การควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์โดยใช้เทคนิคฟัซซี่ไอเทลเบิร์ก

DC MOTOR SPEED CONTROL BY FUZZY-EITELBERG'S TECHNIQUE

T028869

นายเดชา พวงดาวเรือง

MR.DEACHA PUANGDOWNREONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2540

ISBN 974-621-953-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่..............................
เลขทะเบียน 28869
วัน, เดือน, ปี 10 พ.ย. 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC MOTOR SPEED CONTROL BY FUZZY-EITELBERG'S TECHNIQUE

DEACHA PUANGDOWNREONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1997

ISBN 974-621-953-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์โดยใช้เทคนิคฟัซซี่ไอเทลเบิร์ก
นักศึกษา	นายเดชา พวงดาวเรือง
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.สราวุฒิ สุจิตจร
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2540

บทคัดย่อ

โครงงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบและสร้างตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก เพื่อใช้ควบคุมดีซีเซอร์โวมอเตอร์ ให้บรรลุวัตถุประสงค์ทั้งทางการคงตัวและแปรตามคำสั่ง แนวคิดในการออกแบบระบบมีรากฐานจากวิธีการที่นำเสนอโดยไอเทลเบิร์ก เมื่อ ค.ศ. 1987 ซึ่งมีการใช้ประโยชน์สัญญาณอินพุทที่ระดับต่างๆกันส่งไปยังวงรอบของการควบคุม เทคนิควิธีดังกล่าวจะเอื้อประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมที่มีการใช้ตัวควบคุมเดิมเป็นวงจรที่ยากต่อการดัดแปลงแก้ไขหรือปรับแต่ง นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวยังเหมาะสมกับระบบควบคุมที่สังเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ยากอีกด้วย

ตัวควบคุมที่สร้างขึ้นใช้ไมโครโพรเซสเซอร์ Z180 ขนาด 8 บิต ทำงานด้วยอัตราสัญญาณนาฬิกา 10 เมกกะเฮิร์ต ซึ่งมีราคาถูก ตัวควบคุมจะส่งสัญญาณที่เหมาะสมและสอดคล้องตามฟัซซี่อัลกอริธึมที่ได้พัฒนาขึ้นจากภายนอก เข้าสู่วงรอบปิดของการควบคุมเดิม ในกรณีที่ปรากฏทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบ อัลกอริธึมของการควบคุมจะทำการปรับตำแหน่งของซีโร่ในทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นวงรอบปิด (closed-loop transfer function) แต่ถ้าไม่ปรากฏทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบ อัลกอริธึมของการควบคุมจะทำการปรับระดับสัญญาณอินพุท เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้นตามขอบเขตที่ได้สาธิตไว้ในวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	DC Motor Speed Control by Fuzzy-Eitelberg's Technique
Student	Mr.Deacha Puangdownreong
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Yothin Prempraneerach
Thesis Co-advisor	Assoc.Prof.Dr.Sarawut Sujitjorn
Level of study	Master of Engineering in Electrical Engineering
Department	Control System Engineering, Faculty of Engineering
	King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang
Year	1997

Abstract

This master thesis project is geared for the design and implementation of a fuzzy logic controller. The controller is to govern a DC-servo motor for regulating and tracking purposes. The design concept is based on the method introduced by Eitelberg in 1987. This method employs leveling of the input signals issued to the control loop. The technique is proved useful for industrial application when the original controller is hard-wired or prohibited from adjustment. Moreover, the method is suitable for a control system of which its mathematical model is difficult to be derived or synthesized.

The implemented controller is of a microprocessor-based type. It employs a low-cost 8 bit microprocessor Z180 running at 10 MHz clock rate. The controller issues appropriate signals according to the developed fuzzy algorithms. The signals are externally fed to the original control loop. In the case of having a system transfer function, the control algorithm acts in the way of adjusting the zeros of closed-loop transfer function. If the system transfer function does not exist, the control algorithm adjusts the level of input signals. This technique can cope with the performance improvement to some extent as well demonstrated in the thesis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ (มออ.) ที่ได้อนุญาตให้ข้าพเจ้าลาศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา, ขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ที่ข้าพเจ้าสังกัดศึกษาในระดับปริญญาโท จนสำเร็จการศึกษา, ขอบพระคุณ รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์ ในฐานะอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ที่ได้มอบหมายงานวิจัยอันเป็นประโยชน์นี้ คอยให้คำปรึกษาแนะนำแนวความคิดด้วยความเมตตาแก่ศิษย์เสมอมา อีกทั้งยังให้โอกาสข้าพเจ้าสอนวิชาปฏิบัติการที่ สจล. ด้วย, ขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ปฏิบัติการวิจัยแก่ข้าพเจ้า, ขอบพระคุณ รศ.ดร.สราวุฒิ สุจิตจร ในฐานะอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วมของข้าพเจ้า ที่ได้อุทิศความรู้ สติปัญญา ความสามารถ ตลอดจนความเมตตาปราณีต่อศิษย์มาตลอด และยังได้ให้โอกาสข้าพเจ้าสอนวิชาปฏิบัติการที่ มทส. อีกด้วย, ขอบคุณอาจารย์ประทีป มากมิตร แห่ง มออ. ที่ได้ให้ปรัชญาชีวิตแก่ข้าพเจ้าได้ยึดถือและประยุกต์ใช้กับชีวิตของข้าพเจ้าเรื่อยมา, สุดท้ายขอขอบคุณ สุกัญญา รื่นจิตร พยาบาลแห่งวชิรพยาบาล ผู้คอยเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้า กระทั่งบัดนี้ และจนตลอดไป

เดชา พวงดาวเรือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VI

สารบัญภาพ.....VII

บทที่

1. บทนำ.....1
   1. วัตถุประสงค์และเค้าโครงของโครงงานวิทยานิพนธ์.....1
   2. การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....2
2. แนวคิดในเรื่องการคงตัวและแปรตามคำสั่ง และการประยุกต์วิธีการของไอเทลเบิร์ก.....4
   1. แนวคิดและวิธีการของไอเทลเบิร์ก.....5
   2. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุม.....9
   3. สถาปัตยกรรมของระบบควบคุมโดยรวมในเชิงฮาร์ดแวร์.....13
   4. การทดสอบองค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้น.....20
   5. สรุป.....26
3. ตัวควบคุมพีไอดีแบบดิจิตอล.....28
   1. อัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดี.....28
   2. การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี.....34
   3. การอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีด้วยภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU.....41
   4. การทดสอบตัวควบคุมพีไอดี.....52
   5. การทดสอบการปรับระดับอินพุท.....54
   6. สรุป.....58
4. การควบคุมการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก.....60
   1. ฟัซซี่อัลกอริธึมเพื่อบ่งบอกคุณภาพอาการตอบสนอง.....60
   2. ฟัซซี่อัลกอริธึมเพื่อปรับแต่งสมรรถนะ.....65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3. การอนุวัตอัลกอริธึม	66
4. สรุป	79
5. การทดสอบสมรรถนะของระบบ	80
1. การทดสอบสมรรถนะของระบบ	80
2. การทดสอบระบบเชิงแปรตามคำสั่ง	81
3. การทดสอบระบบเชิงคงตัว	84
4. สรุป	92
6. บทสรุป	93
1. ข้อสรุป	93
2. แนวทางการดำเนินงานวิจัยในขั้นต่อไป	95
เอกสารอ้างอิง	97
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก. การคำนวณขนาดและเวลาในการเอกซิคิวท์โปรแกรมให้การควบคุม	100
ภาคผนวก ข. การออกแบบส่วนกรองสัญญาณ	110
ภาคผนวก ค. โปรแกรมให้การทดสอบกระบวนการและส่วนกรองสัญญาณ	115
ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ขณะศึกษา	118
ภาคผนวก จ. บทความ "ฟัซซี่ลอจิกกับระบบควบคุม"	140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1. แสดงผลการทดสอบ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์....................23
2. แสดงผลการทดสอบ ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์....................25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

1. โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอ ตามที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอ.....5
2. ผลตอบสนองของระบบในรูปที่ 1 เมื่อค่า F เปลี่ยนแปลงไป.....6
3. โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี ตามที่ไอเทลเบิร์กเสนอ.....7
4. ระบบควบคุมที่สมมูลย์กับระบบที่ไอเทลเบิร์กเสนอ.....7
5. กระบวนการภายใต้การควบคุม.....10
6. ผลตอบสนองของกระบวนการ จากการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรม MATLAB.....12
7. ผลตอบสนองของกระบวนการ จากการทดสอบด้วยอินพุทแบบขั้นบันไดขนาด 1 โวลท์.....12
8. ผลตอบสนองของกระบวนการ จากโมเดลแบบประมาณด้วยโปรแกรม MATLAB.....13
9. องค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น.....14
10. แผนภาพวงจรของบอร์ดควบคุม CP-AT180.....15
11. แผนภาพวงจร เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์.....17
12. แผนภาพวงจร ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์.....18
13. แผนภาพวงจรส่วนกรองสัญญาณ.....19
14. มอเตอร์ ตัวขับ และแหล่งจ่ายไฟ.....21
15. บอร์ดควบคุม CP-AT180.....21
16. ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์.....22
17. เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ และนอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์.....22
18. โลว์พาสส์ฟิลเตอร์.....23
19. ผลการทดสอบส่วนกรองสัญญาณ.....26
20(ก). ผลการแปลงสัญญาณอนาลอคเป็นค่าดิจิตอล จากสัญญาณด้านล่างของรูปที่ 19.....27
20(ข). ผลการแปลงสัญญาณอนาลอคเป็นค่าดิจิตอล จากสัญญาณด้านบนของรูปที่ 19.....27
21. ตัวควบคุมพีไอดีแบบทั่วไป.....28
22. ตัวควบคุมพีไอดีตามที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอ.....29
23. แสดงความแม่นตรงในการแปลง [1].....31
24. ระบบควบคุมที่เป็นไปตามข้อกำหนดของวิธีโมดูลัสออปติมัม.....36
25. แผนภาพบล็อคแสดงคณิตศาสตร์ของกระบวนการ.....37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

26. แผนภาพบล็อคของระบบควบคุมป้อนกลับแบบทั่วไป....38
27(ก). ผลตอบสนองของระบบเชิงแปรตามคำสั่ง จากการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรม-MATLAB....40
27(ข). ผลตอบสนองของระบบเชิงคงตัว จากการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรม MATLAB....40
28. การทำงานของโปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์....44
29. การทำงานของโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี....46
30. แสดงรายละเอียดของไฟล์ ch0.obj....51
31. แสดงรายละเอียดของไฟล์ ch1.obj....51
32. สัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมพีไอดี ต่อสัญญาณอินพุทแบบขั้นบันได....52
33. สัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมพีไอดี เมื่อ K_P=1, K_I=15 และ K_D=0.001....53
34. สัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมพีไอดี เมื่อ K_P=1, K_I=30 และ K_D=0.001....53
35. สัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมพีไอดี เมื่อ K_P=1, K_I=45 และ K_D=0.002....54
36. ผลตอบสนองที่พึงประสงค์หรือ "set point"....56
37(ก). ผลตอบสนองที่มีระดับการตอบสนองสูงกว่า set point....56
37(ข). ผลตอบสนองภายหลังการปรับลดระดับอินพุท....57
38(ก). ผลตอบสนองที่มีระดับการตอบสนองต่ำกว่า set point....57
38(ข). ผลตอบสนองภายหลังการปรับเพิ่มระดับอินพุท....58
39. โครงสร้างของระบบควบคุมที่ได้รับการอนุวัตขึ้น....61
40. ฟังก์ชั่นของลำดับขั้นความเป็นสมาชิกภาพที่ใช้ในโครงงานฯ....62
41. ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่พึงประสงค์ที่ใช้เป็นแบบจำลองอ้างอิงหรือ "set point"....63
42. แสดงการพิจารณาค่า Δerr....63
43. ฟังก์ชั่นแสดงลำดับขั้นความเป็นสมาชิกภาพของ Δerr....64
44. กร๊าฟแสดงลำดับขั้นความเป็นสมาชิกภาพสำหรับการปรับระดับอินพุทด้วย F_P....66
45. การทำงานของตัวควบคุม f^+PID....68
46. แสดงรายละเอียดของไฟล์ su0.obj....77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

47. แสดงรายละเอียดของไฟล์ su1.obj 78
48. แผนภาพบล็อคแสดงการทดสอบระบบเชิงแปรตามคำสั่ง 81
49. ผลตอบสนองที่พึงประสงค์หรือ"set point" 81
50. ผลตอบสนองที่สูงกว่า set point ปรากฏค่า +Δerr 82
51. ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID 82
52. ผลตอบสนองที่ต่ำกว่า set point ปรากฏค่า -Δerr 83
53. ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID 83
54. ชุดโหลดทางกล 85
55. แผนภาพบล็อคแสดงการทดสอบระบบเชิงคงตัวต่อโหลดทางกล 85
56. ผลตอบสนองเชิงคงตัวที่มีค่าสูงกว่า set point ปรากฏค่า +Δerr 86
57. ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID 86
58. ผลตอบสนองเชิงคงตัวที่มีค่าต่ำกว่า set point ปรากฏค่า -Δerr 87
59. ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID 87
60. ชุดโหลดทางไฟฟ้า 89
61. แผนภาพบล็อคแสดงการทดสอบระบบเชิงคงตัวต่อโหลดทางกลร่วมกับโหลดทางไฟฟ้า 89
62. ผลตอบสนองเชิงคงตัวที่มีค่าสูงกว่า set point ปรากฏค่า +Δerr 90
63. ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID 90
64. ผลตอบสนองเชิงคงตัวที่มีค่าต่ำกว่า set point ปรากฏค่า -Δerr 91
65. ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID 91
66. แสดงความชันของสัญญาณให้การควบคุม เมื่อค่า F_I เปลี่ยนไป 96
67. วงจรนอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ อัตราขยาย 3/7 เท่า 110
68. วงจรนอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ อัตราขยาย $1+(R_2/R_1)$ 111
69. โลว์พาสส์ฟิลเตอร์อันดับหนึ่ง 112
70. แสดงรายละเอียดของไฟล์ test1.obj 115
71. แสดงรายละเอียดของไฟล์ test2.obj 117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในวงการอุตสาหกรรม ระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง จะมีลักษณะเป็นระบบควบคุมวงรอบปิดที่มีรูปลักษณ์ตายตัว กล่าวคือจะมีตัวควบคุมอยู่ในตำแหน่งวิถีป้อนไปข้างหน้า (forward path) ซึ่งจะรับค่าความคลาดเคลื่อน (error signal) ไปดำเนินการเพื่อผลิตสัญญาณควบคุม (control signal) ให้กับกระบวนการต่อไป ตัวควบคุมดังกล่าวส่วนใหญ่จะได้รับการออกแบบมาตั้งแต่ต้น ซึ่งจะมีลักษณะเป็นชนิดที่มีค่าพารามิเตอร์คงที่ โดยจะยึดถือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุมรวมถึงทรานสดิวเซอร์ ในลักษณะของทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่น (transfer function) หรือสมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) เป็นหลักนิยม ในกรณีที่ระบบควบคุมดังกล่าวถูกใช้งานไปเป็นเวลานาน เนื่องจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อมของการปฏิบัติงาน รวมทั้งอายุการใช้งานขององค์ประกอบต่างๆในระบบ อาจทำให้ค่าพารามิเตอร์เกิดเปลี่ยนแปลงไป ยังผลทำให้สมรรถนะของระบบมีคุณภาพต่ำลง ตัวควบคุมเดิมไม่สามารถที่จะปรับพารามิเตอร์ให้รักษาคุณภาพของผลตอบสนองไว้ได้ เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นจึงต้องหยุดการปฏิบัติงานลง เพื่อปรับแต่งตัวควบคุมกันใหม่ซึ่งเป็นเรื่องยุ่งยากซับซ้อน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีตัวควบคุมประเภทที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ไปตามสภาพแวดล้อมได้ด้วยตัวเอง (adaptive controller) ก็ยังไม่ได้ถูกประยุกต์ใช้ในวงการอุตสาหกรรมมากนัก วิธีการหนึ่งซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาข้างต้นได้โดยไม่จำเป็นต้องหยุดการปฏิบัติงานของระบบลง คือการปรับคุมระบบด้วยการปรับระดับของอินพุทจากทางภายนอกวงรอบปิดของการควบคุม วิธีการดังกล่าวมีข้อดีในเรื่องที่ไม่จำเป็นที่จะต้องไปปรับรื้อระบบเดิมที่เป็นอยู่ และถ้าหากว่ามีความเข้าใจถึงกลไกการปรับแต่งระดับของอินพุทเป็นอย่างดีแล้ว ก็สามารถที่จะอนุวัตกลไกดังกล่าวให้ทำงานโดยอัตโนมัติกับระบบในทางปฏิบัติได้ แนวคิดในเรื่องการปรับแต่งระดับอินพุทนี้จะกล่าวในรายละเอียดอีกครั้งในบทที่ 2 หัวข้อที่ 1

1. วัตถุประสงค์และเค้าโครงของโครงงานวิทยานิพนธ์

โครงงานวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่ตั้งอยู่บนรากฐานของการควบคุมแบบดิจิตอลเชิงตรง (direct digital control, DDC) โดยที่กระบวนการภายใต้การควบคุมจะเป็นดีซีมอเตอร์พล้านท์ ตัวควบคุมภายในวงรอบปิดของระบบถูกเลือกใช้เป็นตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) ชนิดพารามิเตอร์ตายตัวที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วยภาษาแอสเซมบลี้ Z180CPU และประยุกต์แนวคิดวิธีการปรับแต่งระดับอินพุทเข้ากับระบบที่สร้างขึ้น เพื่อปรับปรุงคุณภาพของอาการตอบสนองของระบบเมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบภายในวงรอบปิดเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นจะมีความหมายที่สมนัยกับระบบควบคุมที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม กลไกการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพของอาการตอบสนอง จะให้การตัดสินใจในเรื่องการพิจารณาปรับระดับอินพุทไปในทิศทางใด โดยอาศัยเทคนิคเชิงฟัซซี่ (fuzzy technique) เข้ามาดำเนินการปฏิบัติ เพราะถือว่าเป็นหนทางหนึ่งที่สามารถกระทำได้

ลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงานโครงงานวิทยานิพนธ์

- จัดสร้างระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์ ที่มีตัวควบคุมเป็นพีไอดีแบบดิจิตอลชนิดเวลาจริง (real time) อยู่ภายในวงรอบปิด โดยที่ตัวควบคุมดังกล่าวจะได้รับการประดิษฐ์ขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU ตัวควบคุมพีไอดีจะถูกกำหนดให้มีค่าพารามิเตอร์ตายตัว ซึ่งมีความหมายสอดคล้องกับตัวควบคุมที่ใช้งานกันส่วนใหญ่ในภาคอุตสาหกรรม

- ศึกษากลไกและผลจากการปรับแต่งระดับอินพุท ที่มีต่ออาการตอบสนองของระบบในโดเมนเวลา เพื่อใช้เป็นรากฐานในการออกแบบและสร้างฟัซซี่อัลกอริธึม (fuzzy algorithm) เพื่อให้การเลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์

- อนุวัตฟัซซี่อัลกอริธึมด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ Z180CPU ในลักษณะที่ทำงานบนเวลาจริง และทำการทดสอบสมรรถนะของระบบที่ได้รับการพัฒนาขึ้น

ผลการทดสอบที่ได้จะเอื้อประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการในภาคอุตสาหกรรมโดยตรง สำหรับในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้สิ่งที่ต้องพึงระลึกไว้เสมอคือข้อสมมุติต่างๆ ดังต่อไปนี้

1). โครงสร้างหรือรูปลักษณ์ของวงรอบปิดของการควบคุมเดิม (กระบวนการภายใต้การควบคุมและตัวควบคุมพีไอดี) นั้นมีลักษณะที่ตายตัว ยากที่จะดัดแปลงแก้ไขใดๆ

2). การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีในวงรอบปิดของการควบคุมเดิม มีความหมายโดยนัยว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบขึ้น

3). ระบบควบคุมที่สร้างขึ้น เป็นระบบที่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบธรรมดาได้ในตอนแรกเท่านั้น แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบไปแล้ว จะไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบธรรมดาได้อีกต่อไป

4). การควบคุมแบบฟัซซี่ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic controller,FLC) และการอนุมานเชิงฟัซซี่ (fuzzy inference) เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถปฏิบัติการกับระบบที่ไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบธรรมดาได้

2. การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบขึ้นด้วย 6 บท และ 5 ภาคผนวก

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงวัตถุประสงค์และเค้าโครงของโครงงานวิทยานิพนธ์ รวมทั้งข้อสมมุติต่างๆ ที่ตั้งขึ้นเพื่อให้โครงงานฯดำเนินไปอย่างบรรลุเป้าหมายด้วยดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 กล่าวถึงแนวคิดของการควบคุมแบบคงตัว และการควบคุมแบบแปรตามคำสั่ง การประยุกต์ระเบียบวิธีของไอเทลเบิร์กเข้ากับโครงงานวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังกล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุม (ดีซีมอเตอร์พล้านท์) และสุดท้ายกล่าวถึงองค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ที่ พัฒนาขึ้น รวมถึงการทดสอบองค์ประกอบดังกล่าวอีกด้วย

บทที่ 3 กล่าวถึงการสังเคราะห์อัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดีแบบทั่วไป และที่ได้รับการนำเสนอโดยไอเทลเบิร์ก ในโดเมน z หรือสมการดิฟเฟอเรนซ์ (difference equation) การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบดิจิตอลชนิดเวลาจริง ตามโครงสร้างที่ได้รับการนำเสนอโดยไอเทลเบิร์ก ด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม และการรีดีไซน์เพื่อเฟ้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ การอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ Z180CPU รวมทั้งให้การทดสอบ และกล่าวถึงการทดสอบการปรับแต่งระดับอินพุทที่ส่งผลกระทบต่ออาการตอบสนองของระบบในโดเมนเวลา อันจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบและอนุวัต FLC

บทที่ 4 กล่าวถึงการนำเอาเทคนิคเชิงฟัซซี่มาประยุกต์ใช้ควบคุมระบบ การออกแบบฟัซซี่อัลกอริธึมเพื่อบ่งบอกคุณภาพอาการตอบสนอง และฟัซซี่อัลกอริธึมเพื่อปรับแต่งสมรรถนะ การอนุวัตอัลกอริธึมดังกล่าวในลักษณะการปฏิบัติงานบนเวลาจริง ด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ Z180CPU

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น ทั้งในเชิงแปรตามคำสั่ง (ไร้ภาระกรรม) และเชิงคงตัว (มีภาระกรรม) เมื่อเกิดเหตุการณ์เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในวงรอบปิดของการควบคุมขึ้น และให้การอภิปราย

บทที่ 6 เป็นบทสรุป และเสนอแนะแนวทางการดำเนินงานวิจัยในขั้นต่อไป

ผนวก ก. แสดงการคำนวณขนาด และเวลาในการเอกซิคิวท์ของโปรแกรมให้การควบคุมต่าง ๆ ที่ประดิษฐ์ขึ้น

ผนวก ข. แสดงการออกแบบส่วนกรองสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยนอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ (non-inverting amplifier) และโลว์พาสส์ฟิลเตอร์ (low-pass filter)

ผนวก ค. แสดงโปรแกรมให้การทดสอบกระบวนการภายใต้การควบคุม และส่วนกรองสัญญาณ

ผนวก ง. เป็นการรวมผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาระดับปริญญาโท

ผนวก จ. เป็นบทความ "ฟัซซี่ลอจิกกับระบบควบคุม" ของ รศ.ดร.สราวุฒิ สุจิตจร ที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารเทคโนโลยีสุรนารี ปีที่ 2 ฉบับที่ 3, กันยายน-ธันวาคม 2538, หน้า 171-196.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
แนวคิดในเรื่องการคงตัวและแปรตามคำสั่ง และการประยุกต์วิธีการของไอเทลเบิร์ก

ในโลกของวิศวกรรมระบบควบคุม มีลักษณะงานการควบคุมที่สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้สองแนวทางด้วยกันคือ การควบคุมแบบคงตัว (regulating control) และการควบคุมแบบแปรตามคำสั่ง (tracking control) วัตถุประสงค์ของการควบคุมแบบคงตัว คือต้องการคงค่าผลตอบสนองของระบบให้มีความคงทนต่อภาระกรรม (load) ต่างๆ และรวมถึงสิ่งรบกวนระบบ (disturbance) ที่อาจเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดเวลา ลักษณะของงานในเชิงการควบคุมแบบคงตัว ได้แก่การควบคุมบันไดเลื่อนในห้างสรรพสินค้า การควบคุมลิฟท์ เป็นต้น ซึ่งงานดังกล่าวจะต้องมีการควบคุมความเร็วให้คงที่ ไม่ว่าจะมีผู้โดยสารหรือสิ่งของสัมภาระเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม แต่ทั้งนี้และทั้งนั้นก็ขึ้นอยู่กับขีดจำกัดทางสมรรถนะของระบบด้วย

วัตถุประสงค์ของการควบคุมแบบแปรตามคำสั่ง คือต้องการแปรผลตอบสนองของระบบให้เฝ้าติดตามคำสั่งอินพุทที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างของลักษณะงานควบคุมแบบแปรตามคำสั่งได้แก่ ระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตามดวงอาทิตย์ ระบบดังกล่าวจะต้องมีการควบคุมให้ระนาบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ปรับในลักษณะตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ อย่างมีความสอดคล้องกับการหมุนของโลกซึ่งเคลื่อนตัวเองอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้สามารถรับแสงจากดวงอาทิตย์ได้มากที่สุด

สำหรับงานควบคุมที่ใช้การควบคุมทั้งสองประเภทรวมกัน เช่นระบบควบคุมจรวดนำวิถี ระบบดังกล่าวมีสิ่งที่จะต้องควบคุมให้คงตัว และสิ่งที่จะต้องควบคุมให้แปรตามคำสั่งหรือเฝ้าติดตาม ในกรณีของการควบคุมแบบคงตัว คือปรารถนาที่จะคงค่าผลตอบสนองให้มีความคงทนต่อ ลม หมอก ฝน ฯลฯ เหล่านี้ถือเป็นภาระกรรมและสิ่งรบกวนระบบที่อาจเกิดขึ้นกับตัวจรวดเอง และสำหรับการควบคุมแปรตามคำสั่งสิ่งที่ปรารถนาที่จะให้เฝ้าติดตามคือเป้าหมายข้าศึกที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เป็นต้น

ในการควบคุมระบบพลวัตใดๆให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการควบคุมทั้งทางการคงตัว และแปรตามคำสั่ง สิ่งที่เป็นปัญหาสำคัญที่สุดข้อหนึ่ง คือการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ทางพลวัตของระบบ ทั้งนี้หมายรวมถึงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุมเอง และหรือค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอันอาจสืบเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อมและอายุการใช้งาน ยังผลทำให้สมรรถนะของระบบมีคุณภาพต่ำลง สิ่งที่น่าสนใจในกรณีเช่นนี้คือ เราจะปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้นได้อย่างไร สำหรับในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมาก ตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบมาตั้งแต่ดั้งเดิม จะได้รับการติดตั้งไว้ในวงรอบของการควบคุม (control loop) ในลักษณะที่ให้ใครเข้าไปจับต้องแก้ไขได้ยาก หรืออาจเป็นไปไม่ได้เลย หรือตัวควบคุมอาจถูกออกแบบมาให้มีการปรับแต่งได้แต่ต้องหยุดการทำงานของระบบก่อนเมื่อเกิดกรณีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งยังความเสียหายต่อธุรกิจการผลิต สูญเสียเวลาและ

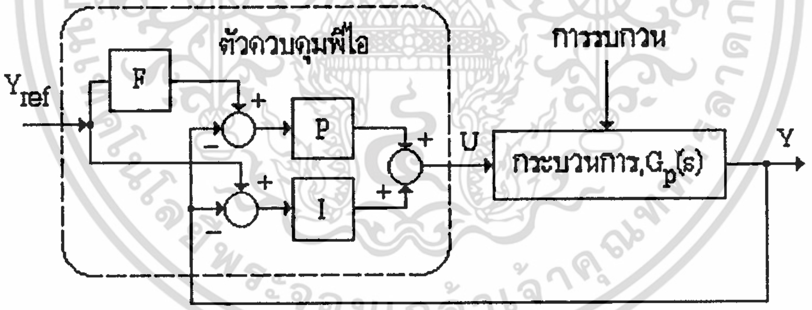
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าใช้จ่ายในการดัดแปลงแก้ไข ปัญหาที่กล่าวมาทั้งหมดได้รับการนำเสนอวิธีการแก้ไข ซึ่งเป็นทางออกที่ดีทางหนึ่งในวงการอุตสาหกรรมโดยไอเทลเบิร์ก [5]

1. แนวคิดและวิธีการของไอเทลเบิร์ก

ไอเทลเบิร์กได้นำเสนอแนวคิดวิธีการแก้ไขปัญหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งยังผลทำให้ผลตอบสนองของระบบมีคุณภาพต่ำลง ในปี ค.ศ.1987 เพื่อประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยเสนอให้มีการปรับแต่งระดับอินพุทที่ค่าต่างๆจากทางภายนอกวงรอบการควบคุม แล้วส่งผ่านไปยังตัวควบคุมเดิมเพื่อปรับคุมระบบโดยขณะปฏิบัติการนั้นไม่ต้องหยุดการทำงาน เพราะระดับของอินพุทที่ค่าต่างๆนั้นสามารถปรับแต่งได้จากทางภายนอกโดยตรง อีกทั้งยังไม่จำเป็นที่จะต้องไปปรับรื้อระบบเดิมที่มีอยู่

ในบทความที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอนั้น ได้สาธิตการปรับแต่งระดับอินพุทกับระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) การปรับระดับอินพุทกระทำโดยการปรับค่าเกน F ที่สัมพันธ์กับองค์ประกอบพี (P-element) เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอ ตามที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอ

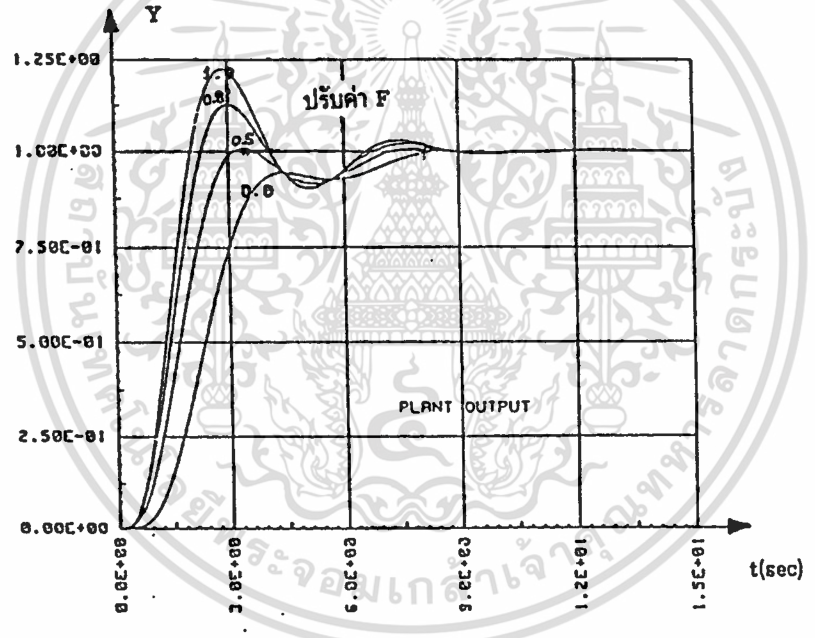
จากรูปที่ 1 ในส่วนของกระบวนการภายใต้การควบคุม ถูกกำหนดให้เป็น

$$G_p(s) = \frac{1}{(1+s)(1+\frac{1}{3}s)^3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนขององค์ประกอบพี และองค์ประกอบไอ มีโครงสร้างเป็น K_P และ $\frac{K_I}{s}$ ตามลำดับ โดยกำหนดให้ K_P มีค่าเป็น 1.35 และ K_I มีค่าเป็น 0.894 รูปที่ 2 แสดงผลการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อทำการปรับแปรค่า F ไปที่ค่าต่างๆ

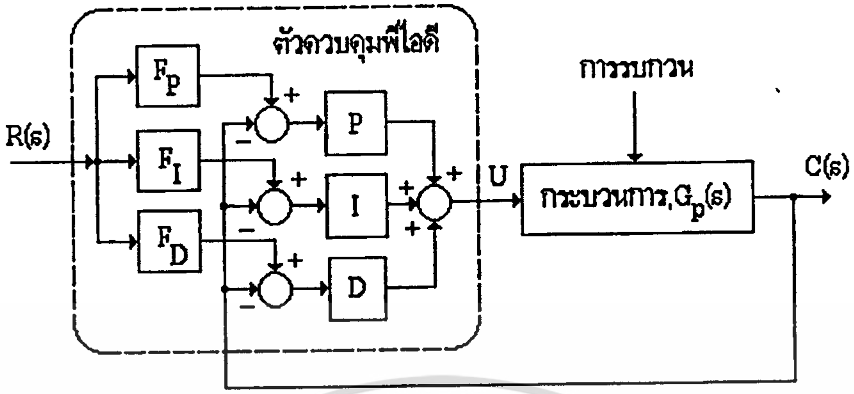
จากรูปที่ 2 สังเกตเห็นว่าเมื่อค่า F = 1 (ค่า Y_{ref} ผ่านเข้าสู่องค์ประกอบพี เป็น 100%) ผลตอบสนองในโดเมนเวลาจะให้ค่าการพุ่งเกิน (overshoot) ประมาณ 18% แต่เมื่อทำการปรับระดับอินพุท ที่สัมพันธ์กับองค์ประกอบพีโดยตรง ด้วยการปรับแปรค่า F ไปที่ 0.8, 0.5 และ 0.0 (ค่า Y_{ref} ผ่านเข้าสู่องค์ประกอบพี คิดเป็น 80%, 50% และ 0% ตามลำดับ) จะช่วยให้ผลตอบสนองมีค่าการพุ่งเกินลดน้อยลงได้ อย่างไรก็ตามผลพวงที่ตามมาจากการปรับค่า F ดังกล่าวจะทำให้ค่าเวลาในการไต่ระดับ (t_r ; rise time), ค่าเวลาหน่วง (t_d ; delay time) และค่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (t_s ; settling time) เปลี่ยนแปลงไปด้วย



รูปที่ 2 ผลตอบสนองของระบบในรูปที่ 1 เมื่อค่า F เปลี่ยนแปลงไป

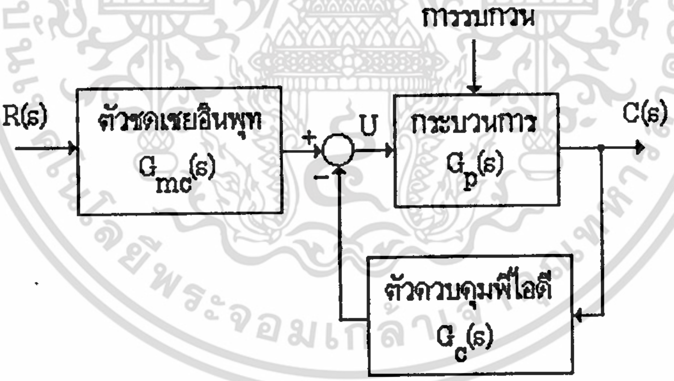
ข้อเสนอของไอเทลเบิร์กนับว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และได้รับการศึกษาขยายผลออกไปบ้างแล้วตามเอกสารอ้างอิง [22],[23],[25],[30] รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมที่ไอเทลเบิร์กได้นำเสนอโดยกำหนดให้ตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมพีไอดี และมีการปรับแต่งระดับอินพุทผสมผสานกันระหว่าง F_P,F_I และ F_D (ในบทความของไอเทลเบิร์กยังไม่มีการศึกษาวิจัย และวิเคราะห์หาข้อสรุปในเรื่องของการปรับแต่งพจน์ F ทั้งหลาย เพียงแต่นำเสนอโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีไว้เท่านั้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี ตามที่ไอเทลเบิร์กเสนอ

โดยอาศัยกรรมวิธีพีชคณิตของบล็อคไดอะแกรม วิเคราะห์ระบบควบคุมในรูปที่ 3 พบว่าระบบตามรูปที่ 3 ที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอนั้น สมมูลย์กับระบบควบคุมตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระบบควบคุมที่สมมูลย์กับระบบที่ไอเทลเบิร์กเสนอ

จากรูปที่ 4 ทำให้เราทราบว่าระบบควบคุมที่สมมูลย์กับระบบที่ไอเทลเบิร์กเสนอนั้น มีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นเป็นดังสมการที่ (2.1)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_{mc}(s).G_p(s)}{1+G_c(s).G_p(s)} \tag{2.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $G_p(s)$ คือฟังก์ชั่นของกระบวนการภายใต้การควบคุม ซึ่งจะแสดงในหัวข้อต่อไป

$G_c(s)$ คือฟังก์ชั่นของตัวควบคุมพีไอดี

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \tag{2.2}$$

เมื่อ K_P คืออัตราขยายแบบสัดส่วน

K_I คืออัตราขยายแบบอินทิเกรต

K_D คืออัตราขยายแบบดิฟเฟอเรนชิเอท

$G_{mc}(s)$ คือตัวชดเชยอินพุท (input compensator) ซึ่งมีรูปแบบเป็นตัวควบคุมพีไอดี ที่มีการดัดแปลง (modified PID-controller)

$$G_{mc}(s) = F_P K_P + \frac{F_I K_I}{s} + F_D K_D s \tag{2.3}$$

เมื่อ F_P ,F_I และ F_D คืออัตราขยายแบบสัดส่วนของสัญญาณอินพุทที่ส่งผ่านไปยังแต่ละองค์ประกอบในตัวควบคุม

ระบบควบคุมในรูปที่ 4 ได้ทำการย้ายตำแหน่งของตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งในระบบควบคุมแบบดั้งเดิมจะอยู่ในวิถีป้อนไปข้างหน้า ลงมาอยู่ในวิถีป้อนกลับ (feedback path) ซึ่งจะเป็นตัวช่วยในเรื่องของการคงค่าผลตอบสนองของระบบจากภาระกรรมต่างๆ รวมถึงสิ่งรบกวนระบบจากภายนอก แล้วทำการใส่ตัวชดเชยอินพุทเข้าที่อินพุทของวงรอบการควบคุม ซึ่งจะช่วยในเรื่องของการแปรผลตอบสนองให้เฝ้าติดตามคำสั่งของสัญญาณอินพุท ตัวชดเชยอินพุทนี้จะมีโครงสร้างเป็นตัวควบคุมพีไอดีเช่นกัน แต่มีการดัดแปลงแก้ไข สำหรับกลไกการปรับแต่งสมรรถนะของระบบตามข้อเสนอของไอเทลเบิร์ก คือการปรับอัตราขยายแบบสัดส่วน F_P, F_I และ F_D หรือการปรับแต่งน้ำหนักอินพุท ของ $G_{mc}(s)$ นั่นเอง ซึ่งเมื่อพิจารณาดูจะพบว่าการปรับดังกล่าวนั้นหมายถึงการปรับแปรตำแหน่งของซีโร่ (zeros) ในทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่น เพื่อนำผลหรืออิทธิพลของซีโร่ไปลบล้างอิทธิพลของโพล (poles) ตัวที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสมรรถนะของระบบนั่นเอง โดยเฉพาะตัวควบคุมพีไอดีนั้นมีซีโร่ 2 ตัว ซึ่งสามารถปรับแปรในลักษณะให้เป็นค่าจริงซ้ำกัน ค่าจริงไม่ซ้ำกัน หรือเป็นค่าจินตภาพได้ครอบคลุมทุกกรณีของจำนวนเชิงซ้อน ทั้งนี้ถ้าได้รับการศึกษาวิเคราะห์อย่างลึกซึ้งอาจนำไปสู่ความรู้ในเรื่องของการจัดวางตำแหน่งซีโร่ให้เหมาะสม (zeros-placement) เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้นได้อีกด้วย

ผลการศึกษาวิจัยเรื่องการปรับแต่งระดับอินพุทด้วยเทอม F_P ,F_I และ F_D ผสมผสานกันตามการนำเสนอโครงสร้างตัวควบคุมโดยไอเทลเบิร์กในรูปที่ 3 นั้นได้ปรากฏในเอกสารอ้างอิง [30] ซึ่งส่วนหนึ่งของเอกสารดังกล่าว เป็นการศึกษาวิจัยขยายผลต่อจากงานที่ไอเทลเบิร์กได้เคยจำลองระบบไว้ด้วยโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอร์ในกรณีตัวควบคุมพีไอมาแล้ว งานวิจัยในเอกสารอ้างอิงดังกล่าวได้ใช้กระบวนการภายใต้การควบคุมและตัวควบคุมพีไอดี ที่มีการปรับแต่งสัดส่วนสัญญาณอินพุทเป็นวงจรอิเล็คทรอนิคส์แบบอนาลอค และทำการทดสอบกับสัญญาณอินพุทแบบขั้นบันได เพื่อดูผลตอบสนองในโดเมนเวลา ผลการทดสอบพอสรุปได้ว่า "การปรับ F_P จะส่งผลมากที่สุดต่อการลดทอนการพุ่งเกิน และการสั่นไกว (oscillated) ที่ปรากฏในการตอบสนอง ซึ่งเป็นการปรับเพื่อลดระดับสัญญาณอินพุท การปรับ F_I อาจให้ประโยชน์ในแง่ของการเพิ่มระดับสัญญาณอินพุทเกิน 100% เพื่อนำไปชดเชยกับความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวที่อาจปรากฏได้จากการปรับ F_P มากๆ การปรับ F_D จะช่วยในเรื่องของการปรับเรียบการตอบสนองในย่านการไต่ระดับช่วงต้นเท่านั้น" อย่างไรก็ตามวิธีการควบคุมที่ได้รับการนำเสนอโดยไอเทลเบิร์ก ควรได้รับการประยุกต์ใช้กับระบบพลวัตที่แปลกแยกออกไป เพื่อวิเคราะห์หากลยุทธ์ต่างๆในการควบคุมให้มีประสิทธิผลมากยิ่งขึ้น ในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์วิธีการควบคุมดังกล่าวเพื่อปรับแต่งสมรรถนะของระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์ เมื่อเกิดปัญหาในเรื่องการแปรเปลี่ยนของค่าพารามิเตอร์ของระบบขึ้น ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุม

2.3 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุม เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะจะเป็นตัวบ่งบอกถึงพฤติกรรมทางพลวัตของระบบ อีกทั้งยังเป็นพื้นฐานของการออกแบบตัวควบคุมที่อาศัยเทคนิควิธีการแบบอมตะ (classical method) ที่ต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการในรูปของสมการดิฟเฟอร์เรนเชียล หรือทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นโดเมน s [4],[7],[9],[11],[21],[26] สำหรับกระบวนการที่ใช้ในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นดีซีมอเตอร์ ของบริษัท ซันโย เดนกิ (Sanyo Denki Co.,Ltd.) รุ่น U178T ซึ่งมีทาโคเยนเนอเรเตอร์ (tachogenerator) ต่อคู่ควบอยู่ภายใน ผนวกกับตัวขับรุ่น PDT-203-30 ของบริษัทเดียวกัน [14],[16] และร่วมกับส่วนกรองสัญญาณ ซึ่งได้พัฒนาขึ้นมาประกอบ รูปที่ 5 แสดงแผนภาพบล็อคของกระบวนการภายใต้การควบคุม

จากรูปที่ 5 ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของกระบวนการภายใต้การควบคุม แสดงดังสมการที่ (2.4)

$$G_p(s) = \frac{E_o(s)}{E_a(s)} = \frac{K_a K_t K_n K_f}{(1+\tau_a s)\left\{(L_a J)s^2 + (R_a J + L_a B)s + (R_a B + K_t K_b)\right\}} \tag{2.4}$$

ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

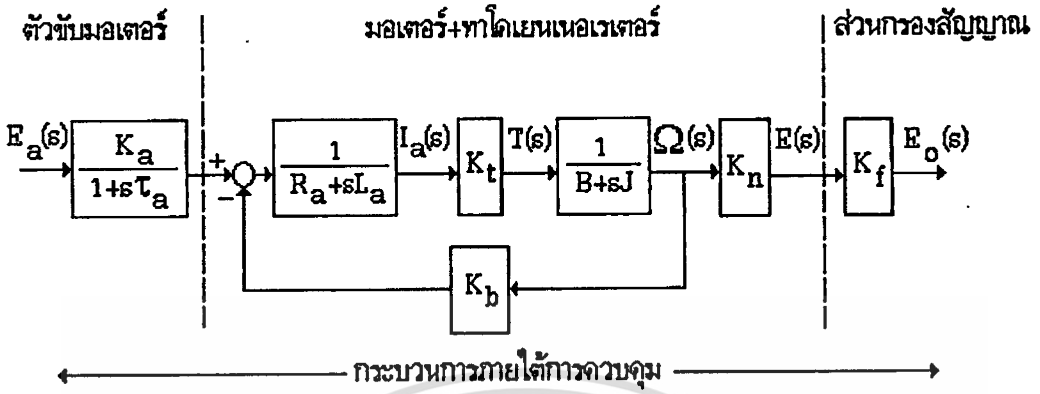
- มอเตอร์

K_t คือค่าคงที่แรงบิด เท่ากับ 2.24 Kg-cm/A

K_b คือค่าคงที่แรงดันกลับอีเอ็มเอฟ เท่ากับ 23 V/Krpm

J คือค่าโมเมนต์แรงเฉื่อย เท่ากับ 2.1 g-cm-s^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 กระบวนการภายใต้การควบคุม

R_a คือค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 3.1 Ω

L_a คือค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 4.7 mH

τ_m คือค่าคงที่เวลาทางกล เท่ากับ 12 ms (τ_m = J/B, B คือค่าความฝืดวิสคอร์ส)

K_n คือค่าคงที่ของทาโคเยนเนอเรเตอร์ เท่ากับ 0.1 V/Krpm

- ตัวขับ

K_a คือค่าคงที่ตัวขับ เท่ากับ 10

τ_a คือค่าคงที่เวลาของตัวขับ เท่ากับ 85 ms

ค่าพารามิเตอร์ของตัวขับได้มาจาก [16] และการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรม MATLAB [18],[19],[20] (ผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดของโปรแกรม MATLAB รวมทั้งการใช้งานโปรแกรมได้จากเอกสารอ้างอิงดังกล่าว) ประกอบ

- ส่วนกรองสัญญาณ

เป็นส่วนที่พัฒนาขึ้นภายหลัง มีโครงสร้างเป็นโลว์พาสส์ฟิลเตอร์ (low-pass filter) ผนวกกับนอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ (non-inverting amplifier) เพื่อกรองสัญญาณจากทาโคเยนเนอเรเตอร์ให้เรียบ และปรับลดระดับแรงดันที่ได้ลง 3/7 เท่า เพื่อให้สอดรับกับขีดจำกัดทางสมรรถนะของฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้น ดังจะได้กล่าวถึงส่วนกรองสัญญาณอีกครั้งในหัวข้อที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของส่วนกรองสัญญาณจะมีเพียงค่าเกนเท่านั้น ส่วนค่าเวลาหน่วง (delay time) นั้นน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ (ดูรูปที่ 19 หัวข้อที่ 4 การทดสอบส่วนกรองสัญญาณ ประกอบ)

K_f คือค่าเกนของส่วนกรองสัญญาณ มีค่าประมาณ 0.43 (3/7 เท่า)

แทนค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ตัวขับ และส่วนกรองสัญญาณ ลงในสมการที่ (2.4) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_P(s) = \frac{E_o(s)}{E_a(s)} = \frac{1}{(1+8.5\times10^{-2}s)(1+1.77\times10^{-3}s)(1+5.55\times10^{-3}s)} \quad (2.5)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุม ที่แสดงในสมการที่ (2.5) เป็นแบบจำลองการควบคุมความเร็วของดีซีมอเตอร์ เนื่องจากใช้สัญญาณเอาท์พุทจากทาโคเยนเนอเรเตอร์ที่ได้รับการปรับเรียบจากส่วนกรองสัญญาณมาเป็นสัญญาณเอาท์พุทของระบบ และยังใช้สัญญาณดังกล่าวเป็นส่วนป้อนกลับของระบบควบคุมวงรอบปิด จากสมการที่ (2.5) ทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าว โดยการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับผลตอบสนองของระบบจากการทดสอบจริงด้วยสัญญาณอินพุทแบบขั้นบันไดขนาด 1 โวลท์ ดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ (สำหรับการทดสอบจริง จะกระทำโดยอาศัยการโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมให้การทดสอบกระบวนการสามารถดูได้จากผนวก ค.)

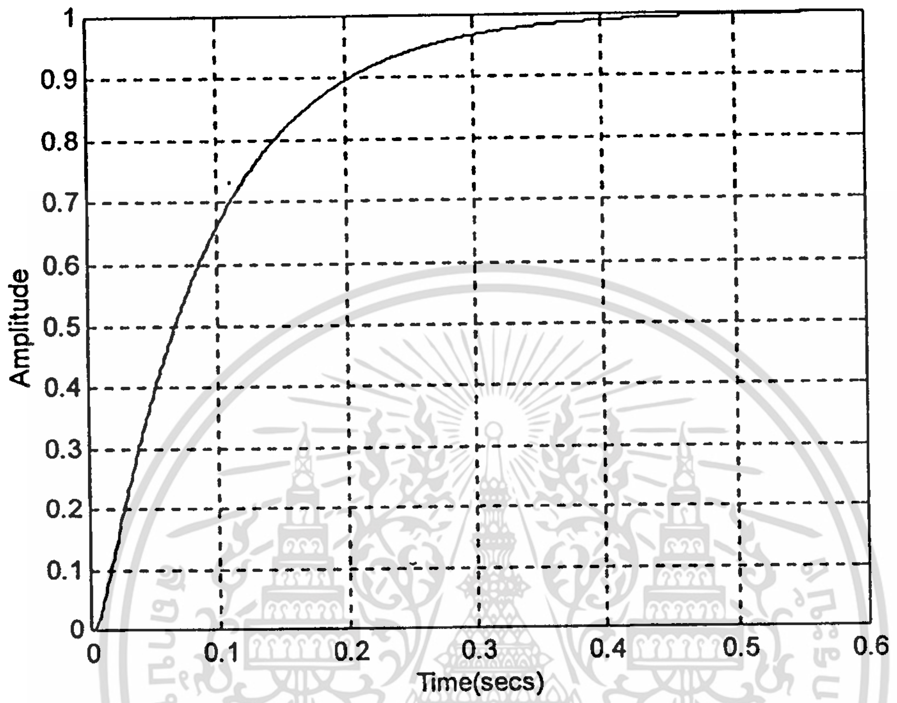
จากผลการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และผลการทดสอบกระบวนการภายใต้การควบคุม จะเห็นว่าผลที่ได้ออกมาน่าพอใจอย่างยิ่ง เพราะทั้งผลตอบสนองในสภาวะคงตัว (c_{ss} ; steady state response) และค่าเวลาในการไต่ระดับ มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก คือให้ค่าตอบสนองในสภาวะคงตัวเท่ากับ 1 และค่าเวลาในการไต่ระดับประมาณ 0.2 วินาที โดยคิดที่ 90% เนื่องจากผลตอบสนองมีลักษณะหน่วงเกิน (overdamped response) [21] เมื่อพิจารณาค่าโพลของกระบวนการ จะมี 3 ตัว ที่ค่า -11.76 , -180.18 และที่ -564.97 ค่าโพลที่ตำแหน่ง -11.76 จะส่งอิทธิพลต่อผลตอบสนองอย่างเด่นชัดกว่าสองตัวที่เหลือ เพราะโพลทั้งสองมีตำแหน่งที่อยู่ไกลออกไปจาก แกนจินตภาพเทียบกับโพลที่ -11.76 เกินสิบเท่าจนแทบจะไม่ส่งผลกระทบใดๆต่ออาการตอบสนองเลย เราอาจเรียกโพลที่ -11.76 ว่าโดมิแนนท์โพล (dominant pole) [11],[21] ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอาจถูกประมาณ (approximated) จากแบบจำลองที่มีอันดับ (order) 3 มาเป็นแบบจำลองอันดับ 1 โดยอาศัยการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ทำการหาแบบจำลองแบบประมาณของกระบวนการภายใต้การควบคุมที่มี อันดับ 1 ได้เป็นดังสมการที่ (2.6) ซึ่งมีค่าโพลอยู่ที่ตำแหน่ง -11.23 ผลตอบสนองของกระบวนการแสดงดังรูปที่ 8 จะเห็นว่าทั้งผลตอบสนองในสภาวะคงตัว และค่าเวลาในการไต่ระดับ มีค่าเท่ากับรูปที่ 6 และรูปที่ 7

$$G_p(s) = \frac{E_o(s)}{E_a(s)} = \frac{1}{(1+0.089s)} \quad (2.6)$$

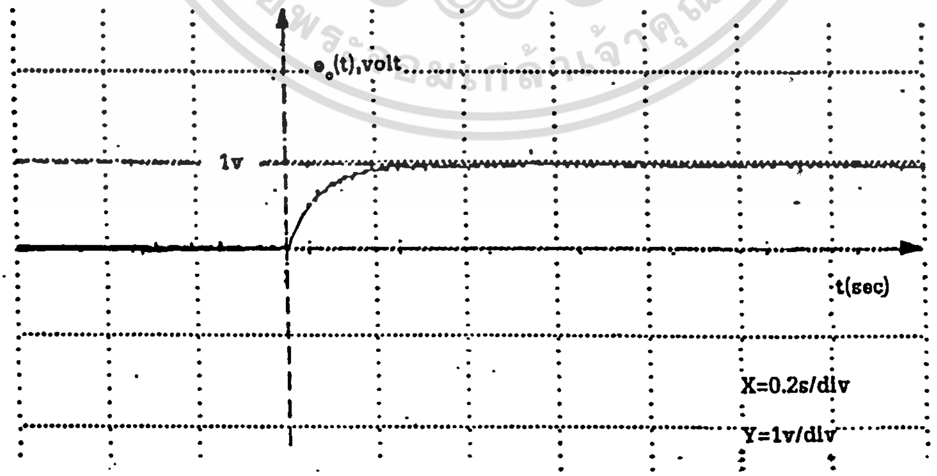
ตอนนี้เรามีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นตรงค่อนข้างสูงอยู่ 2 สมการด้วยกันคือ แบบจำลองที่มีอันดับ 3 ดังสมการที่ (2.5) และแบบจำลองที่มีอันดับ 1 ดังสมการที่ (2.6) อันจะเอื้อประโยชน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการออกแบบและสร้างตัวควบคุมซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงสถาปัตยกรรมของระบบควบคุมโดยรวมในเชิงฮาร์ดแวร์

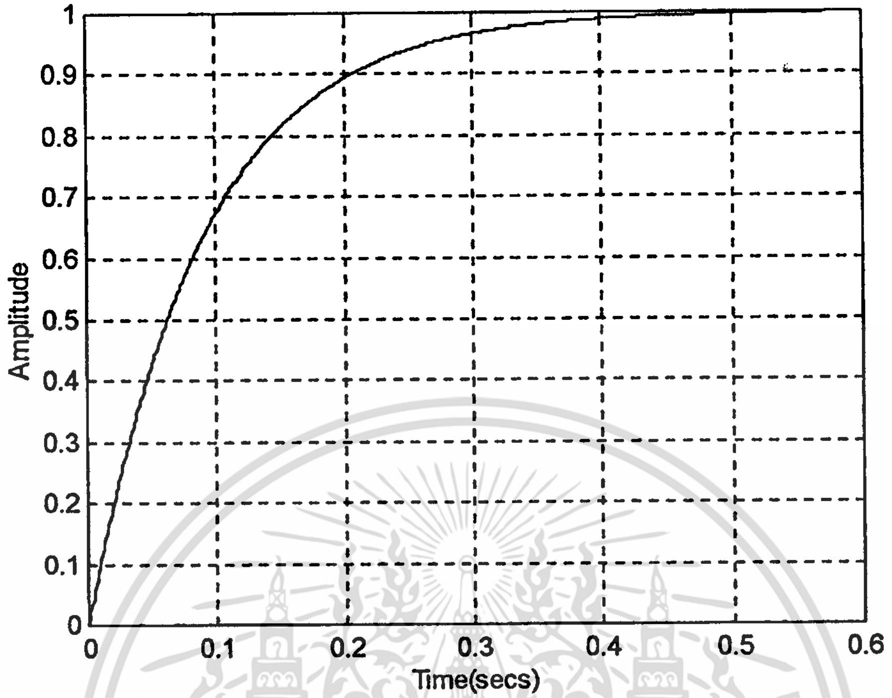


รูปที่ 6 ผลตอบสนองของกระบวนการ จากการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 7 ผลตอบสนองของกระบวนการ จากการทดสอบด้วยอินพุทแบบขั้นบันไดขนาด 1 โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 ผลตอบสนองของกระบวนการ จากโมเดลแบบประมาณด้วยโปรแกรม MATLAB

3. สถาปัตยกรรมของระบบควบคุมโดยรวมในเชิงฮาร์ดแวร์

ระบบควบคุมที่ประดิษฐ์ขึ้นในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้ เป็นระบบควบคุมแบบดิจิตอลมีโครงสร้างของระบบควบคุมตามการนำเสนอโดยไอเทลเบิร์กดังแผนภาพในรูปที่ 9 ในหัวข้อนี้จะบรรยายถึงองค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ให้เห็นเป็นรูปธรรมยิ่งขึ้น

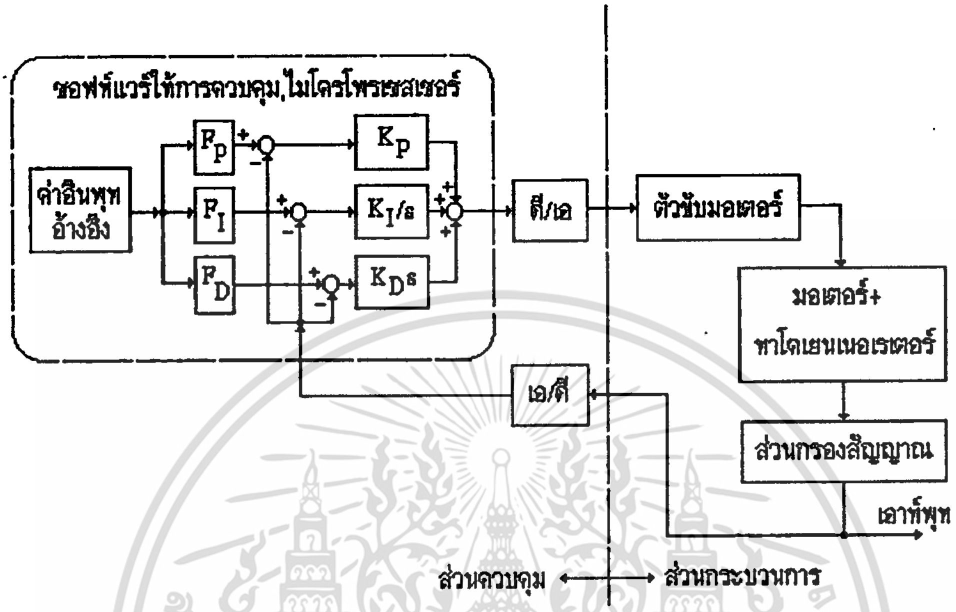
ในส่วนควบคุมนั้นประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอดี มีลักษณะเป็นซอฟท์แวร์ให้การควบคุมที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU ขนาด 8 บิต ทำงานบนอัตราสัญญาณนาฬิกา 10 MHz. เอ/ดี-ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้มีขนาดความแยกชัด (resolution) เป็น 8 บิตเช่นกัน

สำหรับในส่วนควบคุมดังกล่าว บางองค์ประกอบได้จัดสร้างเพิ่มเติมขึ้น แต่ส่วนใหญ่แล้วจะอยู่บนบอร์ดสำเร็จของบริษัท อีทีที (ETT Co.,Ltd) รุ่น CP-AT180 [13] ซึ่งสถาปัตยกรรมของบอร์ดควบคุมดังกล่าวแสดงในรูปที่ 10 จะเห็นว่าบนบอร์ดควบคุม มี เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียว และไม่มี ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ ฉะนั้นในส่วนนี้จึงได้จัดสร้างขึ้นตามวงจรที่แสดงในรูปที่ 11 และ รูปที่ 12 ตามลำดับ

เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้งาน ได้รับการสร้างขึ้นใหม่อีกหนึ่งชุดเพื่อประโยชน์ในการใช้งานสำรอง ทั้งสองตัวจะมีพอร์ทที่ใช้สำหรับการเริ่มต้นแปลงสัญญาณ (start conversion) ร่วมกันคือพอร์ท 60H-7FH สำหรับพอร์ทเอาท์พุทเอ็นเอเบิ้ล (output enable) ของ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์เดิมที่อยู่บนบอร์ดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเป็นพอร์ท 0F8H-0FBH ในขณะที่พอร์เอาท์พุทเอ็นเอเบิ้ลของ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ที่สร้างใหม่จะเป็นพอร์ท 0FCH-0FFH

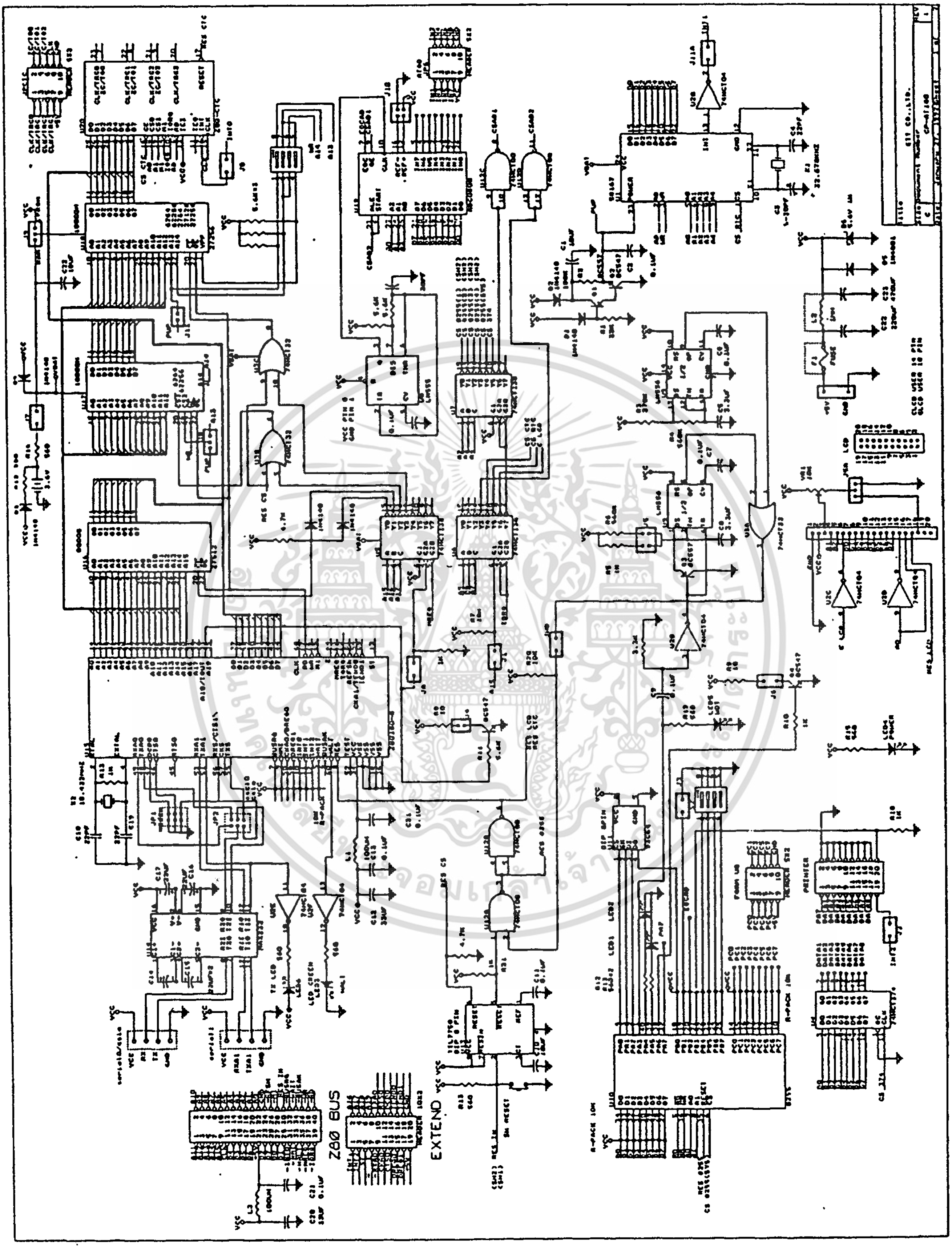


รูปที่ 9 องค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น

ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ สร้างขึ้นทั้งหมด 3 ชุด เพื่อใช้ประโยชน์ในงานจริง 1 ชุด และใช้งานสำรอง 2 ชุด โดยต่อรับข้อมูลดิจิตอลจากพอร์ท 0E8H, 0E9H และ 0EAH ของไอซี 8255PIO (ตัวที่ 3 บนบอร์ดควบคุม) ซึ่งเป็นพอร์ทสำหรับใช้งาน (user port) ของบอร์ดควบคุมในรูปที่ 10 แล้วทำการแปลงข้อมูลดังกล่าวไปเป็นสัญญาณอนาลอค เพื่อส่งไปยังส่วนกระบวนการต่อไป

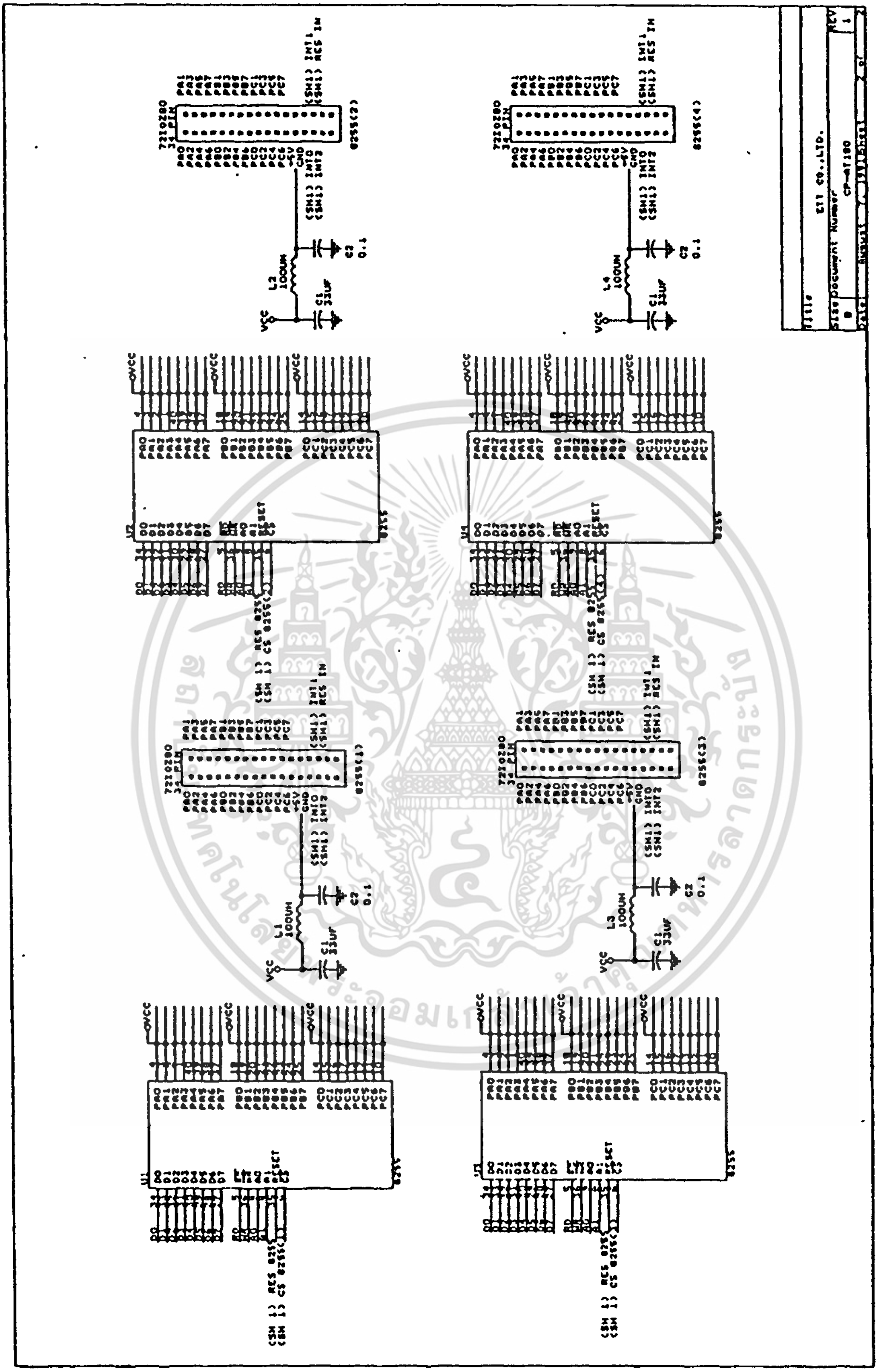
จากรูปที่ 9 ในส่วนกระบวนการ พิจารณาประกอบกับรูปที่ 5 จะเห็นว่านอกเหนือจากส่วนประกอบหลักแล้ว จะมีส่วนกรองสัญญาณเพิ่มเข้ามา ส่วนกรองสัญญาณดังกล่าวจะมีโครงสร้างเป็นโลว์พาสส์ฟิลเตอร์ (low-psaa filter) ผนวกกับ นอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ (non-inverting amplifier) ดังรูปที่ 13 (รายละเอียดของวงจรและการออกแบบ ผู้อ่านสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ข. และเอกสารอ้างอิง [6],[9]) ทำหน้าที่กรองสัญญาณที่ได้รับมาจากทาโคเยนเนอเรเตอร์ ซึ่งค่อนข้างจะมีสัญญาณรบกวน (noise) อยู่มาก และอาจเป็นผลสืบเนื่องไปถึงค่าความผิดพลาด ในการแปลงสัญญาณดังกล่าวไปเป็นค่าดิจิตอล (ดังจะได้แสดงรายละเอียดผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4) และทำหน้าที่ลดระดับสัญญาณลง 3/7 เท่า (ประมาณ 0.43) เพื่อประโยชน์ในเรื่องขีดจำกัดในระดับสัญญาณอินพุทของ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ รวมถึงตัวขับ (driver) จะรับได้ (แรงดันสูงสุดที่ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์จะรับได้คือ 5 โวลท์ เท่ากับแรงดันสูงสุดที่จ่ายให้ตัวมันเองและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 แผนภาพวงจรของบอร์ดควบคุม CP-AT180

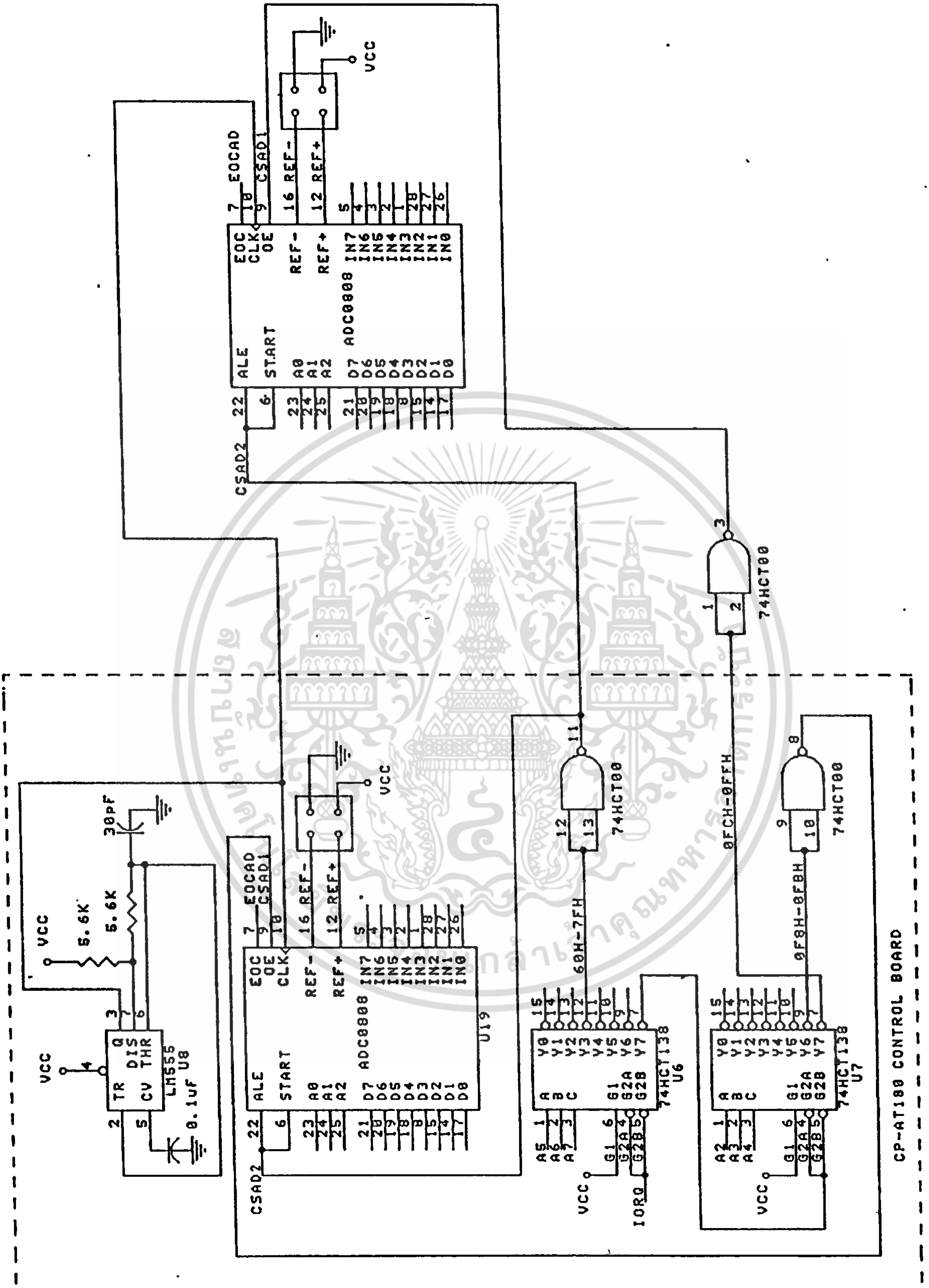
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

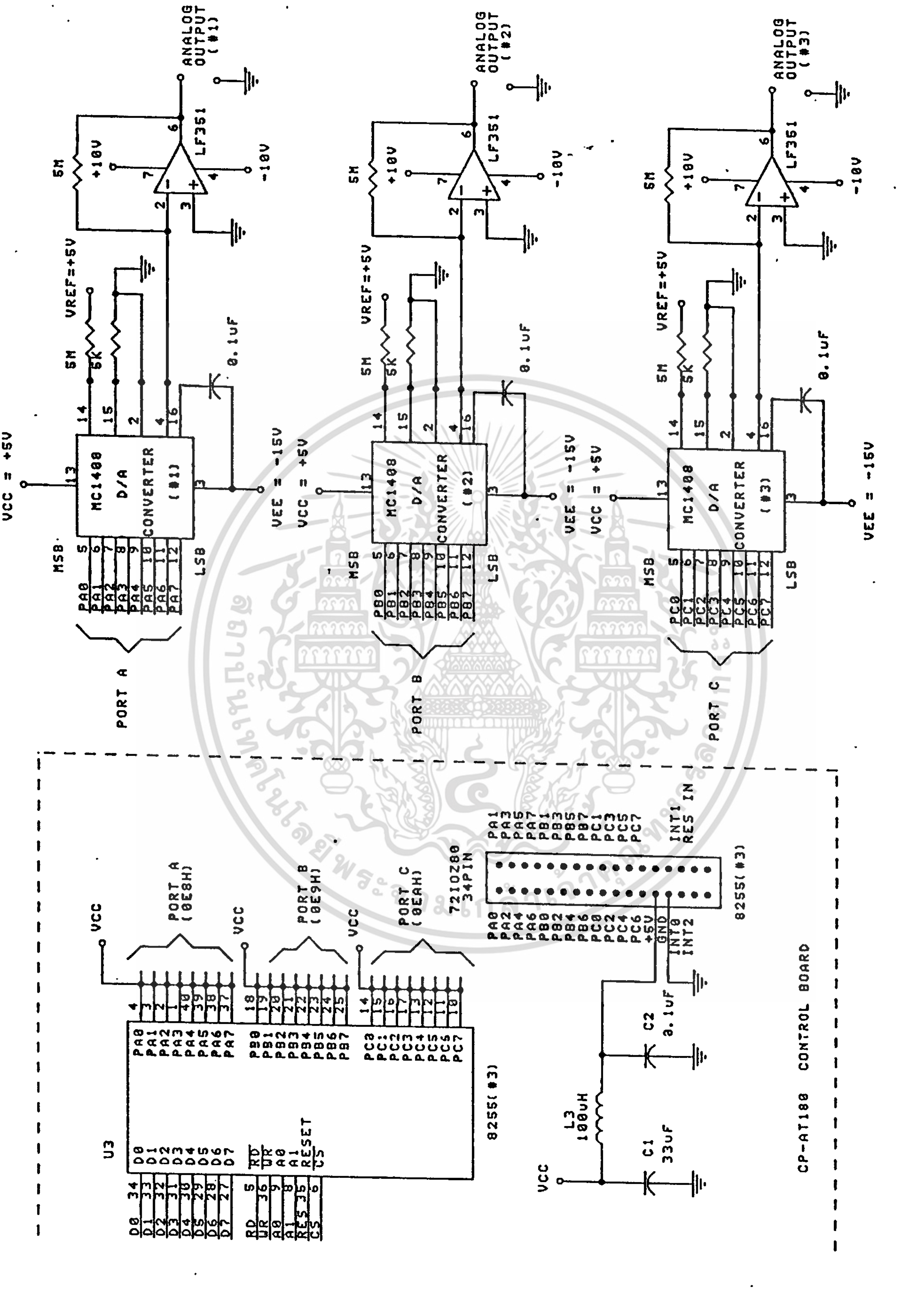
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 11 แผนภาพวงจร เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์

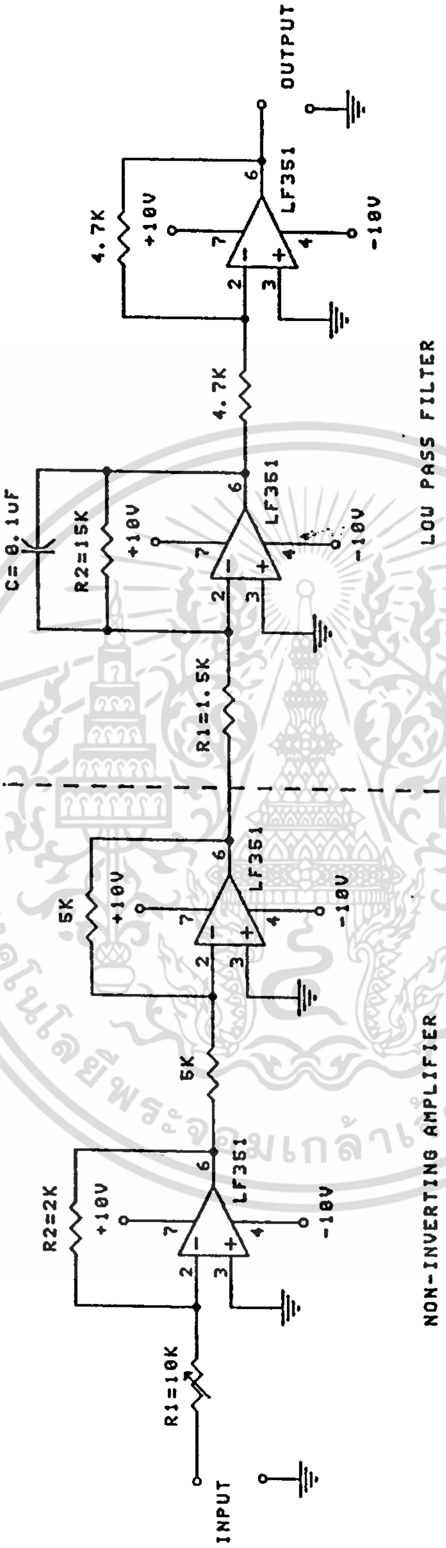
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28800



รูปที่ 12 แผนภาพวงจร ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 แผนภาพวงจรส่วนกรองสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวขับมอเตอร์รับแรงดันได้สูงสุดประมาณ 3-5 โวลท์) ถ้าไม่มีส่วนปรับลดระดับแรงดัน ซึ่งแฝงตัวอยู่ในส่วนกรองสัญญาณ อาจเกิดปัญหาในเรื่องการอิ่มตัว (saturation) ในตัวขับและ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งถือเป็นขีดจำกัดในทางปฏิบัติ อีกประการหนึ่งคือ ถ้าทำการปรับระดับแรงดันดังกล่าวด้วยสัดส่วน 3/7 เท่า จะทำให้เข้าใจระบบได้โดยง่ายในเรื่องของการสเกล (scaling) เพราะอัตราส่วนระหว่างเอาท์พุทต่ออินพุทของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 1

รูปที่ 14-18 เป็นภาพถ่ายแสดงถึงองค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้

4. การทดสอบองค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้น

องค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นคือ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ และส่วนกรองสัญญาณ ผลการทดสอบองค์ประกอบต่างๆได้รับการบรรยายตามลำดับ ดังต่อไปนี้

เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 11 วงจรคอนเวอร์เตอร์ในงานนี้ใช้ไอซีเบอร์ ADC0808 ซึ่งเป็น เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ขนาด 8 บิต 8 แชนแนลล์ เบอร์เดียวกับที่อยู่บนบอร์ดควบคุมCP-AT180 ไอซีดังกล่าวทำงานเป็นลำดับขั้น (sequential) โดยมีตัวมัลติเพล็ก (multiplexer) เป็นตัวเลือกแชนแนลล์ในการแปลงสัญญาณ จากรูปได้ทำการต่อขาสตาร์ท (ขา 6) ของ ADC0808 บนบอร์ด ควบคุมเข้ากับขาสตาร์ท (ขา 6) ของ ADC0808 ที่สร้างขึ้นเพื่อให้การเริ่มต้นการแปลงสัญญาณของ เอ/ดี ทั้งสองเกิดขึ้นพร้อมกันซึ่งตรงกับพอร์ท 60H-7FH

การทดสอบ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ ทำการทดสอบทั้งสองตัว คือตัวที่อยู่บนบอร์ดควบคุม กับตัวที่สร้างขึ้นใหม่ โดยการปรับแปรแรงดันอินพุทซึ่งเป็นสัญญาณอนาลอคจาก 0-5 โวลท์ เพื่อดูค่าดิจิตอล (digital word) ที่ได้จากการแปลงของ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ทั้งสอง เปรียบเทียบกับการคำนวณ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 ผลการคำนวณของ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ขนาด 8 บิต จะอาศัยความสัมพันธ์ทางพีชคณิต ตามสมการที่ (2.7) [10]

$$\text{เอาท์พุท}_{(16)} = \frac{V_{in}}{V_{ref}} \times 2^n \qquad (2.7)$$

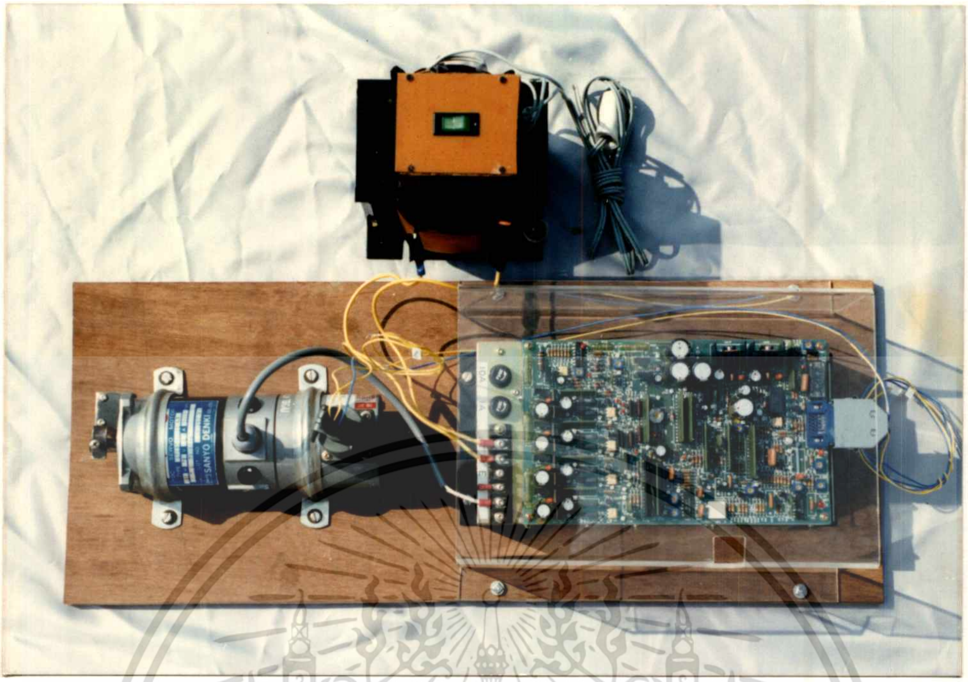
เมื่อ V_{in} คือแรงดันอินพุทที่เป็นสัญญาณอนาลอค

V_{ref} คือแรงดันที่ป้อนให้กับไอซี เท่ากับ 5 โวลท์

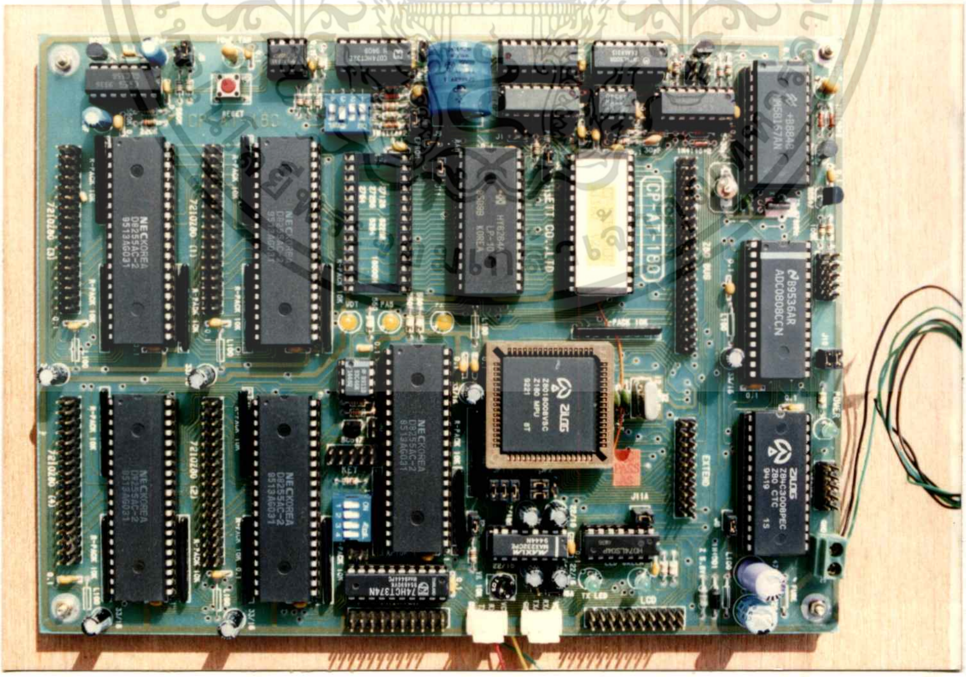
n คือจำนวนบิตของคอนเวอร์เตอร์ เท่ากับ 8

โดยที่ $\frac{V_{in}}{V_{ref}} \times 2^n$ ไม่คิดค่าทศนิยม และไม่มีการปัดขึ้นเมื่อทศนิยมเกิน 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

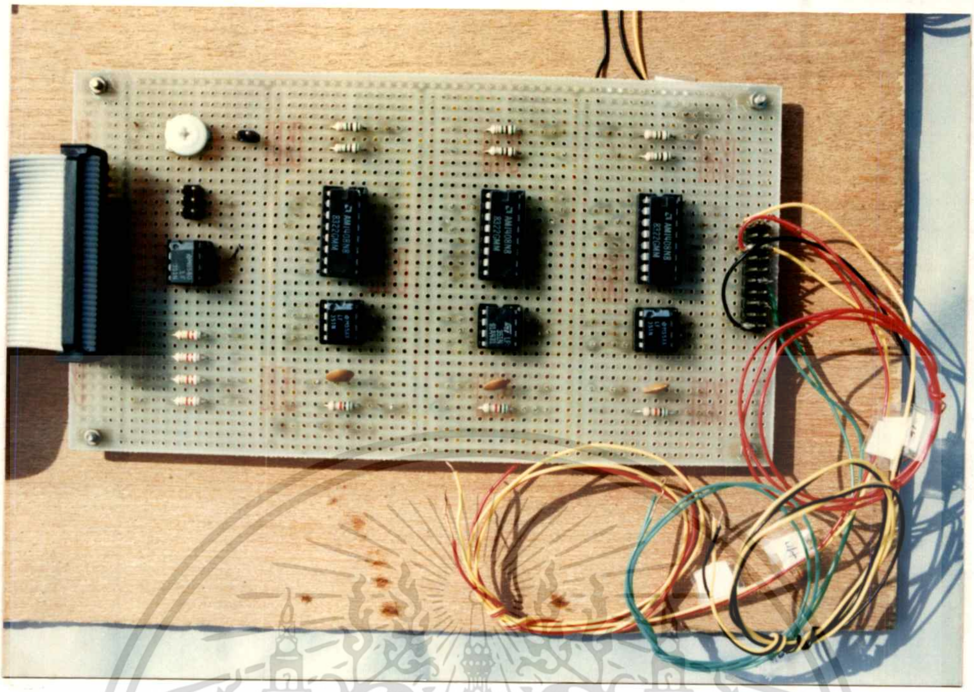


รูปที่ 14 มอเตอร์ ตัวขับ และแหล่งจ่ายไฟ

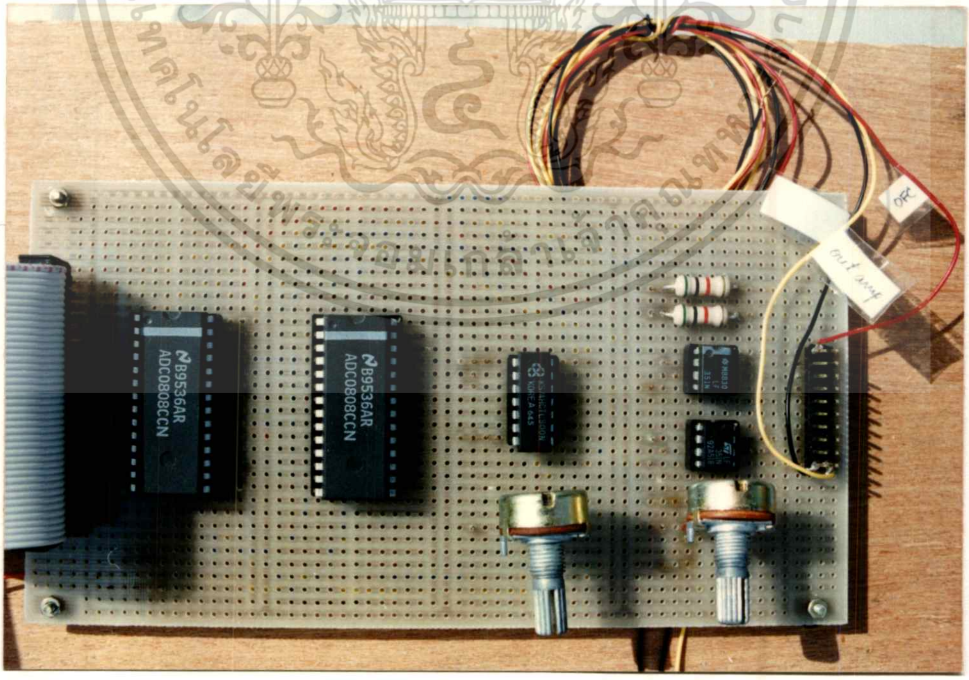


รูปที่ 15 บอร์ดควบคุม CP-AT180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

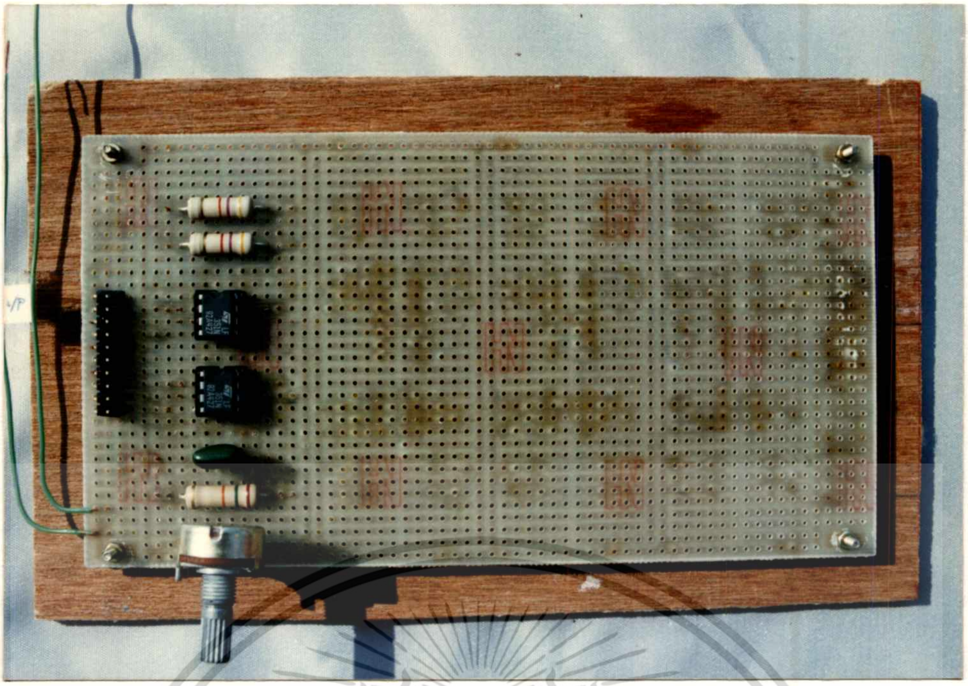


รูปที่ 16 ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 17 เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ และ นอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 โลว์พาสส์ฟิลเตอร์

ตารางที่ 1

แสดงผลการทดสอบ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์

แรงดันอินพุท,โวลท์ (อนาลอค)	เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ บนบอร์ดควบคุม (เลขฐาน 16)	เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ ที่สร้างขึ้น (เลขฐาน 16)	ผลการคำนวณ (เลขฐาน 16)
0	00H	00H	00H
0.5	18H	18H	19H
1.0	33H	33H	33H
1.5	4CH	4BH	4CH
2.0	66H	66H	66H
2.5	7EH	7EH	7FH
3.0	99H	99H	99H
3.5	B1H	B1H	B2H
4.0	CBH	CBH	CCH
4.5	E5H	E4H	E5H
5.0	FFH	FFH	FFH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณเช่น สมมุติว่าแรงดันอินพุท (V_{in}) เท่ากับ 3 โวลท์ เราจะได้ค่าดิจิตอลดังนี้

$$\text{ค่าดิจิตอลเอาท์พุท}_{(16)} = \frac{3}{5} \times 256$$

$$= 153.6_{(10)}$$

$$= 153_{(10)}$$

$$= 99_{(16)}$$ เป็นต้น

ค่าจากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ ทั้งที่อยู่บนบอร์ดควบคุม และที่สร้างขึ้นให้ค่าความถูกต้อง(accuracy) และค่าความเชื่อถือได้(reliable) อยู่ภายในขอบเขตของข้อกำหนดทางเทคนิคของการใช้งานคอนเวอร์เตอร์ทางอุตสาหกรรม กล่าวคือ ยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 1 บิต ที่บิต a_0

ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 12 ใช้ไอซีเบอร์ MC1408 ซึ่งเป็น ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ ขนาด 8 บิต จัดสร้างขึ้น 3 ชุด ต่อรับอินพุทซึ่งเป็นค่าดิจิตอล จากพอร์ท 0E8H, 0E9H และ 0EAH ของไอซี 8255PIO ขณะที่พอร์ท 0EBH เป็นพอร์ทควบคุม

ทำการทดสอบโดยการป้อนค่าดิจิตอลอินพุทจากพอร์ท 0E8H, 0E9H และ 0EAH ด้วยค่าเดียวกัน ผลที่ได้จาก ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 ซึ่งเป็นสัญญาณอนาลอด เปรียบเทียบกับผลการคำนวณ แสดงดังตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 ผลการคำนวณของ ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ ขนาด 8 บิต จะอาศัยความสัมพันธ์ทางพีชคณิตจาก สมการที่ (2.8) [10]

$$V_o = \frac{N}{2^8} \cdot V_{ref} \tag{2.8}$$

เมื่อ V_o คือแรงดันเอาท์พุท

V_{ref} คือแรงดันที่ป้อนให้กับไอซี เท่ากับ 5 โวลท์

N คือค่าดิจิตอลอินพุท กำหนดเป็นเลขฐานสิบ

ตัวอย่างเช่น ค่าดิจิตอลอินพุท เท่ากับ $66_{(16)}$ ซึ่งเท่ากับ $102_{(10)}$

$$V_o = \frac{102}{256} \times 5 = 2$$ โวลท์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2
แสดงผลการทดสอบ ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์

ค่าดิจิตอลอินพุท (เลขฐาน 16)	ดี/เอ ตัวที่ 1 (พอร์ท 0E8H)	ดี/เอ ตัวที่ 2 (พอร์ท 0E9H)	ดี/เอ ตัวที่ 3 (พอร์ท 0EAH)	ผลการคำนวณ (โวลท์)
00H	0.0	0.0	0.0	0.0
19H	0.5	0.5	0.5	0.5
33H	1.1	1.0	1.0	1.0
4CH	1.6	1.5	1.5	1.5
66H	2.1	1.9	2.0	2.0
7FH	2.6	2.4	2.5	2.5
99H	3.1	2.9	3.0	3.0
B2H	3.6	3.4	3.5	3.5
CCH	4.2	3.8	4.0	4.0
E5H	4.6	4.3	4.5	4.5
FFH	5.1	4.8	5.0	5.0

จากค่าผลการทดสอบในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ ที่สร้างขึ้นทั้ง 3 ตัว ให้อนาลอคเอาท์พุทที่ยอมรับได้

ส่วนกรองสัญญาณ

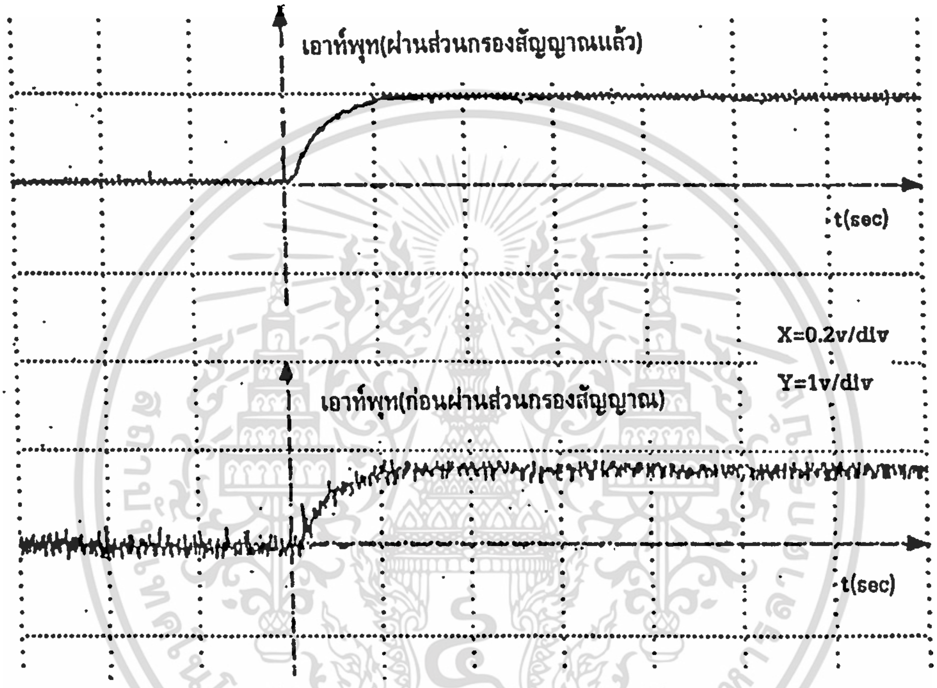
จากรูปที่ 13 ใช้ไอซี LF351 ซึ่งเป็นออปแอมป์ ทำเป็นโลว์พาสส์ฟิลเตอร์ต่อร่วมกับนอนอินเวิร์ทติ้ง แอมปลิไฟเออร์ ด้วยอัตราลดระดับสัญญาณ เท่ากับ 3/7 เท่า ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 19

จากรูปที่ 19 สัญญาณด้านล่างของภาพ จะเป็นสัญญาณเอาท์พุทจากทาโคเยนเนอเรเตอร์ซึ่งมีสัญญาณรบกวนติดมาด้วยค่อนข้างสูง เมื่อผ่านส่วนกรองสัญญาณ เอาท์พุทที่ได้แสดงไว้ด้านบนของภาพ จะเห็นได้ว่าสัญญาณมีความเรียบขึ้นมาก และเมื่อนำเอาสัญญาณทั้งสองไปป้อนให้กับ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ เพื่อดูค่าดิจิตอลที่อ่านได้ (ซึ่งจะแฝงอยู่ในรูปเลขฐานสิบหก มีรูปแบบเป็นอินเทลเฮ็กซ์ไฟล์ (intel hex file) รูปแบบดังกล่าวผู้อ่านสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [15]) แสดงดังรูปที่ 20

จากรูปที่ 20(ก) จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการแปลงสัญญาณที่ไม่ได้ผ่านส่วนกรองสัญญาณ จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ค่อนข้างสูง สังเกตุได้จากค่า 33H,38H,2DH,2FH และ 1FH ในส่วนสภาวะคงตัว คละปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันอยู่มาก ทั้งๆ ที่ค่าที่ควรจะเป็นคือ 33H ตลอดย่าน แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 20(ข) จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการแปลงสัญญาณที่ผ่านส่วนกรองสัญญาณ มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำ สังเกตจากในสภาวะการตอบสนองที่คงตัว ค่าที่แปลงได้จะเป็น 33H เกือบตลอดทั้งย่าน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนกรองสัญญาณที่พัฒนาขึ้น มีคุณภาพอยู่ภายในขอบเขตของข้อกำหนดทางเทคนิคของการใช้งานทางอุตสาหกรรม กล่าวคืออนุญาติให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 1 บิต ที่บิต a_0 ทั้งนี้อาจหมายรวมถึงคุณภาพของ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณด้วย



รูปที่ 19 ผลการทดสอบส่วนกรองสัญญาณ

5. สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้กล่าวถึงแนวคิดในเรื่องการคงตัวและแปรตามคำสั่ง ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ที่สำคัญที่สุดของการควบคุมระบบพลวัตใดๆ กล่าวถึงแนวความคิดและวิธีการของไอเทลเบิร์กและการนำมาประยุกต์ใช้ในโครงงานวิทยานิพนธ์ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุมเพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตและเพื่อใช้ประโยชน์ในการแผนแบบและสร้างตัวควบคุม ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป รวมทั้งแสดงผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดสอบจริง และผลที่ได้จากการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB และสุดท้ายได้กล่าวถึงสถาปัตยกรรมโดยรวมของระบบในเชิงฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในโครงงานวิทยานิพนธ์ รวมทั้งการทดสอบฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับการคำนวณทางพีชคณิต เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ ซึ่งผลการทดสอบโดยรวมอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

:108500003132323131323234313233312F3134324F

:108510003334322F3332333132323232324031342B

:10852000332F31323032312F31342F403233313228

:108530003130333233303831322F3531323032311D

:108540002F31322F313238322F323332333133320E

:10855000333132323231332F3232323134323132FE

:1085600031313031312F2F323132803335313234A5

:108570002D2F3431312F32323132333333323234E3

:1085800032343132321F2F32323231313432 2F34E1

:1085900032313232311F32323132323431333134CE

:1085A000342F32322F34323233333232333332 31AA

:1085B0003231342F3333332F322F3232322F3132A4

:1085C00032323432323232323232323132303231 8D

รูปที่ 20(ก) ผลการแปลงสัญญาณอนาลอคเป็นค่าดิจิตอล ของสัญญาณด้านล่างของรูปที่ 19

:10850000333333333333333333333333333333333B

:10851000333333333333333333333333333333332B

:10852000333333333333333233333333333333331C

:10853000333333333333333333333333333333330B

:108540003232333232323332333232323233323207

:1085500032333232323332333332333333333334F0

:1085600033333333333333333333333333333333DB

:1085700033333332333333333332323233323332D1

:1085800032323232323232323232323232333232CA

:1085900033333333333333333333333333333233AC

:1085A000333333333333333333333333333332329D

:1085B00033333233333232323233333232333492

:1085C00033323333333333333333333333333333 7C

รูปที่ 20(ข) ผลการแปลงสัญญาณอนาลอคเป็นค่าดิจิตอล ของสัญญาณด้านบนของรูปที่ 19

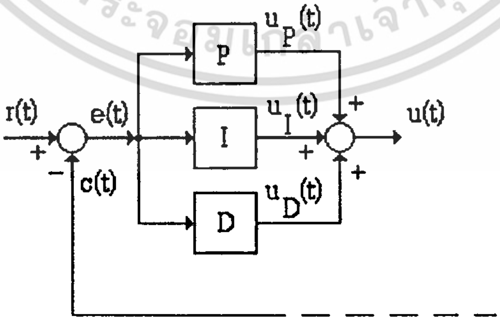
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ตัวควบคุมพีไอดีแบบดิจิตอล

ในบทที่ 3 นี้ จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบดิจิตอล ที่มีโครงสร้างตามที่ไอเทลเบิร์กได้นำเสนอ และให้การทดสอบ โดยเริ่มต้นจากการสังเคราะห์อัลกอริธึมของตัวควบคุม ที่อยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอร์เรนเชียล (differential equation) จากนั้นจะทำการแปลงให้ไปอยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอร์เรนซ์ (difference equation) ด้วยเทคนิคการแปลงแบบต่างๆ เพื่อประโยชน์ในการโปรแกรมเป็นซอฟท์แวร์ให้การควบคุม กล่าวถึงการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี จากการออกแบบด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม (modulus optimum) [7] โดยอาศัยเทคนิคการตัดทอนของโพลกับซีโร่ในทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นและการรีดีไซน์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ ให้การอนุวัตตัวควบคุมดังกล่าวด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU จากนั้นได้ทำการทดสอบการปรับระดับอินพุท เพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบ ด้วยการทดสอบกับอินพุทแบบขั้นบันได และนำเอาความรู้ที่ได้ไปใช้เป็นฐานในการออกแบบและจัดตั้งกฎการควบคุม (control rules) ให้กับตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (FLC) ซึ่งในส่วนนี้ จะกล่าวถึงในบทที่ 4

1. อัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดี

โดยทั่วไปตัวควบคุมพีไอดีจะมีโครงสร้างเป็นดังรูปที่ 21 และให้สัญญาณควบคุม u(t) เป็นดังสมการที่ (3.1)



รูปที่ 21 ตัวควบคุมพีไอดีแบบทั่วไป

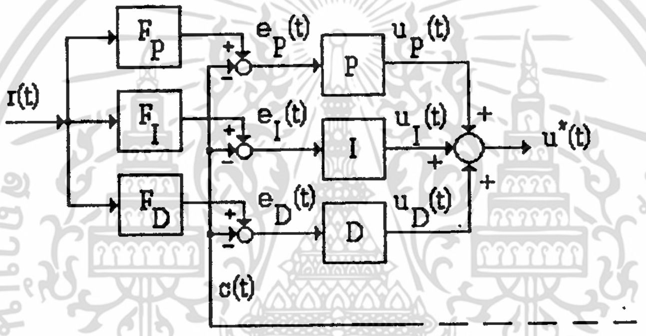
$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \qquad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.1) อาจพิจารณาเห็นได้ว่า สัญญาณควบคุม u(t) ได้มาจากการรวมกันของสัญญาณสามส่วน คือสัญญาณจากองค์ประกอบพี สัญญาณจากองค์ประกอบไอ และสัญญาณจากองค์ประกอบดี เราอาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$u(t) = u_P(t) + u_I(t) + u_D(t) \tag{3.2}$$

สำหรับตัวควบคุมพีไอดีที่ได้รับการนำเสนอโดยไอเทลเทลเบิร์ก ตามโครงสร้างดังรูปที่ 3 ซึ่งได้ตัดตอนมาแสดงในรูปที่ 22 ให้เห็นชัดเจนถึงสัญญาณควบคุม $u^*(t)$ สัญญาณควบคุมดังกล่าว แสดงดังสมการที่ (3.3)



รูปที่ 22 ตัวควบคุมพีไอดีตามที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอ

$$u^*(t) = K_P e_P(t) + K_I \int e_I(t)dt + K_D \frac{d}{dt} e_D(t) \tag{3.3}$$

จากสมการที่ (3.3) พิจารณาพบว่าสัญญาณควบคุม $u^*(t)$ ได้มาจากการรวมกันของสัญญาณสามส่วน เช่นเดียวกับสมการที่ (3.1) และอาจแทนได้ด้วยสมการที่ (3.2) แต่ต้องพึงระลึกไว้เสมอว่า แม้สมการที่ (3.1) และ (3.3) จะสามารถแทนได้ด้วยสมการที่ (3.2) ที่มาของสัญญาณ $u_P(t)$,$u_I(t)$ และ $u_D(t)$ ของทั้งสองสมการนั้นต่างกัน กล่าวคือ สมการที่ (3.1) จะนำเอาสัญญาณ e(t) ซึ่งเกิดจาก r(t)-c(t) ไปผ่านองค์ประกอบพี องค์ประกอบไอ และองค์ประกอบดี เพื่อผลิตสัญญาณ $u_P(t)$,$u_I(t)$ และ $u_D(t)$ ตามลำดับ ในขณะที่สมการ (3.3) ได้นำเอาสัญญาณ $e_P(t)$ ผ่านเข้าองค์ประกอบพี เพื่อผลิตสัญญาณ $u_P(t)$ นำเอาสัญญาณ $e_I(t)$ ผ่านเข้าองค์ประกอบไอ เพื่อผลิตสัญญาณ $u_I(t)$ และนำสัญญาณ $e_D(t)$ ผ่านเข้าองค์ประกอบดี เพื่อผลิตสัญญาณ $u_D(t)$ ทั้งนี้สัญญาณ $e_P(t)$,$e_I(t)$ และ $e_D(t)$ เป็นสัญญาณคนละตัวกัน กล่าวคือ สัญญาณ $e_P(t)$ เกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$F_P r(t)$-c(t) สัญญาณ $e_I(t)$ เกิดจาก $F_I r(t)$-c(t) และสัญญาณ $e_D(t)$ เกิดจาก $F_D r(t)$-c(t) เมื่อเป็นเช่นนี้แล้ว เราอาจเขียนสมการที่ (3.3) ได้ใหม่เป็นดังสมการที่ (3.4)

$$u^*(t) = K_P\{F_P r(t) - c(t)\} + K_I \int \{F_I r(t) - c(t)\}dt + K_D \frac{d}{dt}\{F_D r(t) - c(t)\} \qquad (3.4)$$

ตัวควบคุมแบบดิจิตอลในลักษณะของซอฟท์แวร์ให้การควบคุม จะต้องอาศัยอัลกอริธึมที่อยู่บนรากฐานของสมการดิฟเฟอเรนซ์เพื่อความสะดวกในการโปรแกรม อันดับต่อไปจะเป็นการพิจารณาอัลกอริธึมแยกกันระหว่างอัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดีแบบทั่วไป และอัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดีที่ไอเทลเบิร์กเสนอ

อัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดีแบบทั่วไป

จากสมการที่ (3.1) เมื่อพิจารณาในโดเมน s ตัวควบคุมพีไอดีแบบทั่วไปจะมีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นเป็นดังสมการที่ (2.2) ตัวควบคุมพีไอดีจะมีองค์ประกอบรวมกันสามองค์ประกอบ บางครั้งตัวควบคุมดังกล่าวได้รับการเรียกขานว่า ตัวควบคุมสามพจน์ (three term controller) เราจะแยกพิจารณาองค์ประกอบทั้งสามและทำการแปลงจากคณิตศาสตร์โดเมน s ไปเป็นคณิตศาสตร์โดเมน z แล้วแปลงเป็นสมการดิฟเฟอเรนซ์ตามลำดับ สำหรับการแปลงคณิตศาสตร์โดเมน s ไปเป็นคณิตศาสตร์โดเมน z มีระเบียบวิธีในการดำเนินการหลายวิธีการด้วยกัน สำหรับในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ระเบียบวิธีในการแปลงและเหตุผลในการเลือกใช้ ดังต่อไปนี้

1). องค์ประกอบพี จากสมการที่ (2.2) และสมการที่ (3.1) จะเห็นว่าองค์ประกอบพี ไม่มีตัวแปร s เข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นเราจะได้ฟังก์ชั่นขององค์ประกอบพีในโดเมน z ดังสมการที่ (3.5)

$$U_P(z) = K_P E(z) \qquad (3.5)$$

ทำการแปลงสมการที่ (3.5) ให้อยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนซ์ ได้ดังสมการที่ (3.6)

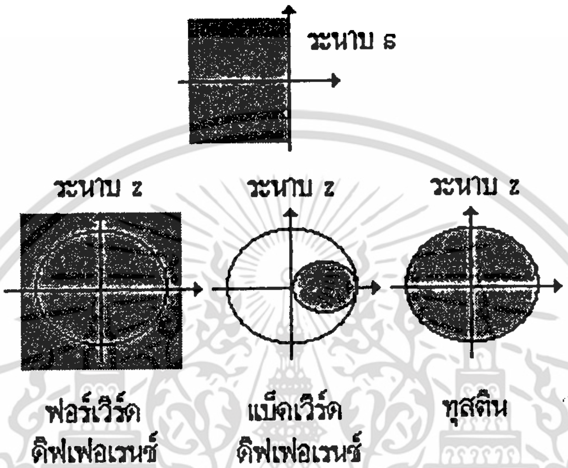
$$u_P(i) = K_P e(i) \qquad (3.6)$$

2). องค์ประกอบไอ จากสมการที่ (2.2) สัญญาณควบคุมที่ได้จากองค์ประกอบไอ แสดงด้วยฟังก์ชั่นในโดเมน s เป็นดังสมการที่ (3.7)

$$U_I(s) = \frac{K_I}{s} E(s) \qquad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะทำการแปลงสมการที่ (3.7) ไปอยู่ในโดเมน z ด้วยวิธีการประมาณของทุสติน (Tustin's approximation) เพราะจะให้ค่าการอินทิเกรต หรือการหาพื้นที่ใต้เส้นโค้งมีความถูกต้องสูง [1],[12] เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นเช่น วิธีการแปลงแบบฟอร์เวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์ (forward difference) หรือวิธีการแปลงแบบแบ็คเวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์ (backward difference) รูปที่ 23 แสดงให้เห็นถึงความแม่นตรงในการแปลงพื้นที่ส่วนที่เสถียรบนระนาบ s มาอยู่บนพื้นที่ส่วนที่เสถียรบนระนาบ z ด้วยเทคนิควิธีทั้งสามข้างต้น



รูปที่ 23 แสดงความแม่นตรงในการแปลง [1]

การแปลงด้วยวิธีการประมาณของทุสติน บางครั้งอาจเรียกว่าวิธีการแปลงแบบไบลิเนียร์ (bilinear transformation) ซึ่งจะอาศัยความสัมพันธ์ทางพีชคณิตระหว่างตัวแปร s และตัวแปร z เป็นดังสมการที่ (3.8)

$$s=\frac{2}{T}\frac{(1-z^{-1})}{(1+z^{-1})} \tag{3.8}$$

การแปลงแบบฟอร์เวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์ บางครั้งอาจเรียกว่าการแปลงด้วยระเบียบวิธีของอูลเลอร์ (Euler's method) ความสัมพันธ์ทางพีชคณิตระหว่างตัวแปร s และตัวแปร z เป็นดังสมการที่ (3.9)

$$s=\frac{(1-z^{-1})}{Tz^{-1}} \tag{3.9}$$

การแปลงแบบแบ็คเวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์ มีความสัมพันธ์ทางพีชคณิตระหว่างตัวแปร s และตัวแปร z เป็นดังสมการที่ (3.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$s = \frac{(1 - z^{-1})}{T} \tag{3.10}$$

เมื่อ T คือช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณ

รายละเอียดของการพิสูจน์ทราบทางคณิตศาสตร์ ของการแปลงที่กล่าวมาข้างต้น ผู้อ่านสามารถศึกษาได้จาก [1],[8],[12]

จากรูปที่ 23 วิธีการแปลงแบบฟอร์เวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์ จะนำเอาพื้นที่ส่วนที่เสถียรของระบบที่ต่อเนื่องกับเวลา (คือพื้นที่บริเวณทางด้านซ้ายมือของระนาบ s ทั้งหมด) ไปอยู่ในส่วนที่ขาดเสถียรของระบบที่ไม่ต่อเนื่องกับเวลา (คือพื้นที่บริเวณภายนอกวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย ที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิดในระนาบ z) เป็นบางส่วน วิธีการแปลงแบบแบ็คเวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์นั้น จะนำเอาพื้นที่ส่วนที่เสถียรของระบบที่ต่อเนื่องกับเวลา ไปอยู่ในพื้นที่ส่วนที่เสถียรของระบบที่ไม่ต่อเนื่องกับเวลาเสมอ แต่ก็ยังนำเอาพื้นที่ส่วนที่ขาดเสถียรของระบบที่ต่อเนื่องกับเวลา มาอยู่ในพื้นที่ส่วนที่เสถียรของระบบที่ไม่ต่อเนื่องกับเวลาด้วย สำหรับวิธีการแปลงด้วยวิธีการประมาณของทุสติน จะนำเอาพื้นที่ส่วนที่เสถียรของระบบที่ต่อเนื่องกับเวลา มาอยู่ในพื้นที่ส่วนที่เสถียรของระบบที่ไม่ต่อเนื่องกับเวลา ส่วนพื้นที่ในส่วนที่ขาดเสถียรของระบบที่ต่อเนื่องกับเวลาจะถูกแปลงให้มาอยู่ในพื้นที่ภายนอกวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยบนระนาบ z ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนที่ขาดเสถียรของระบบที่ไม่ต่อเนื่องกับเวลา ดังนั้นวิธีการแปลงด้วยวิธีการประมาณของทุสตินจึงให้ค่าความถูกต้องสูง [1] (เขตกั้นพื้นที่ระหว่างพื้นที่ส่วนที่เสถียร กับพื้นที่ส่วนที่ขาดเสถียรบนระนาบ s คือแกน $j\omega$ จะถูกแปลงมาเป็นเส้นรอบวงกลมบนระนาบ z ฉะนั้นโพลที่อยู่บนแกน $j\omega$ บนระนาบ s จะถูกแปลงเป็นโพลที่อยู่บนเส้นรอบวงกลมบนระนาบ z การตีความค่าโพลดังกล่าวบนระนาบ z จะถือว่าเป็นโพลที่ขาดเสถียรเช่นเดียวกับเมื่อตอนอยู่บนระนาบ s ด้วย ซึ่งวิธีการแปลงด้วยวิธีการประมาณของทุสติน สามารถดำเนินการได้ด้วยความเที่ยงตรงแม่นยำ) วิธีการแปลงด้วยวิธีการประมาณของทุสติน จึงได้รับการเลือกใช้สำหรับการแปลงองค์ประกอบไอ

โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางพีชคณิตตามสมการที่ (3.8) แทนลงในสมการที่ (3.7) จะได้เป็นดังสมการที่ (3.11)

$$(1 - z^{-1})U_I(z) = \frac{K_I T}{2}(1 + z^{-1})E(z) \tag{3.11}$$

เทอม z^{-1} คือดีเลย์หนึ่งหน่วยเวลาในการสุ่มสัญญาณ ดังนั้นเมื่อทำให้อยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนซ์ จะได้เป็นดังสมการที่ (3.12)

$$u_I(i) = u_I(i-1) + \frac{K_I T}{2}\{e(i) + e(i-1)\} \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3). องค์ประกอบดี จากสมการที่ (2.2) สัญญาณควบคุมที่ได้จากองค์ประกอบดี แสดงดังสมการที่ (3.13)

$$U_D(s) = K_D sE(s) \tag{3.13}$$

การแปลงองค์ประกอบดี ไม่สามารถใช้วิธีการประมาณของทุสตินได้ เนื่องจากกรรมวิธีดังกล่าวจะก่อให้เกิดค่าโพลที่ตำแหน่ง -1 ในระนาบ z ซึ่งเป็นมาร์จินนอลลี่สเตเบิ้ล (marginally stable) หรือมาร์จิน-นอลลี่อันสเตเบิ้ล (marginally unstable) คือจะอยู่ในโหมดของการสั่นไกว (oscillatory mode) ซึ่งในทฤษฎีระบบควบคุมถือว่าขาดเสถียร จึงหลีกเลี่ยงวิธีการดังกล่าว มาใช้วิธีการแปลงแบบแบ็คเวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์ หรือบางครั้งอาจเรียกวิธีการดังกล่าวว่า วิธีการประมาณแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular approximation) เพราะถึงแม้วิธีการนี้จะให้ค่าความถูกต้องน้อยกว่าวิธีการประมาณของทุสติน แต่จะทำให้ตัวควบคุมเสถียรภาพอยู่ตลอดเวลา

โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางพีชคณิต ตามสมการที่ (3.10) แทนลงในสมการที่ (3.13) จะได้เป็นดังสมการที่ (3.14)

$$U_D(z) = \frac{K_D}{T}(1 - z^{-1})E(z) \tag{3.14}$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนซ์ จะได้เป็น

$$u_D(i) = \frac{K_D}{T}\{e(i) - e(i-1)\} \tag{3.15}$$

เมื่อนำทั้งสามองค์ประกอบที่ถูกแยกพิจารณา มารวมกันจะได้ฟังก์ชั่นของตัวควบคุมพีไอดีแบบทั่วไป ที่มีแบบจำลองเป็นคณิตศาสตร์ดิสครีต ดังสมการที่ (3.16)

$$G_c(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_P + \frac{K_I T}{2}\frac{(1 + z^{-1})}{(1 - z^{-1})} + \frac{K_D}{T}(1 - z^{-1}) \tag{3.16}$$

และจะได้สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมพีไอดี ที่อยู่ในรูปของคำตอบของสมการดิฟเฟอเรนซ์ ดังสมการที่ (3.17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(i) = u_I(i-1) + K_P e(i) + \frac{K_I T}{2}\{e(i) + e(i-1)\} + \frac{K_D}{T}\{e(i) - e(i-1)\} \quad (3.17)$$

เมื่อ

$$e(i) = r(i) - c(t) \quad (3.18)$$

สมการที่ (3.17) คืออัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดีแบบทั่วไป ค่า e(i) คือค่าความคลาดเคลื่อนปัจจุบันที่สุ่มมาได้ มีความสัมพันธ์เป็นดังสมการที่ (3.18) ขณะที่ค่า e(i-1) คือค่าคลาดเคลื่อนที่สุ่มมาได้ครั้งก่อนหน้า

อัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดีที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอ

จากสัญญาณ $u^*(t)$ ในสมการที่ (3.4) ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดีที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอ มีความแตกต่างจากสัญญาณ u(t) ในสมการที่ (3.1) ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดีแบบทั่วไป ตรงที่นำเอาค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันไปดำเนินการ ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นเราสามารถที่จะประยุกต์อัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดีแบบทั่วไป ในสมการที่ (3.17) มาเป็นอัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดีที่ไอเทลเบิร์กเสนอ ได้ดังสมการที่ (3.19)

$$u^*(i) = u_I(i-1) + K_P e_P(i) + \frac{K_I T}{2}\{e_I(i) + e_I(i-1)\} + \frac{K_D}{T}\{e_D(i) - e_D(i-1)\} \quad (3.19)$$

เมื่อ

$$e_P(i) = F_P r(i) - c(i) \quad (3.20)$$

$$e_I(i) = F_I r(i) - c(i) \quad (3.21)$$

$$e_D(i) = F_D r(i) - c(i) \quad (3.22)$$

สมการที่ (3.19) จะได้รับการนำไปอนุวัตเป็นซอฟท์แวร์ให้การควบคุม เพื่อใช้ประโยชน์ในโครงงานวิทยานิพนธ์ต่อไป

2. การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

เพื่อเฟ้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอย่างมีหลักการ จำเป็นต้องอาศัยระเบียบวิธีในการดำเนินการอย่างมีแบบแผนและเป็นขั้นเป็นตอน วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีมีหลากหลายวิธีการด้วยกัน แต่ที่ได้รับเลือกมาใช้ในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้คือ วิธีโมดูลัสออปติมัม (modulus optimum) ซึ่งจะใช้เทคนิคการตัดทอนของโพลและซีโร (pole-zero cancellation) [7] วิธีการดังกล่าวให้ความสะดวกสูง เพราะอาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ที่สัมพันธ์กับความต้องการด้านสมรรถนะทางเวลา ข้อสมมุติและขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม มีดังต่อไปนี้

- ข้อสมมุติ (assumptions)

1). กระบวนการภายใต้การควบคุม จะต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบธรรมดา ในลักษณะของทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่น

2). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการจะต้องมีอันดับ (order) มากกว่าหรือเท่ากับสาม (มีโพลอย่างน้อยสามตัว)

3). เมื่อพิจารณาตำแหน่งของโพลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะต้องเป็นโพลที่อยู่บนแกนจริงด้านซ้ายมือของระนาบเชิงซ้อน (s-plane) เท่านั้น หรือค่าโพลจะต้องเป็นค่าจริงลบเท่านั้น นั่นเอง

- ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม

1). กำหนดฟังก์ชั่นของตัวควบคุมพีไอดี เป็น $G_c(s)$ ซึ่ง

$$G_c(s) = A_c \frac{(1+s\tau_i)(1+s\tau_d)}{s\tau_i} \qquad (3.23)$$

เมื่อ A_c คืออัตราขยายของตัวควบคุม

τ_i คือค่าคงที่ทางเวลาของการอินทิเกรตสัญญาณ

τ_d คือค่าคงที่ทางเวลาของการดิฟเฟอเรนชิเอทสัญญาณ

เมื่อนำสมการที่ (3.23) เปรียบเทียบกับสมการที่ (2.2) ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของตัวควบคุมพีไอดีเช่นกัน จะพบว่า

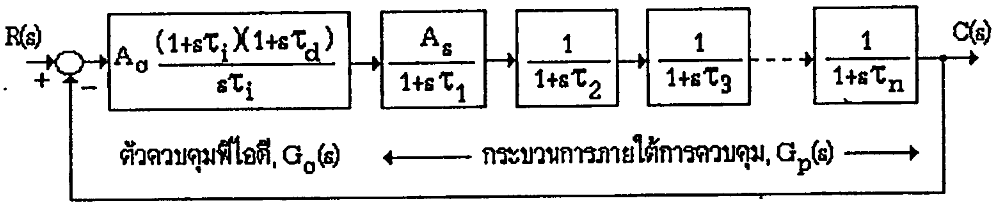
$$K_P = A_c \frac{(\tau_d + \tau_i)}{\tau_i} \qquad (3.24)$$

$$K_I = \frac{A_c}{\tau_i} \qquad (3.25)$$

$$K_D = A_c \tau_d \qquad (3.26)$$

2). กำหนดฟังก์ชั่นของกระบวนการภายใต้การควบคุมเป็น $G_p(s)$ ซึ่งจะต้องจัดรูปแบบคณิตศาสตร์ของกระบวนการให้อยู่ในรูปของตัวประกอบอันดับหนึ่งคูณกัน ดังแสดงในรูปที่ 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 24 ระบบควบคุมที่เป็นไปตามข้อกำหนดของวิธีโมดูลัสออปติมัม

จากรูปที่ 24 ในส่วนของกระบวนการภายใต้การควบคุม จะถูกแบ่งย่อยให้เห็นถึงค่าคงที่ทางเวลา ($\tau_1, \tau_2, \ldots \tau_n$) ซึ่งเป็นตัวประกอบอันดับหนึ่ง อย่างชัดเจน โดยจะกำหนดให้

$$\tau_1 > \tau_2 > \tau_3 > \ldots > \tau_n \tag{3.27}$$

และ A_s คืออัตราขยายของกระบวนการ
ฟังก์ชั่นของกระบวนการคือ $G_p(s)$ ซึ่ง

$$G_p(s) = \frac{A_s}{(1+s\tau_1)(1+s\tau_2)\ldots(1+s\tau_n)} \tag{3.28}$$

3). กำหนดให้ค่าคงที่ทางเวลาของการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุมพีไอดี มีค่าเท่ากับค่าคงที่ทางเวลาที่มีค่ามากที่สุดของกระบวนการภายใต้การควบคุม กล่าวคือ

$$\tau_i = \tau_1 \tag{3.29}$$

4). กำหนดให้ค่าคงที่ทางเวลาของการดิฟเฟอเรนชิเอทสัญญาณของตัวควบคุมพีไอดี มีค่าเท่ากับค่าคงที่ทางเวลาที่มีค่ามากเป็นอันดับสองของกระบวนการภายใต้การควบคุม คือกำหนดให้

$$\tau_d = \tau_2 \tag{3.29}$$

5). กำหนดให้ τ_e คือค่าคงที่ทางเวลาสมมูลย์ (equivalent time constant) มีค่าเท่ากับผลรวมของค่าคงที่ทางเวลา ที่เหลือทั้งหมดของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

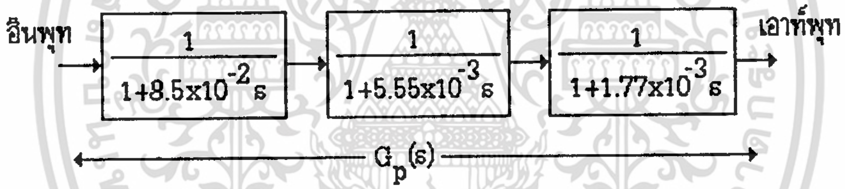
$$\tau_e = \tau_3 + \tau_4 + \ldots \tau_n \tag{3.30}$$

6). กำหนดให้อัตราขยายของตัวควบคุม มีค่าเป็น

$$A_c = \frac{\tau_i}{2A_s\tau_e} \tag{3.31}$$

สำหรับรายละเอียดการพิสูจน์ทางพีชคณิตของวิธีการดังกล่าว ผู้อ่านสามารถศึกษาได้จาก [7]

จากข้อกำหนดและขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัมที่ผ่านมา สามารถนำมาออกแบบตัวควบคุมพีไอดีให้กับกระบวนการที่ได้พัฒนาขึ้นในโครงงานฯนี้ ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (2.5) ได้ เนื่องจากคณิตศาสตร์ของกระบวนการ เป็นไปตามเงื่อนไขข้อกำหนดของวิธีการดังกล่าวทุกประการ จากสมการที่ (2.5) สามารถนำมาเขียนแยกตัวประกอบอันดับหนึ่ง แล้วแทนลงในแผนภาพบล็อคได้ดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 แผนภาพบล็อคแสดงคณิตศาสตร์ของกระบวนการ

เมื่อ $\tau_1 = 8.5\times10^{-2}$ วินาที

$\tau_2 = 5.55\times10^{-3}$ วินาที

$\tau_3 = 1.77\times10^{-3}$ วินาที

$A_s = 1$

ดำเนินการตามขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นปรากฏว่าได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีเป็นดังนี้

$\tau_i = 8.5\times10^{-2}$ วินาที

$\tau_d = 5.55\times10^{-3}$ วินาที

$\tau_e = 1.77\times10^{-3}$ วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$A_c = 24$

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ แทนลงในสมการที่ (3.23) จะได้

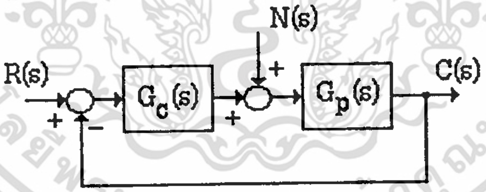
$$G_c(s) = \frac{24(1+8.5x10^{-2}s)(1+5.55x10^{-3}s)}{8.5x10^{-2}s} \tag{3.32}$$

หรือทำให้อยู่ในรูปของสมการที่ (2.2) จะได้

$$G_c(s) = 25.6 + \frac{282.35}{s} + 0.1s \tag{3.33}$$

เมื่อ $K_P = 25.6$, $K_I = 282.35$ และ $K_D = 0.1$

จากคณิตศาสตร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุมในสมการที่ (2.5) และคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมพีไอดี ในสมการที่ (3.33) ทำการหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบควบคุมในลักษณะที่เป็นการควบคุมแบบแปรตามคำสั่ง และการควบคุมแบบคงตัว



รูปที่ 26 แผนภาพบล็อคของระบบควบคุมป้อนกลับแบบทั่วไป

จากรูปที่ 26 R(s) แทนสัญญาณอินพุท C(s) แทนสัญญาณเอาท์พุท และ N(s) แทนสัญญาณรบกวนจากภายนอก ถ้าพิจารณาหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบควบคุมแบบแปรคำสั่ง จะกำหนดให้ N(s) เท่ากับ 0 และทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบควบคุมแบบแปรตามคำสั่งคือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)} \tag{3.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า $G_p(s)$ จากสมการที่ (2.5) และ $G_c(s)$ จากสมการที่ (3.33) ลงในสมการที่ (3.34) จะได้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.1s^2 + 26.5s + 282.3}{8.3x10^{-7} s^4 + 6.3x10^{-4} s^3 + 0.2s^2 + 27.5s + 282.3} \quad (3.35)$$

จากรูปที่ 26 เช่นกัน ถ้าพิจารณาหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบควบคุมแบบคงตัว จะกำหนดให้ R(s) เท่ากับ 0 และทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบควบคุมแบบคงตัวคือ

$$\frac{C(s)}{N(s)} = \frac{G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (3.36)$$

แทนค่า $G_p(s)$ จากสมการที่ (2.5) และ $G_c(s)$ จากสมการที่ (3.33) ลงในสมการที่ (3.36) จะได้

$$\frac{C(s)}{N(s)} = \frac{s}{8.3x10^{-7} s^4 + 6.3x10^{-4} s^3 + 0.2s^2 + 27.5s + 282.3} \quad (3.37)$$

นำสมการที่ (3.35) และ (3.37) ไปทำการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรม MATLAB จะได้ผลตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 27

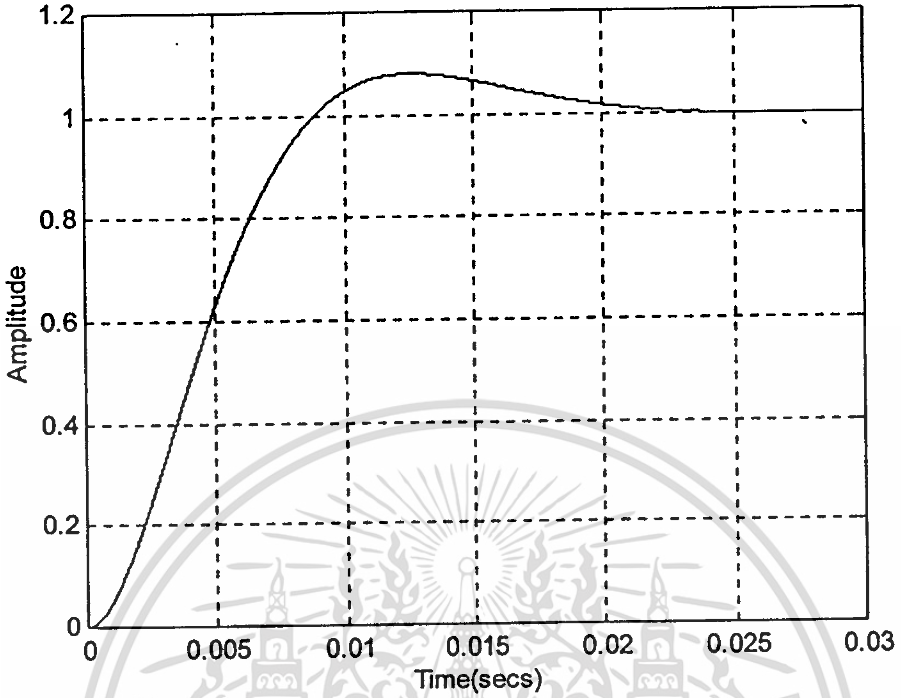
จากรูปที่ 27(ก) เป็นผลตอบสนองของระบบควบคุมแปรตามคำสั่ง ซึ่งจะให้ค่าเวลาในการไต่ระดับที่ประมาณ 8 มิลลิวินาที ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ และให้ค่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว ที่ ±2 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 22 มิลลิวินาที

ส่วนรูปที่ 27(ข) เป็นผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบคงตัว ซึ่งจะให้เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินประมาณ 3.6 เปอร์เซ็นต์ และให้ค่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว ที่ ±2 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 0.5 วินาที

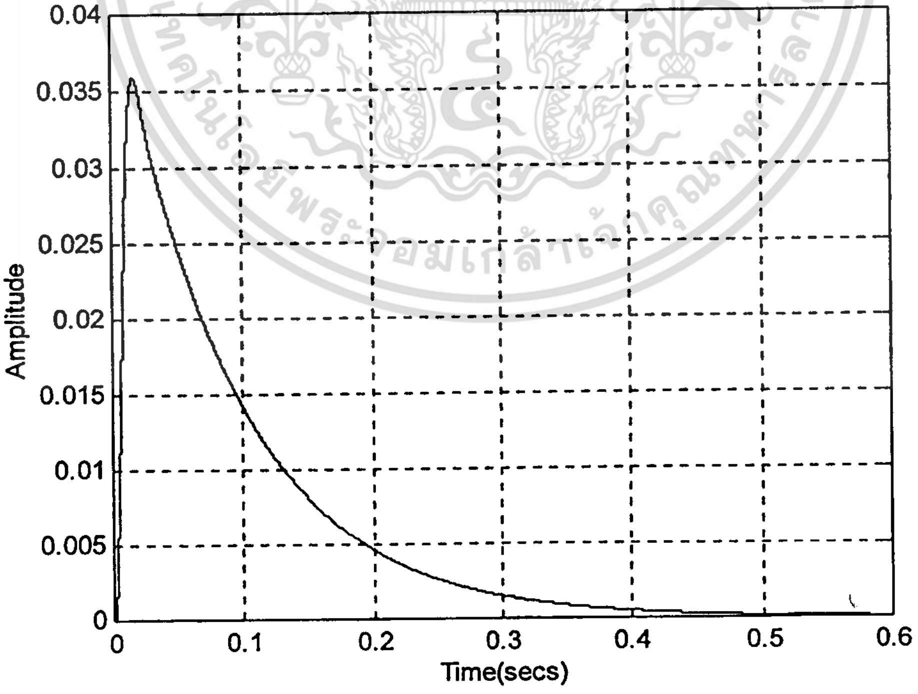
สำหรับการควบคุมแบบดิจิตอล เราจะพิจารณาคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณดังนี้ "ช่วงเวลาหรือคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณ จะต้องมีความเร็วเป็น 4-10 เท่าของค่าเวลาในการไต่ระดับของการควบคุมแปรตามคำสั่ง [1]" ดังนั้น เมื่อพิจารณารูปที่ 27(ก) เราสามารถกำหนดคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณให้มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิวินาที หรือมีความเร็วประมาณ 8 เท่า (ในช่วงที่ผลตอบสนองไต่ระดับขึ้นไปจนถึงค่าอ้างอิงครั้งแรก แซมเปลอร์จะได้รับข้อมูลจากการสุ่ม 8 ข้อมูล) ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการอนุวัตโปรแกรมให้การควบคุม และเมื่อ T คือช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณ ดังนั้น

$$T = 1 \text{ มิลลิวินาที} \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 27(ก) ผลตอบสนองของระบบเชิงแปรตามคำสั่ง จากการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 27(ข) ผลตอบสนองของระบบเชิงคงตัว จากการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม ไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรง ทั้งนี้เพราะขีดจำกัดในเรื่องของความแยกชัด (resolution) ของโพรเซสเซอร์ที่มีขนาดเป็น 8 บิต ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบข้างต้น จะทำให้ผลลัพธ์จากการคำนวณเกิดการล้นเกินไปจาก 8 บิต และทำให้ค่าที่ได้ผิดพลาด วิธีการหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้ คือ การออกแบบใหม่ หรือ "redesign" โดยจะตั้งต้นค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในทางปฏิบัติจากค่าพารามิเตอร์เดิมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม

จากการทดลองด้วยการโปรแกรมค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีไปที่ค่าต่างๆ แล้วสังเกตดูผลตอบสนองของระบบที่เกิดขึ้นทำให้ทราบว่า ในย่านการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้งานได้นั้น จะทำให้ผลตอบสนองเชิงแปรตามคำสั่งล่าช้าออกไป ซึ่งส่งผลทำให้ค่าเวลาในการไต่ระดับ (rise time,t_r) ล่าช้ากว่าผลตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์เดิม (ที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม) กล่าวคือค่าเวลาในการไต่ระดับจะมากกว่า 8 มิลลิวินาที ดังนั้นคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณ (T) ยังสามารถใช้ตามสมการที่ (3.38) ได้อย่างปลอดภัย เพราะคาบเวลาดังกล่าวจะทำให้โพรเซสเซอร์อ่านค่าผลตอบสนองได้ละเอียดยิ่งขึ้น หัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU

3. การอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU

ในระบบควบคุมเวลาจริง จะมีช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณเป็นตัวกำหนดว่าในการเริ่มต้นโปรแกรมให้การควบคุมแต่ละครั้ง จะต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จภายในช่วงเวลาดังกล่าว ดังได้กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้วว่าช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิวินาที ฉะนั้นในทุก ๆ 1 มิลลิวินาที จะต้องมีการเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมให้การควบคุม และจะต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จก่อนที่จะมีการสุ่มสัญญาณเพื่อเริ่มต้นโปรแกรมครั้งต่อไป หรือแล้วเสร็จภายในเวลา 1 มิลลิวินาทีนั่นเอง

ในทางปฏิบัติเพื่อให้สอดคล้องกับหลักการข้างต้น จำเป็นที่จะต้องประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อสั่งการให้โปรแกรมเมเบิ้ลเค้าท์เตอร์ไทม์เมอร์ (programmable counter timer) ทำงานเป็นตัวตั้งเวลา (timer) เพื่อผลิตและส่งสัญญาณอินเตอร์รัพท์ (interrupt signal) ทุกๆช่วงเวลาที่ตั้งไว้ (ในที่นี้คือ 1 มิลลิวินาที) ให้กับซีพียู แล้วจากนั้นเมื่อซีพียูได้รับสัญญาณร้องขอการอินเตอร์รัพท์ และตอบรับการอินเตอร์รัพท์ (การอินเตอร์รัพท์แบบต่างๆรวมทั้งกลไกการตอบรับการอินเตอร์รัพท์ จะไม่ขอกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ที่สนใจสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง [3],[27]) แล้วจะหยุดการทำงานของโปรแกรมหลัก เพื่อกระโดดไปทำโปรแกรมให้บริการการอินเตอร์รัพท์ (interrupt service routine) ซึ่งก็คือโปรแกรมให้การควบคุมนั่นเอง

โปรแกรมเมเบิ้ลเค้าท์เตอร์ไทม์เมอร์ที่กล่าวถึงข้างต้น เป็นชิพไอซีที่สามารถทำงานเป็นตัวนับ (counter) หรือตัวตั้งเวลา ได้ด้วยการโปรแกรม ไอซีดังกล่าวมีหลายเบอร์ด้วยกัน เช่น Z80CTC, IC8253

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นต้น สำหรับในโครงงานนี้ใช้ไอซี Z80CTC เพราะมีอยู่บนบอร์ดควบคุม CP-AT180 อยู่แล้ว ดังรูปที่ 10 หลักการทำงานและรายละเอียดของการโปรแกรม Z80CTC ผู้อ่านสามารถศึกษาได้จาก [3]

สำหรับการประดิษฐ์โปรแกรมจะอาศัยซอฟท์แวร์เข้าช่วยดังนี้

1). Z180ASM [17] เป็นแอสเซมเบลอร์(assembler) ที่ทำหน้าที่แปลงแอสเซมบลี้ไฟล์จากเอดิเตอร์ต่างๆ ไปเป็นภาษาเครื่อง (machine language) หรือออปโค๊ด (op code) คืออยู่ในรูปของเฮ็กซ์ไฟล์ (hex file) นั่นเอง Z180ASM จะมีเอดิเตอร์ในตัว หรืออาจใช้เอดิเตอร์จากที่ใดก็ได้ในการเขียนแอสเซมบลี้ไฟล์

2). ET-DEBUGGER AT180 [15] เป็นดีบักเกอร์ที่ทำหน้าที่นำเอาเฮ็กซ์ไฟล์ที่ได้จาก Z180ASM ไปทำการดาวน์โหลด (down load) ลงสู่แรม (RAM) บนบอร์ดควบคุม ในทางกลับกัน ดีบักเกอร์ AT180 สามารถอัพโหลด (up load) โปรแกรมที่บรรจุอยู่ในหน่วยความจำของบอร์ดได้ และในหลายๆกรณี ดีบักเกอร์ AT180 สามารถทำมินิแอสเซมบลี้ได้อีกด้วย

ทั้งสองโปรแกรมที่กล่าวถึง จะทำงานบน DOS สำหรับรายละเอียดการใช้งานโปรแกรมดังกล่าว ผู้สนใจสามารถศึกษาได้จาก [15],[17] ตามลำดับ

เพื่อให้มีความเข้าใจดียิ่งขึ้น ต่อจากนี้ไปเราจะเรียกโปรแกรมหลักว่า "โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์" และเรียกโปรแกรมให้บริการการอินเตอร์รัพท์ว่า "โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี" ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์

โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์ นอกจากจะทำหน้าที่ผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์แล้ว (ซึ่งมีความหมายโดยนัยว่า สัญญาณดังกล่าวจะมีระยะห่างหรือช่วงเวลาที่ผลิต ช่วงเวลาที่กล่าวถึงคือช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณนั่นเอง) ยังให้การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จะถูกนำไปใช้ในโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีอีกด้วย โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์อาจอธิบายได้ด้วยแผนภูมิที่ 28 สำหรับรายละเอียดและเทคนิคการโปรแกรมสั่งการ Z80CTC ผู้สนใจสามารถศึกษาได้จาก [3]

โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

```
.org 8000h        ;กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของโปรแกรมไว้ที่ 8000h
di                ;ไม่ยอมรับการอินเตอร์รัพท์ (disable interrupt)
im 2              ;กำหนดให้การอินเตอร์รัพท์เป็นโหมด 2
ld a,00h
ld (8080h),a      ;กำหนดค่า eI(0) เท่ากับ 0 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8080h
ld (8081h),a      ;กำหนดค่า eD(0) เท่ากับ 0 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8081h
ld (8082h),a      ;กำหนดค่า uI*(0) เท่ากับ 0 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8082h
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ld a,05h

ld (8083h),a ;กำหนดค่า K_P เท่ากับ 5 (หรือค่าอื่นที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ

;และเงื่อนไขที่ต้องการให้เป็น) แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8083h

ld a,08h

ld (8084h),a ;กำหนดค่า $\overline{K}_I$ เท่ากับ 8 (หรือค่าอื่นที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ

;และเงื่อนไขที่ต้องการให้เป็น) แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8084h

;โดยที่เรากำหนดให้ $\frac{\overline{K}_I}{128} = \frac{K_I T}{2}$ เมื่อ

;$\overline{K}_I = 64 K_I T (8 = 125 \times 1 \times 10^{-3} \times 64)$ เมื่อ $K_I = 125$,

;$T = 1 \times 10^{-3}$

;ตอนนี้เรากำหนด $\overline{K}_I$ ก่อน แล้วไปทำการหารด้วย 128 ภายหลัง

;โดยอาศัยเทคนิคเลื่อนขวา (shift right) 7 ครั้ง

ld a,04h

ld (8085h),a ;กำหนดค่า $\frac{K_D}{T}$ เท่ากับ 4 (หรือค่าอื่นที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ

;และเงื่อนไขที่ต้องการให้เป็น) แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8085h

;โดยที่ค่า $K_D = 0.004$ และ $T = 1 \times 10^{-3}$

ld a,01h

ld (8086h),a ;กำหนดค่า F_P เท่ากับ 1 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8086h

ld a,01h

ld (8087h),a ;กำหนดค่า F_I เท่ากับ 1 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8087h

ld a,01h

ld (8088h),a ;กำหนดค่า F_D เท่ากับ 1 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8088h

ld a,80h ;กำหนด control word ให้เท่ากับ 80h (ทุกพอร์ทเป็น output port)

out (0ebh),a ;ส่ง control word ไปยัง control port ของ 8255PIO

ld a,00h ;กำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี

ld (8070h),a ;อยู่ที่ 8100h โดยที่ 8 บิตด้านต่ำของตำแหน่งเริ่มต้น

ld a,81h ;(00h) จะถูกเก็บไว้ในตำแหน่ง 8070h และ 8 บิตด้านสูง

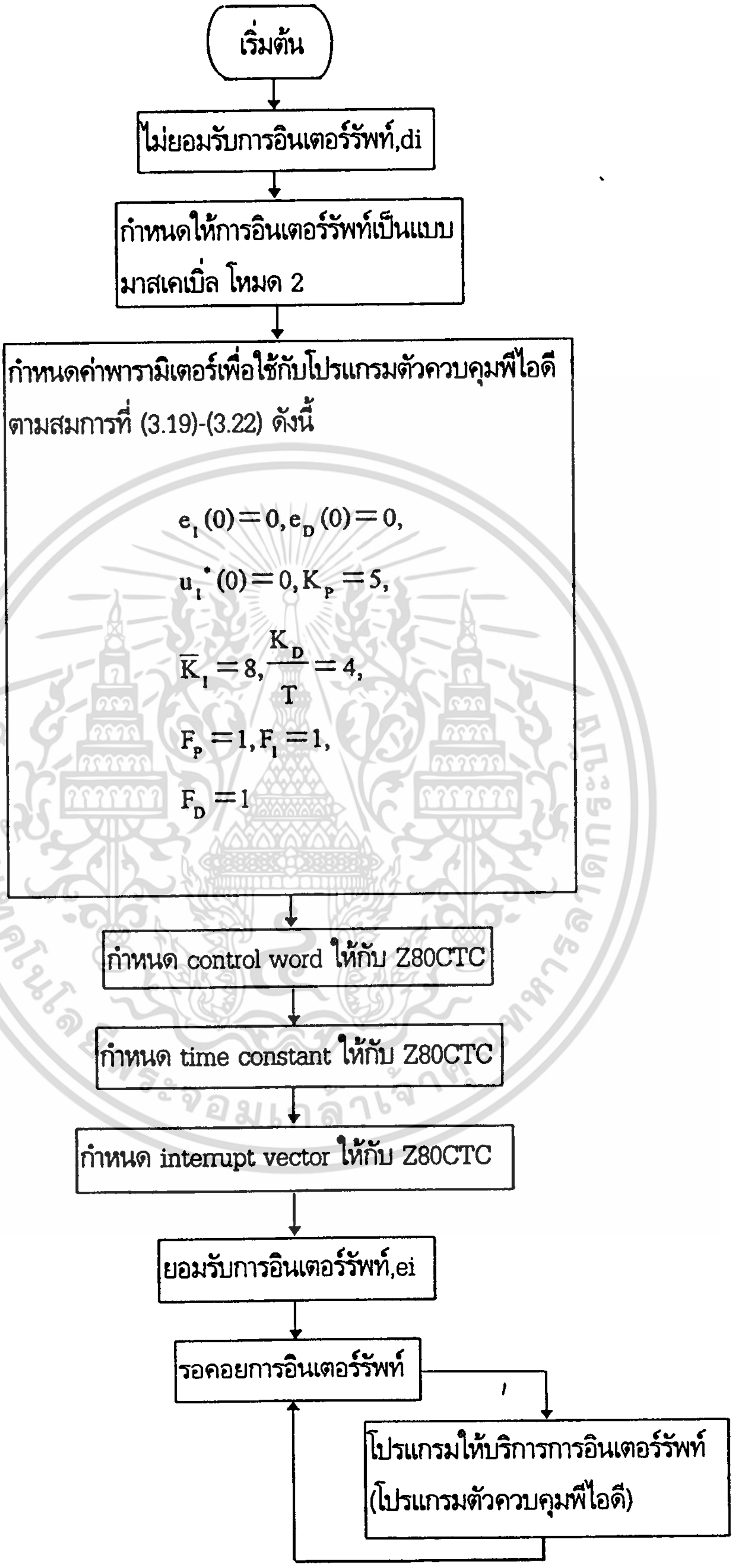
ld (8071h),a ;ของตำแหน่งเริ่มต้น (81h) จะถูกเก็บไว้ในตำแหน่ง 8071h

;ของหน่วยความจำ

ld a,80h

ld i,a ;กำหนดให้อินเด็กซ์รีจิสเตอร์ (i) มีค่าเป็น 80h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผนภูมิที่ 28 การทำงานของโปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

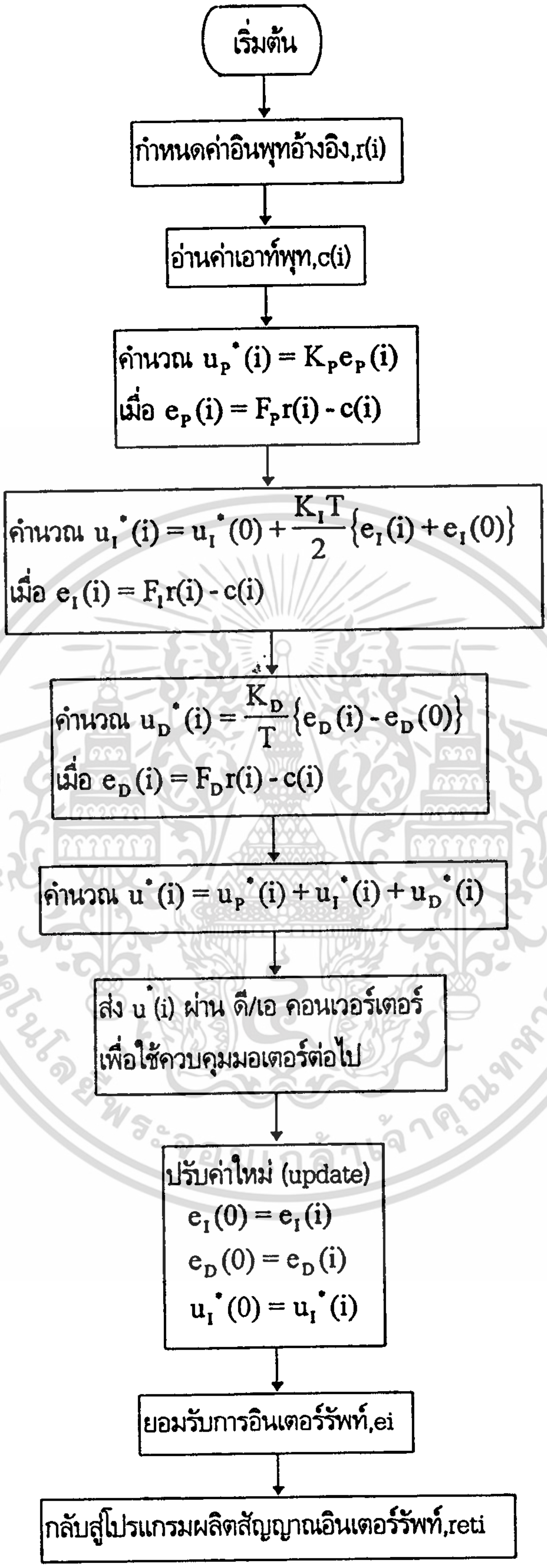
```
      ld a,0a5h        ;กำหนด control word ให้กับ Z80CTC โดยที่ 0a5h มีความหมาย
                       ;ว่าให้ Z80CTC ทำงานเป็นตัวตั้งเวลา (timer) ผลิตสัญญาณ
                       ;อินเตอร์รัพท์ทุกๆ 1 มิลลิวินาที (T)
      out (80h),a      ;ส่ง control word ไปยังพอร์ทของ Z80CTC
      ld a,24h         ;กำหนดค่า time constant
      out (80h),a      ;ส่งค่า time constant ไปยังพอร์ทของ Z80CTC
      ld a,70h         ;กำหนด interrupt vector
      out (80h),a      ;ส่งค่า interrupt vector ไปยังพอร์ทของ Z80CTC
      ei               ;ยอมรับการอินเตอร์รัพท์ (enable interrupt)
loop: jp loop          ;รอการร้องขออินเตอร์รัพท์
```

- โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี

สำหรับโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีจะยึดโครงสร้างของตัวควบคุมที่มีอัลกอริธึมตามการนำเสนอของไอเทลเบิร์ก ดังนั้นเพื่อให้มีความเข้าใจโปรแกรมได้ง่ายยิ่งขึ้น ให้พิจารณาสมการที่ (3.19)-(3.22) ประกอบการทำงานของโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีซึ่งอาจอธิบายได้ด้วยแผนภูมิที่ 29 โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีมีรายละเอียดดังนี้

```
      .org 8100h       ;กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีไว้ที่ 8100h
      push af          ;ทำการเก็บค่าในรีจิสเตอร์ af,hl,de และ bc ลงในสแต็ก
      push hl          ;ทั้งนี้เนื่องจากในส่วนของโปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์
      push de          ;ได้มีการใช้งานรีจิสเตอร์ดังกล่าว ดังนั้นเพื่อมิให้ข้อมูลในรีจิสเตอร์
      push bc          ;เหล่านี้เสียหาย เมื่อจะต้องกลับไปทำงานในโปรแกรมผลิตสัญญาณ
                       ;อินเตอร์รัพท์อีกครั้ง จึงต้องมีการเก็บค่าลงในรีจิสเตอร์สำรอง หรือ
                       ;สแต็ก ดังในโปรแกรมนี้ รายละเอียดอาจดูได้จากเทคนิคการเขียน
                       ;โปรแกรมให้บริการการอินเตอร์รัพท์ใน [3],[27]
      ld a,00h
      out (60h),a      ;สั่งการให้ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ เริ่มต้นแปลง (convers) สัญญาณ
                       ;โดยการส่งค่า(ใดๆ) ในรีจิสเตอร์ a ไปยังพอร์ทสตาร์ทของ เอ/ดี
                       ;คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งในที่นี้คือพอร์ท 60h
      ld a,80h
del:  dec a
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผนภูมิที่ 29 การทำงานของโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
jp nz,del       ;วนลูปคอยกว่าการแปลงสัญญาณของเอ/ดี คอนเวอร์เตอร์จะเสร็จสิ้น
                ;และอ่านข้อมูลเข้า เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงงานฯนี้คือ ADC0808
                ;ใช้เวลาในการแปลง (conversion time) สูงสุด เท่ากับ 116 ไมโคร-
                ;วินาที การวนลูปคอย 80h-1 ครั้ง ใช้เวลาประมาณ 166 ไมโครวินาที
                ;ซึ่งประกันได้ว่า คอนเวอร์เตอร์สามารถแปลงสัญญาณได้ทันการณ์แน่นอน

ld a,33h
ld (8090h),a    ;กำหนดค่าอินพุทอ้างอิง,r(i) ให้เท่ากับ 33h หรือ 1 โวลท์ แล้วเก็บไว้ที่
                ;ตำแหน่ง 8090h ในหน่วยความจำ
in a,(0fch)     ;อ่านเอาท์พุท,c(i) ที่เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์แปลงในรูปของ digital
                ;word
ld (8091h),a    ;เก็บ c(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 8091h ในหน่วยความจำ

;คำนวณสัญญาณควบคุมในส่วนของององค์ประกอบพี ด้วยสูตร
;       up*(i) = Kpep(i)
;เมื่อ ep(i) = Fpr(i) - c(i)
pro: ld a,(8090h) ;โหลดค่าอินพุทอ้างอิง,r(i)
     ld d,a       ;เก็บ r(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ d
     ld a,(8086h) ;โหลดค่า Fp
     ld e,a       ;เก็บ Fp ไว้ที่รีจิสเตอร์ e
     mlt de       ;Fpr(i) ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ e
     ld a,(8091h) ;โหลดค่าเอาท์พุท,c(i)
     ld b,a       ;เก็บค่า c(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
     ld a,e       ;นำค่า Fpr(i) จากรีจิสเตอร์ e มาเก็บไว้ในนีจิสเตอร์ a
     sub b        ;Fpr(i) - c(i) = ep(i) ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ a
     ld d,a       ;เก็บค่า ep(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ d
     ld a,(8083h) ;โหลดค่า Kp
     ld e,a       ;เก็บค่า Kp มาไว้ในรีจิสเตอร์ e
     mlt de       ;Kpep(i) ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ e
     ld a,e       ;เก็บ Kpep(i) หรือ up*(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ a
     ld (80a0h),a ;เก็บ up*(i) ไว้ในตำแหน่ง 80a0h ของหน่วยความจำ
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

;คำนวณสัญญาณควบคุมในส่วนขององค์ประกอบไอ ด้วยสูตร

; $u_I^*(i) = u_I^*(0) + \frac{K_I T}{2}\left\{e_I(i) + e_I(0)\right\} = u_I^*(0) + \frac{\overline{K}_I}{128}\left\{e_I(i) + e_I(0)\right\}$

;เมื่อ $e_I(i) = F_I r(i) - c(i)$

```
int: ld a,(8090h)   ;โหลดค่าอินพุทอ้างอิง,r(i)
     ld d,a         ;เก็บ r(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ d
     ld a,(8087h)   ;โหลดค่า F_I
     ld e,a         ;เก็บค่า F_I ไว้ในรีจิสเตอร์ e
     mlt de         ;F_Ir(i) ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ e
     ld a,(8091h)   ;โหลดค่าเอาท์พุท,c(i)
     ld b,a         ;เก็บ c(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
     ld a,e         ;นำ F_Ir(i) มาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ a
     sub b          ;F_Ir(i) - c(i) = e_I(i) ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ a
     ld (80a1),a    ;เก็บค่า e_I(i) ไว้ในตำแหน่ง 80a1h ของหน่วยความจำ
     ld b,a         ;เก็บ e_I(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
     ld a,(8080h)   ;โหลดค่า e_I(0)
     add a,b        ;e_I(i) + e_I(0) ค่าที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ a
     ld d,a         ;เก็บค่า e_I(i) + e_I(0) ไว้ในรีจิสเตอร์ d
     ld a,(8084h)   ;โหลดค่า K̄_I
     ld e,a         ;เก็บ K̄_I ไว้ในรีจิสเตอร์ e
     mlt de         ;K̄_I{e_I(i) + e_I(0)} ผลลัพธ์จะปรากฏอยู่ในรีจิสเตอร์ e
     ld a,e         ;นำ K̄_I{e_I(i) + e_I(0)} มาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ a
     srl a          ;K̄_I{e_I(i) + e_I(0)}/128 ด้วยเทคนิคเลื่อนขวา 7 ครั้ง ซึ่งหมายถึง
     srl a          ;การหารด้วย 128 นั่นเอง
     srl a
     srl a
     srl a
     srl a
     srl a
     ld b,a         ;เก็บค่า K̄_I{e_I(i) + e_I(0)}/128 ไว้ในรีจิสเตอร์ b
     ld a,(8082h)   ;โหลดค่า u_I*(0) มาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ a
     add a,b        ;u_I*(0) + K̄_I{e_I(i) + e_I(0)}/128 = u_I*(i) ผลที่ได้อยู่ในรีจิสเตอร์ a
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ld (80a2h),a     ;เก็บค่า uI*(i) ไว้ในตำแหน่ง 80a2h ของหน่วยความจำ
```

;คำนวณสัญญาณควบคุมในส่วนขององค์ประกอบดี ด้วยสูตร

; $u_D^*(i) = \frac{K_D}{T}\{e_D(i) - e_D(0)\}$

;เมื่อ $e_D(i) = F_d r(i) - c(i)$

```
diff: ld a,(8090h)   ;โหลดค่าอินพุทอ้างอิง,r(i)
      ld d,a         ;เก็บค่า r(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ d
      ld a,(8088h)   ;โหลดค่า FD
      ld e,a         ;เก็บค่า FD ไว้ในรีจิสเตอร์ e
      mlt de         ;FDr(i) ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ e
      ld a,(8091h)   ;โหลดค่าเอาท์พุท,c(i)
      ld b,a         ;เก็บค่า c(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
      ld a,e         ;นำ FDr(i) มาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ a
      sub b          ;Fdr(i) - c(i) = eD(i) ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ a
      ld (80a3h),a   ;เก็บค่า eD(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 80a3h ของหน่วยความจำ
      ld a,(8081h)   ;โหลดค่า eD(0)
      ld b,a         ;นำ eD(0) มาเก็บไว้ที่รีจิสเตอร์ b
      ld a,(80a3h)   ;โหลดค่า eD(i)
      sub b          ;eD(i) - eD(0) ผลลัพธ์อยู่ที่รีจิสเตอร์ a
      ld d,a         ;เก็บ eD(i) - eD(0) ไว้ในรีจิสเตอร์ d
      ld a,(8085h)   ;โหลดค่า KD/T
      ld e,a         ;นำ KD/T มาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ e
      mlt de         ;KD/T{eD(i) - eD(0)} = uD*(i) ผลลัพธ์อยู่ในรีจิสเตอร์ e
      ld a,e         ;เก็บ uD*(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ a
      ld (80a4h),a   ;เก็บ uD*(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 80a4h ของหน่วยความจำ
```

;คำนวณสัญญาณควบคุม $u^*(i)$ ด้วยสูตร

; $u^*(i) = u_P^*(i) + u_I^*(i) + u_D^*(i)$ หรือ

; $u^*(i) = u_I^*(0) + K_P e_P(i) + \frac{K_I T}{2}\{e_I(i) + e_I(0)\} + \frac{K_D}{T}\{e_D(i) - e_D(0)\}$

```
uk: ld a,(80a0h)     ;โหลดค่า uP*(i)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        ld b,a          ;เก็บ up*(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
        ld a,(80a2h)    ;โหลดค่า uI*(i)
        add a,b         ;นำ up*(i) + uI*(i) ผลลัพธ์อยู่ที่รีจิสเตอร์ a
        ld b,a          ;เก็บ up*(i) + uI*(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
        ld a,(80a4h)    ;โหลดค่า uD*(i)
        add a,b         ;นำ up*(i) + uI*(i) + uD*(i) = u*(i) ผลลัพธ์อยู่ที่รีจิสเตอร์ a
        ld (80a5h),a    ;เก็บค่า u*(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 80a5h ของหน่วยความจำ
outp:   out (0eah),a    ;ส่งสัญญาณ u*(i) ออกสู่ ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ ที่พอร์ท 0eah เพื่อ
                        ;ใช้ประโยชน์ในการเป็นสัญญาณควบคุม สู่ตัวขับ (driver) ต่อไป

;ทำการปรับค่าใหม่ (update) เพื่อใช้ประโยชน์ในการคำนวณครั้งต่อไป
update: ld a,(80a1h)    ;โหลดค่า eI(i)
        ld (8080h),a    ;ปรับให้ eI(0) เท่ากับ eI(i)
        ld a,(80a3h)    ;โหลดค่า eD(i)
        ld (8081h),a    ;ปรับให้ eD(0) เท่ากับ eD(i)
        ld a,(80a2h)    ;โหลดค่า uI*(i)
        ld (8082h),a    ;ปรับให้ uI*(0) เท่ากับ uI*(i)
        pop bc          ;นำข้อมูลที่เก็บลงในสแตกเมื่อตอนต้นโปรแกรมกลับคืนมา เพื่อพร้อม
        pop de          ;ที่จะกลับเข้าสู่ โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์ (โปรแกรมหลัก)
        pop hl          ;โดยที่ข้อมูลในรีจิสเตอร์ต่างๆ ยังคงเดิมเหมือนเมื่อตอนก่อนเข้าสู่-
        pop af          ;โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี (โปรแกรมให้บริการการอินเตอร์รัพท์)
        ei              ;ยอมรับการอินเตอร์รัพท์ (enable interrupt)
        reti            ;กลับเข้าสู่โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์ (return interrupt)
```

โปรแกรมทั้งสองส่วนข้างต้น ถูกเขียนขึ้นเป็นแอสเซมบลี้ไฟล์โดยอาศัยเอดิเตอร์ใน Z180ASM โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์ ได้รับการบรรจุไว้ในไฟล์ ch0.asm ขณะที่โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี ถูกบรรจุไว้ในไฟล์ ch1.asm ทั้งสองไฟล์ได้รับการแปลงให้ไปอยู่ในรูปของอินเทลเฮ็กซ์ไฟล์ (intel hex files) ด้วยแอสเซมเบลอร์ Z180ASM โดยที่ไฟล์ ch0.asm จะถูกแปลงไปเป็นไฟล์ ch0.obj ดังแสดงในรูปที่ 30 และไฟล์ ch1.asm ถูกแปลงไปเป็นไฟล์ ch1.obj ดังรูปที่ 31 ตามลำดับ

เฮ็กซ์ไฟล์ทั้งสองจะถูกดาวน์โหลดลงสู่หน่วยความจำแรมบนบอร์ดควบคุม ด้วยดีบักเกอร์ AT180 เพื่อพร้อมทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี มีพิกัดและขีดจำกัดในการใช้งาน ที่สามารถแยกแยะเป็นข้อได้ดังนี้

1. โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะใช้งานกับโพรเซสเซอร์ที่มีความแยกชัด 8 บิตเท่านั้น

2. โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะใช้งานกับระบบที่มีคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณคงที่ (1 มิลลิวินาที) ถ้าจะต้องนำโปรแกรมดังกล่าวไปใช้ในงานควบคุมระบบที่มีคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณที่ต่างค่ากันออกไป บางส่วนของโปรแกรมดังกล่าวจำเป็นต้องได้รับการดัดแปลงเสียใหม่

```
:10800000F3ED5E3E003280803281803282803E0518
:108010003283803E083284803E043285803E0132C5
:1080200086803E013287803E013288803E80D3EBDD
:108030003E003270803E813271803E80ED473EA529
:0E804000D3803E24D3803E70D380FBC34B80A0
:00000001FF
```

รูปที่ 30 แสดงรายละเอียดของไฟล์ ch0.obj

```
:10810000F5E5D5C53E00D3603E803DC20A813E33D1
:10811000329080DBFC3291803A9080573A86805FC3
:10812000ED5C3A9180477B90573A83805FED5C7BB2
:1081300032A0803A9080573A87805FED5C3A918018
:10814000477B9032A180473A808080573A84805F95
:10815000ED5C7BCB3FCB3FCB3FCB3FCB3FCB3FCB54
:108160003F473A82808032A2803A9080573A888096
:108170005FED5C3A9180477B9032A3803A818047E3
:108180003AA38090573A85805FED5C7B32A4803AB9
:10819000A080473AA28080473AA4808032A580D34D
:1081A000EA3AA1803280803AA3803281803AA2806C
:0A81B000328280C1D1E1F1FBED4DF8
:00000001FF
```

รูปที่ 31 แสดงรายละเอียดของไฟล์ ch1.obj

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สัญญาณควบคุม (control signal,u(i)) จากโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5 โวลท์ และจะอิ่มตัวที่ค่าดังกล่าว

4. โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีมีขนาด 212 ไบต์ และตัวข้อมูลมีขนาด 8 ไบต์ (รายละเอียดการคำนวณขนาดโปรแกรมได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.)

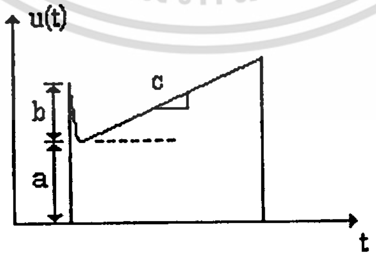
5. โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีใช้เวลาในการเอกซิคิวท์ประมาณ 255.9 ไมโครวินาที หรือประมาณ 0.26 มิลลิวินาที (รายละเอียดการคำนวณเวลาในการเอกซิคิวท์โปรแกรม ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.)

จะเห็นได้ว่าโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี สามารถทำงานได้แล้วเสร็จก่อนที่จะมีการสุ่มสัญญาณครั้งต่อไป การทำงานของตัวควบคุมในลักษณะนี้ ถือได้ว่าเป็นการทำงานแบบเวลาจริง และตัวควบคุมพีไอดีที่ได้รับการพัฒนาขึ้นสามารถเรียกขานได้ว่า "ตัวควบคุมพีไอดีชนิดเวลาจริง" [2],[28] ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการทดสอบโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีที่พัฒนาขึ้น

4. การทดสอบตัวควบคุมพีไอดี

สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดีต่อสัญญาณอินพุทแบบขั้นบันได แสดงดังรูปที่ 32 ผลจากการปรับค่าพารามิเตอร์ K_P, K_I และ K_D จะส่งผลต่อสัญญาณควบคุมที่แสดงในรูปดังรายละเอียดต่อไปนี้

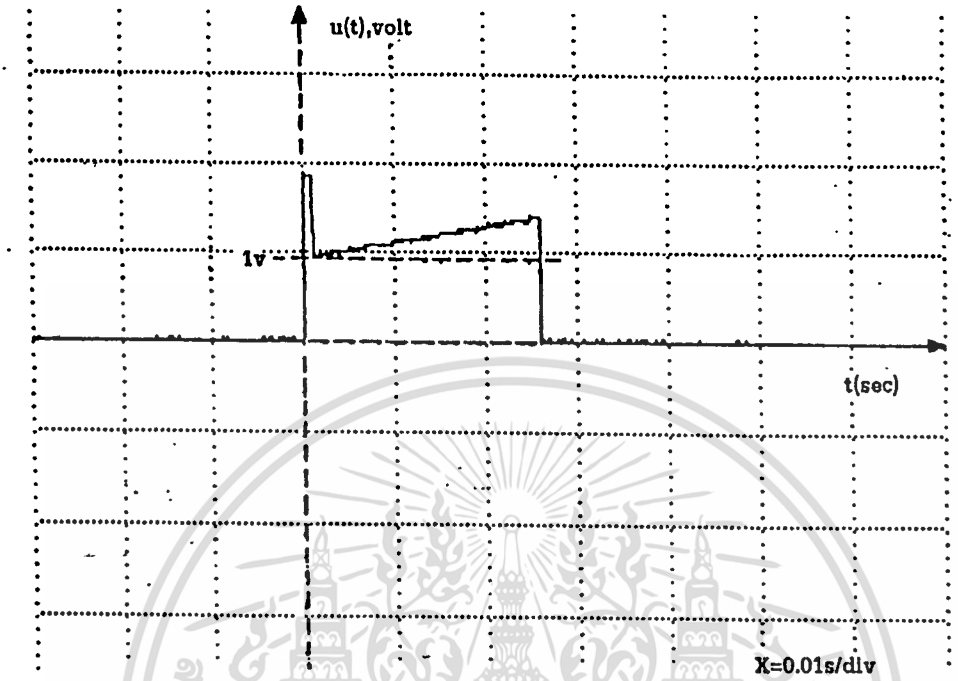
- หากทำการปรับ K_P เพิ่มขึ้น จะทำให้ช่วง a ในรูปเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน และในทางกลับกัน หากให้การปรับลด K_P จะทำให้ช่วง a ลดลงตามสัดส่วน
- หากทำการปรับ K_I เพิ่มขึ้น จะทำให้ความชันในช่วง c ในรูปเพิ่มขึ้น และในทางกลับกัน หากปรับลด K_I ความชันในช่วง c จะลดลง
- หากทำการปรับ K_D เพิ่มขึ้น จะทำให้ความสูงในช่วง b ในรูปเพิ่มขึ้น และในทางกลับกัน หากปรับลด K_D จะทำให้ความสูงในช่วง b ลดลง



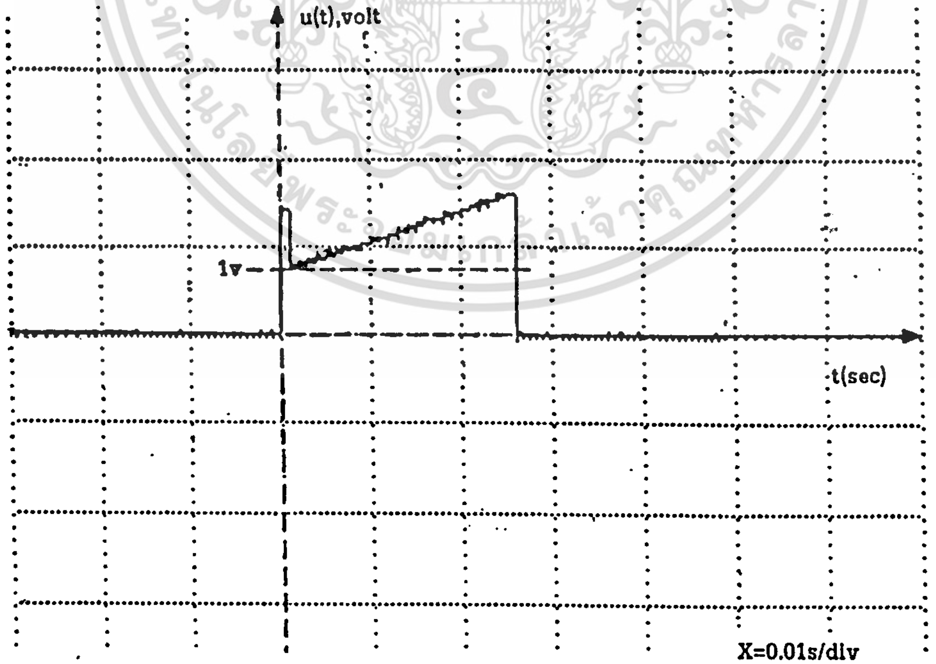
รูปที่ 32 สัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมพีไอดี ต่อสัญญาณอินพุทแบบขั้นบันได

รูปที่ 33-35 เป็นบางส่วนของผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีแบบดิจิตอลที่ได้พัฒนาขึ้น โดยทำการโปรแกรมค่าพารามิเตอร์ K_P, K_I และ K_D ที่ค่าต่างๆ ผลการทดสอบโดยรวมอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

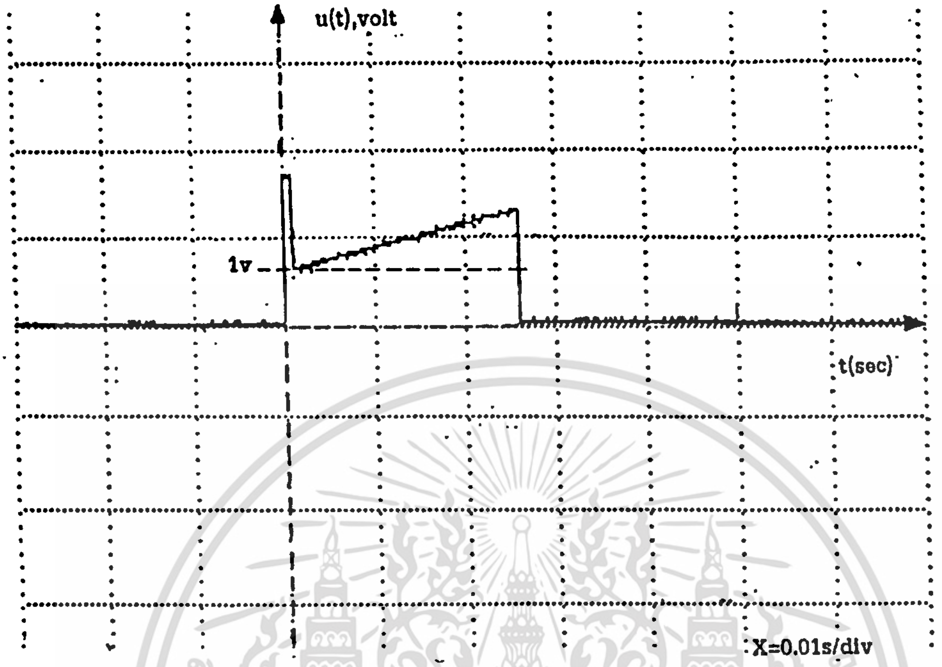


รูปที่ 33 สัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมพีไอดี เมื่อ K_P=1,K_I=15 และ K_D=0.001



รูปที่ 34 สัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมพีไอดี เมื่อ K_P=1,K_I=30 และ K_D=0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 35 สัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมพีไอดี เมื่อ K_P=1,K_I=45 และ K_D=0.002

5. การทดสอบการปรับระดับอินพุท

จากระบบควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น จะเห็นว่าในส่วนของกระบวนการภายใต้การควบคุมนั้น ไม่สามารถปรับค่าใดๆได้ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการมีลักษณะเป็น "hard-wired" ซึ่งยากต่อการปรับรื้อ แต่เราสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีในวงรอบปิดของการควบคุมได้ (ในที่นี้หมายถึงค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบพี,ไอและดี)การปรับค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวยังผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงรูปของอาการตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบโดยรวม ซึ่งมีความหมายโดยนัยว่าระบบได้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ขึ้น อันอาจสืบเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมของการทำงาน และอายุการใช้งาน แล้วเราจะดำเนินการทดลองเชิงปรับแก้สถานการณ์ที่เกิดขึ้น เพื่อชดเชยให้ผลตอบสนองที่เปลี่ยนไป กลับคืนสู่โครงรูปเดิมให้มากที่สุด ด้วยการปรับระดับอินพุทตามข้อเสนอของไอเทลเบิร์ก การพยายามที่จะปรับแก้สถานการณ์ดังกล่าวจะนำไปสู่ความรู้ที่จะใช้เป็นฐานในการตัดสินใจเลือกปรับแต่งค่า F_i เพื่อชดเชยให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นด้วยการอนุวัตกับตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (FLC)

ในการปฏิบัติทดลอง การปรับค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบพี,ไอ และดี จะกระทำโดยการโปรแกรมด้วยค่าต่างๆ เพื่อดูผลกระทบที่อาจทำให้โครงรูปของผลตอบสนองของระบบในโดเมนเวลาเกิดการเปลี่ยนแปลง และในส่วนของการปรับเทอม F ต่างๆเพื่อชดเชยนั้นจะเป็นการปรับลดและเพิ่มระดับอินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จะปรับลดระดับอินพุทจาก 100%-0% และปรับเพิ่มระดับอินพุทจาก 100%-200%) ลักษณะของการปรับจะแยกกันอย่างอิสระ กล่าวคือถ้าทำการปรับ F ตัวใดตัวหนึ่ง อีกสองตัวที่เหลือจะได้รับการปรับตั้งเอาไว้ที่ 100% ของค่าอินพุทอ้างอิง ผลการปรับระดับอินพุทที่มีต่อผลตอบสนองของระบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การปรับ F_P (ในขณะที่ F_I และ F_D ปรับตั้งไว้ที่ 100% ของค่าอินพุทอ้างอิง) จะทำให้ระดับของผลตอบสนองเปลี่ยนไป กล่าวคือ เมื่อทำการปรับลดระดับอินพุทด้วยเทอม F_P จาก 100%-0% จะส่งผลให้อาการตอบสนองลดระดับลงตามส่วน ผลตอบสนองไม่ปรากฏการพุ่งเกินและการสั่นไกว ค่าเวลาในการไต่ระดับเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการปรับเพิ่มระดับอินพุทด้วยเทอม F_P จาก 100%-200% จะส่งผลให้อาการตอบสนองเพิ่มระดับขึ้นตามส่วน ไม่ปรากฏการพุ่งเกินและการสั่นไกวในผลตอบสนอง ค่าเวลาในการไต่ลดลง ผลการปรับ F_P จะเป็นประโยชน์ในการชดเชยค่าระดับผลตอบสนองในสภาวะคงตัว ที่อาจมีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าที่พึงประสงค์หรือ "set point" ให้มีค่าใกล้เคียงค่าที่ต้องการได้

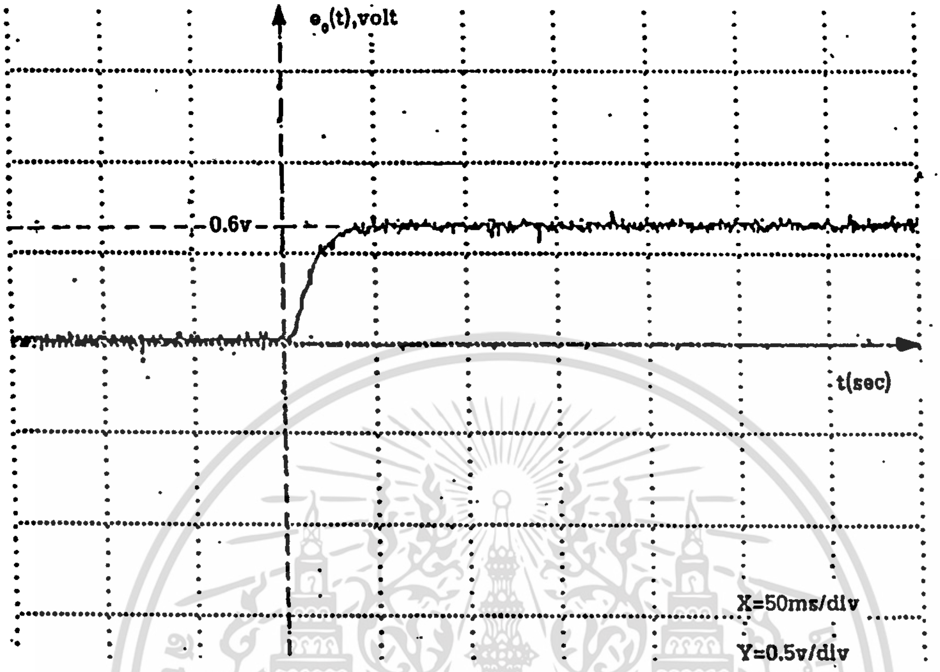
- การปรับ F_I (ในขณะที่ F_P และ F_D ปรับตั้งไว้ที่ 100% ของค่าอินพุทอ้างอิง) ในลักษณะของการปรับลดระดับอินพุทด้วยเทอม F_I จะส่งผลให้ระดับของอาการตอบสนองมีค่าต่ำลงเป็นบางช่วง กล่าวคือ ในการปรับลดระดับอินพุทลงจาก 100%-50% จะส่งผล แต่ในช่วงการปรับลดระดับอินพุทจาก 50%-0% ไม่ส่งผลใดๆ ทั้งนี้ในการปรับลดระดับอินพุทตลอดทั้งย่าน (100%-0%) ไม่ก่อให้เกิดการพุ่งเกินและการสั่นไกว ค่าเวลาในการไต่ระดับเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในทางกลับกันการปรับเพิ่มระดับอินพุทด้วยเทอม F_I จะส่งผลให้ระดับของอาการตอบสนองเพิ่มขึ้น จนบางครั้งอาจเกิดการอิ่มตัว (saturation) ทั้งนี้เพราะการปรับเพิ่ม F_I จะส่งผลถึงการรวม (summation) ของค่าความคลาดเคลื่อน (error) ซึ่งจะกระทำด้วยความชัน (slop) เท่ากับ $F_I K_I$ เมื่อปรับเพิ่ม F_I มากๆ จึงอาจส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นได้ ดังนั้นถ้าจะใช้ประโยชน์ในการปรับเพิ่ม F_I จึงไม่ควรใช้เกิน 140% ของค่าอินพุทอ้างอิง การปรับเพิ่มระดับอินพุทด้วย F_I ไม่ก่อให้เกิดการพุ่งเกินและการสั่นไกว ค่าเวลาในการไต่ระดับเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ผลการปรับ F_I จะเป็นประโยชน์ในการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวของผลตอบสนอง ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่พึงประสงค์ได้เช่นเดียวกับการปรับ F_P แต่อาจจะให้ประสิทธิผลที่ด้อยกว่า เพราะไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ตลอดทั้งย่าน

- การปรับ F_D (ในขณะที่ F_P และ F_I ปรับตั้งไว้ที่ 100% ของค่าอินพุทอ้างอิง) ในลักษณะของการปรับเพิ่ม (100%-200%) และปรับลด (100%-0%) ระดับอินพุทด้วยเทอม F_D ไม่ส่งผลกระทบใดๆต่ออาการตอบสนองของระบบ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอินพุทที่ใช้ทดสอบมีลักษณะเป็นขั้นบันได (step input) อย่างไรก็ตาม การศึกษาถึงผลกระทบจากการปรับ F_D ที่มีต่อผลตอบสนอง เป็นสิ่งที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติมในกรณีที่อินพุทมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป

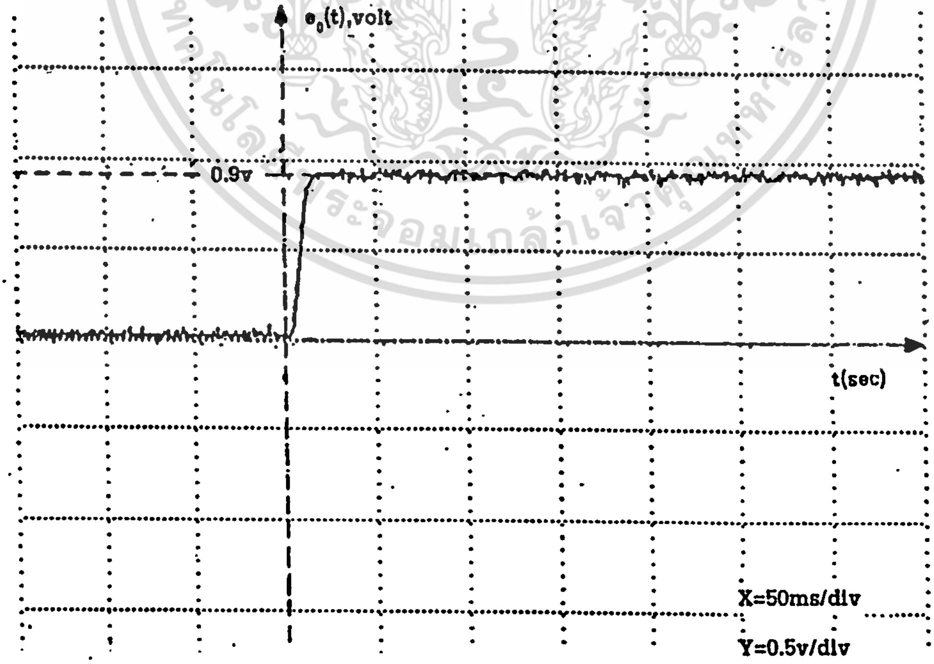
รูปที่ 36-38 เป็นบางส่วนของผลการปรับแต่งระดับอินพุทตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น

รูปที่ 36 แสดงผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่พึงประสงค์หรือ "set point" โดยได้รับการบันทึกไว้ด้วยออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอล ที่สามารถเก็บรักษาภาพและพิมพ์ภาพออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

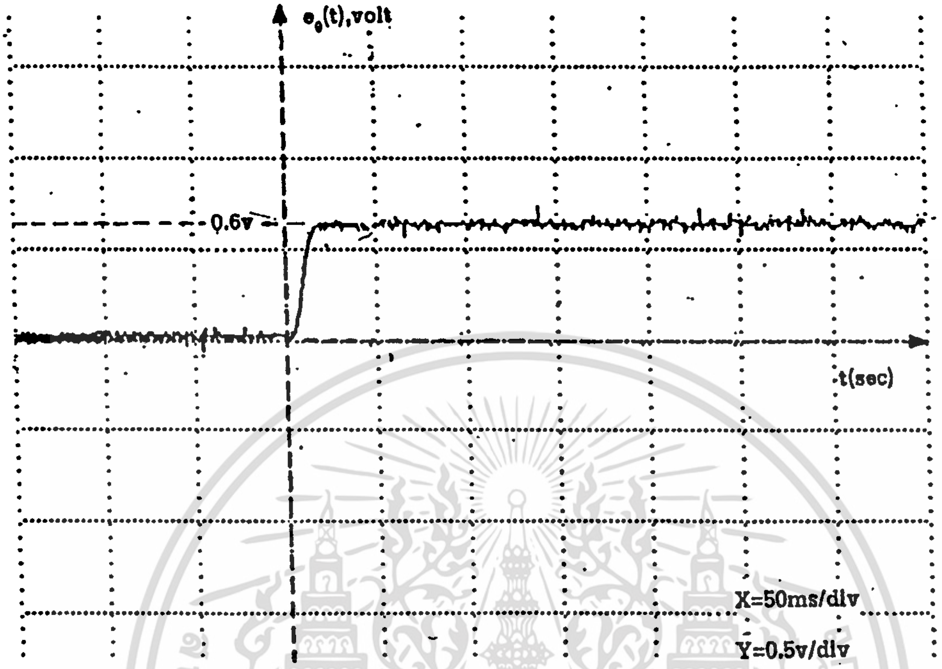


รูปที่ 36 ผลตอบสนองที่พึงประสงค์หรือ "set point"

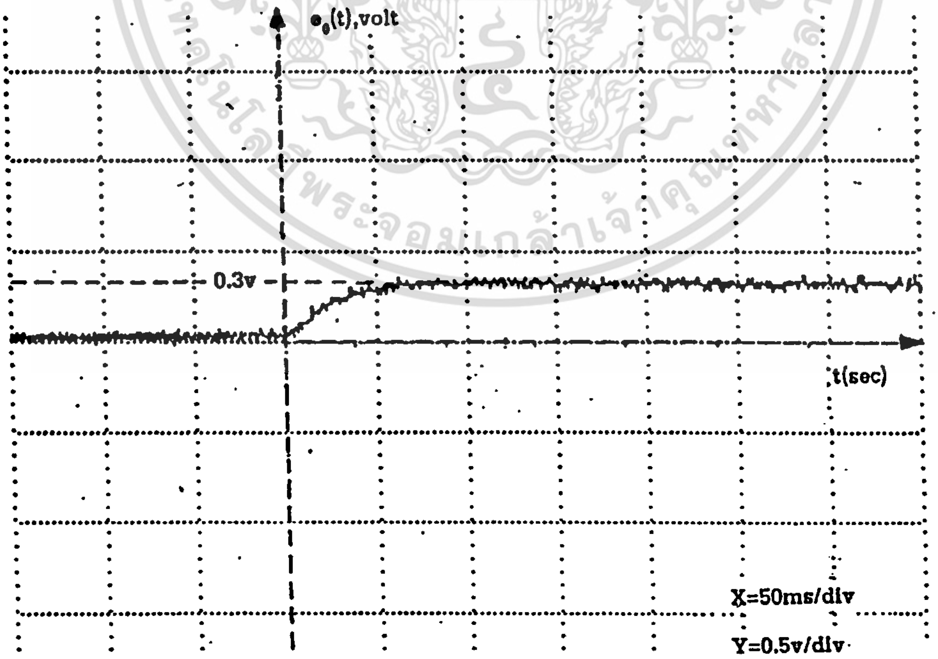


รูปที่ 37(ก) ผลตอบสนองที่มีระดับการตอบสนองสูงกว่า set point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

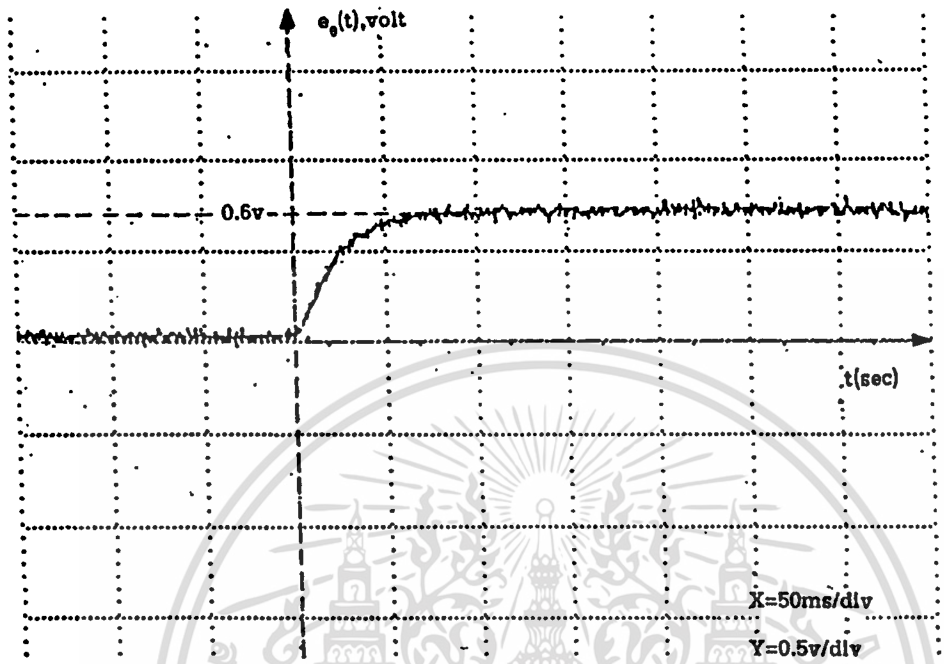


รูปที่ 37(ข) ผลตอบสนองภายหลังการปรับลดระดับอินพุท



รูปที่ 38(ก) ผลตอบสนองที่มีระดับการตอบสนองต่ำกว่า set point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 38(ข) ผลตอบสนองภายหลังการปรับเพิ่มระดับอินพุท

จากรูปที่ 37(ก) แสดงผลตอบสนองที่มีระดับการตอบสนองที่สูงกว่าค่าที่พึงประสงค์หรือ "set point" และรูปที่ 37(ข) แสดงผลตอบสนองภายหลังการปรับลดระดับอินพุท จะเห็นว่าสามารถลดระดับการตอบสนองที่มีค่าสูง ลงมาใกล้เคียงกับ set point ตามรูปที่ 36 ได้อย่างน่าพึงพอใจ

จากรูปที่ 38(ก) แสดงผลตอบสนองที่มีระดับการตอบสนองที่ต่ำกว่า set point และรูปที่ 38(ข) แสดงผลตอบสนองภายหลังการปรับเพิ่มระดับอินพุท จะเห็นว่าสามารถเพิ่มระดับการตอบสนองที่มีค่าต่ำให้สูงขึ้นใกล้เคียงกับค่า set point ตามรูปที่ 36 ได้อย่างน่าพึงพอใจเช่นกัน

6. สรุป

ในบทที่ 3 ที่ผ่านมาได้กล่าวถึงอัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดีแบบทั่วไป และตัวควบคุมพีไอดีที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอ, เทคนิคการทรานสฟอร์มคณิตศาสตร์โดเมน s มาเป็นคณิตศาสตร์โดเมน z และเหตุผลในการเลือกเทคนิคเฉพาะกับโครงงานวิทยานิพนธ์นี้, การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม และการออกแบบใหม่ (redesign) เพื่อเฟ้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ, การอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีตามโครงสร้างที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอในลักษณะของการทำงานแบบเวลาจริง ด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU รวมถึงการทดสอบตัวควบคุมดังกล่าว ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้กล่าวถึงการทดสอบการปรับระดับอินพุทที่ส่งผลต่ออาการตอบสนองของระบบในโดเมนเวลา การทดสอบดังกล่าวพบว่า การปรับ F_P เพื่อเพิ่มและลดระดับอินพุท จะส่งผลต่อการเพิ่มและลดระดับการตอบสนองของระบบได้ตลอดย่านการปรับ, การปรับ F_I เพื่อเพิ่มและลดระดับอินพุท จะส่งผลต่อการเพิ่มและลดระดับการตอบสนองของระบบได้เช่นกัน แต่ไม่ตลอดย่านการปรับ บางครั้งในกรณีปรับลดระดับอินพุทมากๆ จะไม่มีผลใดๆต่ออาการตอบสนอง และบางครั้งในกรณีปรับเพิ่มระดับอินพุทมากๆ อาจทำให้ผลตอบสนองเกิดการอิ่มตัว, ส่วนการปรับ F_D ทั้งเพิ่มและลดระดับอินพุท ในกรณีที่อินพุทเป็นขั้นบันได จะไม่ส่งผลกระทบใดๆต่ออาการตอบสนอง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การควบคุมการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

ความรู้พื้นฐานในการปรับระดับอินพุท เพื่อปรับแต่งสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น ตามที่ได้รับการบันทึกไว้ในบทที่ 5 จะได้รับการนำมาถอดความเป็นแบบจำลองฟัซซี่ (fuzzy model) ที่อาศัยฟัซซี่เซ็ทและฟัซซี่ลอจิกในการจัดตั้ง แบบจำลองดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นกฎ (rules) ที่มีรูปแบบ "ถ้า (สถานการณ์) แล้ว (ปฏิบัติการ)"[28] ในกฎเหล่านี้จะใช้ตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัซซี่ อธิบายความสัมพันธ์ทางพลวัตของสิ่งต่างๆในระบบที่สนใจ และเชื่อมโยงกฎเข้าด้วยกันโดยผูกพันธ์กันด้วยตรรกเชิงฟัซซี่ สิ่งที่ได้คือฟัซซี่อัลกอริธึม (fuzzy algorithm) ซึ่งในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ฟัซซี่อัลกอ-ริธึมที่ใช้บ่งบอกคุณภาพอาการตอบสนอง และฟัซซี่อัลกอริธึมที่ใช้ปรับแต่งสมรรถนะของระบบ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 4 นี้ทั้งสิ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการอนุวัตอัลกอริธึมดังกล่าวเพื่อใช้ควบคุมการปรับระดับอินพุท ด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU อีกด้วย สำหรับเทคนิคเชิงฟัซซี่และกลไกการปฏิบัติการเชิงฟัซซี่ต่างๆ ได้รับการนำเสนอไว้ในภาคผนวก จ. ซึ่งเป็นเอกสารวิชาการของ รศ.ดร.สราวุฒิ สุจิตจร ได้รับการตีพิมพ์ไว้ในวารสารเทคโนโลยีสุรนารี ปีที่ 2 ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกันยายน ถึงธันวาคม ปี 2538 หน้า 171 ถึง 196 บทความดังกล่าวได้ให้การอธิบายถึง ฟัซซี่เซ็ท ฟัซซี่ลอจิก ฟัซซี่อัลกอริธึม การอนุมานเชิงฟัซซี่ และโครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซี่โดยละเอียด อีกทั้งยังได้แสดงตัวอย่างระบบควบคุมแบบฟัซซี่ที่ได้มีการใช้งานแล้วในภาคอุตสาหกรรมด้วย

1. ฟัซซี่อัลกอริธึมเพื่อบ่งบอกคุณภาพอาการตอบสนอง

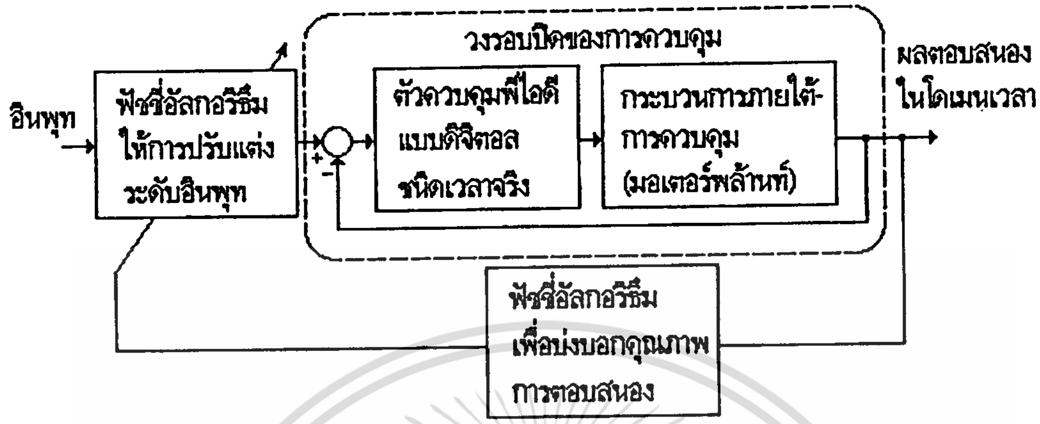
ในภาพรวม โครงสร้างของระบบควบคุมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้ จะมีรูปลักษณะเป็นดังรูปที่ 39 ฟัซซี่อัลกอริธึมจะประกอบด้วยสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ใช้บ่งบอกคุณภาพการตอบสนอง และส่วนปรับแต่งสมรรถนะของระบบ (ให้การปรับระดับอินพุท)

คุณภาพของอาการตอบสนองในโดเมนเวลา จะอาศัยดัชนีในการบ่งชี้คุณภาพดังกล่าว อันได้แก่ เวลาในการไต่ระดับ ปริมาณการพุ่งเกิน ปริมาณการสั่นไกว(อาจมองในแง่ของค่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวก็ได้ ทั้งนี้เพราะค่าทั้งสองเป็นปฏิภาคตรงต่อกัน) และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว ดังนั้นฟัซซี่อัลกอริธึมที่ใช้บ่งบอกคุณภาพการตอบสนอง จะต้องให้คำอธิบายเชิงพรรณนา หรือให้คำตอบต่อคำถามต่างๆ ดังต่อไปนี้ [30]

- เวลาในการไต่ระดับของผลตอบสนอง ช้าหรือเร็วอย่างไร
- การพุ่งเกินของผลตอบสนอง มีปริมาณมากหรือน้อยอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การสั่นไกวของผลตอบสนอง มีปริมาณมากหรือน้อยอย่างไร
- ความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว มีปริมาณมากหรือน้อยอย่างไร



รูปที่ 39 โครงสร้างของระบบควบคุมที่ได้รับการอนุวัตขึ้น

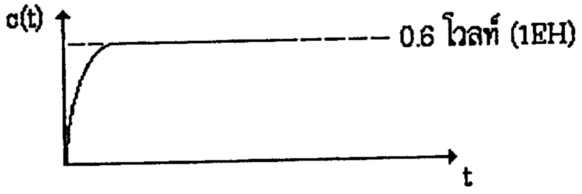
ฟัซซี่อัลกอริธึมในโครงงานฯ จะให้การพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวเป็นสำคัญ ทั้งนี้เพื่อสาธิตวิธีการควบคุม และทดสอบตัวควบคุมตามโครงสร้างที่ไอเทลเบิร์กได้นำเสนอ อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยในอนาคตควรให้ความสนใจกับค่าอื่นดังกล่าวข้างต้นเพื่อแสวงหาประโยชน์ในการใช้งานที่กว้างขวางมากยิ่งขึ้นต่อไป

รูปที่ 40 แสดงฟังก์ชั่นลำดับขั้นความเป็นสมาชิกภาพ (membership function) ที่ใช้ในโครงงานฯ ซึ่งเลือกใช้ฟังก์ชั่นรูปสามเหลี่ยมสมมาตร เพราะให้ความสะดวกต่อการคำนวณ ในส่วนของจักรวาลของสิ่งที่สนใจ (universe of discourse,U) แสดงในลักษณะที่ได้รับการนอร์มัลไลซ์แล้ว เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น และสามารถใช้ได้กับทุกตัวแปรทางภาษา

อักษรย่อในรูปที่ 40 ในทางฟัซซี่หมายถึงคำให้ค่า (labels) ของตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัซซี่มีความหมายดังต่อไปนี้

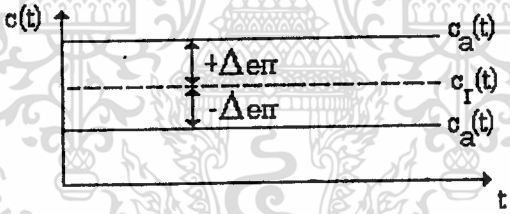
LN (large negative) = ค่าลบห่างศูนย์มาก
MN (medium negative) = ค่าลบห่างศูนย์ปานกลาง
SN (small negative) = ค่าลบห่างศูนย์เล็กน้อย
ZO (about zero) = ค่าประมาณศูนย์
SP (small positive) = ค่าบวกห่างศูนย์เล็กน้อย
MP (medium positive) = ค่าบวกห่างศูนย์ปานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 41 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่พึงประสงค์ที่ใช้เป็นแบบจำลองอ้างอิงหรือ "set point"

ถ้า Δerr มีค่าเป็นบวก (+Δerr) แสดงว่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวของผลตอบสนองที่วัดได้ในขณะนั้น มีระดับที่สูงกว่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวของผลตอบสนองตามแบบจำลองอ้างอิง ในทางกลับกันถ้า Δerr มีค่าเป็นลบ (-Δerr) แสดงว่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวของผลตอบสนองที่วัดได้ในขณะนั้น มีระดับที่ต่ำกว่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวของผลตอบสนองตามแบบจำลองอ้างอิง



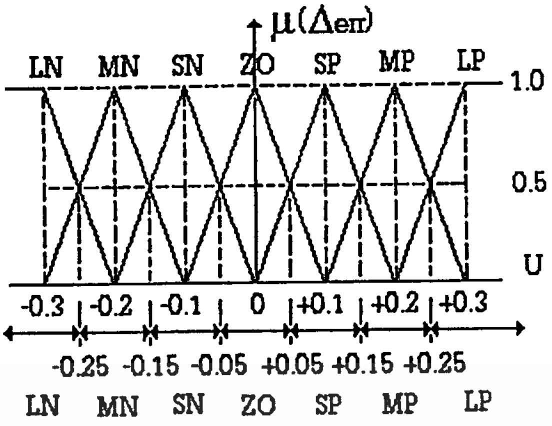
รูปที่ 42 แสดงการพิจารณาค่า Δerr

เพื่อให้โครงงานฯ ดำเนินไปโดยบรรลุวัตถุประสงค์ เราได้กำหนด (ขอบเขตการทำงาน) ขีดจำกัดสูงสุดและต่ำสุดของระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวที่สนใจ ไว้ที่ +0.9 โวลท์ และ +0.3 โวลท์ ตามลำดับ ดังนั้นค่า Δerr จะอยู่ในช่วง ±0.3 เราจะพิจารณาให้ช่วงดังกล่าวเป็น U ตามรูปที่ 43 ซึ่งแสดงกร๊าฟฟังก์ชั่นสมาชิกภาพสำหรับพิจารณาค่า Δerr ที่ได้รับการดีนอร์มัลไลซ์แล้ว และจะใช้ประโยชน์จากจุดตัดข้าม (crossover point) ที่มีค่า μ = 0.5 เป็นกลไกดำเนินการแปลงปริมาณหรือค่าเชิงเลข ไปเป็นปริมาณหรือค่าเชิงภาษา ซึ่งในทางฟัซซี่ จะเรียกขั้นตอนดังกล่าวว่า ฟัซซิฟิเคชั่น (fuzzification)

การฟัซซิฟิเคชั่นจะให้การพิจารณาเป็นช่วง ซึ่งช่วงดังกล่าวมีการจัดแบ่งด้วยค่า μ = 0.5 กล่าวคือ

$$-0.05 \leq \Delta err < +0.05 \Rightarrow ZO$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 43 ฟังก์ชั่นแสดงลำดับขั้นความเป็นสมาชิกภาพของ Δerr

มีความหมายว่า "หากการเปรียบเทียบค่าระดับผลตอบสนองในสภาวะคงตัวของผลตองสนองที่วัดได้กับระดับผลตอบสนองในสภาวะคงตัวของผลตอบสนองตามแบบจำลองอ้างอิงหรือ set point พบว่าผลต่างหรือค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว ($\Delta err = c_a(t) - c_r(t)$) อยู่ในย่าน -0.05 ถึง +0.05 ถือว่าค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวมีค่าประมาณศูนย์" ดังนั้นการฟัซซิฟิเคชั่นในภาพรวมอาจสรุปได้ดังนี้

$$\Delta err < -0.25 \Rightarrow LN$$
$$-0.25 \leq \Delta err < -0.15 \Rightarrow MN$$
$$-0.15 \leq \Delta err < -0.05 \Rightarrow SN$$
$$-0.05 \leq \Delta err < +0.05 \Rightarrow ZO$$
$$+0.05 \leq \Delta err < +0.15 \Rightarrow SP$$
$$+0.15 \leq \Delta err < +0.25 \Rightarrow MP$$
$$\Delta err \geq +0.25 \Rightarrow LP$$

นำผลการฟัซซิฟิเคชั่นมาทำการเขียนแสดงในรูปของกฎ เพื่อวินิจฉัยค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว จากนั้นทำการเรียงร้อยกฎเข้าด้วยกัน สิ่งที่ได้คือฟัซซี่อัลกอริธึมที่ใช้บ่งบอกคุณภาพการตอบสนองของระบบ ที่ขึ้นตรงกับค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวนั่นเอง ดังแสดงในรายละเอียดต่อไปนี้

(1). ถ้า [Δerr เป็น LN] แล้ว [e_{ss} มาก,ต้องปรับแก้]

(2). ถ้า [Δerr เป็น MN] แล้ว [e_{ss} ค่อนข้างมาก,ต้องปรับแก้]

(3). ถ้า [Δerr เป็น SN] แล้ว [e_{ss} ปานกลาง,ต้องปรับแก้]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4). ถ้า [Δerr เป็น ZO] แล้ว [e_{ss} ประมาณศูนย์,ไม่ต้องปรับแก้]

(5). ถ้า [Δerr เป็น SP] แล้ว [e_{ss} ปานกลาง,ต้องปรับแก้]

(6). ถ้า [Δerr เป็น MP] แล้ว [e_{ss} ค่อนข้างมาก,ต้องปรับแก้]

(7). ถ้า [Δerr เป็น LP] แล้ว [e_{ss} มาก,ต้องปรับแก้]

เมื่อ e_{ss} หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว

2. ฟัซซี่อัลกอริธึมเพื่อปรับแต่งสมรรถนะ

จากผลการทดสอบการปรับแต่งสัดส่วนอินพุท ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 5 จะได้รับการนำมาเขียนเป็นกฎการควบคุม สิ่งที่ได้คือฟัซซี่อัลกอริธึมที่ให้การปรับแต่งสมรรถนะของระบบนั่นเอง การเขียนกฎการควบคุมด้วยวิธีการข้างต้น อาจเรียกว่าวิธีศึกษาสำนึกในเชิงอัตวิสัย (subjective) เพราะจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบโดยตรง อัลกอริธึมเพื่อปรับแต่งสมรรถนะ จะให้การปรับระดับอินพุท โดยการทำงานของอัลกอริธึมดังกล่าวจะสอดรับกับค่า Δerr ในอัลกอริธึม ที่ใช้บ่งบอกคุณภาพการตอบสนองโดยตรง ซึ่งในการนี้เราจะใช้ประโยชน์แต่เพียงเทอม F_p เท่านั้น

อัลกอริธึมเพื่อปรับแต่งสมรรถนะ มีรายละเอียดดังนี้

(1). ถ้า [Δerr เป็น LN] แล้ว [ให้ปรับระดับอินพุทโดยการปรับลด F_p ด้วยปริมาณ LP]

(2). ถ้า [Δerr เป็น MN] แล้ว [ให้ปรับระดับอินพุทโดยการปรับลด F_p ด้วยปริมาณ MP]

(3). ถ้า [Δerr เป็น SN] แล้ว [ให้ปรับระดับอินพุทโดยการปรับลด F_p ด้วยปริมาณ SP]

(4). ถ้า [Δerr เป็น SP] แล้ว [ให้ปรับระดับอินพุทโดยการปรับเพิ่ม F_p ด้วยปริมาณ SP]

(5). ถ้า [Δerr เป็น MP] แล้ว [ให้ปรับระดับอินพุทโดยการปรับเพิ่ม F_p ด้วยปริมาณ MP]

(6). ถ้า [Δerr เป็น LP] แล้ว [ให้ปรับระดับอินพุทโดยการปรับเพิ่ม F_p ด้วยปริมาณ LP]

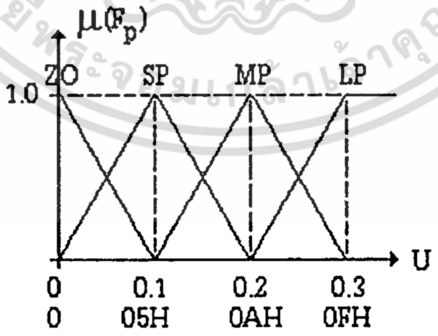
ผลพวงจากการใช้ประโยชน์จุดตัดข้าม (μ = 0.5) แบ่งสรรการให้ค่าเชิงภาษาเป็นคำหรือประโยคต่อตัวแปรทางภาษา (Δerr) นั้นจะเห็นว่า เมื่ออินพุทผ่านเข้ามาใน FLC จะถูกฟัซซิไฟด์ (fuzzified) ให้อยู่ในส่วนใดส่วนหนึ่งเท่านั้น การอนุมานหรือการเอกซิคิวท์กฎก็จะกระทำเพียงกฎนั้นกฎเดียว จะไม่มีการอนุมานหรือการเอกซิคิวท์กฎซ้ำซ้อนเกิดขึ้น ซึ่งสิ่งนี้เป็นผลดีต่อการสร้างตัวควบคุมชนิดเวลาจริงโดยทั่วไป เพราะการทำงานเพียงเงื่อนไขเดียวจะใช้เวลาในการเอกซิคิวท์โปรแกรมให้การควบคุมที่สั้นที่สุด

ถึงตอนนี้เราได้เอาท์พุทของฟัซซี่อัลกอริธึมเพื่อให้การปรับแต่งสมรรถนะ ในรูปของปริมาณเชิงภาษา ปริมาณดังกล่าวเป็นสิ่งที่ระบบหรือกระบวนการภายใต้การควบคุมไม่สามารถเข้าใจได้ ดังนั้นจึงต้องนำไปผ่านกระบวนการบางอย่างเพื่อแปลงปริมาณเชิงภาษาไปเป็นปริมาณเชิงเลข ที่ระบบหรือกระบวนการภายใต้การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมสามารถเข้าใจได้ กระบวนการดังกล่าวทางฟัซซี่เรียกว่าดีฟัซซิฟิเคชั่น (defuzzification) เทคนิคการดีฟัซซิฟิเคชั่นมีหลากหลาย แต่เทคนิควิธีที่นำมาใช้ในโครงงานนี้ คือเทคนิคของส่วนสูงสุด (maximum height) เพราะสะดวกต่อการคำนวณเป็นอย่างยิ่ง ผลของการดีฟัซซิฟิเคชั่นจะให้ปริมาณเชิงเลข เพื่อใช้ประโยชน์ในการปรับแต่งระดับอินพุทที่ระบบหรือกระบวนการภายใต้การควบคุมเข้าใจ รูปที่ 43 แสดงกร๊าฟลำดับขั้นความเป็นสมาชิกภาพของตัวแปรที่ใช้ปรับ(เพิ่มและลด)ระดับอินพุท ที่ผ่านการดีนอร์มัลไลซ์แล้ว ตัวแปรที่ใช้ปรับระดับอินพุทในที่นี้คือ F_p ในภาพรวมอาจสรุปได้ดังนี้

- เมื่อต้องการปรับลดระดับอินพุทโดยการปรับลด F_p ด้วยปริมาณ SP หมายความว่า ให้ลดระดับอินพุทด้วย F_p ลง 0.1 หรือ 05H จากค่าอินพุทอ้างอิง
- เมื่อต้องการปรับลดระดับอินพุทโดยการปรับลด F_p ด้วยปริมาณ MP หมายความว่า ให้ลดระดับอินพุทด้วย F_p ลง 0.2 หรือ 0AH จากค่าอินพุทอ้างอิง
- เมื่อต้องการปรับลดระดับอินพุทโดยการปรับลด F_p ด้วยปริมาณ LP หมายความว่า ให้ลดระดับอินพุทด้วย F_p ลง 0.3 หรือ 0FH จากค่าอินพุทอ้างอิง
- เมื่อต้องการปรับเพิ่มระดับอินพุทโดยการปรับเพิ่ม F_p ด้วยปริมาณ SP หมายความว่า ให้เพิ่มระดับอินพุทด้วย F_p ขึ้น 0.1 หรือ 05H จากค่าอินพุทอ้างอิง
- เมื่อต้องการปรับเพิ่มระดับอินพุทโดยการปรับเพิ่ม F_p ด้วยปริมาณ MP หมายความว่า ให้เพิ่มระดับอินพุทด้วย F_p ขึ้น 0.2 หรือ 0AH จากค่าอินพุทอ้างอิง
- เมื่อต้องการปรับเพิ่มระดับอินพุทโดยการปรับเพิ่ม F_p ด้วยปริมาณ LP หมายความว่า ให้เพิ่มระดับอินพุทด้วย F_p ขึ้น 0.3 หรือ 0FH จากค่าอินพุทอ้างอิง



รูปที่ 44 กร๊าฟแสดงลำดับขั้นความเป็นสมาชิกภาพสำหรับการปรับระดับอินพุทด้วย F_p

3. การอนุวัตอัลกอริธึม

พิจารณารูปที่ 22 ซึ่งแสดงโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีตามที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอ เมื่อพิจารณาในภาพรวมของอัลกอริธึมตามโครงสร้างดังกล่าว เราจะพบว่าสามารถแบ่งอัลกอริธึมออกได้สองส่วนด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ ส่วนแรกเป็นฟัซซี่อัลกอริธึมที่ให้การปรับแต่งระดับอินพุท ตามที่ได้บรรยายไว้ในหัวข้อที่ 1 และหัวข้อที่ 2 และส่วนที่สองเป็นพีไอดีอัลกอริธึมที่ให้การผลิตสัญญาณควบคุม,$u'(i)$ ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ดังนั้นในการอนุวัตอัลกอริธึมโดยรวมในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงรวมเอาอัลกอริธึมทั้งสองส่วนเข้าไว้ด้วยกัน โดยจะได้รับการประดิษฐ์เป็นซอฟท์แวร์ให้การควบคุม ซึ่งเขียนขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU การทำงานของโปรแกรมดังกล่าวอาจอธิบายได้ด้วยแผนภูมิที่ 45

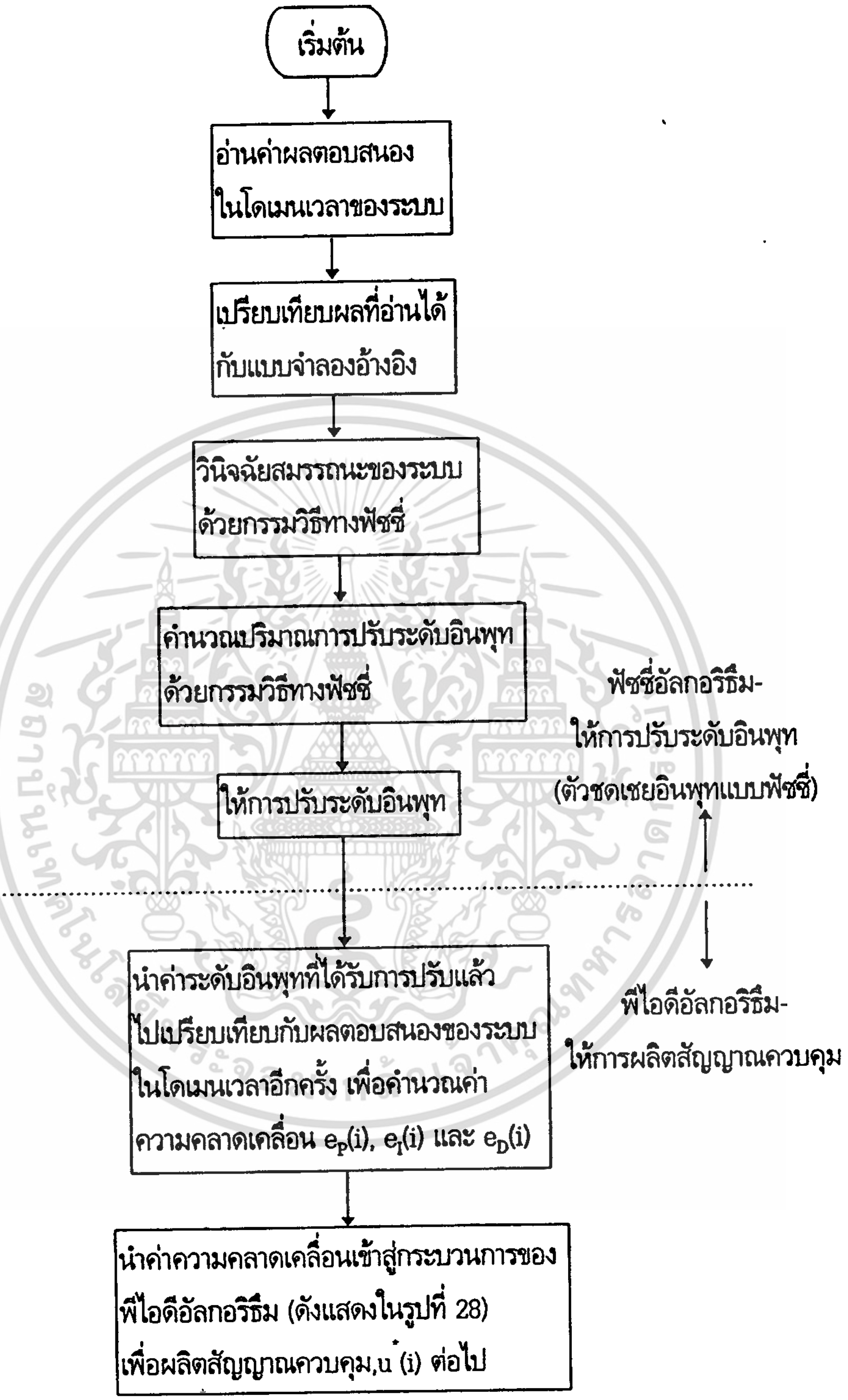
โดยเริ่มต้นจากการอ่านค่าผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบ ซึ่งจะให้ความสนใจกับค่าระดับผลตอบสนองในสภาวะคงตัวเป็นหลัก จากนั้นนำค่าดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองอ้างอิง เพื่อวินิจฉัยสมรรถนะของระบบ คำนวณปริมาณการปรับระดับอินพุทและให้การปรับระดับอินพุท ด้วยกรรมวิธีทางฟัซซี่ตามลำดับ ถึงตอนนี้เป็นอันสิ้นสุดฟัซซี่อัลกอริธึมที่ให้การปรับแต่งระดับอินพุท เราอาจเรียกขานตัวควบคุมในส่วนนี้ว่า "ตัวชดเชยอินพุทแบบฟัซซี่ (fuzzy input compensator)" ต่อจากนี้ค่าอินพุทที่ได้รับการปรับระดับแล้ว จะผ่านเข้าสู่พีไอดีอัลกอริธึม ดังมีรายละเอียดตามที่ได้บรรยายไว้ในบทที่ 3 หรืออาจดูตามแผนภูมิการทำงานของตัวควบคุมพีไอดี จากแผนภูมิที่ 29 ซึ่งจะให้การผลิตสัญญาณควบคุม,$u'(i)$ ต่อไป

ตัวควบคุมที่ได้รับการอนุวัตขึ้นโดยรวมในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้ อาจเรียกขานได้ว่า "ตัวควบคุมแบบฟัซซี่+พีไอดี (f^{+}PID controller)" ทั้งนี้เพราะมีกลไกการทำงานทั้งในส่วนของฟัซซี่ และในส่วนของพีไอดีร่วมกัน เมื่อพิจารณาในส่วนของการประดิษฐ์โปรแกรมให้การควบคุม ตัวควบคุม f^{+}PID จะยังคงอยู่ในส่วนของโปรแกรมให้บริการการอินเตอร์รัพท์เหมือนเดิม และการปฏิบัติงานของตัวควบคุมจะต้องให้แล้วเสร็จภายในช่วงเวลาการสุ่มสัญญาณ ซึ่งยังคงไว้ให้มีค่าเท่าเดิมคือ 1 มิลลิวินาที เพื่อคงคุณสมบัติของการเป็นตัวควบคุมชนิดเวลาจริงเอาไว้ การประดิษฐ์โปรแกรมจะอาศัยซอฟท์แวร์ Z180ASM และ ET-DEBUGGER AT180 เข้าช่วย ดังที่เคยได้อภิปรายไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3 รายละเอียดของโปรแกรมตัวควบคุม f^{+}PID มีดังนี้

- โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์ มีรายละเอียดพร้อมทั้งคำอธิบายโปรแกรมดังนี้

```
      .org 8000h        ;กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของโปรแกรมไว้ที่ 8000h
go1:  di                ;ไม่ยอมรับการอินเตอร์รัพท์ (disable interrupt)
      im 2              ;กำหนดให้อินเตอร์รัพท์เป็นโหมด 2
      ld a,33h          ;กำหนดค่าอินพุทอ้างอิง,r(i) เท่ากับ 33h หรือ 1 โวลท์
      ld (8500h),a      ;เก็บ r(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 8500h ของหน่วยความจำ
      ld (8501h),a      ;เก็บ Fpr(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 8501h ของหน่วยความจำ
      ld (8502h),a      ;เก็บ FIr(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 8502h ของหน่วยความจำ
      ld (8503h),a      ;เก็บ FDr(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 8503h ของหน่วยความจำ
      jp p1             ;กระโดดไปทำงานที่ลาเบล p1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ...เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผนภูมิที่ 45 การทำงานของตัวควบคุม f^+PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
go2: di             ;ไม่ยอมรับการอินเตอร์รัพท์ (disable interrupt)
     im 2           ;กำหนดให้อินเตอร์รัพท์เป็นโหมด 2
 p1: ld a,00h
     ld (8504h),a   ;กำหนดค่า eI(0) เท่ากับ 0 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8504h
     ld (8505h),a   ;กำหนดค่า eD(0) เท่ากับ 0 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8505h
     ld (8506h),a   ;กำหนดค่า uI(0) เท่ากับ 0 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8506h
     ld a,05h
     ld (8507h),a   ;กำหนดค่า KP เท่ากับ 5 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8507h
     ld a,08h
     ld (8508h),a   ;กำหนดค่า K̄I (K̄I = 64KIT) เท่ากับ 8 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8508h
     ld a,04h
     ld (8509h),a   ;กำหนดค่า K̄D (K̄D = KD/T) เท่ากับ 4 แล้วเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8509h
;ค่า KP, K̄I และ K̄D ไม่คงที่ตายตัว ทั้งนี้เพราะในการทดสอบระบบ เราจะทำการปรับแปรค่า
;ดังกล่าว เพื่อสร้างสถานการณ์ขึ้นมาสมอ้างเหตุการณ์ที่อาจทำให้ค่าพารามิเตอร์ภายในวงรอบปิด
;ของการควบคุมเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่นจากสภาพแวดล้อมและอายุการใช้งานขององค์ประกอบ
;ต่างๆในระบบ ซึ่งยังผลทำให้โครงรูปของผลตอบสนองเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่พึงประสงค์
     ld h,86h       ;กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของหน่วยความจำที่ใช้เก็บรักษาข้อมูลที่สนใจ
     ld l,00h       ;(ในที่นี้คือเอาท์พุท,c(i)) ไว้ที่ตำแหน่ง 8600h ซึ่งจะใช้ประโยชน์จาก
                    ;คู่รีจิสเตอร์ hl โดยที่รีจิสเตอร์ h จะเก็บ 8 บิตด้านสูงของตำแหน่ง(86h)
                    ;ในขณะที่รีจิสเตอร์ l จะเก็บ 8 บิตด้านต่ำของตำแหน่ง (00h)
     ld a,80h       ;กำหนด control word ให้เท่ากับ 80h
     out (0ebh),a   ;ส่ง control word ไปยัง control port ของ 8255PIO โดยที่ 80h
                    ;มีความหมายว่า กำหนดให้ทุกพอร์ทของ 8255PIO เป็น output port
     ld a,00h       ;กำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของโปรแกรมตัวควบคุมฟัซซี่พีไอดี อยู่ที่
     ld (8070h),a   ;8100h โดยที่ 8 บิตด้านต่ำของตำแหน่งเริ่มต้น (00h) จะถูกเก็บ
     ld a,81h       ;ไว้ที่ตำแหน่ง 8070h และ 8 ขิตด้านสูงของตำแหน่งเริ่มต้น (81h)
     ld (8071h),a   ;จะถูกเก็บไว้ที่ตำแหน่ง 8071h ของหน่วยความจำ
     ld a,80h
     ld i,a         ;กำหนดให้อินเด็กซ์รีจิสเตอร์ (I) มีค่าเป็น 80h
     ld a,0a5h      ;กำหนด control word ให้กับ Z80CTC โดยที่ 0a5h มีความหมายว่า
                    ;ให้ Z80CTC ทำงานเป็นตัวตั้งเวลา (timer) ผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    ;ทุกๆ 1 มิลลิวินาที (T)
    out (80h),a     ;ส่ง control word ไปยังพอร์ทของ Z80CTC
    ld a,24h        ;กำหนดค่า time constant
    out (80h),a     ;ส่งค่า time constant ไปยังพอร์ทของ Z80CTC
    ld a,70h        ;กำหนด interrupt vector
    out (80h),a     ;ส่งค่า interrupt vector ไปยังพอร์ทของ Z80CTC
    ei              ;ยอมรับการอินเตอร์รัพท์ (enable interrupt)
    loop: jp loop   ;รอการร้องขออินเตอร์รัพท์
```

- โปรแกรมตัวควบคุม f⁺PID มีรายละเอียดพร้อมคำอธิบายดังนี้

```
     .org 8100h     ;กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของโปรแกรมตัวควบคุม f+PID  ไว้ที่ 8100h
     push af        ;ทำการเก็บค่าในรีจิสเตอร์ af,de และ bc ลงสแต็ก เพื่อป้องกันมิให้ข้อมูล
     push de        ;ในรีจิสเตอร์เหล่านี้เสียหาย เมื่อต้องกลับไปทำงานในโปรแกรมผลิต
     push bc        ;ผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์อีกครั้ง ทั้งนี้ยกเว้นคู่รีจิสเตอร์ hl ที่จะต้อง
                    ;ใช้ข้อมูลต่อเนื่องสัมพันธ์กัน ระหว่างโปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์
                    ;และโปรแกรมตัวควบคุม f+PID
     ld a,00h
     out (60h),a    ;สั่งการให้ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ เริ่มการแปลงสัญญาณ โดยการส่งค่า(ใดๆ)
                    ;ในรีจิสเตอร์ a ไปยังพอร์ทสตาร์ทของคอนเวอร์เตอร์ ในที่นี้คือพอร์ท 60h
     ld a,80h
del: dec a
     jp nz,del      ;วนลูปคอยกว่าการแปลงสัญญาณของ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์จะเสร็จสิ้นลง
                    ;เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในโครงงานฯนี้คือ ADC0808 ใช้เวลาในการ
                    ;แปลงสูงสุดเท่ากับ 116 ไมโครวินาที การวนลูปคอย 80h-1 ครั้ง ใช้เวลา
                    ;ประมาณ 166 ไมโครวินาที ซึ่งประกันได้ว่า คอนเวอร์เตอร์สามารถแปลง
                    ;สัญญาณได้ทันการณ์แน่นอน
     in a,(0fch)    ;อ่านเอาท์พุท,c(i) ที่เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์แปลงได้ในรูปของ digital word
     ld (850ah),a   ;เก็บ c(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 850ah ของหน่วยความจำ
stor: ld a,(850ah)  ;โหลดค่าเอาท์พุท,c(i)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
          ld (hl),a          ;เก็บค่า c(i) มาไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของหน่วยความจำที่ใช้บันทึกข้อมูล
                             ;คือที่ตำแหน่ง 8600h นั่นเอง
          inc hl             ;เพิ่มค่า hl ขึ้น 1
          ld a,90h           ;โหลดค่า 90h มาไว้ที่รีจิสเตอร์ a โดยที่ 9000h จะเป็นตำแหน่งสิ้นสุดของ
                             ;หน่วยความจำในการบันทึกข้อมูล
          cp h               ;เปรียบเทียบค่าในรีจิสเตอร์ a(90h) กับค่าในรีจิสเตอร์ h ที่เพิ่มขึ้นทุกครั้ง
                             ;ในการทำงานของโปรแกรม
          jp nc,pro          ;ถ้าค่าในรีจิสเตอร์ a มากกว่าหรือเท่ากับค่าในรีจิสเตอร์ h แสดงว่าการ
                             ;บันทึกค่า c(i) ยังไม่สิ้นสุด ให้โปรแกรมกระโดดไปทำงานที่ลาเบล pro
                             ;แต่ถ้าค่าในรีจิสเตอร์ a น้อยกว่าค่าในรีจิสเตอร์ h แสดงว่าการบันทึก c(i)
                             ;สิ้นสุดลง ให้โปรแกรมทำงานคำสั่งถัดไป
          ld a,00h           ;โหลดค่า 00h ให้กับรีจิสเตอร์ a
          out (0e9h),a       ;สั่งให้มอเตอร์หยุดหมุน (รีเซ็ทกระบวนการ)
compared: ld b,1eh           ;โหลดค่า 1eh ให้กับรีจิสเตอร์ b โดยที่ค่า 1eh จะเท่ากับ 0.6 โวลท์
                             ;ซึ่งถือเป็นค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวที่พึงประสงค์ และ
                             ;ใช้เป็นค่าอ้างอิง,c_r(i)
          ld a,(9000h)       ;โหลดค่า c(i) ในสภาวะคงตัวที่บันทึกไว้
          cp b               ;ให้การเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง
          jp nc,nong         ;ถ้า c(i) ≥ c_r(i) แสดงว่าปรากฏค่า +Δerr ให้โปรแกรมกระโดดไป
                             ;ทำงานที่ลาเบล nong แต่ถ้า c(i) < c_r(i) แสดงว่าปรากฏค่า -Δerr
                             ;ให้โปรแกรมทำงานคำสั่งถัดไป
      su: ld b,a             ;ในกรณีที่ค่า c(i) < c_r(i) (เกิดค่า -Δerr) ให้นำ c(i) มาไว้ที่รีจิสเตอร์ b
          ld a,1eh           ;โหลดค่า c_r(i) ให้กับรีจิสเตอร์ a
          sub b              ;c_r(i)-c(i) = |-Δerr| ผลลัพธ์อยู่ในรีจิสเตอร์ a
          ld (8512h),a       ;เก็บค่า |-Δerr| ไว้ที่ตำแหน่ง 8512h ของหน่วยความจำ

          ld b,0ch           ;ตรวจสอบเงื่อนไขว่าค่า |-Δerr| ≥ |-0.25| (0ch) หรือไม่ ถ้าเงื่อนไข
          ld a,(8512h)       ;เป็นจริง ให้โปรแกรมกระโดดไปทำงานที่ลาเบล s1 ถ้าเงื่อนไขเป็นเท็จ
          cp b               ;ให้โปรแกรมทำงานคำสั่งถัดไป
          jp nc,s1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
   ld b,07h          ;ตรวจสอบเงื่อนไขว่าค่า |-Δerr| ≥ |-0.15| (07h) หรือไม่ ถ้าเงื่อนไข
   ld a,(8512h)      ;เป็นจริง ให้โปรแกรมกระโดดไปทำงานที่ลาเบล s2 ถ้าเงื่อนไขเป็นเท็จ
   cp b              ;ให้โปรแกรมทำงานคำสั่งถัดไป
   jp nc,s2

   ld b,02h          ;ตรวจสอบเงื่อนไขว่าค่า |-Δerr| ≥ |-0.05| (02h) หรือไม่ ถ้าเงื่อนไข
   ld a,(8512h)      ;เป็นจริง ให้โปรแกรมกระโดดไปทำงานที่ลาเบล s3 ถ้าเงื่อนไขเป็นเท็จ
   cp b              ;ให้โปรแกรมทำงานคำสั่งถัดไป
   jp nc,s3
s4: halt             ;สั่งให้ซีพียูหยุดการทำงาน

s1: ld a,(8501h)     ;โหลดค่า Fpr(i) มาไว้ในรีจิสเตอร์ a
   ld b,0eh          ;โหลดค่า 0eh หรือ 0.3 โวลท์ มาไว้ในรีจิสเตอร์ b
   add a,b           ;เพิ่มค่า Fpr(i) ขึ้น 0eh ผลลัพธ์อยู่ในรีจิสเตอร์ a
   ld (8501h),a      ;นำค่าระดับอินพุทที่ได้รับการปรับเพิ่มด้วยเทอม Fp มาไว้ในตำแหน่ง
                     ;8501h ของหน่วยความจำ
   halt              ;สั่งให้ซีพียูหยุดการทำงาน

s2: ld a,(8501h)     ;โหลดค่า Fpr(i) มาไว้ในรีจิสเตอร์ a
   ld b,0ah          ;โหลดค่า 0ah หรือ 0.2 โวลท์ มาไว้ในรีจิสเตอร์ b
   add a,b           ;เพิ่มค่า Fpr(i) ขึ้น 0ah ผลลัพธ์อยู่ในรีจิสเตอร์ a
   ld (8501h),a      ;นำค่าระดับอินพุทที่ได้รับการปรับเพิ่มด้วยเทอม Fp มาไว้ในตำแหน่ง
                     ;8501h ของหน่วยความจำ
   halt              ;สั่งให้ซีพียูหยุดการทำงาน

s3: ld a,(8501h)     ;โหลดค่า Fpr(i) มาไว้ในรีจิสเตอร์ a
   ld b,05h          ;โหลดค่า 05h หรือ 0.1 โวลท์ มาไว้ในรีจิสเตอร์ b
   add a,b           ;เพิ่มค่า Fpr(i) ขึ้น 05h ผลลัพธ์อยู่ในรีจิสเตอร์ a
   ld (8501h),a      ;นำค่าระดับอินพุทที่ได้รับการปรับเพิ่มด้วยเทอม Fp มาไว้ในตำแหน่ง
                     ;8501h ของหน่วยความจำ
   halt              ;สั่งให้ซีพียูหยุดการทำงาน
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
nong: sub b          ;ในกรณีที่ค่า c(i) ≥ c_r(i) แสดงว่าปรากฏค่า +Δerr ทำการคำนวณค่า
                     ;+Δerr ด้วยสูตร +Δerr = c(i)-c_r(i) ผลลัพธ์อยู่ในรีจิสเตอร์ a
      ld (8511h),a   ;เก็บค่า +Δerr ไว้ที่ตำแหน่ง 8511h ของหน่วยความจำ

      ld b,0ch       ;ตรวจสอบเงื่อนไขว่าค่า +Δerr ≥ 0.25 (0ch) หรือไม่ ถ้าเงื่อนไข
      ld a,(8511h)   ;เป็นจริง ให้โปรแกรมกระโดดไปทำงานที่ลาเบล n1 แต่ถ้าเงื่อนไขเป็นเท็จ
      cp b           ;ให้โปรแกรมทำงานคำสั่งถัดไป
      jp nc,n1

      ld b,07h       ;ตรวจสอบเงื่อนไขว่าค่า +Δerr ≥ 0.15 (07h) หรือไม่ ถ้าเงื่อนไข
      ld a,(8511h)   ;เป็นจริง ให้โปรแกรมกระโดดไปทำงานที่ลาเบล n2 แต่ถ้าเงื่อนไขเป็นเท็จ
      cp b           ;ให้โปรแกรมทำงานคำสั่งถัดไป
      jp nc,n2

      ld b,02h       ;ตรวจสอบเงื่อนไขว่าค่า +Δerr ≥ 0.05 (02h) หรือไม่ ถ้าเงื่อนไข
      ld a,(8511h)   ;เป็นจริง ให้โปรแกรมกระโดดไปทำงานที่ลาเบล n3 แต่ถ้าเงื่อนไขเป็นเท็จ
      cp b           ;ให้โปรแกรมทำงานคำสั่งถัดไป
      jp nc,n3
  n4: halt           ;สั่งให้ซีพียูหยุดการทำงาน
  n1: ld a,(8501h)   ;โหลดค่า F_pr(i) มาไว้ในรีจิสเตอร์ a
      ld b,0eh       ;โหลดค่า 0eh หรือ 0.3 โวลท์ มาไว้ในรีจิสเตอร์ b
      sub b          ;ลดค่า F_pr(i) ลง 0eh ผลลัพธ์อยู่ในรีจิสเตอร์ a
      ld (8501h),a   ;นำค่าระดับอินพุทที่ได้รับการปรับลดด้วยเทอม F_p มาไว้ที่ตำแหน่ง
                     ;8501h ของหน่วยความจำ
      halt           ;สั่งให้ซีพียูหยุดการทำงาน

  n2: ld a,(8501h)   ;โหลดค่า F_pr(i) มาไว้ในรีจิสเตอร์ a
      ld b,0ah       ;โหลดค่า 0ah หรือ 0.2 โวลท์ มาไว้ในรีจิสเตอร์ b
      sub b          ;ลดค่า F_pr(i) ลง 0ah ผลลัพธ์อยู่ในรีจิสเตอร์ a
      ld (8501h),a   ;นำค่าระดับอินพุทที่ได้รับการปรับลดด้วยเทอม F_p มาไว้ที่ตำแหน่ง
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                ;8501h ของหน่วยความจำ
    halt        ;สั่งให้ซีพียูหยุดการทำงาน

n3: ld a,(8501h)    ;โหลดค่า Fpr(i) มาไว้ในรีจิสเตอร์ a
    ld b,05h        ;โหลดค่า 05h หรือ 0.1 โวลท์ มาไว้ในรีจิสเตอร์ b
    sub b           ;ลดค่า Fpr(i) ลง 05h ผลลัพธ์อยู่ในรีจิสเตอร์ a
    ld (8501h),a    ;นำค่าระดับอินพุทที่ได้รับการปรับลดด้วยเทอม Fp มาไว้ที่ตำแหน่ง
                    ;8501h ของหน่วยความจำ
    halt            ;สั่งให้ซีพียูหยุดการทำงาน
```

;คำนวณสัญญาณควบคุมในส่วนของององค์ประกอบพี ด้วยสูตร

; $u_p^*(i) = K_p e_p(i)$

;เมื่อ $e_p(i) = F_p r(i) - c(i)$

```
pro: ld a,(850ah)     ;โหลดค่าเอาท์พุท,c(i)
     ld b,a           ;เก็บค่า c(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
     ld a,(8501h)     ;โหลดค่า Fpr(i)
     sub b            ;Fpr(i) - c(i) = ep(i) ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ a
     ld d,a           ;เก็บค่า ep(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ d
     ld a,(8507h)     ;โหลดค่า Kp
     ld e,a           ;เก็บค่า Kp มาไว้ในรีจิสเตอร์ e
     mlt de           ;Kpep(i) ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ e
     ld a,e           ;เก็บ Kpep(i) หรือ up*(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ a
     ld (850bh),a     ;เก็บ up*(i) ไว้ในตำแหน่ง 850bh ของหน่วยความจำ
```

;คำนวณสัญญาณควบคุมในส่วนของององค์ประกอบไอ ด้วยสูตร

; $$u_I^*(i) = u_I^*(0) + \frac{K_I T}{2}\left\{e_I(i) + e_I(0)\right\} = u_I^*(0) + \frac{\overline{K}_I}{128}\left\{e_I(i) + e_I(0)\right\}$$

;เมื่อ $e_I(i) = F_I r(i) - c(i)$

```
int: ld a,(850ah)     ;โหลดค่าเอาท์พุท,c(i)
     ld b,a           ;เก็บ c(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
     ld a,(8502h)     ;โหลดค่า FIr(i)
     sub b            ;FIr(i) - c(i) = eI(i) ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ a
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ld (850ch),a    ;เก็บค่า eI(i) ไว้ในตำแหน่ง 850ch ของหน่วยความจำ
ld b,a          ;เก็บ eI(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
ld a,(8504h)    ;โหลดค่า eI(0)
add a,b         ;eI(i) + eI(0) ค่าที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ a
ld d,a          ;เก็บค่า eI(i) + eI(0) ไว้ในรีจิสเตอร์ d
ld a,(8508h)    ;โหลดค่า K̄I
ld e,a          ;เก็บ K̄I  ไว้ในรีจิสเตอร์ e
mlt de          ;K̄I {eI(i) + eI(0)} ผลลัพธ์จะปรากฏอยู่ในรีจิสเตอร์ e
ld a,e          ;นำ K̄I {eI(i) + eI(0)} มาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ a
srl a           ;K̄I {eI(i) + eI(0)}/128 ด้วยเทคนิคเลื่อนขวา 7 ครั้ง ซึ่งหมายถึง
srl a           ;การหารด้วย 128 นั่นเอง
srl a
srl a
srl a
srl a
srl a
ld b,a          ;เก็บค่า K̄I {eI(i) + eI(0)}/128 ไว้ในรีจิสเตอร์ b
ld a,(8506h)    ;โหลดค่า uI*(0) มาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ a
add a,b         ;uI*(0) + K̄I {eI(i) + eI(0)}/128 = uI*(i) ผลที่ได้อยู่ในรีจิสเตอร์ a
ld (850dh),a    ;เก็บค่า uI*(i) ไว้ในตำแหน่ง 850dh ของหน่วยความจำ
```

;คำนวณสัญญาณควบคุมในส่วนขององค์ประกอบดี ด้วยสูตร

; $$u_D^*(i) = \frac{K_D}{T}\{e_D(i) - e_D(0)\}$$

;เมื่อ $e_D(i) = F_d r(i) - c(i)$

```
diff: ld a,(850ah)    ;โหลดค่าเอาท์พุท,c(i)
      ld b,a          ;เก็บค่า c(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
      ld a,(8503h)    ;โหลดค่า FDr(i)
      sub b           ;Fdr(i) - c(i) = eD(i) ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ a
      ld (850eh),a    ;เก็บค่า eD(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 850eh ของหน่วยความจำ
      ld a,(8505h)    ;โหลดค่า eD(0)
      ld b,a          ;นำ eD(0) มาเก็บไว้ที่รีจิสเตอร์ b
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ld a,(850eh)      ;โหลดค่า e_D(i)
sub b             ;e_D(i) - e_D(0) ผลลัพธ์อยู่ที่รีจิสเตอร์ a
ld d,a            ;เก็บ e_D(i) - e_D(0) ไว้ในรีจิสเตอร์ d
ld a,(8509h)      ;โหลดค่า K_D/T
ld e,a            ;นำ K_D/T มาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ e
mlt de            ;(K_D/T){e_D(i) - e_D(0)} = u_D*(i) ผลลัพธ์อยู่ในรีจิสเตอร์ e
ld a,e            ;เก็บ u_D*(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ a
ld (850fh),a      ;เก็บ u_D*(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 850fh ของหน่วยความจำ

;คำนวณสัญญาณควบคุม u*(i) ด้วยสูตร
;     u*(i) = u_P*(i) + u_I*(i) + u_D*(i) หรือ
;     u*(i) = u_I*(0) + K_P e_P(i) + (K_I T/2){e_I(i) + e_I(0)} + (K_D/T){e_D(i) - e_D(0)}
   uk: ld a,(850bh)   ;โหลดค่า u_P*(i)
       ld b,a         ;เก็บ u_P*(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
       ld a,(850dh)   ;โหลดค่า u_I*(i)
       add a,b        ;นำ u_P*(i) + u_I*(i) ผลลัพธ์อยู่ที่รีจิสเตอร์ a
       ld b,a         ;เก็บ u_P*(i) + u_I*(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ b
       ld a,(850fh)   ;โหลดค่า u_D*(i)
       add a,b        ;นำ u_P*(i) + u_I*(i) + u_D*(i) = u*(i) ผลลัพธ์อยู่ที่รีจิสเตอร์ a
       ld (8510h),a   ;เก็บค่า u*(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 8510h ของหน่วยความจำ
 outp: out (0e9h),a   ;ส่งสัญญาณ u*(i) ออกสู่ ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ ที่พอร์ท 0e9h เพื่อ
                      ;ใช้ประโยชน์ในการเป็นสัญญาณควบคุม สู่ตัวขับ (driver) ต่อไป

;ทำการปรับค่าใหม่ (update) เพื่อใช้ประโยชน์ในการคำนวณครั้งต่อไป
update: ld a,(850ch)   ;โหลดค่า e_I(i)
        ld (8504h),a   ;ปรับให้ e_I(0) เท่ากับ e_I(i)
        ld a,(850eh)   ;โหลดค่า e_D(i)
        ld (8505h),a   ;ปรับให้ e_D(0) เท่ากับ e_D(i)
        ld a,(850dh)   ;โหลดค่า u_I*(i)
        ld (8506h),a   ;ปรับให้ u_I*(0) เท่ากับ u_I*(i)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pop bc	;นำข้อมูลที่เก็บลงในสแตกเมื่อตอนต้นโปรแกรมกลับคืนมา เพื่อพร้อม
pop de	;ที่จะกลับเข้าสู่ โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์ (โปรแกรมหลัก)
pop af	
ei	;ยอมรับการอินเตอร์รัพท์ (enable interrupt)
reti	;กลับเข้าสู่โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์ (return interrupt)

โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์ได้รับการบรรจุไว้ในไฟล์ su0.asm ขณะที่โปรแกรมตัวควบคุม f^{+}PID ถูกบรรจุไว้ในไฟล์ su1.asm ทั้งสองไฟล์จะได้รับการแปลงให้ไปอยู่ในรูปของอินเทลเฮ็กซ์ไฟล์ (intel hex files) ด้วยแอสเซมเบลอร์ Z180ASM โดยที่ไฟล์ su0.asm จะถูกแปลงไปเป็นไฟล์ su0.obj ดังแสดงในรูปที่ 46 และไฟล์ su1.asm ถูกแปลงไปเป็นไฟล์ su1.obj ดังรูปที่ 47 ตามลำดับ

เฮ็กซ์ไฟล์ทั้งสองจะถูกดาวน์โหลดลงสู่หน่วยความจำแรมบนบอร์ดควบคุม ด้วยดีบักเกอร์ AT180

โปรแกรมตัวควบคุม f^{+}PID มีขีดจำกัดในการใช้งาน ที่สามารถแยกแยะเป็นข้อได้ดังนี้

1. โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะใช้งานกับโพรเซสเซอร์ที่มีความแยกชัด 8 บิตเท่านั้น

2. โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะใช้งานกับระบบที่มีคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณคงที่ (1 มิลลิวินาที) ถ้าจะต้องนำโปรแกรมดังกล่าวไปใช้ในงานควบคุมระบบ ที่มีคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณต่างค่ากันออกไป บางส่วนของโปรแกรมจำเป็นต้องได้รับการดัดแปลงเสียใหม่

3. สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม f^{+}PID จะอิ่มตัวที่ 5 โวลท์

4. โปรแกรมตัวควบคุม f^{+}PID มีขนาด 324 ไบต์ (รายละเอียดการคำนวณขนาดโปรแกรมได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.)

5. โปรแกรมตัวควบคุม f^{+}PID ใช้เวลาในการเอกซิคิวท์ประมาณ 242.1 ไมโครวินาที หรือประมาณ 0.24 มิลลิวินาที (รายละเอียดการคำนวณเวลาในการเอกซิคิวท์โปรแกรม ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.)

```
:10800000F3ED5E3E3332008532018532028532036 4
:10801000853E003204853205853206853E053207ED
:10802000853E083208853E0432098526862E003EAC
:1080300080D3EB3E003270803E813271803E80ED15
:10804000473EA5D3803E24D3803E70D380FBC34EF1
:0180500080AF
:00000001FF
```

รูปที่ 46 แสดงรายละเอียดของไฟล์ su0.obj

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
:10810000F5D5C53E00D3603E803DC20981DBFC321F
:108110000A853A0A8577233E90BCD2A9813E00D3D6
:10812000E9061E3A0090B8D26B81473E1E9032128B
:1081300085060C3A1285B8D24D8106073A1285B8E9
:10814000D2578106023A1285B8D26181763A01850A
:1081500060E80320185763A0185060A8032018555
:10816000763A0185060580320185769032118506C2
:108170000C3A1185B8D28B8106073A1185B8D2959I
:108180008106023A1185B8D29F81763A0185060EA2
:1081900090320185763A0185060A90320185763A59
:1081A000018506059032018576 3A0A85473A0185B0
:1081B00090573A07855FED5C7B320B853A0A85471D
:1081C0003A028590320C85473A048580573A0885F3
:1081D0005FED5C7BCB3FCB3FCB3FCB3FCB3FCB3F40
:1081E000CB3F473A068580320D853A0A85473A03E8
:1081F0008590320E853A0585473A0E8590573A09A3
:10820000855FED5C7B320F853A0B85473A0D8580A3
:10821000473A0F8580321085D3E93A0C85320485C0
:108220003A0E853205853A0D85320685C1D1F1FBBE
:02823000ED4D12
:00000001FF
```

รูปที่ 47 แสดงรายละเอียดของไฟล์ su1.obj

จะเห็นได้ว่าตัวควบคุม f^{+}PID ยังคงคุณสมบัติของการเป็นตัวควบคุมชนิดเวลาจริงเอาไว้ เพราะสามารถทำงานได้แล้วเสร็จภายในช่วงเวลาของการสุ่มสัญญาณ ในตัวโปรแกรมหลัก หรือโปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์ จะมีลาเบลให้การเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมอยู่สองแห่ง คือ go1 และ go2 มีความหมายว่า ถ้าหากให้โปรแกรมเริ่มทำงานที่ลาเบล go1 โปรแกรมจะทำงานในลักษณะเฝ้าสังเกตการณ์ผลตอบสนองของระบบ การควบคุมจะเป็นแบบดั้งเดิม คือส่งสัญญาณอินพุทผ่านเข้าสู่วงรอบปิดของการควบคุม 100% หลังจากนั้นเมื่อผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัว โปรแกรมจะให้การเปรียบเทียบระดับผลตอบสนองในสภาวะคงตัวที่อ่านได้กับค่าอ้างอิง และจะดำเนินการตามกรรมวิธีทางฟัซซี่ เพื่อให้การปรับแต่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับอินพุทต่อไปตามลำดับ แต่ถ้าหากให้โปรแกรมเริ่มทำงานที่ลาเบล go2 โปรแกรมจะทำงานในลักษณะให้การปรับแต่งสมรรถนะ (ผลตอบสนองของระบบ) ให้ดีขึ้น โดยที่โปรแกรมจะนำเอาค่าระดับอินพุทที่ได้รับการปรับแต่งแล้ว (จากการทำงานของโปรแกรมที่ลาเบล go1) มาดำเนินการ ส่งผ่านเข้าสู่วงรอบปิดของการควบคุมต่อไป ทั้งนี้ การให้โปรแกรมทำงานที่ลาเบล go2 จะต้องเกิดขึ้นหลังจากโปรแกรมทำงานที่ลาเบล go1 แล้วเสร็จก่อนทุกครั้ง

4. สรุป

บทที่ 4 ที่ผ่านมาได้กล่าวถึง การอนุวัตตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่ให้การปรับระดับอินพุท เพื่อปรับแต่งสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น กล่าวถึงการออกแบบฟัซซี่อัลกอริธึมเพื่อใช้บ่งบอกคุณภาพการตอบสนอง และฟัซซี่อัลกอริธึมให้การปรับแต่งสมรรถนะของระบบ(ปรับระดับอินพุท) ด้วยวิธีศึกษาสำนึกเชิงอัตวิสัย ฟัซซี่อัลกอริธึมให้การปรับสมรรถนะของระบบ จะพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวของผลตอบสนองเป็นหลัก และได้ทำการอนุวัตฟัซซี่อัลกอริธึมดังกล่าวร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี (ตามที่ได้บรรยายไว้ในบทที่ 3) ด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU เป็นซอฟท์แวร์ให้การควบคุมระบบที่ได้พัฒนาขึ้นในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้ และอาจเรียกขานตัวควบคุมดังกล่าวว่า "ตัวควบคุม f^{+}PID" โดยมีลักษณะการทำงานของโปรแกรมให้การเริ่มต้นดำเนินการสองครั้ง กล่าวคือการเริ่มต้นทำงานครั้งแรก เป็นการเฝ้าสังเกตการณ์ผลตอบสนองของระบบ ขณะที่การเริ่มต้นทำงานครั้งที่สอง เป็นการปรับแต่งสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น โปรแกรมให้การควบคุมดังกล่าวยังคงคุณสมบัติของการเป็นตัวควบคุมชนิดเวลาจริงเอาไว้ด้วย ทั้งนี้เพราะการทำงานของตัวควบคุม แล้วเสร็จภายในช่วงเวลาการสุ่มสัญญาณ ในส่วนของการคำนวณขนาดและเวลาในการเอกซิคิวท์ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบสมรรถนะของระบบ

เพื่อให้สามารถประกันได้ว่า ระบบควบคุมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นในโครงงานวิทยานิพนธ์ มีสมรรถนะเป็นที่น่าพึงพอใจและเชื่อถือได้ในขอบเขตการทำงานที่กำหนด ในบทนี้จึงได้กล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะของระบบ กล่าวถึงผลการทดสอบ และการวิจารณ์ผลการทดสอบดังกล่าวเชิงอภิปราย การทดสอบสมรรถนะจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะด้วยกัน กล่าวคือในลักษณะแรกจะเป็นการทดสอบระบบขณะไร้ภาระกรรม เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของระบบในเชิงแปรตามคำสั่งอินพุท ลักษณะที่สองจะเป็นการทดสอบระบบขณะมีภาระกรรม เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของระบบในเชิงคงตัวจากการรบกวน ทั้งนี้ในการทดสอบทั้งสองลักษณะจะจำลองสถานการณ์ว่าได้เกิดมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในวงรอบปิดของการควบคุมขึ้น (ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเสื่อมสภาพของพารามิเตอร์เนื่องจากสภาพแวดล้อมในการปฏิบัติงาน และอายุการใช้งาน) เพื่อทดสอบว่าวิธีการควบคุมและตัวควบคุมที่นำเสนอ สามารถแก้ไขสถานการณ์ดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิผลในขอบเขตการทำงานที่สาธิต

1. การทดสอบสมรรถนะของระบบ

การทดสอบจะให้การพิจารณาผลตอบสนองในโดเมนเวลาเป็นหลัก โดยขั้นตอนการทดสอบจะเริ่มต้นจากการกระตุ้นระบบด้วยอินพุทแบบขั้นบันได โดยที่ภายในวงรอบปิดของการควบคุมเดิม ได้มีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีให้ผิดเพี้ยนไปจากค่าที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อสร้างสถานการณ์ที่มีความหมายโดยนัยว่าได้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบภายในวงรอบปิดของการควบคุมขึ้น อันอาจมีสาเหตุมาจากสภาพแวดล้อมของการทำงาน และอายุการใช้งานของระบบ เมื่อระบบได้รับการกระตุ้นด้วยอินพุทแบบขั้นบันได ผลตอบสนองของระบบที่เกิดขึ้นย่อมผิดเพี้ยนไปจากค่าที่พึงประสงค์หรือ "set point" ผลตอบสนองดังกล่าวจะถูกอ่านและเก็บรักษาไว้ในหน่วยความจำ เพื่อที่จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่พึงประสงค์หรือ "set point" ที่ได้รับการจัดตั้งเอาไว้เป็นค่าอ้างอิงตั้งแต่ต้น จากนั้นค่าผลต่างที่ได้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการทางฟัซซี่ (ดังที่ได้อภิปรายไว้ในบทที่ 4) เพื่อคำนวณหาปริมาณการปรับระดับอินพุท และให้การปรับระดับอินพุทจนเสร็จสิ้น ต่อจากนี้จะให้การกระตุ้นระบบด้วยอินพุทแบบขั้นบันไดอีกครั้ง เพื่อให้ระบบได้รับการปรับแต่งใหม่ให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้น

การที่กำหนดให้มีการกระตุ้นด้วยอินพุทแบบขั้นบันไดสองครั้ง ทั้งนี้เพราะมีความประสงค์ที่ต้องการให้ธรรมชาติของการทดสอบเป็นไปในรูปแบบดังกล่าว เพื่อประโยชน์ในการเปรียบเทียบอาการตอบก่อนและหลังการปรับระดับอินพุทเป็นไปอย่างชัดเจน โดยที่การกระตุ้นด้วยอินพุทแบบขั้นบันไดครั้งแรก (ให้โปรแกรมเริ่มทำงานที่ลาเบล go1) อาจกล่าวได้ว่าเป็นการกระตุ้นเพื่อเฝ้าสังเกตการณ์ผลตอบสนองของระบบ และการ

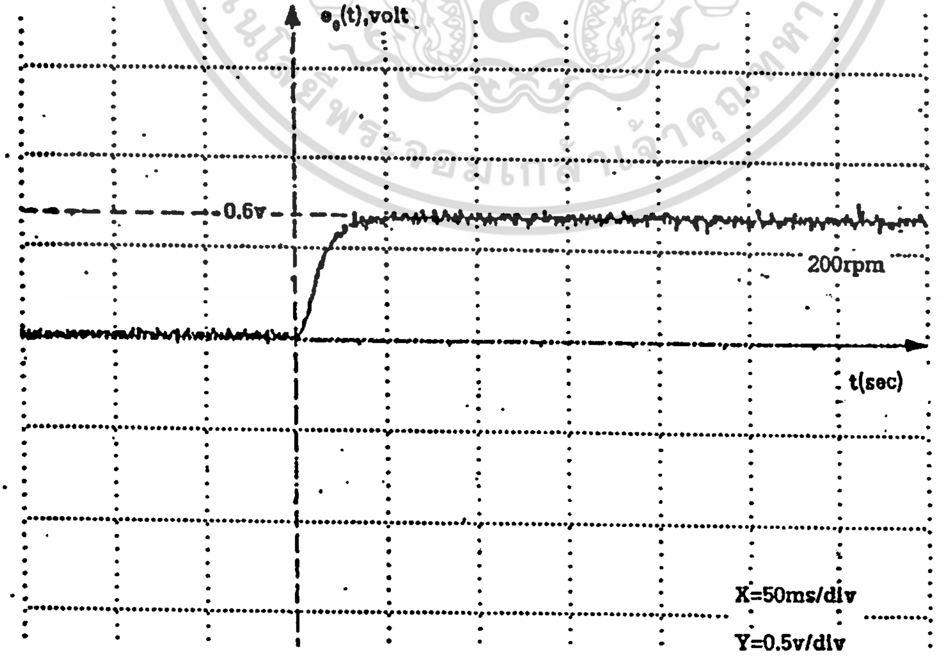
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้นด้วยอินพุทครั้งที่สอง (ให้โปรแกรมเริ่มทำงานที่ลาเบล go2) เป็นการกระตุ้นเพื่อปรับแต่งสมรรถนะของระบบให้ดี

2. การทดสอบระบบเชิงแปรตามคำสั่ง

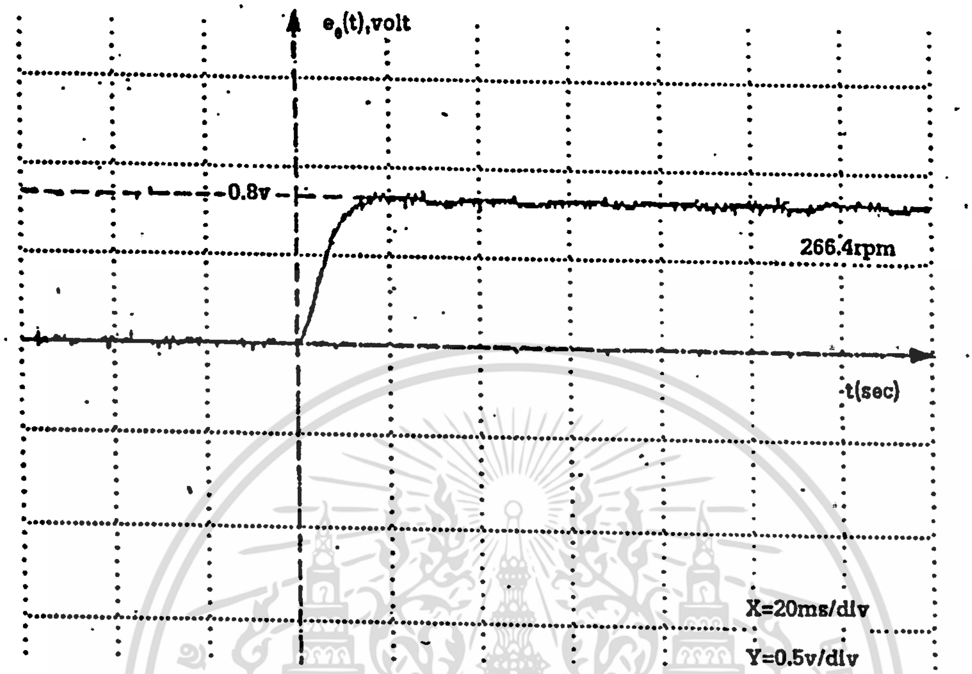
การทดสอบระบบเชิงแปรตามคำสั่งเป็นการทดสอบระบบขณะไร้ภาระกรรม เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของระบบเชิงแปรตามคำสั่งอินพุท (tracking control) รูปที่ 48 แสดงแผนภาพบล็อคการทดสอบระบบเชิงแปรตามคำสั่ง ค่าอินพุทอ้างอิงจะถูกปรับตั้งไว้ในซอฟท์แวร์ให้การควบคุม และเอาท์พุทของระบบจะพิจารณาจากสัญญาณที่ออกจากทาโคเยนเนอร์เรเตอร์ และผ่านส่วนกรองสัญญาณแล้ว ด้วยออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอลที่สามารถเก็บรักษาภาพและพิมพ์ภาพได้ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 50-53 ตามลำดับ โดยที่รูปที่ 49 เป็นผลตอบสนองที่พึงประสงค์หรือ "set point"

รูปที่ 48 แผนภาพบล็อคแสดงการทดสอบระบบเชิงแปรตามคำสั่ง

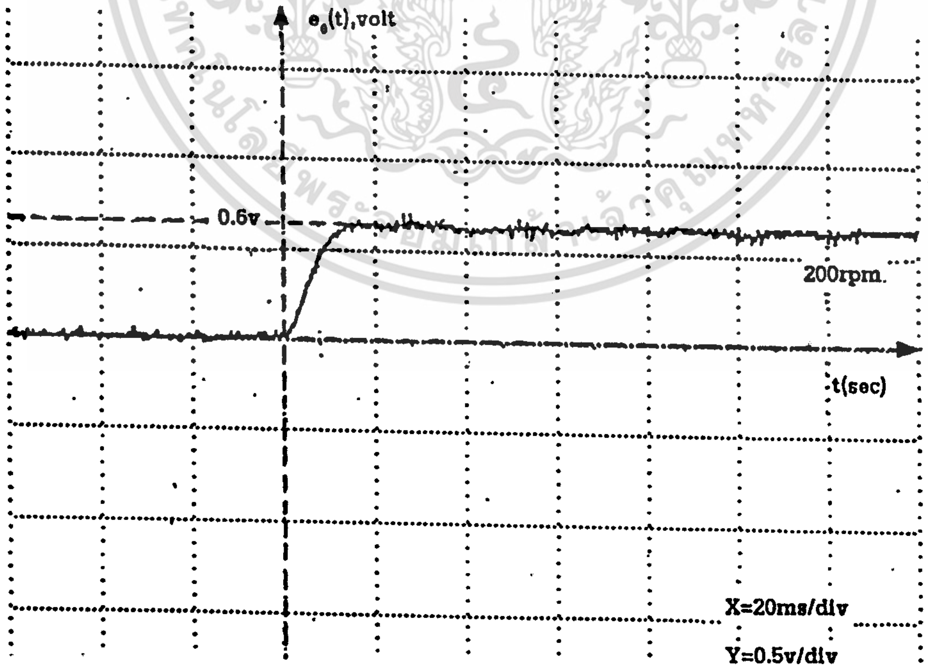


รูปที่ 49 ผลตอบสนองที่พึงประสงค์หรือ "set point"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

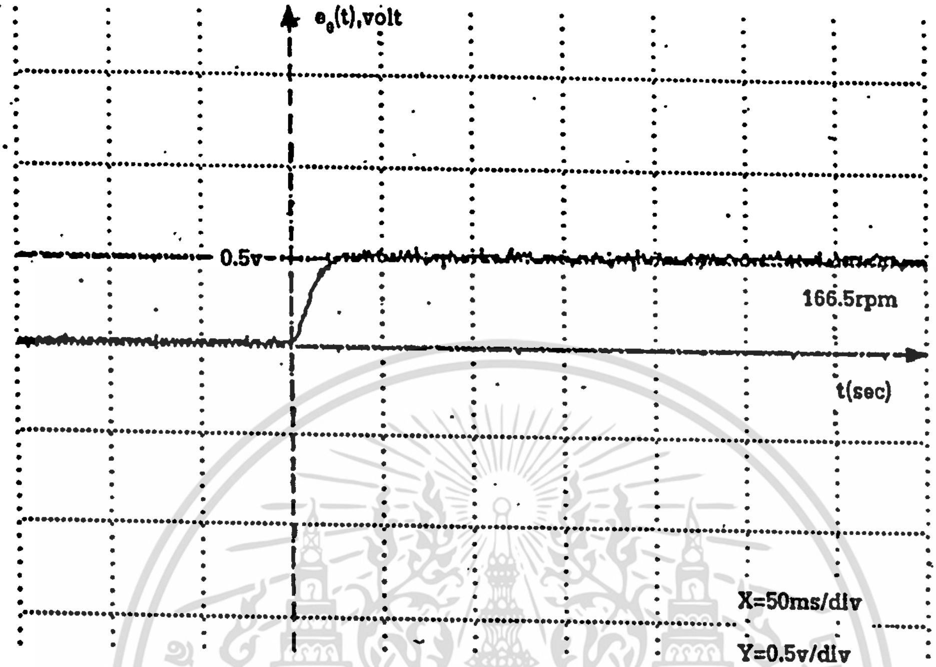


รูปที่ 50 ผลตอบสนองที่สูงกว่า set point ปรากฏค่า +Δerr

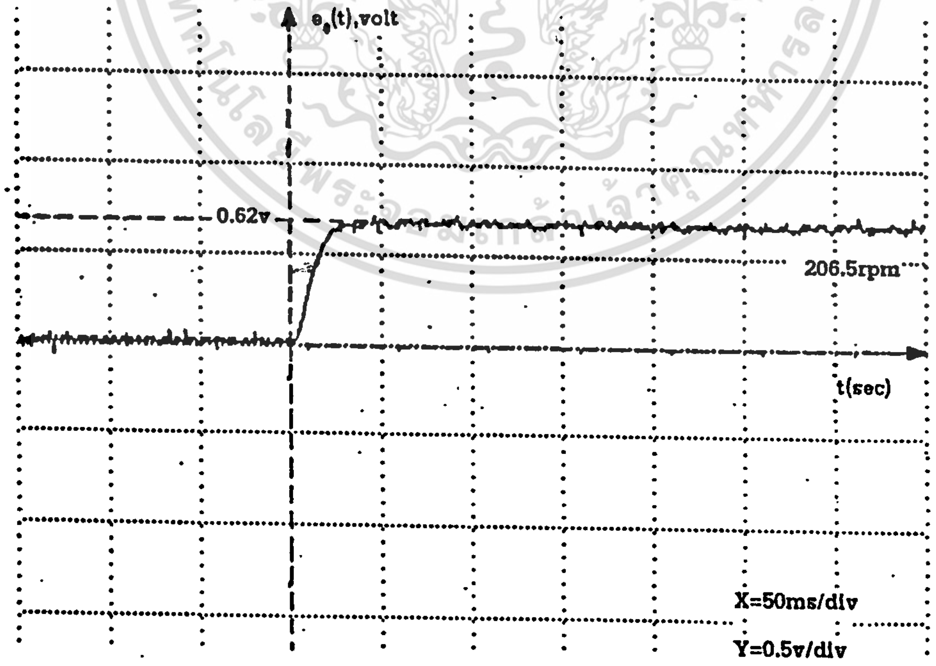


รูปที่ 51 ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 52 ผลตอบสนองที่ต่ำกว่า set point ปรากฏค่า -Δerr



รูปที่ 53 ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 49 เป็นผลตอบสนองที่พึงประสงค์หรือ "set point" ซึ่งใช้เป็นผลตอบสนองอ้างอิง โดยให้การพิจารณาค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวเป็นหลัก จากรูปจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองให้ค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวเท่ากับ 0.6 โวลท์ หรือที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที มีค่าเวลาในการไต่ระดับประมาณ 30 มิลลิวินาที

รูปที่ 50 เป็นผลตอบสนองเชิงแปรตามคำสั่งที่ให้ค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวประมาณ 0.8 โวลท์ หรือที่ความเร็วประมาณ 266.4 รอบต่อนาที ให้ค่าเวลาในการไต่ระดับประมาณ 18 มิลลิวินาที ผลตอบสนองดังกล่าวอาจถือได้ว่าเป็นกรณีหนึ่งที่มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในวงรอบปิดของการควบคุม เมื่อพิจารณาดูจะพบว่าค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวนั้นสูงกว่า set point คือปรากฏค่า +Δerr ค่าเวลาในการไต่ระดับเร็วกว่าผลตอบสนองที่พึงประสงค์

รูปที่ 51 เป็นผลตอบสนองภายหลังการปรับลดระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID จะเห็นได้ว่าค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัว ได้ลดลงมาเท่ากับ set point คือที่ 0.6 โวลท์ หรือที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที นั่นหมายความว่าค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว,e_{ss} มีค่าเท่ากับศูนย์ และค่า Δerr มีค่าประมาณศูนย์ (ZO) ค่าเวลาในการไต่ระดับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คือประมาณ 20 มิลลิวินาที

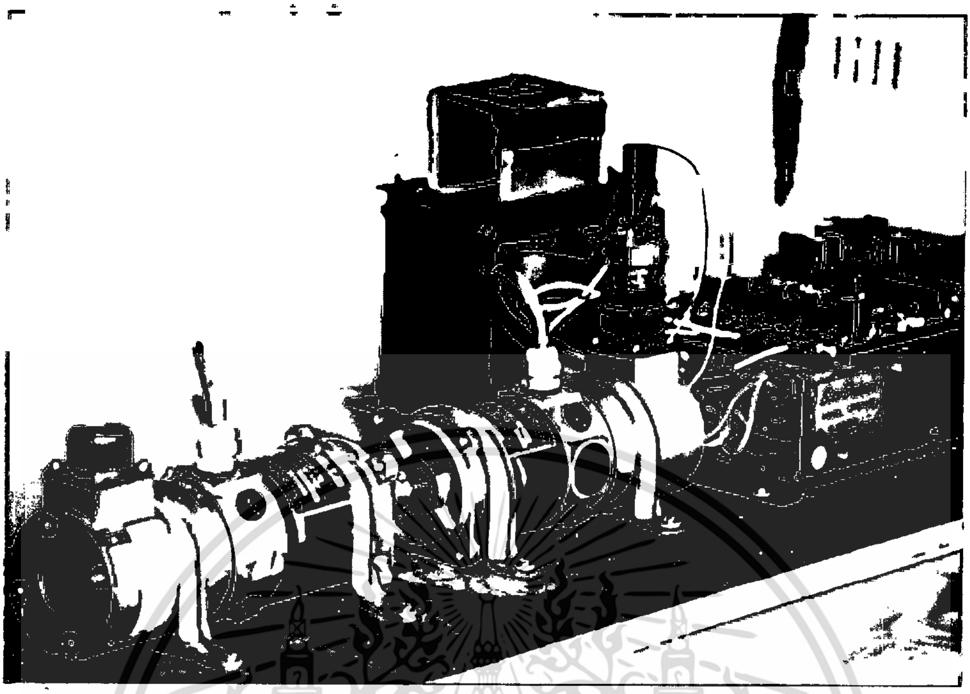
รูปที่ 52 เป็นผลตอบสนองเชิงแปรตามคำสั่งที่ให้ค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวประมาณ 0.5 โวลท์ หรือที่ความเร็วประมาณ 166.5 รอบต่อนาที ให้ค่าเวลาในการไต่ระดับประมาณ 30 มิลลิวินาที ผลตอบสนองดังกล่าวถือเป็นกรณีหนึ่งที่มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในวงรอบปิดของการควบ-คุม เมื่อพิจารณาดูจะพบว่าค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวนั้นต่ำกว่า set point คือปรากฏค่า -Δerr ค่าเวลาในการไต่ระดับเท่ากันกับผลตอบสนองที่พึงประสงค์

รูปที่ 53 เป็นผลตอบสนองภายหลังการปรับเพิ่มระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID จะเห็นได้ว่าค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัว ได้เพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับ set point คือที่ 0.62 โวลท์ หรือที่ความเร็ว 206.5 รอบต่อนาที นั่นหมายความว่าค่า e_{ss} มีค่าเกือบเท่ากับศูนย์ และค่า Δerr มีค่าเท่ากับ ZO (Δerr เท่ากับ ZO เป็นช่วงที่ความคลาดเคลื่อนยอมรับได้ คือมีค่าแรงดันอยู่ระหว่าง 0.55 โวลท์ ถึง 0.65 โวลท์ หรือความเร็วมีค่าอยู่ระหว่าง 183.3 รอบต่อนาที ถึง 216.7 รอบต่อนาที) ค่าเวลาในการไต่ระดับลดลงเล็กน้อย คือประมาณ 25 มิลลิวินาที

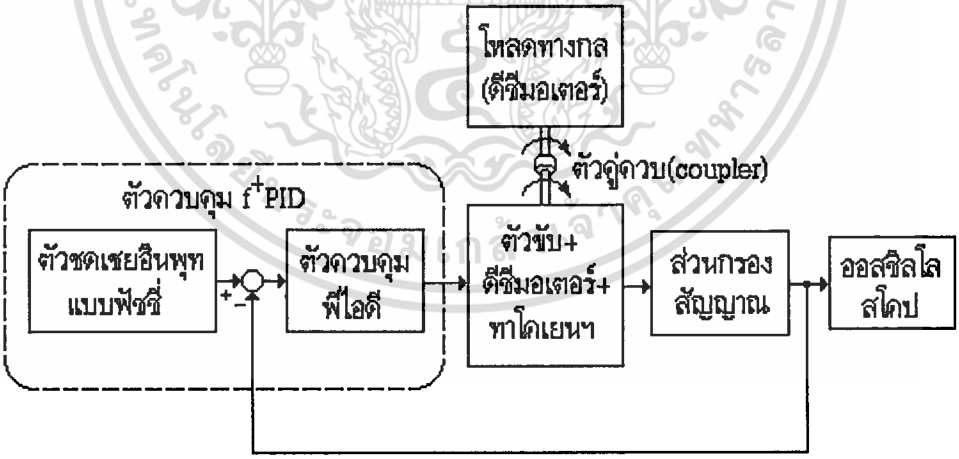
3. การทดสอบระบบเชิงคงตัว

การทดสอบระบบเชิงคงตัวเป็นการทดสอบระบบขณะมีภาระกรรมหรือมีโหลด เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของระบบเชิงคงตัวต่อสิ่งรบกวน (regulating control) ในการนี้ได้ทำการจัดสร้างโหลดทางกลขึ้นเพื่อประกอบการทดสอบ โดยได้นำเอาดีซีมอเตอร์รุ่นเดียวกันกับตัวที่อยู่ในส่วนกระบวนการฯ มาทำการต่อคู่ควบ (coupling) กัน ดังแสดงในรูปที่ 54 แผนภาพบล็อคแสดงการทดสอบระบบเชิงคงตัวแสดงในรูปที่ 55 และผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 56-59 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



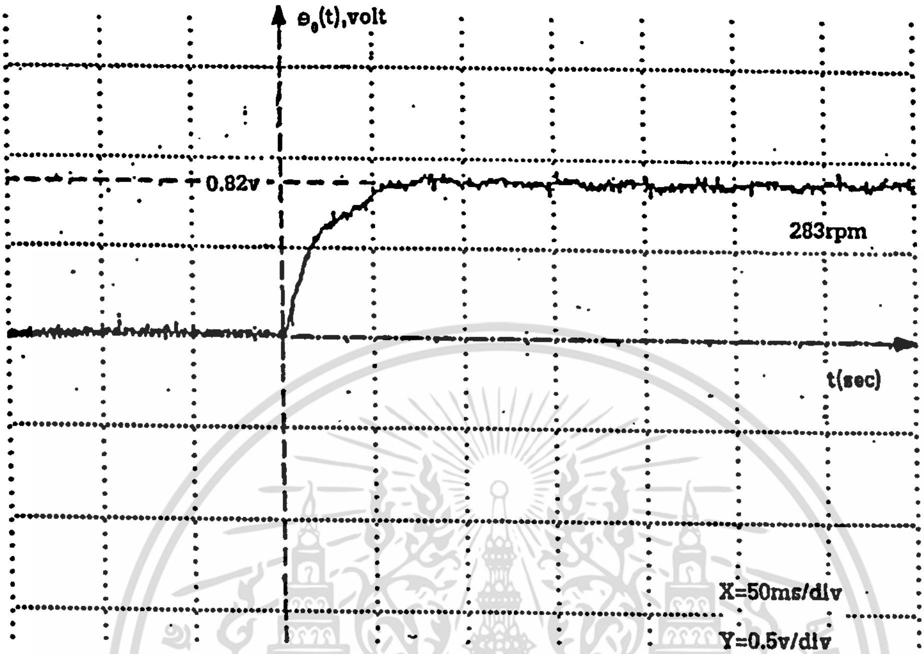
รูปที่ 54 ชุดโหลดทางกล



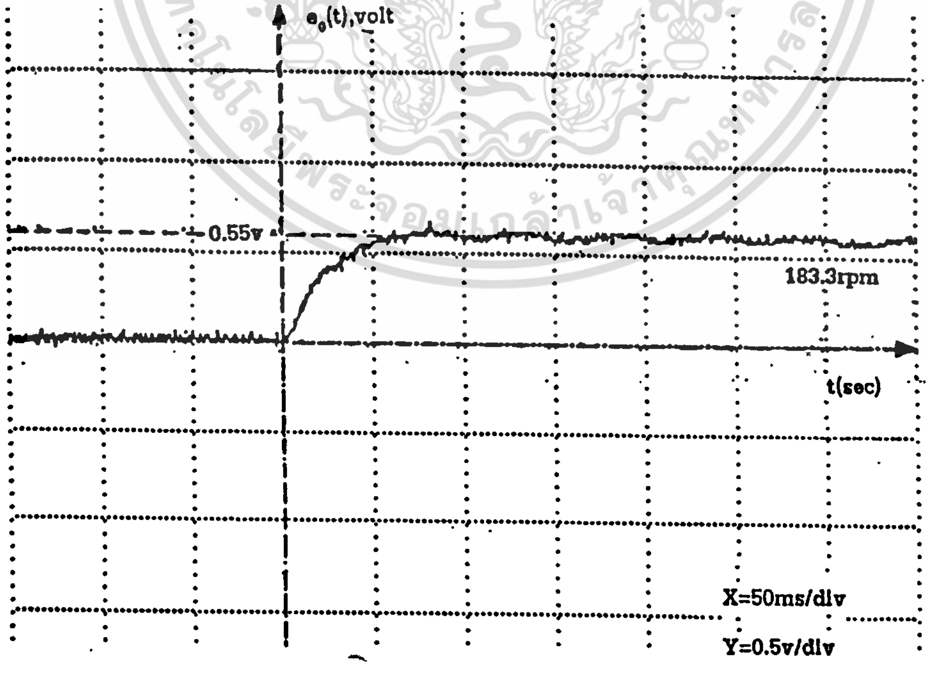
รูปที่ 55 แผนภาพบล็อคแสดงการทดสอบระบบเชิงคงตัวต่อโหลดทางกล

รูปที่ 56 เป็นผลตอบสนองเชิงคงตัวขณะที่ระบบมีภาระกรรม ให้ค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวประมาณ 0.82 โวลท์ หรือที่ความเร็วประมาณ 283 รอบต่อนาที ให้ค่าเวลาในการไต่ระดับประมาณ 80 มิลลิวินาที ผลตอบสนองดังกล่าวอาจถือได้ว่าเป็นกรณีหนึ่งที่มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

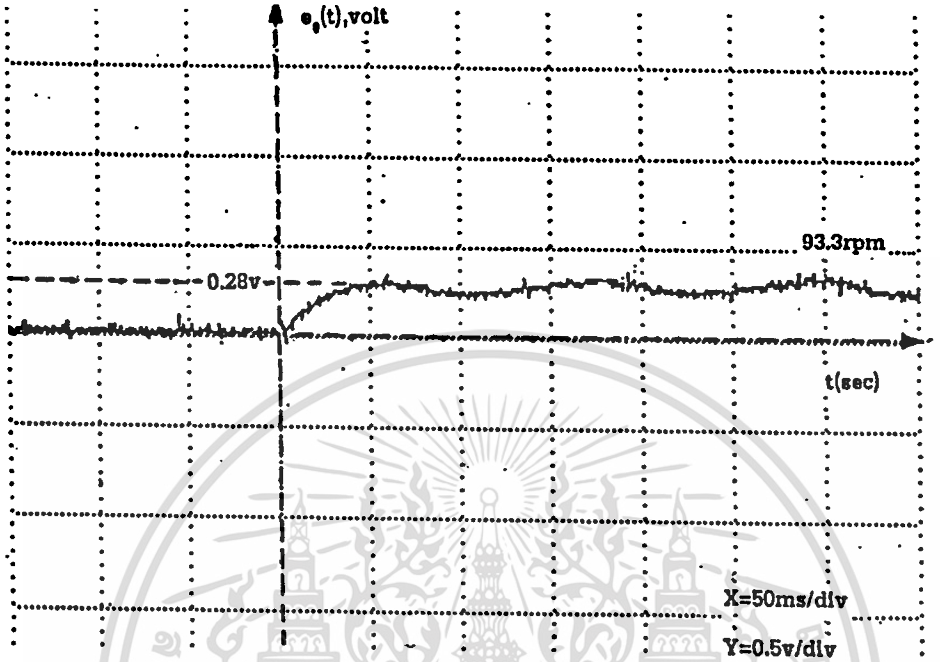


รูปที่ 56 ผลตอบสนองเชิงคงตัวที่มีค่าสูงกว่า set point ปรากฏค่า +Δerr

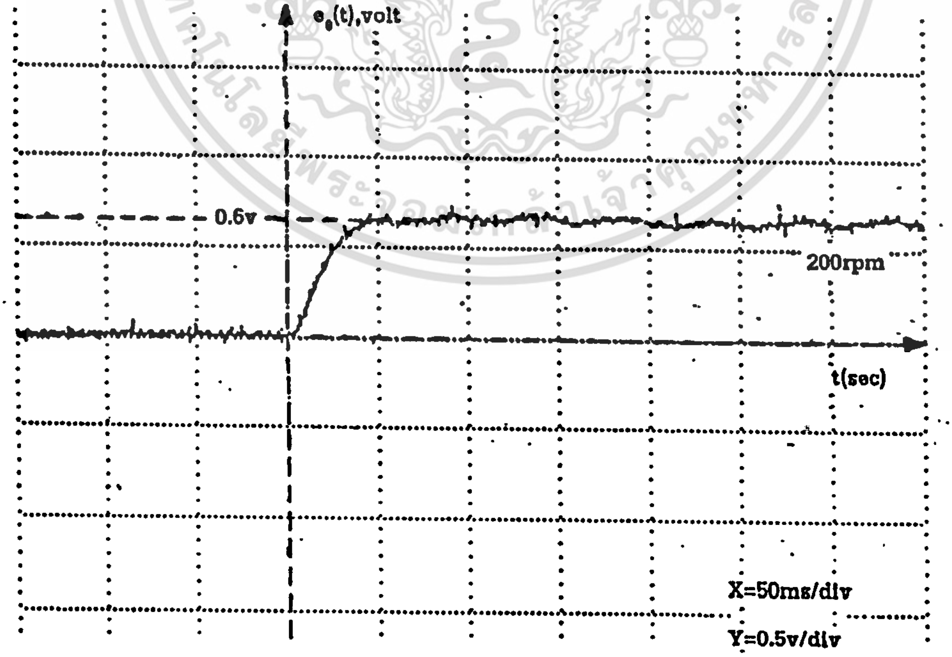


รูปที่ 57 ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^+PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 58 ผลตอบสนองเชิงคงตัวที่มีค่าต่ำกว่า set point ปรากฏค่า -Δerr



รูปที่ 59 ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในวงรอบปิดของการควบคุม เมื่อพิจารณาดูจะพบว่าค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวนั้นสูงกว่า set point คือปรากฏค่า +Δerr ให้ค่าเวลาในการไต่ระดับค่อนข้างยาวนาน ทั้งนี้เพราะโหลดทางกลที่นำมาต่อร่วมมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่อนข้างสูง

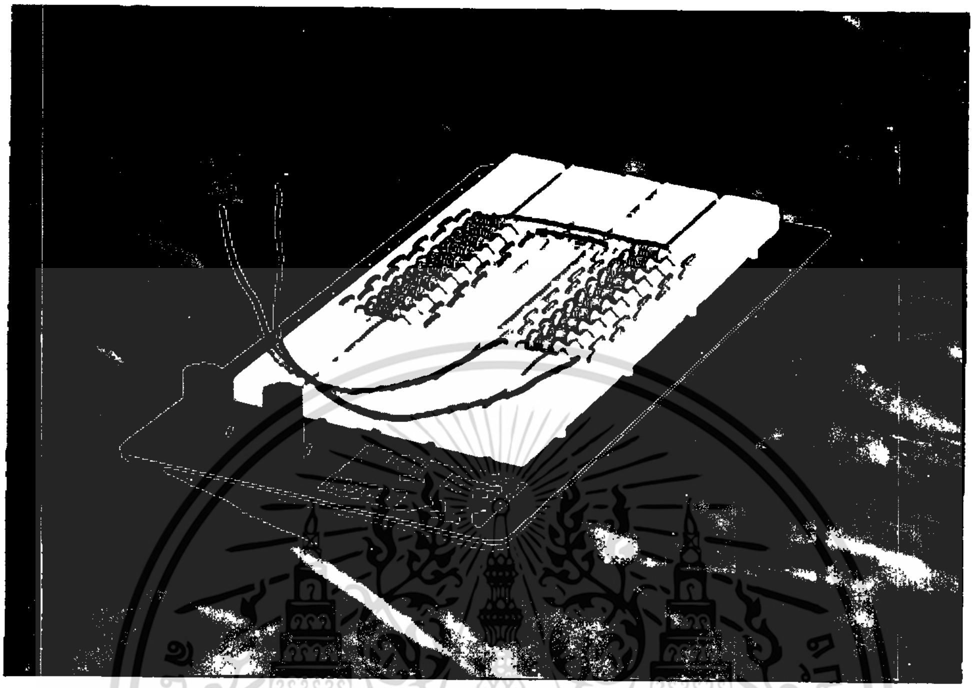
รูปที่ 57 เป็นผลตอบสนองภายหลังการปรับลดระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^+PID จะเห็นได้ว่าค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัว ลดลงมาที่ 0.55 โวลท์ หรือที่ความเร็ว 183.3 รอบต่อนาที นั่นหมายความว่าค่า e_{ss} มีค่าเกือบเท่ากับศูนย์ และค่า Δerr มีค่าอยู่ในช่วง ZO ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ค่าเวลาในการไต่ระดับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คือประมาณ 85 มิลลิวินาที

รูปที่ 58 เป็นผลตอบสนองเชิงคงตัว ให้ค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวประมาณ 0.28 โวลท์ หรือที่ความเร็วประมาณ 93.3 รอบต่อนาที ให้ค่าเวลาในการไต่ระดับประมาณ 50 มิลลิวินาที ผลตอบสนองดังกล่าวถือเป็นกรณีหนึ่งที่อาจมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในวงรอบปิดของการควบคุม เมื่อพิจารณาดูจะพบว่าค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวนั้นต่ำกว่า set point คือปรากฏค่า -Δerr ค่าเวลาในการไต่ระดับค่อนข้างยาวนาน ทั้งนี้เพราะโหลดทางกลมีโมเมนต์ความเฉื่อยสูง ประกอบกับความเร็วมอเตอร์ที่ทำงานในกรณีนี้มีความเร็วค่อนข้างต่ำ ยังผลทำให้ผลตอบสนองในสภาวะคงตัวเกิดความไม่เรียบขึ้น

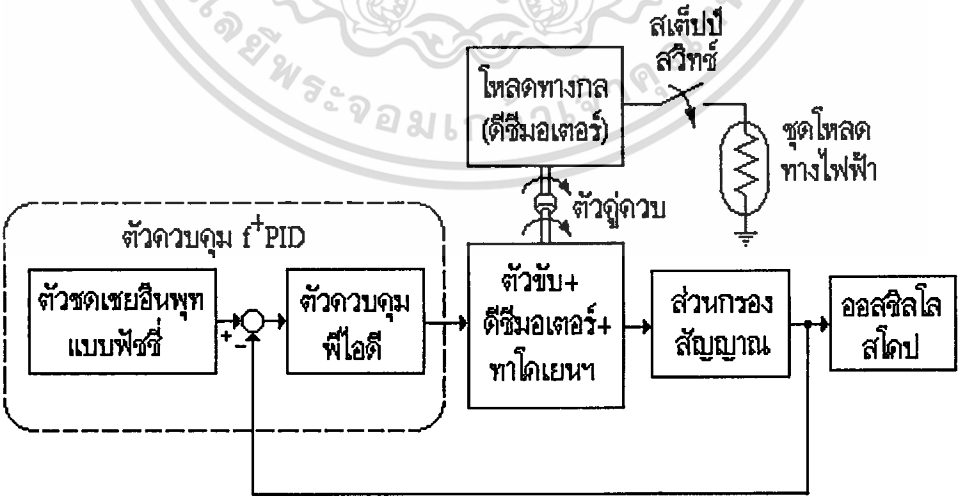
รูปที่ 59 เป็นผลตอบสนองภายหลังการปรับเพิ่มระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^+PID จะเห็นได้ว่าค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัว ได้เพิ่มขึ้นมาเท่ากับ set point คือที่ 0.6 โวลท์ หรือที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที นั่นหมายความว่าค่า e_{ss} มีค่าเท่ากับศูนย์ และค่า Δerr มีค่าเท่ากับ ZO ผลตอบสนองดังกล่าวเป็นที่น่าพึงพอใจ ค่าเวลาในการไต่ระดับลดลงเล็กน้อยคือประมาณ 45 มิลลิวินาที

การทดสอบสมรรถนะของระบบเชิงคงตัวกับโหลดทางกลที่กล่าวมาข้างต้น มีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองอย่างฉับพลัน ขณะมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นกับระบบได้ เพราะการใส่และปลดโหลดดังกล่าว จำเป็นต้องหยุดการทำงานของระบบลงก่อน เพื่อถอดประกอบโหลดร่วมกับตัวคู่ควบ (coupler) แล้วจึงสั่งการให้ระบบเริ่มทำงานใหม่ได้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถสังเกตเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองอย่างฉับพลันเมื่อมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นกับระบบ จึงได้จัดทำโหลดจำลองทางไฟฟ้า โดยการนำเอาตัวต้านทาน ที่มีค่า 2 กิโลโอห์ม จำนวน 10 ตัว และ 560 โอห์ม จำนวน 10 ตัว มาทำการต่อขนานกัน (ค่าความต้านทานรวมประมาณ 44 โอห์ม) ดังแสดงในรูปที่ 60 โดยขั้นตอนการทดสอบได้ทำการต่อชุดโหลดทางไฟฟ้าเข้ากับแรงดันที่ได้จากดีซีมอเตอร์ตัวที่ถูกนำมาต่อเป็นโหลดทางกล (ซึ่งตอนนี้ทำหน้าที่เปรียบเสมือนเยนเนอร์เรเตอร์) เพื่อทำการลด (drop) แรงดัน ดังแผนภาพบล็อคที่แสดงในรูปที่ 61 เมื่อแรงดันถูกลดลงจากการใส่สเต็ปป์โหลดด้วยสเต็ปป์สวิทช์ แรงดันดังกล่าวจะถูกนำไปป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่พึงประสงค์ หรือ "set point" ภายในซอฟท์แวร์ให้การควบคุม เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน,e(t) หลังจากนั้นค่าความคลาดเคลื่อนก็จะผ่านเข้าสู่อัลกอริธึมของตัวควบคุม f^+PID และดำเนินการปรับคุมให้แรงดันเอาท์พุทเพิ่มขึ้นสู่ค่า set point ต่อไป ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 62-65 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

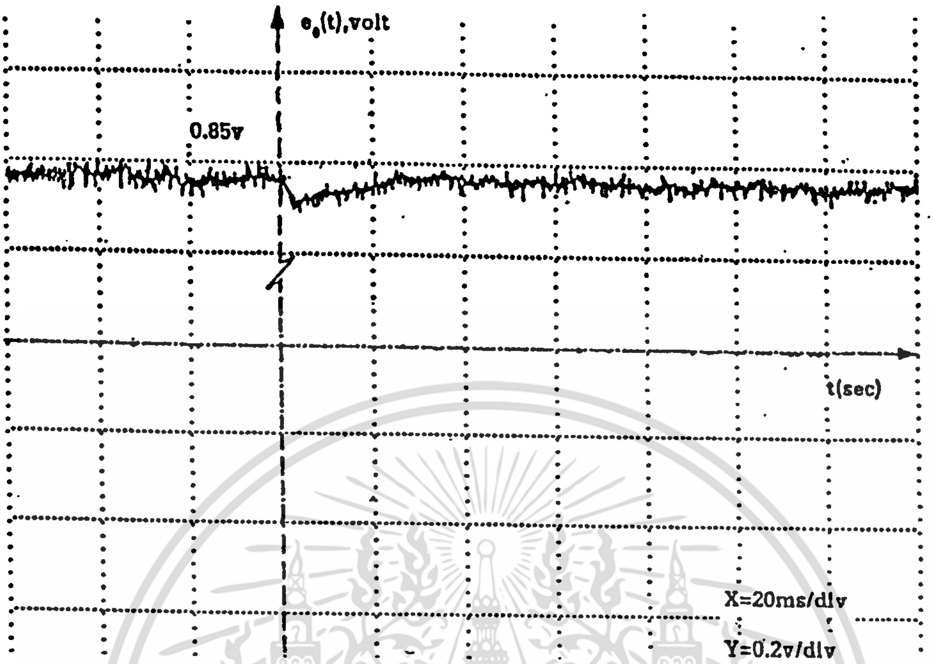


รูปที่ 60 ชุดโหลดทางไฟฟ้า

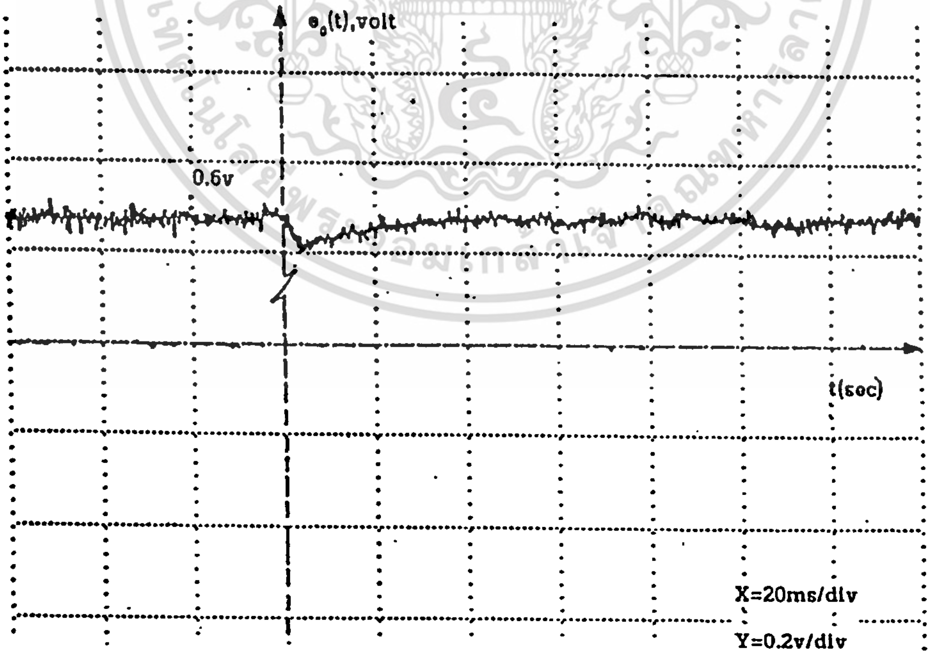


รูปที่ 61 แผนภาพบล็อคแสดงการทดสอบระบบเชิงคงตัวต่อโหลดทางกลร่วมกับโหลดทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

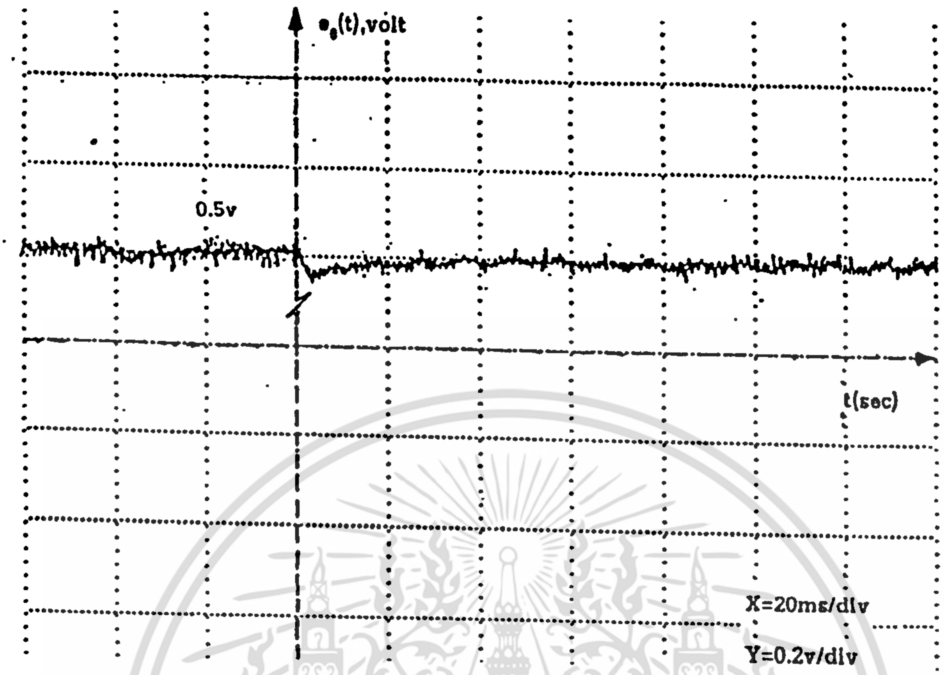


รูปที่ 62 ผลตอบสนองเชิงคงตัวที่มีค่าสูงกว่า set point ปรากฏค่า +Δerr

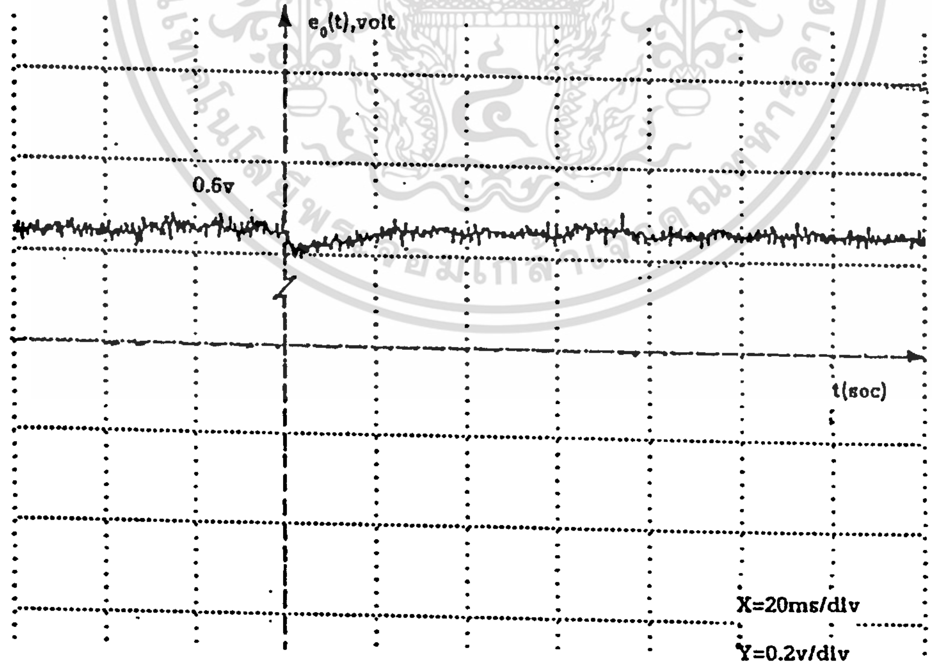


รูปที่ 63 ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 64 ผลตอบสนองเชิงคงตัวที่มีค่าต่ำกว่า set point ปรากฏค่า +Δerr



รูปที่ 65 ผลตอบสนองภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการบันทึกผลด้วยออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอลที่สามารถเก็บรักษาภาพและพิมพ์ภาพออกมาได้นั้น ได้ทำการปรับเลื่อนระดับสัญญาณในแนวดิ่ง เพื่อประโยชน์ในการสำรวจผลตอบสนองในระดับสายตาได้ชัดเจน ผลการทดสอบในรูปที่ 62-65 ที่ผ่านมา มีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 62 เป็นผลตอบสนองเชิงคงตัวต่อโหลดทางกลร่วมกับโหลดทางไฟฟ้า ให้ค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวประมาณ 0.85 โวลท์ ซึ่งสูงกว่า set point ปรากฏค่า +Δerr ผลจากการใส่สเต็ปป์โหลดทางไฟฟ้า ปรากฏค่าเวลาในการกลับคืนสู่สภาวะคงตัว (recovering time) ประมาณ 28 มิลลิวินาที

รูปที่ 63 เป็นผลการตอบสนองภายหลังการปรับลดระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID จะเห็นได้ว่าค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวลดลงมาอยู่ที่ค่า 0.6 โวลท์ ซึ่งเท่ากับ set point นั่นหมายความว่าค่า e_{ss} เท่ากับศูนย์ ค่า Δerr เท่ากับ ZO เป็นผลที่น่าพึงพอใจ ผลจากการใส่สเต็ปป์โหลดทางไฟฟ้า ปรากฏค่าเวลาในการกลับคืนสู่สภาวะคงตัวเพิ่มขึ้น คือประมาณ 40 มิลลิวินาที

รูปที่ 64 เป็นผลตอบสนองเชิงคงตัว ให้ค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวประมาณ 0.5 โวลท์ ซึ่งต่ำกว่า set point ปรากฏค่า -Δerr ผลจากการใส่สเต็ปป์โหลดทางไฟฟ้า ปรากฏค่าเวลาในการกลับคืนสู่สภาวะคงตัว ประมาณ 58 มิลลิวินาที

รูปที่ 65 เป็นผลการตอบสนองภายหลังการปรับเพิ่มระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID จะเห็นได้ว่าค่าระดับการตอบสนองในสภาวะคงตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ที่ค่า 0.6 โวลท์ ซึ่งเท่ากับ set point นั่นคือค่า e_{ss} เท่ากับศูนย์ และค่า Δerr เท่ากับ ZO เป็นผลที่น่าพอใจยิ่ง ผลจากการใส่สเต็ปป์โหลดทางไฟฟ้า ปรากฏค่าเวลาในการกลับคืนสู่สภาวะคงตัวลดลง คือประมาณ 25 มิลลิวินาที

4. สรุป

จากผลการทดสอบสมรรถนะของระบบในเชิงแปรตามคำสั่ง และเชิงคงตัวที่ผ่านมา ในภาพรวมตัวควบคุม f^{+}PID สามารถปรับปรุงสมรรถนะของระบบในเชิงการลดค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในวงรอบปิดของการควบคุมได้อย่างน่าพึงพอใจยิ่ง ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวที่ปรากฏภายหลังการปรับระดับอินพุทด้วยตัวควบคุม f^{+}PID อยู่ในช่วง ZO ซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ ทั้งนี้หากเราต้องการที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนที่ปรากฏ ก็สามารถกระทำได้โดยกำหนดให้ฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพของ Δerr ในรูปที่ 43 (บทที่ 4) มีฐานของแต่ละค่าให้ค่า (LN,MN,...,ZO,...,LP) ที่แคบลง และทำการดัดแปลงกฎการควบคุมในฟัซซี่อัลกอริธึมโดยรวมเสียใหม่ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวสามารถกระทำได้โดยผู้ออกแบบ ส่วนผลของค่าเวลาในการไต่ระดับ (รวมถึงค่าเวลาในการกลับคืนสู่สภาวะคงตัว) เป็นเพียงผลข้างเคียงเท่านั้น ดังจะเห็นได้ว่าในบางกรณีของการควบคุม ค่าเวลาดังกล่าวจะเร็วขึ้น แต่ในบางกรณีค่าเวลาดังกล่าวจะยาวนานออกไป ทั้งนี้เพราะอัลกอริธึมของตัวควบคุม f^{+}PID ไม่ได้ถูกจัดตั้งขึ้นมาเพื่อดำเนินการกับค่าดังกล่าวโดยตรง อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยและพัฒนาในขั้นต่อไปควรให้ความสนใจกับค่าดังกล่าวและค่าอื่นนอกเหนือจากนี้ เพื่อแสวงหาประโยชน์ในการใช้งานที่กว้างขวางมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
บทสรุป

1. ข้อสรุป

โครงงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการบรรลุวัตถุประสงค์ โดยมีผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรม ที่อาจสรุปได้เป็นข้อๆ ดังต่อไปนี้

1. ในภาพรวมระบบควบคุมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นในโครงงานฯ มีโครงสร้างเป็นระบบควบคุมฟัซซี่ โดยที่เค้าโครงและวัตถุประสงค์ของโครงงานฯได้บรรยายไว้ในบทที่ 1 หัวข้อที่ 1

2. ได้มีการพัฒนากระบวนการภายใต้การควบคุมขึ้น โดยใช้ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ผนวกกับตัวขับ และทาโคเยนเนอร์เรเตอร์ รวมถึงส่วนกรองสัญญาณเข้าไว้ด้วย ดังรายละเอียดที่ปรากฏในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2 และผนวก ข.

3. ได้มีการพัฒนาชุดเชื่อมต่อ (interface sets) ทั้ง เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ และดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ เพื่อใช้เฝ้าคุมพฤติภาพทางพลวัตของระบบ และให้การทดสอบองค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ต่างๆ ที่ใช้ประกอบรวมในโครงงานฯ ดังปรากฏในบทที่ 2 หัวข้อที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

4. ได้ประยุกต์บอร์ดควบคุม CP-AT180 ของบริษัท อีทีที มาเป็นส่วนของฮาร์ดแวร์ให้การควบคุม โดยที่บอร์ดควบคุมดังกล่าวใช้ไมโครโพรเซสเซอร์ Z80180 เป็นซีพียู ทำงานบนอัตราสัญญาณนาฬิกา 10 MHz ดังรายละเอียดที่ปรากฏในบทที่ 2 หัวข้อที่ 3

5. ได้มีการพัฒนาซอร์ฟแวร์ให้การควบคุม เป็นตัวควบคุมพีไอดีแบบดิจิตอลชนิดเวลาจริง ที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ Z180CPU โดยที่โปรแกรมให้การควบคุมดังกล่าวมีขนาด 212 ไบต์ มีข้อมูลขนาด 8 ไบต์ และใช้เวลาในการเอกซิคิวท์ประมาณ 255.9 ไมโครวินาที ขณะที่คาบเวลาในการสุ่มสัญญาณเท่ากับ 1 มิลลิวินาที (การคำนวณขนาด และเวลาในการเอกซิคิวท์ของโปรแกรม แสดงในภาคผนวก ก.) ดังรายละเอียดที่ปรากฏในบทที่ 3 หัวข้อที่ 1 ถึง หัวข้อที่ 3 กล่าวคือ

- หัวข้อที่ 1 กล่าวถึงการหาอัลกอริธึมของตัวควบคุมพีไอดีแบบดิจิตอลเชิงตรง หรือ DDC โดยที่ตัวควบคุมพีไอดีจะยึดโครงสร้างตามการนำเสนอของไอเทลเบิร์ก
- หัวข้อที่ 2 กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม และการรีดีไซน์ เพื่อเฟ้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ
- หัวข้อที่ 3 กล่าวถึงการอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีด้วยการโปรแกรม โดยอาศัยซอฟท์แวร์ Z180ASM แอสเซมเบลอร์ และ AT180 ดีบักเกอร์ ของบริษัท อีทีที เข้าช่วย

6. ได้มีการทดสอบโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งให้ผลออกมาเป็นที่น่าพึงพอใจ ดังรายละเอียดที่ปรากฏในบทที่ 3 หัวข้อที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ให้การทดสอบการปรับระดับอินพุทด้วยเทอม F_P, F_I และ F_D ขยายผลต่อจากงานของไอเทลเบิร์กกับกระบวนการที่เป็นดีซีเซอร์โวมอเตอร์ ดังที่แสดงไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 5 ซึ่งในภาพรวมการปรับระดับอินพุทด้วย F_P ช่วยชดเชย(ลด)ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวได้อย่างมีประสิทธิผล, การปรับระดับอิพุทด้วย F_I จะช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวได้เหมือนกัน แต่ไม่ครอบคลุมทุกสถานการณ์ กล่าวคือหากให้การเพิ่มระดับอินพุทด้วยเทอม F_I สูงเกิน 140% จะทำให้ผลตอบสนองเกิดการอิ่มตัว แต่หากให้การลดระดับอินพุทด้วยเทอม F_I ต่ำกว่า 50% จะไม่ส่งผลกระทบใดๆ ต่ออาการตอบสนอง การปรับระดับอินพุทด้วย F_D ไม่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบในโดเมนเวลาแต่อย่างใด ทั้งนี้การทดสอบดังกล่าวได้ใช้อินพุทแบบขั้นบันไดเท่านั้น

8. ได้มีการออกแบบฟัซซี่อัลกอริธึมที่ใช้บ่งบอกคุณภาพการตอบสนอง และฟัซซี่อัลกอริธึมที่ใช้ปรับแต่งสมรรถนะ (ปรับระดับอินพุท) ที่สอดคล้องสัมพันธ์กัน ด้วยวิธีศึกษาสำนึกเชิงอัตวิสัย อีกทั้งยังได้กล่าวถึงกลไกการอนุมานและเทคนิคการดีฟัซซิฟิเคชั่นที่ถูกใช้ในโครงงานฯอีกด้วย ดังรายละเอียดที่ปรากฏในบทที่ 4 หัวข้อที่ 1 และ หัวข้อที่ 2 ตามลำดับ

9. ได้ทำการอนุวัตฟัซซี่อัลกอริธึมที่ได้ออกแบบไว้ ร่วมกับตัวควบคุมพีไอดีในวงรอบปิดของการควบคุม ด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ Z180CPU และให้การเรียกขานตัวควบคุมดังกล่าวว่า "ตัวควบคุม f^+PID" โดยที่ในส่วนของตัวควบคุมฟัซซี่จะให้การปรับระดับอินพุท เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น ในส่วนนี้อาจเรียกว่า "ตัวชดเชยอินพุทแบบฟัซซี่" ขณะที่ในส่วนของตัวควบคุมพีไอดี จะให้การผลิตสัญญาณควบคุมต่อกระบวนการ(มอเตอร์พล้านท์) อีกต่อหนึ่ง ตัวควบคุม f^+PID จะยังคงคุณสมบัติของการเป็นตัวควบคุมชนิดเวลาจริงเอาไว้ด้วย โดยที่โปรแกรมให้การควบคุมดังกล่าวจะมีขนาด 324 ไบต์ ใช้เวลาในการเอกซิคิวท์โปรแกรมประมาณ 0.24 มิลลิวินาที ขณะที่คาบเวลาในการสุ่มสัญญาณยังคงไว้เท่าเดิมคือ 1 มิลลิวินาที ดังรายละเอียดที่ปรากฏในบทที่ 4 หัวข้อที่ 3 ทั้งนี้ในขั้นตอนการประดิษฐ์โปรแกรมได้อาศัยซอฟท์แวร์ช่วยเหมือนดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 5 ที่ผ่านมา และสำหรับการคำนวณขนาดและเวลาในการเอกซิคิวท์ของโปรแกรมให้การควบคุมข้างต้น ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. เช่นกัน

10. ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมที่ได้รับการพัฒนาขึ้น และบันทึกผลการทดสอบในโดเมนเวลาเอาไว้ ปรากฏว่าตัวควบคุม f^+PID ที่ได้ทำการออกแบบและอนุวัตขึ้นในโครงงานฯ สามารถปรับแต่งสมรรถนะของระบบทั้งในด้านการคงตัวและแปรตามคำสั่งของผลตอบสนอง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในวงรอบปิดของการควบคุม ในเชิงการลดค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว, e_{ss} ได้อย่างเป็นที่น่าพึงพอใจในขอบเขตที่กำหนด ดังรายละเอียดที่ปรากฏในบทที่ 5

11. ระบบควบคุมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นในโครงงานฯ อาจใช้เป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบในภาคอุตสาหกรรมได้, อาจใช้เป็นครุภัณฑ์ปฏิบัติการวิศวกรรมศาสตร์ในระดับอุดมศึกษา และอาจใช้เพื่องานวิจัยพัฒนาทางวิศวกรรมระบบต่อไปได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ได้มีการรวมผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ขณะศึกษาในระดับปริญญาโท ที่เกี่ยวข้องกับโครงงานวิทยานิพนธ์นี้ ดังปรากฏในภาคผนวก ง.

2. แนวทางการดำเนินงานวิจัยในขั้นต่อไป

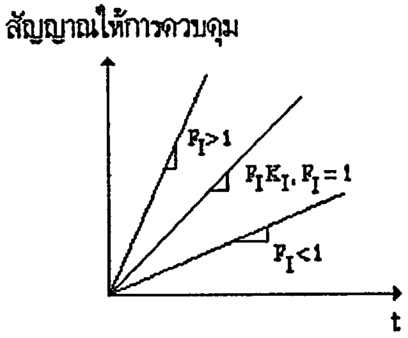
จากการดำเนินงานของโครงงานวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมารวมถึงผลที่ปรากฏ ทำให้เกิดแนวความคิดที่จะดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ซึ่งอาจแยกแยะได้เป็นข้อๆ ดังต่อไปนี้

1. จากกระบวนการภายใต้การควบคุมของโครงงานฯ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือดีซีเซอร์โวมอเตอร์กับตัวขับ ในการทดสอบผลตอบสนองของระบบในโดเมนเวลา ปรากฏว่า ไม่ว่าจะปรับแต่งตัวควบคุมอย่างไร ก็ไม่สามารถทำให้ผลตอบสนองของระบบ เกิดการพุ่งเกิน และการสั่นไกวได้ ทั้งนี้เป็นเพราะตัวขับที่ใช้ มีการปรับแต่งไม่ดีพอ ทำให้ผลตอบสนองเกิดอาการดังกล่าวขึ้น จึงควรมีการออกแบบและสร้างตัวขับขึ้นใหม่ ที่สามารถยอมให้ผลตอบสนองที่จะเกิดขึ้นกับระบบ ปรากฏการพุ่งเกิน และการสั่นไกวได้ เพื่อที่จะสามารถศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างครอบคลุม, สามารถศึกษาผลการปรับระดับอินพุท ด้วยเทอม F_i ได้กว้างขวางยิ่งขึ้น และสามารถออกแบบและอนุวัตฟัซซี่อัลกอริธึมได้อย่างมีประโยชน์สูงยิ่งขึ้นต่อไป

2. การศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนองของระบบ จากการปรับระดับอินพุทด้วยเทอม F_i ตามการนำเสนอของไอเทลเบิร์ก ควรได้รับการศึกษาขยายผลในแนวทางที่ต่างกันออกไป อาทิเช่น การปรับระดับอินพุทด้วยเทอม F_D ควรให้การทดสอบกับสัญญาณอินพุทแบบต่างๆ เช่น ramp,parabolic เป็นต้น, การปรับระดับอินพุทด้วยเทอม F_I ควรให้การพิจารณาในเรื่องของความชัน (slop) ของสัญญาณให้การควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 66 ซึ่งเมื่อสัญญาณให้การควบคุมมีความชันเปลี่ยนไป น่าจะส่งผลในเรื่องของการชดเชยความล่าช้าในการไต่ระดับของผลตอบสนอง ซึ่งแสดงด้วยค่า t_r อีกทั้งยังน่าจะส่งผลในเรื่องของการชดเชยค่า e_{ss} ในบางสถานการณ์ที่อาจใช้ประโยชน์ได้, การปรับระดับอินพุทด้วยเทอม F_i ที่ผสมผสานกันไปพร้อมๆกัน รวมถึงให้การทดสอบในโดเมนความถี่ด้วย ทั้งนี้ในการปรับระดับอินพุทด้วยเทอม F_i อาจได้รับการพิจารณาว่าเป็นการปรับแปรตำแหน่งซีโร่ในทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่น และถ้าหากมีการศึกษาอย่างลึกซึ้ง อาจนำไปสู่ความรู้หรือข้อสรุปในเรื่องการจัดวางตำแหน่งซีโร่ที่เหมาะสม (zeros-placement) เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น หรืออาจได้ข้อสรุปที่เป็นประโยชน์ในด้านการแผนแบบตัวควบคุมในอีกแง่มุมหนึ่ง

3. วิธีการควบคุมที่ได้นำเสนอในโครงงานฯ ควรได้รับการประยุกต์กับกระบวนการที่ต่างลักษณะกันออกไป เพื่อแสวงหาการใช้ประโยชน์ในทางปฏิบัติที่กว้างขวางยิ่งขึ้น เช่นอาจประยุกต์กับโพรเซสคอนโทรล ซึ่งให้ผลตอบสนองที่ล่าช้า (slow response) การควบคุมด้วยวิธีการที่นำเสนอ สามารถให้ความสนใจต่อค่าเวลาในการไต่ระดับของผลตอบสนองในโดเมนเวลาได้ชัดเจนกว่าการประยุกต์กับเซอร์โวคอนโทรลดังในโครงงานฯนี้ เพราะเซอร์โวคอนโทรลจะให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว (fast response) จนอาจสังเกตได้ไม่ทันในบางจังหวะของการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 66 แสดงความชันของสัญญาณให้การควบคุม เมื่อค่า F_I เปลี่ยนไป

4. กรรมวิธีทางฟัซซี่ลอจิก ควรมีพัฒนาการทางทฤษฎีที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ในด้านการเลือกใช้ฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพ, จำนวนกฎการควบคุมที่เหมาะสม, การออกแบบกฎการควบคุม, การอนุมาน และเทคนิคการดีฟัซซิฟิเคชั่น ที่จะใช้กับกระบวนการที่แตกต่างกันออกไป เพื่อให้วิศวกรผู้ออกแบบยึดถือปฏิบัติไปในทิศทางเดียวกัน รวมถึงการวิเคราะห์ระบบเชิงเสถียรภาพและโรบัสท์เนสส์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1]. Astrom,K.J. and Wittenmark,B. Computer Controlled System Theory and Design : Prentice-Hall, 1990.

[2]. Bennett,S. Real Time Computer Control:an introduction :Prentice-Hall, 1988.

[3]. Coffron,J.W. Z80 Applications :Sybex, 1983.

[4]. Dorf,R.C. Modem Control Systems :Addison-Wesley, 1995.

[5]. Eitelberg,E. "A regulating and tracking (PID) controller." Int.J.Control , vol. 45, no. 1, pp. 91-95, 1987.

[6]. Franco,S. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits :McGraw-Hill, 1988.

[7]. Frohr,F and Orttenburger,F. Introduction to Electronic Control Engineering :Siemens, 1970.

[8]. Golten,J and Verwer,A. Control System Design and Simulation :McGraw-Hill, 1991.

[9]. Jacob,J.M. Industrial Control Electronics Application and Design :Prentice-Hall, 1989.

[10]. Johnson,C.D. Process Control Instrumentation Technology :Prentice-Hall, 1993

[11]. Kuo,B.C. Automatic Control Systems :Prentice-Hall, 1991.

[12]. Kuo,B.C. Digital Control Systems :Holt-Suanders, 1980.

[13]. Manual of CP-AT180 Control Board , ETT Co.,Ltd.

[14]. Manual of DC Servo Motor (U178T) , Sanyo Denki Co.,Ltd.

[15]. Manual of ET-Debugger AT180 , ETT Co.,Ltd.

[16]. Manual of San Driver (PDT-203-30) , Sanyo Denki Co.,Ltd.

[17]. Manual of Z180ASM Cross-Assembler , (contact ETT Co.,Ltd.)

[18]. Matlab ,High-Performance Numeric Computation and Visualization Software, Reference Guide, 1995.

[19]. Matlab, Control System Toolbox , User's Guide, 1995.

[20]. Matlab, Simulink:Dynamic System Simulation Software , User's Guide, 1995.

[21]. Ogata,K. Modem Control Engineering :Prentice-Hall, 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[22]. Puangdownreong,D., Sujitjorn,S and Prempraneerat,Y. "Assessment of the effects of Eitelberg's method on system responses." Thailand Engineering Journal , vol. 47, no.4, pp.68-71, 1994.

[23]. Sujitjorn,S., Punarasart,P., Prempraneerat,Y. and Puangdownreong,D. "Input weighting for SISO system with feedback PID controller." Surunaree J.Sci Technol. ,Vol.2, no.1, pp. 33-43, 1995.

[24]. Zilog, Microprocessor Data Book Technical Manual. , (Z180,Z180MPU), 1988.

[25]. เดชา พวงดาวเรือง, โยธิน เปรมปราณีรัชต์, และ สราวุฒิ สุจิตจร, "การพัฒนาระบบควบคุมดีซีเซอร์โวมอเตอร์เพื่อใช้เป็นชุดทดสอบวิธีการของไอเทลเบิร์ก" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 18. ณ. โรงแรมแอมบาสเดอร์ จอมเทียนพัทยา,ชลบุรี, น. 809-814, 22-24 พ.ย., 2538.

[26]. โยธิน เปรมปราณีรัชต์, ระบบเซอร์โวและอิเล็คทรอนิคส์คอนโทรลมอเตอร์ :สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2533.

[27]. วิบูรณ์ ชื่นแขก, ไมโครโพรเซสเซอร์ :สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2532.

[28]. สราวุฒิ สุจิตจร, "แนวความคิดในการแผนแบบและสร้างตัวควบคุมชนิดผู้เชี่ยวชาญเวลาจริง" เอกสารประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี. : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมป์, 31 ต.ค.-3 พ.ย., น. 693-703, 2534.

[29]. สราวุฒิ สุจิตจร, "ฟัซซี่ลอจิกกับระบบควบคุม" วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. ,ปีที่ 2 ฉบับที่ 3, ก.ย.-ธ.ค. น. 171-196, 2538.

[30]. สราวุฒิ สุจิตจร, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์:การปรับแต่งปัจจัยน้ำหนักอินพุทในตัวเอง , ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็คทรอนิคส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, พ.ศ. 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวค ก.
การคำนวณขนาดและเวลาในการเอกซิคิวท์โปรแกรมให้การควบคุม

ในโครงงานวิทยานิพนธ์นี้ มีโปรแกรมให้การควบคุมอยู่สองโปรแกรมด้วยกันคือ โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี (รายละเอียดปรากฏในบทที่ 3) และโปรแกรมตัวควบคุม f^{+}PID (รายละเอียดปรากฏในบทที่ 4) การคำนวณขนาดของโปรแกรม จะพิจารณาว่าในแต่ละคำสั่งของโปรแกรมใช้หน่วยความจำกี่ไบต์ แล้วนำจำนวนหน่วยความจำที่ใช้ทั้งหมดมารวมกัน ส่วนการคำนวณเวลาในการเอกซิคิวท์โปรแกรมจะพิจารณาจากคาบเวลาที่แต่ละคำสั่งของโปรแกรมใช้ปฏิบัติการ แล้วจึงนำคาบเวลาทั้งหมดมารวมกัน ในที่นี้ได้แยกการคำนวณขนาดและเวลาเอกซิคิวท์ของโปรแกรมให้การควบคุมทั้งสอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้ (จำนวนหน่วยความจำและจำนวนคาบเวลาของแต่ละคำสั่งในโปรแกรม ผู้สนใจอาจดูได้จาก [24])

ก.1 โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี

ตัวโปรแกรม	จำนวนหน่วยความจำ(ไบต์)	จำนวนคาบเวลา
.org 8100h	-	-
push af	1	11
push hl	1	11
push de	1	11
push bc	1	11
ld a,00h	2	6
out (60h),a	2	10
ld a,80h	2	6
del: dec a	1	4
jp nz,del	3	9/6 (จริง/เท็จ)
ld a,33h	2	6
ld (8090h),a	3	13
in a,(0fch)	2	9
ld (8091h),a	3	13
pro: ld a,(8090h)	3	12
ld d,a	2	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวโปรแกรม	จำนวนหน่วยความจำ(ไบต์)	จำนวนคาบเวลา
ld a,(8086h)	3	12
ld e,a	2	6
mlt de	2	17
ld a,(8091h)	3	12
ld b,a	2	6
ld a,e	2	6
sub b	1	4
ld d,a	2	6
ld a,(8083h)	3	12
ld e,a	2	6
mlt de	2	17
ld a,e	2	6
ld (80a0h),a	3	13
int: ld a,(8090h)	3	12
ld d,a	2	6
ld a,(8087h)	3	12
ld e,a	2	6
mlt de	2	17
ld a,(8091h)	3	12
ld b,a	2	6
ld a,e	2	6
sub b	1	4
ld (80a1),a	3	13
ld b,a	2	6
ld a,(8080h)	3	12
add a,b	1	4
ld d,a	2	6
ld a,(8084h)	3	12
ld e,a	2	6
mlt de	2	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวโปรแกรม	จำนวนหน่วยความจำ(ไบต์)	จำนวนคาบเวลา
ld a,e	2	6
srl a	2	7
srl a	2	7
srl a	2	7
srl a	2	7
srl a	2	7
srl a	2	7
srl a	2	7
ld b,a	2	6
ld a,(8082h)	3	12
add a,b	1	4
ld (80a2h),a	3	13
diff: ld a,(8090h)	3	12
ld d,a	2	6
ld a,(8088h)	3	12
ld e,a	2	6
mlt de	2	17
ld a,(8091h)	3	12
ld b,a	2	6
ld a,e	2	6
sub b	1	4
ld (80a3h),a	3	13
ld a,(8081h)	3	12
ld b,a	2	6
ld a,(80a3h)	3	12
sub b	1	4
ld d,a	2	6
ld a,(8085h)	3	12
ld e,a	2	6
mlt de	2	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวโปรแกรม	จำนวนหน่วยความจำ(ไบต์)	จำนวนคาบเวลา
ld a,e	2	6
ld (80a4h),a	3	13
uk: ld a,(80a0h)	3	12
ld b,a	2	6
ld a,(80a2h)	3	12
add a,b	1	4
ld b,a	2	6
ld a,(80a4h)	3	12
add a,b	1	4
ld (80a5h),a	3	13
outp: out (0eah),a	2	10
update: ld a,(80a1h)	3	12
ld (8080h),a	3	13
ld a,(80a3h)	3	12
ld (8081h),a	3	13
ld a,(80a2h)	3	12
ld (8082h),a	3	13
pop bc	1	9
pop de	1	9
pop hl	1	9
pop af	1	9
ei	1	3
reti	2	22

ดังนั้นโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีสามารถสรุปได้ดังนี้

1). โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีมีขนาด 212 ไบต์ และมีข้อมูล (data) ขนาด 8 ไบต์ ทั้งนี้ข้อมูลอีกส่วนหนึ่งของโปรแกรม ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ถูกฝากไว้ที่โปรแกรมผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์ (โปรแกมหลัก) อีก 9 ไบต์ ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในบทที่ 3

2). โปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีใช้เวลาในการเอกซิคิวท์สูงสุดประมาณ 0.26 มิลลิวินาที (2559 คาบเวลา)×(1/10 MHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 โปรแกรมตัวควบคุม f^{+}PID

ตัวโปรแกรม	จำนวนหน่วยความจำ(ไบต์)	จำนวนคาบเวลา
.org 8100h	-	-
push af	1	11
push de	1	11
push bc	1	11
ld a,00h	2	6
out (60h),a	2	10
ld a,80h	2	6
del: dec a	1	4
jp nz,del	3	9/6 (จริง/เท็จ)
in a,(0fch)	2	9
ld (850ah),a	3	13
stored: ld a,(850ah)	3	12
ld (hl),a	1	7
inc hl	1	4
ld a,90h	2	6
cp h	1	4
jp nc,pro	3	9/6 (จริง/เท็จ)
ld a,00h	2	6
out (0e9h),a	2	10
compared: ld b,1eh	2	6
ld a,(9000h)	3	12
cp b	1	4
jp nc,nong	3	9/6 (จริง/เท็จ)
su: ld b,a	2	6
ld a,1eh	2	6
sub b	1	4
ld (8512h),a	3	13
ld b,0ch	2	6
ld a,(8512h)	3	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวโปรแกรม	จำนวนหน่วยความจำ(ไบต์)	จำนวนคาบเวลา
cp b	1	4
jp nc,s1	3	9/6 (จริง/เท็จ)
ld b,07h	2	6
ld a,(8512h)	3	12
cp b	1	4
jp nc,s2	3	9/6 (จริง/เท็จ)
ld b,02h	2	6
ld a,(8512h)	3	12
cp b	1	4
jp nc,s3	3	9/6 (จริง/เท็จ)
s4: halt	1	3
s1: ld a,(8501h)	3	12
ld b,0eh	2	6
add a,b	1	4
ld (8501h),a	3	13
halt	1	3
s2: ld a,(8501h)	3	12
ld b,0ah	2	6
add a,b	1	4
ld (8501h),a	3	13
halt	1	3
s3: ld a,(8501h)	3	12
ld b,05h	2	6
add a,b	1	4
ld (8501h),a	3	13
halt	1	3
nong: sub b	1	4
ld (8511h),a	3	13
ld b,0ch	2	6
ld a,(8511h)	3	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวโปรแกรม	จำนวนหน่วยความจำ(ไบต์)	จำนวนคาบเวลา
cp b	1	4
jp nc,n1	3	9/6 (จริง/เท็จ)
ld b,07h	2	6
ld a,(8511h)	3	12
cp b	1	4
jp nc,n2	3	9/6 (จริง/เท็จ)
ld b,02h	2	6
ld a,(8511h)	3	12
cp b	1	4
jp nc,n3	3	9/6 (จริง/เท็จ)
n4: halt	1	3
n1: ld a,(8501h)	3	12
ld b,0eh	2	6
sub b	1	4
ld (8501h),a	3	13
halt	1	3
n2: ld a,(8501h)	3	12
ld b,0ah	2	6
sub b	1	4
ld (8501h),a	3	13
halt	1	3
n3: ld a,(8501h)	3	12
ld b,05h	2	6
sub b	1	4
ld (8501h),a	3	13
halt	1	3
pro: ld a,(850ah)	3	12
ld b,a	2	6
ld a,(8501h)	3	12
sub b	1	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวโปรแกรม	จำนวนหน่วยความจำ(ไบต์)	จำนวนคาบเวลา
ld d,a	2	6
ld a,(8507h)	3	12
ld e,a	2	6
mlt de	2	17
ld a,e	2	6
ld (850bh),a	3	13
int: ld a,(850ah)	3	12
ld b,a	2	6
ld a,(8502h)	3	12
sub b	1	4
ld (850ch),a	3	13
ld b,a	2	6
ld a,(8504h)	3	12
add a,b	1	4
ld d,a	2	6
ld a,(8508h)	3	12
ld e,a	2	6
mlt de	2	17
ld a,e	2	6
srl a	2	7
srl a	2	7
srl a	2	7
srl a	2	7
srl a	2	7
srl a	2	7
srl a	2	7
ld b,a	2	6
ld a,(8506h)	3	12
add a,b	1	4
ld (850dh),a	3	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวโปรแกรม	จำนวนหน่วยความจำ(ไบต์)	จำนวนคาบเวลา
diff: ld a,(850ah)	3	12
ld b,a	2	6
ld a,(8503h)	3	12
sub b	1	4
ld (850eh),a	3	13
ld a,(8505h)	3	12
ld b,a	2	6
ld a,(850eh)	3	12
sub b	1	4
ld d,a	2	6
ld a,(8509h)	3	12
ld e,a	2	6
mlt de	2	17
ld a,e	2	6
ld (850fh),a	3	13
uk: ld a,(850bh)	3	12
ld b,a	2	6
ld a,(850dh)	3	12
add a,b	1	4
ld b,a	2	6
ld a,(850fh)	3	12
add a,b	1	4
ld (8510h),a	3	13
outp: out (0e9h),a	2	10
update: ld a,(850ch)	3	12
ld (8504h),a	3	13
ld a,(850eh)	3	12
ld (8505h),a	3	13
ld a,(850dh)	3	12
ld (8506h),a	3	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวโปรแกรม	จำนวนหน่วยความจำ(ไบต์)	จำนวนคาบเวลา
pop bc	1	9
pop de	1	9
pop af	1	9
ei	1	3
reti	2	22

ดังนั้นโปรแกรมตัวควบคุม f^{+}PID สามารถสรุปได้ดังนี้

1). โปรแกรมตัวควบคุม f^{+}PID มีขนาด 324 ไบต์

2). โปรแกรมตัวควบคุม f^{+}PID ใช้เวลาในการเอกซิคิวท์สูงสุดประมาณ 0.24 มิลลิวินาที (2421 คาบเวลา)×(1/10 MHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

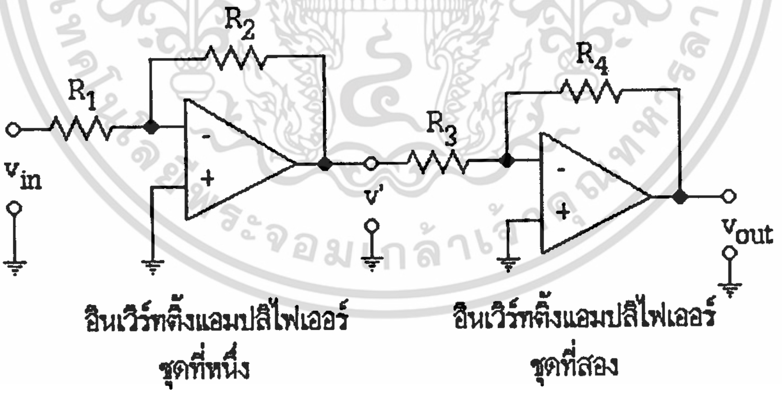
ภาคผนวก ข.

การออกแบบส่วนกรองสัญญาณ

ส่วนกรองสัญญาณเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการภายใต้การควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้นในโครงงานฯ ประกอบด้วยนอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์และโลว์พาสส์ฟิลเตอร์ ทำหน้าที่ลดระดับสัญญาณ 3/7 เท่า และกรองสัญญาณจากทาโค่เยนเนอร์เรเตอร์ ดังอภิปรายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 3 การออกแบบส่วนกรองสัญญาณ จะแยกพิจารณาเป็นการออกแบบนอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ และการออกแบบโลว์พาสส์ฟิลเตอร์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ข.1 นอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์

นอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ทำหน้าที่ลดระดับสัญญาณลง 3/7 เท่า มีการใช้งานวงจรอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ (inverting amplifier) สองชุด ดังแสดงในรูปที่ 67 อินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ชุดที่หนึ่งให้การลดระดับสัญญาณด้วยอัตรา -3/7 เท่า ขณะที่อินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ชุดที่สอง มีอัตราขยายเป็น -1 ทั้งนี้เพื่อให้การลดระดับสัญญาณมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 67 วงจรนอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ อัตราขยาย 3/7 เท่า

จากรูปที่ 67 อินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ชุดที่หนึ่ง มีอัตราขยายเป็น $\frac{v'}{v_{in}}$ ซึ่ง

$$\frac{v'}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{3}{7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $R_1 = 10\ K\Omega$ (R_1 เป็นตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้) และ $R_2 = 2\ K\Omega$

อินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ชุดที่สอง มีอัตราขยายเป็น $\frac{v_{out}}{v'}$ ซึ่ง

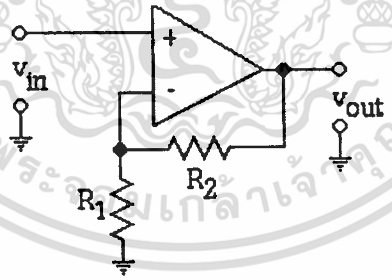
$$\frac{v_{out}}{v'} = -\frac{R_4}{R_3} = -1$$

กำหนดให้ $R_4 = 5\ K\Omega$ และ $R_3 = 5\ K\Omega$

พิจารณาอัตราขยายโดยรวม

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{v'}{v_{in}} \times \frac{v_{out}}{v'} = (-\frac{3}{7})(-1) = \frac{3}{7}$$

สาเหตุที่ต้องสร้างอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ ขึ้นมาถึงสองชุดเพื่อสมอ้างเป็นนอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์นั้น เพราะถ้าหากใช้วงจรนอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ตรงๆ ดังแสดงในรูปที่ 68 วงจรดังกล่าวจะให้อัตราขยายเป็น $1+\frac{R_2}{R_1}$ หรือ ≥ 1 ซึ่งในการนี้ต้องการอัตราขยายเพียง 3/7 เท่า ดังนั้นจึงหลีกเลี่ยงไปใช้วงจรอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์สองชุดข้างต้นแทน



รูปที่ 68 วงจรนอนอินเวิร์ทติ้งแอมปลิไฟเออร์ อัตราขยาย $1+\frac{R_2}{R_1}$

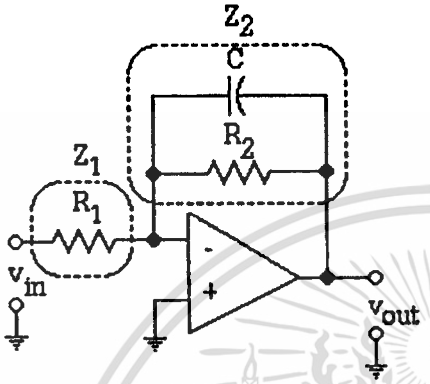
ข.2 โลว์พาสส์ฟิลเตอร์

หน้าที่หลักของโลว์พาสส์ฟิลเตอร์ คือกำจัดสัญญาณรบกวนซึ่งมีความถี่สูงออกไปจากสัญญาณคงเหลือแต่สัญญาณความถี่ต่ำที่ต้องการ โลว์พาสส์ฟิลเตอร์ที่ใช้ในโครงงานฯ เป็นโลว์พาสส์ฟิลเตอร์อันดับหนึ่ง (first-order low-pass filter) มีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 69(ก) คุณลักษณะสมบัติเชิงความถี่ของฟิลเตอร์ แสดงดังรูปที่ 69(ข)

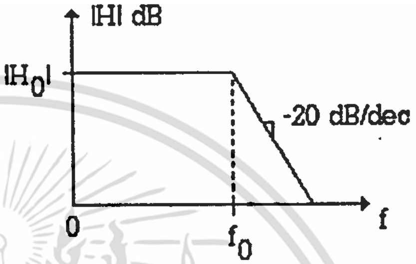
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 69(ก) เราสามารถหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่น,H ได้จาก

$$H = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$



รูปที่ 69(ก) โครงสร้างวงจร



รูปที่ 69(ข) คุณลักษณะสมบัติเชิงความถี่

รูปที่ 69 โลว์พาสส์ฟิลเตอร์อันดับหนึ่ง

โดยที่ $$Z_2 = R_2 // \left\{ \frac{1}{(j\omega C)} \right\} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C}$$

ซึ่ง $$\omega = 2\pi f$$

และ $$Z_1 = R_1$$

ดังนั้น $$H = H_0 \frac{1}{1 + j(f / f_0)}$$

โดยที่ $$H_0 = -\frac{R_2}{R_1}$$

และ $$f_0 = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

รูปที่ 69(ข) แสดงลักษณะสมบัติเชิงความถี่ของฟิลเตอร์ โดยอาศัยพีชคณิตของโบดไดอะแกรม (Bode diagram) ดำเนินการตามสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงทะเบียนไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|H|_{dB} \triangleq 20\log_{10}|H|$$

ผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดได้จาก [6]

เมื่อ H_0 คือ ดีซีเกน (dc gain) และ

f_0 คือ ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) หรือความถี่คอร์เนอร์ (corner frequency)

สัญญาณใดๆก็ตามที่ผ่านเข้ามายังโลว์พาสส์ฟิลเตอร์ ถ้ามีความถี่ต่ำกว่าความถี่คัทออฟ,f_0 สัญญาณดังกล่าวสามารถผ่านฟิลเตอร์ไปได้ แต่ในทางกลับกัน ถ้าสัญญาณที่ผ่านเข้ามายังโลว์พาสส์ฟิลเตอร์ มีความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟ สัญญาณนั้นจะไม่สามารถผ่านฟิลเตอร์ไปได้

ในการประยุกต์โลว์พาสส์ฟิลเตอร์กับโครงงานฯ สัญญาณจากทาโคเยนเนอเรเตอร์จะเป็นสัญญาณดีซี มีความถี่เป็นศูนย์ ขณะที่สัญญาณรบกวนซึ่งแทรกสอดมากับสัญญาณดังกล่าว มีความถี่ประมาณ 100 Hz จึงทำการออกแบบโลว์พาสส์ฟิลเตอร์เพื่อกรองสัญญาณรบกวนดังกล่าวทิ้ง โดยกำหนดให้ค่าดีซีเกน,H_0 เท่ากับ 20 dB และความถี่คัทออฟ,f_0 เท่ากับ 100 Hz

จาก

$$|H_0|_{dB} = 20\log_{10}|H_0|$$

$$20 = 20\log_{10} H_0$$

$$1 = \log_{10} H_0$$

ดังนั้น $H_0 = 10$

จาก $|H_0| = \dfrac{R_2}{R_1}$

จะได้ $R_2 = 10R_1$

กำหนดให้ $R_1 = 10\ K\Omega$ และ $R_2 = 1\ K\Omega$

จาก $f_0 = \dfrac{1}{2\pi R_2 C} = 100\ Hz$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ $$C = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^{3} \times 100} = 0.16\ \mu F$$

เลือก $C = 0.1\ \mu F$

ทำการคำนวณย้อนกลับ $$R_2 = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 0.1 \times 10^{-6}} \approx 15\ K\Omega$$

$$R_1 = 1.5\ K\Omega$$

เลือก $R_1 = 1.5\ K\Omega$ และ $R_2 = 15\ K\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
โปรแกรมให้การทดสอบกระบวนการและส่วนกรองสัญญาณ

โปรแกรมให้การทดสอบกระบวนการภายใต้การควบคุม(ดีซีเซอร์โวมอเตอร์พล้านท์) และโปรแกรมให้การทดสอบส่วนกรองสัญญาณ ประดิษฐ์ขึ้นด้วยภาษาแอสเซมบลี้ของ Z180CPU โดยจะอาศัยโปรแกรมแอสเซมเบลอร์ Z180ASM ช่วยในการแปลงโปรแกรมจากแอสเซมบลี้ไฟล์ไปเป็นอินเทลเฮ็กซ์ไฟล์ ดังแสดงในรายละเอียดต่อไปนี้

ค.1 โปรแกรมให้การทดสอบกระบวนการภายใต้การควบคุม

รายละเอียดของโปรแกรมให้การทดสอบกระบวนการฯ พร้อมคำอธิบายโปรแกรม แสดงดังต่อไปนี้

```
        .org 8000h          ;กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของโปรแกรมไว้ที่ 8000h ของหน่วยความจำ
        ld a,80h            ;กำหนด control word ให้เท่ากับ 80h
        out (0ebh),a        ;ส่ง control word ไปยัง control port ของ 8255PIO โดยที่ 80h
                            ;มีความหมายว่า กำหนดให้ทุกพอร์ทของ 8255PIO เป็น output
                            ;port
setp:   ld a,33h            ;กำหนดค่าอินพุทอ้างอิง,r(i) เท่ากับ 33h หรือ 1 โวลท์
outp:   out (0e9h),a        ;ส่งอินพุท,r(i) ไปยังพอร์ท 0e9h ของ 8255PIO ซึ่งต่ออยู่กับ ดี/เอ
                            ;คอนเวอร์เตอร์ เพื่อใช้ประโยชน์ในการทดสอบกระบวนการ (ขับ
                            ;มอเตอร์พล้านท์) ต่อไป
        end                 ;จบการทำงาน
```

โปรแกรมให้การทดสอบกระบวนการฯ ถูกเขียนขึ้นเป็นแอสเซมบลี้ไฟล์โดยอาศัยเอดิเตอร์ใน Z180ASM ถูกเก็บไว้ในไฟล์ชื่อ test1.asm จากนั้นจะถูกแปลงให้ไปอยู่ในรูปของอินเทลเฮ็กซ์ไฟล์ด้วยแอสเซมเบลอร์ Z180ASM เป็นไฟล์ test1.obj ดังแสดงในรูปที่ 70

```
:088000003E80D3EB3E33D3E9CF
:00000001FF
```

รูปที่ 70 แสดงรายละเอียดของไฟล์ test1.obj

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 โปรแกรมให้การทดสอบส่วนกรองสัญญาณ

รายละเอียดของโปรแกรมให้การทดสอบส่วนกรองสัญญาณ พร้อมคำอธิบายแสดงดังต่อไปนี้

```
        .org 8000h      ;กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของโปรแกรมไว้ที่ 8000h ของหน่วยความจำ
        ld h,82h
        ld l,00h        ;กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของการเก็บข้อมูลไว้ที่ 8200h ของหน่วย
                        ;ความจำ โดยที่ 8 บิตด้านต่ำของตำแหน่งการเก็บข้อมูล (00h)
                        ;ถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ l และ 8 บิตด้านสูงของตำแหน่งการเก็บข้อมูล
                        ;(82h) ถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ h
        ld a,80h        ;กำหนด control word ให้เท่ากับ 80h
        out (0ebh),a    ;ส่ง control word ไปยัง control port ของ 8255PIO โดยที่ 80h
                        ;มีความหมายว่า กำหนดให้ทุกพอร์ทของ 8255PIO เป็น output
                        ;port
    do: out (60h),a     ;สั่งการให้ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ เริ่มทำการแปลงสัญญาณ
                        ;โดยการส่งค่า (ใดๆ) ในรีจิสเตอร์ a ไปยังพอร์ทสตาร์ทของ
                        ;เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งในการนี้คือพอร์ท 60h
   del: dec a
        jp nz,del       ;วนลูปคอยจนกว่าการแปลงสัญญาณจาก เอ/ดี
                        ;คอนเวอร์เตอร์จะเสร็จสิ้น เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้เป็น
                        ;ADC0808 ใช้เวลาในการแปลง (conversion time) สูงสุด
                        ;เท่ากับ 116 ไมโครวินาที   การวนลูปคอย 80h-1 ครั้ง
                        ;ใช้เวลาประมาณ 166 ไมโครวินาที ซึ่งประกันได้ว่า
                        ;คอนเวอร์เตอร์สามารถแปลงสัญญาณได้ทันการณ์แน่นอน

  setp: ld a,33h        ;กำหนดค่าอินพุทอ้างอิง,r(i) เท่ากับ 33h หรือ 1 โวลท์
        ld (8100h),a    ;เก็บค่าอินพุท,r(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 8100h ของหน่วยความจำ
        in a,(0fch)     ;อ่านค่าเอาท์พุท,c(i) ที่ เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์แปลงได้ในรูปของ
                        ;digital word
        ld (8101h),a    ;เก็บค่าเอาท์พุท,c(i) ไว้ที่ตำแหน่ง 8101h ของหน่วยความจำ
stored: ld a,(8101h)    ;โหลดค่าเอาท์พุท,c(i) มาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ a
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        ld (hl),a        ;นำ c(i) ไปเก็บไว้ในตำแหน่ง 8200h ของหน่วยความจำ
        inc hl           ;เพิ่มค่า hl ขึ้น 1
        ld a,90h         ;โหลดค่า 90h ไว้ในรีจิสเตอร์ a
        cp h             ;เปรียบเทียบค่าในรีจิสเตอร์ a กับค่าในรีจิสเตอร์ h
        jp nc,outp       ;ถ้าค่าในรีจิสเตอร์ a มากกว่าหรือเท่ากับค่าในรีจิสเตอร์ h ให้
                         ;กระโดดไปทำงานที่คำสั่งในลาเบล outp แต่ถ้า
                         ;ค่าในรีจิสเตอร์ a น้อยกว่าค่าในรีจิสเตอร์ h ให้ทำคำสั่งต่อไป
        ld a,00h         ;โหลดค่า 00h ไว้ในรีจิสเตอร์ a
        out (0e9h),a     ;ส่งค่า 00h ไปยังพอร์ท 0e9h ของ 8255PIO ซึ่งต่ออยู่กับ
                         ;ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์ ที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณให้กับตัวขับของมอเตอร์
                         ;อีกต่อหนึ่ง ค่า 00h เป็นการสั่งให้มอเตอร์หยุดหมุน
        halt             ;สั่งให้ CPU หยุดทำงาน
outp:   ld a,(8100h)     ;โหลดค่า r(i) มาไว้ในรีจิสเตอร์ a
        out (0e9h),a     ;ส่ง r(i) ไปยังพอร์ท 0e9h ของ 8255PIO เพื่อขับมอเตอร์พล้านท์
        jp do            ;กลับไปทำงานที่คำสั่งในลาเบล do
```

โปรแกรมให้การทดสอบส่วนกรองสัญญาณ ถูกเขียนขึ้นเป็นแอสเซมบลี้ไฟล์โดยอาศัยเอดิเตอร์ใน Z180ASM ถูกเก็บไว้ในไฟล์ชื่อ test2.asm จากนั้นจะถูกแปลงให้ไปอยู่ในรูปของอินเทลเฮ็กซ์ไฟล์ด้วยแอสเซมเบลอร์ Z180ASM เป็นไฟล์ test2.obj ดังแสดงในรูปที่ 71

```
:1080000026822E003E80D3EBD3603DC20A803E33F1
:10801000320081DBFC3201813A018177233E90BC42
:10802000D228803E00D3E9763A0081D3E9C30880A4
:00000001FF
```

รูปที่ 71 แสดงรายละเอียดของไฟล์ test2.obj

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ขณะศึกษา

1). "การศึกษาผลกระทบจากระเบียบวิธีของไอเทลเบิร์กที่มีต่อผลตอบสนองของระบบ" ตีพิมพ์ใน วารสารวิศวกรรมสาร ปีที่ 47 เล่มที่ 4 หน้า 68-71 ปีพ.ศ. 2537

2). "Input weighting for SISO system with feedback PID controller" ตีพิมพ์ในวารสาร Suranaree J.Sci.Tecnol.,vol. 2,no. 1, หน้า 33-43 ปีค.ศ. 1995

3). "การพัฒนาระบบควบคุมดีซีเซอร์โวมอเตอร์เพื่อใช้เป็นชุดทดสอบวิธีการของไอเทลเบิร์ก" ตีพิมพ์ ในวารสารการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18 หน้า 809-814 ปีพ.ศ. 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบจากระเบียบวิธีของไอเทลเบิร์กที่มีต่อผลตอบสนองของระบบ

Assessment of the Effects of Eitelberg's Method on System Responses.

เดชา พวงดาวเรือง *
* นักศึกษาปริญญาโท (ทดลองวิจัย)
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.สํราวุฒิ สุจิตจร **
** อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สำนักเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์ ***
*** หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบจากซีโร่ของอินพุทคอมเพนเซเตอร์ ที่มีต่อผลตอบสนองของระบบโครงสร้างของคอนโทรลลูปที่ถูกนำเสนอโดยไอเทลเบิร์กในปี 1987 สำหรับใช้ในภาคอุตสาหกรรม โครงสร้างที่ PID ในฟอร์เวิร์ดพาทจะสมมูลย์กับโครงสร้างที่มีตัวควบคุม PID อยู่ในตำแหน่งฟีดแบคพาทร่วมกับอินพุทคอมเพนเซเตอร์ ซึ่งมีรูปแบบเป็น PID การปรับแต่งสัดส่วนของสัญญาณตามข้อเสนอของไอเทลเบิร์ก เสมือนเป็นการปรับแปรตำแหน่งซีโร่ของอินพุทคอมเพนเซเตอร์ ผลของการวิเคราะห์ และการจำลองระบบดังกล่าวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้แสดงไว้ในบทความนี้

ABSTRACT

This research assessed the effects of input compensator zeros on system responses The control-loop structure was proposed by Eitelberg in 1987 for industrial use.. It was found that the structure was equivalent to one having a feedback PID-controller with a input compensator. The input compensator was found to be the PID form. Adjusting signal proportions in accordance with Eiteiberg's suggustion was therefore equivalent to adjusting zero locations of the input compensator. Detailed analyses, as well as simulation results obtained from using computer program are presented in this paper.

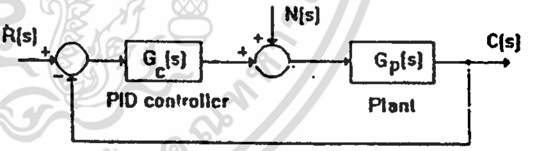
1. บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบควบคุมที่ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมมักจะนิยมใช้ตัวควบคุมเป็นแบบ PID ซึ่งอยู่ในฟอร์เวิร์ดพาทแบบทั่ว ๆ ไป PID ในฟอร์เวิร์ดพาท สามารถแทนได้ด้วย PID ที่อยู่ในฟีดแบคพาท พร้อมกับทำการชดเชยระบบด้วยตัวคอมเพนเซเตอร์ที่มีโครงสร้างของทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นเท่ากับ PID ในฟีดแบคพาท ใส่เข้าที่อินพุท ระบบดังกล่าวสามารถให้ผลตอบสนองได้เหมือนกับผลตอบสนองของระบบที่มี PID อยู่ในฟอร์เวิร์ดพาททุกประการ วิธีการดังกล่าวจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเมื่อ PID ดั้งเดิมที่อยู่ในฟอร์เวิร์ดพาทเกิดขัดข้องหรือเสียหาย เราอาจแทนด้วย PID ในฟีดแบคพาทร่วมกับคอมเพนเซเตอร์ที่อินพุท นอกจากนั้นวิธีการนี้ยังเป็นพื้นฐานในการศึกษาเรื่อง zero-placement โดยการปรับแปรตำแหน่งของซีโร่ในตัวคอมเพนเซเตอร์ที่อินพุท และยังเป็นวิธีการปรับแต่งผลตอบสนองของระบบจากภายนอกได้ผลการทดลองของระบบและวิธีการดังกล่าว แสดงได้โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2. วิธีการควบคุมตามข้อเสนอของไอเทลเบิร์ก

2.1 วิธีการควบคุมแบบทั่วไป

วิธีการควบคุมระบบโดยทั่วไปนั้น ตามทฤษฎีจะนำเอาตัวควบคุม ต่อเข้ากับ พลานท์ เพื่อควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดี ตัวควบคุมดังกล่าวจะอยู่ตรงตำแหน่ง ฟอร์เวิร์ดพาท ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงบล็อคไดอะแกรมของระบบควบคุมทั่วไป

โมเดลของตัวควบคุม จะได้มาจากทฤษฎีการแผนแบบ ซึ่งมีหลากหลายวิธี และจะไม่ขอกล่าวในที่นี้ ด้วยเนื้อที่จำกัด

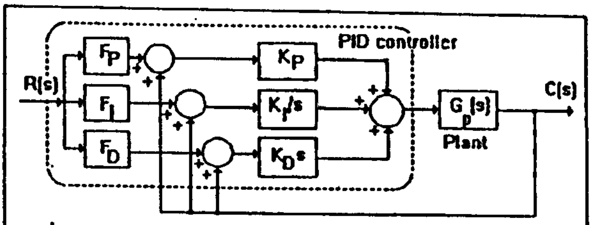
การแปรเปลี่ยนของพารามิเตอร์ยังผลทำให้ผลตอบสนองของระบบมีคุณภาพต่ำลง บ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบเกิดการสั่นไหวและต้องหยุดการทำงานของระบบลงชั่วคราว ปัญหาดังกล่าวเป็นข้อเสียของระบบควบคุมแบบทั่วไป ไอเทลเบิร์กได้เสนอวิธีการแก้ไขซึ่งเป็นทางออกที่ดีทางหนึ่ง โดยเสนอให้มีการปรับคุมระบบจากทางภายนอกโดยที่ไม่ต้องหยุดการทำงานขณะปรับคุม

2.2 วิธีการควบคุมตามข้อเสนอของไอเทลเบิร์ก

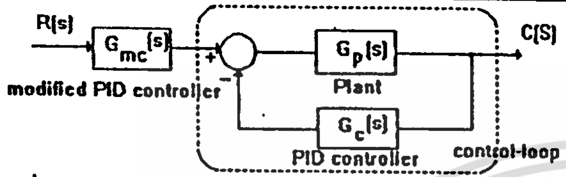
รูปแบบของระบบควบคุมตามข้อเสนอของไอเทลเบิร์กเขียนเป็นบล็อคไดอะแกรม ได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีตัวควบคุมเป็นชนิด PID

จากข้อเสนอระบบในรูปที่ 2.2 สามารถรังสรรค์ระบบให้สมมูลย์ได้ด้วยระบบควบคุมในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงบล็อคไดอะแกรมของระบบควบคุมตามข้อเสนอของไอเทลเบิร์ก



รูปที่ 2.3 แสดงบล็อคไดอะแกรมของระบบควบคุมที่สมมูลย์กับระบบที่ถูกเสนอโดยไอเทลเบิร์ก

ตัวควบคุม PID ที่ดัดแปลงแล้ว (modified PID controller) คือ อินพุทคอมเพนเซเตอร์ มีรูปแบบเป็น PID เช่นกัน ถ้าเรากำหนดให้ $G_c(s)$ มีโมเดลเหมือนกันกับ $G_c(s)$ ของระบบในรูปที่ 2.1 แล้วปรับให้ $G_{mc}(s)$ มีโมเดลตรงกัน ผลตอบสนองของระบบควบคุมทั้งสองจะตรงกัน

2.3 แนวทางการทดลองระบบ

จากระบบควบคุมในรูปที่ 2.3 การปรับแปร $G_{mc}(s)$ เสมือนเป็นการปรับแปรตำแหน่งของซีโรทั้งสองของตัวควบคุม PID ที่ดัดแปลงแล้ว โดยที่จะทำการคงค่าโพลเดิมของคอนโทรลลูป ผลกระทบจากการปรับแปรตำแหน่งของซีโรดังกล่าวจะให้ข้อสรุปที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในเรื่อง zero-placement ซึ่งการปรับแปรซีโร่จะดำเนินการดังนี้

1) ให้ $G_{mc}(s)$ มีซีโร่เป็นค่าจริงซ้ำกัน มีขอบเขตที่ −5 ถึง +5 ช่วงห่างเป็น 25

2) ให้ $G_{mc}(s)$ มีซีโร่เป็นค่าจริงไม่ซ้ำกัน มีขอบเขตที่ −5 ถึง +5

3) ให้ $G_{mc}(s)$ มีซีโร่เป็นค่า complex conjugate โดยคงค่าจินตภาพไว้ที่ $\pm j5$ แล้วปรับแปรค่าจริงจาก −5 ถึง +5 ช่วงห่างเป็น 2.5

4) ให้ $G_{mc}(s)$ มีซีโร่เป็นค่า complex conjugate โดยคงค่าจินตภาพไว้ที่ $\pm j10$ แล้วปรับแปรค่าจริงจาก −5 ถึง +5 ช่วงห่างเป็น 2.5

3. การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1 plant มีโมเดลเป็น $G_p(s)$

$G_p(s) = 1/[(1+s)(1+s/3)^3]$

หรือ $G_p(s) = 27/(s^4+10s^3+36s^2+54s+27)$ ดูที่มาจากเอกสารอ้างอิง [2]

3.2 ตัวควบคุม เป็นชนิด PID มีโมเดลเป็น $G_c(s)$

$G_c(s) = K_P+K_I/s+K_Ds$

$= (K_Ds^2+Kps+K_I)/s$

$= (0.9s^2+2.2s+1.5)/s$ ดูที่มาจากเอกสารอ้างอิง [4]

โมเดลของตัวควบคุม PID ได้มาจากการทดลองโดยทำการแผนแบบเมื่อตัวควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งฟอร์เวิร์ดพาท ดังระบบในรูปที่ 2.1

3.3 ระบบควบคุมในรูปที่ 2.1 พิจารณาทรานสเฟอร์ฟังค์ชั่น C(s)/R(s) จะได้เป็น

$C(s)/R(s) = (24.3s^2+59.4s+40.5)/(s^5+10s^4+36s^3+78.3s^2+86.4s+40.5)$

3.4 ระบบควบคุมในรูปที่ 2.1 พิจารณาทรานสเฟอร์ฟังค์ชั่น C(s)/N(s) จะได้เป็น

$C(s)/N(s) = 27s/(s^5+10s^4+36s^3+78.3s^2+86.4s+40.5)$

3.5 การนำอินพุทคอมเพนเซเตอร์มาต่อเข้ากับระบบในหัวข้อ 3.4 แล้วปรับแปรซีโร่นั่นคือการศึกษาผลกระทบตามข้อเสนอของไอเทลเบิร์กตามที่ได้เสนอไว้ข้างต้น

3.6 โมเดลของอินพุทคอมเพนเซเตอร์เป็น $G_{mc}(s)$ จะปรับแปรตามหัวข้อ 2.3

*3.7 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์*ผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดได้จากเอกสารอ้างอิง [5] และ [3] ตามลำดับ

4. ผลการทดลอง

4.1 จากระบบควบคุมในรูปที่ 2.1

ซึ่งมีตัวควบคุม PID อยู่ที่ตำแหน่งฟอร์เวิร์ดพาท ในลักษณะเช่นนี้ในศัพท์ทางระบบควบคุมจะเรียกว่า "การแทรกกิ้ง" หรือ "เซอร์โว" ผลตอบสนองในเชิง สเตปอินพุท แสดงในรูปที่ 4.1 (b)

4.2 จากระบบควบคุมในรูปที่ 2.1 เช่นกัน

ผลตอบสนองในเชิง สเตปโหลด แสดงในรูปที่ 4.1 (c) ถ้าพิจารณาจะเห็นว่าตัวควบคุม PID จะอยู่ที่ตำแหน่งฟีดแบคพาท ลักษณะเช่นนี้มีศัพท์ทางระบบควบคุมจะเรียกว่า "เร็กกูเลชั่น"

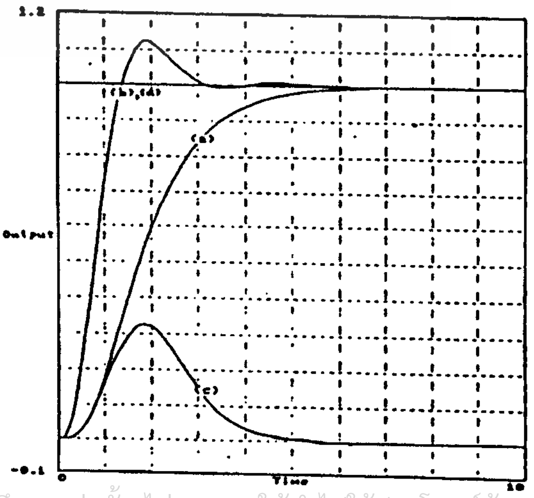
รูปที่ 4.1 แสดงผลตอบสนองของระบบ

(a) ผลตอบสนองต่อสเตปอินพุทของพลานท์

(b) ผลตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบ

(c) ผลตอบสนองต่อสเตปโหลดของระบบ

(d) ผลตอบสนองต่อสเตปอินพุท เมื่อ $G_{mc}(s) = G_c(s)$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 นำเอาตัวควบคุม PID ที่ดัดแปลงแล้ว

มาต่อเข้ากับระบบในหัวข้อ 4.2 ซึ่งนั่นคือระบบควบคุมในรูปที่ 2.3 โดยกำหนดให้ $G_{mc}(s) = G_c(s)$ ผลตอบสนองในเชิงสเตปอินพุท จะแสดงในรูปที่ 4.1 (d)

4.4 ปรับแปร $G_{mc}(s)$ ในลักษณะที่มีซีโร่เป็นค่าจริงซ้ำกัน

โดยปรับแปรค่าจริงจาก −5 ถึง +5 ซึ่งโมเดลของ $G_{mc}(s)$ จะเป็นดังนี้ (หมายเลขของโมเดลจะตรงกับหมายเลขของผลตอบสนองในรูป)

(1) $G_{mc}(s) = (s+5)(s+5)/s$

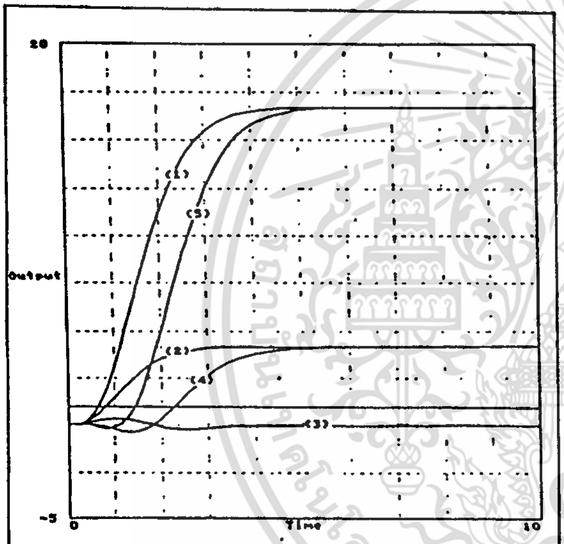
(2) $G_{mc}(s) = (s+2.5)(s+2.5)/s$

(3) $G_{mc}(s) = s^2/s$

(4) $G_{mc}(s) = (s-2.5)(s-2.5)/s$

(5) $G_{mc}(s) = (s-5)(s-5)/5$

ผลตอบสนองต่อสเตปอินพุทแต่ละกรณี แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงผลตอบสนอง เมื่อ $G_{mc}(s)$ ปรับแปรซีโร่เป็นค่าจริงซ้ำกัน

4.5 ปรับแปร $G_{mc}(s)$ ในลักษณะที่มีซีโร่เป็นค่าจริงที่ไม่ซ้ำกัน

โดยมีขอบเขตในช่วง −5 ถึง +5 ซึ่งโมเดลของ $G_{mc}(s)$ จะเป็นดังนี้ (หมายเลขของโมเดลจะตรงกับหมายเลขของผลตอบสนองในรูป)

(1) $G_{mc}(s) = (s+5)(s+2.5)/s$

(2) $G_{mc}(s) = (S+5)s/s$

(3) $G_{mc}(s) = (s+5)(s-2.5)/s$

(4) $G_{mc}(s) = (s+2.5)s/s$

(5) $G_{mc}(s) = (s+2.5)(s-2.5)/s$

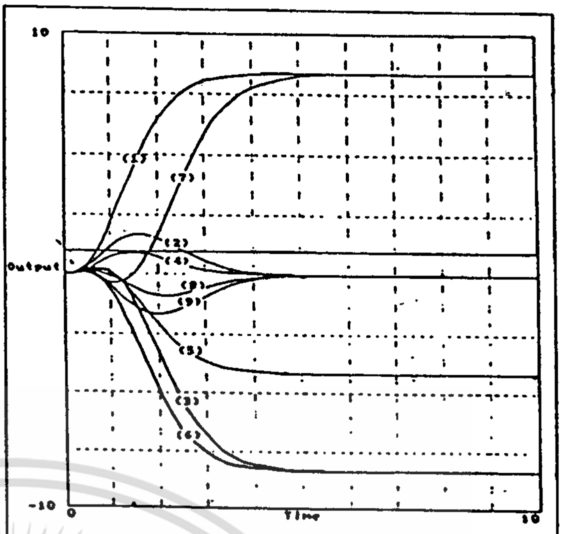
(6) $G_{mc}(s) = (s+2.5)(s-5)/s$

(7) $G_{mc}(s) = (s-2.5)(s-5)/s$

(8) $G_{mc}(s) = (s-2.5)s/s$

(9) $G_{mc}(s) = (s-5)s/s$

ผลตอบสนองต่อสเตปอินพุทแต่ละกรณี แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองเมื่อ $G_{mc}(s)$ ปรับแปรซีโร่เป็นค่าจริงไม่ซ้ำกัน

4.6 ปรับแปร $G_{mc}(s)$ ในลักษณะที่มีซีโร่เป็น complex conjugate

โดยคงค่าจินตภาพไว้ที่ ±j5 แล้วปรับแปรค่าจริงจาก -5 ถึง +5 ช่วงห่างเป็น 2.5 ซึ่งโมเดลของ $G_{mc}(s)$ จะเป็นดังนี้ (หมายเลขของโมเดลจะตรงกับหมายเลขของผลตอบสนองในรูป)

(1) $G_{mc}(s) = (s+5-j5)(s+5+j5)/s$

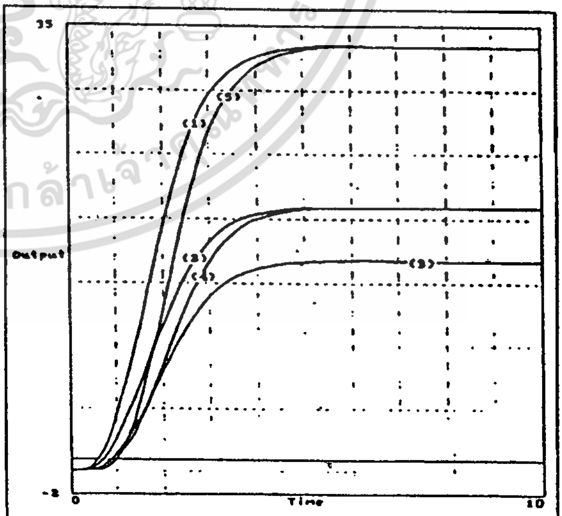
(2) $G_{mc}(s) = (s+2.5-j5)(s+2.5+j5)/s$

(3) $G_{mc}(s) = (s-j5)(s+j5)/s$

(4) $G_{mc}(s) = (s-2.5-j5)(s-2.5+j5)/s$

(5) $G_{mc}(s) = (s-5-j5)(s-5+j5)/s$

ผลตอบสนองต่อสเตปอินพุทแต่ละกรณีแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองเมื่อ $G_{mc}(s)$ ปรับแปรซีโร่เป็น complex conjugate คงค่าจินตภาพที่ ±j5

4.7 ปรับแปร $G_{mc}(s)$ ในลักษณะที่มีซีโร่เป็น complex conjugate

โดยคงค่าจินตภาพไว้ที่ ±j10 แล้วปรับแปรค่าจริงจาก −5 ถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

+5 ช่วงห่างเป็น 2.5 ซึ่งโมเดลของ $G_{mc}(s)$ จะเป็นดังนี้ (หมายเลขของโมเดลจะตรงกับหมายเลขของผลตอบสนองในรูป)

(1) $G_{mc}(s) = (s+5-j10)(s+5+j10)/s$

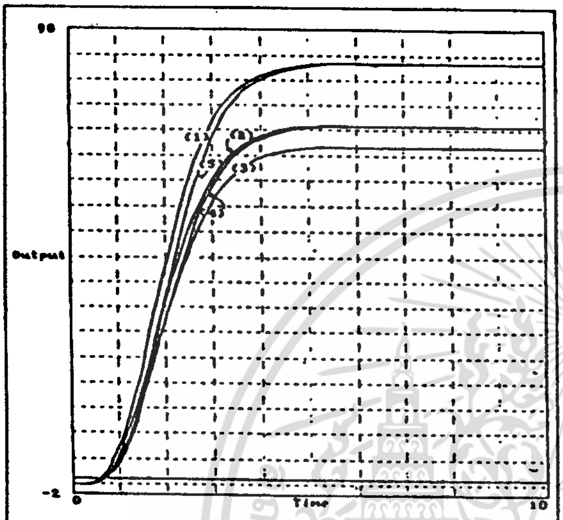
(2) $G_{mc}(s) = (s+2.5-j10)(s+2.5+j10)/s$

(3) $G_{mc}(s) = (s-j10)(s+j10)/s$

(4) $G_{mc}(s) = (s-2.5-j10)(s-2.5+j10)/s$

(5) $G_{mc}(s) = (s-5-j10)(s-5+j10)/s$

ผลตอบสนองต่อสเตปอินพุทแต่ละกรณีแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงผลตอบสนองเมื่อ $G_{mc}(s)$ ปรับแปรซีโร่เป็น complex conjugate คงค่าจินตภาพที่ ±j10

5. สรุปและวิจารณ์

จากผลการทดลองวิเคราะห์ระบบในหัวข้อที่ 4 สรุปเป็นข้อ ๆ อย่างเด่นชัดดังนี้

5.1 จากระบบควบคุมในรูปที่ 2.3 เมื่อทำการปรับ $G_{mc}(s)$ ให้มีโมเดลเท่ากับ $G_c(s)$

ผลตอบสนองในเชิงสเตปอินพุทจะเหมือนกันกับระบบควบคุมในรูปที่ 2.1 ดังรูปที่ 4.1 นั่นแสดงให้เห็นว่า สามารถที่จะควบคุมระบบจากทางภายนอกได้

5.2 เมื่อทำการปรับซีโรของ $G_{mc}(s)$ ตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้งสองตัว อยู่ที่จุดกำเนิด

ผลตอบสนองจะออกมาในลักษณะการเร็กกูเลชั่น ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

5.3 เมื่อทำการปรับซีโรของ $G_{mc}(s)$ อยู่ทางขวามือของ s-plane ทั้งคู่ หรือ อยู่ทางซ้ายมือของ s-plane ทั้งคู่

ผลตอบสนองในสภาวะคงที่, (C_{ss}) จะมีค่าเป็นบวก ดังรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5

5.4 ถ้าปรับให้ซีโรของ $G_{mc}(s)$ อยู่ทางขวามือของ s-plane หนึ่งตัว และอยู่ทางซ้ายมือของ s-plane หนึ่งตัว

ผลตอบสนองในสภาวะคงที่, (C_{ss}) จะมีค่าเป็นลบ ดังรูปที่ 4.3

5.5 ถ้าปรับให้ซีโรของ $G_{mc}(s)$ อยู่ทางขวามือของ s-plane ทั้งคู่

ผลตอบสนองจะเกิดอันเดอร์ชูท (undershoot) ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

ข้อสรุปดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาเรื่อง zero-placement แก่ practicing engineers ในภาคอุตสาหกรรม แต่ผลการวิเคราะห์ ยังเป็นเพียงผลที่ได้จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในขั้นต่อไปจะเป็นการพัฒนาไปยังฮาร์ดแวร์ ซึ่งจะอนุวัติกับมอเตอร์ ในลักษณะของ motor control เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่เป็น practical results

6. เอกสารอ้างอิง

(1) BENJAMIN C.KUO. AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS. 6th ed. U.S.A. Prentice-Hall, 1991

(2) E.EITELBERG. "A regulating and tracking PI(D) Controller" INT.J.CONTROL. vol 45(No.1) : 91-95, 1987.

(3) JACK GOLTEN, ANDY VERWER. CONTROL SYSTEM DESIGN AND SIMULATION. International Edition Singapore McGraw-Hill, 1992

(4) P.DECHA ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF EITELBERG'S METHOD ON SYSTEM RESPONSES. Special project. South-East Asia U. 1992.

(5) THE MATHWORKS, INC. THE STUDENT EDITION OF MATLAB. U.S.A. Prentice-Hall, 1992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INPUT WEIGHTING FOR SISO SYSTEM WITH FEEDBACK PID CONTROLLER

Sarawut Sujitjorn[1]*, Parinya Punarasart[2], Yotin Prempraneerat[3] and Deacha Puangdownreong[4]

Abstract

This paper describes experimental studies of a regulating and tracking control strategy in which the attempt to improve the system performance is externally issued to the control loop. The control method can be viewed as the input compensating technique. The results illustrate strengths and weaknesses of the method. The method is quite attractive to industrial applications since it introduces minimum disruption to an existing control system.

Key words : PID control, input weighting, tracking, regulating.

The use of PID controllers in industries has been known since 1939 (Bennett, 1994). Conventionally, the controller appears in the feedback loop of the control system. To obtain suitable controller's parameters, one can proceed with available design methods or tuning rules. Mostly the design methods, such as stated in some references (Kuo, 1991; Golten and Verwer, 1991; Dorf, 1992), assume known plant models. The tuning rules, such as stated in references (Ziegler and Nichols, 1942, 1943; Cohen and Coon, 1953), assume known process responses. The controller's parameters obtained from both methods are based on the assumption of time-invariant parameters of certain kinds. In practice, these parameters and the response dynamics may change. The controller's parameters are thus optimum at the beginning of the design or tuning process. If the controller's parameters are not adjusted correspondingly to the plant dynamics, the final response of the control system will be satisfactory only for a certain period of time. There have been several attempts to adjust the controller's parameters on-line according to plant dynamics to keep the process's response at optimum. The methods require an identification of the process's parameters as well as an adjustment of the controller's parameters on-line and real-time. These reflect the need for a dedicated control system. If one has a PID control of a classic type, the methods may not lend themselves to the situation except that the existing control system is redesigned and rewired. Apart from the adaptively automatic adjustment of the controller's parameters as mentioned above, one method usually employed in industries is the manual adjustment of such parameters. In this, an operator monitors the process output and adjusts the controller's parameters accordingly in order to maintain satisfactory time response at all time. It requires an experienced operator and manually adjusted knobs available on the control panel. A difficulty always

[1] *Ph.D., member IEEE, Asst. Prof., School of Electrical Engineering (Chair), also with the Center for Scientific and Technological Equipment, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.*
[2] *B.Ind.Tech., Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology, South-East-Asia University, Bangkok, Thailand.*
[3] *Ph.D., Assoc. Prof., Department of Control Engineering (Head), Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Ladgrabang, Bangkok, Thailand.*
[4] *B.Eng., Post-graduate Student, Department of Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang, Bangkok, Thailand.*
* *Corresponding author*

Suranaree J. Sci. Technol. 2 : 33-43.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

arises when the control system in use is of the fixed parameter type providing an experienced operator is available. One may overcome this difficulty by applying the method introduced by Eitelberg (Eitelberg, 1987). This method suggests fractionalizing of the reference input as illustrated in Figure 1. It also suggests manual adjusting of the input portion from the outside of the control loop. This is practically attractive due to less interruption to the original control system. In Eitelberg's work, there is no detailed discussion on the test against PID controller. Suggestion is made via the illustration on the control system configuration as shown in Figure 1 only. The work presented herein is an extension to cover the case of having a SISO system with a feedback PID controller.

Using the block-diagram algebra, one can easily obtain an equivalent system as shown in Figure 2. Equation (1) expresses the transfer function of this equivalent system.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_{mc}(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)} \qquad (1)$$

where

$G_p(s)$ = plant,

$G_c(s)$ = PID-controller (see equation (4)), and

$G_{mc}(s)$ = modified PID-controller (see equation (5)).

It can be seen that the method is equivalent to using a feedforward PID compensator in conjunction with the original feedback one. However, the original controller is repositioned to be in the feedback path receiving and processing the sensed process output instead of the error signal. The adoption of two controllers ensures the regulating and tracking objectives (Kuo, 1991; Astrom and Wittenmark, 1984). The feedback-path controller plays a vital role in disturbance rejection while the feedforward-path controller is particularly for tracking purposes. This description would give a clear view for the Eitelberg's method. Moreover, the technique can be considered as "zero-placement" method. The equation (1) illustrates that the technique is equivalent to adding zeros to the system transfer function providing the repositioned controller $G_c(s)$. Even though the effects of zeros on a system's response have been recognized for years (Truxal, 1955; MacFarlane and Karcanias 1976; Hang, 1989; Kuo, 1991; Golten and Verwer, 1991; Dorf, 1992), the zero-placement method has not been strongly studied and introduced to industrial uses. However, some control theorists have proposed coupled "pole-zero placement" methods (Hostetter and Santina, 1988; Chen et. al., 1990; 1994) which are different and interesting issues.

The current paper describes the experimental results of applying the Eitelberg's method to control an electronic plant. The counterpart simulation results are presented in the co-paper (Puangdownreong, Sujitjorn and Prempraneerat, 1994). The results presented herein show that the method has promising industrial applications. Implementation can be devised by using various techniques. Finally, the paper points out relevant areas of further research.

Materials and Methods

Experiments were conducted against electronic plants. These plants are first-, second-, and third-order networks built from commercially available op-amps. Figures 3(a) and 3(b) depict the circuit diagrams of the first- and the second-order plants, respectively. For the first-order plant, various resistor combinations provide responses with different time- constants. The description of the plant is

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{1 + \tau s} \qquad (2)$$

where τ = time-constant = RC

R = combination of 4kΩ R(s) and C of 0.01 μF

For the second-order one, similar combinations provide responses with different overshoot, rise time, and settling time. Equation (3) describes this plant.

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K\omega^2_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega} \qquad (3)$$

where

K = $1 + R_f / Rn$,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Suranaree J. Sci. Technol.
Vol. 2, No. 1; January - April 1995

$$\omega_n = \sqrt{1/(R_1R_2C_1C_2)}, \text{ and}$$

$$2\zeta = \sqrt{\frac{R_2C_2}{R_1C_1}} + \sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}} + (1-K)\sqrt{\frac{R_1C_1}{R_2C_2}}$$

(for proof of this transfer function, see appendix). Both can be series connected to provide a third-order plant with various response profiles. One can adjust the resistance knobs made available on the panel to obtain different response profiles from the third-order plant.

The PID controller shown in Figure 1 possesses the transfer function :

$$G_C(s) = K_p + K_i / s + sK_d \quad (4),$$

where

K_p = proportional constant,
K_i = integration constant, and
K_d = derivation constant.

The physical controller of parallel configuration can be realized by using conventional op-amps. The controller's schematic diagram can be found in any standard textbook on control electronics such as that of Jacob (1988). All constants of the controlling elements are adjustable to provide an appropriate controlling signal and, hence, a satisfactorily visualized plant's response. Moreover, this adjusting function can represent the time-varying controller parameters.

The weighting elements F_p, F_i, and F_d shown in the Figure 1 are realized by using conventional op-amps. Each element is implemented in the form of a simple proportional circuit issuing weight in the range of 0 to 100%, the configuration of which is available from a standard textbook (e.g. Jacob, 1988). However, a weighting of greater than 100% may be used. When the control system is equipped with these elements, the modified PID controller as mentioned earlier can be described by

$$G_{mc}(s) = F_pK_p + \frac{F_iK_i}{s} + sF_dK_d \quad (5)$$

The conducted experiments are to investigate the step response of the system since the step input has been commonly accepted as a standard test input both in industrial use and in control theoretic. The square wave input is of 120Hz. This enables a conventional oscilloscope to trace the response signal appropriately. Experimenters turned the knobs on the control panel to obtain responses of any desirable shapes. These knobs are provided for adjusting the plant's dynamic characteristics, the controlling elements (K_s) of the PID - controller and the input weighting elements (F_s). The former two sets represent changes in dynamic parameters of the system due to environmental changes and aging, for instance. The latter represents control efforts to regain a satisfactory response.

Results and Discussion

The experiments were conducted to investigate the effects of adjusting F_p, F_i and F_d on the signals obtained from the P+I+D elements and on the time responses of the system. Firstly, the P+I+D signal is discussed. The curve in figure 4 illustrates the P+I+D signal. Results demonstrate that adjusting F_p to decrease the level of the input signal introduces the following effects: the curve a-b-c-d is shifted downward, the line a-b becomes longer, and the point -c- becomes lower. F_i and F_d are set to 100% while F_p is being adjusted. Adjusting F_i while F_p and F_d remain at 100% results in a change of the slope of line c-d. Decreasing input level via adjusting F_i yields a decrease in the slope of line c-d with point -b- fixed. Adjusting F_d while F_p and F_i remain at 100% affects the slope of a-b. Decreasing the input level via adjusting F_d results in point -a- being shifted downward and hence the slope of a-b being decreased. Changing the portion of the input via F_p, F_i and F_d as mentioned above obviously affects the controlling signal obtained from the P+I+D controller. This certainly introduces some changes in the system performance which are discussed below.

Observations for the changes in the system performance were conducted under the circumstances of adjusting F_p, F_i and F_d individually. This means that when one of the fractionalizing elements was adjusted to obtain the corresponding output ranging from 0 to 100% the other two elements were maintained at 100% output.

Adjusting F_p solely decreases the magnitude of oscillation in the final system's response. Steady-state error appears noticeably when the signal obtained through F_p is about 40% of its input. At-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

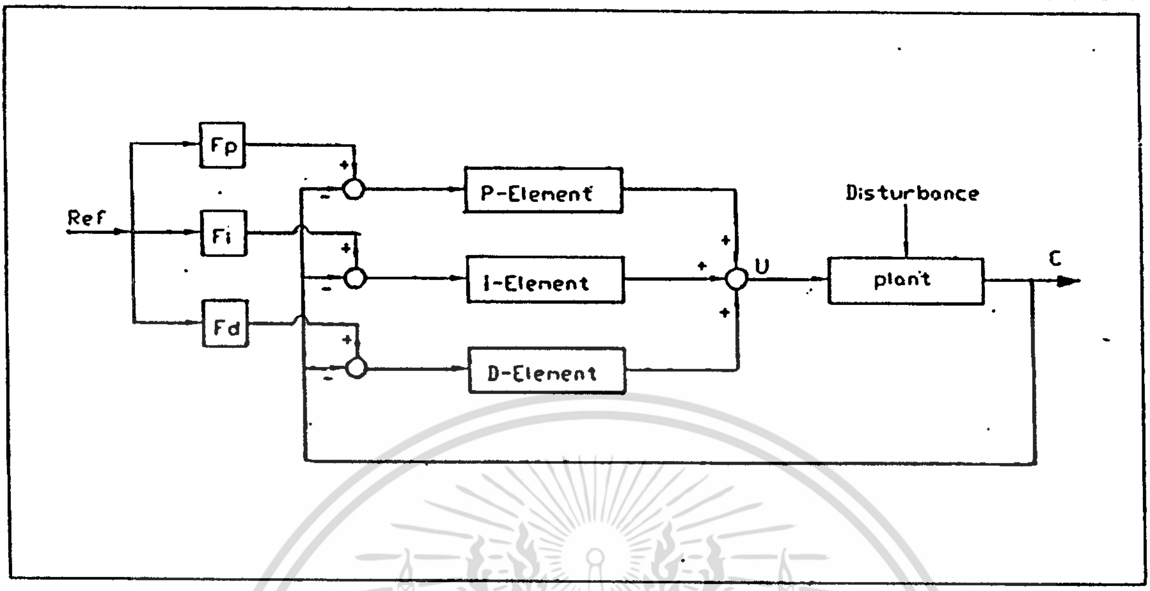


Figure 1. Fractionalizing of the reference input as proposed by Eitelberg in 1987.

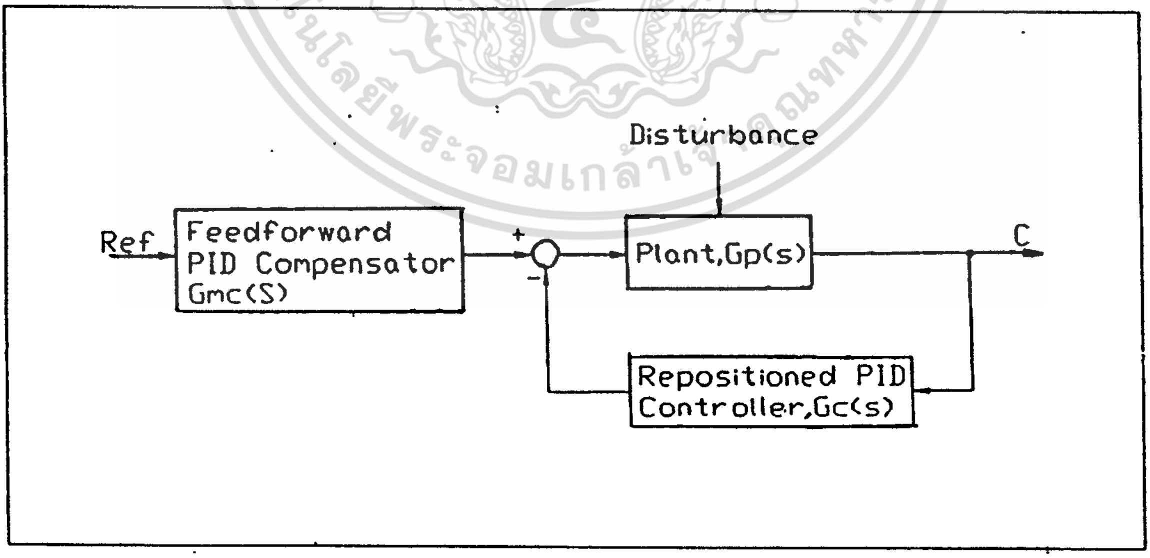


Figure 2. Block diagram illustrating the Eitelberg's method in a clearer view.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

tempt to reduce the magnitude of the output signal from F_p beyond this level introduces more steady-state error and longer rise-time to the response. Moreover, the time response exhibits oscillation during the transient period. It is recognized that adjusting F_p yields a downward movement of the positive (+) envelope (see Figure 5) providing no visualized steady-state error.

Adjusting F_p further results in an upward movement of the negative (-) envelope (see Figure 5), a further downward movement of the positive envelope, and a growth in steady-state error. An interpretation of the results is that a lower level of input signal gives an initial kick to the system at its state closer to equilibrium.

Adjusting F_i reduces the swinging-down magnitude of oscillation, i.e. the negative envelope is shifted upward. A drawback is a decrease in the level of steady-state response. It is noticed that F_i should be adjusted to a level of greater than 100% to recover the steady-state response from being decreased by the adjustment of F_p to reduce the magnitude of oscillation. Surprisingly, oscillation grows when F_i is further adjusted to a certain level (F_i's output is about 40% of its input) to reduce the input to the system. The system may become unstable or have sustained oscillation if F_i is further adjusted.

Adjusting F_d does not introduce any significant changes in the system response. This is mainly due to the nature of step input. Therefore, the effects of Fd for various shapes of input waveforms should be further investigated.

Some of the results illustrating effectiveness of the method are shown in Figures 6 and 7. Figures 6(a) and 7(a) show step responses with moderate and high oscillation, respectively. The oscillation in the responses could be reduced by adjusting the fractionalizing parameters properly. The obtained responses are depicted in Figures 6(b) and 7(b), correspondingly.

The results obtained from the experimental and the counterpart simulation studies would lead to several future researches. The authors wish to point out areas of further research as follows :

- The manipulation of input weighting function studied thus far can be automated. One possibility is to model the operator behaviour in fractionalizing the input. In this domain, a fuzzy system is a useful approach to model the human operator. However, an identification of the system is also necessary and can be accomplished in the fuzzy system domain. Thus, the automated input weighting can be viewed as a fuzzy adaptive learning system. (This project is currently supported by the National Electronics and Computer Technology Center under the research contract #048/2537.)

- The automated input weighting function can be implemented alternatively by using the conventional adaptive control system. This needs that would yield dominant the identification of the system transfer function and/or oscillatory poles. The fractions of the input can be adjusted to obtain appropriate zeros' locations to compensate for the oscillatory poles. However, the polezero cancellation method is to be avoided in practice (Clark, 1988; Kuo, 1991).

- The effects of zeros on the system's response should be theoretically studied in further detail. This would lead to practical recommendations for control system design to utilize more on zero-selection for the system transfer function.

- The obtained results show that fractionalizing the input portion fed to the derivative part is ineffective. This would lead to the modified Eitelberg's method in which F_d would be a derivative function in stead of being a common proportioning function. This should be further studied. In addition, the effects of the simple proportioning F_d for various types of inputs, such as ramp, parabolic and step-ramp, should be further investigated.

- Implementation of the method for a real-world problem is also an interesting matter.

This issue is currently being conducted by the authors' team at the King Mongkut's Institute of Technology, Ladgrabang for serving control of a DC motor, at least.

Conclusion

Experimental studies of the regulating and tracking technique introduced by Eitelberg are discussed in this paper. The technique is attractive to industrial use since it requires less disruption to existing processes. For a manual control process,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

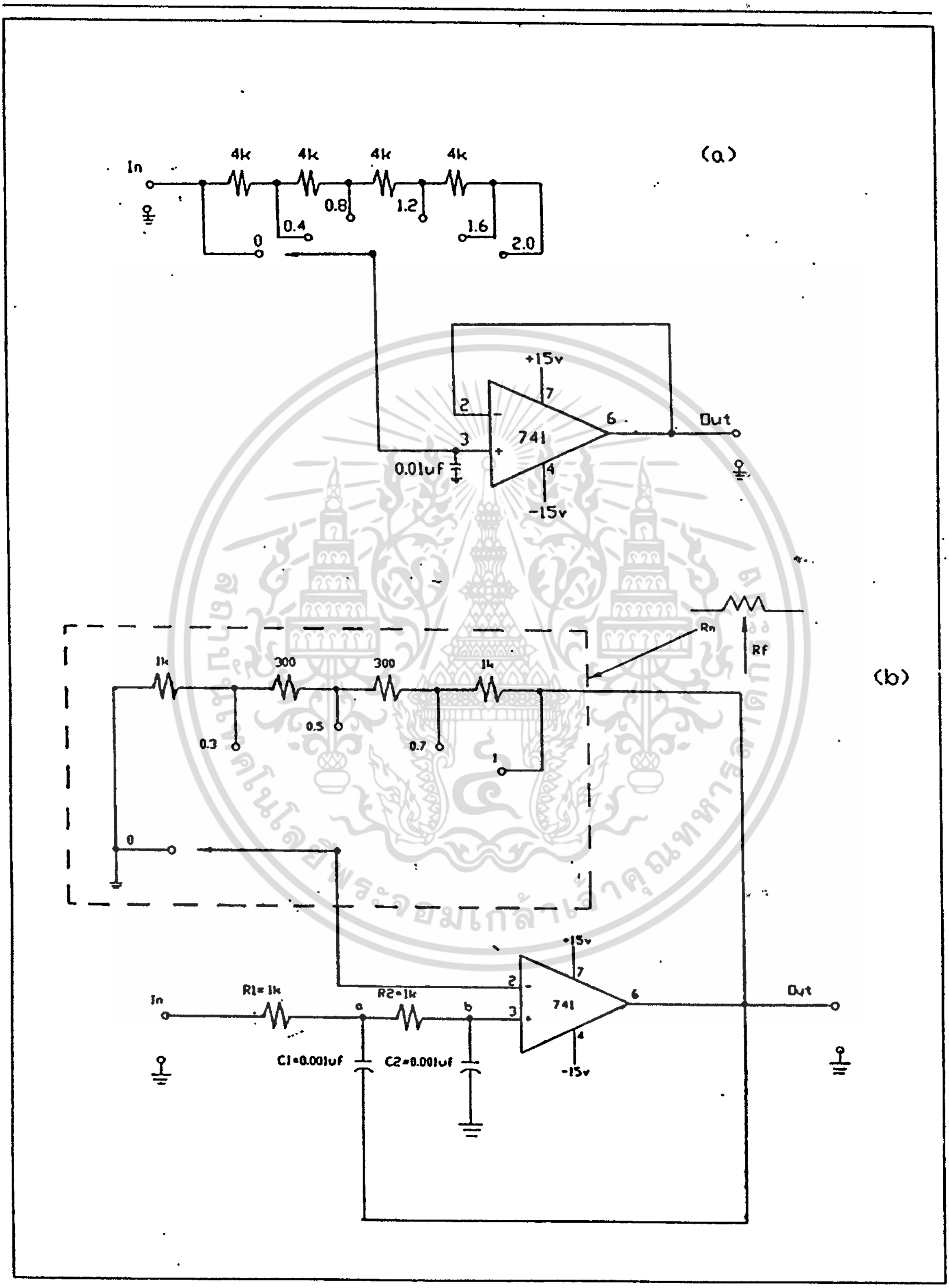


Figure 3. Electronic plants (a) first-order (b) second order.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Suranaree J. Sci. Technol.
Vol. 2, No. 1; January - April 1995

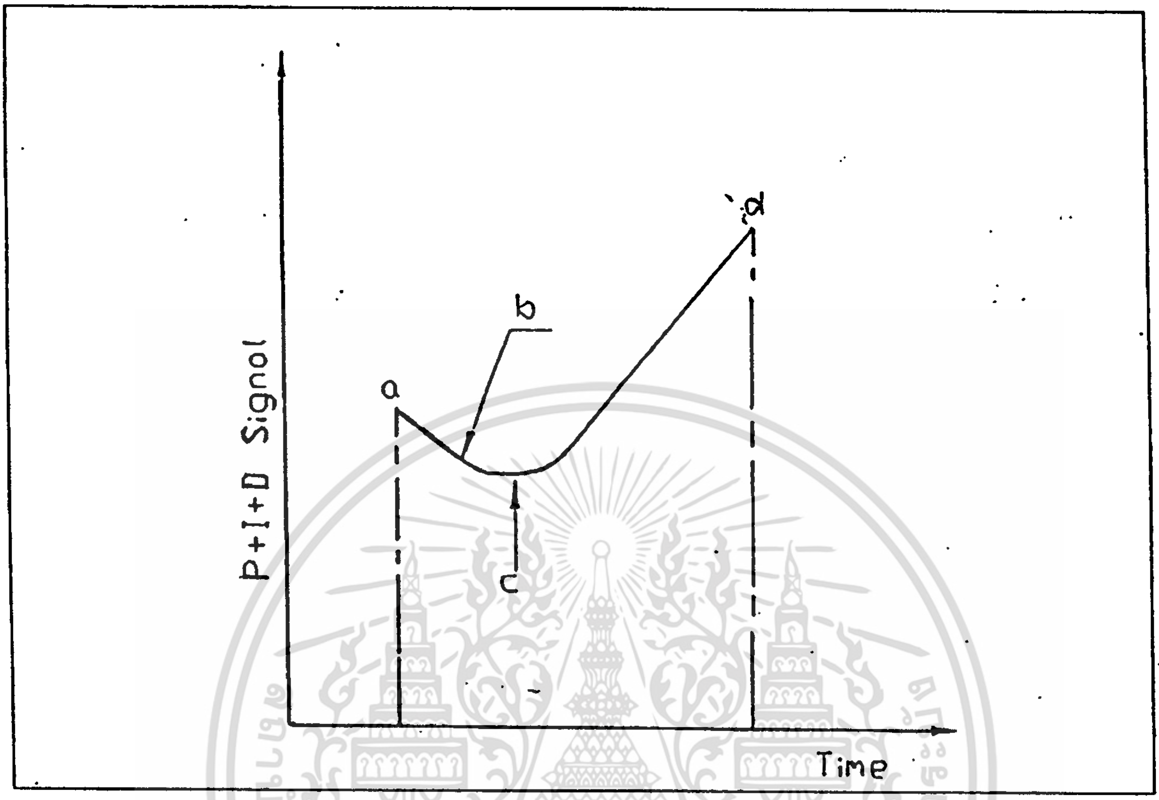


Figure 4. Signal obtained from P+I+D controller.

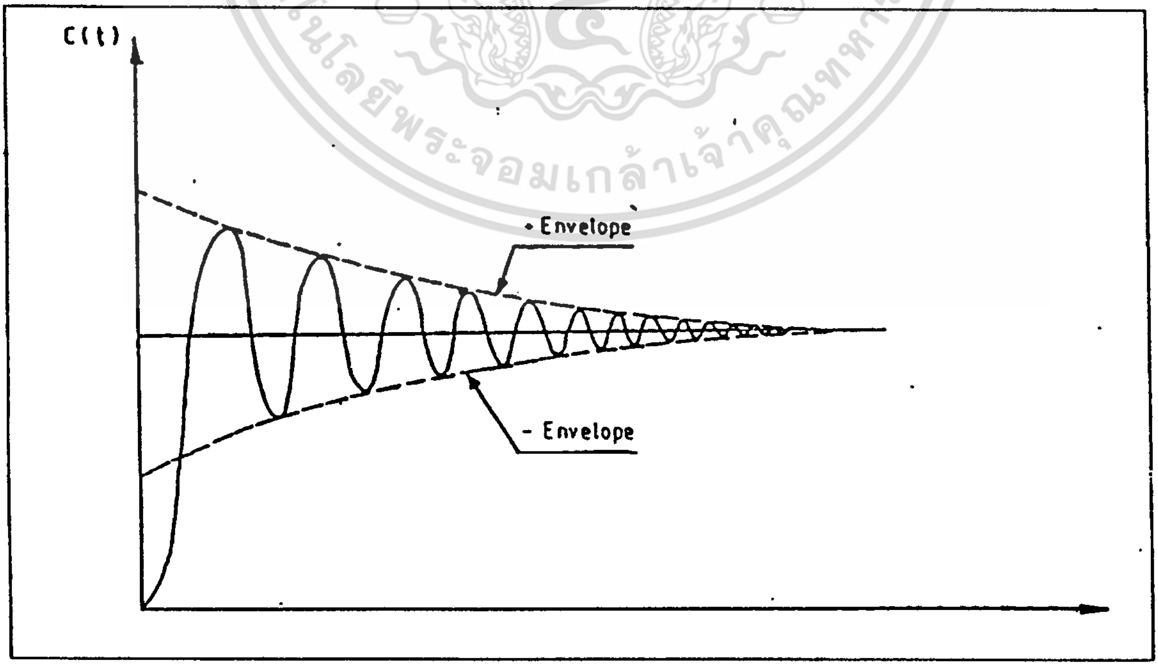


Figure 5. Time-domain response.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

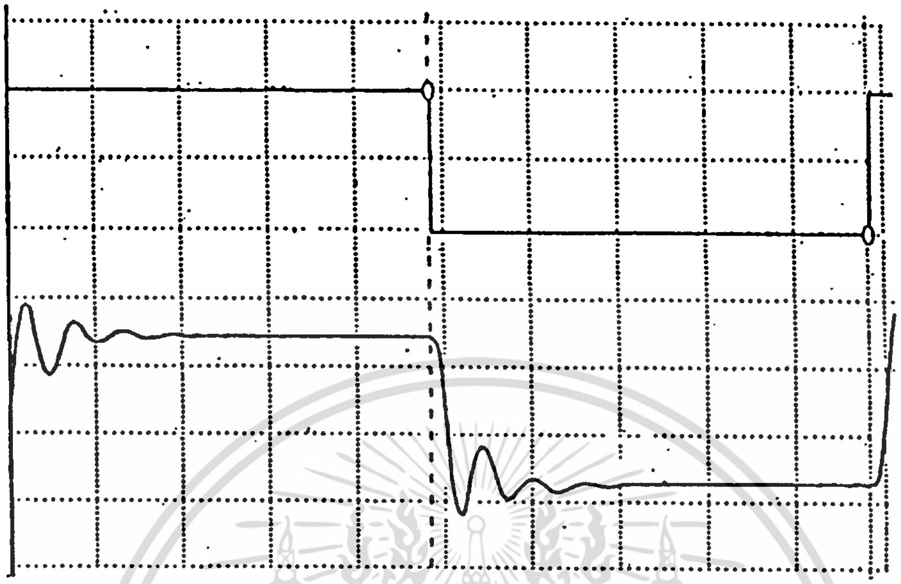


Figure 6 (a). Step response before adjusting input level.

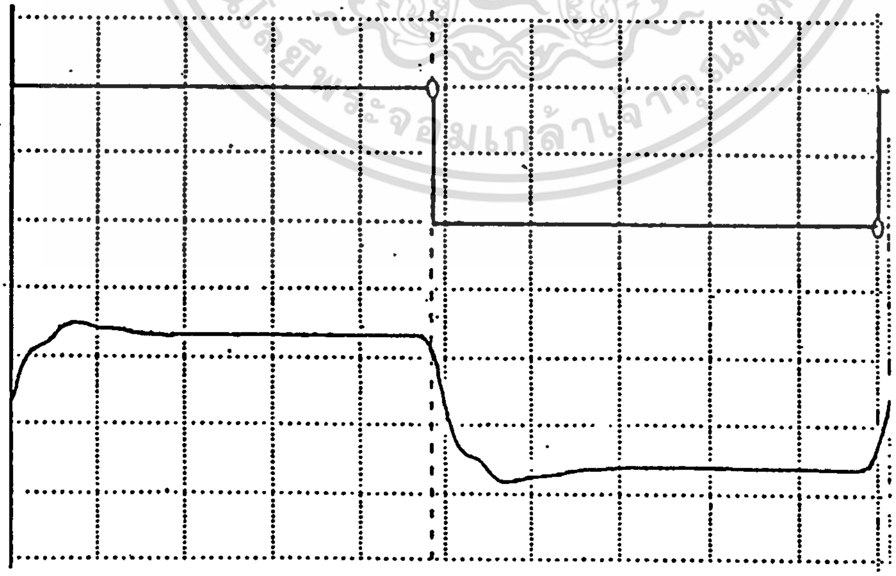


Figure 6 (b). Step response after fractionalizing input signal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Suranaree J. Sci. Technol.
Vol. 2, No. 1; January - April 1995

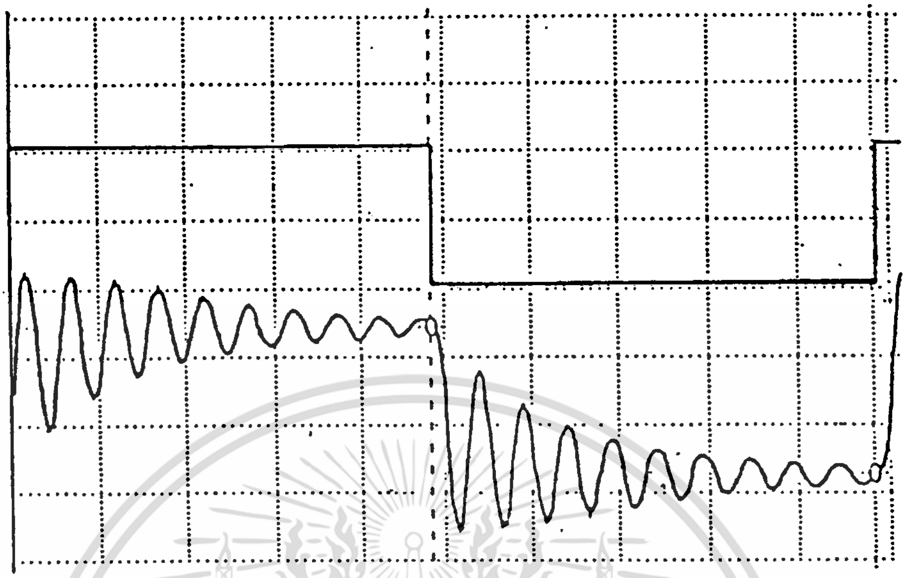


Figure 7 (a). Step response before adjusting input level.

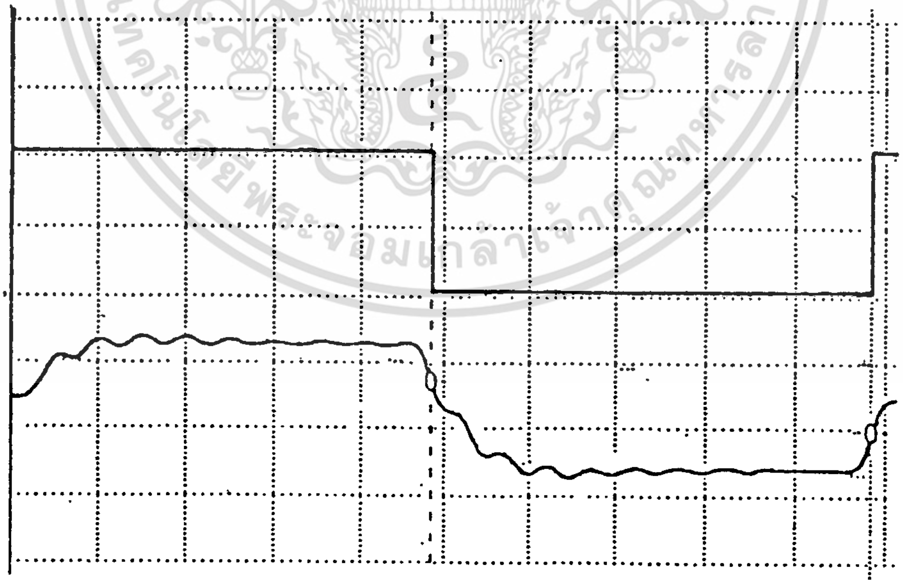


Figure 7 (b). Step response after fractionalizing input signal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

to implement the technique requires appropriate transducers and proportional circuits to provide the input-weighting function that can be operated manually. For an automatic one, it requires a computer with specific software to provide the system identification and the input-weighting functions instead of using analog circuits. In this study, the method demonstrates its capability of successful improvement in system's response. Limitation of the method exists in that it is ineffective to the oscillating frequency of the response. Another attractive feature is that a would-be implemented controller can be coupled externally to an existing system. The disruption introduced to the existing system is minimum.

Acknowledgment

The authors wish to thank A. Chompoo and S. Sangsri for doing a part of this work, O. Thaidee and K. Sirikanaerat for the illustrations, P. Saetai for typing difficult parts of the paper, the National Electronics and Computer Technology Center for financial support (research contract #048/2537), and V. Mangclavirat at the Center for Scientific and Technological Equipment of Suranaree University of Technology for general support to this project.

References

Astrom, K.J. and Wittenmark, B. (1984) Computer Controlled Systems-Theory and Design. Prentice-Hall.

Bennett, S. (1994). Development of the PID controller. IEEE Control Systems Magazine. Dec.: 58-65.

Chen, C. and Seo, B. (1990). Applications of the linear algebraic method for control system design. IEEE Control Systems Magazine. Jan.: 43-47.

Chen, C. and Liu, C. (1994). On control system design : A comparative study. IEEE Control Systems Magazine. Oct.: 47-51.

Clark, R.N. (1988). Another reason to eschew pole-zero cancellation. IEEE Control System Magazine 8(2): 87-88.

Cohen, G.H. and Coon, G.A. (1953). Theoretical consideration of retarded control. Trans. ASME 75: 827-834.

Dorf R.C. (1992). Modern Control Systems. Addison-Wesley.

Eitelberg, E. (1987). A regulating and tracking PI(D)controller. Int. J. Contro l 45(1):91-95.

Golten, J. and Verwer, A. (1991) Control System Design and Simulation. McGraw-Hill.

Hang, C.C. (1989). The choice of controller zeros. IEEE Control Systems Magazine. Jan.: 72-75.

Hostetter, G.H. and Santina, M.S. (1988). Rational linear algebraic tracking control system design. IEEE Control Systems Magazine. Aug.: 34-42.

Jacob, J.M. (1988). Industrial Control Electronics-Applications and Design. Prentice-Hall.

Kuo, B.C. (1991). Automatic Control System. Prentice-Hall.

MacFarlane, A.G.J. and Karcanias, N. (1976). Poles and zeros of linear multivariable systems : A survey of the algebraic, geometric and complexvariable theory. Int. J. Control 24: 33-74.

Puangdownreong, D; Sujitjorn, S. and Prempraneerat, Y. (1994). Assessment of the Effects of Eitelberg's Method on System Responses. Thailand Engineering Journal 47(4): 68-71.

Truxal, J.G. (1955). Automatic Feedback Control System Synthesis. McGraw-Hill.

Ziegler, J.G. and Nichols, N.B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME 64: 759-768.

Ziegler, J.G. and Nichols, N.B. (1943). Process lags in automatic control circuits. Trans. ASME 65: 433-444.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Suranaree J. Sci. Technol.
Vol. 2, No. 1; January - April 1995

Appendix

Referring to Figure 3 :

at node a : $(V_m-V_a)/R_1 + (V_o-V_a)\,C_1 s + (V_b-V_a)/R_2 = 0$ (a.1)

at node b : $(V_b-V_a)/R_2 + V_b C_2 s = 0$ (a.2)

from (a.2), we can obtain $V_a = V_b(R_2C_2s + 1)$

from the circuit diagram, it is obtained that $V_b = V_oR_n/(R_n + R_f)$

substitute V_a and V_b into (a.1), thus obtain :

$$\frac{V_{in}(s)}{V_o(s)} = \frac{R_n}{R_n + R_f}\left[R_1R_2C_1C_2s^2 + (R_1C_1 + R_1C_2 + R_2C_2)\,s - \left(\frac{R_n + R_f}{R_n}\right)R_1C_1s+1 \quad \text{or}\right]$$

$$\frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K}{R_1R_2C_1C_2s^2 + [(R_2C_2 + R_1C_2) + (1-K)\,R_1C_1]\,s + 1} \qquad \text{(a.3)}$$

where $K = 1 + R_f/R_n = (R_n+R_f)/R_n$
(a.3) can be rewritten as

$$\frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K/R_1R_2C_1C_2}{s^2 + \left[\frac{R_2C_2 + R_1C_2 + (1-K)\,R_1C_1}{R_1R_2C_1C_2}\right]s + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \qquad \text{(a.4)}$$

from the standard 2nd - order transfer function $\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$, one can deduce from (a.4) that

$$\omega_n = \sqrt{1/(R_1R_2C_1C_2)}, \text{ and}$$

$$2\zeta = \sqrt{\frac{R_2C_2}{R_1C_1}} + \sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}} + (1-K)\sqrt{\frac{R_1C_1}{R_2C_2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาระบบควบคุมดีซีเซอร์โวมอเตอร์เพื่อใช้เป็นชุดทดสอบวิธีการของไอเทลเบิร์ก

Development of a DC-Servo Motor Control for Testing of the Eitelberg's Method.

เดชา พวงดาวเรือง (1) โชติน เปรมปราณีรัชต์ (2) สราวุฒิ สุจิตจร (3)

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้กล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดีซีเซอร์โวมอเตอร์, การออกแบบตัวควบคุม PID ด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม และเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และกล่าวถึงแนวทางการพัฒนาระบบควบคุมดีซีเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อใช้เป็นชุดทดสอบวิธีการของไอเทลเบิร์กต่อไป

Abstract

This article presents the mathematical modelling of a DC-servo motor, the design of a PID-coutroller via the modulus optimum method with simulation results. The developed system is for testing of the Eitelberg's method.

1. บทนำ

ในการควบคุมระบบพลวัตใด ๆ ให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการควบคุมทั้งทางการคงค่า (regulating) และแปรตามคำสั่ง (tracking) สิ่งที่เป็นปัญหาสำคัญที่สุดข้อหนึ่งคือ การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ อันอาจสืบเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อม และอายุการใช้งาน ทำให้ผลตอบสนองของระบบมีคุณภาพต่ำลง สิ่งที่น่าสนใจในกรณีเช่นนี้คือ เราจะปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้นได้อย่างไร

ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมาก ตัวควบคุมที่ออกแบบมาตั้งแต่ดั้งเดิม ได้รับการติดตั้งไว้ในกระบวนการในลักษณะที่ให้ใครเข้าไปปรับแก้ได้ยาก เมื่อเกิดกรณีดังกล่าวข้างต้นจึงมักจำเป็นต้องหยุดการทำงานของระบบ เพื่อไม่ให้ผลผลิตเกิดความเสียหาย แต่เสียเวลาในการดัดแปลงแก้ไข หรือตัวควบคุมอาจอยู่บนแผงปรับก็ไม่มีกรรมวิธีใด ๆ ที่จะปรับตัวควบคุมให้ระบบมีสมรรถนะดีขึ้นดังเดิมได้ อาจทำได้แค่เพียงการลองผิดลองถูก (trial and error) ซึ่งเป็นการปฏิบัติของวิศวกรในโรงงานตามปกติ

การแก้ไขปัญหาดังกล่าว และเป็นทางออกที่ดีทางหนึ่งในวงการอุตสาหกรรม ได้รับการนำเสนอโดยไอเทลเบิร์กใน [1] โดยเสนอให้มีการปรับคุมระบบจากทางภายนอก ซึ่งหมายความว่าจะต้องมีตัวชดเชยอินพุท (input compensator) คอยปรับและควบคุมเมื่อสมรรถนะของระบบเปลี่ยนไปโดยขณะปรับคุมนั้นไม่ต้องหยุดการทำงานของระบบ และถ้าในกรณีปกติก็ให้ทำงานเฉพาะในวงรอบการควบคุม (control loop) เท่านั้น เพราะได้ออกแบบมาอย่างเหมาะสมแล้ว

บทความนี้ให้ความสนใจการนำวิธีการของไอเทลเบิร์กมาใช้ประโยชน์ในการควบคุมระบบพลวัต ซึ่งระบบในทางปฏิบัติที่ได้นำเสนอในบทความนี้ เป็นระบบควบคุมความเร็วของดีซีเซอร์โวมอเตอร์ (เพื่อใช้เป็นชุดทดสอบแทนการควบคุมทางอุตสาหกรรม) บทความได้นำเสนอเรื่องราวเกี่ยวกับแนวคิดและวิธีการของไอเทลเบิร์กโดยย่อ กล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ การออกแบบตัวควบคุมสำหรับมอเตอร์โดยใช้เทคนิคของพารามิเตอร์คายตัว ซึ่งสามารถประกันได้ว่าระบบควบคุมจะมีสมรรถนะที่น่าพึงพอใจอยู่เสมอ เพื่อที่จะนำไปสร้างเป็นชุดทดสอบ เพื่อค้นหาวิธีการปรับสมรรถนะของระบบอย่างอัตโนมัติ เมื่อมีการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ไป ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ใช่วิธีการดั้งเดิม (non-classical method)

---

(1) นักศึกษาปริญญาโท (2) รองศาสตราจารย์ , ดร.

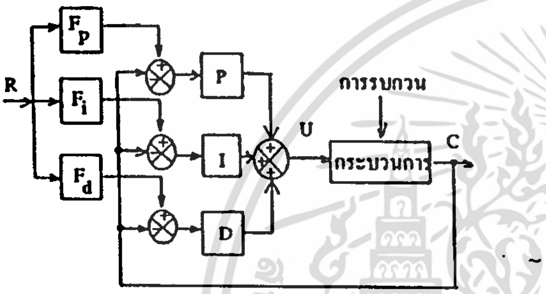
(1) และ (2) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

(3) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ , ดร. สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

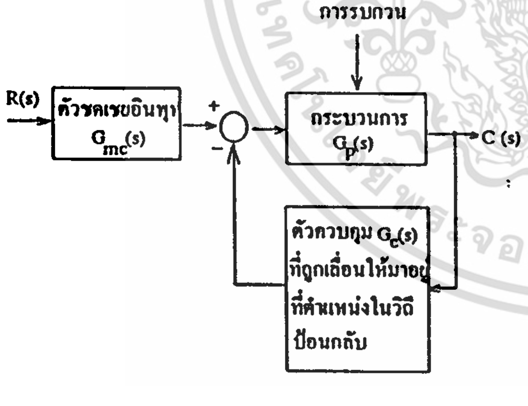
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แนวคิดและวิธีการของไอเทลเบิร์ก

ไอเทลเบิร์กได้นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาพารามิเตอร์ของระบบควบคุมเกิดการเปลี่ยนแปลง ในปี 1987 เพื่อประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยเสนอให้มีการปรับสัดส่วนของสัญญาณอินพุทจากทางภายนอกวงรอบการควบคุมแล้วส่งผ่านไปยังตัวควบคุมเดิม โดยขณะปรับนั้นไม่ต้องหยุดการทำงานของระบบ รูปที่ 1 แสดงระบบควบคุมที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอ เมื่อเราทำการวิเคราะห์แผนภาพในรูปที่ 1 ด้วยวิธีพีชคณิตของบล็อกไดอะแกรม เราจะพบว่าระบบตามรูปที่ 1 สมมูลย์กับระบบที่มีแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 2 [6], [7]



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ไอเทลเบิร์กนำเสนอ



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่สมมูลย์กับรูปที่ 1

สมการ (2.1) แสดงทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบที่สมมูลย์กับระบบที่ไอเทลเบิร์กเสนอ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_{mc}(s).G_p(s)}{1+G_c(s).G_p(s)} \quad \text{.................(2.1)}$$

เมื่อ $G_p(s)$ คือฟังก์ชั่นของกระบวนการภายใต้การควบคุม

$G_c(s)$ คือฟังก์ชั่นของตัวควบคุม PID ซึ่ง

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad \text{..................(2.2)}$$

$G_{mc}(s)$ คือตัวชดเชยอินพุทซึ่งมีรูปแบบเป็น PID

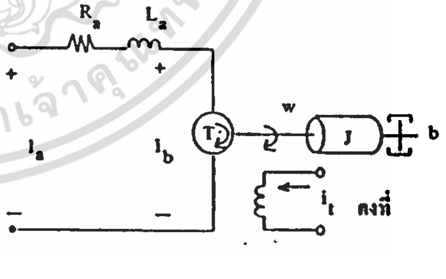
$$G_{mc}(s) = F_p K_p + \frac{F_i K_i}{s} + F_d K_d s \quad \text{.....(2.3)}$$

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าเราทำการย้ายตำแหน่งของตัวควบคุม PID ซึ่งในระบบควบคุมแบบดั้งเดิมจะอยู่ในวิถีป้อนไปข้างหน้าลงมาอยู่ในวิถีป้อนกลับ และใส่ตัวชดเชยอินพุทเข้าที่อินพุทของวงรอบการควบคุม ตัวชดเชยอินพุทจะมีโครงสร้างเป็นตัวควบคุม PID เช่นกัน แต่มีการดัดแปลงแก้ไข การปรับแต่งสมรรถนะตามข้อเสนอของไอเทลเบิร์กก็คือการปรับ Fs ของ $G_{mc}(s)$ นั่นเอง ซึ่งเราจำเป็นต้องสร้างชุดทดสอบขึ้น โดยใช้เป็นระบบควบคุมดีซีเซอร์โวมอเตอร์จำลองการควบคุมทางอุตสาหกรรม เชื่อมโยงกับแนวคิดและวิธีการของไอเทลเบิร์กข้างต้น

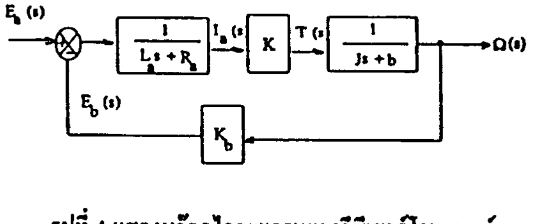
ในส่วนต่อไปของบทความ จะกล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์, การออกแบบตัวควบคุม และผลการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะนำเอาตัวกระบวนการ และตัวควบคุมที่ได้ไปพัฒนาเป็นชุดทดสอบวิธีการของไอเทลเบิร์กต่อไป

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดีซีเซอร์โวมอเตอร์

แบบจำลองของมอเตอร์กระแสตรงมีสมการดิฟเฟอร์เรนเชียลที่สำคัญอยู่สองสมการ คือสมการทางไฟฟ้า และสมการเชิงกลดังที่ได้อภิปรายไว้ใน [5], [8] รูปที่ 3 แสดงแผนภาพแทนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และรูปที่ 4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์



รูปที่ 3 แผนภาพวงจรแทนดีซีเซอร์โวมอเตอร์



รูปที่ 4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีเซอร์โวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3 และ 4 เราสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของดีซีมอเตอร์ แสดงได้ดังสมการที่ (3.1)

$$\frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{(L_aJ)s^2+(R_aJ+L_ab)s+(R_ab+KK_b)} \quad ..(3.1)$$

เมื่อ $E_a(s)$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่เป็นอินพุท

$\Omega(s)$ คือ อัตราเร็วของมอเตอร์ที่เป็นเอ้าท์พุท

สำหรับดีซีมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นของบริษัทซันโยเดนกิ (Sanyo Denki) รุ่น U.178T [4] ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

$K = 2.24$ Kg-cm/A = 2.24×10^{-2} Kg-m/A

$K_b = 23$ V/Krpm = 0.22 V/rad/s, (1 rpm = 0.1047 rad/s)

$J = 2.1$ g-cm-s^2 = 2.1×10^{-5} Kg-m-s^2

$R_a = 3.1\ \Omega$

$L_a = 4.7 \times 10^{-3}$ H

$\tau_e = 1.52 \times 10^{-3}$ s, (electrical time constant = L_a/R_a)

$\tau_m = 12 \times 10^{-3}$ s, (mechanical time constant = J/b)

$b = 1.75 \times 10^{-3}$ Kg-m-s

แทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการ (3.1) เราจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ในการควบคุมความเร็วเป็น

$$\frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{2.24}{9.86\times10^{-6}s^2+7.327\times10^{-3}s+1} \quad ....(3.2)$$

จากสมการ (3.2) บอกให้ทราบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์ตัวนี้มี

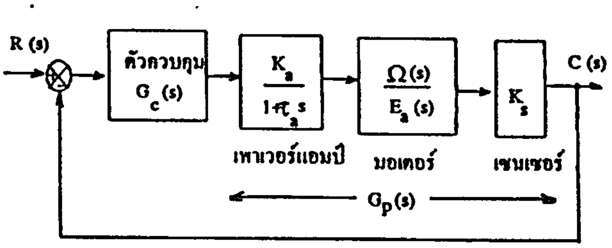
ω_n (undamped natural frequency) = 318.30 rad/s

ζ (damping ratio) = 1.17 (overdamped response)

4. การออกแบบตัวควบคุม

ตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตัวควบคุม PID เนื่องจากงานวิจัยสามารถพัฒนาไปถึงขั้นการศึกษาผลกระทบจากซีโรของตัวควบคุมที่มีต่อผลตอบสนองของระบบ และอาจนำไปสู่ความรู้เรื่องการจัดวางตำแหน่งของซีโร (zero placement) ได้ครอบคลุมทุกกรณีของจำนวนเชิงซ้อน

เทคนิคการออกแบบตัวควบคุม PID ใช้วิธีการที่เรียกว่าโมดูลัส-ออปติมัม (modulus optimum) [2] เพราะสะดวกต่อการออกแบบโดยอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ หาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่สัมพันธ์กับความต้องการด้านสมรรถนะทางเวลา รูปที่ 5 แสดงระบบควบคุมที่มีตัวควบคุมเป็น PID



รูปที่ 5 บล็อคไดอะแกรมแสดงระบบควบคุมความเร็วดีซีเซอร์โวมอเตอร์ด้วยตัวควบคุม PID

$$G_c(s) = A_c\frac{(1+\tau_i s)(1+\tau_d s)}{\tau_i s} \quad ...(4.1)$$

หรือจากสมการที่ (2.2)

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

เมื่อ $K_p = A_c\frac{(\tau_d+\tau_i)}{\tau_i}$, $K_i = \frac{A_c}{\tau_i}$ และ

$$K_d = A_c\tau_d \quad ...(4.2)$$

เมื่อ

A_c คือ อัตราขยายของตัวควบคุม

τ_i คือ ค่าคงที่ทางเวลาของการอินทิเกรทสัญญาณ

τ_d คือ ค่าคงที่ทางเวลาของการดิฟเฟอเรนชิเอทสัญญาณ

τ_a คือ ค่าคงที่ทางเวลาของเพาเวอร์แอมป์ = 1.777×10^{-4} s

K_p คือ อัตราขยายแบบสัดส่วน

K_i คือ อัตราขยายของการอินทิเกรท

K_d คือ อัตราขยายของการดิฟเฟอเรนชิเอท

K_a คือ อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า = 1

K_s คือ อัตราขยายของทาโคมิเตอร์ = 0.1 V/rad/sec

กระบวนการภายใต้การควบคุมมีฟังก์ชั่นเป็น $G_p(s)$ ซึ่งรายละเอียดการแบบตัวควบคุม PID ด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม ผู้อ่านสามารถศึกษาได้ใน [2] หรืออาจดูคำอธิบายโดยย่อได้ในภาคผนวก ตัวควบคุม PID จากการออกแบบ คือ

$$G_p(s) = \frac{10\times2.24\times0.1}{(1+1.777\times10^{-4}s)(1+1.777\times10^{-3}s)(1+5.55\times10^{-3}s)} \quad ...(4.3)$$

$$G_c(s) = \frac{6.972\ (1+5.55\times10^{-3}s)(1+1.777\times10^{-3}s)}{5.55\times10^{-3}s} \quad ...(4.4)$$

จากสมการ (4.1) และ (4.4) เราทราบว่า

A_c = 6.972

τ_i = 5.55 ms

τ_d = 1.777 ms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

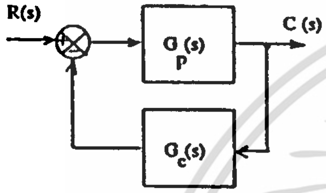
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่า A_c , τ_i และ τ_d ในสมการ (4.4) สามารถเขียนตัวควบคุม PID ในรูปแบบของสมการ (2.2) ได้เป็น

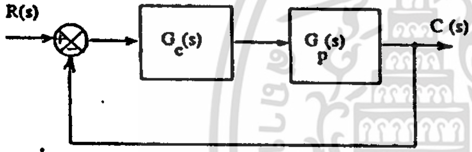
$$G_c(s) = 9.204 + \frac{1256.216}{s} + 0.0124s$$
$$= \frac{0.0124s^2 + 9.204s + 1256.216}{s} \quad ....(4.5)$$

เมื่อ $K_p = 9.204$, $K_i = 1256.216$ และ $K_d = 0.0124$

บล็อกไดอะแกรมในลักษณะการควบคุมแบบคงตัว (regulating control) และการควบคุม แบบแปรตามคำสั่ง (tracking control) แสดงในรูปที่ 6 (a) และ 6 (b) ตามลำดับ



รูปที่ 6 (a) บล็อกไดอะแกรมแทนระบบควบคุมแบบคงตัว



รูปที่ 6 (b) บล็อกไดอะแกรมแทนระบบควบคุมแบบแปรตามคำสั่ง

จากสมการตัวควบคุม $G_c(s)$ ใน (4.5) และสมการของกระบวนการ $G_p(s)$ ใน (4.3) เราสามารถแทนลงในบล็อกไดอะแกรมเพื่อหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นในการควบคุมแบบคงตัวและแปรตามคำสั่ง ซึ่งจะได้ดังสมการที่ (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{224s}{1753\times10^{-9}s^4 + 1117\times10^{-5}s^3 + 0.035s^2 + 21617s + 2813924} \quad ...(4.6) \quad \text{(คงตัว)}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.0278s^2 + 20.617s + 2813.924}{1753\times10^{-9}s^4 + 1117\times10^{-5}s^3 + 0.035s^2 + 21617s + 2813.924} \quad ...(4.7) \quad \text{(แปรตามคำสั่ง)}$$

ผลการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงไว้ในหัวข้อที่ 5

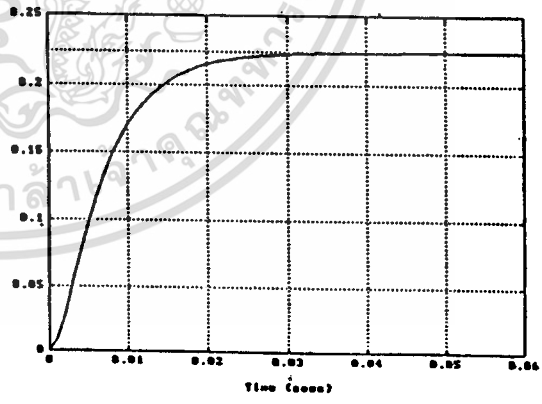
5. ทดสอบการออกแบบด้วยการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรม MATLAB (Mathwork Inc.) แสดงเป็นข้อดังต่อไปนี้

5.1 ทดสอบผลตอบสนองของมอเตอร์กับการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

มอเตอร์ได้รับการเลียนแบบระบบเปรียบเทียบกับการทดสอบจริง ปรากฏผลออกมาดังรูปที่ 7(a) และ 7(b) ตามลำดับ (มอเตอร์ในขณะที่ไม่รวมเพาเวอร์แอมป์)

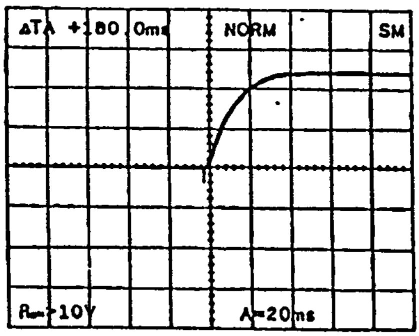
เปรียบเทียบผลตอบสนองทั้งสองพบว่า สิ่งที่ตรงกันคือ C_{ss} (steady-state response) และ t_r (rise time) แต่สิ่งที่ต่างกันคือ t_d (delay time) ผลการทดสอบจริงจะให้ t_d มากกว่า ซึ่งอาจสืบเนื่องมาจากค่าเวลาหน่วงในตัวเซ็นเซอร์(ทาโคเยนเนอร์เรเตอร์) ซึ่งมิได้นำมาคิดเมื่อสังเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์หรืออาจเกิดมีอยู่แล้วตามธรรมชาติ [3] การแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือถ้า t_d ต่างกันมากจนรับไม่ได้ ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่นของระบบอาจจะต้องคูณด้วยเทอมเอ็กซโปเนนเชียลหรือเทอมของซีโร่ที่อยู่ทางด้านขวามือของระนาบเชิงซ้อน (s-plane) แล้วแต่วิธีใดจะเหมาะสม แต่ผลตอบสนองข้างเคียงที่เกิดขึ้นและต้องยอมรับคือ ถ้าคูณด้วยเทอมเอ็กซโปเนนเชียลระบบจะมีลักษณะเป็น non-minimum phase และถ้าคูณด้วยเทอมซีโร่ที่อยู่ด้านขวามือของระนาบเชิงซ้อน จะเกิดอันเดอร์ชู้ท (undershoot) เล็ก ๆ ขึ้นกับผลตอบสนอง [3] แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ผลต่างของ t_d ที่เกิดขึ้นถือว่ายอมรับได้เพราะน้อยมาก



รูปที่ 7 (a) ผลการเลียนแบบระบบของดีซีเซอร์โวมอเตอร์ด้วย MATLAB

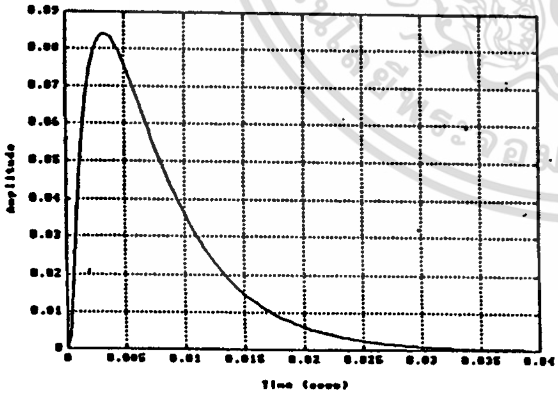
5.2 ทดสอบการออกแบบตัวควบคุมด้วยการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

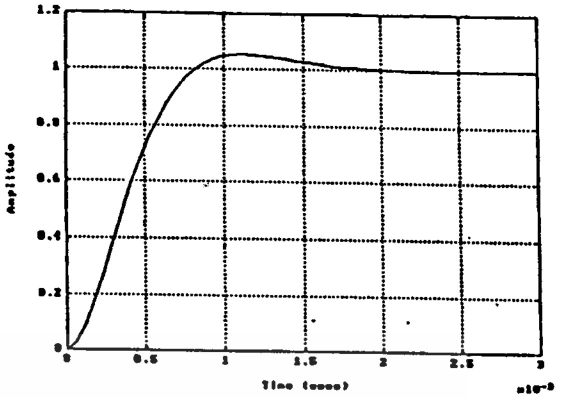


รูปที่ 7 (b) ผลการทดสอบมอเตอร์ด้วยอินพุทแบบสเตปขนาด 10 Vdc

เมื่อทำการออกแบบตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสมด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม ตามหัวข้อที่ 4 แล้ว (รายละเอียดเพิ่มเติมอาจดูได้จากภาคผนวก) ทำการเลียนแบบระบบทั้งในกรณีการควบคุมแบบคงตัวและแปรตามคำสั่ง ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ จะเห็นว่าในการควบคุมแบบคงตัว ผลตอบสนองจะให้ชู้ท (shoot) ประมาณ 8.5% แล้วเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 35 ms และในการควบคุมแบบแปรตามคำสั่ง ผลตอบสนองของระบบให้โอเวอร์ชู้ท (overshoot) ประมาณ 4% ค่า t_r ลดลงจากเดิมที่ประมาณ 40 ms เหลือประมาณ 0.8 ms ซึ่งผลตอบสนองที่ออกมาเป็นที่น่าพอใจยิ่ง



รูปที่ 8 ผลตอบสนองของระบบต่อการควบคุมแบบคงตัว



รูปที่ 9 ผลตอบสนองของระบบต่อการควบคุมแบบแปรตามคำสั่ง

6. บทสรุป

จากผลการทดสอบและผลการเลียนแบบระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในหัวข้อที่ 5 ทำให้เราทราบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดีซีเซอร์โวมอเตอร์ที่เราหาได้นั้นค่อนข้างแม่นตรงกับระบบจริง ทำให้เราทราบว่าตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยเทคนิควิธีโมดูลัสออปติมัม มีคุณภาพดีพอที่จะสามารถปรับคุมให้ระบบบรรลุวัตถุประสงค์ของการควบคุมทั้งคงค่าและแปรตามคำสั่งได้ ในขั้นต่อไปเราจะนำเอาตัวกระบวนการที่มีอยู่ และตัวควบคุมที่ออกแบบมาอย่างเหมาะสมไปทำการอนุวัติเป็นระบบควบคุมที่สมบูรณ์กับระบบที่ไอเทลเบิร์กเสนอ เพื่อใช้เป็นชุดทดสอบวิธีการของเขาโดยที่ตัวควบคุมทั้งหมดจะมีลักษณะเป็นตัวควบคุมชนิดระบบผู้เชี่ยวชาญเวลาจริง [9] และจะอยู่ในรูปของคอมพิวเตอร์ซอร์ฟแวร์ ซึ่งจะเป็นการพัฒนางานวิจัยในระยะต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณอัญชุลี รักด่านกลาง และคุณปราณี กระจ่างโพธิ์ แห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการพิมพ์ต้นฉบับบทความนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] E. Eitelberg, "A regulating and tracking PI(D) controller," Int. J. Control, vol. 45, no. 1, pp. 91-95, 1987.

[2] F. Frohr and F. Orttenburger, Introduction to Electronic Control Engineering ,Siemens, 1970.

[3] B.C. Kuo, Automatic Control Systems, Prentic-Hall, 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[4] Manual of DC Servo Motor (U.178T), Sanyo Denki Co., Ltd.

[5] K.Ogata, Modern Control Engineering, Prentice-Hall, 1990.

[6] D. Puangdownreong, S. Sujitjorn, and Y. Prempraneerat, "Assessment of the effects of Eitelberg's method on system responses," Thailand Engineering Journal, vol. 47, no. 4, pp. 68-71, 1994.

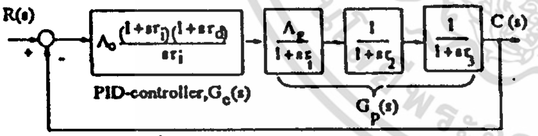
[7] S. Sujitjorn, P. Punaprasart, Y. Prempraneerat, and D. Puangdownreong," Input weighting for SISO system with feedback PID controller," Suranaree J. Sci. Technol., vol.2, no. 1, pp. 33-43, 1995.

[8] โยธิน เปรมปราณีรัชต์, ระบบเซอร์โวและอิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลมอเตอร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2533.

[9] สราวุฒิ สุจิตจร, "แนวความคิดในการแผนแบบและตัวควบคุมชนิดระบบผู้เชี่ยวชาญเวลาจริง," เอกสารประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 31 ต.ค. - 3 พ.ย. , น. 693-703, 2534.

ภาคผนวก : การออกแบบตัวควบคุม PID สำหรับดีซีมอเตอร์

เทคนิควิธีที่ใช้ทำการแผนแบบตัวควบคุม PID สำหรับดีซีมอเตอร์ในบทความนี้คือวิธี โมดูลัสออปติมัม (modulus optimum) [2] ซึ่งมีวิธีการออกแบบโดยย่อ ดังต่อไปนี้



รูปที่ ก แสดงบล็อคไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์

จากฟังก์ชั่นของมอเตอร์ในสมการที่ (4.3) เราได้

$$G_p(s) = \frac{2.24}{(1+1.777\times10^{-4}s)(9.86\times10^{-6}s^2+7.327\times10^{-3}s+1)}$$

$$= \frac{2.24}{(1+1.777\times10^{-4}s)(1+1.777\times10^{-3}s)(1+5.55\times10^{-3}s)}$$

เปรียบเทียบ $G_p(s)$ กับรูป ก จะได้

$A_g = 2.24$

$\tau_1 = 1.777\times10^{-4}$ วินาที

$\tau_2 = 1.777\times10^{-3}$ วินาที

$\tau_3 = 5.55\times10^{-3}$ วินาที

จากฟังก์ชันตัวควบคุม PID τ_i จะต้องมากกว่า τ_d ดังนั้นทำการปรับให้ τ_i มีค่าเท่ากับค่าคงที่ทางเวลาตัวที่มีค่ามากที่สุดใน $G_p(s)$ จะได้

$$\tau_i = \tau_3 = 5.55\times10^{-3} \text{ วินาที}$$

ปรับให้ τ_d มีค่าเท่ากับค่าคงที่ทางเวลาตัวที่มีค่ามากรองลงมาจาก τ_i จะได้

$$\tau_d = \tau_2 = 1.777\times10^{-3} \text{ วินาที}$$

และค่า $\tau_1 = \tau_e$ (τ_e: equivalent time constant) จะได้เป็น

$$\tau_e = 1.777\times10^{-4} \text{ วินาที}$$

ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม PID คือ A_c มีค่าเท่ากับ

$$A_c = \frac{\tau_i}{2A_g\tau_e} = \frac{5.55\times10^{-3}}{2\times2.24\times1.777\times10^{-4}} = 6.972$$

ฟังก์ชันของตัวควบคุม PID จะได้เป็นดังนี้

$$G_c(s) = A_c\frac{(1+s\tau_i)(1+s\tau_d)}{s\tau_i}$$

$$= 6.972\frac{(1+5.55\times10^{-3}s)(1+1.777\times10^{-3}s)}{5.55\times10^{-3}s}$$

หรือ $G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$ โดยที่

$$K_p = A_c\frac{(\tau_d+\tau_i)}{\tau_i}$$

$$K_i = \frac{A_c}{\tau_i}$$

$$K_d = A_c\tau_d$$

ดังนั้น

$$G_c(s) = \frac{0.0124s^2+9.204s+1256.216}{s}$$

....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

บทความ "ฟัซซี่ลอจิกกับระบบควบคุม"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟัซซี่ลอจิกกับระบบควบคุม

สราวุฒิ สุจิตจร[1]

Abstract

Sujitjorn, S. 1995. **Fuzzy Logic and Control System.** *Suranaree J. Sci. Technol. 2 : 171-196*

This tutorial article explains the basic concepts of fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy algorithms. It explains the important issues of fuzzy inference useful for fuzzy systems and control implementation. It also presents the simple structure of fuzzy control system with some industrial applications exemplified.

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นบทความเชิงบรรยายให้การแนะนำเกี่ยวกับฟัซซี่เซ็ท ฟัซซี่ลอจิก และการประยุกต์กับระบบควบคุม เนื้อหาที่นำเสนอ เริ่มตั้งแต่การแนะนำให้รู้จักกับฟัซซี่เซ็ท ฟัซซี่ลอจิก ฟัซซี่อัลกอริธึม และระบบฟัซซี่ จากนั้นจึงได้กล่าวถึงการอนุมานแบบฟัซซี่ และโครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ รวมทั้งได้มีตัวอย่างของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ที่ได้มีการใช้งานแล้วทางอุตสาหกรรม นำเสนอในบทความนี้ด้วย

1. คำนำ

ฟัซซี่เซ็ทถือกำเนิดขึ้นจาก Lotfi Zadeh เมื่อ ค.ศ. 1965 ซึ่งเมื่อก่อนหน้านี้นักวิทยาศาสตร์ วิศวกร และนักเทคโนโลยีล้วนรู้จักแต่เซ็ทปกติธรรมดา ที่พิจารณาสิ่งของหรือวัตถุใดๆ ว่าเพียงเป็นสมาชิก หรือไม่เป็นสมาชิกของเซ็ท ๆ หนึ่งเท่านั้น ค่าที่ใช้แสดงลักษณะสมบัติของสิ่งของดังกล่าวก็มีเพียง "1" หรือ "0" ซึ่ง "1" หมายถึงการเป็นสมาชิกในเซ็ท และ "0" หมายถึงการไม่เป็นสมาชิกในเซ็ท

ฟัซซี่เซ็ทมีความแปลกแตกต่างไปจากเซ็ทปกติธรรมดา ในเรื่องของค่าที่ให้แสดงลักษณะสมบัติ และลักษณะของการปฏิบัติทางลอจิก ซึ่งจะได้กล่าวถึงในตอนที่ 2 นับตั้งแต่ฟัซซี่เซ็ทและฟัซซี่ลอจิกถือกำเนิดขึ้นจนกระทั่งบัดนี้ ก็ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางทั้งในด้านการรู้จำต่างๆ (pattern recognition) การดำเนินกระบวนการของสัญญาณและภาพ (signal and image processing) การควบคุมระบบพลวัติ (control systems) การประมาณค่าฟังก์ชั่น (function approximation) เป็นต้น ประเทศที่ถือว่าประสบความสำเร็จสูงสุดในการประยุกต์ความรู้ในด้านฟัซซี่เซ็ทและฟัซซี่ลอจิกคือประเทศญี่ปุ่น ซึ่งในช่วงเวลา 10 ปีที่ผ่านมานี้ญี่ปุ่นได้มีพัฒนาการทางระบบฟัซซี่ต่างๆ มากมาย เช่น ระบบควบคุมมิให้ล้อของรถไฟฟ้าและรถยนต์เกิดการลื่นไถลโดยใช้ฟัซซี่เทคโนโลยี ระบบนำรถยนต์เข้าจอดในลานจอดรถได้อย่างอัตโนมัติ โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่และระบบควบคุมเครื่องปรับอากาศชนิด "I fell control" เป็นต้น ตัวอย่างที่กล่าวแนะนำข้างต้น คงจะพอเป็นเครื่องยืนยันถึงความสำเร็จที่ฟัซซี่ลอจิกได้รับการนำไปใช้งานอย่างหลายหลาย

เนื้อความตอนที่ 2 ของบทความนี้ เป็นการแนะนำให้ผู้อ่านได้รู้จักกับฟัซซี่เซ็ท และการปฏิบัติทางลอจิกอันเป็นพื้นฐานต่างๆ ; ตอนที่ 3 กล่าวถึงตัวแปรแบบฟัซซี่ (fuzzy variables) ตัวแปรทางภาษา (linguistec variables)

---

[1] *Ph.D., member IEEE, หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟัซซี่อัลกอริธึม (fuzzy algorithms); ตอนที่ 4 กล่าวถึงระบบฟัซซี่ (fuzzy systems) และการอนุมานแบบฟัซซี่ (fuzzy inference) ซึ่งอธิบายถึงลักษณะทางองค์ประกอบของระบบฟัซซี่และให้การเปรียบเทียบกับระบบผู้เชี่ยวชาญ (expert system) และยังกล่าวถึงกลไกการอนุมานที่เป็นพื้นฐานต่างๆ ที่ใช้กันกับระบบฟัซซี่; ตอนที่ 5 กล่าวถึงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ (fuzzy control systems) เทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในระบบควบคุมแบบฟัซซี่ ซึ่งมีสองลักษณะด้วยกันอย่างกว้างๆ นอกจากนั้นยังให้ข้อแนะนำในขั้นตอนการออกแบบและอนุวัตระบบควบคุมแบบฟัซซี่ พร้อมทั้งกล่าวถึงตัวอย่างระบบควบคุมแบบฟัซซี่ที่ได้เคยมีผู้พัฒนาขึ้น และกล่าวถึงการบ่งบอกสมรรถนะของระบบควบคุมเชิงฟัซซี่พอเป็นสังเขป

2. ฟัซซี่เซ็ทและฟัซซี่ลอจิก

(1) นิยามพื้นฐานเกี่ยวกับฟัซซี่เซ็ท

ฟัซซี่เซ็ทเป็นกลุ่มของสิ่งของหรือวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงความเป็นสมาชิกภาพในเซ็ทอย่างค่อยเป็นค่อยไป หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าที่แสดงความเป็นสมาชิกภาพมีลักษณะต่อเนื่อง เมื่อ "0" หมายถึงการไม่เป็นสมาชิกในเซ็ท และ "1" หมายถึงการเป็นสมาชิกในเซ็ทอย่างสมบูรณ์ ความแตกต่างในเรื่องของความเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกในเซ็ทระหว่างเซ็ทปกติธรรมดาและฟัซซี่เซ็ทอาจดูได้จากรูปที่ 1 ซึ่งใช้ μ เป็นสัญลักษณ์แทนค่าที่แสดงความเป็นสมาชิกในเซ็ทของกลุ่มตัวเลขจาก 0 ถึง 6 รูปที่ 1(ก) แสดงให้เห็นว่าเลขจำนวนจริงจาก 2 ถึง 5 เป็นสมาชิกของเซ็ทอย่างสมบูรณ์ ส่วนที่เหลือนอกย่านดังกล่าวไม่เป็นสมาชิกอย่างสิ้นเชิง รูปที่ 1(ข) แสดงความเป็นสมาชิกอย่างค่อยเป็นค่อยไปของเลขจำนวนจริงจาก 2 ถึง 5 ในเซ็ทแบบฟัซซี่เซ็ท ส่วนที่เหลือนอกย่านดังกล่าวไม่เป็นสมาชิกของฟัซซี่เซ็ทนั้น ลักษณะของกราฟในรูปที่ 1(ข) เป็นเพียงตัวอย่างที่หยิบยกขึ้นมาประกอบการอธิบายเท่านั้น กราฟแสดงความเป็นสมาชิกในฟัซซี่เซ็ทอาจมีรูปร่างเช่นใดก็ได้ เช่น รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยมคางหมู รูประฆังคว่ำ เป็นต้น กราฟแสดงสมาชิกภาพดังกล่าวอาจได้รับการเขียนขึ้นจากความรู้และประสบการณ์ของมนุษย์โดยตรง (heuristic) การกำหนดความเป็นสมาชิกภาพในลักษณะเช่นนี้ เรียกว่าเป็นแบบอัตตวิสัย (subjective) อีกลักษณะหนึ่งอาจกำหนดรูปแบบของความเป็นสมาชิกภาพ โดยอาศัยผลการวิเคราะห์เชิงคำนวณที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มวัตถุหรือสิ่งของที่ต้องการให้มีการแบ่งแยกความเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกในฟัซซี่เซ็ท วิธีการเช่นนี้เรียกว่าเป็นแบบวัตถุวิสัย (objective)

เมื่อได้ทราบเกี่ยวกับฟัซซี่เซ็ทมาบ้างแล้ว ในขั้นต่อไปก็ขอให้ทราบถึงคำนิยามของฟัซซี่เซ็ทอย่างเป็นทางการในทางคณิตศาสตร์ และการปฏิบัติทางลอจิกพื้นฐานต่างๆ ดังต่อไปนี้

(ก) เซ็ทแบบปกติธรรมดา (ordinary set) หรือเซ็ทแบบกรอบ (crisp set)

(ข) ฟัซซี่เซ็ท (fuzzy set)

รูปที่ 1. กราฟแสดงสมาชิกภาพของกลุ่มตัวเลข 0 ถึง 6 ในเซ็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"เมื่อให้ X เป็นอวกาศที่มีวัตถุต่างๆ ปรากฏอยู่ ซึ่งอิลิเมนต์ใน X เป็น x นั่นคือ X = {x} ฟัซซี่เซ็ท A ใน X มีลักษณะสมบัติแสดงสมาชิกภาพ กำหนดด้วยฟังก์ชั่นสมาชิกภาพ (membership function) หรืออาจเรียกว่าฟังก์ชั่นลักษณะสมบัติ (characteristic function) $\mu_A(x)$ ที่สัมพันธ์กับวัตถุแต่ชิ้นใน X ในลักษณะที่ $\mu_A(x)$ เป็นค่าจริงในช่วง [0, 1] โดยที่ค่า $\mu_A(x)$ ของอิลิเมนต์ x เป็นค่าแสดงสมาชิกภาพของ x ใน A"

ในการใช้งานฟัซซี่เซ็ทก็ต้องมีการกำหนดจักรวาล (universe) ในทำนองเดียวกับเซ็ทปกติธรรมดา หากแต่เราสามารถกำหนดจักรวาลให้มีขอบเขตที่แน่นอนได้ (universe of discourse) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ U เช่น กำหนดว่าจักรวาลของสิ่งที่สนใจ U คือ {1 2 3 4 5 6 7 8 9 10} อิลิเมนต์แต่ละตัวใน U อาจเรียกว่า y (อาจเรียกเป็นอย่างอื่นก็ได้ เช่น x, w, z เป็นต้น)

นอกจากจักรวาลของสิ่งที่สนใจแล้ว เราควรต้องทราบนิยามของสามสิ่งที่เกี่ยวข้องกับฟัซซี่สับเซ็ท (fuzzy suset) ได้แก่ ซัพพอร์ท (support) จุดตัดข้าม (crossover point) และฟัซซี่ซิงเกลทัน (fuzzy singleton) สมมุติว่าเรามี A เป็นฟัซซี่สับเซ็ทของ U:

- ซัพพอร์ทของ A คือ เซ็ทของจุดต่างๆ ใน U ที่มี $\mu_A(y)$ เป็นบวก (ไม่รวมศูนย์)
- จุดตัดข้ามใน A คือ อิลิเมนต์ใน U ที่มี $\mu_A(y)$ เท่ากับ 0.5
- ฟัซซี่ซิงเกลทัน คือ ฟัซซี่ซิงเกลทันที่มีซัพพอร์ทเป็นจุดๆ เดียวใน U ถ้า A เป็นฟัซซี่ซิงเกลทันที่มีซัพพอร์ทเป็น y เราอาจเขียนแสดง A ได้ดังนี้คือ A = μ/y ซึ่ง μ คือ ค่าแสดงความเป็นสมาชิกของ y ใน A (ถ้าลองเปรียบเทียบกับกรณีของเซ็ทปกติธรรมดา จะเห็นว่า A = 1/y เราเรียกกรณีเช่นนี้ว่านันฟัซซี่ซิงเกิลทัน (nonfuzzy singleton)

สมมุติให้ U = {1 2 3 4 5 6 7 8 9 10}

A และ B เป็นฟัซซี่สับเซ็ทของ U ซึ่งวิธีหนึ่งที่สามารถเขียนแสดง A และ B ได้ มีดังต่อไปนี้

A = {0/1 0/2 0.2/3 0.4/4 0.47/5 0.5/6 0.8/7 0.9/8 1/9 1/10}

B = {0/1 0/2 0/3 0.5/4 0.7/5 0.8/6 1/7 1/8 1/9 1/10}

ดังนั้น

ซัพพอร์ทของ A คือ {3 4 5 6 7 8 9 10}

ซัพพอร์ทของ B คือ {4 5 6 7 8 9 10}

หรืออาจเขียนแสดงซัพพอร์ทในรูปของเซ็ทของฟัซซี่ซิงเกิลทันก็ได้ กล่าวคือ

ซัพพอร์ทของ A คือ {0.2/3 0.4/4 0.47/5 0.5/6 0.8/7 0.9/8 1/9 1/10}

ซัพพอร์ทของ B คือ {0.5/4 0.7/5 0.8/6 1/7 1/8 1/9 1/10}

ซึ่งให้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าแสดงความเป็นสมาชิกของอิลิเมนต์ต่างๆ เอาไว้ด้วย

จุดตัดข้ามใน A คือ 6 หรือ 0.5/6

จุดตัดข้ามใน B คือ 4 หรือ 0.5/4

นอกจากการเขียนแสดงฟัซซี่สับเซ็ทดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีวิธีเขียนแสดงฟัซซี่สับเซ็ทได้ในลักษณะอื่นอีก กล่าวคือ เมื่อ A เป็นฟัซซี่สับเซ็ท

$$A = \int_U \mu_A(y)/y$$

เครื่องหมาย $\int_U$ หมายถึงการทำยูเนียน (union) ของฟัซซี่ซิงเกิลทัน หรืออาจเขียนแสดงในรูป $\sum$ ซึ่งหมายถึงยูเนียนของไฟไนท์ซัพพอร์ท (finite support) เช่น เมื่อ A มีไฟไนท์ซัพพอร์ทเป็น $\{y_1, y_2, ..., y_n\}$ แล้ว

$$A = \sum_{i=1}^{n} \mu_i / y_i = \mu_1 / y_1 + \mu_2 / y_2 + ... + \mu_n y_n$$

ซึ่ง μ_i, i = 1, ..., n คือ ค่าแสดงความเป็นสมาชิกของ y_i ใน A และ + หมายถึง ยูเนียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างข้างต้น เราอาจเขียนแสดงฟัซซี่สับเซ็ท A และ B ได้ดังนี้

A = 0.2/3 + 0.4/4 + 0.4/5 + 0.5/6 + 0.8/7 + 0.9/8 + 1/10 และ

B = 0.5/4 + 0.7/5 + 0.8/6 + 1/7 + 1/8 + 1/9 + 1/10

(2) ความรู้เบื้องต้นเรื่องฟัซซี่ลอจิก

การปฏิบัติทางลอจิกที่เป็นพื้นฐานต่างๆ บนฟัซซี่เซ็ท ย่อมมีในทำนองเดียวกันกับกรณีของเซ็ทแบบปกติ ซึ่งจะต่างกันก็เพียงกลไกขณะปฏิบัติเท่านั้น ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึง คอมพลีเมนต์ (complement) คอนเทนเมนต์ (containment) ยูเนียน (union) และอินเตอร์เซ็คชั่น (intersection)

เมื่อ D เป็นฟัซซี่สับเซ็ท = 0.5/3 + 0.8/4 + 1/5 + 1/6 + 0.8/7 + 0.5/8

คอมพลีเมนต์ของ C คือ $\neg C = \int_U (1-\mu_c(y)/y$

$$\neg C = 0.5/3 + 0.2/4 + 0.2/7 + 0.5/8$$

เมื่อ D เป็นฟัซซี่สับเซ็ท = 0.2/3 + 0.3/4 + 1/5 + 1/6 + 1/7 + 0.8/8

ยูเนียนของฟัซซี่สับเซ็ท C และ D คือ

$$C + D \doteq \int_U [\mu_C(y) \vee \mu_D(y)]/y = C \quad \text{or} \quad D = C \cup D$$

$\vee$ หมายถึง การหาค่า "maximum"

เช่น ถ้า a และ b เป็นจำนวนจริง

$$a \vee b = \max(a, b) = a; a \geq b \quad \text{หรือ} \quad = b;\ a < b$$

$\vee_y$ หมายถึง "supremum" เหนือโดเมน y ทั้งหมด

จาก C และ D ที่กำหนดข้างต้น

$$C \cup D = 0.5/3 + 0.8/4 + 1/5 + 1/6 + 1/7 + 0.8/8$$

อินเตอร์เซ็คชั่นของฟัซซี่สับเซ็ท C และ D คือ

$$C \cap D = \int_U [\mu_C(y) \wedge \mu_D(y)]/y = C \text{ and } D$$

$\wedge$ หมายถึง การหาค่า "minnimum"

เช่น ถ้า a และ b เป็นจำนวนจริง

$$a \wedge b = \min(a, b) = a; a \leq b \quad \text{หรือ} \quad b, b < a$$

$\wedge_y$ หมายถึง "infimum" เหนือโดเมน y ทั้งหมด

จาก C และ D ที่กำหนดข้างต้น

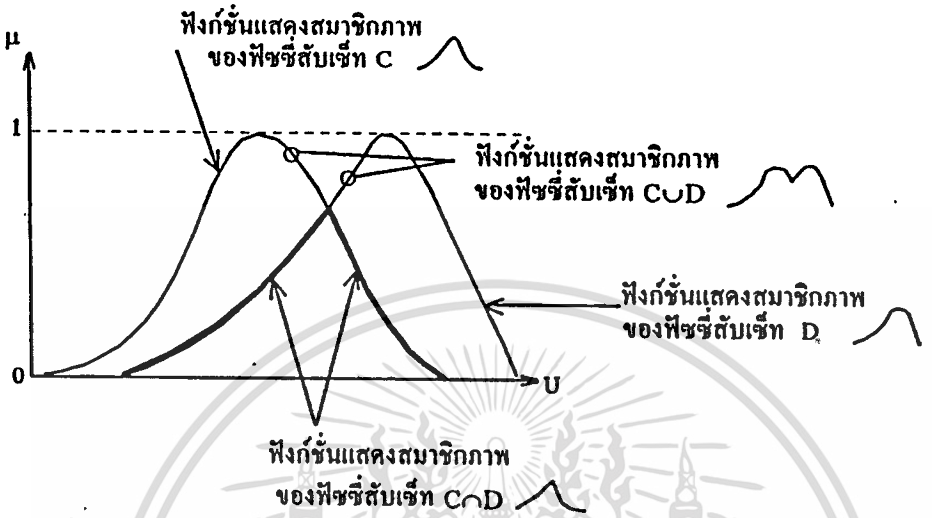
$$C \cap D = 0.2/3 + 0.3/4 + 1/5 + 1/6 + 0.8/7 + 0.5/8$$

สมมุติว่า ค่าแสดงความเป็นสมาชิกของทุกๆ อิลิเมนต์ ในฟัซซี่สับเซ็ท C และ D สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ การปฏิบัติต่อค่าแสดงสมาชิกภาพเหล่านี้ในการทำยูเนียน และอินเตอร์เซ็คชั่น จะมีค่าแสดงสมาชิกภาพของฟัซซี่สับเซ็ทที่เป็นผลลัพธ์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2

คอนเทนเมนต์ เมื่อเรากล่าวว่า X คอนเทนใน Y นั่น หมายความว่า X เป็นสับเซ็ทของ Y หรือ X มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ Y นั่นเอง เขียนแสดงด้วยสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$x \subset y \Leftrightarrow \mu_x \leq \mu_y$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2. ฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพ (membership function) ของฟัซซี่เซ็ทต่างๆ ที่เป็นผลมาจากการปฏิบัติทางลอจิก

3. ตัวแปรทางภาษาและฟัซซี่อัลกอริธึม

ฟัซซี่เซ็ทนั้นมีรากฐานการกำเนิดมาจากความเชื่อที่ว่า ความคิดอ่านของมนุษย์มิได้มีตรรกพื้นฐานเป็นแบบ "0" - "1" หรือแบบลอจิกหลายค่า (ตรรกหลายค่า, multivalued logic) หรือมิได้เป็นกลไกการคิดแบบตัวเลข หากแต่ความคิดอ่านของมนุษย์เป็นความสามารถพิเศษในการรวมประเด็นข่าวสาร จากกลุ่มข้อมูลขนาดเล็กไปจนขนาดใหญ่ขึ้นกับความสามารถเฉพาะตนของมนุษย์ อย่างไรก็ตามเมื่อข้อมูลของระบบที่กำลังสนใจมีปริมาณมากๆ และระบบที่มนุษย์กำลังสนใจนั้นมีความสลับซับซ้อน ความสามารถของมนุษย์ในการตัดสินใจหรือวินิจฉัยในสิ่งที่เกี่ยวกับระบบนั้น ก็ยิ่งมีความเที่ยงตรงและมีนัยสำคัญลดน้อยลง นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรกลุ่มหนึ่งมีความเชื่อว่าตรรกแบบฟัซซี่และการอนุมานเชิงฟัซซี่ (fuzzy inferencc) สามารถใช้เป็นรากฐานเพื่ออธิบายกลไกการตัดสินใจและความคิดอ่านของมนุษย์ได้ดีกว่าการใช้ตรรกแบบอื่นๆ ดังนั้นจึงอาจนำไปใช้ช่วยในการวิเคราะห์ระบบที่มีความสลับซับซ้อนมากๆ ได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานกับระบบที่ไม่อาจหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical models) ด้วยวิธีการแบบธรรมดาได้ หรืออาจจะหาได้แต่ก็มีความยุ่งยากมาก

ในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับระบบที่มีความซับซ้อนมากโดยอาศัยคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่นั้น มีประเด็นที่น่าสนใจซึ่งแตกต่างไปจากวิธีการที่เป็นอมตะ (classical methods) ดังต่อไปนี้ :

- ในการดำเนินงานจะใช้ตัวแปรทางภาษา (linguistic variables) แทนการใช้ตัวแปรเชิงเลข (numerical variables)
- บ่งบอกลักษณะความสัมพันธ์ที่ไม่ซับซ้อนระหว่างตัวแปรต่างๆ ด้วยประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่ (fuzzy conditional statements) และ
- บ่งบอกลักษณะความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนต่างๆ ด้วยฟัซซี่อัลกอริธึม (fuzzy algorithms)

ต่อจากนี้ไป ก็จะเป็นการกล่าวถึงประเด็นต่างๆ ข้างต้นตามลำดับ ซึ่งจะเริ่มด้วยตัวแปรทางภาษาเป็นเรื่องแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) ตัวแปรแบบฟัซซี่และตัวแปรทางภาษา

ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้วถึงความเชื่อที่ว่า ความสามารถของมนุษย์ในการสรุปประเด็นที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่สลับซับซ้อน แสดงออกมาได้อย่างเด่นชัดด้วยการอธิบายด้วยภาษาของมนุษย์ตามธรรมชาติและในหลายๆ กรณีการอธิบายความหมายด้วยภาษาพูดหรือเขียน ก็เป็นที่เข้าใจได้ดีกว่าการแสดงด้วยตัวเลข

ภาษามนุษย์อาจได้รับการพิจารณาว่าเป็นระบบที่สร้างขึ้นมาจากคำ วลี และประโยค นอกจากภาษาตามธรรมชาติแล้ว การมองภาษาเป็นระบบอาจมีความหมายรวมถึงภาษาประดิษฐ์ (artificial language) ด้วย ไม่ว่าจะในภาษาธรรมชาติหรือภาษาประดิษฐ์ ตัวแปรทางภาษา (linguistic variables) หมายถึง ตัวแปรที่มีการให้ค่าเป็นคำหรือประโยค เช่น "อายุ" ถือเป็นตัวแปรทางภาษา การให้ค่าแก่อายุอาจเป็น "เด็ก", "เด็กไร้เดียงสา", "หนุ่มสาว", "แก่", และ "แก่มาก" เป็นต้น

สมมุติว่าเราพิจารณาคำว่า "สี" ของวัตถุเป็นตัวแปร สีอาจได้รับการตีค่าหรือให้ค่าเป็น "แดง", "เหลือง", "เขียว" เป็นต้น คำว่า แดง เหลือง เหล่านี้เราเรียกว่า คำให้ค่า (labels) ของฟัซซี่สับเซ็ทของจักรวาลของสิ่งของที่เราสนใจ ขณะที่คำว่า สี ซึ่งเป็นคำบ่งบอกลักษณะ (attribute) ของสิ่งของนั้น ถือเป็นตัวแปรแบบฟัซซี่ (fuzzy variables) ซึ่งมีค่าตามคำให้ค่าของฟัซซี่สับเซ็ท และอาจเรียกคำเช่น สี นี้ว่าเป็นตัวแปรทางภาษา ดังนั้น อาจสรุปได้ว่า ตัวแปรทางภาษา และตัวแปรแบบฟัซซี่นั้นหมายถึงสิ่งเดียวกัน

ในระบบทางภาษา นอกจากตัวแปรทางภาษา และคำให้ค่าที่กล่าวถึงแล้วยังมี คำขยายเสริมความ (hedges) เช่น มาก, ค่อนข้าง เป็นต้น คำเชื่อมโยง (connectives) เช่น และ, แต่ เป็นต้น และนิเสธ (negation) เช่น ไม่, มิได้ เป็นต้น ตัวอย่างในตารางที่ 1 จะให้ความกระจ่างในการแยกแยะองค์ประกอบของประโยคในภาษาได้เป็นอย่างดี หน้าที่หลักของตัวแปรทางภาษาคือ การให้ความหมายอย่างมีระบบแก่สิ่งหรือปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน หรือที่มนุษย์ยังมีความรู้ไม่ลึกซึ้งถึงธรรมชาติของสิ่งเหล่านั้น

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการแยกองค์ประกอบของประโยค

ประโยค	ตัวแปรทางภาษา	นิเสธ	คำเชื่อมโยง	คำขยายเสริมความ
1. ชายคนนี้สูงมาก	ความสูง (ซ่อนรูป)	-	-	มาก
2. ชายคนนี้ค่อนข้างสูง	ความสูง	-	-	ค่อนข้าง
3. ชายคนนี้สูงแต่สูงไม่มากนัก	ความสูง	ไม่	แต่	มาก
4. ชายคนนี้เตี้ย	ความสูง	ไม่	-	มาก

ด้วยแนวคิดเรื่องตัวแปรแบบฟัซซี่หรือตัวแปรทางภาษา ทำให้มนุษย์สามารถให้ความหมายแก่ภาษาได้ และสามารถปฏิบัติต่อความหมายต่างๆ เหล่านั้น (เชิงเลขหรือฟังก์ชั่น) ได้อย่างมีระบบ การให้ความหมายทำได้โดยการกำหนดฟัซซี่สับเซ็ทให้แก่ตัวแปรทางภาษา อีกนัยหนึ่งคือ การกำหนดฟังก์ชั่นแสดงความเป็นสมาชิกให้แก่ตัวแปรทางภาษานั่นเอง เช่น จักรวาลของสิ่งที่เราสนใจคือ อายุในช่วง 0-100 ปี และเราสนใจความหมายของคำว่า หนุ่ม และ แก่ เราอาจกำหนดฟังก์ชั่นแสดงความเป็นสมาชิกของคำว่าหนุ่ม และ แก่ ในช่วงอายุ 0-100 ปีได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu(\text{หนุ่ม}, y) = \begin{cases} 1 & ;\text{สำหรับ } y \le 25 \\ \left\{1+\left(\frac{y-25}{5}\right)^{2}\right\}^{-1} & ;\text{สำหรับ } y > 25 \end{cases}$$

ดังนั้นฟัซซี่สับเซ็ทของ U ที่ถูกกำหนดคำให้ค่าเป็นหนุ่มคือ

$$\text{หนุ่ม} = \int_{0}^{25} 1/y + \int_{25}^{100} \left\{1+\left(\frac{y-25}{5}\right)^{2}\right\}^{-1} /y$$

และ

$$\mu(\text{แก่}, y) = \left\{1+\left(\frac{y-50}{5}\right)^{-2}\right\}^{-1} \quad ;\text{สำหรับ } y \ge 50$$

ซึ่งอาจเขียนแสดงฟัซซี่สับเซ็ทของ U ที่ถูกกำหนดคำให้ค่าเป็นแก่คือ

$$\text{แก่} = \int_{50}^{100} \left\{1+\left(\frac{y-50}{5}\right)^{-2}\right\}^{-1} /y$$

ฟังก์ชั่นแสดงความเป็นสมาชิกสำหรับคำว่าหนุ่ม แก่ ได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 3

ภาษาที่เราใช้ในชีวิตประจำวันมีคำขยายเสริมความหรือ hedge การพิจารณาคำขยายเสริมความในการให้ความหมายทางภาษา ด้วยแนวคิดทางคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่นั้น เรามองว่า คำขยายเสริมความเป็นตัวปฏิบัติให้เกิดการแปลงฟัซซี่สับเซ็ท M(u) ที่แทนความหมายของ u (คำในภาษา) ไปเป็นฟัซซี่สับเซ็ท M(hu) เมื่อคำ u ใดๆ มีคำขยายเสริมความเข้ามาประกอบ เราอาจพิจารณาได้ตามตัวอย่างของนิยามต่างๆ ที่ปรากฏตามมานี้ ซึ่งผู้เขียนขอคงรูปคำภาษาอังกฤษไว้ เพื่อรักษาความหมายดั้งเดิมของผู้ค้นคิด (Zadeh, 1973) และอีกประการหนึ่ง คำบางคำเช่น "concentration", "dilation" นั้น เป็นศัพท์เฉพาะทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินกระบวนการทางสัญญาน

ตัวอย่างคำขยายเสริมความและการปฏิบัติทางฟัซซี่ลอจิก

$$\text{very }(u) = u2 = \int_{U} \mu_{U}^{2}(y)/y$$

$$\text{very very }(u) = (\text{very } u)^{2} = u^{4}$$

$$\text{plus }(u) = u^{1.25}$$

$$\text{minus }(u) = u^{0.75}$$

$$\text{plus plus }(u) = \text{minus very }(u)$$

$$\text{highly }(u) = \text{minus very very }(u) = \text{plus plus very }(u)$$

$$\text{concentration }(u) = \text{con }(u) = u^{2}$$

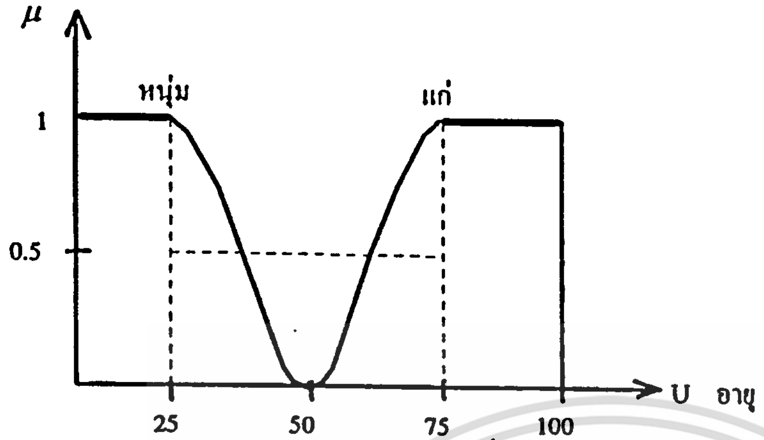
$$\text{delation }(u) = \text{DIL }(u) = u0.5$$

$$\text{intensification }(u) = \begin{cases} 2u^{2} ; 0 \le \mu_{u}(y) \le 0.5 \\ \neg 2(\neg u)^{2} ; 0.5 < \mu_{u}(y) \le 1 \end{cases}$$

กำหนดให้ u = แก่

$$\text{ความหมายของแก่ กำหนดโดย} \quad \int_{50}^{100} \left\{1+\left(\frac{y-50}{5}\right)^{-2}\right\}^{-1} /y$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ธ ฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพสำหรับคำว่าหนุ่ม, แก่

ดังนั้น แก่มาก $= u^2 = \int_{50}^{100} \left\{1+\left(\frac{y-50}{5}\right)^{-2}\right\}^{-2} / y$

กำหนดให้	U	=	1 + 2 + 3 + 4 + 5 และ
	เล็ก	=	1/1 + 0.8/2 + 0.6/3 + 0.4/4 + 0.2/5
ดังนั้น	เล็กมาก	=	1/1 + 0.64/2 + 0.36/3 + 0.16/4 + 0.04/5 และ
	ไม่เล็กมากนัก	=	$\neg$(เล็ก)^2
ซึ่ง	(เล็ก)^2	=	เล็กมาก
ดังนั้น	$\neg$(เล็ก)^2	=	0.36/2 + 0.64/3 + 0.84/4 + 0.96/5
		≅	0.4/2 + 0.6/3 + 0.8/4 + 1/5
ถ้าสมมุติว่า	ใหญ่	=	0.2/1 + 0.4/2 + 0.6/3 + 0.8/4 + 1/5

ความหมายของวลีว่า "ไม่เล็กมากและไม่ใหญ่มากนัก" อาจหาได้ดังต่อไปนี้

ไม่เล็กมากและไม่ใหญ่มากนัก		=	$\neg$(เล็ก)$^2 \cap \neg$(ใหญ่)^2
	ซึ่ง (ใหญ่)^2	=	0.04/1 + 0.16/2 + 0.36/3 + 0.64/4 + 1/5
	$\neg$(ใหญ่)^2	=	0.96/1 + 0.84/2 + 0.64/3 + 0.36/4
		≅	1/1 + 0.8/2 + 0.6/3 + 0.4/4
ดังนั้น	$\neg$(เล็ก)$^2 \cap \neg$(ใหญ่)^2	=	min [$\neg$(เล็ก)^2, $\neg$(ใหญ่)^2]
		=	0.4/2 + 0.6/3 + 0.4/4

ตัวอย่างต่อไปนี้น่าสนใจมากในด้านการให้ความหมายของภาษา ซึ่งเมื่อใช้แนวคิดของตัวแปรทางภาษาจะทำให้เราเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ให้พิจารณาคำว่า แม่นยำ ซึ่งตรงกับภาษาอังกฤษว่า accurate ดังนั้น

	ไม่แม่นยำ	=	inaccurate	=	$\neg$แม่นยำ = $\neg$accurate
	ไม่แม่นยำมาก	=	very inaccurate	=	$(\neg$accurate$)^2$
ซึ่งจะต่างกับ					
	แม่นยำไม่มาก	=	not very accurate	=	$\neg($accurate$)^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่ และอัลกอริธึม

วิศวกร นักวิทยาศาสตร์ และนายช่างสาขาต่างๆ คงจะต้องมีความคุ้นเคยบ้างกับประโยคเงื่อนไข (conditional statements) ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีลักษณะเป็นประโยค "ถ้า-แล้ว" (IF-THEN)

ถ้า (x = 15) แล้ว (y = 3.87)
ถ้า $(x \geq -3)$ แล้ว (y = 12) เป็นต้น

ประโยคเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น มีค่าเชิงเลขที่แน่นอน มีค่าเชิงเลขที่แน่นอน ซึ่งเป็นกรณีของการวิเคราะห์ระบบแบบธรรมดา (conventional) ที่เราคุ้นเคยกันอย่างดี ในกรณีของระบบที่เรากำลังวิเคราะห์มีความซับซ้อน (complex) หรือคลุมเคลือ (vague, ill-defined) รูปลักษณะของประโยคเงื่อนไขดังกล่าว ก็ยังคงเอื้อประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ระบบ หากแต่ตัวแปรธรรมดาในประโยคเงื่อนไขเหล่านั้นจะแทนด้วยตัวแปรทางภาษา ทำให้ประโยคเงื่อนไขแบบธรรมดานั้นเปลี่ยนเป็นประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่ (fuzzy conditional statements) เช่น

ถ้า (x มีขนาดเล็กมากๆ) แล้ว (y มีขนาดใหญ่)
ถ้า (x มีขนาดเล็ก) แล้ว (y มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก) เป็นต้น

หากลองนึกเปรียบเทียบประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่ข้างต้น กับการสนทนาหรือการใช้ภาษาของมนุษย์ในชีวิตประจำวันที่อาจใช้การอธิบายด้วยประโยคเงื่อนไขเช่น

ถ้า (คุณสมพรเขาสุภาพต่อเธอ) แล้ว (เธอเองก็ควรจะมีอัธยาศัยอันดีต่อเขา) จะเห็นว่าการใช้ภาษาเพื่อการสื่อสารของมนุษย์ ก็มีความคลุมเคลือหรือไม่ชัดเจน (imprecise) อยู่ในธรรมชาติอย่างคล้ายคลึงกัน ฉะนั้นเมื่อเราใช้ประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่ ช่วยในการบ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในระบบที่ความสัมพันธ์นั้นมิได้ปรากฏอย่างเด่นชัดในเชิงปริมาณหรือเชิงเลข แล้วเราใช้วิธีการให้ความหมายแก่ตัวแปรทางภาษาต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เราก็จะสามารถทำการวิเคราะห์คำนวณเกี่ยวกับระบบนั้น โดยได้รับผลการวิเคราะห์ที่มีความชัดเจน (precise) ปรากฏอยู่ได้ กลไกในการวิเคราะห์คำนวณเกี่ยวกับประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่จะได้รับการกล่าวถึงในโอกาสต่อไป

ประโยคเงื่อนไขแบบธรรมดานั้นเหมือนกับเป็นการบ่งบอกความสัมพันธ์ (x, f(x)) เมื่อนำประโยคเงื่อนไขจำนวนมากมาร้อยเรียงกันอย่างมีระเบียบ มีขั้นตอน และผูกพันธ์กันด้วยตรรก สิ่งที่ได้เราเรียกว่าอัลกอริธึม (algorithm) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในทำนองเดียวกัน เราก็สามารถผูกพันธะประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่ เกิดขึ้นเป็นฟัซซี่อัลกอริธึม (fuzzy algorithm) ได้ ในมุมมองที่กว้างขวางขึ้นนั้น ฟัซซี่อัลกอริธึมอาจมีทั้งตัวแปรแบบธรรมดาและตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรแบบฟัซซี่ปะปนคละกันอยู่ได้ ดังตัวอย่างเช่น

ถ้า (พบว่า x มีขนาดใหญ่) แล้ว (ให้ลด y ลงบ้างเล็กน้อย)
ถ้า (ลด y ลงบ้างเล็กน้อย) และ (พบว่า x ยังคงมีขนาดใหญ่อยู่เช่นเดิม) แล้ว
(ให้ใช้ y = 0.1)
ถ้า (x มีขนาดเล็ก) แล้ว (ให้หยุดปรับ y) มิฉะนั้น (ให้เพิ่ม x อีก 1%)

จากตัวอย่างและคำอธิบายข้างต้น เราอาจกล่าวได้ว่า ฟัซซี่อัลกอริธึม คือชุดคำสั่งแบบฟัซซี่ (fuzzy instructions : คำสั่งที่ใช้ประโยชน์ตัวแปรแบบฟัซซี่ และอาจมีตัวแปรแบบธรรมดารวมอยู่ด้วยก็ได้ ซึ่งเมื่อเอ็กซิคิวท์ (execute) ชุดคำสั่งนั้นแล้ว ให้คำตอบโดยประมาณสำหรับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ในขณะนั้น ฟัซซี่อัลกอริธึมได้รับการนำไปประยุกต์อย่างกว้างขวางในด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และสังคมศาสตร์ คำสั่งต่างๆ ที่พบในฟัซซี่อัลกอริธึมนั้นมีสามแบบด้วยกัน คือประโยคให้ค่า (assignment statements), ประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่ (fuzzy conditional statements) และประโยคสั่งการแบบไม่มีเงื่อนไข (unconditional action statemets)

เพื่อให้มีความเข้าใจในการคำนวณเกี่ยวข้องกับประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่ และฟัซซี่อัลกอริธึม เราจึงควรทราบเกี่ยวกับการปฏิบัติทางคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่เพิ่มเติมบ้าง เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มเติมเกี่ยวกับการปฏิบัติทางคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่

การปฏิบัติทางคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่ที่จะให้ได้ทราบเป็นประการแรกในขณะนี้คือ การคูณ หรือโพรดัคท์ (product)

เมื่อ A และ B เป็นฟัซซี่สับเซ็ท โพรดัคท์ของ A และ B คือ AB มีนิยามว่า

$$AB = \int_U \mu_A(y)\mu_B(y)/y$$

เช่น กำหนดให้

$$A = 0.8/2 + 0.9/5 \quad \text{และ}$$

$$B = 0.6/2 + 0.8/3 + 0.6/5$$

$$AB = 0.48/2 + 0.54/5$$

และจากนิยามของโพรดัคท์นี้ ทำให้เราทราบว่า

$$A\alpha = \int_U [\mu_A(y)]^\alpha / y$$

$$\alpha A = \int_U \alpha\mu_A(y)/y$$

เช่น อาศัย A เป็นฟัซซี่สับเซ็ทที่กำหนดข้างต้น เราจะมี

$$A^2 = 0.64/2 + 0.81/5 \quad \text{และ}$$

$$0.5A = 0.4/2 + 0.45/5 \quad \text{เป็นต้น}$$

การคูณแบบคาร์ทีเซียน หรือ คาร์ทีเซียนโพรดัคท์ (Cartesian product) ระหว่างฟัซซี่สับเซ็ท A และ B ใช้สัญลักษณ์ $A \times B$ ซึ่งมีนิยามว่า

$$A \times B = \int_{U \times V} \mu_A(u) \wedge \mu_B(v)/(u, v)$$

สมมุติให้

$$U = 1 + 2 + 3$$

$$V = 1 + 2 + 3 + 4 + 5$$

$$A = 1/1 + 0.8/2 + 0.7/3$$

$$B = 0.6/1 + 0.7/2 + 0.8/3 + 0.9/4 + 1/5$$

$$\begin{aligned} A \times B = {} & 0.6/(1, 1) + 0.7/(1, 2) + 0.8/(1, 3), + 0.9/(1, 4) + 1/(1, 5) + 0.6/(2, 1) + 0.7/(2, 2) \\ & + 0.8/(2, 3) + 0.8/(2, 4) + 0.8/(2, 5) + 0.6/(3, 1) + 0.7/(3, 2) + 0.7/(3, 3) + 0.7/(3, 4) \\ & + 0.7/(3, 5) \end{aligned}$$

คาร์ทีเซียนโพรดัคท์นั้นเป็นรากฐานของการแสดงความสัมพันธ์แบบฟัซซี่ (fuzzy relation) ซึ่งสามารถเขียนแสดงไว้ด้วยแมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์แบบฟัซซี่ (fuzzy relational matrix) R กล่าวคือ R เป็นฟัซซี่สับเซ็ทของคาร์ทีเซียนโพรดัคท์ $X \times Y$

$$R = \int_{X \times Y} \mu_R(x, y)/(x, y) \qquad ; x \in X, \quad y \in Y$$

$\mu_R(x,y)$ นั้นเราเรียกว่า ฟังก์ชั่นแสดงความเป็นสมาชิกแบบสองตัวแปร (bivariate membership function) จากตัวอย่างของ $A \times B$ ที่ผ่านมา เราอาจเขียนแสดง R ได้ดังนี้

$$R = \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 1 \\ 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.8 & 0.8 \\ 0.6 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \end{bmatrix} \end{array}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคูณอีกแบบหนึ่ง คือการคูณแบบแมกซ์-มิน หรือ แมกซ์-มินโพรดัคท์ (max-min product) สมมุติว่า R แสดงความสัมพันธ์จาก X ไป Y และ S แสดงความสัมพันธ์จาก Y ไป Z แมกซ์-มินโพรดัคท์แสดงความสัมพันธ์จาก X ไป Z กำหนดโดย

$$RoS = \int_{X\times Z} \vee_{y} [\mu_R(x,y) \wedge \mu_S(y,z)]/(x,z)$$

ซึ่ง RoS นี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า คอมโพสิชั่น (composition) ของ R และ S หรือ R คอมโพส S ก็ได้ ตัวอย่างเช่น กำหนดให้

$$R = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.8 \\ 0.6 & 0.9 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad S = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.9 \\ 0.4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$RoS = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.8 \\ 0.6 & 0.9 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} 0.5 & 0.9 \\ 0.4 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.8 \\ 0.5 & 0.9 \end{bmatrix}$$

ขั้นตอนการปฏิบัติเพื่อหาค่า RoS นั้น กระทำคล้ายกับการคูณแบบแมทริกซ์แบบธรรมดา กล่าวคือ พิจารณาอิลิเมนต์ใน R ทีละแถว โดยทรานส์โพสเสียก่อนแล้วนำไปเข้าคู่เปรียบเทียบกบอิลิเมนต์ในคอลัมน์ของ S เพื่อหาค่าแมกซ์-มิน เช่น อิลิเมนต์ 0.4 ในแมทริกซ์ที่เป็นผลลัพธ์ได้มาจาก :

ขั้นที่ 1 จับแถวที่ 1 ของ R ทรานส์โพสจะได้ $\begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.8 \end{bmatrix}$

ขั้นที่ 2 หาค่า min (0.3, 0.5) = 0.3

min (0.8, 0.4) = 0.4

ขั้นที่ 3 หาค่า max (0.3, 0.4) = 0.4

ถ้าต้องการทราบที่มาของค่า 0.8 ในแมทริกซ์ผลลัพธ์ ก็ให้ดำเนินการแบบเดียวกัน หากแต่ในขั้นที่ 2 จะเป็นการเปรียบเทียบค่าต่อไปนี้

min (0.3, 0.9) = 0.3

min (0.8, 1) = 0.8

และในขั้นที่ 3 จะเป็น max (0.3, 0.8) = 0.8 เป็นต้น

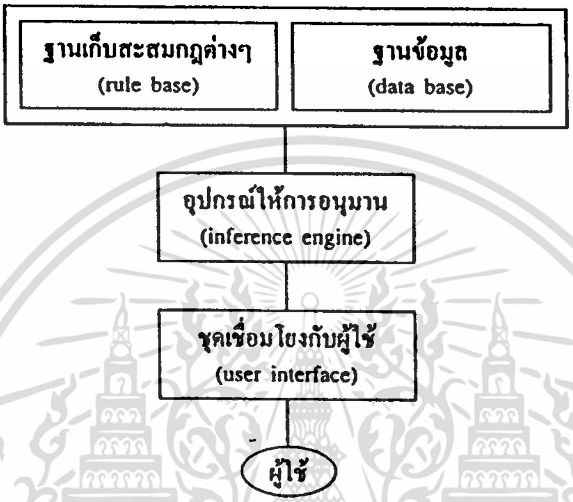
การหาค่า 0.5 และ 0.9 ในแมทริกซ์ผลลัพธ์ ก็สามารถดำเนินการด้วยวิธีที่คล้ายคลึงกันหากแต่ใช้แถวที่ 2 ของ R ในการทำทรานส์โพสนับแต่เริ่มแรก

4. ระบบผู้เชี่ยวชาญ, ระบบฟัซซี่ และการอนุมาน

ในตอนที่ 4 นี้ จะเป็นการกล่าวถึงโครงสร้างของระบบที่เป็นรากฐานสำหรับระบบควบคุมแบบฟัซซี่ และจะกล่าวถึงเทคนิคของการอนุมานที่ใช้เพื่อเป็นการนำเข้าสู่เนื้อความ ในอันดับแรกนี้ ควรจะต้องกล่าวถึงปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) หรือ AI ซึ่งเป็นแขนงหนึ่งของคอมพิวเตอร์ศาสตร์ (computer science) วัตถุประสงค์หนึ่งของ AI ก็คือ การพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (computer based models) เพื่อใช้แก้ไขปัญหา ซึ่งมีธรรมชาติของงานแตกต่างไปจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบกายภาพอย่างมาก นอกจากนั้นแล้ว การใช้เทคนิคทาง AI ก็มักจะมุ่งไปในแนวที่ปัญหาต่างๆ ที่สนใจนั้น ไม่สามารถแก้ไขได้โดยวิธีเชิงเลขอย่างมีประสิทธิภาพ แต่อาจแก้ไขได้ด้วยวิธีแบบศึกษาสำนึก หรือ ฮิวริทติคส์ (heuristics) ในวิทยาการทางด้าน AI นั้น มีสาขาย่อยแขนงหนึ่งที่ใช้ประโยชน์การสรรสร้างแบบจำลองของความรู้และขั้นตอนการแก้ไขปัญหาต่างๆ โดยอาศัยประสบการณ์ของมนุษย์ที่มีความชำนาญในงานนั้นๆ ระบบที่สร้างขึ้นเพื่อช่วยมนุษย์ในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ เรียกว่า ระบบผู้เชี่ยวชาญ (expert systems) ความรู้ของมนุษย์ที่เก็บสะสมไว้ในระบบผู้เชี่ยวชาญ อาจมีวิธีเขียนแสดงได้หลายวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีหนึ่งที่นิยมกันมากก็คือ เขียนแสดงในรูปประโยคเงื่อนไข ถ้า.....แล้ว หรือ IF.....THEN ศัพท์เฉพาะทางระบบผู้เชี่ยวชาญจะเรียกประโยคเงื่อนไขเหล่านี้ว่า กฎ (rules) หรือ กฎการผลิต (production rules) เราจะเรียกระบบผู้เชี่ยวชาญในลักษณะเช่นนี้ว่า ระบบโพรดัคชั่น (production systems) หรือระบบผู้เชี่ยวชาญแบบใช้กฎการผลิต (rule based expert systems) ส่วนประกอบหลักของระบบดังกล่าว ได้แก่ ฐานเก็บสะสมกฎ, ฐานข้อมูล, อุปกรณ์ให้การอนุมาน และชุดเชื่อมโยงกับผู้ใช้ ดังที่แสดงไว้ในแผนภาพของรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของระบบผู้เชี่ยวชาญ

การเขียนแสดงความรู้ที่สะสมไว้ในฐานความรู้ (knowledge base) ของระบบผู้เชี่ยวชาญ ในรูปของกฎ ถ้า <A> แล้ว <B> นั้น <A> เป็นสถานการณ์ (situation) เมื่อสถานการณ์ <A> เกิดขึ้น ให้ปฏิบัติตามปฏิบัติการ (action) <B> เมื่อการอธิบายสถานการณ์และปฏิบัติการใช้ประโยชน์จากตัวแปรแบบฟัซซี่ หรืออีกนัยหนึ่งคือ ตัวแปรทางภาษา ระบบที่ใช้แก้ปัญหานี้จึงเรียกว่า ระบบฟัซซี่ (fuzzy system) นอกจากนั้นแล้วการเอ็กซิคิวท์ (execute) กฎต่าง ๆ จะให้เทคนิคการอนุมานแบบฟัซซี่ (fuzzy inference) ซึ่งมีสิ่งที่ควรพิจารณาในขั้นพื้นฐานดังต่อไปนี้ :

ประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่ถ้า <A> แล้ว <B> อาจเป็น

ถ้า < ถนนลื่น > แล้ว < การขับขี่รถยนต์อาจเกิดอันตรายขึ้นได้ง่าย >

ถ้า < x มีขนาดใหญ่ > แล้ว < y มีขนาดเล็ก > เป็นต้น

ประโยคเงื่อนไข ถ้า <A> แล้ว <B> ได้รับการนิยามในเชิงคาร์ทีเซียนโพรดัคท์ กล่าวคือ

$$A \times B = \int_{U \times V} \mu_A(u) \wedge \mu_B(V)(u,v)$$

ในลักษณะของประโยคเงื่อนไขที่ซับซ้อนมากขึ้นดังเช่น

ถ้า <A> แล้ว <B> ไม่เช่นนั้น <C>

อาจได้รับการนิยามโดย $(A \times B) + (\neg A \times C)$

คำว่า "ไม่เช่นนั้น" หรือ ELSE ในภาษาอังกฤษถูกแทนด้วยฟัซซี่ลอจิก + และจากความเข้าใจพื้นฐานเรื่องคาร์ทีเซียนโพรดัคท์ กับประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่นี้ เราอาจพิจารณาประโยคเงื่อนไขที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น และเขียนแสดงในรูปของคาร์ทีเซียนโพรดัคท์ และการปฏิบัติทางฟัซซี่ลอจิกต่างๆ ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการอนุมานทางฟัซซี่ ดังตัวอย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยค ถ้า <A_1> แล้ว <B_1> ไม่เช่นนั้น ถ้า <A_2> แล้ว <B_2>

อาจแทนได้ด้วย $(A_1 \times B_1)+(A_2 \times B_2)$

ประโยค ถ้า <A_1> แล้ว <B_1> ไม่เช่นนั้น [ถ้า <A_2> แล้ว <B_2> ไม่เช่นนั้น <B_3>]

อาจแทนได้ด้วย $(A_1 \times B_1)+[(A_2 \times B_2)+(\neg A_2 \times B_3)]$

ประโยค ถ้า <A> แล้ว [ถ้า <B> แล้ว <C> ไม่เช่นนั้น <D>] ไม่เช่นนั้น <E>

อาจแทนได้ด้วย $A \times [(B \times C)+(\neg B \times D)]+(\neg A \times E)$ หรือเท่ากับ

$(A \times B \times C)+(A \times \neg B \times D)+(\neg A \times E)$ เป็นต้น

การอนุมาน (inference) ประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่นั้น ถือเป็นการให้เหตุผลโดยประมาณ (approximate reasoning) ซึ่งมีกฎการอนุมานเพื่อให้การแจงเหตุสู่ผลแบบฟัซซี่ (fuzzy implication inference rules) ที่สำคัญๆ อยู่สามลักษณะดังต่อไปนี้

Generalized Modus Ponens (GMP) " เน้นที่การใช้สัญลักษณ์ในการอนุมาน บนรากฐานของประโยคเงื่อนไขที่มีอยู่ เช่น

- x เป็น A'
- ถ้า x เป็น A แล้ว y เป็น B
- ดังนั้น x เป็น B'

การอนุมานแบบ GMP มีลักษณะใกล้เคียงกับ "forward data-driven inference" ที่ใช้ในระบบผู้เชี่ยวชาญเป็นอย่างมาก และได้รับการนำไปใช้ประโยชน์ในระบบควบคุมแบบฟัซซี่อย่างแพร่หลาย

Generalized Modus Tollens (GMT) : เป็นการอนุมานที่ใช้สัญลักษณ์เป็นรากฐานเช่นเดียวกับ GMP หากแต่มีลักษณะใกล้เคียงกับ "backward goal-driven inference" เช่น

- y เป็น B'
- ถ้า x เป็น A แล้ว y เป็น B
- ดังนั้น x เป็น A'

กฎเชิงประกอบของการอนุมาน (Compositional Rule of Inference) อาจได้รับการพิจารณาว่าเป็นลักษณะหรือกรณีพิเศษของ GMP มีการพิจารณาดังต่อไปนี้

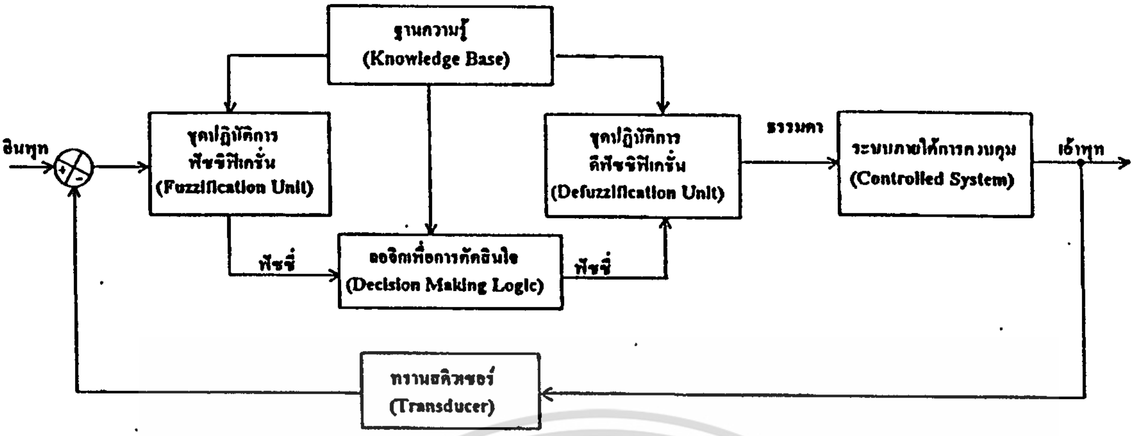
- ถ้า R เป็นความสัมพันธ์เชิงฟัซซี่จาก U ไป V และ x เป็นฟัซซี่สับเซ็ทของ U โดยจะมี y เป็นฟัซซี่สับเซ็ทของ V ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของ x กับ R ที่อาจเรียกว่า เป็นการคอมโพสท์ของ R และ x กล่าวคือ

เป็นเครื่องหมายแมกซ์-มินโพรดัคท์

สมมุติว่า $x=[1\ 0.6\ 0.2\ 0]$ และ $R=\begin{bmatrix}1 & 0.5 & 0 & 0\\ 0.5 & 1 & 0.5 & 0\\ 0 & 0.5 & 1 & 0.5\\ 0 & 0 & 0.5 & 1\end{bmatrix}$

ดังนั้น $y = [1\ 0.6\ 0.2\ 0] \bullet \begin{bmatrix}1 & 0.5 & 0 & 0\\ 0.5 & 1 & 0.5 & 0\\ 0 & 0.5 & 1 & 0.5\\ 0 & 0 & 0.5 & 1\end{bmatrix} = [0\ 0.6\ 0.5\ 0.0]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 รูปลักษณะพื้นฐานของระบบควบคุมที่ใช้ FLC

5. ระบบควบคุมแบบฟัซซี่

ในตอนที่ 5 นี้ เราจะได้กล่าวถึงแนวคิดหลักของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ เมื่อกล่าวถึงระบบควบคุมแบบฟัซซี่ ในปัจจุบันเราหมายถึงระบบควบคุมที่มีการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic controller) หรือที่เรียกโดยย่อว่า FLC รูปที่ 5 แสดงรูปลักษณะพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ ซึ่งจะเห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซี่หรือ FLC มีองค์ประกอบหลักอยู่ 4 ส่วน ได้แก่ ชุดปฏิบัติการฟัซซิฟิเคชั่น (fuzzification unit) ฐานความรู้ (knowledge base) ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ (decision making logic) และชุดปฏิบัติการดีฟัซซิฟิเคชั่น (defuzzification unit)

ชุดปฏิบัติการฟัซซิฟิเคชั่น ทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลแบบธรรมดาให้ไปอยู่ในรูปของตัวแปรทางภาษาหรือตัวแปรฟัซซี่ ซึ่งเป็นการแปลงข้อมูลทางด้านอินพุท บางครั้งอาจพบว่าเมื่อกล่าวถึงชุดปฏิบัติการฟัซซิฟิเคชั่น ผู้พูดหมายรวมเอาชุดวัดสัญญาณด้วยทรานสดิวเซอร์และชุดเปรียบเทียบสัญญาณ ไว้ในส่วนที่เป็นชุดปฏิบัติการฟัซซิฟิเคชั่นนี้ด้วย

ฐานความรู้ ประกอบด้วยส่วนที่เป็นฐานข้อมูล (data base) และฐานกฎการควบคุม (control rule base) ส่วนที่เป็นฐานข้อมูลนั้นให้นิยามต่างๆ ที่ใช้กำหนดกฎการควบคุมนั้นเป็นศูนย์รวมของกฎการควบคุมแบบตัวแปรทางภาษา ซึ่งแสดงถึงแนวทางการควบคุมให้ระบบมีพฤติกรรมตามที่ต้องการ

ลอจิกเพื่อให้การตัดสินใจ เป็นส่วนที่ให้การเลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์ โดยอาศัยแนวคิดทางคณิตศาสตร์ และการอนุมานแบบฟัซซี่

ชุดปฏิบัติการดีฟัซซิฟิเคชั่น ทำหน้าที่แปลงข้อมูลแบบฟัซซี่ ไปเป็นตัวแปรธรรมดา (conventional variable) ที่สมนัยกัน เพื่อให้ระบบภายใต้การควบคุมสามารถเข้าใจสัญญาณดังกล่าวได้ ข้อมูลแบบฟัซซี่ที่กล่าวถึงข้างต้นเป็นข้อมูลที่ได้มาจากการอนุมานกฎการควบคุมแบบฟัซซี่ต่างๆ

กฎการควบคุมต่างๆ ที่กล่าวถึงในที่นี้ มีรูปลักษณ์เช่นเดียวกับประโยคเงื่อนไขแบบฟัซซี่หรือกฎการผลิตที่ได้เคยกล่าวถึงมาแล้วในตอนที่ 4 ของบทความนี้

(1) การออกแบบ และอนุวัตระบบควบคุมแบบฟัซซี่

การออกแบบและอนุวัตระบบควบุมแบบฟัซซี่มิได้ยุ่งยากซับซ้อนใดๆ เลย เพียงแต่ผู้ปฏิบัติมีความเข้าใจในขั้นตอนอย่างถูกต้อง ก็จะสามารถปฏิบัติได้ไม่ยากนัก ก่อนอื่นเราจะต้องเข้าใจว่า ระบบภายใต้การควบคุมนั้นเป็นระบบทางกายภาพที่มิได้มีความเป็นฟัซซี่ นั้นหมายความว่าสถานะ (state) ของระบบแสดงได้ด้วยตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบธรรมดา (conventional variables) คราวนี้เราคงจะถามกันต่อไปว่า แล้วระบบควบคุมแบบฟัซซี่หรือ FLC เข้ามามีประโยชน์ตรงไหนหรือหาช่องว่างแทรกตัวเข้ามาให้เกิดประโยชน์อย่างไร คำตอบสำหรับคำถามนี้ก็คือ มนุษย์มิได้มีความรู้ลึกซึ้งเกี่ยวกับฟิสิกส์ของระบบทั้งมวลที่มีอยู่ในโลกมนุษย์จึงไม่สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical models) ด้วยวิธีการแบบอมตะต่างๆ ให้กับระบบได้ทุกประเภท ในบางกรณีระบบที่มนุษย์สนใจนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนมากเสียจนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต้องใช้เวลานาน จนอาจกล่าวได้ว่าเป็นการได้ไม่คุ้มเสีย เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเหมือนหัวใจของการวิเคราะห์และออกแบบระบบด้วยวิธีการแบบอมตะต่างๆ ในการประยุกต์ที่ขาดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิธีการแบบอมตะต่างๆ ก็พลอยขาดการใช้ประโยชน์ไปด้วย FLC ได้รับการนำมาใช้ประโยชน์ในกรณีที่ขาดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอมตะ ไม่ว่าจะด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นหรือเป็นเพราะว่ามนุษย์เพิกเฉยต่อการหาแบบจำลองนั้น

การทำงานภายใน FLC อาศัยคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่และตัวแปรฟัซซี่ทั้งสิ้น เมื่อ FLC จะต้องเกี่ยวข้องกับระบบทางกายภาพที่ไม่เป็นฟัซซี่ ตัวแปรต่างๆ ที่ไม่เป็นฟัซซี่ ได้แก่ เอ้าพุทของกระบวนการหรือระบบภายใต้การควบคุมอินพุทอ้างอิง เป็นต้น จะต้องผ่านกระบวนการทำให้เป็นฟัซซี่ด้วยฟัซซี่โอเพอเรเทอร์ (fuzzy operator) ที่เรียกว่า ฟัซซิฟายเออร์ (fuzzifier) ผลของการอนุมานที่ได้จาก FLC ซึ่งจะนำไปบังคับควบคุมกระบวนการอยู่ในรูปของตัวแปรฟัซซี่ซึ่งระบบหรือกระบวนการภายใต้การควบคุมนั้นไม่สามารถเข้าใจได้ ตัวแปรฟัซซี่ดังกล่าวจึงต้องผ่านกระบวนการทำให้ไปเป็นฟัซซี่ด้วยโอเพอเรเทอร์ชนิดดีฟัซซิฟายเออร์ (defuzzifeir) หรือดีฟัซซิฟิเคชั่นโอเพอเรเทอร์ (defuzzification opertor)

การออกแบบ FLC จึงต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์หลักๆ ดังต่อไปนี้ :

1) วิธีการฟัซซิฟิเคชั่นและการตีความของฟัซซิฟายเออร์
2) ฐานข้อมูล ซึ่งจะต้องคำนึงถึง
   - ยูนิเวิร์ส : การกำหนด การแบ่งส่วน และการนอร์มัลไลซ์
   - การกำหนดช่วงอินพุท เอ้าพุท ให้เหมาะสมสอดคล้องกับการแบ่งส่วนตัวแปรแบบฟัซซี่
   - ความครบถ้วน
   - ลักษณะของฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพ
3) ฐานกฎ ซึ่งจะต้องคำนึงถึง
   - การเลือกตัวแปรสถานะ (อินพุท) และตัวแปรควบคุม (เอ้าพุท) สำหรับกฎการควบคุม
   - แหล่งที่มาและการสังเคราะห์กฎการควบคุม
   - ชนิดของกฎการควบคุมแบบฟัซซี่
   - ความครบถ้วน ความสอดคล้องกันอย่างเสมอต้นเสมอปลาย และอันตรกิริยาระหว่างกฎการควบคุม
4) ลอจิกเพื่อให้การตัดสินใจ ซึ่งเราจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้
   - นิยามของฟัซซี่อิมพลิเคชั่น (fuzzy implication)
   - การตีความคำเชื่อมประโยคแบบ and
   - การตีความคำเชื่อมประโยคแบบ also
   - นิยามของคอมโพสิชันนัลโอเพอเรเทอร์ (compositional operator)
   - กลไกการอนุมาน (inference mechanism)
5) วิธีการดีฟัซซิฟิเคชั่นและการตีความดีฟัซซิฟายเออร์

จากพารามิเตอร์หลัก 5 ประการข้างต้น สิ่งที่ดูจะเป็นปัญหามากที่สุดในงานออกแบบและอนุวัต FLC คือการสังเคราะห์กฎการควบคุม การเลือกฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพที่เหมาะสม การอนุมาน และการดีฟัซซิฟิเคชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในบทความนี้ หากผู้อ่านมีความสนใจในรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวกับพารามิเตอร์ทั้ง 5 ประการที่นอกเหนือไปจากนี้ อาจค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง (Lee, 1990)

(2) การกำหนดฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพ

การเลือกฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพที่เหมาะสมนั้น ทางปฏิบัติที่พบมากที่สุดเป็นการกำหนดจากประสบการณ์ และความรู้เดิมที่ผู้ออกแบบมีอยู่ก่อนแล้ว หรือที่เรียกว่าเป็นวิธีแบบศึกษาสำนึก (heuristic approach) ค่าแสดงสมาชิกภาพที่ได้จึงมีลักษณะเป็นแบบอัตวิสัย (subjective) ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ FLC เป็นรายๆ ไป การกำหนดอาจใช้รูปแบบจุด กล่าวคือ

$$\mu(u) = \sum_{i=1}^{6} c_i / u_i \qquad \text{ซึ่ง}$$

$$c = [0.1, 0.3, 0.6, 0.8, 0.95, 1.0]$$

หรืออาจกำหนดในรูปแบบของฟังก์ชั่น ดังตัวอย่างเช่น

$$\mu(x) = \exp\left[\frac{-(x-\lambda)^2}{2\sigma^2}\right]$$

เมื่อพิจารณาประกอบกับตารางที่ 2 และรูปที่ 6 จะสังเกตได้ว่า ถ้ายูนิเวิร์สที่ผ่านการนอร์มัลไลซ์ (normalized universe) นั้นเปลี่ยนแปลงไป พารามิเตอร์ λ และ σ นั้นก็จะต้องได้รับการดัดแปลงแก้ไขให้สอดคล้องตามไปด้วย

การกำหนดฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธีการอัตวิสัยนั้นเป็นสิ่งที่ใช้ประโยชน์มากับระบบฟัซซี่นานนับสิบปี คำถามหนึ่งที่มักเกิดขึ้นเสมอก็คือ สำหรับตัวแปรฟัซซี่กลุ่มเดียวกัน มนุษย์สองคนอาจกำหนดฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงได้ใช่หรือไม่ คำตอบสำหรับคำถามดังกล่าวนี้คือใช่อย่างแน่นอน หากระบบที่มนุษย์กำลังสนใจอยู่นั้นเป็นระบบที่เรียกว่า ใหม่ถอดด้าม การกำหนดฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธีศึกษาสำนึกหรืออัตวิสัยนี้สร้างความลำบากให้แก่ผู้ออกแบบเสมอ เพราะไม่มีผู้ใดเลยที่มีความรู้ความเข้าใจระบบนั้นมาก่อน

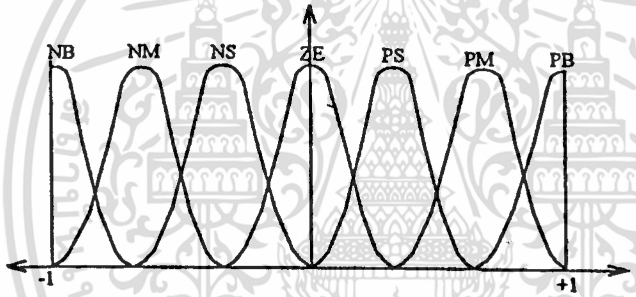
ปัจจุบันได้มีผู้หาหนทางปฏิบัติที่ช่วยกำหนดฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธีการที่ไม่ต้องพึ่งพาความรู้เดิมเกี่ยวกับระบบ หนทางดังกล่าวมีหลายหนทางซึ่งนำเสนอโดยนักวิชาการหลายคณะ บทความนี้จะขอกล่าวถึงหนทางหนึ่งเป็นตัวอย่างพอสังเขป ซึ่งผู้เขียนเห็นว่าเป็นสิ่งที่มีประโยชน์ต่อการออกแบบ FLC โดยตรง และได้รับการนำเสนอโดยManoranjanและคณะในบทความของพวกเขาเรื่อง A Systematic Approach to Obtaining Fuzzy Sets for Control Systems (Manoranjan et al., 1995) เมื่อผู้ออกแบบระบบได้กำหนดตัวแปรทางภาษา ฐานกฎการควบคุม และวิธีการดีฟัซซิฟิเคชั่นแล้ว ในขั้นสุดท้ายคือการหาค่าแสดงสมาชิกภาพที่เหมาะสม วิธีที่สะดวกที่สุดคือเริ่มต้นด้วยการเดา เช่น อาจแบ่งยูนิเวิร์สออกเป็น M ช่วงเท่าๆ กัน และสมมุติให้ฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพเป็นกราฟรูปเรขาคณิตที่สมาตรใดๆ จากนั้นก็กำหนดดัชนีสมรรถนะ (performance index) ซึ่งอาจจะสัมพันธ์กับเวลาที่อาการตอบสนองใช้ได้ระดับ (rise time) เวลาที่อาการตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัว (settling time) หรือปริมาณการสั่นไกว เป็นต้น ดัชนีสมรรถนะนี้อาจมีลักษณะเป็นฟังก์ชั่นเช่นใดก็ได้ตามความเหมาะสม เมื่อกำหนดอย่างนี้แล้ว ในขั้นต่อไปจะต้องกำหนดแบบจำลอง (model) ทางคณิตศาสตร์ให้แก่ระบบภายใต้การควบคุม แบบจำลองดังกล่าวอาจเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอมตะ ที่ใช้ประมาณค่าระบบทางกายภาพ ภายใต้สภาวะที่มีข้อมูลไม่สมบูรณ์ (incomplete information) หรืออาจมีลักษณะเป็นฐานกฎอีกก็ได้ ในขั้นสุดท้ายเป็นการเลียนแบบระบบทั้งหมดด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำการเลียนแบบระบบพร้อมด้วย FLC และทำการสืบค้นเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization search) สำหรับฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพของตัวแปรทางภาษาตามต้องการ ที่ทำให้อาการตอบสนองของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 การกำหนดฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพ

ยูนิเวิร์ส ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว	เซ็กเมนต์ ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว	พิสัย	λ	σ	ฟัซซี่เซ็ท มูลฐาน
	[-1.0, -0.5]	[-6.9, -4.1]	-1.0	0.4	NB
	[-0.5, -0.3]	[-4.1, -2.2]	-0.5	0.2	NM
	[-0.3, -0.0]	[-2.2, -0.0]	-0.2	0.2	NS
[-1.0, +1.0]	[-0.0, +0.2]	[-0.0, +1.0]	0.0	0.2	ZE
	[+0.2, +0.4]	[+1.0, +2.5]	0.2	0.2	PS
	[+0.4, +0.6]	[+2.5, +4.5]	0.5	0.2	PM
	[+0.6, +1.0]	[+4.5, +6.9]	1.0	0.4	PB

หมายเหตุ : N = negative, P = positive, B = big, M = Medium, S = small, ZE = about zero



รูปที่ 6 ตัวอย่างหนึ่งของกราฟแทนฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพที่สัมพันธ์กับค่าต่าง ๆ ในตารางที่ 2

สอดคล้องกับดัชนีสมรรถนะที่ตั้งไว้ วิธีการสืบค้นอาจเลือกใช้วิธีใดก็ได้ไม่จำกัด เช่น อาจเลือกใช้วิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex) เป็นต้น

(3) การสังเคราะห์กฎการควบคุม

กรณีที่มีผู้ชำนาญการเกี่ยวกับระบบที่เราจะทำการควบคุมนั้น กฎการควบคุมสามารถได้รับการเขียนขึ้นเป็นประโยคแสดงอาการของการพยายามควบคุมกับผลที่จะเกิดขึ้นกับการตอบสนองของระบบ โดยอาศัยความรู้ความชำนาญของมนุษย์เป็นหลัก ดังตัวอย่างของกฎการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมเช่น

ถ้า [ความดันภายในท่อ A เพิ่มสูงขึ้นไม่มากนัก] แล้ว [ให้ลดปริมาณไอน้ำที่ไหลเข้าทางจุด X ลงบ้างเล็กน้อย]

ถ้า [ความดันภายในท่อ A ยังลดลงไม่มากเท่าที่ควร] แล้ว [ให้ลดปริมาณไอน้ำที่ไหลเข้าทางจุด Y เป็น 2 เท่าของการลดปริมาณไอที่จุด X ซึ่งเพิ่งปฏิบัติผ่านมา] ดังนี้เป็นต้น

การสังเคราะห์กฎการควบคุมด้วยวิธีนี้เป็นวิธีการแบบศึกษาสำนึก ซึ่งมีข้อจำกัดที่ว่า ถ้าเป็นระบบใหม่เรายังไม่อาจหาผู้ใดที่มีความชำนาญในระบบนั้นได้ เราก็จะไม่สามารถสังเคราะห์กฎการควบคุมได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีผู้นำเสนอวิธีการต่างๆ ที่ใช้ผลิตกฎการควบคุมโดยไม่ต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในเรื่องระบบที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างหนึ่งของวิธีการเหล่านี้ได้แก่ วิธีการ FARMA (ชื่อเต็มคือ Fuzzy Auto-Regressive Average Model)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งนำเสนอโดย Park และคณะ (Y. Park et. al., 1995) ตัวควบคุมแบบ FARMA ไม่ต้องอาศัยมนุษย์ผู้ชำนาญการในการผลิตกฎการควบคุม หากแต่ใช้ข้อมูลที่ผ่านมาทางอินพุทและเอ้าพุทของระบบ เมื่อตัวควบคุมเริ่มทำงานในระยะแรกจะไม่มีกฎการควบคุมอยู่เลย แต่จะสร้างกฎขึ้นเองโดยใช้ข้อมูลอินพุท-เอ้าพุทเก่าที่ผ่านมา และสะสมกฎที่สร้างขึ้นไว้ในหน่วยความจำ เทคนิคการสร้างกฎนั้นคล้ายกับ ARMA (หรือชื่อเต็มว่า Auto-Regressive Moving Average) ในอนุกรมเวลา (time-series) การควบคุมระบบที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะลองผิดลองถูก และทำการจดจำพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ให้ผลดีต่อการควบคุม ทำการปรับแก้ฐานกฎการควบคุมด้วยตัวเองได้ในระดับหนึ่ง คณะผู้นำเสนอได้จำลองผลวิธีการควบคุมดังกล่าวกับระบบพลวัตที่เป็นลูกตุ้มนาฬิกากลับหัวอยู่บนรถล้อเลื่อน ปรากฏว่าให้ผลการควบคุมเป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามมีสิ่งที่น่าสังเกตว่าเกิดการสะสมของกฎการควบคุมขึ้นทุกๆ ครั้งที่มีอินพุทกระตุ้นระบบพลวัต ทั้งนี้จากกราฟผลการควบคุมที่แสดงไว้ในบทความดังกล่าว

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ก็ยังมีผู้เสนอวิธีการสังเคราะห์กฎการควบคุมอีกแนวทางหนึ่ง โดยการใช้ข้อมูลอินพุท-เอ้าพุทของระบบ นำมาผ่านกระบวนการผลิตกฎตามขั้นตอนที่แนะนำ (L. Wang and J. M. Mendel 1992) ซึ่งขั้นตอนต่างๆ มีการใช้การศึกษาสำนึกอยู่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการของ Park (Y. Park et. al., 1995) อย่างไรก็ตามวิธีการของ Wang สามารถรวมกฎจากการผลิตโดยอาศัยข้อมูลอินพุท-เอ้าพุทและกฎที่ได้จากผู้ชำนาญการ ไว้ในฐานกฎเดียวกันได้ วิธีการดังกล่าวนี้เหมาะสำหรับระบบควบคุมที่ต้องพึ่งพาอัลกอริธึมในการควบคุมทั้งส่วนที่เป็นข้อมูลเชิงเลข และส่วนที่เป็นตัวแปรทางภาษา หากแต่อัลกอริธึมโดยรวมนั้นเป็นฟัซซีอัลกอริธึม

(4) รูปแบบการอนุมาน

การอนุมาน (inference) หมายถึงการเอ็กซิคิวท์กฎนั่นเอง ในระบบควบคุมแบบฟัซซี ได้พบว่าเทคนิคการอนุมานมีสองลักษณะกล่าวคือ

ลักษณะที่หนึ่ง เป็นการอนุมานกฎการควบคุมแยกจากกันแต่ละกฎโดยทำการอนุมานทุกกฎ และนำผลการอนุมานที่ได้จากแต่ละกฎมารวมกัน คำว่ารวมกันในที่นี้ มิได้หมายถึงการรวมกันทางพีชคณิต หากแต่ต้องใช้เทคนิคเฉพาะในการรวม ส่วนเทคนิคใดนั้นผู้ออกแบบจะทำการเลือกเทคนิคการรวมผลการอนุมานที่ตนคิดว่าเหมาะสม เช่น อาจเป็นการหาค่าเฉลี่ยแบบฟัซซี เป็นต้น โดยปกติระบบควบคุมแบบฟัซซีเวลาจริง (real-time fuzzy control) ใช้กฎการควบคุมเพียงไม่กี่กฎ เท่าที่พบเห็นจะใช้จำนวนกฎ 10-40 กฎโดยประมาณ ดังนั้นการเก็บสะสมกฎเหล่านี้ไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ จึงมิได้ต้องการเนื้อที่ของหน่วยความจำมากมายอะไร การเอ็กซิคิวท์กฎเหล่านี้ด้วยวิธีการแบบฟัซซีจนครบทุกกฎ ก็ใช้เวลาเป็นเพียงไมโครวินาทีเท่านั้น จึงพบได้เสมอว่าเทคนิคการอนุมานเช่นนี้เป็นที่นิยมใช้ในกลุ่มผู้ออกแบบ FLC

ลักษณะที่สอง เป็นการอนุมานแบบรวมกฎ เทคนิคการอนุมานนี้ใช้วิธีการคำนวณแมทริกซ์ความสัมพันธ์ (relational matrix) ซึ่งเป็นตัวแทนเพื่อการอนุมานของกฎทุกกฎ (Gupta et. al., 1986) FLC ทำการคำนวณโดยตรงกับแมทริกซ์ความสัมพันธ์นี้เพื่อให้ผลการอนุมาน ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบ FLC จะต้องทำการคำนวณแมทริกซ์ความสัมพันธ์นี้เก็บไว้เสียก่อน ซึ่งมักจะใช้ภาษาสูงในการโปรแกรมทำการคำนวณ จากนั้นจึงเก็บแมทริกซ์ดังกล่าวนี้ไว้ในหน่วยความจำ เพื่อใช้ประโยชน์ในการคำนวณแบบเวลาจริง ในกรณีที่ตัวแปรเกี่ยวข้องกับการควบคุมมีจำนวนหลายตัวแปร แมทริกซ์ดังกล่าวจะเป็น n-มิติ (n-dimensional matrix) การจัดเก็บแมทริกซ์เช่นนี้ลงในหน่วยความจำมูลฐาน เช่น ROM กระทำได้ยากยิ่ง ต้องอาศัยเทคนิคการจัดแอดเดรสเข้าช่วยอย่างมาก และสิ้นเปลืองเนื้อที่หน่วยความจำ นอกจากนั้นยังได้พบว่า ถ้าจำนวนกฎมีมาก แมทริกซ์ความสัมพันธ์ที่คำนวณได้ก็จะมีความคลุมเคลือมาก กล่าวคือจะมีค่าความเป็นสมาชิกที่เป็น 1 แพร่กระจายอยู่เต็มแมทริกซ์ ทำให้ผลการอนุมานโดยอาศัยแมทริกซ์ดังกล่าว ขาดความแม่นยำไปมาก (Sujitjorn et. al., 1994) จึงพบว่าลักษณะการอนุมานแบบที่สองนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมมากนักในการออกแบบ FLC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5) เทคนิคของการดีฟัซซิฟิเคชั่น

เอ้าพุทจากกระบวนการอนุมานจะอยู่ในรูปของฟัซซี่เซ็ทซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงการกระจายความเป็นไปได้ (possibility distribution) ของการควบคุมที่จะสั่งไปยังกระบวนการ ในการสั่งการควบคุมแก่กระบวนการเราต้องการสัญญาณสั่งการที่ไม่ใช่ฟัซซี่ (nonfuzzy or crisp control signal) ดังนั้น กระบวนการดีฟัซซิฟิเคชั่น เพื่อเปลี่ยนฟัซซี่เซ็ทไปเป็นเอ้าพุทที่ไม่ใช่ฟัซซี่ จึงเป็นสิ่งจำเป็น เมื่อ x_0 เป็นสัญญาณการควบคุมแบบธรรมดา และ x เป็นฟัซซี่เซ็ทของคำสั่งการควบคุม

$$x_0 = D(x) = \text{defuzzifier}(x)$$

D(.) จึงเป็นดีฟัซซิฟิเคชั่นโอเปอเรเตอร์ (defuzzification operator)

เทคนิคดีฟัซซิฟิเคชั่นที่ได้รับการใช้งานมามีหลากหลายเทคนิค ต่างก็ให้เอ้าพุท x_0 ที่มีค่าไม่เท่ากันจนถึงปัจจุบัน การเลือกใช้เทคนิคใดนั้นขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ FLC เป็นสำคัญ ในการพิจารณาเลือกใช้มักจะคำนึงถึงความยุ่งยากซับ ซ้อนในการคำนวณ สำหรับระบบควบคุมแบบเวลาจริง การคำนวณไม่ควรจะยุ่งยากและการใช้หน่วยความจำจะต้องเป็นไปอย่างจำกัดเทคนิคดีฟัซซิฟิเคชั่นที่ได้รับการใช้งานกันกว้างขวางได้แก่วิธีแบบเกณฑ์สูงสุด (max criterion) วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (mean of maximum) และวิธีแบบศูนย์กลางของพื้นที่ (center of area)

วิธีแบบเกณฑ์สูงสุดจะให้เอ้าพุทที่มีค่าการกระจายของความเป็นไปได้สูงสุดเป็นค่าที่นำไปสั่งการควบคุม ในกรณีที่ผลการอนุมานให้ฟัซซี่เซ็ทแทนการกระจายความเป็นไปได้ ที่เป็นแบบลดสัดส่วน (scaled fuzzy sets) ดังในรูปที่ 7 ผลการดีฟัซซิฟิเคชั่นก็จะให้ค่า x_0 ในโดเมน หากว่าการอนุมานกฎการควบคุมให้ฟัซซี่เซ็ทแบบตัดส่วน (clipped fuzzy sets) อาจทำให้มีค่าความเป็นไปได้สูงสุดหลายค่าดังที่แสดงในรูปที่ 8 ในกรณีดังกล่าวแนวทางในการหาผลดีฟัซซิฟิเคชั่นมี 2 ลักษณะ ได้แก่ การเลือกค่าในโดเมนที่มีค่าความเป็นไปได้ (μ) สูงสุดค่าแรก ที่ค้นหาพบจากการค้นหาค่าในโดเมนจากน้อยไปมาก เมื่อพิจารณาวิธีนี้ประกอบรูปที่ 8 จะพบว่า ในกรณีแรกนี้ค่า $x_0 = x_1$ อีกลักษณะหนึ่งเป็นการใช้ค่าเฉลี่ยของค่า x ต่างๆ ในโดเมนที่พบว่ามีค่า μ สูงสุด นั่นคือผลการดีฟัซซิฟิเคชั่น

$$x_0 = \sum_{j=1}^{k} \frac{x_j}{k}$$

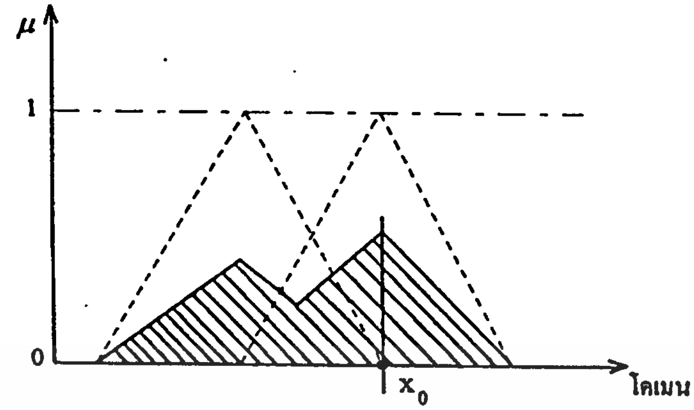
ซึ่งลักษณะที่สองที่กล่าวถึงนี้คือ วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดนั่นเอง และมีค่า $x_0 = x_2$ เมื่อพิจารณาประกอบรูปที่ 8 วิธีแบบศูนย์กลางของพื้นที่ ให้ผลการดีฟัซซิฟิเคชั่นจากการคำนวณศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง (center of gravity) ของการกระจายความเป็นไปได้ของค่าแทนสัญญาณสั่งการควบคุม กล่าวคือ

$$x_0 = \frac{\sum_{j=1}^{n} \mu(x_i).x_j}{\sum_{j=1}^{n} \mu(x_j)}$$

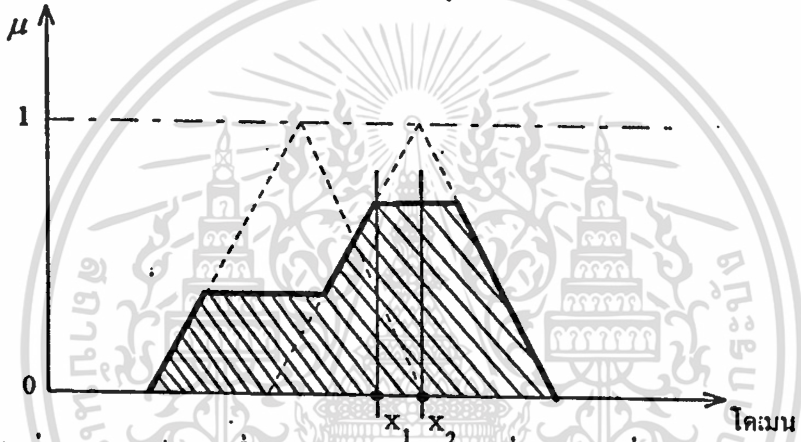
ซึ่ง n เป็นจำนวนของระดับการควันไทซ์เอ้าพุท

ในวิธีการดีฟัซซิฟิเคชั่นเหล่านี้ ได้มีผู้ทำการวิเคราะห์แล้วพบว่าวิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดให้ผลดีกว่าต่อสมรรถนะของระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีเกณฑ์สูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบทั้งสามวิธีด้วยกัน วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดส่งผลให้ระบบมีสมรรถนะชั่วครู่ที่เหนือกว่า ส่วนวิธีแบบศูนย์กลางของพื้นที่ส่งผลที่ดีกว่าต่อสมรรถนะในสภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ดีฟัซซิฟิเคชั่นแบบเกณฑ์สูงสุดเมื่อปฏิบัติกับผลการอนุมานที่ได้เป็นฟัซซี่เซ็ทชนิดลดสัดส่วน



รูปที่ 8 ดีฟัซซิฟิเคชั่นแบบเกณฑ์สูงสุดเมื่อปฏิบัติกับผลการอนุมานที่ได้เป็นฟัซซี่เซ็ทชนิดตัดส่วน

(6) ตัวอย่างของระบบควบคุมแบบฟัซซี่

ตัวอย่างของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ที่ใช้งานกับกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ถือกันว่าเป็นการประยุกต์ฟัซซี่ลอจิกในยุคแรกๆ และมีความเป็นอมตะคือ FLC ที่อนุวัติขึ้นโดย King และ Mamdani เมื่อปี ค.ศ. 1977 (King and Mamdani, 1977) FLC ดังกล่าวนี้อนุวัติกฎการควบคุมที่ใช้ตัวแปรทางภาษา สร้างขึ้นจากการศึกษาสำนึกสำหรับระบบพลวัตทางอุตสาหกรรมที่แต่ก่อนมาจำเป็นต้องใช้มนุษย์ให้การควบคุมระบบ ระบบควบคุมนี้ถือเอาการสนองตอบของผู้ปฏิบัติการที่มีต่อสัญญาณความคลาดเคลื่อน (E) และอัตราเปลี่ยนของสัญญาณความคลาดเคลื่อน (CE) การสนองตอบเป็นการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม (CU) กระบวนการฟัซซี่สับเซ็ทที่นำมาใช้อธิบายตัวแปรทางภาษาที่เกี่ยวข้องมี 8 อย่าง ได้แก่

1. PB = ค่าใหญ่ทางบวก (positive big)
   = {0.1/3 0.4/4 0.8/5 1/6}
2. PM = ค่าปานกลางทางบวก (positive medium)
   = {0.2/2 0.7/3 1/4 0.7/5 0.2/6}
3. PS = ค่าน้อยๆ ทางบวก (positive small)
   = {0.3/0 0.8/1 1/2 0.5/3 0.1/4}
4. PO = ค่าบวกที่ใกล้ศูนย์ (positive nil)
   = {1/0 0.6/1 0.1/2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วารสารเทคโนโลยีสุรนารี
ปีที่ 2 ฉบับที่ 3, กันยายน-ธันวาคม 2538

5. NO = ค่าลบที่ใกล้ศูนย์ (negative nil)
= {0.1/-2 0.6/-1 1/0}

6. NS = ค่าน้อยๆ ทางลบ (negative small)
= {0.1/-4 0.5/-3 1/-2 0.8/-1 0.3/0}

7. NM = ค่าปานกลางทางลบ (negative medium)
= {0.2/-6 0.7/-5 1/-4 0.7/-3 0.2/-2}

8. NB = ค่าใหญ่ทางลบ (negative big)
= {1/-6, 0.8/-5, 0.4/-4 0.1/-3}

จักรวาล U ที่ใช้กับการควบคุมนี้ คือ

U = {-6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6}

กฎของการควบคุมหรือฟัซซี่อัลกอริธึมเพื่อการควบคุมมี 2 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มควบคุมความดัน ซึ่งมีกฎ 15 ข้อ และกลุ่มควบคุมอัตราเร็วมีกฎ 9 ข้อ ในแต่ละกลุ่ม กฎแต่ละข้อจะเชื่อมโยงเข้าด้วยกันด้วยคำเชื่อม "หรือ (OR)" ตัวอย่างเพียงบางส่วนของกฎการควบคุมมีดังต่อไปนี้

- กลุ่มควบคุมความดัน PE = ความคลาดเคลื่อนในความดัน, CPE = การเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนในความดัน และ HC = การเปลี่ยนแปลงในปริมาณความร้อนที่เป็นอินพุท (หรือ CU_1)

ถ้า PE = NB แล้ว ถ้า CPE = ¬(NB แล้ว NM) แล้ว HC = PB

หรือ

ถ้า PE = (NB หรือ NM) แล้ว ถ้า CPE = NS แล้ว HC = PM

หรือ

ถ้า PE = NS แล้ว ถ้า CPE = (PS หรือ NO) แล้ว HC = PM

หรือ....................

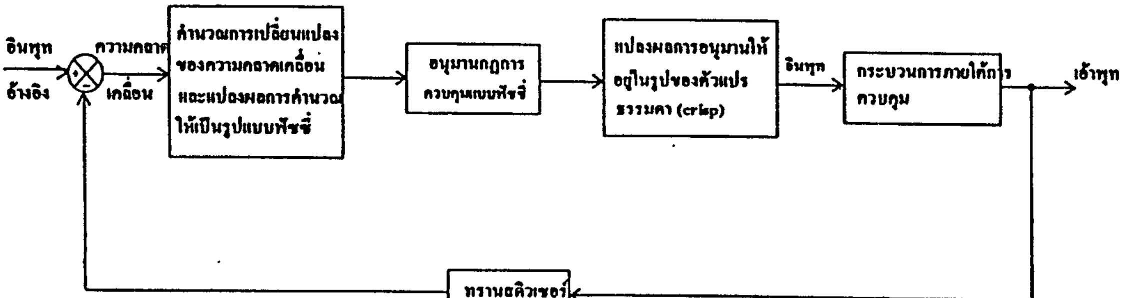
- กลุ่มควบคุมอัตราเร็ว SE = ความคลาดเคลื่อนในอัตราเร็ว, CSE = ความเปลี่ยนแปลงในความคลาดเคลื่อนในอัตราเร็ว และ TC = การเปลี่ยนแปลงในปริมาณการเปิดลิ้นควบคุม (throttle) (หรือ CU_2)

ถ้า SE = NB แล้ว ถ้า CSE = ¬(NB หรือ NM) แล้ว TC = PB

หรือ

ถ้า SE = NM แล้ว ถ้า CSE = (PB หรือ PM หรือ PS) แล้ว TC = PS

หรือ



รูปที่ 9 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ของ King และ Mamdani

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

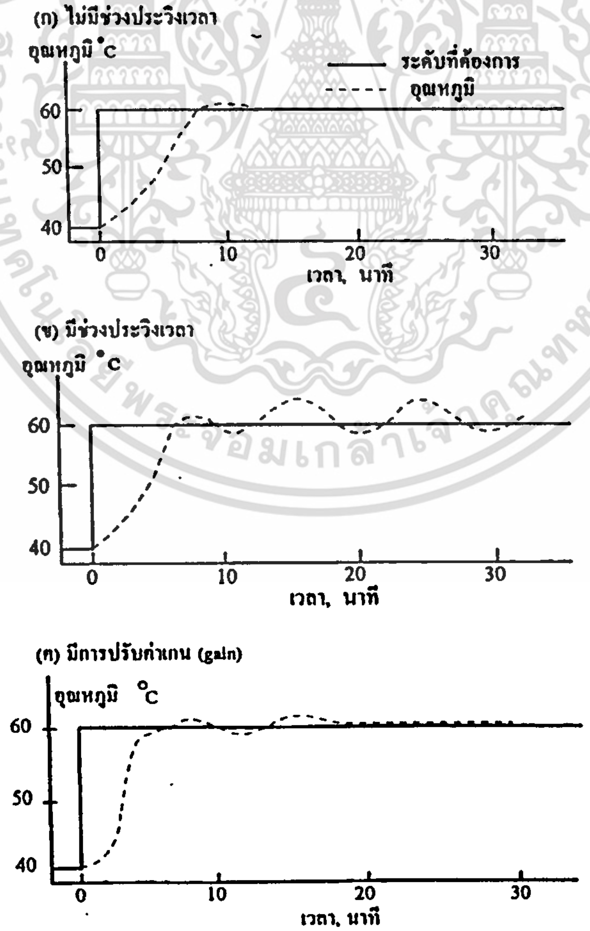
ถ้า SE = NS แล้ว ถ้า CSE = (PB หรือ PM) แล้ว TC = PS

หรือ....................

FLC นี้มีโครงสร้างดังที่แสดงในรูปที่ 9 ซึ่งแผนภาพในรูปยังให้ความเข้าใจในขั้นตอนการทำงานของตัวควบคุมด้วย กล่าวคือ

1. ชุดเปรียบเทียบสัญญาณนำสัญญาณที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ เปรียบเทียบกับอินพุทอ้างอิง ให้ผลเป็นความคลาดเคลื่อน
2. คำนวณการเปลี่ยนแปลงในความคลาดเคลื่อน และแปลงผลการคำนวณให้ไปอยู่ในรูปตัวแปรฟัซซี่
3. อนุมานกฎการควบคุมได้ผลเป็นสัญญาณการควบคุมกระบวนการที่ยังอยู่ในรูปตัวแปรฟัซซี่
4. แปลงผลที่ได้จากการอนุมานในข้อ 3 ให้อยู่ในรูปตัวแปรธรรมดา (crisp) ซึ่งพร้อมที่จะป้อนให้เป็นสัญญาณอินพุทแก่กระบวนการ
5. ทรานสดิวเซอร์วัดเอ้าพุทจากกระบวนการ และวนกลับไปปฏิบัติตามขั้นตอนต่างๆ โดยเริ่มที่ข้อ 1 ซ้ำอีกต่อๆ ไป

จากการอนุมานกฎการควบคุมนั้น อาจมีมากกว่าหนึ่งกฎที่ให้ผลต่อการควบคุม การรวมผลจากทุกๆ กฎใช้การหา max ระหว่างผลทั้งหมดที่ได้จากกฎที่เกี่ยวข้อง ในด้านการดีฟัซซิฟิเคชั่นนั้น ใช้วิธีแบบเกณฑ์สูงสุด



รูปที่ 10 การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ในการใช้ FLC ควบคุมอุณหภูมิของถังกวน (King and Mamdani, 1977)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

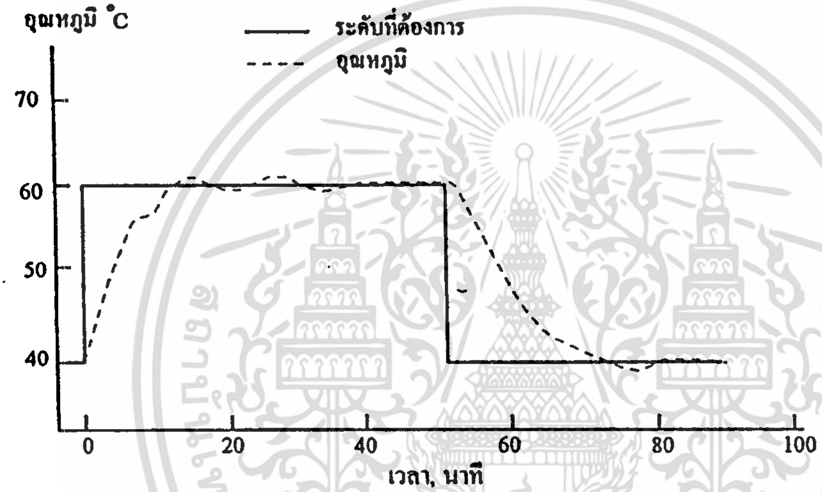
วารสารเทคโนโลยีสุรนารี
ปีที่ 2 ฉบับที่ 3, กันยายน-ธันวาคม 2538

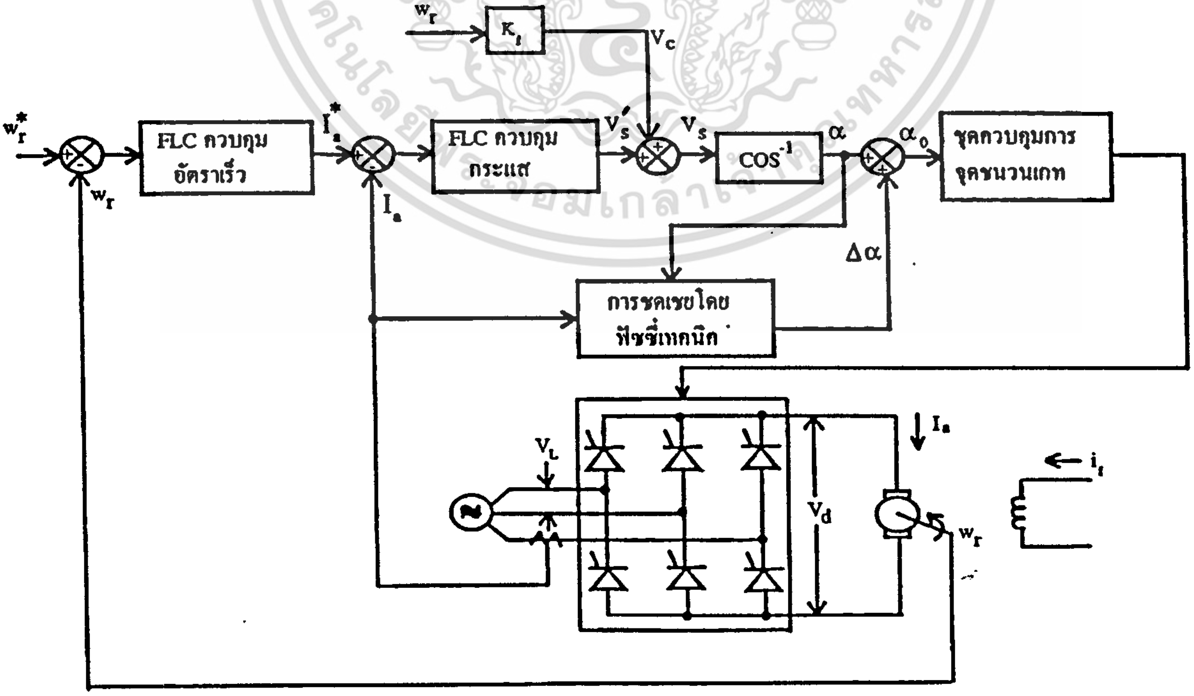
หรือเลือกค่าที่อยู่ระหว่างกลาง ถ้าพบว่ามีจุดยอดสูงสุดอยู่เกินกว่าหนึ่งยอด หรือถ้าพบว่าผลการอนุมานให้ส่วนบนสุดของกราฟแสดงสมาชิกภาพ มีลักษณะตัดตรงไปในแนวระนาบ

FLC นี้ได้รับการนำไปใช้เพื่อควบคุมอุณหภูมิของถังกวน (stirred tank) ขนาด 80 แกลลอน ของกระบวนการรีแอคเตอร์ โดยมีผลการเลียนแบบระบบด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงไว้ในรูปที่ 10 และมีผลการควบคุมถังกวนจริง แสดงไว้ในรูปที่ 11 ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

ตัวอย่าง FLC ที่ผ่านมาถือกันว่าเป็นการอนุวัตที่อมตะ ในเอกสารนี้จะขอกล่าวถึงอีกตัวอย่างหนึ่งที่เป็นการอนุวัตทางอุตสาหกรรม ซึ่งได้รับการเปิดเผยเมื่อไม่นานมานี้ เพื่อให้เห็นวิวัฒนาการของ FLC ในช่วงเวลา

รูปที่ 11 ผลการควบคุมอุณหภูมิของถังกวนที่บันทึกไว้ (King and Mamdani, 1977)





รูปที่ 12 แผนภาพแสดงระบบควบคุมแบบ FLC ใช้งานในระบบขับเคลื่อนกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วม 20 ปี ที่ผ่านมา ตัวอย่างที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นระบบขับเคลื่อนกระแสตรงด้วยคอนเวอร์เตอร์ชนิดควบคุมเฟส (phase-controlled converter dc drive) (Sousa and Bose, 1994) FLC เข้ามามีบทบาทในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในช่วงที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีโหลดเบาหรือมีอัตราเร็วการหมุนรอบสูง ซึ่งในช่วงดังกล่าวคอนเวอร์เตอร์มีการนำกระแสไม่ต่อเนื่อง นอกจากนั้นยังใช้ FLC แทนตัวควบคุมแบบ PI ในการควบคุมอัตราเร็วและกระแสอีกด้วย ระบบดังกล่าวได้รับการแสดงไว้ด้วยแผนภาพบล็อคในรูปที่ 12

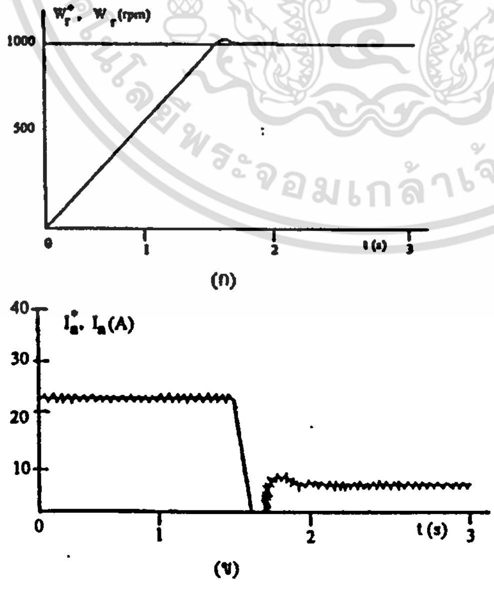
เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ได้รับการควบคุมเป็นมอเตอร์กระแสตรงที่มีวงจรสนามแยกส่วน (separately excited DC motor) วงจรจ่ายกำลังให้มอเตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ ชนิดควบคุมเฟส การทำงานของวงจรพิจารณาเฉพาะโหมดที่เป็นมอเตอร์ (motoring mode) มีความเข้มสนามแม่เหล็กจากวงจรสนามตายตัว (fixed field) วงรอบการควบคุมอัตราเร็วที่มีวงรอบการควบคุมกระแสซ้อนอยู่ภายใน จะช่วยให้มีการตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ที่รวดเร็ว และยังช่วยจำกัดกระแสอาร์เมเจอร์อีกด้วย การป้อนไปหน้าด้วยสัญญาณ emf V_c ในการให้กำเนิดสัญญาณควบคุม V_s จะช่วยให้วงรอบการควบคุมนี้มีการตอบสนองที่รวดเร็วขึ้น

การปรับมุมจุดชนวนด้วยปริมาณ $\Delta\alpha$ ได้รับการแสดงในรูปความสัมพันธ์แบบฟัซซี่ ของตัวแปร I_a และมุม α ดังเช่น

ถ้า I_a เป็นค่าลบขนาดน้อยๆ (NS) และ α เป็นบวกขนาดน้อยๆ (PS) แล้ว $\Delta\alpha$ เป็นลบขนาดน้อย (NS)

รายละเอียดของกฎในการปรับแปร $\Delta\alpha$ อาจดูได้ตามต้นฉบับ (Sousa and Bose, 1994) ซึ่งมีการใช้ฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ที่สมมาตรตลอดย่านยูนิเวิร์ส

รายละเอียดของกฎในการควบคุมกระแสและอัตราเร็วมีลักษณะทำนองเดียวกันกับกฎเพื่อการปรับแปรค่า $\Delta\alpha$ กฎเหล่านี้ อาจหาดูได้จากบทความต้นฉบับและกราฟของฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพมีลักษณะเช่นเดียวกับที่กล่าวถึงข้างต้น หากแต่ซึ่งมีลักษณะไม่สมมาตร เพื่อเป็นการเพิ่มความเที่ยง (precision) ของการควบคุมในบริเวณที่ใกล้กับจุดปฏิบัติงานในสภาวะคงตัว (steady-state operating point)

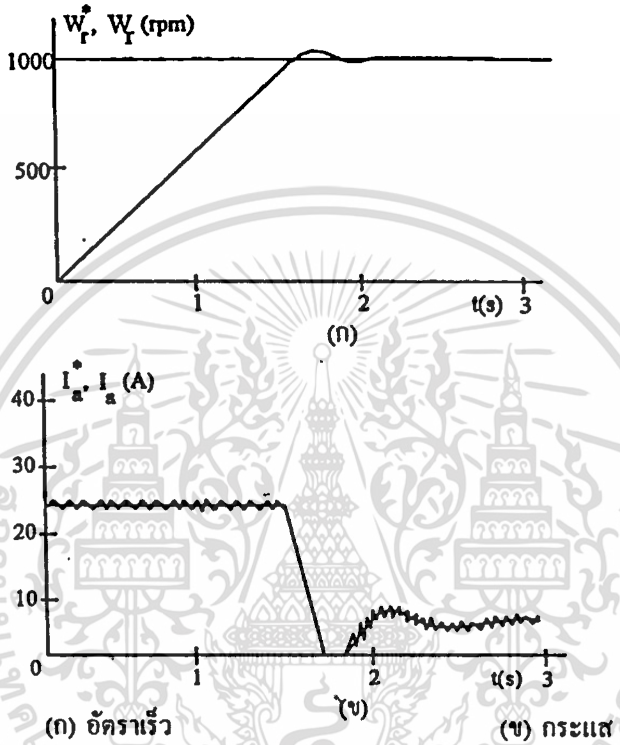


(ก) อัตราเร็ว (ข) กระแส

รูปที่ 13 อาการตอบสนองต่อ W_r แบบขั้นบันได ของระบบควบคุมแบบ FLC (Sousa and Bose, 1994)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสมรรถนะของระบบควบคุมนี้ อาศัยการเลียนแบบระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ทั้งในกรณีที่ตัวควบคุมเป็นแบบ PI ธรรมดา และตัวควบคุมเป็น FLC เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะซึ่งกันและกัน ส่วนหนึ่งของผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนว่า FLC ให้สมรรถนะที่ดีกว่า



รูปที่ 14 อาการตอบสนองต่อ W_r แบบขั้นบันไดของระบบควบคุมแบบ PI (Sousa and Bose, 1994)

(7) สมรรถนะของระบบควบคุมแบบ FLC

ในวงการระบบควบคุม การวัดสมรรถนะ (performance) ของระบบดูกันที่อาการตอบสนองทางเวลา (time-domain response) โรบัสท์เนสส์ (robustness) และเสถียรภาพ (stability) ในเรื่องการตอบสนองทางเวลานั้นเราพิจารณากันที่เวลาไต่ระดับของการตอบสนอง (rise-time) การพุ่งเกิน (overshoot) เวลาปรับตัวของการตอบสนอง (settling time) การสั่นไกว (oscillation) และความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (steady-state error) โรบัสท์เนสส์นั้นเป็นการวัดว่า ระบบควบคุม จะทนทานอยู่ได้มากขนาดไหนก่อนที่จะขาดเสถียรภาพ ถ้าคุณสมบัติของระบบเปลี่ยนไป เช่น จากอายุใช้งาน จากสภาพแวดล้อมในการทำงาน เป็นต้น ระบบที่มีโรบัสท์เนสส์ต่ำหมายความว่า จะขาดเสถียรได้ง่ายหากคุณสมบัติของระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วยปริมาณที่ไม่มากนัก ระบบที่โรบัสท์หรือมีโรบัสท์เนสส์สูงก็จะมีความหมายในทางตรงกันข้าม ในด้านเสถียรภาพนั้น ระบบที่ขาดเสถียรภาพจะไม่สามารถควบคุมได้อีกต่อไป อาจแสดงการตอบสนองที่มีขนาดขยายตัวอย่างไร้ขอบเขต หรืออาจแสดงการกวัดแกว่งไปอย่างต่อเนื่อง ระบบที่มีเสถียรภาพดีนั้น จะสามารถได้รับการควบคุมให้มีการตอบสนอง ตามที่เราต้องการได้โดยง่าย

ในทางทฤษฎี สมรรถนะของระบบควบคุมแบบ FLC ทั้งด้านเสถียรภาพและโรบัสท์เนสส์ก็ยังคงเป็นประเด็นของการค้นคว้าวิจัยและได้รับการถกเถียงกันอย่างกว้างขวางมายาวนานนับสิบปี ซึ่งในปัจจุบันก็ยังไม่อาจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาข้อยุติได้ ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบและสร้าง FLC จึงใช้วิธีการเลียนแบบระบบด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ผลเป็นการตอบสนองทางเวลาของระบบพลวัตที่มีการควบคุมด้วย FLC และเปรียบเทียบผลที่ได้ กับการตอบสนองของระบบพลวัตเดียวกัน เมื่อมีการควบคุมแบบธรรมดา เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่า FLC สามารถปรับปรุงให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

บทสรุป

สิ่งที่ได้บรรยายไว้ในบทความนี้ เริ่มตั้งแต่แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับฟัซซี่เซ็ทและฟัซซี่ลอจิก ปฏิบัติการทางลอจิกรูปแบบต่างๆ ยังได้กล่าวถึงตัวแปรฟัซซี่หรือตัวแปรทางภาษา การให้ความหมายแก่วลีในภาษาพูดของมนุษย์โดยอาศัยคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่ และกล่าวถึงฟัซซี่อัลกอริธึมกับวิธีการเอ็กซิคิวอัลกอริธึมนั้น

นอกจากนั้น บทความยังได้บรรยายถึงโครงสร้างของระบบผู้เชี่ยวชาญและระบบฟัซซี่ไปจนถึงลักษณะของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ เทคนิคที่ต้องใช้ในระบบควบคุม ซึ่งได้แก่ฟัซซิฟิเคชั่นกับดีฟัซซิฟิเคชั่นเทคนิค บทความยังได้ให้ข้อคิดเป็นแนวทางเพื่อการออกแบบและอนุวัตระบบควบคุมแบบฟัซซี่ การกำหนดฟังก์ชั่นแสดงสมาชิกภาพ การสังเคราะห์กฎการควบคุม และได้บรรยายถึงระบบคุมอุณหภูมิของถังกวนที่มีการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ ระบบขับเคลื่อนกระแสตรงที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่เพื่อปรับคุมค่าอัตราเร็ว และกระแสอาร์เมเจอร์ เป็นตัวอย่างพอสังเขป

6. บรรณานุกรม

Driankov D. , Hellendoorn H. and Reinfrank M. (1993). An introduction to fuzzy control. Springer-Verlag.

Gaines B.R. and Shaw M.L.G. (1984). Logical foundation of expert systems. Proc. 1984-IEEE Int. Conf. on SMC: 238-247.

Zadeh L.A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control 8: 338-353.

Zadeh L.A. (1975). The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. Information Sciences 8: 199-249.

7. เอกสารอ้างอิง

Gupta M.M., Kiszka J.B. and Trojan G.M. (1986). Multivariable structure of fuzzy control systems. IEEE Trans. SMC-16 5: 638-655.

King P.J. and Mamdani E.H. (1977). The application of fuzzy control systems to industrial processes. Automatica 13: 235-242.

Lee C.C. (1990). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller-part i and part ii. IEEE Trans. SMC-20 2: 404-418 and 419-435.

Manoranjan V.S., de Sam Lazaro A., Edwards D. and Athalye A. (1995). A system approach to obtaining fuzzy sets for control systems. IEEE Trans. SMC-25 1: 206-213.

Park Y.M., Moon U. and Lee K.Y. (1995). A self-organizing fuzzy logic controller for dynamic systems using a fuzzy auto-regressive moving average (FARMA) model. IEEE Trans. SMC-3 1: 75-82.

Sousa G.C.D. and Bose B.K. (1994). A fuzzy set theory based control of a phase-controlled converter DC machine drive. IEEE Trans. InApplications-30 1: 34-44.

Sujitjorn S., Sookjaras P. and Wainikorn W. (1995). An expert system to forecast visibility in Don-Muang air force base. Proc. 1994 IEEE Int. Conf. on SMC: 2528-2531.

Wang L. and Mendel J.M. (1992). Generating fuzzy rules by learning from examples. IEEE Trans. SMC-22 6: 1414-1427.

Zadeh L.A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision process. IEEE Trans. SMC-3 1: 28-44.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายเดชา พวงดาวเรือง เกิดวันที่ 3 ธันวาคม 2513 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(ไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2536 และเข้าบรรจุเป็นอาจารย์ประจำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536 จนถึงปัจจุบัน เคยเป็นอาจารย์สอนปฏิบัติการที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะศึกษาปริญญามหาบัณฑิต มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 3 บทความ ดังได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้