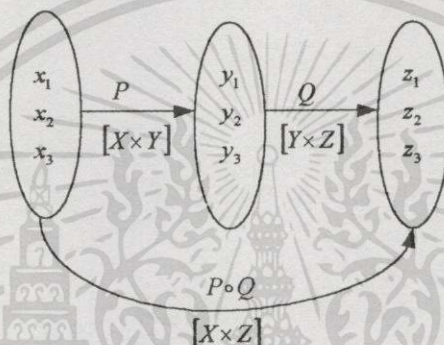
กำหนดให้ F เป็นฟัซซี่เซตบนเอกภพสัมพัทธ์ Y การขยายเป็นทรงกระบอกของ F บน $X \times Y$ เป็นเซตของคู่อันดับทั้งหมด $(x, y) \in X \times Y$ ซึ่งมีระดับความมีสมาชิกเท่ากับ $\mu_F(y)$ ดังแสดงในสมการ (3.19)

$$ce(F) = \int_{X \times Y} \mu_F(y)/(x, y) \quad (3.19)$$

3.6 การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี่ (Composition of Fuzzy Relation)

กำหนดให้ $P(x, y)$ และ $Q(y, z)$ เป็น ความสัมพันธ์จากเอกภพสัมพัทธ์ X ไป Y และ จาก Y ไป Z ตามลำดับ

การคอมโพสิชัน แทนด้วย $P \circ Q$ เป็นความสัมพันธ์ใน $X \times Z$ ที่ซึ่ง $(x, z) \in P \circ Q$ ก็ต่อเมื่อ มี $y \in Y$ อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ซึ่ง $(x, y) \in P$ และ $(y, z) \in Q$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี่

นิยาม 22 Max-Min Composition

Max-Min Composition ของความสัมพันธ์ฟัซซี่ $P(x, y)$ และ $Q(y, z)$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่ $P \circ Q$ ในเอกภพสัมพัทธ์ $X \times Z$ ถูกนิยามฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังในสมการที่ (3.20)

$$\mu_{P \circ Q}(x, z) = \max_{y \in Y} [\min[\mu_P(x, y), \mu_Q(y, z)]] \quad (3.20)$$

โดยที่ $(x, z) \in X \times Z$

นิยาม 23 Max-Product Composition

Max-Product Composition ของความสัมพันธ์ฟัซซี่ $P(x, y)$ และ $Q(y, z)$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่ $P \circ Q$ ในเอกภพสัมพัทธ์ $X \times Z$ ถูกนิยามฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังในสมการที่ (3.21)

$$\mu_{P \circ Q}(x, z) = \max_{y \in Y} [\mu_P(x, y) \times \mu_Q(y, z)] \quad (3.21)$$

โดยที่ $(x, z) \in X \times Z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ตัวแปรลึงค์จิสติก (Linguistic Variable)

นิยาม 24 ตัวแปรลึงค์จิสติก คือ ตัวแปรที่สามารถกำหนดค่าเป็นคำภาษามนุษย์ ซึ่งคำพูดนั้นถูกนิยามโดยฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์ของตัวแปรลึงค์จิสติกนั้น

การกำหนดคุณสมบัติของตัวแปรลึงค์จิสติก จะใช้เป็น (X, T, U, M)

- X = ตัวแปรลึงค์จิสติก เช่น ความเร็ว อุณหภูมิ เป็นต้น
- T = เซตของเทอมที่สามารถกำหนดค่าให้กับตัวแปรลึงค์จิสติกได้
- U = โดเมนทางฟิสิกส์ซึ่งเป็นค่าเชิงปริมาณที่สามารถกำหนดค่าให้กับตัวแปรลึงค์จิสติกได้
- M = ฟังก์ชันที่ถ่ายทอดค่าเชิงปริมาณในโดเมนให้เป็นค่าลึงค์จิสติก

นิยาม 25 ส่วนขยายของตัวแปรลึงค์จิสติก (Linguistic Hedges)

ส่วนขยายของตัวแปรลึงค์จิสติก คือ ตัวปฏิบัติการซึ่งขยายค่าลึงค์จิสติกหรือขยายฟัซซี่เซต ซึ่งแบ่งเป็น

Concentration เป็นส่วนขยายที่ลดระดับความเป็นสมาชิกของสมาชิกทั้งหมดที่มีความเป็นสมาชิกภายในเซตเพียงบางส่วนเท่านั้น [17] ดังแสดงในสมการที่ (3.22)

กำหนดให้ A เป็นฟัซซี่เซต เซตในเอกภพสัมพัทธ์ X โดยที่ $x \in X$

$$CON(A) = \mu_{con(A)}(x) = [\mu_A(x)]^2 \quad (3.22)$$

ตัวอย่างเช่น

$$\text{"Very" } A = [\mu_A(x)]^2$$

$$\text{"Very, very" } A = [\mu_A(x)]^4$$

$$\text{"Plus" } A = [\mu_A(x)]^{2.5}$$

Dilatation เป็นส่วนขยายที่เพิ่มระดับความเป็นสมาชิกของสมาชิกทั้งหมดที่มีความเป็นสมาชิกภายในเซตเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ (3.23)

กำหนดให้ A เป็นฟัซซี่เซต เซตในเอกภพสัมพัทธ์ X โดยที่ $x \in X$

$$DIL(A) = \mu_{dil(A)}(x) = [\mu_A(x)]^{0.5} \quad (3.23)$$

ตัวอย่างเช่น

$$\text{"Slightly"} A = [\mu_A(x)]^{0.5}$$

$$\text{"Minus"} A = [\mu_A(x)]^{0.75}$$

Intensification เป็นส่วนขยายที่เพิ่มระดับความเป็นสมาชิกของสมาชิกทั้งหมดที่มีระดับความเป็นสมาชิกเดิมมากกว่า 0.5 และ ลดระดับความเป็นสมาชิกของสมาชิกทั้งหมดที่มีระดับความเป็นสมาชิกเดมน้อยกว่า 0.5 ดังแสดงในสมการที่ (3.24)

$$\text{"intensify"} A = \begin{cases} 2\mu_A^2(x) & \text{for } 0 \leq \mu_A(x) \leq 0.5 \\ 1 - 2[1 - \mu_A(x)]^2 & \text{for } 0.5 \leq \mu_A(x) \leq 1 \end{cases} \quad (3.24)$$

3.8 ประพจน์แบบฟัซซี (Fuzzy Proposition)

ประพจน์ คือ ข้อความแสดงถึงความจริงทางคุณสมบัติหรือค่าปริมาณของวัตถุ หรือ ตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง

นิยาม 26 ประพจน์ฟัซซีเดี่ยว (Atomic fuzzy propositions)

ประพจน์แบบฟัซซีเดี่ยว คือ ข้อความแสดงคุณสมบัติทางฟัซซีของตัวแปรถึงค่าจัสติก ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ (3.25)

$$X \text{ is } A \quad (3.25)$$

โดยที่

X	=	ตัวแปรถึงค่าจัสติก เช่น ความเร็ว อุณหภูมิ เป็นต้น
is	=	คุณสมบัติของการเป็น
A	=	ค่าถึงค่าจัสติกหรือฟัซซีเซต

นิยาม 27 ประพจน์ฟัซซีผสม (Compound fuzzy propositions)

ประพจน์ฟัซซีผสม คือ ประพจน์ฟัซซีเดี่ยวตั้งแต่ 2 ประพจน์ขึ้นไปซึ่งเชื่อมกันด้วยตัวเชื่อมต่างๆ เช่น "AND" "OR" และ "NOT" เป็นต้น

ดังนั้น ประพจน์ฟัซซีผสมเทียบได้กับความสัมพันธ์ฟัซซี โดยมีตัวปฏิบัติการดังนี้

ประพจน์ที่เชื่อมด้วย "AND" ใช้ตัวปฏิบัติการ ฟัซซีอินเตอร์เซกชัน ดังแสดงในสมการที่ (3.26)

$$\begin{aligned}
 & X \text{ is } A \text{ AND } Y \text{ is } B \\
 \mu_{A \cap B}(x, y) &= \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]
 \end{aligned}
 \tag{3.26}$$

ประพจน์ที่เชื่อมด้วย “OR” ใช้ตัวปฏิบัติการฟัซซี่ยูเนียน

$$\begin{aligned}
 & X \text{ is } A \text{ OR } Y \text{ is } B \\
 \mu_{A \cup B}(x, y) &= \max[\mu_A(x), \mu_B(y)]
 \end{aligned}
 \tag{3.27}$$

ประพจน์ที่เชื่อมด้วย “NOT” ใช้ตัวปฏิบัติการคอมพลิเมนต์ของฟัซซี่เซต

$$\begin{aligned}
 & X \text{ is } NOT A \\
 \mu_{\bar{A}}(x) &= 1 - \mu_A(x)
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$

3.9 กฎของฟัซซี่ (Fuzzy Rules)

นิยาม 28 กฎของฟัซซี่

กฎของฟัซซี่ เป็นข้อความแบบมีเงื่อนไข ซึ่งอยู่ในรูปแบบของ IF-THEN ดังนี้

IF <fuzzy proposition> *THEN* <fuzzy proposition>

เช่น

IF *X is A THEN Y is B*

โดยที่ *X is A* เป็นส่วนเงื่อนไขของกฎ (rule antecedent)

Y is B เป็นส่วนข้อสรุปหรือผลลัพธ์ของกฎ (rule consequent)

นิยาม 29 การอิมพลิเคชัน

การอิมพลิเคชัน คือ การตีความหมายกฎของฟัซซี่ ซึ่งมีหลายวิธี แต่ที่ได้รับความนิยม คือวิธีการอิมพลิเคชันที่ใช้โดย Prof. Mamdani [18]

กำหนดให้

IF <FP₁> *THEN* <FP₂>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกฎของฟัซซี่ โดย FP_1 เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่ใน $X = X_1 \times \dots \times X_n$, FP_2 เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่ใน $Y = Y_1 \times \dots \times Y_n$ และ x และ y เป็นตัวแปรลึกลับใน X และ Y ตามลำดับ
Mamdani Implication: ถูกตีความเป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่ Q ใน $X \times Y$ ด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังแสดงในสมการ (3.29)

$$\mu_Q(x, y) = \min[(\mu_{FP_1}(x), \mu_{FP_2}(y))] \quad (3.29)$$

หรือ

$$\mu_Q(x, y) = \mu_{FP_1}(x) \times \mu_{FP_2}(y) \quad (3.30)$$

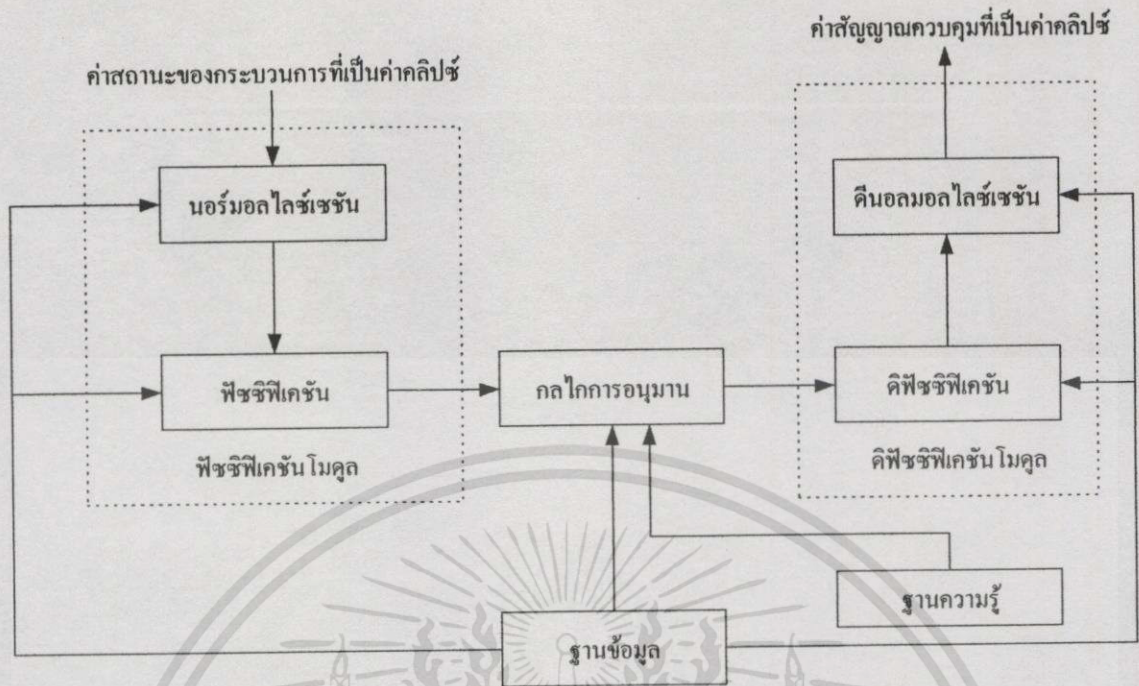
3.10 ตัวควบคุมฟัซซี่ (Fuzzy Controller)

ตัวควบคุมฟัซซี่ที่กล่าวนี้จะเป็นตัวควบคุมแบบใช้ฐานความรู้ (Knowledge base) หรือ ประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ เป็นกฎหรือแนวทางในการควบคุมเราจะเรียกตัวควบคุมได้อีกชื่อหนึ่งว่า “ตัวควบคุมฟัซซี่แบบฐานความรู้” (Fuzzy Knowledge Base Controller: FKBC)

3.10.1 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่แบบฐานความรู้

โครงสร้างของ FKBC จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน [14] ดังแสดงในรูปที่ (3.2)

1. ฟัซซิฟิเคชันโมดูล (Fuzzification Module)
2. ฐานความรู้ (Knowledge Base)
3. กลไกการอนุมาน (Inference Engine)
4. ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification Module)



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่

3.10.1.1 ฟัซซิฟิเคชันโมดูล ประกอบด้วย 2 ส่วน

การนอร์มอลไลซ์เซชัน (Normalization) ทำหน้าที่ เปลี่ยนสเกลจากค่าทางฟิสิกส์ของตัวแปรสถานะ ไปสู่เอกภพสัมพัทธ์ซึ่งถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว

ฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification) ทำหน้าที่ เปลี่ยนค่าเชิงปริมาณที่เป็นคลิบซ์ประเภทของตัวแปรสถานะ ไปเป็นฟัซซี่เซต โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

3.10.1.2 ฐานความรู้ฟัซซี่ (Fuzzy Knowledge base) ประกอบด้วย 2 ส่วน

ฐานข้อมูล เป็นส่วนที่เก็บฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต ค่าเอกภพสัมพัทธ์ และสเกลต่างๆ ที่ใช้ในการนอร์มอลไลซ์เซชัน และ คีนอร์มอลไลซ์เซชัน

ฐานกฎ เป็นส่วนที่เก็บกฎที่ใช้ในการควบคุมระบบ ซึ่งอยู่ในรูปของ IF-THEN

$$IF \langle \text{process state} \rangle THEN \langle \text{control output} \rangle$$

3.10.1.3 กลไกการอนุมาน (Inference Engine)

กลไกการอนุมานถูกใช้เพื่อรวมกฎฟัซซี่ในฐานความรู้เพื่อหาข้อสรุป ซึ่งมีหลายวิธีดังนี้

1. **Max-min method** วิธีการอินเฟอเรนซ์แบบนี้ จะใช้ตัวปฏิบัติการ min การเชื่อมโยงกันของประพจน์แบบฟัซซี่ในส่วนเงื่อนไขของกฎแต่ละกฎซึ่งจะได้ระดับความเข้มของข้อสรุปในแต่ละกฎ และใช้ตัวปฏิบัติการ max ในการรวมส่วนข้อสรุปแต่ละกฎเข้าด้วยกันเป็นข้อสรุปสุดท้าย [19] ดังแสดงในสมการที่ (3.31) และ รูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_{B'}(y) = \max_k \min(\beta_k, \mu_{B_k}(y)) \quad (3.31)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \text{ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อสรุปหลังจากทำการอินเฟอร์เรนซ์} \\ \beta_k &= \text{ระดับความเข้มของกฎที่ } k \\ \mu_{B_k}(y) &= \text{ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อสรุปในกฎที่ } k \end{aligned}$$

2. Max-product method วิธีการอินเฟอร์เรนซ์แบบนี้จะใช้ตัวปฏิบัติการ "*" (product) ในการอิมพลีเม้นชัน [20] และใช้ตัวปฏิบัติการ max ในการรวมข้อสรุปของกฎต่างๆเข้าด้วยกัน ส่วนการเชื่อมโยงระหว่างประพจน์แบบฟัซซี่ในส่วนเงื่อนไขของกฎจะใช้ตัวปฏิบัติการ min หรือ product อย่างใดอย่างหนึ่ง ดังแสดงในสมการที่ (3.32) และรูปที่ 3.4

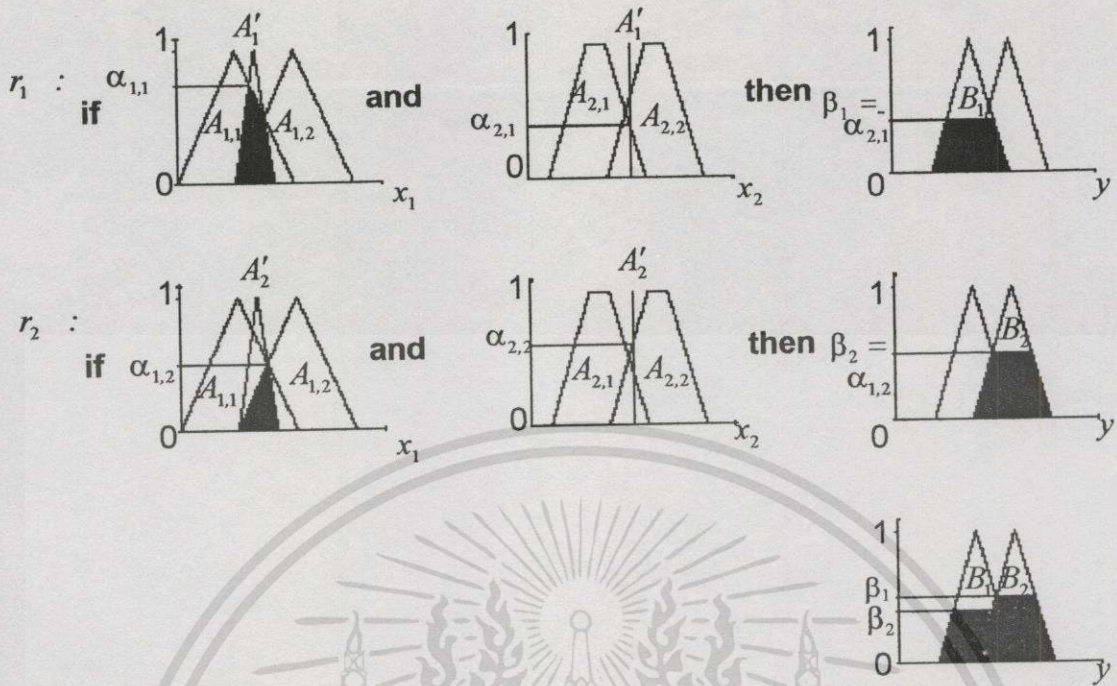
$$\mu_{B'}(y) = \max_k (\beta_k * \mu_{B_k}(y)) \quad (3.32)$$

โดยที่

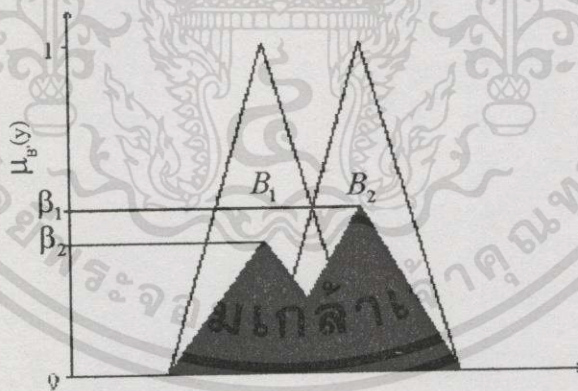
$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \text{ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อสรุปหลังจากทำการอินเฟอร์เรนซ์} \\ \beta_k &= \text{ระดับความเข้มของกฎที่ } k \\ \mu_{B_k}(y) &= \text{ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อสรุปในกฎที่ } k \end{aligned}$$

3. Sum-product method วิธีการอินเฟอร์เรนซ์แบบนี้ใช้ ตัวปฏิบัติการ "*" ในการอิมพลีเม้นชัน เช่นเดียวกับวิธี Max-product แต่การรวมข้อสรุปของกฎต่างๆจะใช้ตัวปฏิบัติการ sum ดังแสดงในสมการที่ (3.33)

$$\mu_{B'}(y) = \sum_k \beta_k * \mu_{B_k}(y) \quad (3.33)$$



รูปที่ 3.3 การอินเฟอร์เรนซ์แบบ Max-Min



รูปที่ 3.4 การอินเฟอร์เรนซ์แบบ Max-product

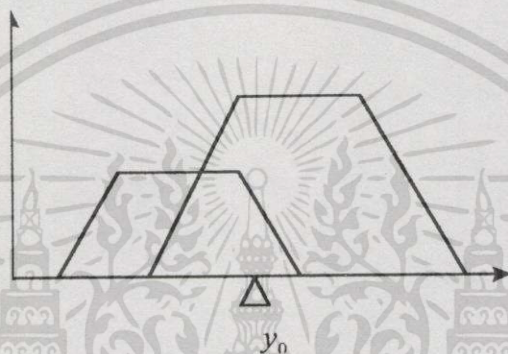
3.10.1.4 ดิฟฟิวซิฟิเคชัน (Defuzzification) ประกอบด้วย 2 ส่วน

ดิฟฟิวซิฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงค่าระดับความเป็นสมาชิกของข้อสรุปที่ได้จากกลไกการอนุมานกลับมาเป็นค่าคลิซิปเซต ซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้ในการควบคุมระบบต่อไป วิธีการดิฟฟิวซิฟิเคชันนั้นมีหลายวิธีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Center of Gravity กำหนดค่าที่ได้จากการคิฟuzzyไฟค์ให้เท่ากับ y_0 ซึ่งเป็นค่าศูนย์กลางพื้นที่ซึ่งคคอบคคกด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อสรูปของแต่ละกกฎ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.34) และรูปที่ 3.5

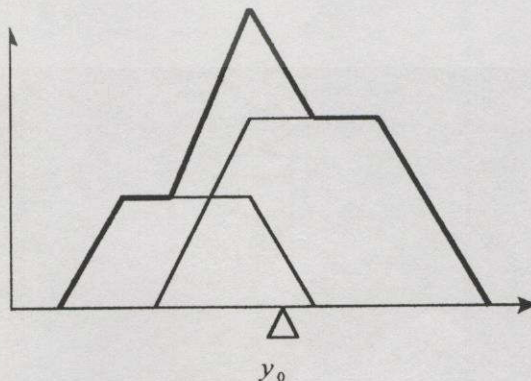
$$y_0 = \frac{\sum_{j=1}^n y_j \cdot \mu_{B'}(y_j)}{\sum_{j=1}^n \mu_{B'}(y_j)} \quad (3.34)$$



รูปที่ 3.5 การคิฟuzzyไฟค์นวิธี Center of Gravity

3. Center of Sums วิธีการนี้จะทล็กเคื่องการนำฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้จากการอนูมานมา ยูเนียงกัน ซึ่งจะนำมารวมกันแทน ซึ่งทำให้วิธีนี้เป็นวิธีที่เร็ว ค่า y_0 คำนวณได้จากสมการที่ (3.35) และรูปที่ 3.6

$$y_0 = \frac{\sum_{j=1}^n y_j \cdot [\mu_{B'_1}(z_j) + \mu_{B'_2}(z_j) + \dots + \mu_{B'_n}(z_j)]}{\sum_{j=1}^n [\mu_{B'_1}(z_j) + \mu_{B'_2}(z_j) + \dots + \mu_{B'_n}(z_j)]} \quad (3.35)$$



รูปที่ 3.6 การคิฟuzzyไฟค์นวิธี Center of Sums

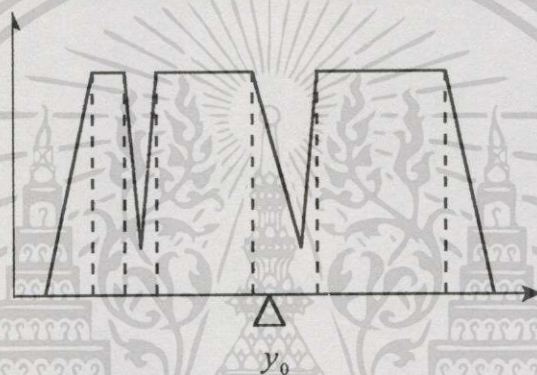
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. **วิธี Mean of Maxima** กำหนดค่าที่ได้จากการดิฟฟิวซิไฟด์ให้เท่ากับ y_0 คือ ค่าเฉลี่ยของสมาชิกซึ่งมีค่าระดับความเป็นสมาชิกในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตเป็นหนึ่ง สามารถหาได้จากสมการที่ (3.36) และแสดงให้เห็นดังรูปที่ (3.5)

$$y_0 = \frac{\sum_{j=1}^n y_j}{m} \tag{3.36}$$

โดยที่ y_j คือสมาชิกที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตเป็นหนึ่ง

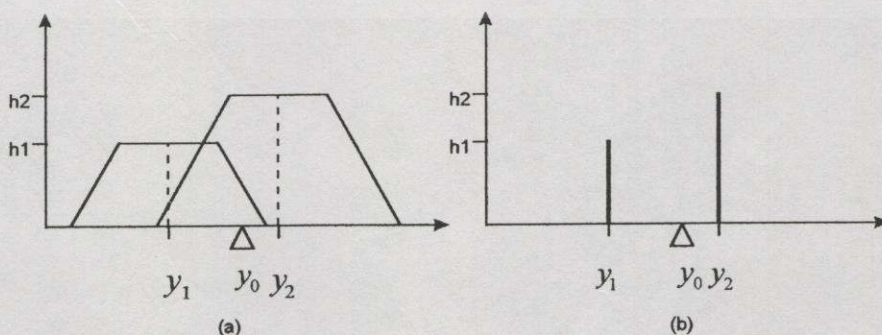
m คือ จำนวนสมาชิกที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตเป็นหนึ่ง



รูปที่ 3.7 การดิฟฟิวซิไฟเคชันวิธี Mean of Maxima

4. **วิธี Height** วิธีนี้อาจเรียกว่า วิธี moment วิธี fuzzy-mean หรือ วิธี ค่าถ่วงน้ำหนักเฉลี่ย ซึ่งใช้ค่าเฉลี่ย y_j ของแต่ละเอาต์พุต B_j ดังแสดงในรูปที่ (3.8a) และสร้างค่าถ่วงน้ำหนักโดยใช้ความสูงของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้จากการอินเฟอร์เรนซ์ของแต่ละกฎ แทนด้วย h_j ดังนั้น ค่า y_0 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.37) และ รูปที่ (3.8b)

$$y_0 = \frac{y_1 \cdot h_1 + y_2 \cdot h_2 + \dots + y_n \cdot h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \tag{3.37}$$



รูปที่ 3.8 การดิฟฟิวซิไฟเคชันวิธี Height

คืนอลมอลไลซ์เซชัน (Denormalization) เป็นส่วนที่แปลงค่าสเกลของตัวแปรเอาต์พุตจากดิฟฟิเคชันให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ของปริมาณที่ใช้ในการควบคุมจริง

3.11 ชนิดของตัวควบคุมฟัซซี่แบบฐานความรู้ (Fuzzy Knowledge Base Types)

ตัวควบคุมฟัซซี่ที่นิยมใช้จะมีชนิดต่างๆคล้ายกับการควบคุมแบบดั้งเดิม เช่น แบบ P, PD, PI และ PID เป็นต้น การกำหนดตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตจะสอดคล้องกับรูปแบบของตัวควบคุมและเพื่อใช้เป็นตัวแปรส่วนเหตุและผลสรุปของกฎ การกำหนดตัวแปร กำหนดได้ดังนี้

ตัวแปรอินพุตที่เป็นส่วนเงื่อนไขของกฎในตัวควบคุมฟัซซี่

$$\begin{aligned} e &= \text{ค่าผิดพลาดระหว่างค่าที่กำหนดและค่าที่คำนวณได้จริง} \\ \Delta e &= \text{การเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด} \\ \delta e &= \text{ผลรวมของค่าผิดพลาด} \end{aligned}$$

ตัวแปรเอาต์พุตที่เป็นส่วนข้อสรุปของกฎในตัวควบคุมฟัซซี่

$$\begin{aligned} u &= \text{ตัวแปรเอาต์พุตซึ่งเป็นผลลัพธ์ของตัวควบคุม} \\ \Delta u &= \text{การเปลี่ยนแปลงของค่าเอาต์พุต} \end{aligned}$$

ค่าตัวแปรต่างๆสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (3.38)-(3.40)

$$e(k) = y_{sp} - y(k) \quad (3.38)$$

$$ce(k) = e(k) - e(k-1) \quad (3.39)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (3.40)$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} y_{sp} &= \text{ค่าเอาต์พุตของกระบวนการที่ต้องการ} \\ y(k) &= \text{ค่าเอาต์พุตของกระบวนการจริง} \\ k &= \text{เวลาการสุ่มสัญญาณ (sampling time)} \end{aligned}$$

การแบ่งชนิดของตัวควบคุมฟัซซี่ จะอ้างอิงถึงคุณสมบัติเดิมของการควบคุมแบบเดิม โดยการควบคุมแบบฟัซซี่จะกำหนดความสัมพันธ์จากกฎ และอนุมานแบบ GMP จากเหตุเพื่อให้ได้ผลสรุป โดยกำหนดให้ส่วนของเงื่อนไขและผลสรุปอยู่ในรูปของตัวแปรลิ่งค์จัสติก

3.11.1 ตัวควบคุมฟuzzyแบบ Proportional (P-like FKBC)

สมการที่อธิบายตัวควบคุมชนิด P แบบเดิมคือ

$$u = K_p e \quad (3.41)$$

โดย K_p = Proportional gain

แสดงให้อยู่ในรูปของกฎของฟuzzy ได้ดังนี้

if $e(k)$ is (antecedent) then $u(k)$ is (consequent)

3.11.2 ตัวควบคุมฟuzzyแบบ Proportional-Derivative (PD-like FKBC)

สมการที่อธิบายตัวควบคุมชนิด PD แบบเดิมคือ

$$u = K_p e + K_D \dot{e} \quad (3.42)$$

โดยที่

K_p = Proportional gain

K_D = Derivative gain

แสดงให้อยู่ในรูปของกฎของฟuzzy ได้ดังนี้

if $e(k)$ is (antecedent) and $\dot{e}(k)$ is (antecedent) then $u(k)$ is (consequent)

3.11.3 ตัวควบคุมฟuzzyแบบ Proportional-Integral (PI-like FKBC)

สมการที่อธิบายตัวควบคุมชนิด PI แบบเดิมคือ

$$u = K_p e + K_I \int e dt \quad (3.43)$$

โดยที่

K_I = Integral gain

แสดงให้อยู่ในรูปของกฎของฟuzzy ได้ดังนี้

if $e(k)$ is (antecedent) and $\int e(k) dt$ is (antecedent) then $\Delta u(k)$ is (consequent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรรมใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11.4 ตัวควบคุมพีชซีแบบ Proportional-Integral-Derivative (PID-like FKBC)

สมการที่อธิบายตัวควบคุมชนิด PID แบบเดิมคือ

$$u = K_p e + K_D \dot{e} + K_I \int e dt \quad (3.44)$$

แสดงให้อยู่ในรูปของกฎของพีชซีได้ดังนี้

*if $e(k)$ is (antecedent) and $ce(k)$ is (antecedent) and δe is (antecedent)
then $\Delta u(k)$ is (consequent)*

3.12 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในตัวควบคุมพีชซี

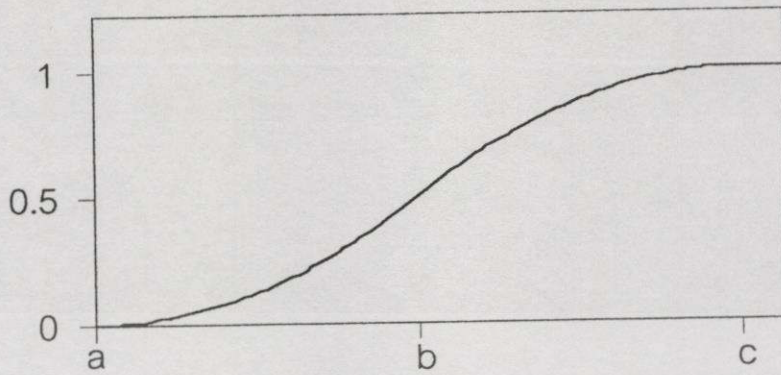
การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้กับพีชซีเซต มี 2 วิธี คือ กำหนดโดยใช้ตัวเลข และ กำหนดโดยใช้ฟังก์ชัน การกำหนดโดยใช้ตัวเลขนั้นค่าระดับความเป็นสมาชิกของพีชซีเซตสามารถอธิบายได้โดยใช้เวกเตอร์ตัวเลขซึ่งมิติของเวกเตอร์ขึ้นอยู่กับจำนวนสมาชิกซึ่งเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ในเอกภพสัมพัทธ์ ส่วนการกำหนดโดยใช้ฟังก์ชันนั้นจะมีการกำหนดฟังก์ชันซึ่งเป็นฟังก์ชัน จาก เอกภพสัมพัทธ์ ไปบน $[0,1]$ รูปแบบของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่นิยมใช้มีดังต่อไปนี้ [6]

3.12.1 ฟังก์ชันรูปตัว S (S-function) ฟังก์ชันนี้จะมีรูปร่างเป็นตัว S ดังแสดงในสมการที่ (3.45) และ รูปที่ (3.9)

$$S(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & ; u < a \\ 2[(u-a)/(c-a)]^2 & ; a \leq u < b \\ 1 - 2[(u-c)/(c-a)]^2 & ; b \leq u \leq c \\ 1 & ; u > c \end{cases} \quad (3.45)$$

โดยที่ a, b, c คือ ค่าคงที่ใดๆ

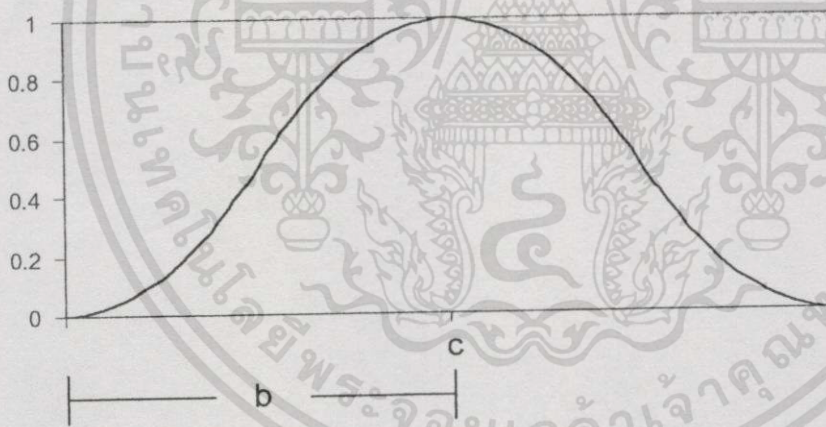
u คือ ค่าตัวแปรอินพุท



รูปที่ 3.9 รูปฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปตัว S

3.12.2 ฟังก์ชันรูปประฆังคว่ำ (π -function) ฟังก์ชันนี้จะมีรูปร่างเป็นระฆังคว่ำ ดังแสดงในสมการที่ (3.46) และ รูปที่ (3.10)

$$\pi(u; b, c) = \begin{cases} S(u; c-b, c-b/2, c) & ; u \leq c \\ 1 - S(u; c, c+b/2, c+b) & ; u > c \end{cases} \quad (3.46)$$



รูปที่ 3.10 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปประฆังคว่ำ

3.12.3 ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม (T-function) ฟังก์ชันนี้จะมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยม ดังแสดงในสมการที่ (3.47)

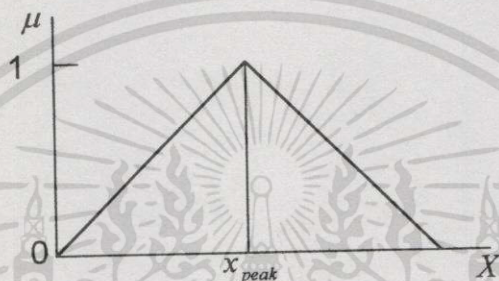
$$T(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & ; u \leq a \\ (u-a)/(b-a) & ; a < u \leq b \\ (c-u)/(c-b) & ; b < u \leq c \\ 0 & ; u > c \end{cases} \quad (3.47)$$

3.13 พารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ในวิชานีพนธ์ฉบับนี้ใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยมเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ดังนั้นจะกล่าวเพียงพารามิเตอร์ของฟังก์ชันสามเหลี่ยมเท่านั้น

นิยาม 31 ค่าสูงสุด (Peak Value)

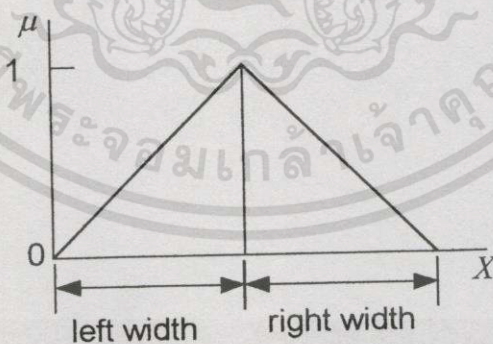
ค่าสูงสุด หมายถึง ค่าสูงสุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในแต่ละเทอม โดยจะมีค่าเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ค่าสูงสุดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม

นิยาม 32 ความกว้างทางซ้ายและขวา (Left and Right Width)

ความกว้างทางซ้ายและขวา หมายถึง ช่วงความกว้างระหว่างจุดสูงสุดและจุดศูนย์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกหรือ เรียกว่าซัพพอร์ตของเซต ถ้าความกว้างทั้งสองเท่ากัน เราเรียกฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12



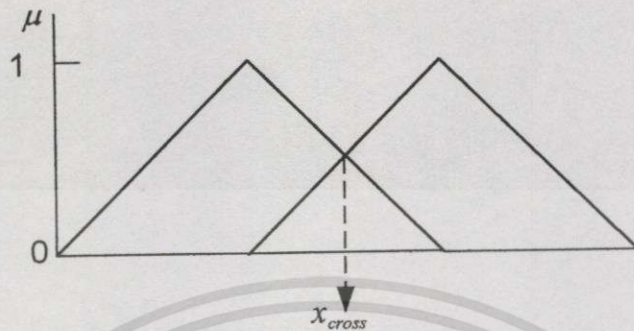
รูปที่ 3.12 ความกว้างของฟังก์ชันสามเหลี่ยม

นิยาม 33 จุดตัด (Crosspoints)

จุดตัด จุดตัดระหว่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก μ_{A1} และ μ_{A2} ในเอกภพสัมพัทธ์ X คือ ค่า x_{cross} ที่ซึ่ง $\mu_{A1}(x_{cross}) = \mu_{A2}(x_{cross}) > 0$ และระดับของจุดตัดคือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x_{cross} และจำนวนจุดตัดระหว่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 2 ฟังก์ชันเรียกว่า อัตราส่วนของจุดตัด (cross-point ratio) ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 จุดตัดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม

3.14 หลักเกณฑ์ในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

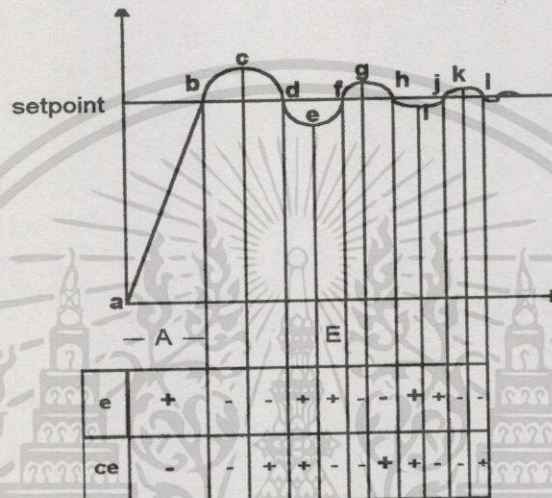
1. การกระจายข้อมูล หรือคุณลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และ เอาท์พุท ของกระบวนการที่ควบคุมว่าเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น ถ้าเป็นเชิงเส้นควรใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ถ้าไม่เป็นเชิงเส้นควรใช้ฟังก์ชันรูปตัว S หรือฟังก์ชันรูปประฆังคว่ำ
2. คุณสมบัติในการคำนวณ เช่น ความเร็วในการคำนวณและขนาดของหน่วยความจำ
3. ความต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องของข้อมูล โดยทั่วไปจำนวนฟังก์ชันที่ใช้กำหนดระดับของค่าลึงค์อิสติกไม่ควรต่ำกว่า 5 ถึง 7 ระดับ ถ้าต่ำกว่านี้จะเกิดความไม่ต่อเนื่องและเกิดความผิดพลาดในผลลัพธ์ ถ้ามีจำนวนมากกว่านี้จะเสียเวลาในการคำนวณให้มากขึ้น
4. การกำหนดฟังก์ชัน แต่ละฟังก์ชันควรให้มีการทับกันระหว่างฟังก์ชัน (overlap) ของเซตที่อยู่ติดกันเพื่อให้แน่ใจว่าการควบคุมต้องมีกฎควบคุมอย่างน้อย 1-2 กฎ ในการรองรับตัวแปรอินพุต เปอร์เซ็นต์การทับกันอยู่ที่ประมาณ 15- 50 %
5. การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ควรมีอัตราส่วนของจุดตัดเป็นหนึ่ง ระดับความเป็นสมาชิกของจุดตัดควรเท่ากับ 0.5 และฟังก์ชันควรมีลักษณะสมมาตร ซึ่งจะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี นั่นคือเวลาในการเข้าถึงเร็วและเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินต่ำ

3.15 แนวทางการออกแบบกฎ

กฎถือว่าเป็นหัวใจสำคัญในตัวควบคุมฟัซซี่ โดยกฎจะเป็นที่รวมของประสบการณ์เกี่ยวกับพฤติกรรมการตอบสนองของระบบเชิงประมาณที่ต้องการควบคุม ซึ่งวิธีการกำหนดอาจจะสรุปแน่นอนไม่ได้ ดังนั้นหลักเกณฑ์ประมาณค่ากฎอาจจะกำหนดได้จากคุณสมบัติของระบบอย่างง่าย ๆ

และทำการปรับแต่งให้เหมาะสมหรืออาจจะทดสอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อใช้เป็นแนวทางการออกแบบ

การออกแบบกฎโดยวิธีฮิวริสติก (Heuristic) เป็นการออกแบบกฎจากพฤติกรรมการตอบสนองของระบบที่ได้จากประสบการณ์หรือจากการทดสอบจนกระทั่งได้ค่าสมรรถนะที่ต้องการซึ่งการออกแบบกฎโดยประมาณนี้จะใช้วิธีการพิจารณาความสัมพันธ์ของอินพุตและผลการตอบสนอง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งสามารถเขียนเป็นกฎแบบหยาบได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.14 ผลการตอบสนองของการเปลี่ยนระดับและการแบ่งช่วงของผลการตอบสนองเพื่อหาความสัมพันธ์ของ ค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุต และเอาต์พุตของการออกแบบกฎ

Rule no.	e	ce	Output	Reference
1	P	Z	P	Points a,e,i
2	Z	N	N	Points b,f,j
3	N	Z	N	Points c,g,k
4	Z	P	P	Points d,h,l
5	Z	N	Z	Setpoint
6	P	N	P	Range A,E

นอกจากนี้จากความสัมพันธ์ของอินพุตและผลการตอบสนองทำให้สามารถแบ่งกฎแบบละเอียดได้ 5 กลุ่มดังแสดงในรูปที่ 3.15 ดังนี้

กำหนดให้ ค่าลึงค์ฮิสติก สำหรับค่าผิดพลาด อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด และ เอาต์พุตของระบบพีซี คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PB = Positive Big PM = Positive Medium PS = Positive Small
 ZE = Zero NS = Negative Small NM = Negative Medium
 NB = Negative Big

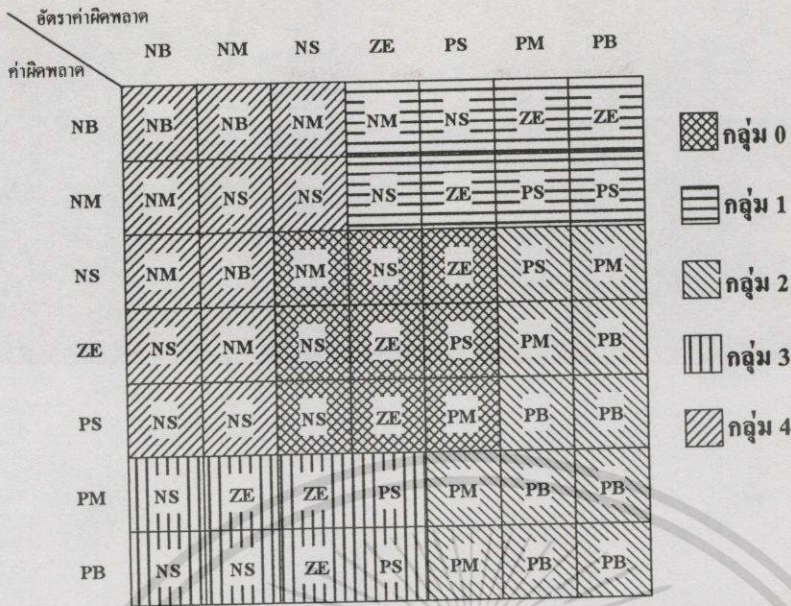
กลุ่มที่ 0 (Group 0) คือ กลุ่มของกฎที่มีค่า $e(k)$ และ ค่า $ce(k)$ เป็น (Positive หรือ Negative) ด้วยขนาด (Small หรือ Zero) ซึ่งหมายความว่า ค่าปัจจุบันของเอาต์พุตอยู่ห่างจากค่าที่กำหนดไว้เพียงเล็กน้อย ดังนั้น ค่า $\Delta u(k)$ ควรมีค่าน้อยด้วย (Small หรือ Zero) สรุปกฎในกลุ่มนี้จะสัมพันธ์กับสถานะ steady state ของระบบ

กลุ่มที่ 1 (Group 1) คือ กลุ่มของกฎที่มีค่า $e(k)$ เป็น (NB, NM) ซึ่งหมายความว่า ค่าเอาต์พุตมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดให้มาก ขณะเดียวกัน ค่า $ce(k)$ เป็น Positive แสดงว่า เอาต์พุต วิ่งเข้าหาค่าที่กำหนดให้ ดังนั้น ค่า $\Delta u(k)$ จะเป็นตัวที่เร่งให้ระบบเข้าสู่ค่าที่กำหนดเร็วขึ้นหรือหน่วงให้ระบบเข้าสู่ค่าที่กำหนดช้าลงนั่นเอง เช่น ถ้า เอาต์พุตของระบบมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดให้มาก ($e(k)$ is NB) และ มันกำลังเคลื่อนที่เข้าหาค่าที่กำหนดไว้อย่างช้าๆ ($ce(k)$ is PS) ดังนั้น ขนาดของ การเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าที่กำหนดควรจะถูกระงับให้เร็วขึ้น ($\Delta u(k)$ is NM) เป็นต้น

กลุ่มที่ 2 (Group 2) คือ กลุ่มของกฎที่มีค่า $e(k)$ มีค่าเข้าใกล้ค่าที่กำหนด (PS, ZE, NS) หรือ มีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดมาก (PM, PB) ขณะเดียวกัน ค่า $ce(k)$ เป็นบวก (Positive) แสดงว่า ค่าเอาต์พุตเคลื่อนที่ออกจากค่าที่กำหนดไว้ ดังนั้น ค่า $\Delta u(k)$ ควรมีค่าเป็นบวกเพื่อเปลี่ยนค่าเอาต์พุตให้เคลื่อนที่สู่ค่าที่กำหนดให้แทนที่จะเคลื่อนที่ออกจากค่าที่กำหนดให้

กลุ่มที่ 3 (Group 3) คือ กลุ่มของกฎที่มีค่า $e(k)$ เป็น Positive Medium หรือ Big ซึ่งหมายความว่า เอาต์พุต มีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดมาก ขณะเดียวกัน ค่า $ce(k)$ เป็นลบ (Negative) แสดงว่าเอาต์พุตเคลื่อนที่สู่ค่าที่กำหนดให้ $\Delta u(k)$ จะเป็นตัวที่เร่งให้ระบบเข้าสู่ค่าที่กำหนดเร็วขึ้นหรือหน่วงให้ระบบเข้าสู่ค่าที่กำหนดช้าลงนั่นเอง เช่น ถ้า เอาต์พุตของระบบมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดให้มาก ($e(k)$ is PB) และ มันกำลังเคลื่อนที่เข้าหาค่าที่กำหนดไว้อย่างรวดเร็ว ($ce(k)$ is NM) ดังนั้น ขนาดของการเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าที่กำหนดควรจะถูกระงับให้เร็วขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ($\Delta u(k)$ is PS) เป็นต้น

กลุ่มที่ 4 (Group 4) คือ กลุ่มของกฎที่มีค่า $e(k)$ ใกล้เดียวกับค่าที่กำหนด (PS, ZE, NS) หรือ มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้มาก (NM, NB) ขณะเดียวกัน ค่า $ce(k)$ เป็นลบ (Negative) แสดงว่า เอาต์พุตเคลื่อนที่ออกจาก ค่าที่กำหนดให้ ดังนั้น $\Delta u(k)$ ควรเป็น ลบ (Negative) เพื่อเปลี่ยนให้เอาต์พุตเคลื่อนที่เข้าหาค่าที่กำหนดให้ นั่นเอง



รูปที่ 3.15 กลุ่มของกฎทั้ง 5 ที่ได้จากการออกแบบกฎของตัวควบคุมแบบฮิวริสติก

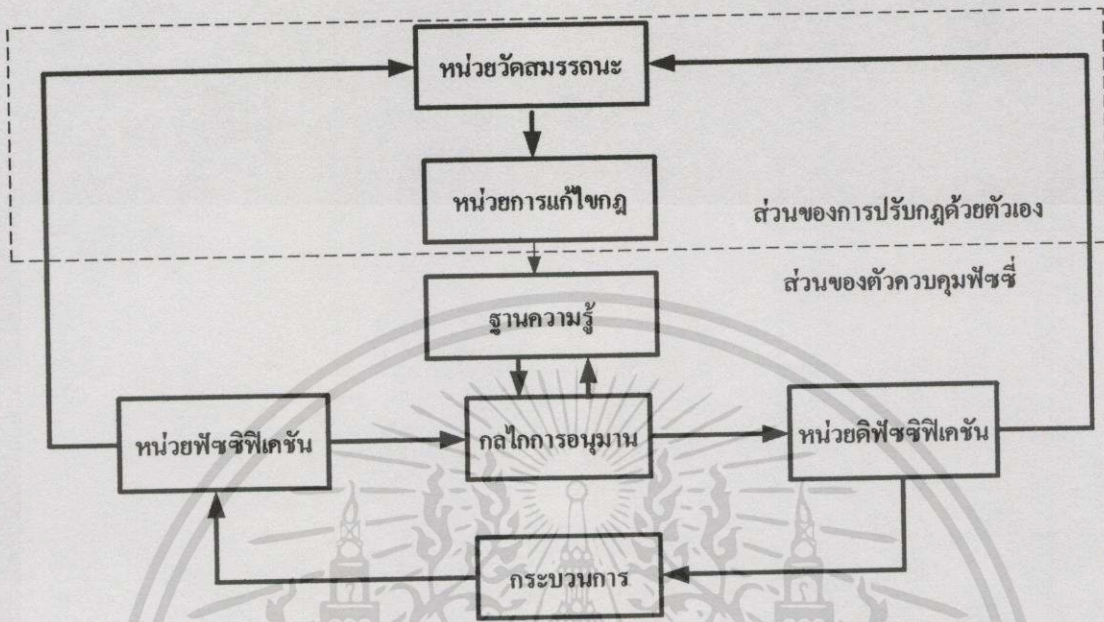
จากที่กล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่าสิ่งที่สำคัญสำหรับตัวควบคุมฟัซซี่คือ ฐานความรู้ ซึ่งจากการนำตัวควบคุมฟัซซี่มาประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นคือ กรณีที่ฐานความรู้ไม่เหมาะสม อาจทำให้ระบบไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ หรือ กรณีที่พารามิเตอร์ของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลง ฐานความรู้เดิมที่มีอยู่อาจจะแก้ปัญหาไม่ได้ ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาตัวควบคุมฟัซซี่เพื่อให้สามารถมีการเรียนรู้และปรับปรุงฐานความรู้เพื่อให้ระบบมีผลการตอบสนองที่ดี ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.16 ตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตัวเอง (Self-organizing fuzzy logic controller)

จากที่กล่าวมาแล้วถึงโครงสร้างและแนวทางการออกแบบส่วนต่างๆของตัวควบคุมฟัซซี่ จะเห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะนำมาจากฐานความรู้ ดังนั้นปัญหาของตัวควบคุมฟัซซี่ คือ จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกหรือกฎในฐานความรู้อาจจะน้อยเกินไปหรือหาจุดที่เหมาะสมไม่ได้ จึงต้องทำการปรับแต่งจนสามารถใช้งานได้ อีกประการหนึ่งเมื่อพารามิเตอร์ของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆจะต้องทำการปรับแก้ไขใหม่ ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซี่จึงได้มีการพัฒนาเพื่อให้สามารถเรียนรู้และปรับค่าด้วยตัวเองซึ่งจะแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด

- Self Tuning ใช้การปรับสเกลแฟคเตอร์ [21]
- Self Organizing ใช้การปรับแต่งกฎในฐานความรู้ [10]
- Adaptive ใช้ทั้งการปรับสเกลแฟคเตอร์และการปรับแต่งกฎในฐานความรู้

โครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzyแบบปรับกฎด้วยตัวเอง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของตัวควบคุมแบบฟuzzy และ ส่วนของการปรับกฎ



รูปที่ 3.16 โครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzyแบบปรับกฎด้วยตัวเอง

จากโครงสร้างดังรูปที่ 3.16 จะเพิ่มส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ

- หน่วยวัดสมรรถนะ ในส่วนประกอบส่วนนี้ จะวัดค่าเอาต์พุตว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมหรือไม่ และนำผลความแตกต่างระหว่างสมรรถนะที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับสมรรถนะที่กำหนดไว้ นำค่าความแตกต่างไปปรับกฎเพื่อให้ได้สมรรถนะตามที่ต้องการ
- หน่วยการแก้ไขกฎ ในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่แก้ไขกฎเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของผลการตอบสนอง ซึ่งวิธีการปรับกฎนั้นมีหลายวิธี เช่น การสร้างตารางสมรรถนะ [7] การใช้นิวรอลเน็ตเวิร์ก [22] การใช้เจเนติก [23] สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการปรับกฎโดยใช้เกรเดียนต์เดสเซนส์ และการวิเคราะห์ทางเดินสถานะ ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ กระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง

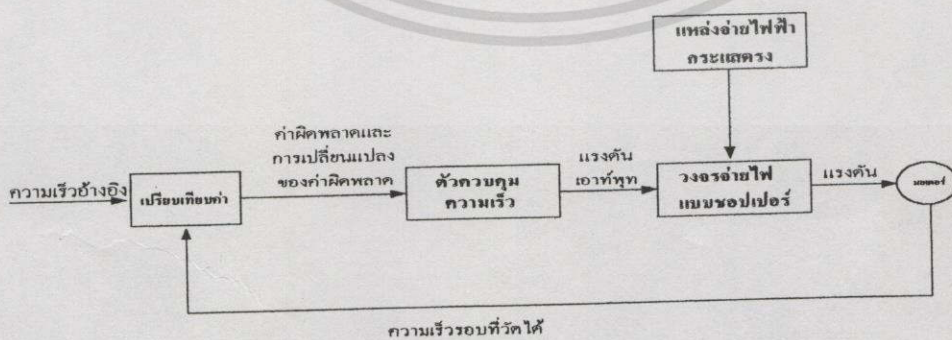
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยกล่าวเป็นหัวข้อใหญ่ได้ดังนี้

- โครงสร้างของตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุมพีชชี
- โครงสร้างตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีการเกรเดียนท์เดสเซนธ์
- โครงสร้างตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะ

4.1 โครงสร้างของตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุมพีชชี จะแบ่งเป็น 2 ส่วน

4.1.1. ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นแบบ D.C.-D.C. chopper 2 ควอดแรนต์ที่เป็นการขับเคลื่อนชนิดควบคุมแรงดันอาร์มเจอร์เพื่อควบคุมความเร็วรอบในย่านความเร็วต่ำกว่าพิคัด

4.1.2. ตัวควบคุมพีชชี โครงสร้างของตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก โดยใช้ตัวควบคุมพีชชีจะประกอบด้วย ตัวควบคุมความเร็ว ดังรูปที่ 4.1 และนำไปควบคุมวงจรขับเคลื่อนแบบชอปเปอร์ควบคุมแรงดันของอาร์มเจอร์



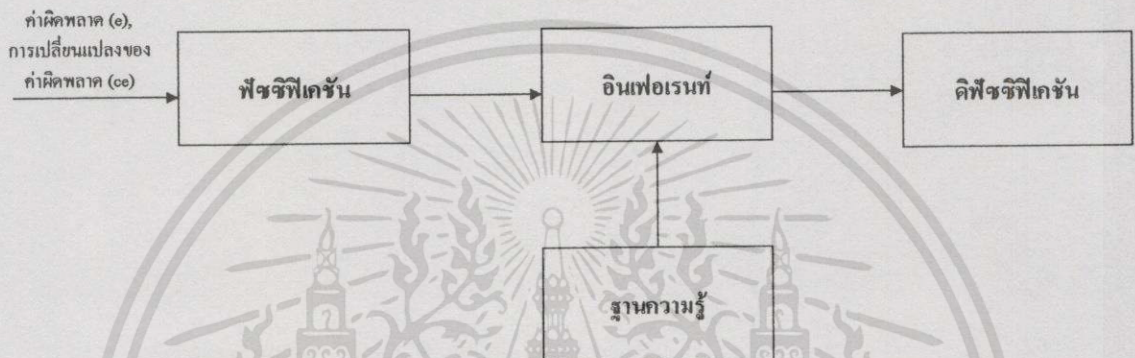
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง

4.2 การออกแบบตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบพีซีซี

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวควบคุมพีซีซีแบบ PI ตามหัวข้อ 3.11.3 การแสดงความสัมพันธ์ของกฎในตัวควบคุมพีซีซีจะอยู่ในรูป

if e(k) is (antecedent) and ce(k) is (antecedent) then $\Delta u(k)$ is (consequent)

โครงสร้างของตัวควบคุมพีซีซีแบบ PI จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างตัวควบคุมพีซีซี PI แบบปกติ

จากรูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างตัวควบคุมพีซีซี PI แบบปกติซึ่งการปรับกฎเราจะปรับในส่วนของฐานความรู้ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป การออกแบบส่วนประกอบต่างสามารถทำได้ดังนี้

4.2.1 ภาคฟuzzy inference ซึ่งแบ่งเป็นการนอมอลไลซ์เซชันและการฟuzzy inference

4.2.1.1 นอมอลไลซ์เซชัน ซึ่งเป็นการแปลงค่าอินพุต คือ ค่าผิดพลาด (e) และอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด (ce) ของความเร็ว ดังแสดงในสมการที่ (4.1) และ (4.2) ให้อยู่ในช่วงของเอกภพสัมพัทธ์ของฟuzzy โดยทั่วไปแล้วการนอมอลไลซ์เซชัน จะแปลงค่าเอกภพสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง [0, 1] แต่ในที่นี้เรากำหนดย่านของเอกภพสัมพัทธ์ของค่าผิดพลาดให้อยู่ในช่วง [-8, 8] และ การเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดให้อยู่ในช่วง [-4, 4] ซึ่งการแปลงนี้จะทำโดยการนำค่า สเกลแฟกเตอร์เป็นตัวคูณค่าผิดพลาดจริงให้อยู่ในย่านของเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด การคำนวณหาค่านอมอลไลซ์แฟกเตอร์ หาได้จากสมการ(4.3)

$$e(nT) = y_{sp} - y(nT) \quad (4.1)$$

$$ce(nT) = e(nT) - e(nT - T) \quad (4.2)$$

กำหนดให้

y_{sp}	=	ความเร็วอ้างอิง
$y(nT)$	=	ค่าความเร็วที่วัด ได้จริงจากเทคโคมิเตอร์
$e(nT)$	=	ค่าผิดพลาดของระบบที่คาบเวลา nT
$e(nT - T)$	=	ค่าผิดพลาดของระบบที่คาบเวลา $nT - T$
$ce(nT)$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดของระบบที่ คาบเวลา nT

$$N.F. = \frac{X_{max} - X_{min}}{N} \quad (4.3)$$

กำหนดให้

X_{max}	=	ค่าความเร็วสูงสุดที่ A/D CARD ที่อ่าน ได้
X_{min}	=	ค่าความเร็วต่ำสุดที่ A/D CARD ที่อ่าน ได้
N	=	ค่าสูงสุดของเอกภพสัมพัทธ์ของพีชชี
$N.F.$	=	ค่านอมอลโลซ์แฟคเตอร์

4.2.1.2 พีชชีพีเคชั่น ทำหน้าที่ แปลงค่าผิดพลาด และ การเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด ระหว่างค่าอ้างอิงและค่าที่วัด ได้จริง และได้ทำการนอมอลโลซ์เซชันให้อยู่ในช่วงของเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนดไว้แล้ว ให้อยู่ในรูปของพีชชีเซตโดยค่าระดับความเป็นสมาชิกของ e และ ce แทนด้วย μ_e และ μ_{ce} ตามลำดับ วิธีการพีชชีพีเคชั่นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มี 2 วิธี คือ การแปลงแบบพีชชีซึ่งเกิดขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (4.4) และการแปลงแบบฟังก์ชัน โดยใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ดังแสดงในสมการที่ (4.5) และลักษณะของฟังก์ชันสามเหลี่ยมแสดงในรูปที่ 4.3

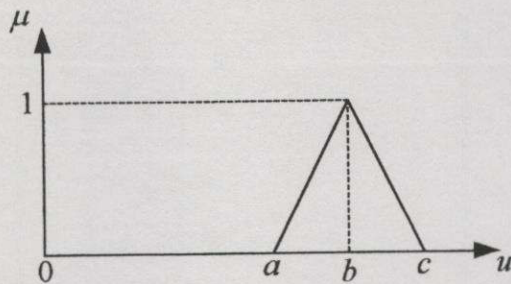
$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 & ; u = u_0 \\ 0 & ; u \neq u_0 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$T(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & u < a \\ (u - a) / (b - a) & a \leq u \leq b \\ (c - u) / (c - b) & b < u \leq c \\ 0 & u > c \end{cases} \quad (4.5)$$

กำหนดให้

$T(u; a, b, c)$	=	ฟังก์ชันสามเหลี่ยม
a, b, c	=	ค่าพารามิเตอร์ของสามเหลี่ยมฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ฟังก์ชันสามเหลี่ยมซึ่งเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต

4.2.2 ภาคฐานความรู้ แบ่งเป็น ฐานความรู้และฐานข้อมูล

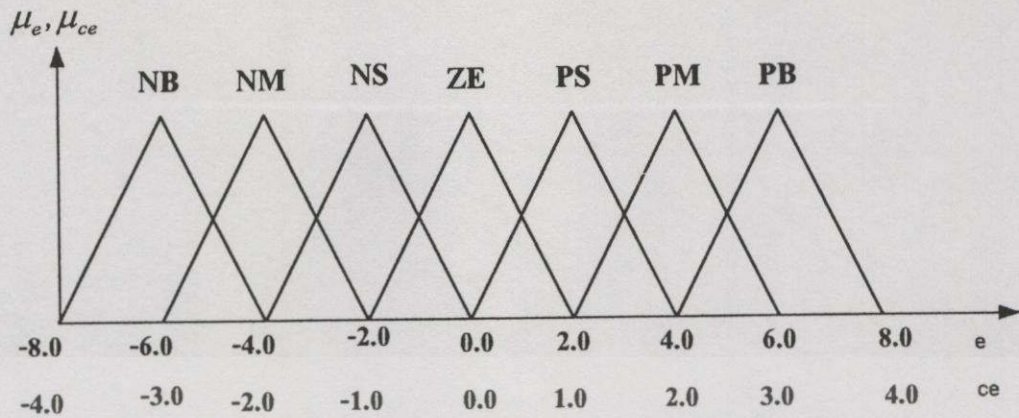
4.2.2.1 ฐานข้อมูล เป็นส่วนที่เก็บฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและค่าพารามิเตอร์ต่างๆซึ่งเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) ของอินพุตและเอาต์พุต และค่าคงที่ต่างๆ

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต

เป็นฟังก์ชันที่ทำหน้าที่แปลงค่าของตัวแปรอินพุต e และ ce ซึ่งเป็นคลิ๊ปเซตให้อยู่ในรูปของฟัซซี่เซต โดยมีข้อกำหนดดังนี้

1. กำหนดย่านของเอกภพสัมพัทธ์ของ E เท่ากับ $[-8,8]$ และ CE เท่ากับ $[-4,4]$
2. มีการกระจายแบบเชิงเส้นและมีการซ้อนทับกันแต่ละฟังก์ชัน 50%
3. ระดับจำนวนเทอมของฟัซซี่เซต 7 เทอม และกำหนดค่าถึงกัอิสติก 7 ระดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.4)

- NB = Negative big
 NM = Negative medium
 NS = Negative small
 ZE = Zero
 PS = Positive small
 PM = Positive medium
 PB = Positive big



รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าผิดพลาด (e) และการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด (ce)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

เอาต์พุตของระบบควบคุมคือแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรจ่ายไฟแบบชอปเปอร์โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นแบบฟัซซีซึ่งเกิดขึ้น โดยมีเอกภพสัมพัทธ์อยู่ในช่วง $[-8,8]$

4.2.2.2 **ฐานกฎ** ฐานกฎประกอบเซตของกฎในรูปของ IF-THEN ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของตัวควบคุมแบบฟัซซี เพราะว่า ถ้าฐานกฎได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสม ระบบก็จะทำงานได้อย่างดี แต่ถ้าฐานกฎได้รับการออกแบบที่ไม่เหมาะสม การทำงานของระบบอาจไม่ดีหรืออาจเกิดผลเสียต่อระบบได้ ฐานกฎนั้นอาจจะได้มาจากความรู้หรือประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญหรือได้จากการทดลองซึ่งระบบจะใช้กฎต่างๆ ในการอนุมานหรือเรียกว่าอินเฟอร์เรนซ์ เพื่อหาข้อสรุปต่อไป

4.2.3 ส่วนของการอินเฟอร์เรนซ์

การอินเฟอร์เรนซ์ คือการหาข้อสรุปจากหลักฐานหรือเหตุผลของที่มีอยู่ แล้วนำมาสรุปตามเงื่อนไขความสัมพันธ์ (implication) ในที่นี้ จะเลือกใช้การอนุมานแบบ GMP โดยมีรูปแบบกฎดังนี้

$$R_1: \text{ IF } e \text{ is } A_1 \text{ AND } ce \text{ is } B_1 \text{ THEN } U \text{ is } C_1$$

$$R_2: \text{ IF } e \text{ is } A_2 \text{ AND } ce \text{ is } B_2 \text{ THEN } U \text{ is } C_2$$

$$R_3: \text{ IF } e \text{ is } A_3 \text{ AND } ce \text{ is } B_3 \text{ THEN } U \text{ is } C_3$$

...

$$R_n: \text{ IF } e \text{ is } A_n \text{ AND } ce \text{ is } B_n \text{ THEN } U \text{ is } C_n$$

กำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_1, R_2, \dots, R_n เป็นอันดับของกฎ จำนวนของกฎจะ ได้จากการจับคู่ (Combination) เทอมของ e และ ce จะ ได้จำนวนกฎทั้งหมด 49 กฎ

A_1, A_2, \dots, A_n เป็นค่าลึงก์จิตติกของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ e

B_1, B_2, \dots, B_n เป็นค่าลึงก์จิตติกของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ ce

C_1, C_2, \dots, C_n เป็นค่าลึงก์จิตติกของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ U

4.2.4 แนวทางการออกแบบกฎ

การสร้างกฎจะใช้วิธีวิธีวิธิตติค ซึ่งจะ เป็นการออกแบบกฎจากพฤติกรรมการตอบสนองของระบบที่ได้จากประสบการณ์หรือจากการทดสอบโดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของอินพุตและผลการตอบสนอง

ในระบบควบคุมพีซีแบบ PI จะมีอินพุต 2 ค่า และเอาต์พุต 1 ค่า คือ ค่าผิดพลาด(e) และ การเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด(ce) ส่วนเอาต์พุต คือ การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม จากความสัมพันธ์ระหว่างผลการตอบสนองและอินพุตของระบบและแนวทางในการออกแบบกฎเชิงประมาณดังกล่าวได้ในหัวข้อที่ 3.15 สามารถสร้างฐานความรู้ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 กฎความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมความเร็ว

ค่าลึงก์จิตติกบนค่าผิดพลาด	ค่าลึงก์จิตติกบนการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

ค่าลึงก์จิตติกบนสัญญาณควบคุม

จากเงื่อนไขความสัมพันธ์ของกฎสามารถหาระดับความเป็นสมาชิกของกฎ (fire strength: α) ของทั้งสองอินพุต คือ e และ ce โดยใช้ตัวปฏิบัติการ product จากตัวอย่างของกฎ

$$R_1: \text{ IF } e \text{ is NM AND } ce \text{ is ZE THEN } U \text{ is NM}$$

$$R_2: \text{ IF } e \text{ is NS AND } ce \text{ is ZE THEN } U \text{ is NS}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

$$\begin{aligned}\mu_{e_1}, \mu_{e_2} &= \text{ระดับความเป็นสมาชิก } e_1, e_2 \text{ ตามลำดับ} \\ \mu_{ce_1}, \mu_{ce_2} &= \text{ระดับความเป็นสมาชิก } ce_1, ce_2 \text{ ตามลำดับ} \\ \alpha_1, \alpha_2 &= \text{ระดับความเป็นสมาชิกของกฎ } R_1 \text{ และ } R_2\end{aligned}$$

จะได้

$$\alpha_1 = \mu_{NM}(e_1) \times \mu_{ZE}(ce_1) \quad (4.6)$$

$$\alpha_2 = \mu_{NS}(e_2) \times \mu_{ZE}(ce_2) \quad (4.7)$$

จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นถึงการอินเฟอเรนซ์เพื่อหาระดับความเป็นสมาชิกของแต่ละกฎซึ่งคือผลลัพธ์ของการคูณกันระหว่างระดับความเป็นสมาชิกของส่วนเงื่อนไขและระดับความเป็นสมาชิกของส่วนข้อสรุป

4.2.5 คีพีซซีพีเคชั่น

ขั้นตอนการคีพีซซีพีเคชั่น ทำหน้าที่ แปลงค่าจากพีซซีเซตให้อยู่ในรูปของ คลิปซ์เซตเพื่อใช้เป็นตัวแปรเอาต์พุตต่อไป ซึ่งจะใช้วิธี center average ดังแสดงในสมการที่ (4.8)

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{c}_i [\mu_i(e) \times \mu_i(ce)]}{\sum_{i=1}^M [\mu_i(e) \times \mu_i(ce)]} \quad (4.8)$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned}\mu_i(e) &= \text{ระดับความเป็นสมาชิกของ } e \text{ สำหรับกฎที่ } l \\ \mu_i(ce) &= \text{ระดับความเป็นสมาชิกของ } ce \text{ สำหรับกฎที่ } l \\ \bar{c}_i &= \text{ค่าจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต} \\ M &= \text{จำนวนกฎ}\end{aligned}$$

4.2.6 ส่วนของการดีนอร์มอลไลซ์เซชัน

เป็นการแปลงค่าสเกลเอาต์พุต คือ ค่าแรงดัน U ให้อยู่ในย่านเดียวกันกับค่ากระแสที่วัดได้ที่จะนำไปคำนวณค่าความเร็วรอบเพื่อใช้ในการหาค่าความเร็วผิดพลาด ซึ่ง ค่าดีนอร์มอลไลซ์แฟคเตอร์หาได้จากสมการที่ (4.9)

$$DF = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_I} \quad (4.9)$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} DF &= \text{ดีนอมอลไลซ์แฟคเตอร์} \\ U_{min}, U_{max} &= \text{ค่าแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดได้จากการทดสอบ} \\ U_I &= \text{ค่าสูงสุดของเอกภพสัมพัทธ์เอาท์พุทของรูปความเร็ว} \end{aligned}$$

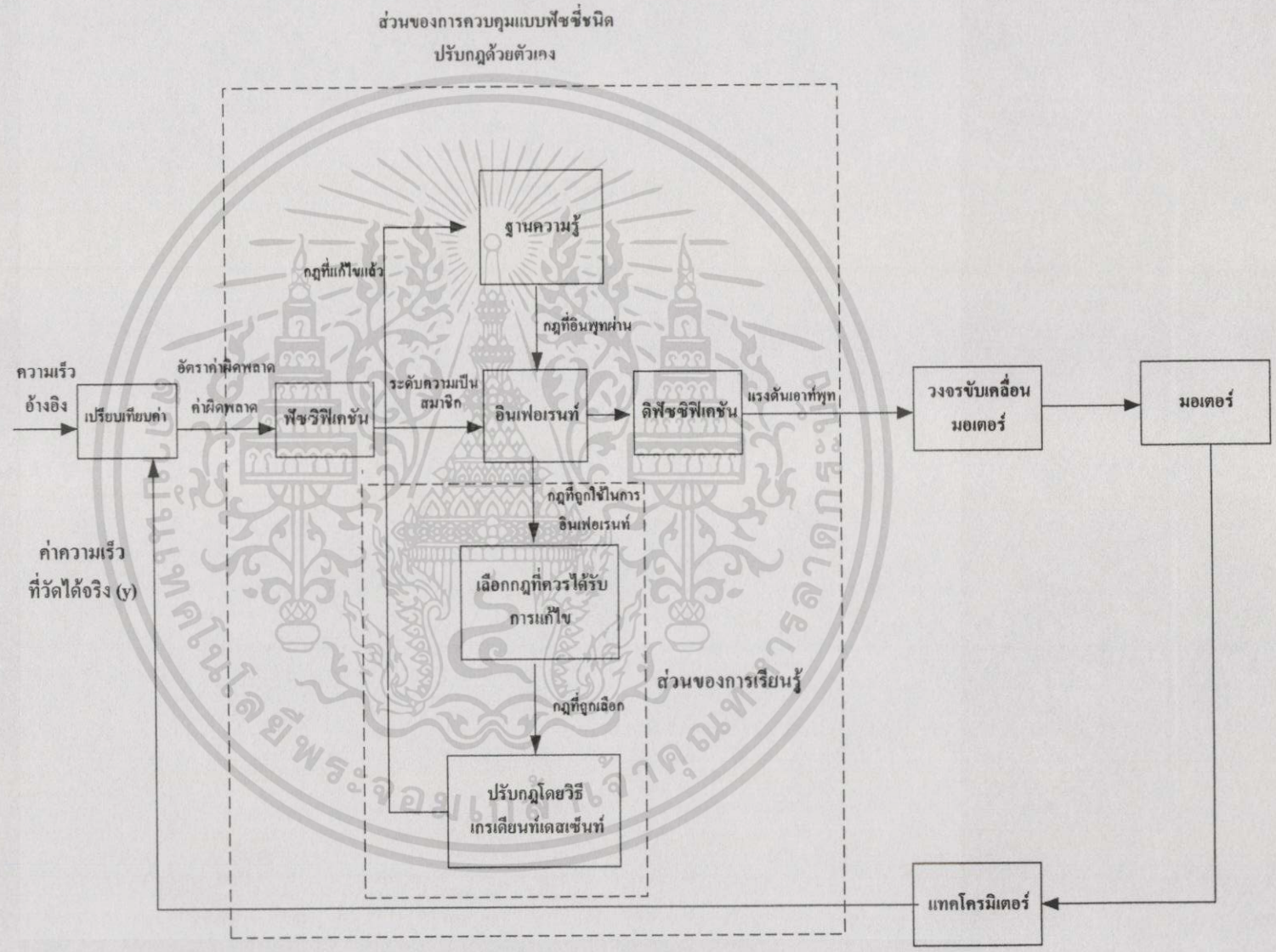
4.3 โครงสร้างของตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีการเกรเดียนต์เดสเซนท์

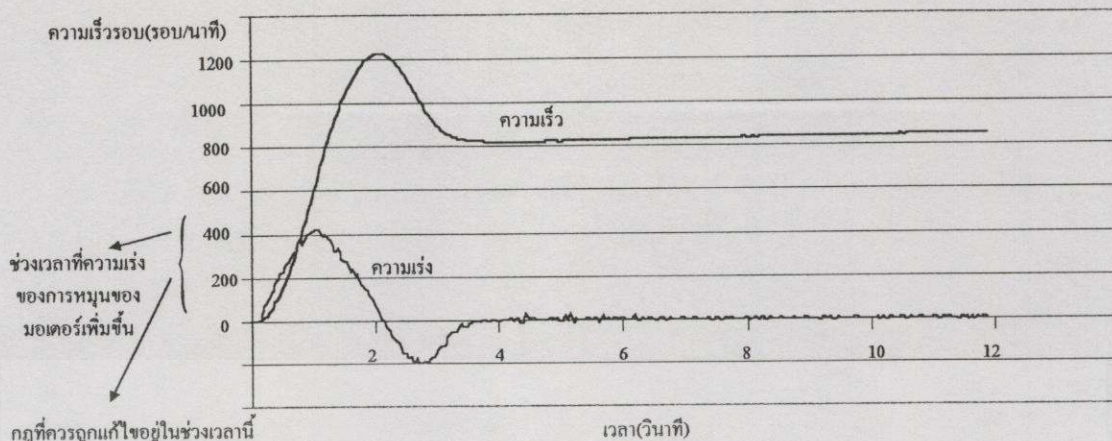
ตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎเป็นการขยายส่วนของตัวควบคุมฟัซซี่แบบปกติโดยเพิ่มส่วนของการวัดค่าสมรรถนะและส่วนของการปรับกฎ (ดังแสดงในรูปที่ 4.5) วิธีแรกที่ขอกกล่าวเป็นวิธีเกรเดียนต์เดสเซนท์ ดังแบ่งเป็นส่วนประกอบดังนี้

4.3.1 ตัวควบคุมฟัซซี่ เป็นตัวควบคุมฟัซซี่แบบปกติที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เลือกใช้สำหรับอินพุทคือ ฟังก์ชันสามเหลี่ยม และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสำหรับเอาท์พุทคือ ฟัซซี่ซิงเกิลตัน การอินเฟอเรนซ์ที่ใช้ Max-product คอมโพสิชัน วิธีการดีฟัซซี่ฟิเคชันใช้ center average defuzzifier โดยฐานความรู้จะประกอบด้วยกฎทั้งหมด 49 กฎ ซึ่งในส่วนนี้จะทำหน้าที่ควบคุมระบบแบบฟัซซี่และทำการเก็บกฎทั้งหมดที่ถูกใช้ในการควบคุมความเร็วส่งให้กับส่วนของการเลือกกฎในการแก้ไข

4.3.2 ตัวเลือกกฎที่ควรถูกแก้ไข ทำหน้าที่เลือกกฎที่ควรได้รับการแก้ไขโดยจากการทดลองพบว่าสัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับมอเตอร์ในช่วงแรกจะทำให้มอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร่งระดับหนึ่งซึ่งถ้าอัตราเร่งของการหมุนสูงจะทำให้ผลการตอบสนองมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูงดังแสดงในรูปที่ 4.6 ดังนั้นการลดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินต้องลดความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งนั่นคือลดสัญญาณควบคุมในช่วงเวลาเริ่มต้นดังนั้นกลุ่มของกฎที่ควรได้รับการแก้ไขคือกฎที่อินพุททั้งสองคือค่าผิดพลาดและอัตราค่าผิดพลาดผ่านในช่วงเวลาในการเริ่มต้นนั่นเองและส่วนมากการดำเนินการของระบบฟัซซี่หนึ่งครั้งจะมีกฎที่ถูกกระตุ้น 4 กฎดังแสดงในรูปที่ 4.7(ก) โดยกฎที่มีผลต่อพฤติกรรมของระบบที่เวลานั้นมากที่สุดคือกฎที่มีระดับความเป็นสมาชิกสูงที่สุดดังนั้นกฎที่มีระดับความเป็นสมาชิกสูงสุดจึงถูกเลือกเป็นกฎที่ควรได้รับการแก้ไข จากรูปที่ 4.7(ข) จะเห็นได้ว่า ค่าอินพุทนั้นผ่านกฎที่ 37, 38, 44 และ 45 มีระดับความเข้มของกฎที่ 0.05, 0.2, 0.3, 0.7 ตามลำดับจากหลักการที่กล่าวแล้วจะพบว่ากฎที่ควรถูกแก้ไขคือ กฎที่ 45 เนื่องจากเป็นกฎที่มีระดับความเข้มสูงสุดเป็นต้น

รูปที่ 4.5 โครงสร้างของตัวควบคุมความเร็วรวมมอเตอร์กระแสสลับแบบพีซีซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยวิธีการเคียนเคสเซ็นท์





กฎที่ควรถูกแก้ไขอยู่ในช่วงเวลานี้ กรณีที่มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูง

รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองของความเร็วรอบและความเร่งของการหมุนของมอเตอร์

จุดศูนย์กลางของฟังก์ชัน

ค่าฟังก์ชันติดบนค่าผิดพลาด(e(nT)) ความเป็นสมาชิกบน e(nT) ค่าฟังก์ชันติดบนการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด(ce(nT))

	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	-6.0	-4.0	-2.0	0.0	2.0	4.0	6.0
NB	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-4.0	-2.0
NM	-4.0	-6.0	-6.0	-6.0	-4.0	-2.0	0.0
NS	-2.0	-6.0	-6.0	-4.0	-2.0	0.0	2.0
ZE	0.0	-6.0	-4.0	-2.0	0.0	2.0	4.0
PS	2.0	-4.0	-2.0	0.0	2.0	4.0	6.0
PM	4.0	-2.0	0.0	2.0	4.0	6.0	6.0
PB	6.0	0.0	2.0	4.0	6.0	6.0	6.0

จุดศูนย์กลางของฟังก์ชัน
ความเป็นสมาชิกบน Δn

กลุ่มของกฎที่ถูกกระตุ้นที่เวลา nT

รูปที่ 4.7 (ก) ฐานความรู้และกฎที่ถูกกระตุ้นที่เวลา nT ในการเรียนรู้รอบที่ k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับความเข้มของกฎอยู่ที่ 0.05

		NS	ZE	
		-2.0	0.0	
PM	4.0	2.0	4.0	ระดับความเข้มของกฎอยู่ที่ 0.2
PB	6.0	4.0	6.0	ระดับความเข้มของกฎอยู่ที่ 0.7

ระดับความเข้มของกฎอยู่ที่ 0.3

รูปที่ 4.7(ข) ระดับความเข้มของกฎที่ถูกกระตุ้นในการเรียนรู้รอบที่ k

4.3.3 ส่วนของการวัดค่าสมรรถนะ ในส่วนนี้จะเป็นการวัดผลต่างของค่าสมรรถนะที่กำหนดไว้กับค่าสมรรถนะที่วัด ได้จริง ดังแสดงในสมการที่ (4.10)

$$\Delta OV = OV_{desired} - OV \tag{4.10}$$

กำหนดให้

- ΔOV = ผลต่างของค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่กำหนดไว้และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่วัด ได้จริง
- $OV_{desired}$ = เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่กำหนดไว้
- OV = เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่วัด ได้จริง

4.3.4 ส่วนของการปรับกฎโดยวิธีเกรเดียนท์เดสเซนท์ ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงกฎในฐานความรู้ โดยจะทำการเลื่อนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต ให้เหมาะสมกับค่าอินพุตที่เข้ามาจุดประสงค์เพื่อทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งแสดงโดยสมการที่ (4.11) มีค่าน้อยที่สุด

$$E = \frac{1}{2} [y(t) - y_{sp}]^2 \tag{4.11}$$

กำหนดให้

- E = ฟังก์ชันเป้าหมาย
- $y(t)$ = ค่าความเร็วที่วัดได้จากเทค โครมิเตอร์
- y_{sp} = ค่าความเร็วอ้างอิง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้อัลกอริทึมของเกรเดียนต์เดสเซนส์ในการพิจารณาพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสัญญาณควบคุมซึ่งเป็นเอาต์พุตของระบบดังแสดงในสมการ (4.12)

$$\bar{c}_l(k+1) = \bar{c}_l(k) - \alpha \left(\frac{\partial E}{\partial \bar{c}_l} \right) \quad (4.12)$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} \bar{c}_l(k) &= \text{ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกฎที่ } l \text{ ณ รอบการเรียนรู้ที่ } k \\ \bar{c}_l(k+1) &= \text{ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกฎที่ } l \text{ ณ รอบการเรียนรู้ที่ } k+1 \\ \alpha &= \text{อัตราการเรียนรู้} \\ \left(\frac{\partial E}{\partial \bar{c}_l} \right) &= \text{ฟังก์ชันอนุพันธ์หลายตัวแปรเมื่อเทียบกับ } \bar{c}_l \end{aligned}$$

โดยที่ $\left(\frac{\partial E}{\partial \bar{c}_l} \right)$ คำนวณได้จากสมการ(4.13)

$$\left(\frac{\partial E}{\partial \bar{c}_l} \right) = \frac{\mu_l(e) \times \mu_l(ce) \times (y(t) - y_{sp})}{\sum_{l=1}^n (\mu_l(e) \times \mu_l(ce))} \quad (4.13)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \mu_l(e) &= \text{ระดับความเป็นสมาชิกของค่าผิดพลาดของกฎที่ } l \\ \mu_l(ce) &= \text{ระดับความเป็นสมาชิกของอัตราการเรียนรู้ของค่าผิดพลาดของกฎที่ } l \\ y_{sp} &= \text{ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ} \\ y(t) &= \text{ค่าความเร็วรอบที่วัดได้จริง} \end{aligned}$$

การคำนวณค่าอัตราการเรียนรู้จะพิจารณาจากเหตุผล 2 ประการ

1. ค่าสมรรถนะที่วัดได้ควรมีผลต่ออัตราการเรียนรู้ในแต่ละรอบ
2. ค่าอัตราการเรียนรู้ควรจะแปรผันในทุกช่วงเวลาเนื่องจากกฎที่อินพุตผ่านในแต่ละช่วงเวลามีผลต่อผลการตอบสนองด้วยระดับที่ต่างกัน

$$\alpha = \text{weight} \times |e(nT) - \bar{c}_l(nT)| \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

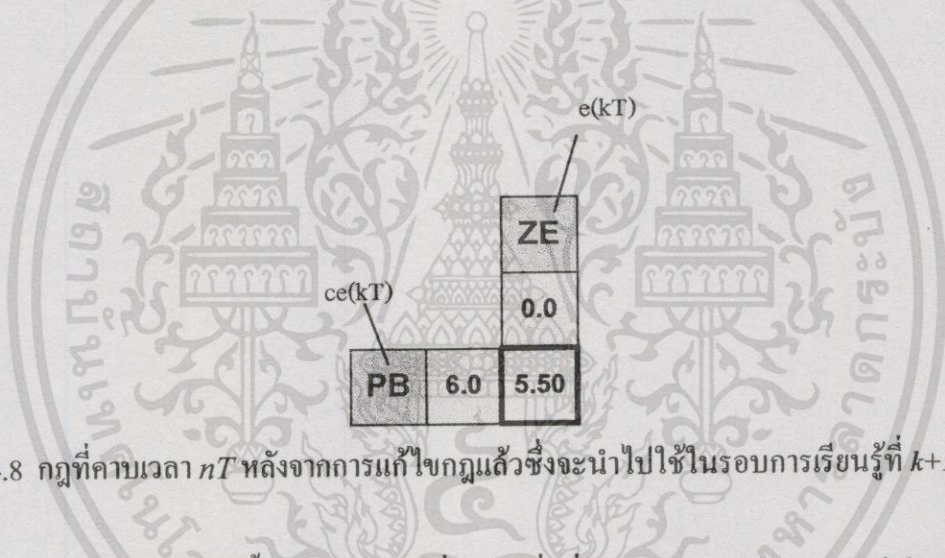
$weight$ = ค่าถ่วงน้ำหนัก

$e(nT)$ = ค่าผิดพลาดที่เวลา nT

\bar{c}_i = พืชซึ่งเกิดต้นของเอาท์พุทของกฎที่ i ที่เวลา nT

ค่าถ่วงน้ำหนักนั้นเป็นค่าที่ได้จากการวัดค่าสมรรถนะ โดยมีเงื่อนไขดังนี้

If $\Delta OV < 0.3$	Then weight = 0.0
If $(\Delta OV \geq 0.3)$ and $(\Delta OV \leq 1.0)$	Then weight = 1.0
If $(\Delta OV > 1.0)$ and $(\Delta OV \leq 3.0)$	Then weight = 3.0
If $(\Delta OV > 3.0)$	Then weight = 5.0



รูปที่ 4.8 กฎที่คาบเวลา nT หลังจากการแก้ไขกฎแล้วซึ่งจะนำไปใช้ในรอบการเรียนรู้ที่ $k+1$

ในการเรียนรู้ของระบบนั้นจะมีการสร้างเงื่อนไขเพื่อที่จะทำการหยุดปรับ 2 กรณี ในกรณีแรก กำหนดค่า ε ซึ่งเป็นค่าผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้ ถ้าฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า ε กรณีที่สองการกำหนดความกว้างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่สามารถเคลื่อนได้มากที่สุด ซึ่งเมื่อระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งสอง จึงจะหยุดปรับกฎในช่วงเวลานั้นหลังจากผ่านกระบวนการปรับกฎแล้วกฎในส่วนของข้อสรุปจะเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 4.8

4.4 โครงสร้างของตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้

ตัวควบคุมฟuzzyซึ่งนิคปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะ

การปรับกฎโดยวิธีนี้จะมีโครงสร้างของตัวควบคุมเหมือนกับวิธีที่ 1 ทุกประการแตกต่างกันในเรื่องของวิธีการอินเฟอเรนซ์ การดีฟัซซิฟิเคชันและเทคนิคการปรับกฎ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำการปรับกฎโดยวิธีการวิเคราะห์ทางคตินสถานะมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ ซึ่งโดยหลักการแล้วผลการตอบสนองของระบบที่ค่าสมรรถนะต่างๆจะมีทางคตินสถานะที่แตกต่างกันดังนั้นจึงได้นำแนวทางคตินสถานะของผลการตอบสนองที่มีค่าสมรรถนะตามที่ต้องการมาเป็นแนวทางเพื่อให้ระบบได้เรียนรู้และปรับกฎในฐานความรู้ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองตามที่ต้องการ

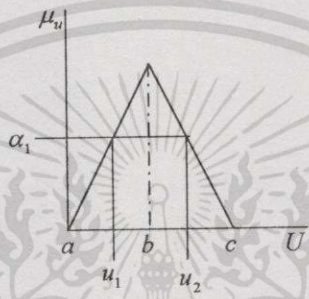
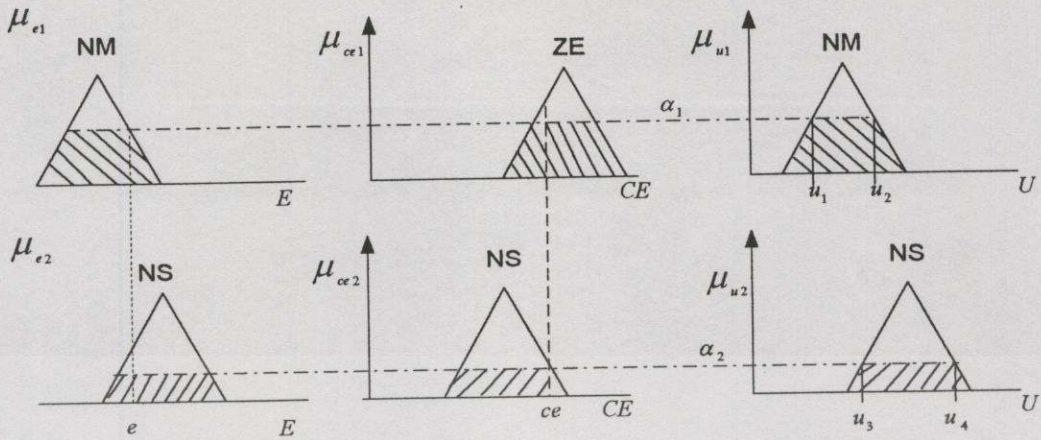
4.4.1 โครงสร้างตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตัวเอง

สำหรับโครงสร้างของระบบควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตัวเองจะแสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ และ ส่วนของการเรียนรู้คือ ส่วนของการเลือกกฎในการแก้ไขและ การแก้ไขกฎซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.4.1.1 ตัวควบคุมฟัซซี่ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เลือกใช้สำหรับอินพุตและเอาต์พุตคือ ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ฐานความรู้มีกฎทั้งหมด 49 กฎ การอินเฟอร์เรนซ์ ของตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุต แสดงในสมการที่ (4.15) และ (4.16) ค่าอินพุต e และ ce ที่เป็นค่าคลิป์เซตจะถูกเปลี่ยนเป็นค่าระดับความเป็นสมาชิกโดยการฟัซซี่ฟิเคชันและนำไปหาค่า α_1 และ α_2 โดยตัวปฏิบัติการ \min เพื่อให้ได้ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และวิธีการคิฟัซซี่ฟิเคชันใช้ center of gravity (COG) defuzzifier โดย α_1 และ α_2 เปลี่ยนกลับไปเป็นค่า U ดังแสดงในสมการที่ (4.17) สมการที่ (4.18) และ รูปที่ 4.10

$$\alpha_1 = \min(\mu(e_1), \mu(ce_1)) \quad (4.15)$$

$$\alpha_2 = \min(\mu(e_2), \mu(ce_2)) \quad (4.16)$$



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนจากค่า α_1 เป็น ค่า u_1 และ u_2

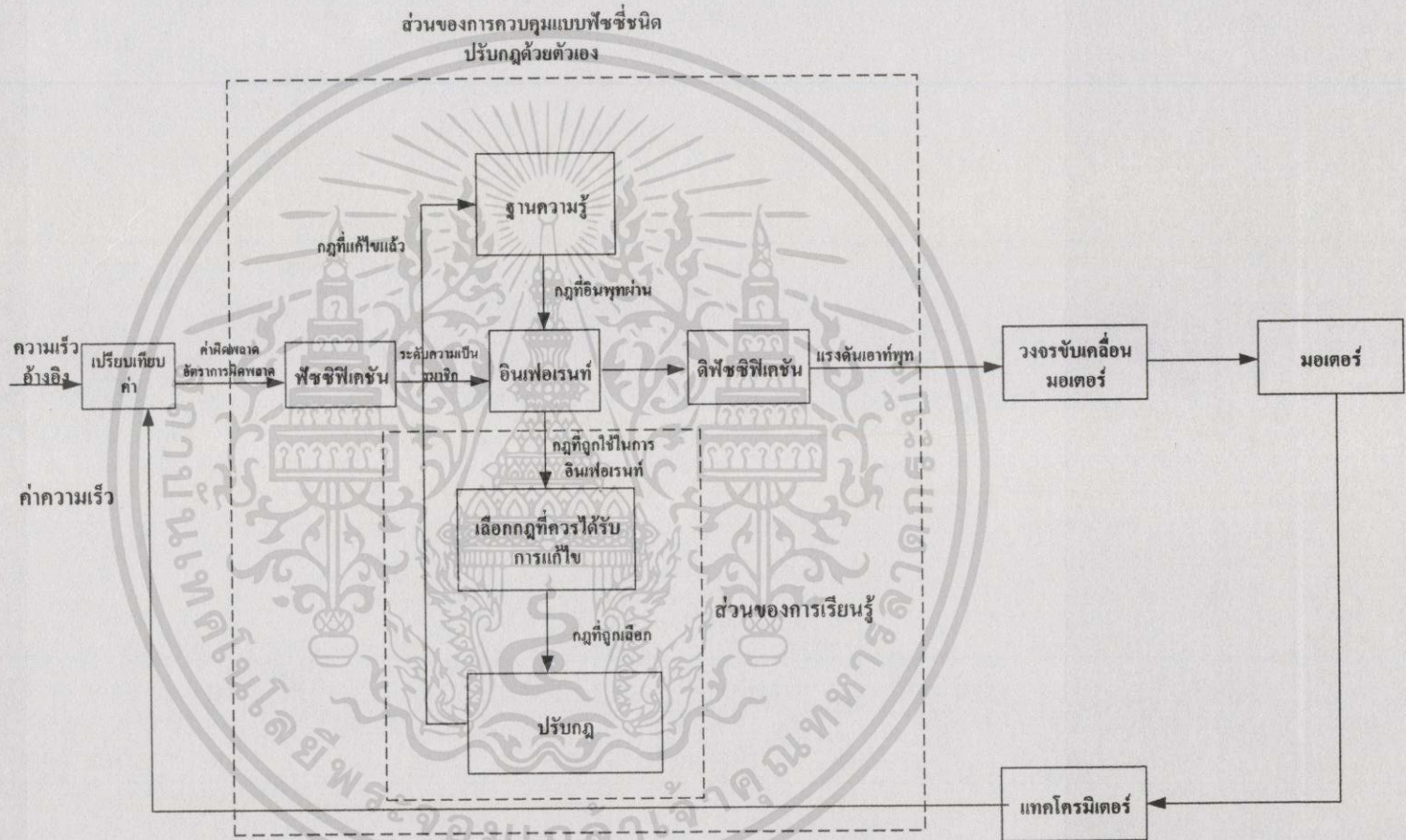
$$u_1 = \alpha_1(b-a) + a \tag{4.17}$$

$$u_2 = c - \alpha_2(c-b) \tag{4.18}$$

กำหนดให้

- U = เอกภพสัมพัทธ์ของเอาท์พุท ซึ่งจะเป็ค่าแรงดันเอาท์พุทที่จะส่งให้วงจรขอปเปอร์ต่อไป
- u_1, u_2 = ค่าเอาท์พุทตัวที่ 1 และ 2 ในฟังก์ชัน NM

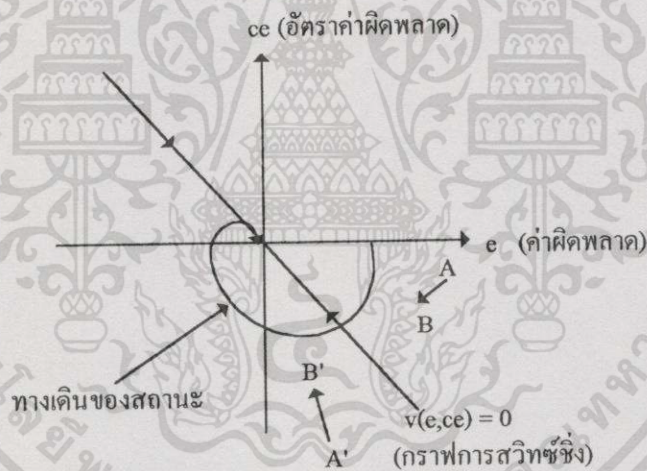
รูปที่ 4.9 โครงสร้างของตัวควบคุมความเร็วรวมมอเตอร์กระแสระบบฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง
 ตัวเองโดยการใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์



การคำนวณหาค่า u_3, u_4 ทำเช่นเดียวกัน จากนั้นนำค่า u_1, u_2, u_3, u_4 มาหาค่า u โดยวิธีการ COG ดังนี้

$$u = \frac{\alpha_1 u_1 + \alpha_1 u_2 + \alpha_2 u_3 + \alpha_2 u_4}{2(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (4.19)$$

4.4.1.2 ตัวเลือกกฎที่ควรถูกแก้ไข ทำหน้าที่เลือกกฎที่ควรได้รับการแก้ไขโดยมีแนวความคิดดังนี้คือ ถ้าสถานะของระบบเริ่มแรกอยู่ในช่วงที่มีทางเดินของสถานะที่ผิดปกติต่างๆจะไม่ถูกแก้ไข แต่เมื่อทางเดินของสถานะมีการเดินออกไปนอกช่วงของทางเดินสถานะที่ผิดปกติในฐานความรู้จะถูกปรับเพื่อให้แนวทางเดินของสถานะกลับเข้าสู่ช่วงที่เหมาะสม จากรูปที่ 4.11 เป็นกราฟทางเดินสถานะโดยสมมติว่า สถานะอยู่ที่จุด $A(e, ce)$ ตำแหน่งต่อไปอยู่ที่ $A(e + \Delta e, ce + \Delta ce)$ การเคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ไปสู่ตำแหน่ง B ทำให้เราสามารถนำค่า $\frac{\Delta ce}{\Delta e}$ มาอธิบายข้อมูลของสถานะเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่เส้นกราฟการสวิทซ์ซึ่ง โดยกำหนดให้ $v = v(e, ce) = 0$ เป็นกราฟสวิทซ์ซึ่ง



รูปที่ 4.11 กราฟทางเดินสถานะ

ที่บริเวณการเคลื่อนที่ จากจุด A ไป จุด B ค่า $(v \times ce) < 0$ และ $\frac{\Delta ce}{\Delta e}$ ควรจะมากกว่าศูนย์ ซึ่งหมายความว่า สถานะกำลังเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณที่มุ่งไปสู่กราฟสวิทซ์ซึ่ง และ ถ้า $\frac{\Delta ce}{\Delta e}$ มีค่ามากกว่าค่าหนึ่งซึ่งมากกว่าศูนย์ นั้นหมายความว่าสถานะเคลื่อนที่เข้าสู่กราฟสวิทซ์ซึ่งด้วยความเร็วที่พอเพียง ดังนั้นฐานความรู้จึงไม่จำเป็นต้องถูกแก้ไข ทำนองเดียวกันบริเวณการเคลื่อนที่จาก จุด A' ไปยังจุด B' ค่า $(v \times ce) > 0$ และ $\frac{\Delta ce}{\Delta e}$ ควรจะน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งถ้า $\frac{\Delta ce}{\Delta e}$ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าหนึ่งและน้อยกว่าศูนย์นั้นหมายความว่าสถานะยังสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่กราฟสวิทซ์ซึ่งได้อย่าง

เหมาะสมซึ่งในกรณีนี้ฐานความรู้ก็ไม่จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขเช่นเดียวกัน แต่ถ้า $\frac{\Delta ce}{\Delta e}$ มีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าสถานะกำลังเคลื่อนที่ออกจากกราฟสวิตซ์ซึ่งนั่นคือกฎที่มีผลต่อผลการตอบสนองในช่วงนี้ควรได้รับการแก้ไข ดังนั้นเราสามารถสร้างกฎที่ใช้ในการเลือกกฎที่ควรได้รับการแก้ไขดังแสดงในสมการที่ (4.20)

$$m = \begin{cases} q_1 - \frac{\Delta ce}{\Delta e} & ; (v \times ce) < 0 \\ -q_2 + \frac{\Delta ce}{\Delta e} & ; (v \times ce) > 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

ถ้า $m \leq 0$ แสดงว่ากฎที่เวลานั้นไม่ต้องการแก้ไข

ถ้า $m > 0$ แสดงว่ากฎที่เวลานั้นต้องการแก้ไข

จากรูปที่ 4.12 กลุ่มของกฎที่อยู่ภายในกรอบที่มีการแรเงาคือกลุ่มของกฎที่ควรถูกแก้ไข

อัตราค่าผิดพลาด							
ค่าผิดพลาด	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NM	NS	NS	NS	ZE	PS	PS
NS	NM	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NS	NS	NS	ZE	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB
PB	NS	NS	ZE	PS	PM	PB	PB

รูปที่ 4.12 กฎที่ควรได้รับการแก้ไข

4.4.1.3 การแก้ไขกฎ ทำหน้าที่แก้ไขกฎในฐานความรู้เพื่อให้ผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวและมีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดไว้ โดยการแก้ไขกฎจะเลือกกฎที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินและจะทำการแก้ไขกฎโดยการเลื่อนกฎไปด้วยระยะทางตามค่าถ่วงน้ำหนักที่คำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (4.21) ส่วนกฎที่มีผลต่อเวลาในการเข้าถึงจะใช้วิธีการชขายกฎ (hedge)

$$w = \text{sat}(w_m \cdot l_m \cdot m \cdot \text{sgn}(v(e, ce))) \times (ov_{\text{desired}} - ov) \quad (4.21)$$

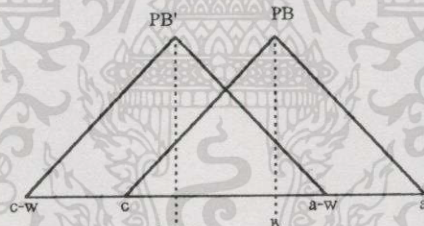
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

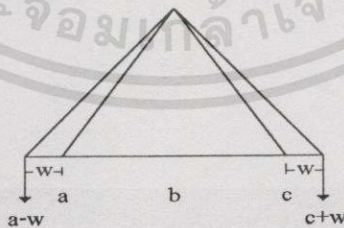
- w = ค่าด่วงนำหนักในการเลื่อนกฎ
 w_m = ค่าด่วงนำหนักที่มากที่สุดที่เป็นไปได้
 l_m = ค่าความละเอียดในการเลื่อนกฎ
 $sgn(v(e, ce))$ = เครื่องหมายของค่าที่คำนวณได้จากฟังก์ชันกราฟสวิตซ์ซึ่งที่เวลาใดๆ
 $ov_{desired}$ = เปอร์เซนต์การพุ่งเกินที่กำหนด
 ov = เปอร์เซนต์การพุ่งเกินที่คำนวณได้
 ฟังก์ชันอิมตัว $sat(a, x)$ กำหนดได้ดังสมการที่ (4.22)

$$sat(a, x) = \begin{cases} a & ; x > a \\ x & ; |x| \geq a \\ -a & ; x < -a \end{cases} \quad (4.22)$$

ค่าด่วงนำหนักที่ได้ไปใช้ในการเลื่อนกฎที่ต้องถูกแก้ไข และขยายกฎดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 การเลื่อนกฎในกระบวนการปรับกฎ



รูปที่ 4.14 การขยายกฎในกระบวนการปรับกฎ

สรุป การออกแบบตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีที่กล่าวในบทที่ 4 นี้ ได้กล่าวถึงแนวทางในการออกแบบตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบส่วนประกอบต่างของตัวควบคุมพีชชีแบบ FKBC. การออกแบบตัวควบคุมพีชชีแบบปรับ

กฎด้วยตัวเองโดยใช้วิธีการเคียนท์เคสเซ็นท์ การออกแบบตัวควบคุมพีซีซีแบบปรับกฎด้วยตัวเอง โดยวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะ ซึ่งในบทต่อไปจะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกด้วยตัวควบคุมพีซีซี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกด้วยตัวควบคุมพีซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองจะทดลองกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นชุดทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าสำเร็จรูปดังมีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองดังนี้

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

5.1.1 D.C. shunt wound motor separately excited

ขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลองจะมีพิกัดตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ขนาดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง

แรงดันพิกัด	220	Volt
กำลังไฟฟ้าพิกัด	1000	Watt
กระแสพิกัด	6.2	Amp.
ความเร็วรอบ	2200	r.p.m.

5.1.2 เครื่องมือวัดความเร็วรอบ

ใช้ A.C. tacho generator ขนาด 10 volt, 1.5 watt, 6000 r.p.m. เป็นเครื่องมือวัดความเร็วรอบของมอเตอร์

5.1.3 เครื่องจำลองโหลดทางกล

Magnetic Powder Brake เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แทนโหลดทางกลเป็นอุปกรณ์ทดลองประกอบอยู่ในชุดทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้า

5.1.4 เครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. power supply)

D.C. power supply ขนาด 2 kW, 220 volt ใช้สำหรับขับเคลื่อนวงจรรีเลย์

D.C. power supply ขนาด 500 w, 220 volt ใช้สำหรับขับเคลื่อนวงจรรีเลย์

5.1.5 เครื่องมือวัดไฟฟ้า

D.C. volts meter 0-300 volt. 2 ตัว

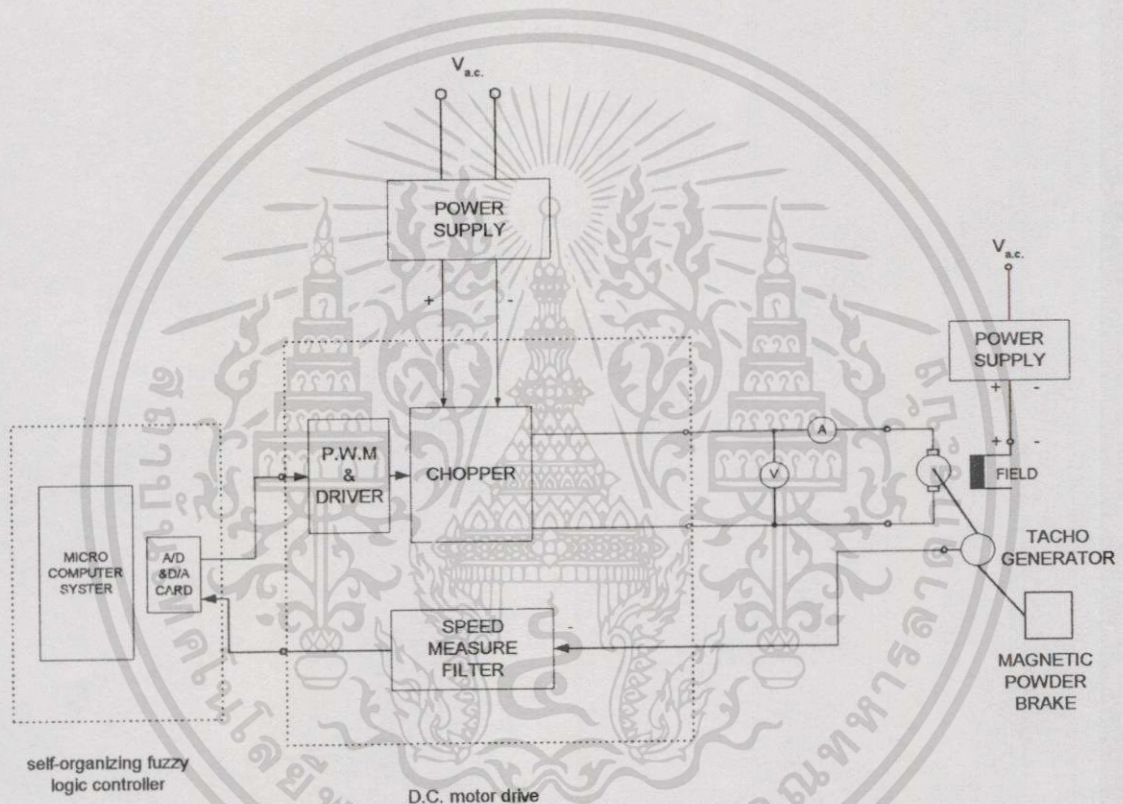
D.C. amp meter 0-10 amp. 2 ตัว

Digital storage oscilloscope 150 MHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 โครงสร้างของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกด้วยตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง

ตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองจะเป็นการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกผ่านไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมการทำงานของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยจะควบคุมระดับแรงดันที่จ่ายให้ขั้ววงจรรีอาร์เมเจอร์ เพื่อให้ระดับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนแปลงไป ตามความต้องการของผู้ใช้ ดังแสดงโครงสร้างของวงจรที่จะทำการทดลองดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกด้วยตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง

จากรูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกด้วยตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ

1. ตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง เป็นโปรแกรมที่สร้างด้วยภาษา C ทำงานบนคอมพิวเตอร์ P.C. PENTIUM 75 MHZ. เชื่อมโยงผ่านด้วย A/D - D/A CARD ขนาด 12 บิต (ตามภาคผนวก ข)

2. D.C motor driver วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ chopper 2 ควอดแรนซ์ เพื่อควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ ซึ่งประกอบด้วย ภาคสัญญาณ P.W.M. วงจรขับ IGBT วงจรกรองสัญญาณรบกวนจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดความเร็วรอบ วงจรกรองสัญญาณรบกวนจากเครื่องวัดความเร็วรอบ วงจรกรองสัญญาณรบกวนจากเครื่องวัดกระแสอาร์มเจอร์

3. D.C. motor, tacho generator ใช้เป็นเครื่องมือวัดความเร็วของมอเตอร์ และ Hall sensor ใช้วัดกระแสอาร์มเจอร์ ผ่านภาคกรองสัญญาณ กลับเข้าสู่คอมพิวเตอร์

5.3 การทดลองที่ 1 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีเกรเดียนท์เดสเซนท์

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อหาค่ากฎที่เหมาะสมในการใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมพีชซีโดยเรียนรู้แบบวนรอบ

ขอบเขตของการทดลอง

1. การทดลองจะทดลองเพื่อหาค่าการปรับสมรรถนะของการเปลี่ยนระดับ (Step Response) ความเร็วรอบ

- ที่ระดับความเร็ว 800 รอบต่อนาที
- ที่ระดับความเร็ว 1000 รอบต่อนาที
- ที่ระดับความเร็ว 1200 รอบต่อนาที

2. การทดลองโดยการกำหนดค่าสมรรถนะที่ระดับต่างๆ

- กำหนดให้ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ต้องการเป็น 4 %
- กำหนดให้ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ต้องการเป็น 5 %
- กำหนดให้ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ต้องการเป็น 7 %

3. การทดลองการตอบสนองต่อโหลดทางกล (Step load)

- ใส่โหลดให้กับระบบที่ระดับ 50 %
- ใส่โหลดให้กับระบบที่ระดับ 75 %
- ใส่โหลดให้กับระบบที่ระดับ 100 %

การทดลองในหัวข้อนี้ จะมีการกำหนดฐานความรู้เริ่มแรก เมื่อระบบทำการเรียนรู้แบบวนรอบ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชซีจะถูกเปลี่ยนแปลง เพื่อให้ระบบมีผลการตอบสนองที่มีค่าสมรรถนะตามที่ต้องการ โดยค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเรียนรู้คือ ค่าอัตราการเรียนรู้ และ ระยะทางที่มากที่สุด ที่ยอมให้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชซีเลื่อนได้

ขั้นตอนการทดลอง

1. กำหนดค่าอัตราการเรียนรู้และระยะทางที่มากที่สุดที่ยอมให้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตเดือนได้เริ่มแรก

2. กำหนดค่าสมรรถนะโดยประมาณ ในที่นี้เรากำหนดค่า %OV ไว้ โดยมีจุดประสงค์ให้มอเตอร์ทำงานจนได้ค่า %OV เท่ากับ ค่า %OV ที่กำหนดไว้หรือมีค่าใกล้เคียงที่จะยอมรับได้

3. ทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยให้มอเตอร์ทำงานระยะสั้นๆและตรวจสอบการปรับค่าอัตราการเรียนรู้ และระยะทางที่มากที่สุดที่ยอมให้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตเดือนได้

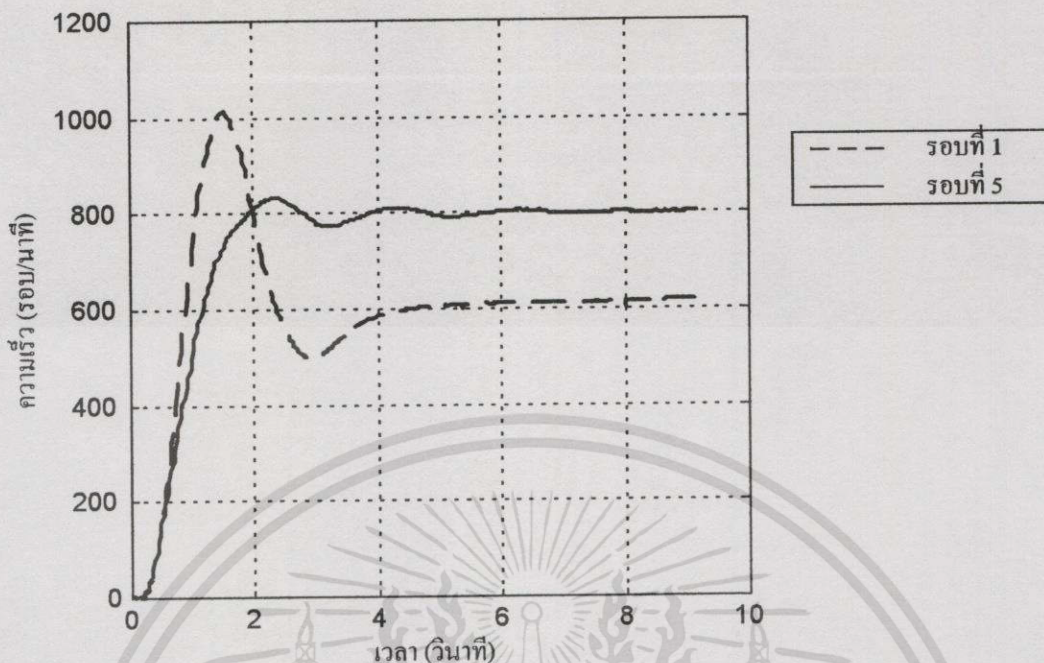
4. ทำการบันทึกผลการทดลอง ซึ่งจะบันทึกในรูปแบบของแฟ้มข้อมูลและนำไปเขียนกราฟโดยใช้โปรแกรม MATLAB

5.3.1 การทดลองตัวควบคุมฟuzzyชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง ความเร็วรอบ 800 r.p.m. ที่ค่าสมรรถนะต่างๆ

การทดลองที่ 1.1 การทดลองตัวควบคุมฟuzzyชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการเป็น 800 r.p.m. ค่าสมรรถนะที่ใช้คือค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินกำหนดเป็น 4.0% โดยแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่คงที่และเปลี่ยนตามเวลาที่ใช้ในการทดลอง

ค่าอ้างอิง	จำนวน	หน่วย
ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ	800	r.p.m.
ความกว้างที่มากที่สุดในการเดือนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาต์พุต	4.5	หน่วย
อัตราการเรียนรู้เริ่มแรก	0.07	
%OV	4.0	%



รูปที่ 5.2 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 800 r.p.m โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ $\%OV = 4.0\%$. ด้วยตัวควบคุมพีซีซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนต์เดสเซนท์

ตารางที่ 5.3 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบการทำงาน

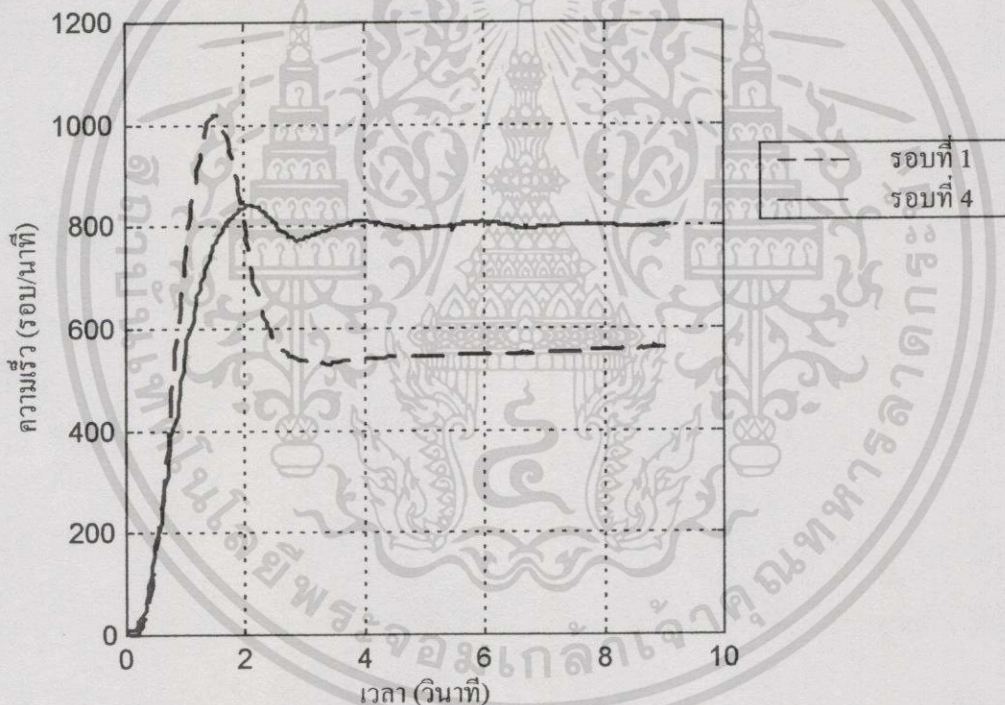
ค่าสมรรถนะ	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5
R.T. (sec)	1.1	1.37	1.65	1.7	1.92
$\%OV$	63.38	10.25	5.62	5.0	4.0

จากรูปที่ 5.1 ผลการตอบสนองชั่วขณะโดยรอบที่ 1 เป็นผลการตอบสนองของระบบที่ไม่มีการเรียนรู้ซึ่งจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 63.38% เวลาในการเข้าถึง 1.1 วินาที มีค่าผิดพลาด ณ สภาวะคงตัวสูง (มากกว่า $\pm 2\%$) เนื่องจากกฎที่ถูกผ่านนั้นเป็นกฎในช่วงกลางซึ่งระดับของสเกลซึ่งได้จากการออกแบบกฎโดยประมาณนั้นหยابเกิน ไปจนทำให้ไม่เกิดการแปรเปลี่ยนของกฎจึงเกิดการผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และรอบที่ 5 เป็นผลการตอบสนองหลังจากตัวควบคุมทำการปรับกฎจนกระทั่งผลการตอบสนองมีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดไว้ ตารางที่ 5.3 แสดงค่าสมรรถนะของระบบในแต่ละรอบการเรียนรู้ ตั้งแต่ระบบไม่มีการเรียนรู้จนกระทั่งระบบสามารถเรียนรู้และปรับกฎจนได้ค่าสมรรถนะตามที่กำหนดไว้

การทดลองที่ 1.2 การทดลองควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการเป็น 800 r.p.m. ค่าสมรรถนะที่ใช้คือค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินกำหนดเป็น 5.0% โดยแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลอง

ค่าอ้างอิง	จำนวน	หน่วย
ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ	800	r.p.m.
ความกว้างที่มากที่สุดในการเลือนฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาท์พุท	4.5	หน่วย
อัตราการเรียนรู้เริ่มแรก	0.07	
%OV	5.0	%



รูปที่ 5.3 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 800 r.p.m. โดยกำหนดค่า สมรรถนะที่ %OV = 5.0 % ด้วยตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนต์เดสเซนส์

ตารางที่ 5.5 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบการทำงาน

ค่าสมรรถนะ	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5
R.T. (sec)	1.04	1.32	1.43	1.65	1.70
%OV	81.60	12.62	9.12	5.0	5.0

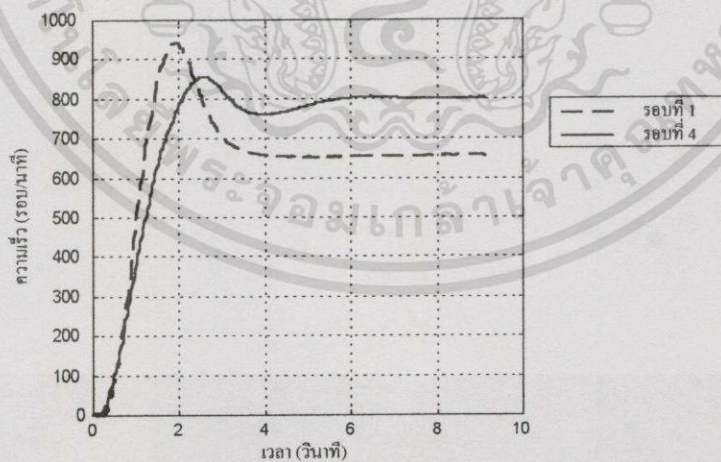
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3 แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะซึ่งรอบที่ 1 เป็นผลการตอบสนองของระบบที่ไม่มีการเรียนรู้ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 81.60% เวลาในการเข้าถึง 1.04 วินาที มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวสูง (มากกว่า $\pm 2\%$) และรอบที่ 4 เป็นผลการตอบสนองหลังจากที่ระบบเรียนรู้จนได้ผลการตอบสนองชั่วขณะที่มีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 5.0% เวลาในการเข้าถึง 1.65 วินาที ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวน้อย (น้อยกว่า $\pm 2\%$) ค่าสมรรถนะต่างๆในแต่ละรอบการเรียนรู้แสดงในตารางที่ 5.5

การทดลองที่ 1.3 การทดลองควบคุมพัชซ์ซึ่งนิคปรับกฎด้วยตัวเอง โดยกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการเป็น 800 r.p.m. ค่าสมรรถนะที่ใช้คือค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินกำหนดเป็น 7.0% โดยแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลอง

ค่าอ้างอิง	จำนวน	หน่วย
ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ	800	r.p.m.
ความกว้างที่มากที่สุดในการเลื่อนฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาต์พุต	1.5	หน่วย
อัตราการเรียนรู้เริ่มแรก	0.04	
%OV	7.0	%



รูปที่ 5.4 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 800 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 7.0 % ด้วยตัวควบคุมพัชซ์ซึ่งนิคปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เดสเซนส์

ตารางที่ 5.7 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบการทำงาน

ค่าสมรรถนะ	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
R.T. (sec)	1.43	1.87	2.03	2.09
%OV	43.0	8.38	7.38	7.0

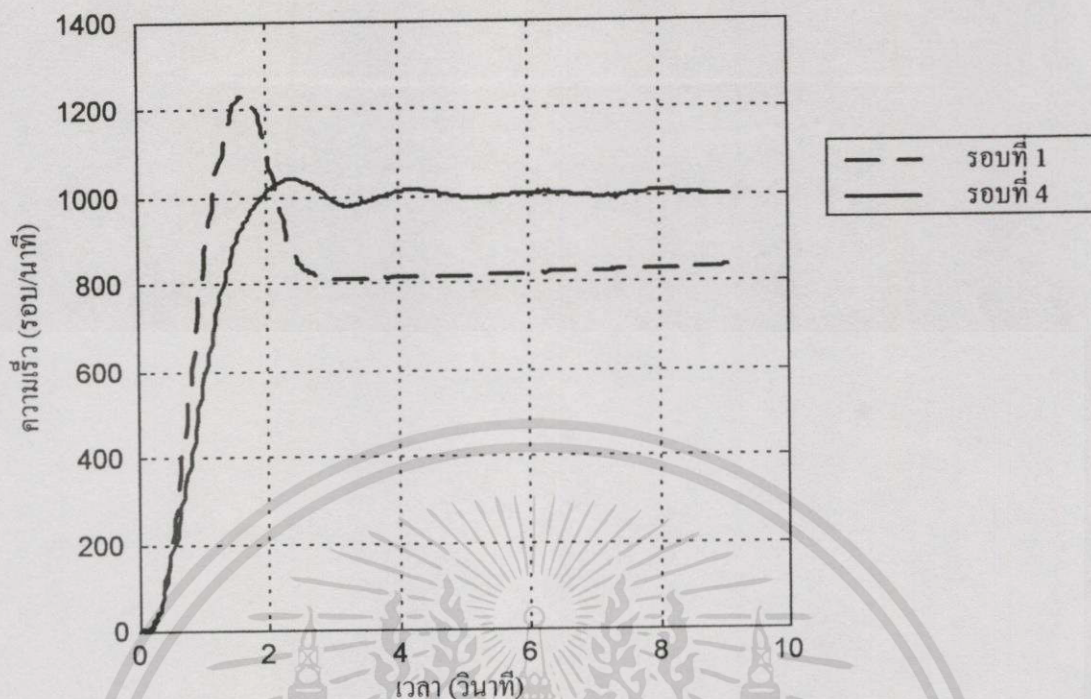
รูปที่ 5.4 แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะซึ่งรอบที่ 1 เป็นผลการตอบสนองของระบบที่ไม่มีการเรียนรู้ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 43 % เวลาในการเข้าถึง 1.43 วินาที มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวสูง (มากกว่า $\pm 2\%$) และรอบที่ 4 เป็นผลการตอบสนองหลังจากที่ระบบเรียนรู้จนได้ผลการตอบสนองชั่วขณะที่มีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 7.0% เวลาในการเข้าถึง 2.09 วินาที ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวน้อย (น้อยกว่า $\pm 2\%$) ค่าสมรรถนะต่างๆในแต่ละรอบการเรียนรู้แสดงในตารางที่ 5.7

5.3.2 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองความเร็วรอบ 1000 r.p.m.

การทดลองที่ 1.4 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการเป็น 1000 r.p.m. ค่าสมรรถนะที่ใช้คือค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินกำหนดเป็น 4.0% โดยแสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลอง

ค่าอ้างอิง	จำนวน	หน่วย
ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ	1000	r.p.m.
ความกว้างที่มากที่สุดในการเลื่อนฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาต์พุต	3.0	หน่วย
อัตราการเรียนรู้เริ่มแรก	0.1	
%OV	4.0	%



รูปที่ 5.5 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1000 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 4.0 % ด้วยตัวควบคุมพีซซึ่งนักปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนต์เดสเซนส์

ตารางที่ 5.9 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบการทำงาน

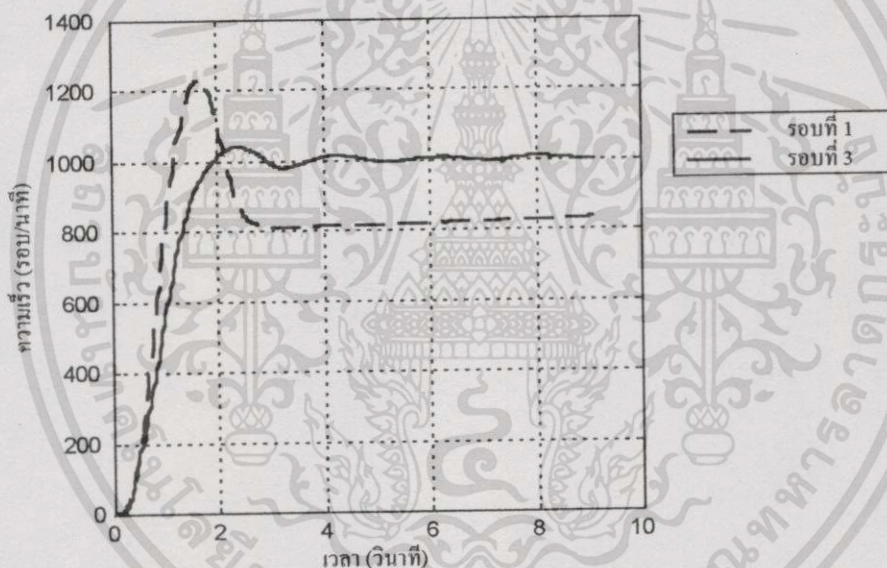
ค่าสมรรถนะ	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
R.T. (sec)	1.15	1.54	4.7	1.92
%OV	47.72	11.30	7.0	4.0

รูปที่ 5.5 แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะซึ่งรอบที่ 1 เป็นผลการตอบสนองของระบบที่ไม่มีการเรียนรู้ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 47.72% เวลาในการเข้าถึง 1.15 วินาที มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวสูง (มากกว่า $\pm 2\%$) และรอบที่ 4 เป็นผลการตอบสนองหลังจากที่ระบบเรียนรู้จนได้ผลการตอบสนองชั่วขณะที่มีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 4.0% เวลาในการเข้าถึง 1.92 วินาที ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวน้อย (น้อยกว่า $\pm 2\%$) ค่าสมรรถนะต่างๆในแต่ละรอบการเรียนรู้แสดงในตารางที่ 5.9

การทดลองที่ 1.5 การทดลองควบคุมพีชซึ่งชนิดปรับกวดด้วยตัวเอง โดยกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการเป็น 1000 r.p.m. ค่าสมรรถนะที่ใช้คือค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินกำหนดเป็น 5.0% โดยแสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลอง

ค่าอ้างอิง	จำนวน	หน่วย
ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ	1000	r.p.m.
ความกว้างที่มากที่สุดในการเลื่อนฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาต์พุต	4.5	หน่วย
อัตราการเรียนรู้เริ่มแรก	0.1	
%OV	5.0	%



รูปที่ 5.6 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1000 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 5.0 % ด้วยตัวควบคุมพีชซึ่งชนิดปรับกวดด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนต์เดสเซนท์

ตารางที่ 5.11 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกวดในแต่ละรอบการทำงาน

ค่าสมรรถนะ	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
R.T. (sec)	1.21	1.70	2.03
%OV	44.11	7.10	5.0

รูปที่ 5.6 แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะซึ่งรอบที่ 1 เป็นผลการตอบสนองของระบบที่ไม่มีการเรียนรู้ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 44.11% เวลาในการเข้าถึง 1.21 วินาที มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคง

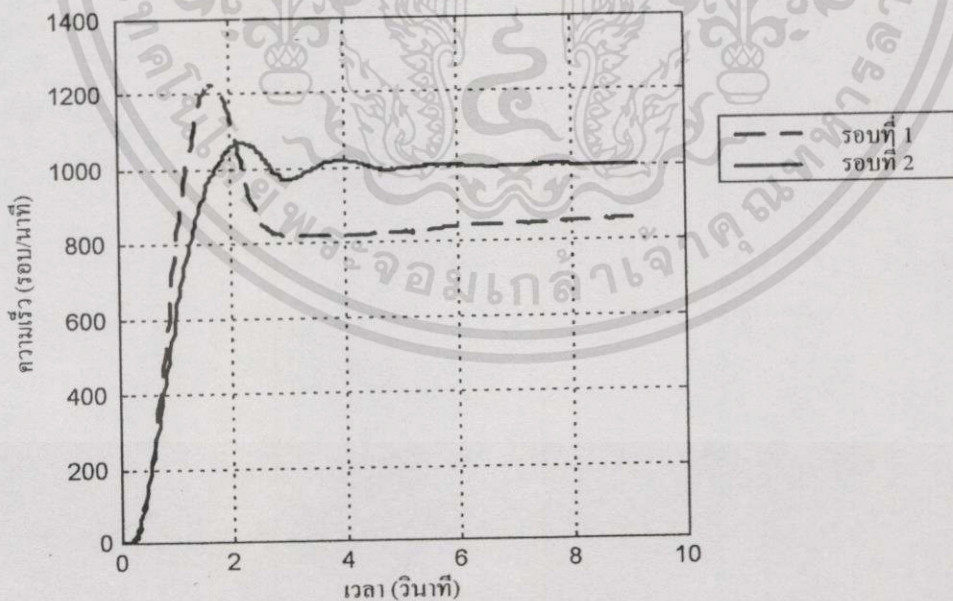
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวสูง (มากกว่า $\pm 2\%$) และรอบที่ 3 เป็นผลการตอบสนองหลังจากที่ระบบเรียนรู้จนได้ผลการตอบสนองช่วงขณะที่มีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 5.0% เวลาในการเข้าถึง 2.03 วินาที ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวน้อย (น้อยกว่า $\pm 2\%$) ค่าสมรรถนะต่างๆในแต่ละรอบการเรียนรู้แสดงในตารางที่ 5.11

การทดลองที่ 1.6 การทดลองตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการเป็น 1000 r.p.m. ค่าสมรรถนะที่ใช้คือค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินกำหนดเป็น 7.0% โดยแสดงในตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลอง

ค่าอ้างอิง	จำนวน	หน่วย
ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ	1000	r.p.m.
ความกว้างที่มากที่สุดในการเลือนฟังก์ชัน	3.0	หน่วย
ความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาต์พุต	0.1	
อัตราการเรียนรู้เริ่มแรก	7.0	%



รูปที่ 5.7 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1000 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ $\%OV = 7.0\%$ ด้วยตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนต์เดสเซนท์

ตารางที่ 5.13 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบการทำงาน

ค่าสมรรถนะ	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5	รอบที่ 6
R.T. (sec)	1.21	1.70	1.76	1.70	1.70	1.70
%OV	43.10	7.0	6.80	7.10	6.90	7.0

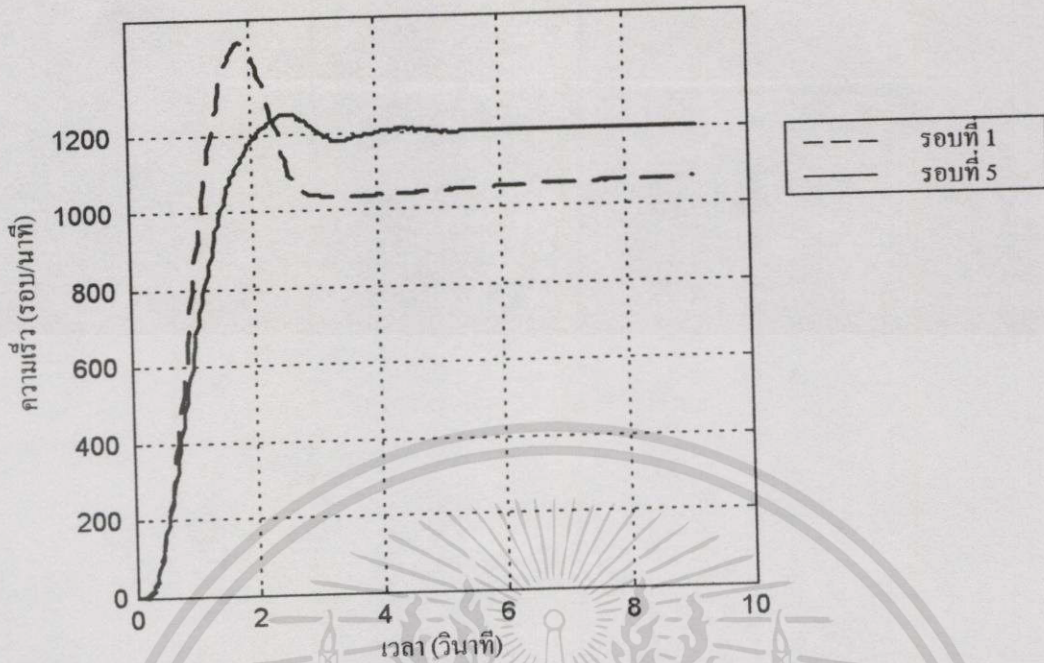
รูปที่ 5.7 แสดงผลการตอบสนองของช่วงขณะซึ่งรอบที่ 1 เป็นผลการตอบสนองของระบบที่ไม่มีการเรียนรู้ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 43.10 % เวลาในการเข้าถึง 1.21 วินาที มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวสูง (มากกว่า $\pm 2\%$) และรอบที่ 2 เป็นผลการตอบสนองหลังจากที่ระบบเรียนรู้จนได้ผลการตอบสนองช่วงขณะที่มีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 7.0% เวลาในการเข้าถึง 1.70 วินาที ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวน้อย (น้อยกว่า $\pm 2\%$) ค่าสมรรถนะต่างๆในแต่ละรอบการเรียนรู้แสดงในตารางที่ 5.13

5.3.3 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองความเร็วรอบ 1200 r.p.m.

การทดลองที่ 1.7 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการเป็น 1200 r.p.m. ค่าสมรรถนะที่ใช้คือค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินกำหนดเป็น 4.0% โดยแสดงในตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลอง

ค่าอ้างอิง	จำนวน	หน่วย
ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ	1200	r.p.m.
ความกว้างที่มากที่สุดในการเลื่อนฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาต์พุต	1.3	หน่วย
อัตราการเรียนรู้เริ่มแรก	0.13	
%OV	4.0	%



รูปที่ 5.8 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1200 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ $\%OV = 4.0\%$ ด้วยตัวควบคุมพีซซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนต์เดสเซนท์

ตารางที่ 5.15 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบการทำงาน

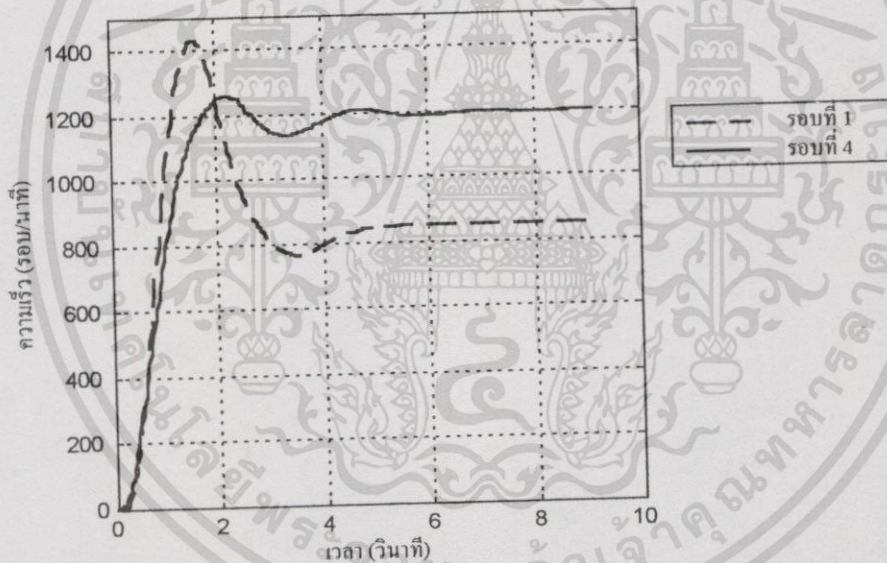
ค่าสมรรถนะ	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5
R.T. (sec)	1.32	1.87	2.14	2.02	2.09
$\%OV$	34.48	6.33	3.58	4.08	4.0

รูปที่ 5.8 แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะซึ่งรอบที่ 1 เป็นผลการตอบสนองของระบบที่ไม่มี การเรียนรู้ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 34.48% เวลาในการเข้าถึง 1.32 วินาที มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคง ตัวสูง (มากกว่า $\pm 2\%$) และรอบที่ 5 เป็นผลการตอบสนองหลังจากที่ระบบเรียนรู้จนได้ผลการตอบ สอนชั่วขณะที่มีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 4.0% เวลาในการเข้าถึง 2.09 วินาที ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวน้อย (น้อยกว่า $\pm 2\%$) ค่าสมรรถนะต่างๆในแต่ละรอบการ เรียนรู้แสดงในตารางที่ 5.15

การทดลองที่ 1.8 การทดลองควบคุมพีชซึ่งชนิดปรับได้ด้วยตัวเอง โดยกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการเป็น 1200 r.p.m. ค่าสมรรถนะที่ใช้คือค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินกำหนดเป็น 5.0% โดยแสดงในตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลอง

ค่าอ้างอิง	จำนวน	หน่วย
ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ	1200	r.p.m.
ความกว้างที่มากที่สุดในการเลื่อนฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาต์พุต	2.5	
อัตราการเรียนรู้เริ่มแรก	0.13	
%OV	5.0	%



รูปที่ 5.9 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1200 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 5.0 % ด้วยตัวควบคุมพีชซึ่งชนิดปรับได้ด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เดสเซนท์

ตารางที่ 5.17 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบการทำงาน

ค่าสมรรถนะ	รอบที่1	รอบที่2	รอบที่3	รอบที่4
R.T. (sec)	1.15	1.43	1.59	1.76
%OV	67.60	8.33	6.17	4.92

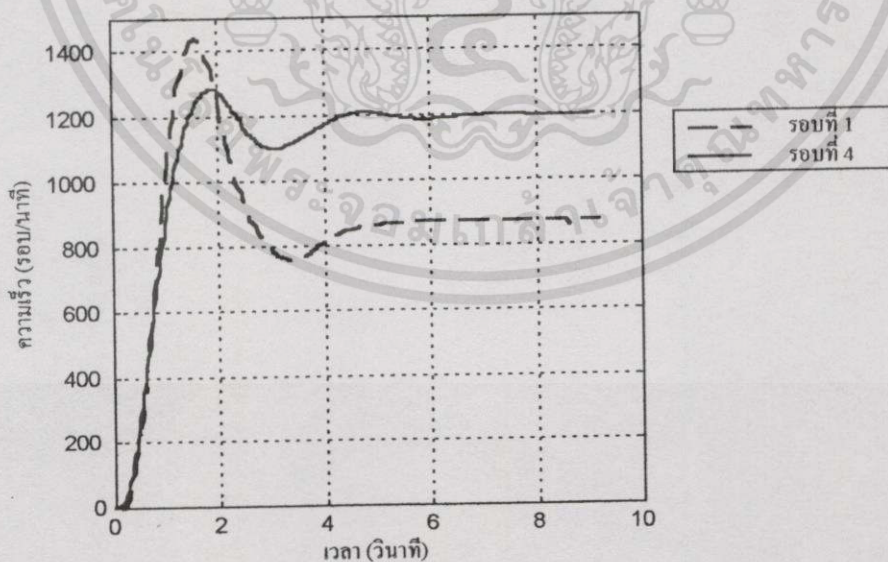
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.9 แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะซึ่งรอบที่ 1 เป็นผลการตอบสนองของระบบที่ไม่มีการเรียนรู้ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 67.60% เวลาในการเข้าถึง 1.15 วินาที มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวสูง (มากกว่า $\pm 2\%$) และรอบที่ 4 เป็นผลการตอบสนองหลังจากที่ระบบเรียนรู้จนได้ผลการตอบสนองชั่วขณะที่มีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 4.92% เวลาในการเข้าถึง 1.76 วินาที ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวน้อย (น้อยกว่า $\pm 2\%$) ค่าสมรรถนะต่างๆในแต่ละรอบการเรียนรู้แสดงในตารางที่ 5.17

การทดลองที่ 1.9 การทดลองควบคุมพีซีซึ่งชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการเป็น 1200 r.p.m. ค่าสมรรถนะที่ใช้คือค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินกำหนดเป็น 7.0% โดยแสดงในตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลอง

ค่าอ้างอิง	จำนวน	หน่วย
ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ	1200	r.p.m.
ความกว้างที่มากที่สุดในการเลื่อนฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาต์พุต	4.0	
อัตราการเรียนรู้เริ่มแรก	0.1	
%OV	7.0	%



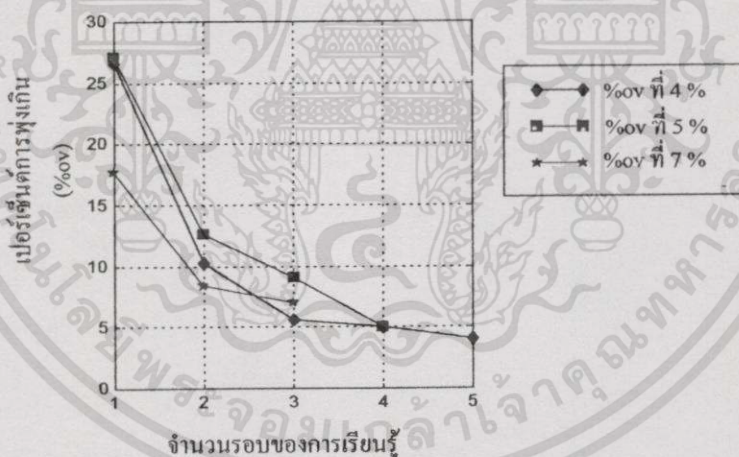
รูปที่ 5.10 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1200 r.p.m. โดยกำหนดค่าสมรรถนะที่ %OV = 7.0 % ด้วยตัวควบคุมพีซีซึ่งชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีเกรเดียนท์เดสเซ็นท์

ตารางที่ 5.19 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบการทำงาน

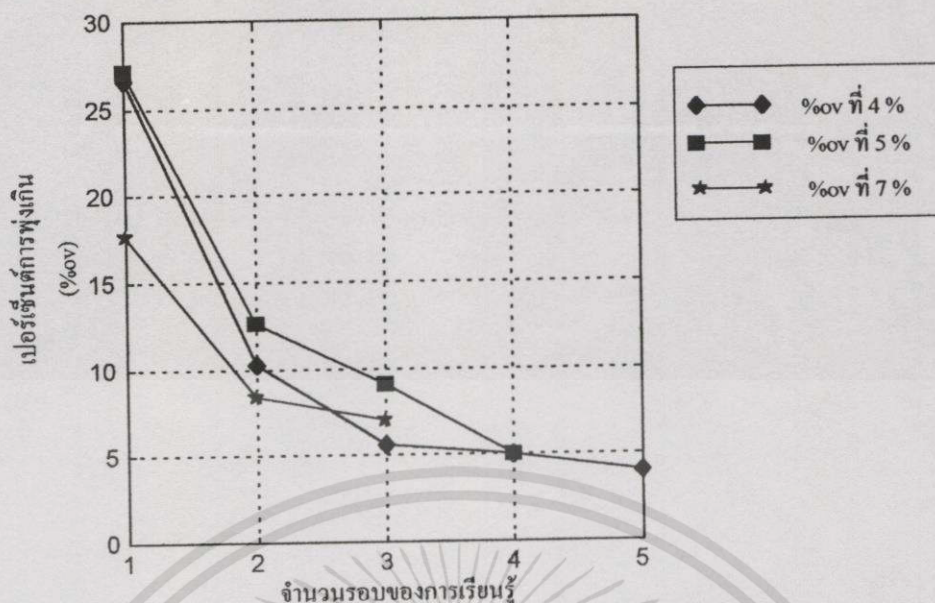
ค่าสมรรถนะ	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
R.T. (sec)	1.15	1.48	1.65	1.48
%OV	64.83	7.83	4.75	7.0

รูปที่ 5.10 แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะซึ่งรอบที่ 1 เป็นผลการตอบสนองของระบบที่ไม่มีการเรียนรู้ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 64.83 % เวลาในการเข้าถึง 1.15 วินาที มีค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัวสูง (มากกว่า $\pm 2\%$) และรอบที่ 4 เป็นผลการตอบสนองหลังจากที่ระบบเรียนรู้จนได้ผลการตอบสนองชั่วขณะที่มีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 7.0% เวลาในการเข้าถึง 1.48วินาที ค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัวน้อย (น้อยกว่า $\pm 2\%$) ค่าสมรรถนะต่างๆในแต่ละรอบการเรียนรู้แสดงในตารางที่ 5.9

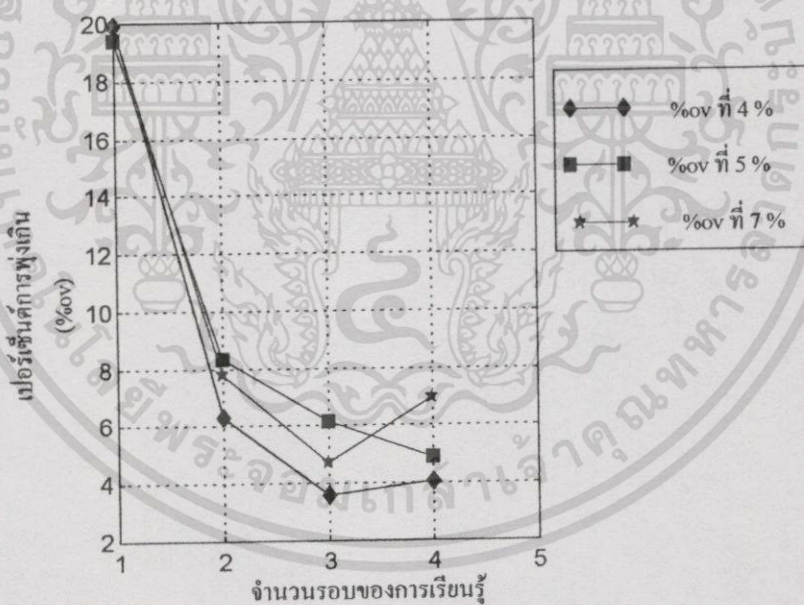
จากการทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมพีซีซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีเกรเดียนต์เดสเซนท์ พบว่ารอบในการเรียนรู้ของตัวควบคุมเพื่อทำให้ระบบมีผลการตอบสนองอยู่ในช่วง 3-5 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ถึง รูปที่ 5.13



รูปที่ 5.11 จำนวนรอบของการเรียนรู้ของตัวควบคุมพีซีซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีเกรเดียนต์เดสเซนท์ที่ความเร็ว 800 รอบ/นาที เมื่อกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ 4.0% 5.0% และ 7.0%



รูปที่ 5.12 จำนวนรอบของการเรียนรู้ของตัวควบคุมพีซีซีชนิดปรับกวดด้วยตัวเอง โดยวิธีเกรเดียนท์ เดสเซ็นท์ที่ความเร็ว 1000 รอบ/นาที เมื่อกำหนดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ 4.0% 5.0% และ 7.0%

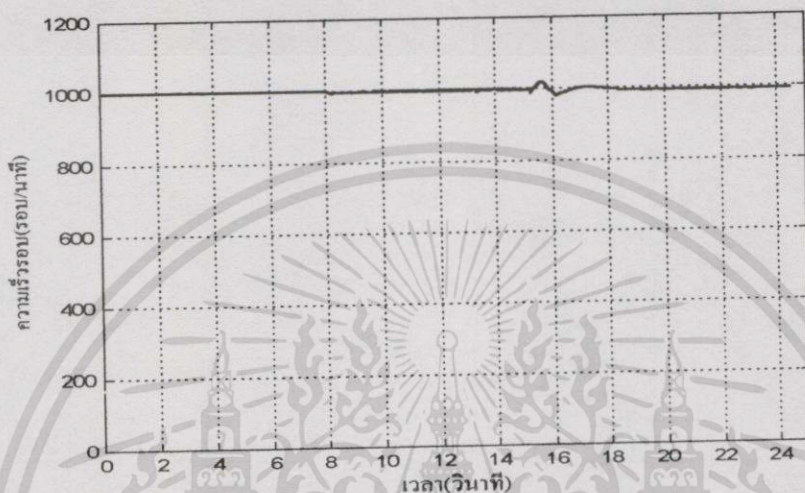


รูปที่ 5.13 จำนวนรอบของการเรียนรู้ของตัวควบคุมพีซีซีชนิดปรับกวดด้วยตัวเอง โดยวิธีเกรเดียนท์ เดสเซ็นท์ที่ความเร็ว 1200 รอบ/นาที เมื่อกำหนดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ 4.0% 5.0% และ 7.0%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยการใส่ภาระให้กับมอเตอร์ด้วยระดับต่างๆ

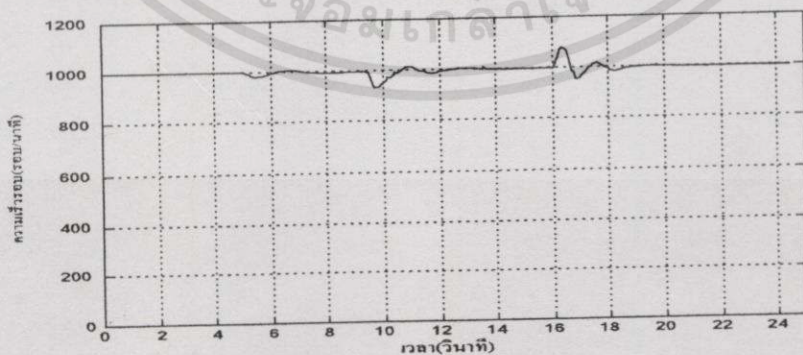
การทดลองที่ 1.10 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยการทดลองจ่ายโหลด 50%



รูปที่ 5.14 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่ายโหลด 50 % ของพิกัดมอเตอร์ที่บันทึกจากตัวควบคุมพีชชีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.

รูปที่ 5.14 แสดงผลการตอบสนองเมื่อทำการจ่ายโหลด 50% ของพิกัดมอเตอร์พบว่า การจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ระดับนี้มีผลต่อผลการตอบสนองเล็กน้อย แต่เมื่อทำการปลดโหลดพบว่าระบบสามารถปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะคงตัวโดยใช้เวลาประมาณ 1.25 วินาที

การทดลองที่ 1.11 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยการทดลองจ่ายโหลด 75% บันทึกจากตัวควบคุมพีชชีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.

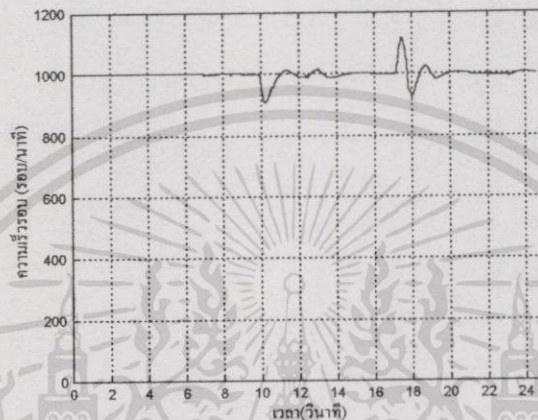


รูปที่ 5.15 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่ายโหลด 75 % ของพิกัดมอเตอร์ที่บันทึกจากตัวควบคุมพีชชีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.15 แสดงผลการตอบสนองเมื่อทำการจ่ายโหลด 75% ของฟลักมอเตอร์พบว่าระบบสามารถปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อมีการจ่ายโหลดให้กับระบบได้โดยใช้เวลาประมาณ 2.50 วินาที และขณะปลดโหลดระบบใช้เวลาในการเข้าถึงสภาวะคงตัวประมาณ 2.75 วินาที

การทดลองที่ 1.12 การทดลองตัวควบคุมพีซีซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยการทดลองจ่ายโหลด 100% บันทึกจากตัวควบคุมพีซีซีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.



รูปที่ 5.16 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่ายโหลด 100 % ของฟลักมอเตอร์ ที่บันทึกจากตัวควบคุมพีซีซีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.

รูปที่ 5.16 แสดงผลการตอบสนองเมื่อทำการจ่ายโหลด 100% ของฟลักมอเตอร์พบว่าระบบสามารถปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อมีการจ่ายโหลดให้กับระบบได้โดยใช้เวลาประมาณ 4.50 วินาที และขณะปลดโหลดระบบใช้เวลาในการเข้าถึงสภาวะคงตัวประมาณ 2.75 วินาที

จากการทดลองใส่โหลดที่ระดับ 50% 75 % และ 100% ของฟลักมอเตอร์พบว่าตัวควบคุมพีซีซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยวิธีเกรเดียนต์เดสเซนท์สามารถทำให้ผลการตอบสนองของระบบสามารถกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบเมื่อใส่โหลดและปลดโหลด

ระดับโหลดที่ใส่ให้กับระบบ	เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อใส่โหลด (วินาที)	เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อปลดโหลด (วินาที)
50% ของฟลักมอเตอร์	มีผลเล็กน้อย	1.25
75% ของฟลักมอเตอร์	2.50	2.75
100% ของฟลักมอเตอร์	4.50	2.75

สรุปการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบพีซซีชนิดปรับกฏด้วยตัวเองด้วยวิธีการเคียนท์เคสเซ็นท์สามารถทำการเรียนรู้และปรับกฏให้ระบบมีผลการตอบสนองที่มีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดไว้ได้ โดยใช้รอบในการเรียนรู้ประมาณ 3-5 รอบ ซึ่งการเรียนรู้นั้นจะช้าหรือเร็วขึ้นกับการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

5.4 การทดลองที่ 2 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้ตัวควบคุมพีซซีแบบปรับกฏด้วยตัวเองโดยวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะ

จุดประสงค์การทดลอง

เพื่อทดสอบการเรียนรู้ของตัวควบคุมพีซซีชนิดปรับกฏด้วยตัวเองโดยวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยการท้าท้าว่าสามารถปรับกฏในฐานความรู้เพื่อให้ระบบมีผลการตอบสนองที่มีค่าสมรรถนะตามที่ต้องการและทำการวัดจำนวนรอบที่ใช้ในการเรียนรู้

ขอบเขตของการทดลอง

1. การทดลองจะทดลองเพื่อหาค่าการปรับสมรรถนะของการเปลี่ยนระดับ (Step Response) ที่ระดับความเร็ว 1000 รอบ/นาที โดยกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่ยอมรับได้อยู่ที่ระดับ 5.0 %
2. การทดลองการตอบสนองต่อโหลดทางกล (Step load)
 - ใส่โหลดให้กับระบบที่ระดับ 50 %
 - ใส่โหลดให้กับระบบที่ระดับ 75 %
 - ใส่โหลดให้กับระบบที่ระดับ 1000 %

ขั้นตอนการทดลอง

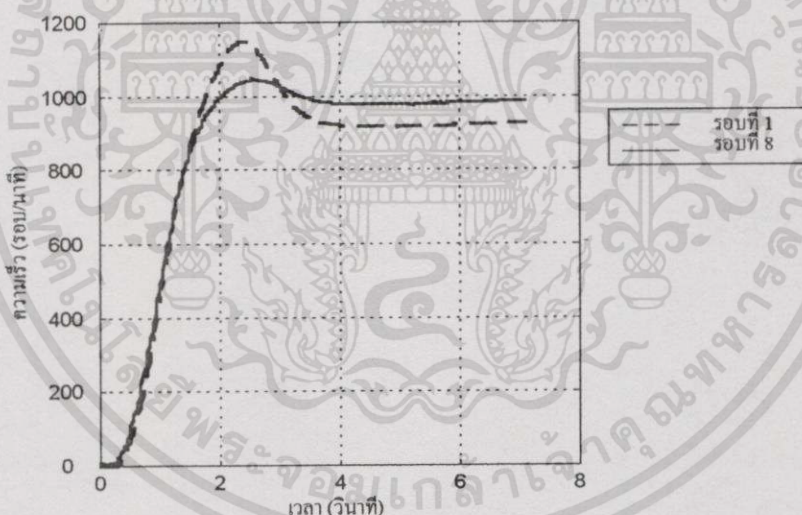
1. กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับกฏ
2. กำหนดค่าสมรรถนะโดยประมาณ ในที่นี้เรากำหนดค่า %OV ไว้ โดยมีจุดประสงค์ให้มอเตอร์ทำงานจนได้ค่า %OV เท่ากับ ค่า %OV ที่กำหนดไว้หรือมีค่าใกล้เคียงที่จะยอมรับได้
3. ทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยให้มอเตอร์ทำงานระยะสั้นๆ
4. ทำการบันทึกผลการทดลอง ซึ่งจะบันทึกในรูปของแฟ้มข้อมูลและนำไปเขียนกราฟโดยใช้โปรแกรม MATLAB

5.4.1 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีการวิเคราะห์ทางเดินสถานะ ความเร็วรอบ 1000 r.p.m.

การทดลองที่ 2.1 การทดลองตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต้องการเป็น 1000 r.p.m. ค่าสมรรถนะที่ใช้คือค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินกำหนดเป็น 5.0% โดยแสดงในตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.21 การกำหนดค่าความเร็วรอบ ค่าสมรรถนะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลอง

ค่าอ้างอิง	จำนวน	หน่วย
ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ	1000	r.p.m.
ความกว้างที่มากที่สุดในการเลื่อนฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาต์พุต	1.0	
%OV	5.0	%



รูปที่ 5.17 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วที่ระดับ 1000 r.p.m. โดยกำหนดค่า สมรรถนะที่ %OV = 5.0 % ด้วยตัวควบคุมพีชชีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางเดินสถานะ

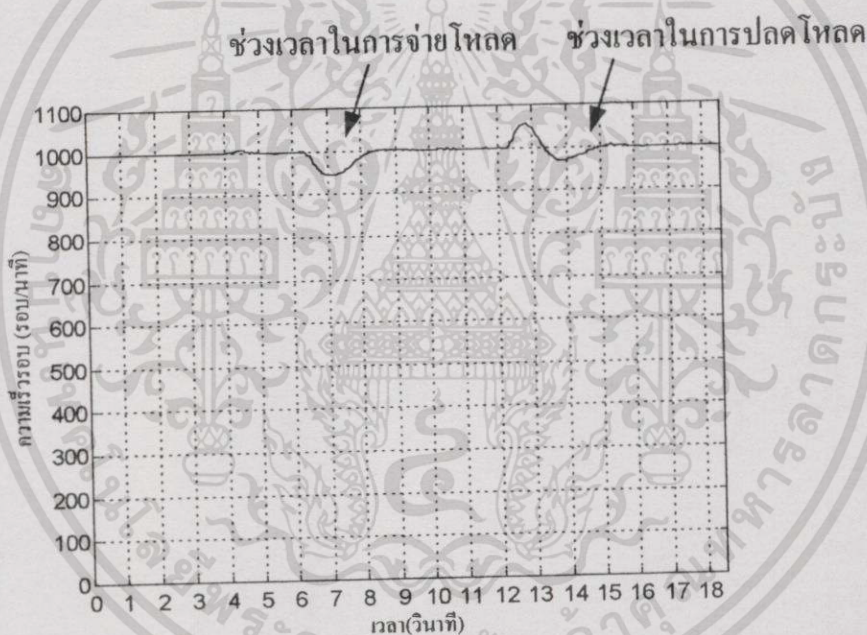
ตารางที่ 5.22 ผลค่าสมรรถนะของการเรียนรู้โดยการปรับกฎในแต่ละรอบการทำงาน

ค่าสมรรถนะ	1	2	3	4	5	6	7	8
R.T. (sec)	1.76	1.81	1.92	1.98	2.09	2.58	2.03	1.98
%OV	24.05	14.27	9.44	7.33	5.88	5.76	6.38	4.90

รูปที่ 5.17 เป็นผลการตอบสนองชั่วขณะโดยรอบที่ 1 เป็นผลการตอบสนองของระบบที่ไม่มี การเรียนรู้ซึ่งจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 24.05% เวลาในการเข้าถึง 1.76 วินาที มีค่าผิดพลาดที่ สภาวะคงตัวสูง (มากกว่า $\pm 2\%$) รอบที่ 8 เป็นผลการตอบสนองชั่วขณะเมื่อระบบทำการเรียนรู้จน ได้ค่าสมรรถนะตามต้องการซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 4.9% และเวลาการเข้าถึงความเร็วที่กำหนด ประมาณ 1.98 วินาที

5.4.2 การทดลองตัวควบคุมฟuzzyชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีการวิเคราะห์ทางเดินสถานะ โดยการใส่ภาระให้กับมอเตอร์ที่ระดับต่างๆ

การทดลองที่ 2.2 การทดลองตัวควบคุมฟuzzyชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยการทดลองจ่ายโหลด 50% บนที่กจากตัวควบคุมฟuzzyที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.

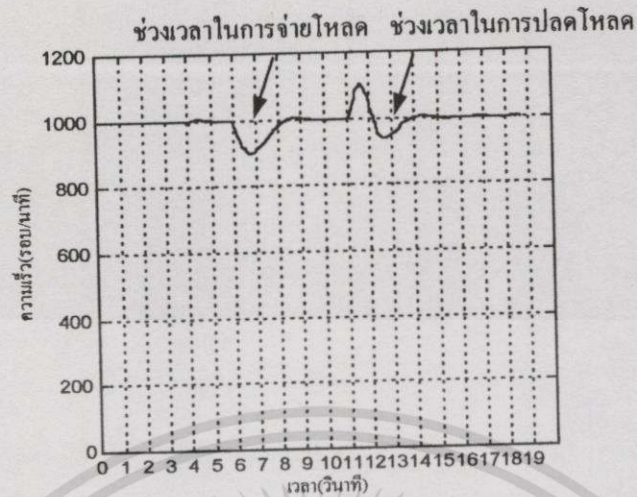


รูปที่ 5.18 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่ายโหลด 50 % ของฟักัดมอเตอร์ ที่ บนที่กจากตัวควบคุมฟuzzyที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.

รูปที่ 5.18 แสดงผลการตอบสนองเมื่อทำการจ่ายโหลด 50% ของฟักัดมอเตอร์พบว่าระบบ สามารถปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อมีการจ่ายโหลดให้กับระบบได้โดยใช้เวลาประมาณ 1.98 วินาที และขณะปลดโหลดระบบใช้เวลาในการเข้าถึงสภาวะคงตัวประมาณ 2.74 วินาที

การทดลองที่ 2.3 การทดลองตัวควบคุมฟuzzyชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยการทดลองจ่ายโหลด 75% บนที่กจากตัวควบคุมฟuzzyที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.

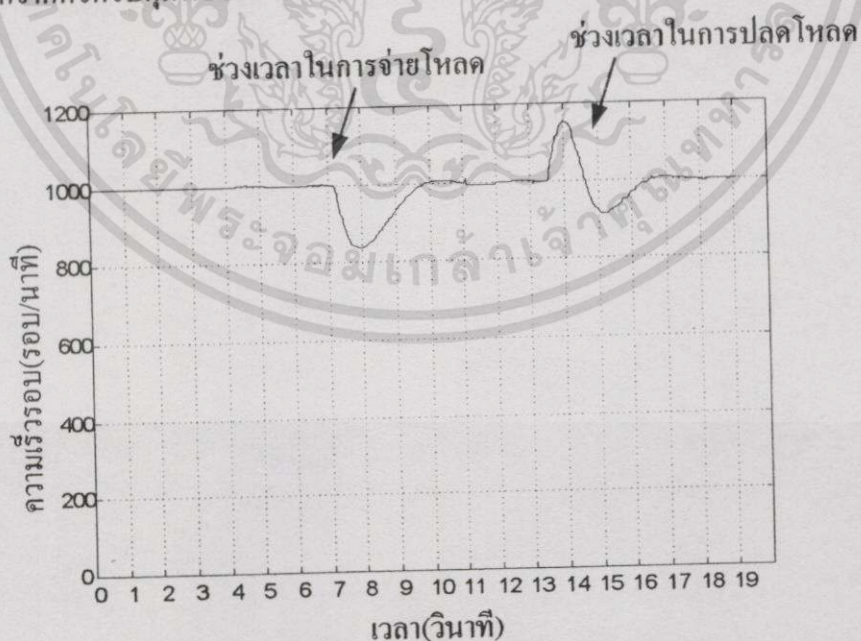
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่ายโหลด 75 % ของพิกัดมอเตอร์ ที่บันทึกจากตัวควบคุมพีซีซีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.

รูปที่ 5.19 แสดงผลการตอบสนองเมื่อทำการจ่ายโหลด 75% ของพิกัดมอเตอร์พบว่าระบบสามารถปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อมีการจ่ายโหลดให้กับระบบได้โดยใช้เวลาประมาณ 2.48 วินาที และขณะปลดโหลดระบบใช้เวลาในการเข้าถึงสภาวะคงตัวประมาณ 3.85 วินาที

การทดลองที่ 2.4 การทดลองตัวควบคุมพีซีซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง โดยการทดลองจ่ายโหลด 100% บันทึกจากตัวควบคุมพีซีซีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.



รูปที่ 5.20 ผลการตอบสนองของการควบคุมความเร็วเมื่อจ่ายโหลด 100 % ของพิกัดมอเตอร์ ที่บันทึกจากตัวควบคุมพีซีซีที่ระดับความเร็ว 1000 r.p.m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.20 แสดงผลการตอบสนองเมื่อทำการจ่ายโหลด 100% ของฟัดคโมเตอร์พบว่าระบบสามารถปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อมีการจ่ายโหลดให้กับระบบได้โดยใช้เวลาประมาณ 2.75 วินาที และขณะปลดโหลดระบบใช้เวลาในการเข้าถึงสภาวะคงตัวประมาณ 3.30 วินาที

จากการทดลองใส่โหลดที่ระดับ 50% 75 % และ 100% ของฟัดคโมเตอร์พบว่าตัวควบคุมพีชซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะสามารถทำให้ผลการตอบสนองของระบบสามารถกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.23

ตารางที่ 5.23 เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบเมื่อใส่โหลดและปลดโหลด

ระดับโหลดที่ใส่ให้กับระบบ	เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อใส่โหลด (วินาที)	เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อปลดโหลด (วินาที)
50% ของฟัดคโมเตอร์	1.98	2.74
75% ของฟัดคโมเตอร์	2.48	3.85
100% ของฟัดคโมเตอร์	2.75	3.30

สรุปการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบพีชซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเองด้วยวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะสามารถทำการเรียนรู้และปรับกฎให้ระบบมีผลการตอบสนองที่มีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดไว้ได้โดยใช้รอบในการเรียนรู้ประมาณ 8 รอบ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองในบทที่ 5 ซึ่งทดสอบตัวควบคุมพืชซึ่งชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีเกรเดียนท์เคสเซ็นท์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ระดับต่างๆและกำหนดให้มีค่าสมรรถนะต่างๆกันพบว่า ตัวควบคุมพืชซึ่งชนิดปรับกฎด้วยตัวเองนี้สามารถทำการเรียนรู้พฤติกรรมของระบบและปรับกฎในฐานความรู้จนกระทั่งได้ผลการตอบสนองที่มีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดโดยส่วนใหญ่ด้วยรอบการเรียนรู้ประมาณ 3-4 รอบ และสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้เมื่อมีการใส่โหลดทางกลให้กับระบบที่ระดับ 50 % 75% และ 100% ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของตัวควบคุมพืชซึ่งชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีเกรเดียนท์เคสเซ็นท์ได้ดังนี้

ข้อดีของตัวควบคุมพืชซึ่งชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีเกรเดียนท์เคสเซ็นท์

1. สามารถเรียนรู้พฤติกรรมของระบบและปรับกฎในฐานความรู้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ได้ตามที่ต้องการ ได้เร็ว
2. สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้เมื่อมีการใส่โหลดให้กับระบบ
3. เนื่องจากส่วนของข้อสรุปของตัวควบคุมเป็นพืชซึ่งเกิดค้นทำให้การคำนวณง่ายไม่ซับซ้อน
4. วิธีการเรียนรู้ทำให้ระบบสามารถจับคู่ (mapping) เอาท์พุท ให้เหมาะสมกับอินพุทของระบบพืชซึ่ง แทนการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบคงที่

ข้อเสียของตัวควบคุมพืชซึ่งชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีเกรเดียนท์เคสเซ็นท์

1. จากผลการทดลองพบว่าผลการตอบสนองที่ภาวะเสถียรมีการแกว่งเล็กน้อย

ในส่วนของตัวควบคุมพืชซึ่งชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะหลังจากทำการทดลองพบว่า ตัวควบคุมนี้สามารถเรียนรู้พฤติกรรมของระบบและปรับปรุงค่าสมรรถนะของระบบให้ได้ตามที่ต้องการได้โดยใช้จำนวนรอบการเรียนรู้ประมาณ 8 รอบ ซึ่ง ช้ากว่าการใช้เกรเดียนท์เคสเซ็นท์แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการใส่โหลดให้กับระบบที่ระดับต่างๆ ตัวควบคุมชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีวิเคราะห์ทางเดินสถานะสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ ซึ่งสามารถสรุปข้อดีของเสียของตัวควบคุมนี้ได้ดังนี้

ข้อดีของตัวควบคุมชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีการวิเคราะห์ทางเดินสถานะ

1. กฎที่ได้รับการแก้ไขแล้วสามารถนำกลับมาใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ได้โดยไม่ต้องมีการเรียนรู้ได้ ในกรณีที่พารามิเตอร์ของระบบยังไม่ได้เปลี่ยนแปลง
2. วิธีการเรียนรู้นี้จะลดจำนวนการแก้ไขกฎที่ไม่จำเป็นต้องแก้ไข
3. สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้เมื่อมีการใส่โหลดให้กับระบบ

ข้อเสียของตัวควบคุมชนิดปรับกฎด้วยตัวเองโดยวิธีการวิเคราะห์ทางเดินสถานะ

การเรียนรู้เพื่อทำการปรับปรุงค่าสมรรถนะของระบบช้าเมื่อเทียบกับวิธีการของเกรเดียนต์เดสเซนท์

อย่างไรก็ดี ผู้เขียนขอเสนอแนะ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง ควรพัฒนาเกี่ยวกับวิธี การปรับกฎและการเลือกกฎที่ควรถูกแก้ไข แนวคิดของทฤษฎีนิเวศวิวัฒนาการและเจเนติก เป็นสิ่งที่น่าสนใจเพราะว่า แนวคิดของทั้งสองทฤษฎีนี้ เป็นวิธีการเรียนรู้ และการหาค่าที่ดีที่สุด (optimization) ซึ่งเหมาะสำหรับการนำมาใช้ในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เพื่อให้ระบบสามารถใช้รอบในการเรียนรู้และให้ผลการตอบสนองที่มีค่าสมรรถนะตามที่ต้องการน้อยที่สุด หรืออาจใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ร่วมกับวิธีอื่น ๆ ในการเรียนรู้เพื่อควบคุมระบบต่อไป

เอกสารอ้างอิง

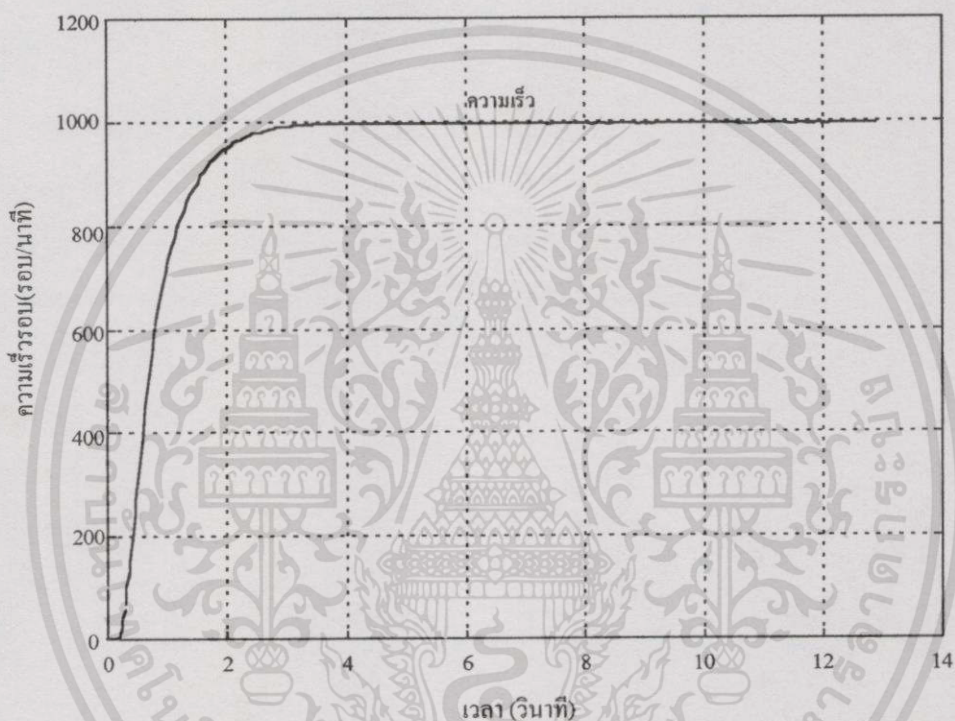
- [1] Timothy J. Ross. **Fuzzy Logic with Engineering Application**. New York NY: McGraw-Hill, 1995.
- [2] Zadeh, L. A. "Fuzzy Sets." *Information and Control*, vol. 8, 1965. pp. 338-353.
- [3] Zadeh, L. A. "Why the Success of Fuzzy Logic is not Paradoxical." *IEEE Expert - A Fuzzy Logic Symposium*, Vol. 9, No. 4, 1994. pp. 43-46.
- [4] R.M. Tong. "A Control Engineering Review of Fuzzy Systems." *Automatica*, Vol. 13, 6, November, 1977. pp. 559-569.
- [5] S. Joe Qin and Guy Borders. "A Multiregion Fuzzy Logic Controller for Nonlinear Process Control." *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Vol. 2, No. 1, February, 1994. pp. 74-81.
- [6] Jun Yan, Michael Ryan and James Power. **Using Fuzzy Logic Toward Intelligent Systems**. Prentice-Hall International (UK) Limited. 1994.
- [7] T.J. Procyk and E. H. Mamdani. "A Linguistic Self-organizing Process Controller." *Automatica*, Vol. 15, 1, January, 1979. pp. 15-30.
- [8] Shihwang Shao. "Fuzzy Self-organizing Controller and It's Application for Dynamic Processes." *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 26, 1988. pp. 151- 164.
- [9] Chien-Hui Lee and Sheng-De wang. "A Self-organizing Adaptive Fuzzy Controller." *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 80, 1996. pp. 295-313.
- [10] D. A. Likens and S. B. Hasnain. "Self-organizing Fuzzy Logic Control and Application to Muscle Relaxant Anaesthesia." *IEE Proceedings-D*, Vol. 138, No. 3, May, 1991, pp. 274-284.
- [11] B. S. Zhang and J. M. Edmunds. "Self-organizing Fuzzy Logic Controllers." *IEE Proceedings-D*, Vol. 13, No. 5, September, 1992, pp. 460-464.
- [12] W. Leonhard. **Control of Electrical Drives**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg Germany. 1985.
- [13] Stephen J. Chapman. **Electric Machinery Fundamentals**. 3rd. Boston : McGraw-Hill, 1999.
- [14] George J. Klir, Ute St Clair and Bo Yuan. **Fuzzy Set Theory Foundations and Applications**. 1st. Canada : Prentice Hall PTR. 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] Dimiter Driankov, Hans Hellendoorn and Michiel Reimink. **An Introduction to Fuzzy Control**. U.S.A. : Springer-Verlag Berlin. 1993.
- [16] Earl Cox. **The Fuzzy Systems Handbook**. AP Professional. 1994.
- [17] George J. Klir and Tina A. Folger. **Fuzzy sets, Uncertainty, and Information**. New Jersey : Prentice-Hall International Editions. 1992.
- [18] Li-Xin Wang. **A Course in Fuzzy System and Control**. Prentice-Hall International, Inc. 1997.
- [19] Mamdani E. H. "Applications of Fuzzy Algorithm for Simple Dynamic Plant." *Proceeding IEE.*, Vol. 121, No.12, 1974. pp. 1585-1588.
- [20] Lasen P.M. "Industrial Applications of Fuzzy Logic Control.", *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 12, No. 1, 1980. pp. 3-10.
- [21] นิमित บุญภิรมย์. "การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยฟัซซี่ซันิตปรับค่าด้วยตัวเอง." *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2541.
- [22] James C. Spall and John A. Cristion. "A Neural Network Controller for Systems with Unmodeled Dynamics with Applications to Wastewater Treatment." *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, Vol. 27, No. 3, June, 1997. pp. 369-375.
- [23] Hung-Yuan Chang and Chih-Kuan Chiang. "A Self-learning and Tuning Fuzzy Logic Controller Based on Genetic Algorithms and Reinforcements." *International Journal of Intelligent Systems*, Vol. 12, 1997. pp. 673-694.

ภาคผนวก ก

แสดงผลการทดลองของตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ
กระตุ้นแยกในสภาวะรูปเปิดโดยกำหนดความเร็วรอบที่ 1000 rpm.



รูปที่ 1 ผลการตอบสนองของความเร็วในสภาวะรูปเปิด

จากรูปที่ 1 พบว่าผลการตอบสนองจะมีค่าเวลาในการเข้าถึงค่าความเร็วที่กำหนดไว้ประมาณ 2.2 วินาที และมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 0.0% และไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว

ภาคผนวก ข

แสดงถึงรายละเอียดของ A/D card ขนาด 12 บิต ที่ใช้ในวิชานิปนธ์ ซึ่งเป็นข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

Function		PA-ST12	PA-ST12-H
A/D	Resolution	12Bits	12Bits
	Channels	16 differential or 32 single-ended	16 differential or 32 single-ended
	Speed	20 μ s.	10 μ s.
D/A	Resolution	12 Bits	12 Bits
	Channels	2	2
	Speed	10 μ s.	10 μ s.
D I/O	Digital I/P	16 Bits	16 Bits
	Digital O/P	16 Bits	16 Bits

Standard package

Quantity	Products
1	PA-ST12 or PA-ST12-H card
3	Testing wire for connecting D-type connector
1	Testing and sample program diskette
1	This instruction manual

System requirements :

IBM PC or compatibles

Option products

The following is a list of the optional products which are available from acqutek.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Screw terminal board and chassis

Model No	Function
ST-DM37	Screw terminal board for A/D D/A with cable
IC-xcxd	Chassis for ST-DM37 and XCI/XDI expansion board

Digital I/O expansion (XDI) boards

Model No	Type	Channel	Function
XI-PI08	Input	8	3-32V Photo-coupled I/P
XI-IM04-28	Input	4	12-32V AC/DC input module
XI-IM04-140	Input	4	90-140V AC/DC input module
XI-IM04-280	Input	4	180-280V AC/DC input module
XO-RR08	Output	8	10VA reed relay
XO-SRD4	Output	4	3A 5V-60V DC S.S.R.
XO-SRA4	Output	4	3A 24V-280V AC S.S.R.
ST-XD02		16	Screw terminal board for 2 XDI
IC-XCXD	Chassis		Chassis for XCI/XDI I/F card

These input and output modules offer several options for digital I/O applications. All come with ribbon cables and connections that enable direct and immediate connection to the digital I/O.

Specifications

Analog to digital (A/D)

Resolution	12 Bits
Input channel	32 channels(single-ended) 16-channels(differential)
Input voltage range	-5V to 5V, -10V to 10V 0V to +5V, 0V to +10V
Accuracy	1 Bit
Conversion Time	20 μ s. (PA-ST12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	10 μ s. (PA-ST12-H)
Overvoltage	35 V.
Gain controller	1, 2, 5, 10, or user define By H/W jumper setting or S/W programming
Conversion method	S/W trig External clock trig Internal 8253/8254 timer trig Internal 8254 timer trig (paced)
Connector	37 pins D-type male connector (shared with D/A)
Digital to Analog (D/A)	
Resolution	12 Bits
Input channel	2
Output voltage range	-5V to 5V, -10V to 10V 0V to +5V, 0V to +10V
Accuracy	1 Bit
Conversion Time	10 μ s.
Connector	37 pins D-type male connector (shared with A/D)

DIGITAL I/O

Number of digital input	16 Bits
Input type	74LS244
Input high/low voltage	2.0V/0.8V
Number of digital output	16 Bits
Output type	74LS273
Output high/low voltage	2.4V/0.5V
Digital I/O connector	20 pin dual-in-line male box header

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Programmable timer

Controller	8253 or 8254
Counters	3 16 Bit down counter 2 for A/D timer conversion 1 for user's application
Clock source	4 MHz.
Input/output type	TTL

Interface and environmental characters

Compatible bus	IBM PC and compatibles
Data path	8 Bits
Interface type	12 Bit I/O mapped
I/O location occupied	16
Port address range	0100H to 0FF0H
Interrupt	IRQ2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 14, 15
Interrupt source	A/D end of conversion (EOC)
Power consumption	1.00A/+5V
Operating temperature	5°C to 50°C
Storage temperature	-25°C to +85°C
Operating and storage humidity	0 to 90% non-condensing
Weight	280 g
Dimension	33.6×12.6×1.8 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาว รัชณี สุภัคพานิช เกิดเมื่อวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2514 จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต (คณิตศาสตร์) จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2535 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2537



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้