

ระบบควบคุมเครื่องพับและตัดเหล็กแบบปรับตัวเองได้

An Adaptive Control System of a Bending and Cutting Machine

พรเจริญ สวัสดิ์รักษา

Porncharen Sawadderuksa

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Master of Engineering in Computer Engineering
Prince of Songkla University

2550

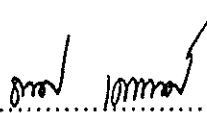
๑ ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่	TK2781	ท47	2550	ร. 2
Lib Key	3006/6			
	-5 ส.ค. 2551			

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ ระบบควบคุมเครื่องพิมพ์และตัดเหล็กแบบปรับตัวเองได้
ผู้เขียน นายพรเจริญ สวัสดิ์รักษา
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

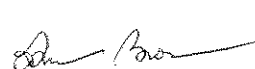
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

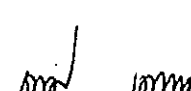

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ เคารพพงษ์)

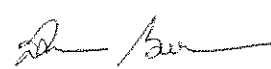
คณะกรรมการสอบ



.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล)


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

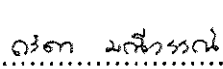

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สินชัย กมลภิวังศ์)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ เคารพพงษ์)

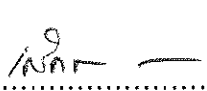

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สินชัย กมลภิวังศ์)


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี กาญจนะเดชะ)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี กาญจนะเดชะ)


.....กรรมการ
(ดร.ฉวีดา มณีวีวรรณ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
คอมพิวเตอร์


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	ระบบควบคุมเครื่องหีบและตัดเหล็กแบบปรับตัวเองได้
ผู้เขียน	นายพรเจริญ สวัสดิ์รักษา
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2550

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบควบคุมแบบปรับตัวเอง โดยประยุกต์หลักการควบคุม แบบฟัซซี่โดยการเรียนรู้จากโมเดลอ้างอิง (Fuzzy Model Reference Learning Control) (FMRLC) มาควบคุมตำแหน่งและความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งเป็นตัวขับในเครื่องหีบและตัดเหล็ก เพื่อป้องกันแผ่นเหล็กเข้าเครื่องหีบและตัดเหล็ก ระบบที่ออกแบบนั้นสามารถเรียนรู้, สร้าง และปรับกฎการควบคุมได้ด้วยตัวเอง ระบบการควบคุมมี 2 ส่วน คือ การควบคุมตำแหน่งและการควบคุมความเร็ว มีการทำงาน 2 ขั้นตอนคือ 1. การเรียนรู้และสร้างกฎการควบคุม 2. การปรับกฎการควบคุมเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง การทดสอบโดยจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วได้ตามที่ต้องการและมีความแม่นยำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด ระบบก็จะปรับกฎการควบคุมได้เอง ทำให้ให้การเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย ใช้เวลาใกล้เคียงหรือเท่ากับในสภาวะ โหลดคงที่ค่าหนึ่งที่กำหนดไว้ การควบคุมจริงได้ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เบอร์ TMS320F2812 เป็นตัวควบคุม ในการทดสอบการปรับความเร็วอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด ได้แบ่งเป็น 2 ตอน คือ 1. ระบบควบคุมที่มีฟัซซี่ควบคุมตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ผลการทดสอบ ในสภาวะไม่มีโหลด การควบคุมมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ± 0.025 มิลลิเมตร และในสภาวะมีโหลด 100 Kg การควบคุมมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ± 0.400 มิลลิเมตร 2. ระบบควบคุมที่มีฟัซซี่ควบคุมตำแหน่งและฟัซซี่ควบคุมความเร็วทำงานร่วมกัน ผลการทดสอบ ในสภาวะไม่มีโหลด การควบคุมมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ± 0.300 มิลลิเมตร และในสภาวะมีโหลด 100 Kg การควบคุมมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ± 0.100 มิลลิเมตร

คำสำคัญ: ฟัซซี่โดยการเรียนรู้จากโมเดลอ้างอิง, มอเตอร์เหนี่ยวนำ, ระบบควบคุมแบบปรับตัวเอง

Thesis Title An adaptive control system of a bending and cutting machine
Author Mr. Porncharen Sawadderuksa
Major Program Computer Engineering
Academic Year 2007

Abstract

This thesis presents an adaptive control system by using fuzzy model reference learning control (FMRLC) to control positions and speeds of a 3 phase induction motor of a bending and cutting machine. The motor is used for feeding metal sheets into the machine. The designed control system can learn, generate and adapt rules by itself. The designing system consists of two parts : position control and speed control. It has two mode of operations the self-learning mode which generates the controlled rules and the adaptive mode which adjust the control rule when the load changes. From MATLAB simulation results, we found that the position and speed controllers can learn to generate the rules, and give an accurate position and speed under varying loads. The settling time of the system is relatively invariant under loads or no load. The implemented of control system is on TMS320F2812 digital signal processor. The experimental results on position test indicate that the average error is ± 0.025 millimeter under no load condition and the average error is ± 0.400 millimeter under 100 Kg load. The experimental results on position and speed test indicate that the average error is ± 0.300 millimeter under no load and the average error is ± 0.100 millimeter under 100 Kg load.

Keywords: fuzzy model reference learning control (FMRLC), induction motor, adaptive control

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ เคารพพงศ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำความรู้ในด้านต่างๆ อีกทั้งสนับสนุนในเรื่องอุปกรณ์ในการทำวิจัย ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สินชัย กมลภิวังศ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางต่างๆ รวมทั้งช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี กาญจนะเดชะ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางต่างๆ รวมทั้งช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ลิ่มสกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.ถวิดา มณีวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบริษัท ทีโอที มหาชน จำกัด ที่ได้มอบทุนการศึกษา ในระดับปริญญาโท

ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารของ บริษัท ทีโอที ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาต่อและสนับสนุนให้ดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสิ้น

ขอขอบคุณ อาจารย์ปราโมทย์ อริยาดิเรก ที่ได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ในเรื่อง พีซีลอคจิกคอนโทรล และให้การช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณนักศึกษاپริญญาโทสาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุนให้ดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสิ้น

และสุดท้ายนี้ ขอน้อมรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ส่งเสริมให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในเรื่องต่างๆ จนกระทั่งข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการศึกษา

พรเจริญ สวัสดิรักษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ.....	(6)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ.....	(11)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 การตรวจเอกสาร	1
1.3 วัตถุประสงค์	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	5
2.1.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	6
2.1.2 แบบจำลองพลศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	8
2.1.3 หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	14
2.2 ทฤษฎีฟิสิกส์ล่อจิก	16
2.2.1 ทฤษฎีฟิสิกส์เซต	17
2.2.2 ฟิสิกส์เซต	19
2.2.3 ฟิลด์ของฟิสิกส์เซต	19
2.2.4 ชิงเกิดตันฟิสิกส์เซต.....	20
2.3 การปฏิบัติการฟิสิกส์ล่อจิก.....	20
2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก.....	21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.4.1	ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก..... 21
2.5	ตัวแปรทางภาษา 23
2.6	ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก..... 24
2.6.1	ฟuzzyพีเคชั่น..... 25
2.6.2	ฐานความรู้ฟuzzyลอจิก..... 26
2.6.3	กลไกอนุมาน..... 26
2.6.4	ดีฟuzzyพีเคชั่น 28
2.7	Fuzzy Model Reference Learning Control..... 30
2.7.1	ตัวควบคุมฟuzzy..... 30
2.7.2	โมเดลอ้างอิง..... 32
2.7.3	กระบวนการเรียนรู้..... 32
3	โครงสร้างและการจำลองการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องหีบและตัดเหล็ก..... 36
3.1	โครงสร้างและการทำงานของเครื่องหีบและตัดเหล็ก..... 36
3.2	ส่วนประกอบ ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วมอเตอร์ในเครื่องหีบและตัดเหล็ก. 37
3.3	แบบจำลอง ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็ว มอเตอร์ในเครื่องหีบและตัดเหล็ก .. 38
3.3.1	แบบจำลองมอเตอร์..... 39
3.3.2	แบบจำลองอินเวอร์เตอร์..... 42
3.3.3	การหาโมเดลอ้างอิง..... 43
3.4	การจำลองการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์..... 47
3.4.1	อินเวอร์เตอร์..... 49
3.4.2	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ 49
3.4.3	ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก..... 50
3.5	การทดลอง และผลการทดลอง..... 51
3.5.1	การสร้างกฎการควบคุมให้กับฟuzzyควบคุมตำแหน่ง 52

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.5.2	การสร้างกฎการควบคุมให้กับพีซีที่ควบคุมความเร็ว และการทดสอบการปรับความเร็วอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด 53
4	ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก 58
4.1	ส่วนฮาร์ดแวร์..... 58
4.1.1	บอร์ดควบคุม DSP..... 59
4.1.2	อินเวอร์เตอร์ 60
4.1.3	เอนโคเดอร์ 60
4.1.4	ลิมิตสวิตช์..... 62
4.1.5	บอร์ดเอาต์พุต..... 63
4.1.6	บอร์ด D/A TLV5619-5639EVM..... 64
4.2	ส่วนซอฟต์แวร์..... 65
4.2.1	ไฟล์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมควบคุม 65
4.2.2	การออกแบบตัวควบคุมพีซีลอจิก 69
5	ผลและการอภิปรายผลการทดลอง..... 76
5.1	การสร้างกฎการควบคุมให้กับพีซีที่ควบคุมตำแหน่ง 76
5.1.1	การบันทึกค่าการปรับกฎ..... 76
5.1.2	การทดสอบกฎของพีซีที่ควบคุมตำแหน่ง 81
5.1.3	การเปรียบเทียบระหว่างผลการควบคุมที่ได้จากการปรับอัตโนมัติ กับผลการทดลองจากงานวิจัย [10]..... 84
5.2	การสร้างกฎการควบคุมให้กับพีซีที่ควบคุมความเร็ว..... 87
5.2.1	การบันทึกค่าการปรับกฎ..... 87
5.2.2	ทดสอบกฎของพีซีที่ควบคุมความเร็ว 99
5.2.3	การเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการทดลอง 5.1 กับการทดลอง 5.2 102
5.3	การทดสอบการปรับความเร็วอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด 105

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 114
6.1	บทสรุป..... 114
6.2	ปัญหา และข้อเสนอแนะ 118
เอกสารอ้างอิง.....	119
ภาคผนวก.....	121
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	121
ประวัติผู้เขียน.....	126

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3-1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวควบคุมพีซีซีในระบบการควบคุม.....	48
5-1 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในรอบการปรับกฎพีซีซีควบคุมตำแหน่ง.....	77
5-2 แสดงกฎของพีซีซีควบคุมตำแหน่งที่ได้จากการทดลอง.....	80
5-3 ผลการทดสอบกฎของพีซีซีควบคุมตำแหน่ง.....	81
5-4 ผลการทดลองเชิงเปรียบเทียบระหว่าง ผลการควบคุมที่ได้จากการปรับอัตโนมัติ กับ ผลการทดลองจากงานวิจัย [10].....	84
5-5 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในรอบการปรับกฎพีซีซีควบคุมความเร็ว.....	90
5-6 แสดงกฎพีซีซีควบคุมความเร็วที่ได้จากการทดลอง.....	98
5-7 ผลการทดสอบกฎของพีซีซีควบคุมความเร็ว.....	99
5-8 ผลการทดลองเชิงเปรียบเทียบระหว่าง การทดลอง 5.1 กับการทดลอง 5.2	102
5-9 แสดงผลการควบคุมตำแหน่ง ในแบบการทดสอบที่ 1	106
5-10 แสดงผลการควบคุมตำแหน่ง ในแบบการทดสอบที่ 2.....	108
5-11 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการควบคุม ทั้ง 2 แบบการทดสอบ.....	112

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2-1 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2].....	7
2-2 แกน d เกิดจากสนามแม่เหล็กหลัก และแกน q เกิดจากสนามแม่เหล็กบน โรเตอร์[2].....	8
2-3 การย้ายแกนของระบบไฟฟ้า 3 เฟสให้อยู่บนแกน d-q	9
2-4 การแปลงแรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่งไปอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วย ความเร็วเชิงมุม ω_r [15].....	12
2-5 คริสป์เซตความเร็วสูง (ของรถจักรยานยนต์)	17
2-6 ฟัซซี่เซตความเร็วสูง (ของรถจักรยานยนต์).....	18
2-7 ตัวแปรภาษากำหนดคุณหมิน้ำ	24
2-8 ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่.....	25
2-9 การอนุมาน โดยวิธีของแมมคานี [10].....	28
2-10 Fuzzy model reference learning control [19]	31
2-11 Input – output universes of discourse and rule – base for the	34
3-1 โครงสร้างเครื่องพิมพ์และตัดเหล็ก [10].....	36
3-2 ส่วนประกอบของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็ว	37
3-3 ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์	38
3-4 วงจรสมมูลพลศาสตร์บนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิง โครนัส.....	39
3-5 โครงสร้างการทดสอบหาโมเดลอ้างอิงการควบคุมตำแหน่ง	44
3-6 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมในงานวิจัยอ้างอิง[10] และ โมเดลอ้างอิง	44
3-7 โครงสร้างการทดสอบหาโมเดลอ้างอิงการควบคุมตำแหน่ง	45
3-8 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถี่ซึ่งคำนวณจากความเร็วของ มอเตอร์	46
3-9 โครงสร้างการสร้างกฎการควบคุมให้ฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง	47
3-10 โครงสร้างการสร้างกฎการควบคุมให้ฟัซซี่ควบคุมความเร็ว	47
3-11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนอินเวอร์เตอร์ [10].....	49
3-12 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำ [10].....	49
3-13 แบบจำลองของฟัซซี่อินเวอร์สตำแหน่ง	50
3-14 แบบจำลองของฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง	50

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3-15 แบบจำลองของฟิชชีอินเวอร์เตอร์ความเร็ว	51
3-16 แบบจำลองของฟิชชีควบคุมความเร็ว	51
3-17 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ในการสร้างกฎการควบคุมให้กับฟิชชีควบคุมตำแหน่ง	52
3-18 แสดงกฎฟิชชีควบคุมตำแหน่งที่ได้จากการปรับ	53
3-19 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ในการสร้างกฎการควบคุมให้กับฟิชชีควบคุมความเร็ว และการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของโหลด	54
3-20 แสดงกฎฟิชชีควบคุมความเร็วที่ได้จากการปรับ	55
3-21 ความเร็วของมอเตอร์ที่เวลาต่างๆ	56
3-22 ความเร็วของมอเตอร์ ขณะมีโหลด 2 N.m	56
3-23 ความเร็วของมอเตอร์ ขณะมีแรงเสถียร ขนาด 2 N.m	57
4-1 ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก	58
4-2 รูปบอร์ดควบคุม TMS320F2812 DSP และอุปกรณ์ต่างๆ	59
4-3 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับมอเตอร์ [10]	60
4-4 แสดงสัญญาณเอาท์พุทของเอน โคลเดอร์ตำแหน่งแบบเพิ่ม	61
4-5 เอน โคลเดอร์ตำแหน่งแบบเพิ่มค่า ยี่ห้อ OMRON [10]	61
4-6 การตรวจจับขอบขาขึ้น และขอบขาลงของทั้ง 2 เฟส	62
4-7 วิธีการตรวจจับทิศทางการหมุนของเอน โคลเดอร์	62
4-8 ลิมิตสวิทช์ ที่ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของตัววัฏระยะ [10]	63
4-9 บอร์ดวงจรเอาท์พุท	63
4-10 วงจรเอาท์พุท ควบคุมทิศทางการหมุน [10]	64
4-11 บอร์ด D/A TLV5619-5639EVM	65
4-12 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของ โปรแกรมควบคุม	66
4-13 โฟลว์ชาร์ตการเข้าหาตำแหน่งเริ่มต้น	68
4-14 กฎการควบคุมของตัวฟิชชีอินเวอร์เตอร์ตำแหน่ง	72
5-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ลำดับที่ และค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย	78

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ลำดับที่ และค่าเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เข้าสู่ เป้าหมายที่ ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร	79
5-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมาย และค่าความผิดพลาด	82
5-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมาย และค่าเวลาที่ใช้	83
5-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมาย และค่าความผิดพลาด	86
5-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมาย และค่าเวลาที่ใช้	86
5-7 การเคลื่อนที่ของกฎที่ถูกปรับ	88
5-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ และค่าความผิดพลาด	96
5-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเคลื่อนที่และค่าเวลาที่ใช้	97
5-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเป้าหมาย และค่าความผิดพลาด	100
5-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเป้าหมายที่ระยะต่างๆ และค่าเวลาที่ใช้	101
5-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายและค่าความผิดพลาด เปรียบเทียบระหว่างการ ทดลอง 5.1 และ การทดลอง 5.2.....	103
5-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมาย และเวลาที่ใช้ เปรียบเทียบระหว่างการทดลอง 5.1 และ การทดลอง 5.2.....	104
5-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ กับค่าความผิดพลาด ในสถานะไม่มีโหลดและมีโหลด 100 kg.....	107
5-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ กับค่าเวลาที่ใช้ ในสถานะไม่มีโหลด และมีโหลด 100 kg.....	107
5-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ กับค่าความผิดพลาด ในสถานะไม่มีโหลดและมีโหลด 100 kg.....	109
5-17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ กับค่าเวลาที่ใช้ ในสถานะไม่มีโหลด และมีโหลด 100 kg.....	109
5-18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ และค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสถานะไม่มี โหลด.....	110
5-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ และค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสถานะมี โหลด 100 kg.....	111

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ และค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสถานะไม่มี โหลด.....	111
5-21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ และค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสถานะมีโหลด 100 kg.....	112
6-1 แสดงการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย 100 มิลลิเมตร.....	115
6-2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ควบคุม	115
6-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของ โมเดลอ้างอิงและมอเตอร์.....	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกได้ถูกนำมาใช้ในงานควบคุมต่างๆ มากขึ้น เนื่องจากตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก สามารถควบคุมระบบที่มีความสลับซับซ้อน, ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและระบบที่ไม่สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือระบบที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ชัดเจน ซึ่งระบบงานดังกล่าวนี้ถ้าหากใช้การควบคุมแบบเดิม (PD,PI และ PID) จะมีความยุ่งยากและเสียเวลามาก

การออกแบบกฎของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ต้องอาศัยความรู้ และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ จะมีความยุ่งยากมากขึ้นถ้าหากระบบมีความซับซ้อน ซึ่งจำเป็นต้องใช้กฎการควบคุมจำนวนมาก จึงเกิดแนวคิดใหม่ในการพัฒนาตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ให้สามารถเรียนรู้ระบบและปรับกฎการควบคุมได้ด้วยตัวเอง ซึ่งก็มีหลายวิธีด้วยกันเช่น การใช้วิธีโครงข่ายเซลล์ประสาท, การใช้วิธีเจนเนติก, การใช้หลักการควบคุมแบบฟัซซี่โดยการเรียนรู้จากโมเดลอ้างอิง (Fuzzy Model Reference Learning Control) (FMRLC) และวิธีอื่นๆ

งานวิจัยนี้ได้นำหลักการ FMRLC มาใช้ในการสร้างระบบที่สามารถเรียนรู้, สร้างและปรับกฎการควบคุมได้ เนื่องจากการควบคุมแบบ FMRLC นั้นใช้หลักการพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ซึ่งง่ายในการออกแบบ พัฒนาและประยุกต์ใช้งานต่างๆ สำหรับในงานวิจัยนี้นั้นจะนำมาควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งเป็นตัวขับในเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก เพื่อป้องกันแผ่นเหล็กเข้าเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 ตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตัวเอง (รัชนี้ สุภัคพาณิชย์ กิตติ ไพบูลย์ วัฒนกิจ และ นิमित บุญภิรมย์ , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 2541:437-440) งานวิจัยนี้นำเสนอตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตัวเอง โดยใช้หลักการวิเคราะห์ทางเดินของ

สถานะในการตรวจสอบว่ากฎใดควรถูกปรับ และใช้ฟังก์ชันอิมิตัวเป็นค่าถ่วงน้ำหนักในการเลื่อนกฎ จุดประสงค์เพื่อต้องการหาโครงสร้างกฎที่เหมาะสม สำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง ในกรณีที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบมาก่อน โดยทำการทดสอบที่สภาวะชั่วขณะด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ และกำหนดค่าสมรรถนะให้มีเปอร์เซ็นต์พุ่งเกินน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองพบว่า ตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตัวเอง สามารถทำการเรียนรู้และปรับโครงสร้างของกฎให้ระบบมีสมรรถนะตามที่กำหนดไว้ได้ แต่เวลาในการเข้าถึงความเร็วที่ต้องการนั้นยังช้า

1.2.2 การควบคุมการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ฟัซซี่ลอจิกที่เรียนรู้ได้ด้วยตัวเอง (ภากร ศันสนียวานิช, สุวรรณ อรุณวิวัฒน์, เสริมศักดิ์ เลิศม โนรัตน์ และ พิศิษฐ์ โภการรัตน์ กุล) งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ Fuzzy Logic Control ที่สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตัวเอง (SOFLC) ได้นำเสนอการควบคุมแบบ Fuzzy PD Controller โดยระบบจะควบคุม DC Motor ซึ่งเป็นตัวขับ Synchronous Machine ให้ได้ความเร็ว Synchronous ที่ 1500 rpm เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความถี่เท่ากับ 50 Hz ในขณะเดียวกันต้องควบคุมขนาดของกระแสกระตุ้นของ Synchronous Machine เพื่อให้แรงดันออกมามีขนาด 220 Volt จากผลการทดลองพบว่า ระบบควบคุมที่นำเสนอนี้สามารถเรียนรู้ได้ระดับหนึ่ง ประสิทธิภาพของระบบควบคุมเป็นที่น่าพอใจ ทั้งในด้านผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง และผลตอบสนองต่อการรบกวนภายนอก และได้สรุปในตอนท้ายว่า ประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟัซซี่ที่ออกแบบนั้น ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ที่ใส่ลงไปให้ระบบเรียนรู้ เพราะฉะนั้นโครงสร้างในการเรียนรู้มีส่วนสำคัญมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับ 2 สิ่งคือ หลักการเรียนรู้ และบทเรียนที่ป้อนให้กับระบบ และจะต้องสัมพันธ์กัน

1.2.3 Fuzzy Model Reference Learning Control for Cargo Ship Steering (Jeffery R.Layne and Kevin M.passino,IEEE 1993:457-462) งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์หลักการควบคุมแบบ Fuzzy Model Reference Learning Control มาควบคุมการบังคับทิศทาง การเคลื่อนที่ของเรือสินค้า โดยได้จำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์และได้เปรียบเทียบผลการควบคุมกับการควบคุมแบบ Model Reference Adaptive Control (MRAC) ผลการทดสอบสรุปได้ว่าการควบคุมแบบ FMRLC สามารถปรับกฎการควบคุมได้เร็วกว่า การควบคุมแบบ MRAC

1.2.4 Model Reference Adaptive Fuzzy Control for Induction Motor Using Auto-Attentive Approach (Ahmed EI Dessouky and Mohammed Tarbouchi ,IEEE 2000 :719-723) งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์หลักการควบคุมแบบ FMRLC มาใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้การปรับกฎแบบ Auto-Attentive ซึ่งได้จำลองการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ผลการทดสอบระบบสามารถควบคุมความเร็วได้ตามต้องการ เมื่อมีการรบกวน

จากภายนอก ระบบก็จะทำการปรับตัวเองให้ความเร็วเท่ากับความเร็วเป้าหมายได้ และมีความเร็วในการปรับได้ดีกว่าวิธีการควบคุมเดียวกันแต่มีการปรับกฎแบบธรรมดา

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาหลักการควบคุมตำแหน่ง และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการป้อนแผ่นเหล็กเข้าเครื่องพับและตัดเหล็ก

1.3.2 เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ให้มีประสิทธิภาพ โดยระบบจะต้องเข้าสู่เป้าหมายเร็วและมีความแม่นยำสูง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอ การควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ใช้ในการป้อนแผ่นเหล็กเข้าเครื่องพับและตัดเหล็กสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะทำการจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นจึงสร้างระบบควบคุมขึ้น ระบบควบคุมทั้งหมดจะเป็นซอฟต์แวร์ที่ประมวลผลด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ตระกูล TMS320F2812 DSP โดยใช้หลักการควบคุมแบบฟัซซี่ โดยการเรียนรู้จากโมเดลอ้างอิง (Fuzzy Model Reference Learning Control) เป็นตัวควบคุมระบบ ซึ่งจะทำการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ เพื่อให้สามารถป้อนแผ่นเหล็กที่จะพับและตัดได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาหลักการทำงานของระบบที่ต้องการควบคุม
- 1.5.2 ศึกษาหลักการควบคุมทางดิจิทัลและตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก
- 1.5.3 สร้างแบบจำลองของระบบที่ต้องการควบคุม
- 1.5.4 ออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์
- 1.5.5 จำลองการทำงานของระบบควบคุม โดยใช้โปรแกรม MATLAB
- 1.5.6 สร้างระบบควบคุมจริง

1.5.7 ทดสอบการทำงานของระบบทั้งหมดซึ่งควบคุม โดยการประยุกต์หลักการควบคุมแบบ FMRLC

1.5.8 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ

1.5.9 สรุปผล และเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อไป

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ต้นแบบชุดควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถนำไปใช้ในเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก สำหรับ โรงงานอุตสาหกรรมได้

1.6.2 เสริมสร้างและพัฒนาความรู้ความเข้าใจในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและ นำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ รวมถึงสามารถถ่ายทอดความรู้เหล่านี้ต่อไปได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการประยุกต์ หลักการควบคุมแบบฟัซซี่ โดยการเรียนรู้จากโมเดลอ้างอิง (Fuzzy Model Reference Learning Control) มาควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งเป็นตัวขับในเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก เพื่อป้อนแผ่นเหล็กเข้าเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก จุดประสงค์เพื่อสร้างระบบที่สามารถเรียนรู้, สร้างและปรับกฎการควบคุมได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือพารามิเตอร์ของระบบ, จะต้องควบคุมให้มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ และใช้เวลาในการเข้าสู่เป้าหมายต่ำ ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุมแบบ FMRLC นั้นจำเป็นต้องอาศัยความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีฟัซซี่ลอจิก สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ, ทฤษฎีฟัซซี่ลอจิก และการควบคุมแบบ FMRLC ซึ่งจะ ได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาไม่แพง, มีความเร็วค่อนข้างคงที่ และสะดวกในการบำรุงรักษา มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนคือ สเตเตอร์ (Stator) และ โรเตอร์ (Rotor) อธิบายรายละเอียดแต่ละส่วนได้ดังนี้

- สเตเตอร์ เป็นส่วนที่อยู่กับที่ทำจากแผ่นเหล็กบางอัดซ้อนกัน และอัดเป็นแท่งรูปทรงกระบอก และมีร่องสเตเตอร์ (Slot) เพื่อใช้สำหรับพันขดลวดซึ่งจะพันขดลวดไว้เป็น 3 เฟส
- โรเตอร์ มี 2 ชนิด คือ
 - โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) ประกอบด้วยแท่งอะลูมิเนียมฝังอยู่ในโรเตอร์ ซึ่งเป็นเหล็กอ่อนแผ่นบางๆ ปลายทั้งสองด้านของแท่งอะลูมิเนียมจะเชื่อมเข้าด้วยกัน
 - โรเตอร์พันด้วยขดลวด (Wound Rotor) ตัวโรเตอร์จะมี Slot สำหรับพันขดลวด 3 ชุด โดยพันให้จำนวนขั้วแม่เหล็กเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้าน

สเตเตอร์ ปลายด้านหนึ่งของขดลวดโรเตอร์จะต่อร่วมกัน และปลายที่เหลือจะมาต่อเข้ากับวงแหวนลื่น (Slip Ring) แยกกันแต่ละชุด

2.1.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อป้อนไฟฟ้าสามเฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ และจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัวโรเตอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่ตัวโรเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนที่ตัวสเตเตอร์ จะดึงดูดให้สนามแม่เหล็กที่ตัวโรเตอร์หมุนตามไปด้วย จึงทำให้ตัวโรเตอร์ หมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ เรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (n_s) ซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.1)

$$n_s = \frac{120 * f}{p} \quad (2.1)$$

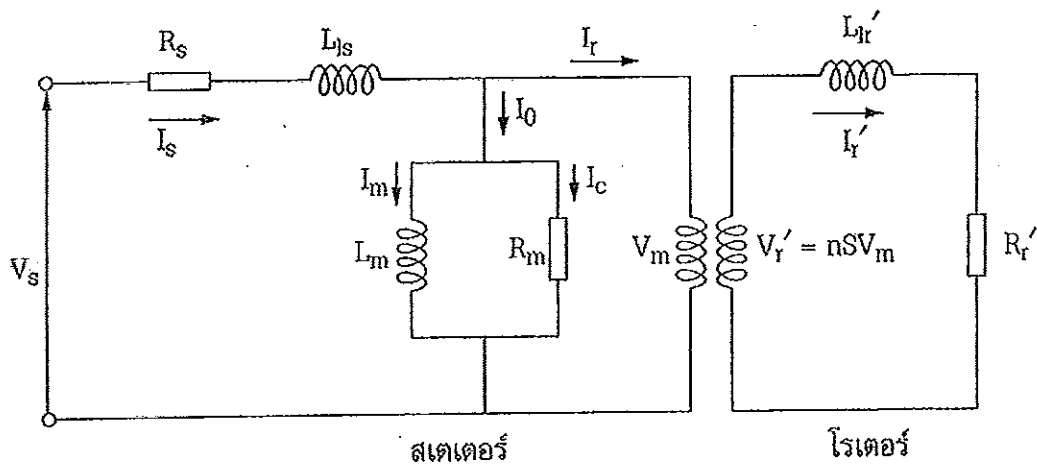
เมื่อ n_s = ความเร็วซิงโครนัส (รอบต่อนาที หรือ rpm)
 f = ความถี่ของแรงดันสเตเตอร์ (Hz)
 p = จำนวนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ต่อ เฟส

ส่วนความเร็วที่โรเตอร์ (n_r) จะต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเพราะว่า โหลดของมอเตอร์ ความแตกต่างของความเร็วทั้งสองนี้เรียกว่า สลิป (Slip) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.2)

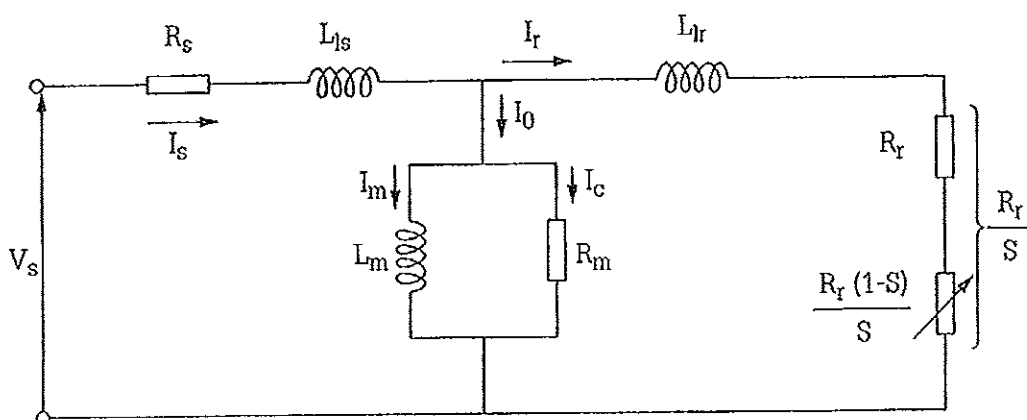
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.2)$$

เมื่อ S = สลิป
 n_s = ความเร็วซิงโครนัส (รอบต่อนาที หรือ rpm)
 n_r = ความเร็วโรเตอร์ (รอบต่อนาที หรือ rpm)

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า เพียงแต่ต่างกันตรงที่ด้านทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถหมุนได้ ดังนั้นสามารถเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ในลักษณะเดียวกันกับหม้อแปลงไฟฟ้าทุกประการ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-1



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 2-1 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2]

จากภาพประกอบ 2-1

$$I_r = nI_r' = \frac{n^2 S V_m}{R_r' + j\omega_{sl} L_{lr}'} \quad (2.3)$$

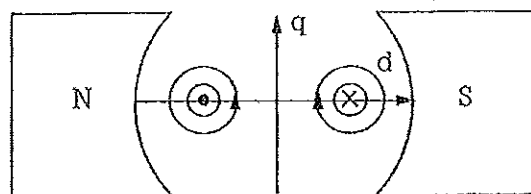
$$I_r = \frac{V_m}{\left(\frac{R_r}{S}\right) + j\omega_e L_{lr}} \quad (2.4)$$

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ R_r และ L_{lr} เป็นค่าที่โอนไปไว้ทางสเตเตอร์แล้ว จากภาพประกอบ 2-1 และสมการข้างต้น จะเห็นว่าถ้าค่าสลิป S ยิ่งมาก I_r ก็ยิ่งมาก ณ จุดที่มอเตอร์หยุดนิ่ง ค่าสลิป $S = 1$ เปรียบเสมือนการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง และ ที่ความเร็วซิงโครนัส ค่าสลิป $S = 0$ เปรียบเสมือนการเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง การรับภาระของมอเตอร์ก็จะถูกส่งผ่านเข้าสู่ระบบในรูปของการเปลี่ยนค่าสลิป S ถ้าภาระน้อย ค่าสลิป S ก็เข้าใกล้ 0 แต่ถ้าภาระมาก ค่าสลิป S ก็เข้าใกล้ 1

2.1.2 แบบจำลองพลศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

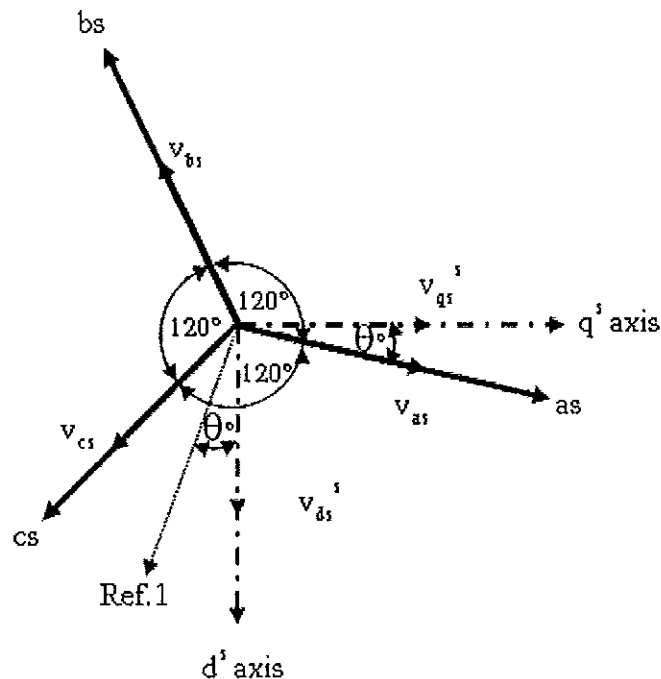
จากการพิจารณาค่าตัวแปรเป็นค่าต่อเฟสในวงจรสมมูล ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พบว่าจะมีความถูกต้องเมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) เท่านั้น กล่าวคือมอเตอร์รับโหลดคงที่ หรือหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ แต่ในการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ หรือที่เรียกว่า สภาวะเปลี่ยนแปลง (Transient State) เช่น เกิดความเร็ว, เบรก หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดทางกล

เพื่อให้การควบคุมมอเตอร์กระแสสลับเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะมองมอเตอร์กระแสสลับให้เป็นมอเตอร์กระแสตรงเพื่อง่ายต่อการควบคุม และวิธีดังกล่าวสามารถทำได้โดยการ โอนย้ายตัวแปรต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้มาอยู่บนแกน d - q ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแสดงไว้ดังภาพประกอบ 2-2



ภาพประกอบ 2-2 แกน d เกิดจากสนามแม่เหล็กหลัก และแกน q เกิดจากสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์

2.1.2.1 การย้ายแกน



ภาพประกอบ 2-3 การย้ายแกนของระบบไฟฟ้า 3 เฟสให้อยู่บนแกน d-q
ในระบบแกนอ้างอิงคงที่ [2]

จากภาพประกอบ 2-3 เป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันที่จ่ายให้สเตเตอร์ as, bs และ cs กับแกน d^s และ q^s ซึ่งจะทำให้การย้ายแกนของแรงดัน 3 เฟสเข้าหา สำหรับสัญลักษณ์ของเฟส a,b,c และแกน d,q นั้น จะใช้สัญลักษณ์ s ตัวล่างเพื่อบอกว่าเฟสเซอร์และแกนที่อ้างอิงอยู่บนสเตเตอร์ ส่วน s ตัวบนแทนแกนอ้างอิงที่อยู่หนึ่ง (Stationary Axis) มุม θ เป็นมุมระหว่างเฟส a และแกน q ซึ่งจะมีค่าเป็นเท่าใดก็ได้ เริ่มการพิจารณา ดังต่อไปนี้

1. พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน v_{d^s} และ v_{q^s} บนแกน as

1.1 องค์ประกอบของ v_{q^s} บนแกน as คือ $v_{q^s} \cos \theta$

1.2 องค์ประกอบของ v_{d^s} บนแกน as คือ $v_{d^s} \sin \theta$

ทั้งนี้อ้างอิงมุม θ กับแกน Ref.1 ซึ่งตั้งฉากกับ as ทำให้แกน Ref.1 ทำมุม θ กับแกน d^s ด้วย

2. พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน v_{d^s} และ v_{q^s} บนแกน bs

2.1 องค์ประกอบของ v_{q^s} บนแกน bs คือ $v_{q^s} \cos (120 - \theta)$

แต่เนื่องจาก $\cos(-\theta) = \cos\theta$ จึงอาจเขียนเป็น $v_{qs}^s \cos(\theta-120)$

2.2 องค์ประกอบของ v_{ds}^s บนแกน bs คือ $v_{ds}^s \cos(90+(120-\theta))$ โดยมุม 90 องศา คือ มุมระหว่าง d^s กับ q^s ส่วน $(120-\theta)$ คือมุมระหว่าง q^s กับ bs, ใช้กฎการกระจายของ ฟังก์ชันตรีโกณมิติ จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$v_{ds}^s [\cos 90 \cos(120-\theta) - \sin 90 \sin(120-\theta)]$$

ซึ่งก็คือ $-v_{ds}^s \sin(120-\theta)$ แต่เนื่องจาก $-\sin\theta = \sin(-\theta)$

$$\text{ดังนั้นจะได้} \quad -v_{ds}^s \sin(120-\theta) = v_{ds}^s \sin(\theta-120)$$

3. พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน v_{ds}^s และ v_{qs}^s บนแกน cs

3.1 องค์ประกอบของ v_{qs}^s บนแกน cs คือ $v_{qs}^s \cos(120+\theta)$

3.2 องค์ประกอบของ v_{ds}^s บนแกน cs

$$\text{มุมระหว่าง } d^s \text{ กับ cs คือ } 360-(120+120+90-\theta) = 30+\theta$$

แต่เนื่องจาก $\cos(30+\theta) = \sin(120+\theta)$ ดังนั้นจะได้ $v_{ds}^s \sin(\theta+120)$

จากผลการพิจารณาข้างต้น นำมาเขียนสมการของแรงดัน v_{as}, v_{bs} และ v_{cs} ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta-120) & \sin(\theta-120) & 1 \\ \cos(\theta+120) & \sin(\theta+120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \\ v_{0s}^s \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

โดย v_{0s}^s คือ องค์ประกอบของแรงดันลำดับศูนย์ (Zero-sequence Component)

ในกรณีที่เฟสทั้งสามสมดุล แรงดันลำดับศูนย์จะไม่ปรากฏ แต่ส่วนที่เป็นแรงดันลำดับศูนย์นี้ เมื่อไปปรากฏเป็นส่วนหนึ่งในสมการของ v_{as}, v_{bs} และ v_{cs} เฟสเซอร์หนึ่งหน่วยของแรงดันลำดับศูนย์ที่แฝงอยู่ในเฟสทั้งสามนี้ ก็จะเกิดสมดุลและหักล้างกัน

จากสมการ (2.5) ทำอินเวอร์สเมตริกซ์ จะได้

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \\ v_{0s}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ \sin\theta & \sin(\theta-120) & \sin(\theta+120) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

เพื่อให้การพิจารณาเป็นไปได้ง่ายขึ้น จะกำหนดให้ $\theta = 0$ ซึ่งจะทำให้แกน q' ทับกับแกน as พอดี และเนื่องจากการพิจารณากระทำบนสมมติฐานที่ว่าแรงดันทั้ง 3 เฟสสมดุล ดังนั้นผลของแรงดันลำดับศูนย์ จะหักล้างกันไปเอง จึงสามารถแยกเขียนสมการให้ดูง่ายขึ้น ได้ดังนี้

$$v_{as}^s = v_{qs}^s \quad (2.7)$$

$$v_{bs}^s = -\frac{1}{2}v_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s \quad (2.8)$$

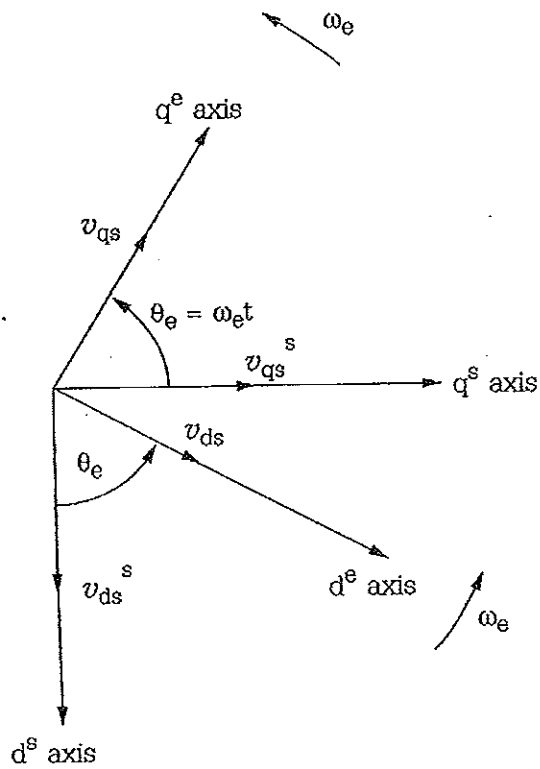
$$v_{cs}^s = -\frac{1}{2}v_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s \quad (2.8)$$

และจากสมการที่ได้ทำอินเวอร์สเมตริกซ์ จะได้

$$v_{qs}^s = \frac{2}{3}v_{as}^s - \frac{1}{3}v_{bs}^s - \frac{1}{3}v_{cs}^s = v_{as}^s \quad (2.10)$$

$$v_{ds}^s = -\frac{1}{\sqrt{3}}v_{bs}^s + \frac{1}{\sqrt{3}}v_{cs}^s \quad (2.11)$$

แรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่งนี้ สามารถแปลงไปอยู่บนแกนอ้างอิงซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_c ได้โดยใช้ภาพประกอบ 2-4



ภาพประกอบ 2-4 การแปลงแรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่งไปอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_e [15]

เพื่อให้ง่ายต่อการเขียน จะเขียน v_{ds} และ v_{qs} ซึ่งอยู่บนแกน d^s และ q^s โดยละเว้นการเขียนตัวห้อย e ไว้ข้างบน จากภาพประกอบ 2-4 จะได้ว่า

$$v_{qs} = v_{qs}^s \cos \omega_e t - v_{ds}^s \sin \omega_e t \quad (2.12)$$

$$v_{ds} = v_{qs}^s \sin \omega_e t + v_{ds}^s \cos \omega_e t \quad (2.13)$$

และสามารถแปลงแกนเคลื่อนที่ให้มีมาอยู่บนแกนหยุดนิ่งได้ดังนี้

$$v_{qs}^s = v_{qs} \cos \omega_e t + v_{ds} \sin \omega_e t \quad (2.14)$$

$$v_{ds}^s = -v_{qs} \sin \omega_e t + v_{ds} \cos \omega_e t \quad (2.15)$$

พิจารณาตัวอย่างดังต่อไปนี้

$$v_{as} = V_{sm} \cos \omega_e t \quad (2.16)$$

$$v_{bs} = V_{sm} \cos(\omega_e t - 120) \quad (2.17)$$

$$v_{cs} = V_{sm} \cos(\omega_e t + 120) \quad (2.18)$$

ทำการแปลงแรงดันทั้ง 3 เฟสให้ไปอยู่บนแกน q^s และ d^s จะได้

$$v_{qs}^s = V_{sm} \cos \omega_e t \quad (2.19)$$

$$v_{ds}^s = -V_{sm} \sin \omega_e t \quad (2.20)$$

จากนั้นก็แปลงแรงดันบนแกนหยุดนิ่งให้ไปอยู่บนแกนที่เคลื่อนที่ จะได้

$$v_{qs} = V_{sm} = \hat{V}_m \quad (2.21)$$

$$v_{ds} = 0 \quad (2.22)$$

เมื่อ V_m เป็นแรงดันเทียบเท่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากความสัมพันธ์ตามสมการข้างต้น จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์และมีความเร็วเชิงมุม ω_e เมื่อสังเกตบนแกนหยุดนิ่ง กลับไปปรากฏเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงบนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคจร ω_e และสิ่งที่สังเกตได้อีกอย่างหนึ่งก็คือแรงดันที่ไปปรากฏนั้น จะเป็นแรงดันซึ่งอยู่บนแกน q ซึ่งแกน q นี้ถ้าเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือ แกนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากโรเตอร์ และขดลวดซึ่งอยู่บนโรเตอร์ของมอเตอร์

กระแสตรงนั้นคือ อาร์เมเจอร์ ในขณะที่แรงดันบนแกน q ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เกิดจากการจ่ายไฟเข้าทางสเตเตอร์ ซึ่งเป็นที่วางขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสสลับเช่นกัน ดังนั้นถ้ามองในมุมของแกน $d-q$ แล้ว อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งอยู่บนโรเตอร์ ก็คือ อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสสลับ ซึ่งอยู่บนสเตเตอร์นั่นเอง และจากสมการ $v_{ds} = 0$ ก็เพราะว่ายังไม่พิจารณาถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าบนโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั่นเอง

2.1.3 หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีหลักการควบคุมความเร็ว คือ ต้องควบคุมความเร็วเชิงโคโรนัสให้ได้จึงจะสามารถควบคุมความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังสมการ (2.1) และ (2.2) โดยจะสามารถควบคุมได้ ดังนี้

2.1.3.1 การควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนขั้วแม่เหล็ก

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก ถ้าเปลี่ยนแปลงการต่อปลายของขดลวดสเตเตอร์ใหม่ สามารถทำให้ขั้วแม่เหล็กต่อเฟสที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงได้ ผลคือความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไป แต่การเปลี่ยนแปลงนี้ จะเปลี่ยนแปลงความเร็วเป็นขั้นๆ ไม่เรียบเหมือนวิธีอื่นๆ เช่น เปลี่ยนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์จาก 4 ขั้ว ไปเป็น 8 ขั้ว จะสามารถเปลี่ยนความเร็วจาก 1,500 rpm เป็น 750 rpm (ที่ความถี่ไฟสลับ 50Hz)

2.1.3.2 การควบคุมแบบความถี่คงที่

การควบคุมแบบความถี่คงที่ที่สามารถที่จะทำการควบคุมได้ 2 วิธีด้วยกันคือ

1. การควบคุมแรงดันสเตเตอร์

วิธีการปรับแรงดันสเตเตอร์ของแหล่งจ่าย 3 เฟส โดยความถี่ไฟสลับคงที่ วิธีการนี้สามารถนำมาควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้ทั้งชนิดโรเตอร์กรงกระรอกและโรเตอร์แบบพันขดลวด แต่สามารถควบคุมความเร็วได้ในย่านแคบๆ เนื่องจากทอร์กของมอเตอร์แปรผันกับแรงดันยกกำลังสอง การปรับแรงดันที่สเตเตอร์ทำให้ค่าสลิปเปลี่ยนแปลงไป และความเร็วรอบของมอเตอร์จะถูกกำหนดด้วยทอร์กของโหลด

2. การควบคุมแรงดันโรเตอร์

วิธีการนี้ใช้ได้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีโรเตอร์แบบพันขดลวดเท่านั้น เพราะสามารถต่อวงจรโรเตอร์กับวงจรควบคุมภายนอกได้ ทำได้ 2 วิธีคือ

- วิธีเปลี่ยนค่าความต้านทาน โดยใช้ความต้านทานภายนอกต่อกับวงจรโรเตอร์ผ่านสลิปริงของโรเตอร์และวิธีชอปเปอร์
- วิธีควบคุมแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในโรเตอร์

2.1.3.3 การควบคุมความถี่ปรับค่า

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยการควบคุมความถี่ที่ปรับค่าได้นั้น เป็นวิธีที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง เพราะว่าย่านของการควบคุมความเร็วกว้างมากกว่าวิธีอื่นๆ การปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับ 3 เฟส ที่ป้อนให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์ มี 2 วิธี

- วิธีควบคุมโดยตรงโดยใช้วงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์
- วิธีควบคุมโดยการเชื่อมโยงโดยใช้อินเวอร์เตอร์

จากโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำต่อเฟส ดังนี้

$$E_{rms} = 4.44fNph \Psi_p K_w \quad (2.23)$$

โดยที่ N_{ph} คือ จำนวนรอบขดลวดที่ต่ออนุกรมกันต่อเฟส

Ψ_p คือ ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า

K_w คือ Winding Factor อยู่ในช่วง 0.85-0.95

f คือ ความถี่

ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์มีค่า ดังนี้

$$\Psi_p \propto E/f \quad (2.24)$$

ถ้าแรงดันที่ตกคร่อม R_1 และ X_1 มีค่าน้อย สามารถประมาณค่าให้ $V_1 = E_1$ จะได้

$$\Psi_p \propto v/f \quad (2.25)$$

จากสมการความสัมพันธ์ข้างต้น พบว่าวิธีการควบคุมความถี่ ยังคงมีขีดจำกัด เนื่องจากความต้องการในการรักษาทอร์คของมอเตอร์ให้คงที่ทุกๆย่านความถี่ ดังนั้นวิธีการควบคุมความถี่ปรับค่า จึงต้องพยายามควบคุมแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไปด้วยกัน เพื่อให้อัตราส่วนระหว่าง v/f คงที่ เมื่อ v คือ แรงดันไฟสลับ 3 เฟส ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ และ f คือ ความถี่ไฟสลับ 3 เฟส ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ อย่างไรก็ตาม วิธีการควบคุม v/f คงที่ ยังมีขีดจำกัดเนื่องจาก การเพิ่ม v ไม่สามารถเพิ่มให้สูงกว่าค่าแรงดันสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทนได้ ดังนั้นที่ความถี่ f สูงกว่าความถี่ขิงโครนัส แรงดัน v จะต้องคงที่ ไม่สามารถเพิ่มได้อีก

2.2 ทฤษฎีฟuzzyลอจิก

ฟuzzyลอจิกถูกคิดค้นโดย นายลือตฟี ซาเดห์ (Lotfi Zadah) แห่งมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียเบิร์กลีย์ ในปี 1965 ซึ่งได้ประยุกต์ทฤษฎีเซตที่มีอยู่เดิม ซึ่งคำว่า ฟuzzyลอจิก แปลว่า “ลอจิกที่คลุมเคลือไม่ชัดเจน” หรือ “ตรรกที่คลุมเคลือไม่ชัดเจน” ซาเดห์ให้ข้อสังเกตไว้ว่า “ระบบควบคุมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ความต้องการค่าที่แน่นอนนั้นแทบไม่จำเป็น” สิ่งที่สนับสนุนแนวคิดดังกล่าวของซาเดห์ที่เห็นได้ชัดเจนคือ จากตัวควบคุมที่ใช้กันมานานเช่น PID นั้นการที่จะออกแบบระบบได้นั้นจำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ ซึ่งจำเป็นต้องใช้คำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนและการหาพารามิเตอร์ต่างๆ ก็มีความยุ่งยาก และโดยเฉพาะระบบที่มีความซับซ้อนมากนั้น ในบางครั้งก็ไม่สามารถที่จะหาพารามิเตอร์ได้ตรงตามสภาวะการของระบบจริง ทำให้ต้องเสียเวลาในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ออกแบบ แต่ทว่าการควบคุมแบบ PID จะให้ความเที่ยงตรงสูง “ส่วนตัวควบคุมฟuzzyการออกแบบตัวควบคุมไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ สิ่งที่ต้องรู้คือพฤติกรรมทางพลวัตของกระบวนการ ซึ่งได้มาด้วยการทดสอบศึกษา เรียนรู้กระบวนการและนำเอาความรู้ที่ได้มาสร้างกฎ [6]” ทำให้ลดความยุ่งยากในการออกแบบ “ลักษณะงานบางอย่างที่ไม่มีความจำเป็นที่ต้องการความแม่นยำสูงหรือ ความแม่นยำสูงไม่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนผลลัพธ์ที่ต้องการ อย่างเช่นระบบที่มีความเที่ยงตรงสูงสูงจะทำให้อุณหภูมิในห้องๆ หนึ่งมีค่า 25 องศาเซลเซียส อย่างแม่นยำ ส่วนตัวควบคุมฟuzzyอาจจะทำให้อุณหภูมิในห้องเดียวกันนี้ใกล้เคียงกันด้วยค่าผิดพลาดไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส ซึ่งเหตุการณ์นี้ความเที่ยงตรงสูงเป็นพิเศษเป็นสิ่งที่มากเกินไปความต้องการของมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์แทบจะไม่ได้รู้สึกถึงความแตกต่างของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส[12]” ในส่วนของ

ลักษณะงานอื่นก็เช่นเดียวกัน การที่จะเลือกตัวควบคุมแบบใดมาใช้งานขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความง่ายในการออกแบบรวมถึงค่าใช้จ่ายก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน

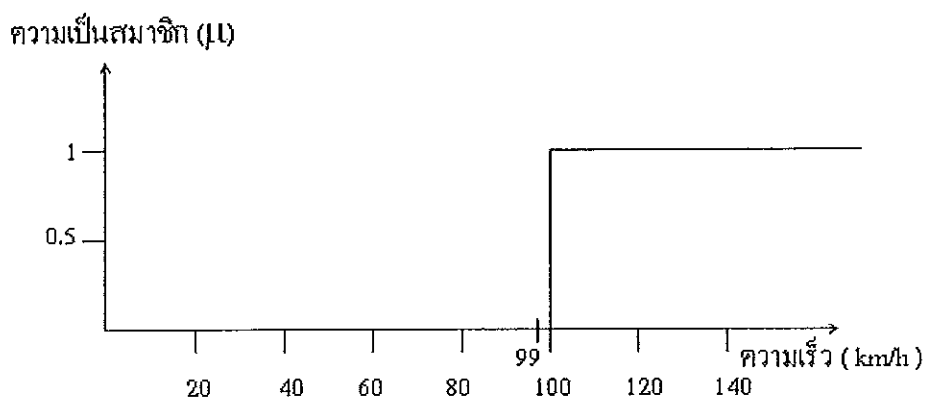
2.2.1 ทฤษฎีฟuzzyเซต

ทฤษฎีฟuzzyเซตเป็นการรวมสมาชิกของหลายๆ เซตดั้งเดิม (คริสป์เซต) ที่มีอยู่จริง และพหุมีลักษณะที่รวมกลุ่มกันได้ โดยฟuzzyเซตยอมรับความเป็นสมาชิกเพียงบางส่วน ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงทีละน้อยระหว่างการมีคุณสมบัติความเป็นสมาชิกครบถ้วน กับ ไม่มีคุณสมบัติของความเป็นสมาชิกเลยระบบฟuzzyลอจิกสามารถทำงานได้ หากมีส่วนของสมาชิกที่มีลักษณะที่ถูกเพียงบางส่วนและผิดเพียงบางส่วน โดยมีค่าความเป็นสมาชิกต่างกัน อยู่ระหว่าง 0 และ 1

ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นว่า คริสป์เซต มีข้อจำกัดในการแยกแยะ ตัดสินใจ ในเชิงแนวคิดหรือความรู้สึกของมนุษย์ จากการพิจารณาตัวแปรความเร็วของรถจักรยานยนต์ สมมติกำลังพิจารณาความเร็วของรถจักรยานยนต์ โดยกำหนดคริสป์เซตของความเร็วสูง μ ดังนี้

μ เท่ากับ 0 ถ้าความเร็วต่ำกว่า 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/h)

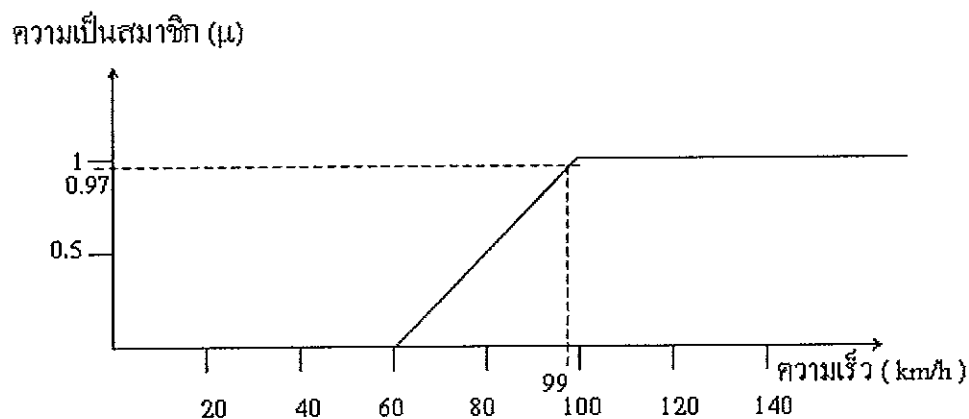
μ เท่ากับ 1 ถ้าความเร็วมากกว่าหรือเท่ากับ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/h)



ภาพประกอบ 2-5 คริสป์เซตความเร็วสูง (ของรถจักรยานยนต์)

จากภาพประกอบ 2-5 คริสป์เซตความเร็วสูง จะเห็นได้ว่าความเร็วของรถจักรยานยนต์ที่ 99 (km/h) ไม่เป็นสมาชิกของเซตความเร็วสูง ซึ่งในการตัดสินใจดังกล่าว เป็นการชี้ชัดและเด็ดขาดเกินไป โดยความรู้สึกของมนุษย์ที่ความเร็ว 99 (km/h) กับที่ความเร็ว 100 (km/h) นั้นมีความแตกต่างกันน้อยมาก การตัดสินใจว่าที่ความเร็ว 99 (km/h) นั้นไม่มีความเป็นสมาชิกของความเร็วสูงอยู่เลยคงไม่ได้ ดังนั้นจึงได้มีการนิยามฟัซซี่เซตเพื่อที่จะใช้ในการอธิบายและตัดสินใจในงานที่มีความคลุมเครือ

กำหนดฟัซซี่เซตความเร็วสูง (ของรถจักรยานยนต์) ใหม่โดยใช้ฟัซซี่เซตอธิบายดังนี้



ภาพประกอบ 2-6 ฟัซซี่เซตความเร็วสูง (ของรถจักรยานยนต์)

จากภาพประกอบ 2-6 แสดงฟัซซี่เซตความเร็วสูงจะเห็นได้ว่า ที่ความเร็ว 99 (km/h) สามารถเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตความเร็วสูงได้ ด้วยค่าความเป็นสมาชิก $\mu = 0.97$ ซึ่งจะสื่อความหมายให้รู้ว่า ความเร็วของรถจักรยานยนต์ ที่ 99 (km/h) ก่อนข้างมีความเร็วสูง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้พยัญชนะตัวใหญ่ (เช่น A) แทนฟัซซี่เซต สมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ เขียนแทนด้วย $x \in U$ เมื่อ x คือ สมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ และ U คือ เอกภพสัมพัทธ์ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ A เขียนแทนด้วย $\mu_A(x)$

2.2.2 ฟัชซีเซต

ฟัชซีเซต คือ เซตคู่ลำดับของสมาชิกในเอกภพสัมพัทธ์ที่สนใจและระดับความเป็นสมาชิกเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (2.26)$$

ถ้า U เป็นค่าต่อเนื่อง ฟัชซีเซต A สามารถเขียนแทนด้วยสมการ (2.27)

$$A = \int \mu_A(x) / x \quad (2.27)$$

เครื่องหมาย " \int " หมายถึง การทำยูเนียนตามทฤษฎีเซต และเครื่องหมาย " $/$ " ไม่ได้หมายถึงการหาร แต่เป็นการแทนความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์

ถ้า A เป็นความไม่ต่อเนื่อง มีขอบเขต สามารถกำหนดฟัชซีเซต ได้ดังนี้

$$A = \sum_U \mu_A(x) / x \quad (2.28)$$

2.2.3 ซัพพอร์ตของฟัชซีเซต

ซัพพอร์ตของฟัชซีเซต (Support of Fuzzy Set) A ในเอกภพสัมพัทธ์ U คือฟัชซีเซตที่มีสมาชิกทั้งหมดในเอกภพสัมพัทธ์ ที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกในฟัชซีเซต A มากกว่า ศูนย์ เขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{sup } p(A) = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\} \quad (2.29)$$

- ศูนย์กลางของฟัชซีเซต คือ ค่ากึ่งกลางของฟัชซีเซตหรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

- จุดแบ่งของฟัซซี่เซต คือ จุดใดๆ ในเอกภพสัมพัทธ์ ที่มีความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.5
- ความสูงของฟัซซี่เซต คือ ค่าสูงสุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

2.2.4 ชิงเกิดตันฟัซซี่เซต

ฟัซซี่ชิงเกิดตันเซต คือ ฟัซซี่เซตที่มีค่าความเป็นสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์เพียงหนึ่งสมาชิก

2.3 การปฏิบัติการฟัซซี่ลอจิก

การปฏิบัติการทางฟัซซี่เซตลอจิกมีพื้นฐานปฏิบัติการต่างๆ เช่นเดียวกับการปฏิบัติการของเซตแบบดั้งเดิมที่ประกอบไปด้วย อินเตอร์เซกชัน ยูเนียน และคอมพลิเมนต์

อินเตอร์เซกชันเป็นตัวปฏิบัติการที่แทนการกระทำทางลอจิก AND มีสัญลักษณ์ \cap แทน การปฏิบัติการ สามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ $A \cap B$ หรือ $A \text{ AND } B$ ดังนี้

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (2.30)$$

เมื่อ \wedge แทนการกระทำ min

ยูเนียนเป็นตัวปฏิบัติการที่แทนการกระทำทางลอจิก OR มีสัญลักษณ์ \cup แทนการปฏิบัติการ สามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ $A \cup B$ หรือ $A \text{ OR } B$ ดังนี้

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (2.31)$$

คอมพลิเมนต์ของ ฟัซซี่เซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ \bar{A} ($\neg A$, $\text{NOT } A$) สามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.32)$$

2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจนไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี่ เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกันหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้

2.4.1 ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีหลายชนิด แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 6 ชนิดดังนี้

1. ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function)

ฟังก์ชันสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์คือ $\{a, b, c\}$

$$\text{triangular}(x : a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b) & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (2.33)$$

2. ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function)

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมูมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์คือ $\{a, b, c, d\}$

$$\text{trapezoidal}(x : a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-a)/(b-a) & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ (d-x)/(d-c) & c \leq x < d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (2.34)$$

3. ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian Membership Function)

ฟังก์ชันเกาส์เซียนมีทั้งหมด 2 พารามิเตอร์คือ $\{m, \sigma\}$ ซึ่ง m หมายถึงค่าเฉลี่ย และ σ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$gaussian(x : m, \sigma) = \exp\left(-\frac{x-m^2}{\sigma^2}\right) \quad (2.35)$$

4. ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-shaped Membership Function)

ฟังก์ชันระฆังคว่ำมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$

$$bell - shaped(x : a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \quad (2.36)$$

5. ฟังก์ชันตัวเอส (Smooth Membership Function)

ฟังก์ชันรูปตัวเอสมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ $\{a, b\}$

$$s(x : a, b) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x < b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (2.37)$$

6. ฟังก์ชันตัวเซต (Z Membership Function)

ฟังก์ชันรูปตัวเอสมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ $\{a, b\}$

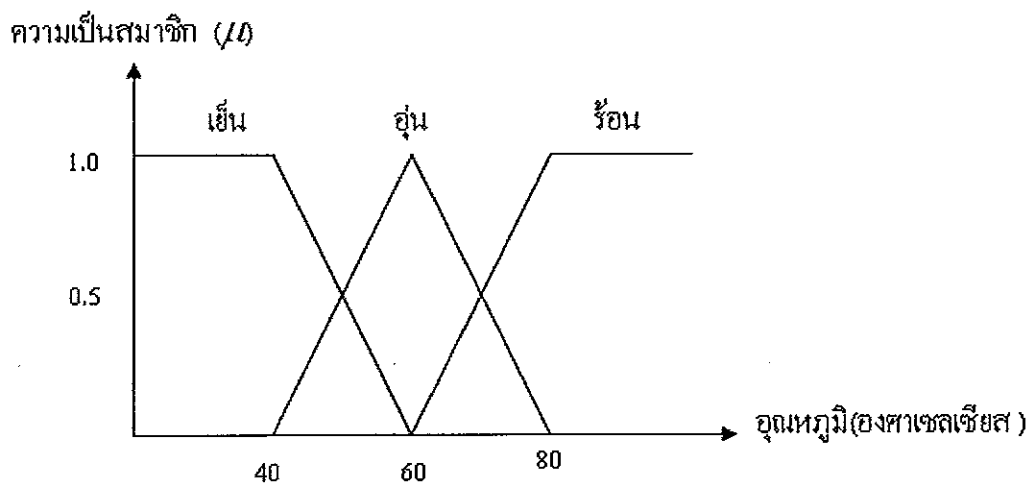
$$Z(x:a,b) = \begin{cases} 1 & x < a \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (2.38)$$

การเลือกฟังก์ชันของความเป็นสมาชิก จะต้องเลือกตามความเหมาะสมความครอบคลุมของข้อมูลที่จะรับเข้ามา โดยสามารถที่ทับซ้อนกันเพื่อให้การดำเนินงานราบเรียบ ซึ่งมีความเป็นสมาชิกหลายค่าได้ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเปลี่ยนแปลงแก้ไขให้เหมาะกับงานที่กำลังปฏิบัติงานหรือตามความต้องการ

2.5 ตัวแปรทางภาษา

ตัวแปรทางภาษา (Linguistic Variables) คือ คำพูดหรือประโยคทางธรรมชาติที่สามารถเข้าใจได้ทั่วไป ในการให้ความหมายเพื่อความสะดวกสำหรับการวิเคราะห์ระบบ การประมาณการ สรุปข้อมูลและตีความจำนวนเซตดั้งเดิมในเทอมของฟัซซี่เซต

ตัวอย่างของตัวแปรภาษาในส่วนของอุณหภูมิ เช่น เย็น, อุณหภูมิ และร้อน โดยนำตัวแปรภาษาดังกล่าวไปกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต



ภาพประกอบ 2-7 ตัวแปรภาษากำหนดอุณหภูมิน้ำ

จากภาพประกอบ 2-7 ประกอบด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตของอุณหภูมิ 3 ฟังก์ชัน คือ เย็น, อุณหภูมิ และร้อน

ตัวแปรทางภาษาดูนิยามด้วยฟังก์ชัน 4 เทอม คือ $(x, T(x), U, M)$ โดยที่

x คือ ชื่อตัวแปร เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น

$T(x)$ คือ เซตตัวแปรทั้งหมดของตัวแปร x {เช่น เย็น, อุณหภูมิ และร้อน}

U คือ เอกภพสัมพัทธ์ของ x เช่น $(0, V_{\max})$

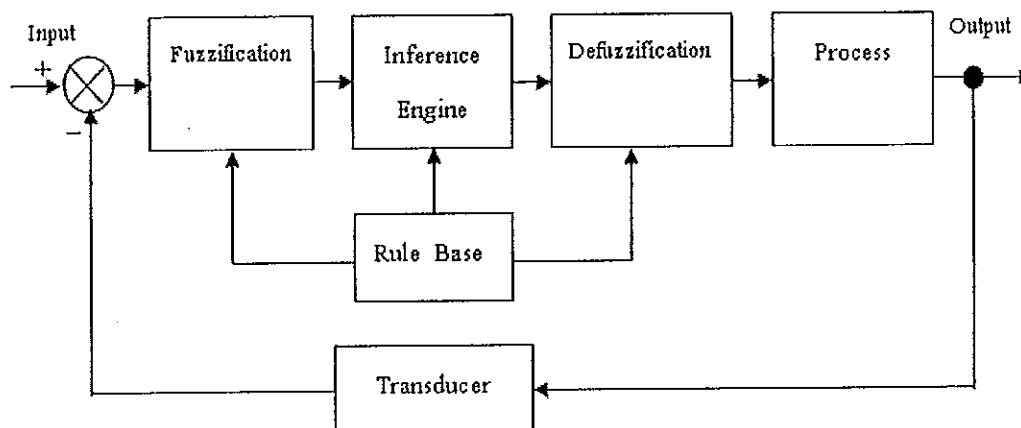
M คือ ความสัมพันธ์ของ x แต่ละค่า

2.6 ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ ชนิดแมมดानी (Mamdani Type) และชนิดทากาจิ-ซุเกโน (Takagi-Sugeno Type) หรือเรียกชื่อย่อว่า ชนิดทีเอส (TS Type) โดยเรียกตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่ใช้กฎทีเอส ว่าตัวควบคุมทีเอสฟัซซี่ลอจิก และเรียกตัวควบคุมที่ใช้กฎแมมดानीฟัซซี่ลอจิก ว่าตัวควบคุมแมมดानीฟัซซี่ลอจิก หรือในบางครั้งเมื่อกล่าวถึงตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกทั่วไปก็จะหมายถึงตัวควบคุมแมมดानीฟัซซี่ลอจิก

2.6.1 ฟัชซีฟิเคชัน

การฟัชซีฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงข้อมูลแบบธรรมดาให้ไปอยู่ในรูปของตัวแปรทางภาษาหรือตัวแปรฟัชซีลอจิก การแปลงข้อมูลทางด้านอินพุตที่ประกอบด้วยเซตของค่าผิดพลาด (Error: e) และเซตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด (Change of Error: ce) ของค่าเป้าหมายและค่าที่วัดได้ตามลำดับ จากภาพประกอบ 2-8 แสดงระบบควบคุมฟัชซีที่มีด้วยตัวควบคุมฟัชซีลอจิกที่ประกอบด้วย ฟัชซีฟิเคชัน ฐานความรู้ กลไกอนุมาน ดีฟัชซีฟิเคชัน กระบวนการ และทรานสดิวเซอร์



ภาพประกอบ 2-8 ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมฟัชซี

การเลือกจำนวนและลักษณะรูปร่างของฟัชซีเซต คือพารามิเตอร์หนึ่งในการออกแบบตัวควบคุมฟัชซีลอจิก ซึ่งขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้ออกแบบโดยอาศัยหลักเกณฑ์ต่างๆ เช่น ความรู้และประสบการณ์ที่มีต่อกระบวนการที่จะควบคุม เพราะไม่มีหลักการและขั้นตอนทางคณิตศาสตร์ในการเลือกอินพุตฟัชซีเซต

2.6.2 ฐานความรู้ฟัซซี่ลอจิก

ฐานความรู้ฟัซซี่ลอจิก ประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วน คือ ฐานข้อมูล (Database) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเก็บฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต และสเกลที่ใช้ในการนอร์มอลไลเซชัน (Normalization) และฐานกฎ (Rule Base) เป็นส่วนที่เก็บกฎที่ใช้ในการควบคุมระบบ ซึ่งอยู่ในรูปของ IF-THEN คือ IF (Process State) THEN (Control Output) เมื่อ Process State เป็นอินพุตฟัซซี่เซต และ Control Output เป็นเอาต์พุตฟัซซี่เซต

จำนวนกฎฟัซซี่ลอจิกจะสัมพันธ์กับจำนวนอินพุตฟัซซี่เซต นั่นคือ ถ้า e เป็นอินพุตฟัซซี่เซตของค่าผิดพลาด และ ce ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดที่มีจำนวนอินพุตฟัซซี่เซตเท่ากับ N_1 และ N_2 แล้ว กฎฟัซซี่ลอจิกสามารถมีได้มากที่สุด $N_1 \times N_2$ กฎ ในทางปฏิบัติอาจมีน้อยกว่าได้ และในการออกแบบกฎฟัซซี่ลอจิกนั้น อาศัยหลักการเดียวกับการออกแบบอินพุตฟัซซี่เซต คือ ใช้ความรู้และประสบการณ์ที่มีต่อกระบวนการที่ถูกควบคุม โดยอยู่บนพื้นฐานของการลองผิดลองถูกจนได้ผลตอบสนองเป็นที่พอใจ

2.6.3 กลไกอนุมาน

กลไกอนุมานทำหน้าที่หาผลลัพธ์ของกฎการควบคุมจากค่าตัวแปรอินพุตฟัซซี่เซต ค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากปฏิบัติการฟัซซี่ลอจิกในส่วนมูลเหตุ (Antecedent) และเงื่อนไข โดยทั่วไปการเชื่อมโยงของเหตุผลจะมี 2 ชนิด คือ

- Generalized Modus Ponens (GMP) คือการสรุปจากเหตุไปหาผล
 - Generalized Modus Tollens (GMT) คือการสรุปจากผลไปหาเหตุ
- รูปแบบของทั้ง 2 วิธีมีดังนี้

GMP :

Premise : x is A'

Implication : if x is A then y is B

Consequence : y is B'

GMT :

Premise : y is B'

Implication : if x is A then y is B

Consequence : x is A'

โดย

A, A', B, B' คือ ฟัซซีเซต

x, y คือ ตัวแปรทางภาษา

$\mu_R(x, y)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของความสัมพันธ์ของ A และ B

$\mu_A(x), \mu_B(y)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร x และ y

f_{imp} คือ ฟังก์ชันการอิมพลิเคชัน (implication) หรือฟังก์ชันการเชื่อมโยงค่าความเป็นสมาชิกของความสัมพันธ์ฟัซซีลอจิก

$$\mu_R(x, y) = f_{imp}(\mu_A(x), \mu_B(y)); \quad x \in U, y \in V \quad (2.39)$$

โดยทั่วไป ในการสร้างตัวควบคุมฟัซซีลอจิกจะนิยมใช้การเชื่อมโยงแบบ GMP และใช้ f_{imp} ด้วยวิธีแมมดานิ โดยสร้างเป็นกฎได้ดังนี้

R_1 : IF X IS A_1 AND Y IS B_1 THEN Z IS C_1

R_2 : IF X IS A_2 AND Y IS B_2 THEN Z IS C_2

โดยที่

A_1, B_1, A_2, B_2 คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต

C_1, C_2 คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

R_1, R_2 คือ กฎความสัมพันธ์ฟัซซีลอจิก

Z คือ ตัวแปรทางภาษาในเอกภพสัมพัทธ์ U, V และ W ตามลำดับ

α_1, α_2 คือ ระดับความเป็นสมาชิกของ 2 อินพุต

จะได้ค่าความเป็นสมาชิกของผลสรุป (μ_c)

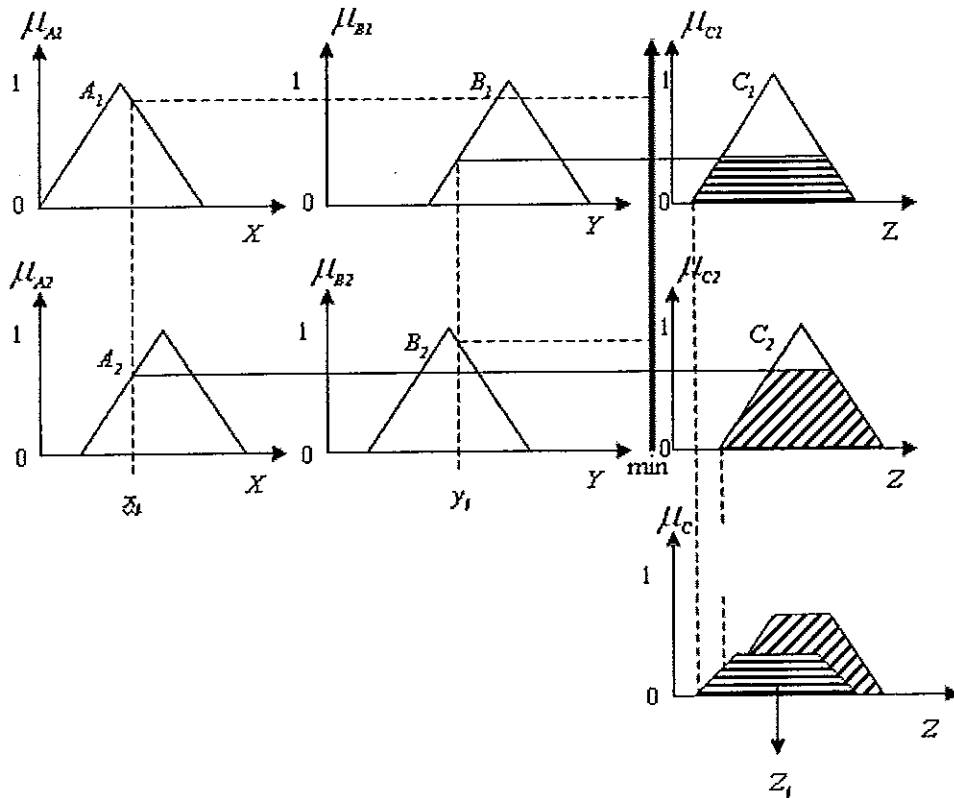
$$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0))$$

$$\alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0))$$

$$\mu_{c_i}(z) = \min(\alpha_i, \mu_c(z))$$

$$\mu_c(z) = \max(\mu_{c_1}, \mu_{c_2}) \quad (2.40)$$

จากผลของการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกสามารถทำการอนุมานในแบบของ
แมมดานี้ได้ดังในภาพประกอบ 2-9



ภาพประกอบ 2-9 การอนุมานโดยวิธีของแมมดานี้ [10]

2.6.4 ดีฟัซซิไฟเคชัน

ดีฟัซซิไฟเคชัน ทำหน้าที่แปลงผลลัพธ์กฎการควบคุมที่อยู่ในรูปตัวแปรฟัซซีลอจิกให้เป็นคริสป์เซต และทำการสเกลกลับมาให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์เดิมที่จะเป็นฟัซซิไฟเคชัน วิธีการดีฟัซซิไฟเออร์ นั้นมีหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงวิธีที่นิยมใช้เพียง 2 วิธี ดังนี้

2.6.4.1 การเลือกค่าสูงสุด (Mean of Maximun: MOM)

เป็นวิธีการที่ง่ายสุดในการเลือกข้อมูลเอาต์พุต (Z_0) เป็นการใช้ค่าสูงสุดของค่าระดับการเป็นสมาชิกจากการกระทำหลายๆ แบบแล้วเลือกกระทำเพียงหนึ่งรูปแบบ

$$Z_0 = \max_{x \in U} \mu_A(x) \quad (2.41)$$

ถ้าหากเกิดการกระทำที่มีค่า μ สูงสุดเท่ากันสองค่าจะต้องใช้รูปแบบการแก้ปัญหา อีกลักษณะหนึ่งคือ ใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลอินพุต

$$Z_0 = \sum_{j=1}^I \frac{V_j}{J} \quad (2.42)$$

เมื่อ V_j คือ ค่าเอาต์พุตสูงสุดที่มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากัน
 J คือ จำนวนเอาต์พุตที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน
 นั่นคือ $V_j = \max \mu_A(x)$
 $j = |\{x\}|$ เป็นจำนวนของความเป็นสมาชิก

2.6.4.2 การเลือกค่าศูนย์กลาง (Center of Area : COA)

เป็นการแบ่งจุดศูนย์กลางของพื้นที่ค่าความเป็นสมาชิกออกเป็นสองส่วนเพื่อหาจุดศูนย์กลางของน้ำหนัก ค่าของเอาต์พุตแสดงได้ดังนี้

$$Z_0 = \frac{\int v \mu_B(v) dv}{\int \mu_B(v) dv} \quad (2.43)$$

สำหรับเอกภพสัมพัทธ์ที่มีสมาชิกเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ที่แบ่งระดับข้อมูล เอาต์พุตออกเป็น m ระดับ แสดงได้ดังสมการ (2.44)

$$Z_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_{v(v_k)}}{\sum_{k=1}^m \mu_{v(v_k)}} \quad (2.44)$$

เมื่อ v_k คือ ค่าเอาต์พุตแต่ละส่วน

μ_v คือ ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตแต่ละส่วน

2.7 Fuzzy Model Reference Learning Control

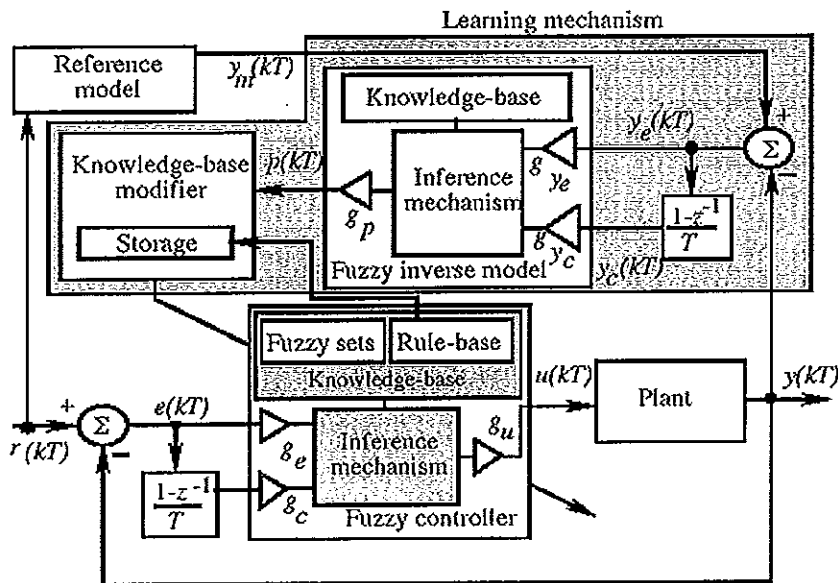
โครงสร้างการควบคุมแบบ FMRLC แสดงดังภาพประกอบ 2-10 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักด้วยกันคือ ตัวควบคุมฟัซซี่ (Fuzzy Controller), ตัวโมเดลอ้างอิง (Reference Model) และกลไก หรือ กระบวนการเรียนรู้ (Learning Mechanism) โดยมีหลักการทำงานดังนี้ กลไกหรือกระบวนการเรียนรู้จะมีหน้าที่ ในการปรับกฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซี่ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบเข้าใกล้ผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิง โดยจะนำผลตอบสนองของระบบเปรียบเทียบกับผลตอบสนองของ โมเดลอ้างอิง แล้วประมวลผลส่งค่าไปปรับกฎของตัวควบคุมฟัซซี่ สำหรับการทำงานในแต่ละส่วนจะอธิบายในลำดับต่อไป

2.7.1 ตัวควบคุมฟัซซี่

จากระบบการควบคุมแบบ FMRLC ในภาพประกอบ 2-12 จะแสดงให้เห็นว่า สัญญาณ อินพุตของระบบ คือ $u(kT)$ และ เอาท์พุตของระบบ คือ $y(kT)$ ส่วนสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าตัวควบคุมฟัซซี่จะประกอบด้วย ค่าความผิดพลาด $e(kT)$ ระหว่างค่าเป้าหมาย $r(kT)$ กับค่าผลตอบสนองของระบบ $y(kT)$ และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด $c(kT)$ สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$e(kT) = r(kT) - y(kT) \tag{2.45}$$

$$c(kT) = (e(kT) - e(kT-T))/T \tag{2.46}$$



ภาพประกอบ 2-10 Fuzzy model reference learning control [19]

โดยทั่วไปการกำหนดขอบเขตของตัวแปรอินพุต และเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ (Universes of Discourse) จะถูกนอร์มอลไลซ์ (Normalized) ให้อยู่ในช่วงระหว่าง [-1,1] และใช้ค่าเกน g_e, g_c และ g_u ในการกำหนดขอบเขตของตัวแปรค่าความผิดพลาด $e(kT)$, ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลง ค่าความผิดพลาด $c(kT)$ และ เอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ $u(kT)$ ตามลำดับ ในการกำหนดค่าขอบเขตของตัวแปรเหล่านี้ สามารถทำได้โดยการปรับ โดยผู้เชี่ยวชาญ หรือปรับแบบอัตโนมัติ สำหรับการปรับแบบอัตโนมัตินี้มีหลักการคือ ตัวควบคุมฟัซซี่จะทำการตรวจสอบค่าความผิดพลาด $e(kT)$ และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด $c(kT)$ จะเลือกค่าสูงสุด มาเป็นค่าเกนของแต่ละตัวแปรนั้นๆ ซึ่งจะกำหนดช่วงเวลาในการพิจารณาค่าตัวแปรดังกล่าว สามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการได้ดังนี้

$$g_e = 1/\max_{TA}\{e(kT)\} \tag{2.47}$$

$$g_c = 1/\max_{TA}\{c(kT)\} \tag{2.48}$$

2.7.2 โมเดลอ้างอิง

โมเดลอ้างอิงจะใช้สำหรับกำหนดค่าผลตอบสนองของระบบให้เป็นที่ต้องการ โดยการออกแบบโมเดลอ้างอิงนั้นจะพิจารณาจากค่าเวลาไคขึ้น (Rise Time), ค่าพุ่งเกิน (Overshoot)

2.7.3 กระบวนการเรียนรู้

กระบวนการเรียนรู้ ทำหน้าที่ปรับกฎในฐานความรู้ของตัวควบคุมฟัซซี่ เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบเข้าใกล้ผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิง ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน คือ 1. โมเดลอินเวอร์สฟัซซี่ (Fuzzy Inverse Model) และ 2. ตัวปรับฐานความรู้ (Knowledge-base Modifier)

1. โมเดลอินเวอร์สฟัซซี่ ทำหน้าที่ในการสร้างเอาต์พุต $p(kT)$ เพื่อที่จะทำให้ ค่าความผิดพลาด $y_e(kT)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นก็คือการพยายามทำให้ผลตอบสนองของระบบมีผลตอบสนองเท่ากับผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิง โมเดลอินเวอร์สฟัซซี่ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-10 ก็จะประกอบด้วย อินพุตค่าความผิดพลาด $y_e(kT)$ ระหว่างค่าผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิง $y_m(kT)$ กับค่าผลตอบสนองของระบบ $y(kT)$ และ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด $y_e(kT)$ สามารถแสดงได้ดังสมการ

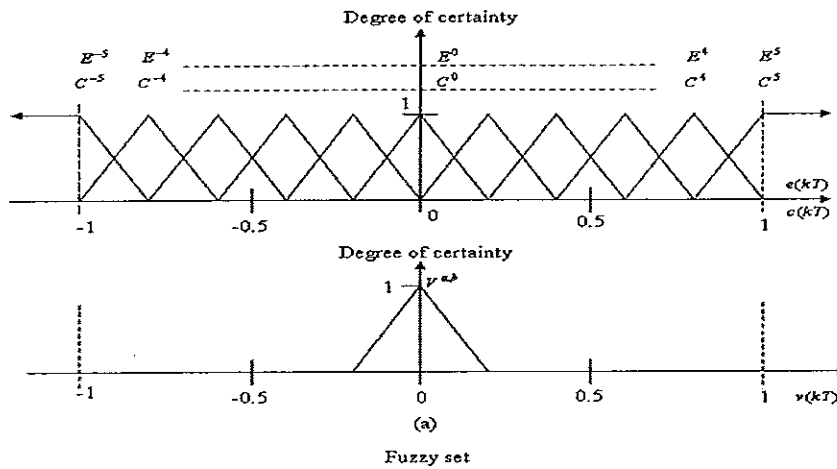
$$y_e(kT) = y_m(kT) - y(kT) \quad (2.49)$$

$$\dot{y}_e(kT) = (y_e(kT) - y_e(kT - T)) / T \quad (2.50)$$

มีเกน g_{y_e} , $g_{\dot{y}_e}$ และ g_p ในการกำหนดขอบเขตของตัวแปร ค่าความผิดพลาด $y_e(kT)$, ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด $\dot{y}_e(kT)$ และ เอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ $p(kT)$ ตามลำดับ และได้ออกแบบฟัซซี่เซต, ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และมีกฎการควบคุม กฎจะอยู่ในรูปของเงื่อนไขการตัดสินใจ

2. ตัวปรับฐานความรู้ ทำหน้าที่ในการปรับกฎการควบคุมฐานความรู้ของตัวควบคุมฟัซซี่ เพื่อให้สามารถควบคุมระบบให้ได้ผลตอบสนองเหมือนกับผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิง โดยอาศัยเอาต์พุต ที่ได้จากโมเดลอินเวอร์สฟัซซี่ $p(kT)$ เป็นตัวที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกฎของฐานความรู้ของตัวควบคุมฟัซซี่ โดยเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ จะมีค่าเท่ากับ $v(kT-T)+p(kT)$ ซึ่งในภาพประกอบ 2-11 แสดงให้เห็นว่าเริ่มต้นนั้นจะกำหนด ฟัซซี่เซตของอินพุต และฟัซซี่เซตเอาต์พุตไว้แล้วแต่จุดเซ็นเตอร์ของเอาต์พุต กำหนดค่าไว้เท่ากับศูนย์ ซึ่งการปรับกฎในฐานความรู้ก็คือการปรับค่าเซ็นเตอร์ของเอาต์พุตดังสมการที่ (2.51)

$$v^{j,\dots,k,l,\dots,m}(kT) = v^{j,\dots,k,l,\dots,m}(kT - T) + p(kT) \quad (2.51)$$



(a)

Fuzzy set

	$\nu^{a,b}$	E^a											
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	
		-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
C^b	-5	-1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Center of input membership functions on $e(kT)$
	-4	-0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Center of output membership functions on $v(kT)$
	-3	-0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	-2	-0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	-1	-0.2	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0	
	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
5	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

(b)

Rule - base

ภาพประกอบ 2-11 Input – output universes of discourse and rule – base for the fuzzy controller[19]

ตัวอย่าง สมมติเอาที่หุดของโมเดลอินเวอร์สพีซซี่ $p(kT) = 0.5$ ซึ่งเอาที่หุดของตัวควบคุมพีซซี่ที่เวลา $kT-T$ จะถูกปรับปรุงค่า $v(kT-T)+0.5$ และในขณะเวลา $kT-T$ นั้น $e(kT-T) = 0.75$ และ $c(kT-T) = -0.2$ ซึ่งกฎที่ถูกเรียกใช้ในการตัดสินใจจะมีสองกฎด้วยกันคือ

$$\text{If } E^3 \text{ and } C^{-1} \text{ Then } V^{3,-1} \text{ และ If } E^4 \text{ and } C^{-1} \text{ Then } V^{4,-1}$$

ค่า $V^{3^{-1}}(kT-T)$ และ $V^{4^{-1}}(kT-T)$ มีค่าเท่ากับศูนย์เพราะฉะนั้นจากสมการ (2.51) จะได้ว่า $V^{3^{-1}}(kT) = 0+0.5 = 0.5$ และ $V^{4^{-1}}(kT) = 0+0.5 = 0.5$ ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงค่าของกฎ
ดังแสดงในภาพประกอบ 2-11

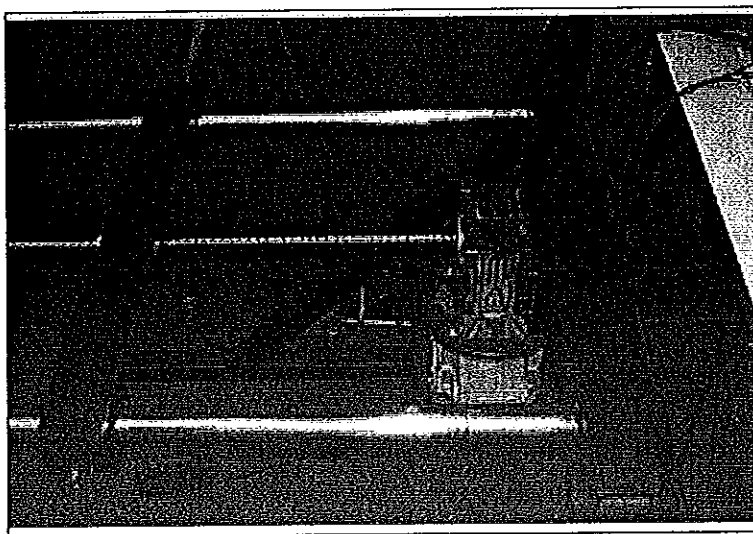
ในบทนี้ได้นำเสนอ หลักการทำงานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำ 3 เฟส รวมถึงการควบคุมความเร็วในรูปแบบต่างๆ และทฤษฎีการควบคุมแบบ FMRLC ซึ่งจะนำไป
ออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ต่อไป โดยรายละเอียดจะนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 3

โครงสร้างและการจำลองการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงโครงสร้างและแบบจำลองการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก โดยการประยุกต์หลักการควบคุมแบบ FMRLC เพื่อให้การออกแบบระบบควบคุมง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงแก้ไขปรับปรุง จึงได้ทำการจำลองการทำงานของระบบทั้งหมดบนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งจะได้อธิบายในรายละเอียดแต่ละส่วนต่อไป

3.1 โครงสร้างและการทำงานของเครื่องพับและตัดเหล็ก

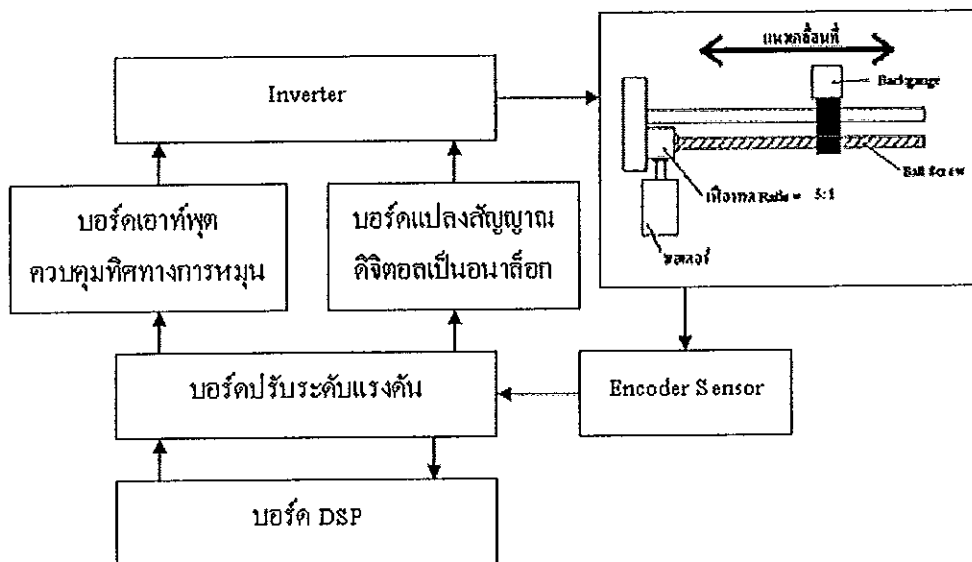


ภาพประกอบ 3-1 โครงสร้างเครื่องพับและตัดเหล็ก [10]

เครื่องพับและตัดเหล็ก จะประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ, ชุดเฟืองทด และชุดวัดระยะ (Auto Backgauge) การทำงานเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ หมุนขับเคลื่อนเฟืองทดที่มีอัตราทด 5:1 เพื่อหมุนบอลสกรู (Ball Screw) ซึ่งบอลสกรูจะมี

ระยะพิทช์ (Pitch) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมีชุดวัดระยะจับอยู่บนร่องเกลียว เมื่อบอลสกรูหมุนก็จะทำให้ตัววัดระยะ เลื่อนในแนวเส้น ในขณะที่เดียวกันก็จะทำให้อินคริเมนทอล โรตารีเอนโคดเดอร์ (Incremental Rotary Encoder) หมุน และในการหมุนของแกนหมุนหรือบอลสกรูหมุนครบ 1 รอบ จะทำให้อินคริเมนทอล โรตารีเอนโคดเดอร์กำเนิดสัญญาณพัลส์ซึ่งนับได้ 400 สเตป (Step) ซึ่งสามารถคำนวณได้ว่า ทุกๆ 1 สเตป ที่อ่านได้จากโรตารีเอนโคดเดอร์ จะเท่ากับการเคลื่อนที่ของตัววัดระยะ ทุกๆ $10 \text{ มม.}/400 = 25 \text{ ไมครอน}$ และในการควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนจะส่งค่าความถี่ควบคุมให้ตัวอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมมอเตอร์ต่อไป

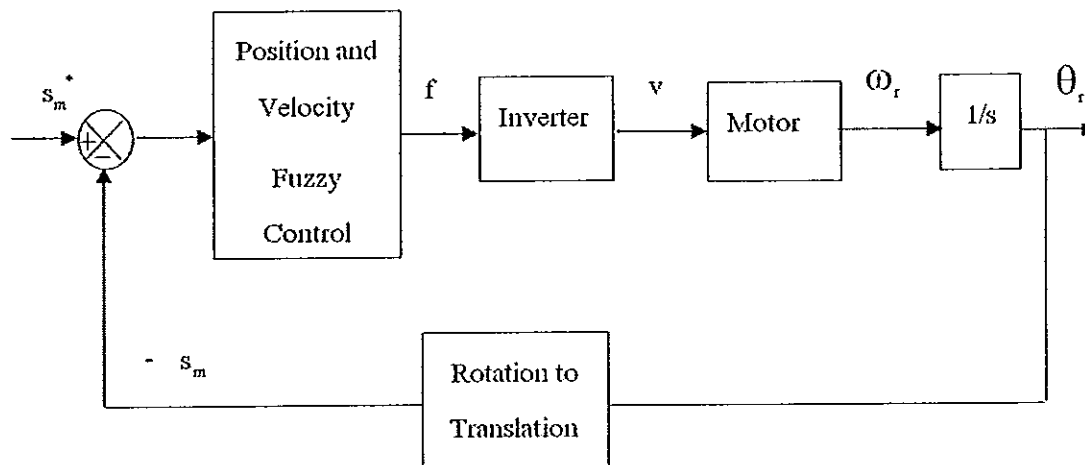
3.2 ส่วนประกอบ ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก



ภาพประกอบ 3-2 ส่วนประกอบของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ในเครื่องพับและตัดเหล็ก

ส่วนประกอบของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ในเครื่องพับและตัดเหล็ก จะแยกเป็น 2 ส่วนหลัก คือส่วนกระบวนการ (Plant) และส่วนของตัวควบคุม (Controller) ในส่วนกระบวนการจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส, อินเวอร์เตอร์ และชุดวัดระยะ และส่วนตัวควบคุมจะเป็นบอร์ด TMS320F2812 DSP, บอร์ด D/A TLV5619-5639EVM, บอร์ดเอาต์พุต และบอร์ดปรับระดับแรงดัน ดังภาพประกอบ 3-2 จะแสดงบล็อกของอุปกรณ์ต่างๆ

3.3 แบบจำลอง ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็ว มอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก



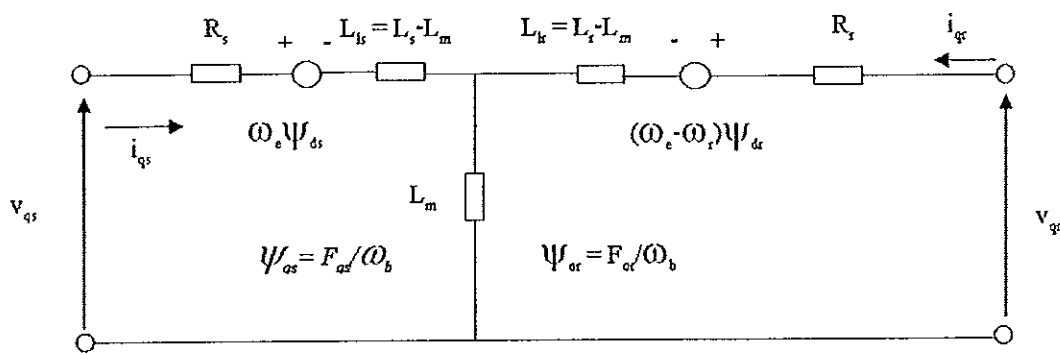
ภาพประกอบ 3-3 ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์

ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 3-3 จะเป็นการแสดงให้เห็นสัญญาณของระบบควบคุม โดยความเร็วของมอเตอร์ (ω_r) จะถูกอินทิเกรตเพื่อให้ได้ตำแหน่งเชิงมุมจริงของมอเตอร์ (θ_r) จากนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นตำแหน่งเชิงเส้นจริงที่มอเตอร์เคลื่อนที่ไป (s_m) เพื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งเชิงเส้นเป้าหมาย (s_m^*) และนำผลลัพธ์ที่ได้ป้อนเข้าบล็อก Position and Velocity Fuzzy Control ซึ่งภายในบล็อกจะมีฟัซซี่ 2 ตัวทำงานร่วมกัน และผลลัพธ์ที่ส่งเข้ามาจะเป็นอินพุตให้กับตัวฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง ตัวแปรอินพุตของตัวฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง ประกอบด้วยค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (Position Error) (e) ระหว่างตำแหน่งเป้าหมาย (Target Position) กับตำแหน่งการเคลื่อนที่จริงของมอเตอร์ และค่าการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (Change of Error) (ce) เอาท์พุตที่ได้จากตัวฟัซซี่ควบคุมตำแหน่งเป็น

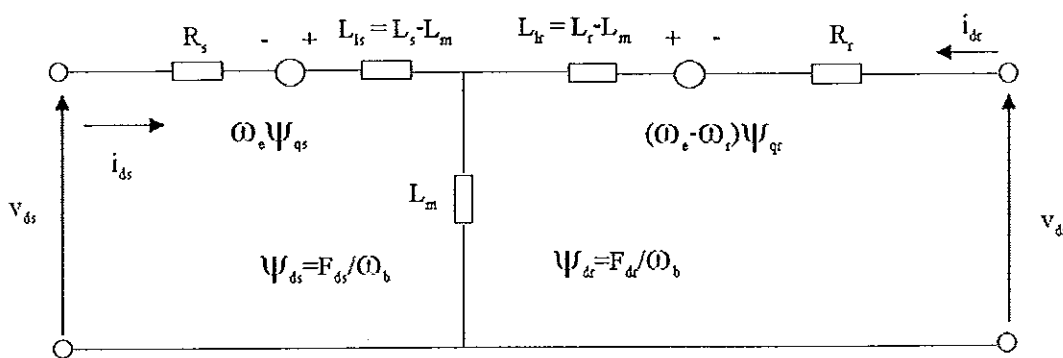
ค่าความถี่เป้าหมาย ซึ่งจะป้อนให้กับพีชซึ่งควบคุมความเร็วเป็นอินพุตตัวที่ 1 (e1) และอินพุตตัวที่ 2 คือค่าความถี่จริงของมอเตอร์ โดยทำการคำนวณจากความเร็วของมอเตอร์ (e2) และเอาท์พุตที่ได้จากพีชซึ่งควบคุมความเร็วจะเป็นค่าความถี่ควบคุม ที่ส่งให้กับอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามความเร็วที่ต้องการ ระบบก็จะควบคุมการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายที่กำหนดไว้ อย่างถูกต้องแม่นยำ

ในลำดับต่อไปจะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ โดยแบบจำลองดังกล่าวจะใช้ในการเขียน โปรแกรมจำลองการทำงานบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 แบบจำลองมอเตอร์



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 3-4 วงจรสมมูลพลศาสตร์บนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโรตัส

(ก) บนแกน q° (ข) บนแกน d°

จากแบบจำลองดังกล่าว สามารถเขียนสมการในรูปของ ฟลักซ์ (flux linkage) ได้ดังนี้

$$\frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{mq} + F_{qs}) \right] \quad (3.1)$$

$$\frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{md} + F_{ds}) \right] \quad (3.2)$$

$$\frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b \left[v_{qr} - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{mq} - F_{qr}) \right] \quad (3.3)$$

$$\frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b \left[v_{dr} + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{md} - F_{dr}) \right] \quad (3.4)$$

$$F_{mq} = X_{ml}^* \left[\frac{F_{qs}}{X_{ls}} + \frac{F_{qr}}{X_{lr}} \right] \quad (3.5)$$

$$F_{md} = X_{ml}^* \left[\frac{F_{ds}}{X_{ls}} + \frac{F_{dr}}{X_{lr}} \right] \quad (3.6)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} (F_{qs} - F_{mq}) \quad (3.7)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} (F_{ds} - F_{md}) \quad (3.8)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{X_{lr}} (F_{qr} - F_{mq}) \quad (3.9)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{X_{lr}} (F_{dr} - F_{md}) \quad (3.10)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{n_p}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} (F_{ds} i_{qs} - F_{qs} i_{ds}) \quad (3.11)$$

$$T_e - T_L = J \left(\frac{2}{n_p} \right) \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3.12)$$

เมื่อ d : แกน d (Direct Axis)

q : แกน q (Quadrature Axis)

s : ตัวแปรสเตเตอร์ (Stator Variable)

r : ตัวแปรโรเตอร์ (Rotor Variable)

F_{ij} is the flux linkage($i=q$ or $j=s$ or r)

v_{qs}, v_{ds} : แรงดันสเตเตอร์แกน q และ d (q and d-axis stator voltages)

v_{qr}, v_{dr} : แรงดันโรเตอร์แกน q และ d (q and d-axis rotor voltages)

F_{mq}, F_{md} : ฟลักซ์แมกนีไทซิงแกน q และ d (q and d axis magnetizing flux linkages)

R_r : ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ (Rotor Resistance)

R_s : ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (Stator Resistance)

X_{ls} : stator leakage reactance ($\omega_b L_{ls}$)

X_{lr} : rotor leakage reactance ($\omega_b L_{lr}$)

X_m : magnetizing leakage reactance ($\omega_b L_m$)

$$X_{mi}^* : \frac{1}{\left(\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lr}} \right)}$$

i_{qs}, i_{ds} : กระแสสเตเตอร์ในแกน q และ d (q and d-axis stator currents)

i_{qr}, i_{dr} : กระแสโรเตอร์ในแกน q และ d (q and d-axis rotor currents)

n_p : จำนวนคู่ของขั้ว (Number of Poles)

J : โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

T_e : แรงบิดทางไฟฟ้า (Electrical Output Torque)

T_L : แรงบิดของโหลด (Load Torque)

ω_e : ความถี่เชิงมุมสเตเตอร์ (Stator Angular Electrical Frequency)

ω_b : ความถี่ฐานเชิงมุมมอเตอร์ (Motor Angular Electrical Base Frequency)

ω_r : ความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ (Rotor Angular Electrical Speed)

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ v_{qr}, v_{dr} ใน (3.3) และ (3.4) เป็นศูนย์

แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถแสดงได้ดัง สมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Equation) ข้างต้น ในการแก้สมการเหล่านี้ จำเป็นต้องแปลงให้อยู่ในรูปสเปซ (State-space Form)

$$\dot{x} = Ax + b \tag{3.13}$$

เมื่อ $x = [F_{qs} \ F_{ds} \ F_{qr} \ F_{dr} \ \omega_r]^T$: state vector

$F_{ij} = \Psi_{ij}\omega_b$ โดยที่ F_{ij} เป็น flux linkage ($i = q$ หรือ d และ $j = s$ หรือ r) และ Ψ_{ij} คือ ฟลักซ์

ในการแปลงให้อยู่ในรูปสเทตสเปซ ทำได้โดยการแทน (3.5) และ (3.6) ใน (3.1-3.4) แล้วรวมพจน์ที่เหมือนกันเข้าด้วยกัน จะได้สมการแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปสเทตสเปซ ดังนี้

$$\frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} F_{qr} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1 \right) F_{qs} \right) \right] \quad (3.14)$$

$$\frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} F_{dr} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1 \right) F_{ds} \right) \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b \left[-\frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} F_{qs} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} - 1 \right) F_{qr} \right) \right] \quad (3.16)$$

$$\frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b \left[\frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} F_{ds} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} - 1 \right) F_{dr} \right) \right] \quad (3.17)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \left(\frac{n_p}{2J} \right) (T_e - T_L) \quad (3.18)$$

3.3.2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบ เป็นอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส มีลักษณะการทำงานแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบไซน์มูชอยด์ (Sinusoidal Pulse Width Modulation) ใช้วิธีควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ (V/f Control) สมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเฟส (Phase Voltage) และแรงดันสาย (Line Voltage) เอาท์พุตเป็นดังนี้

$$v_{an} = \frac{2}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} \quad (3.19)$$

$$v_{bn} = \frac{2}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{co} \quad (3.20)$$

$$v_{cn} = \frac{2}{3}v_{co} - \frac{1}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} \quad (3.21)$$

$$v_{ab} = v_{ao} - v_{bo} \quad (3.22)$$

$$v_{bc} = v_{bo} - v_{co} \quad (3.23)$$

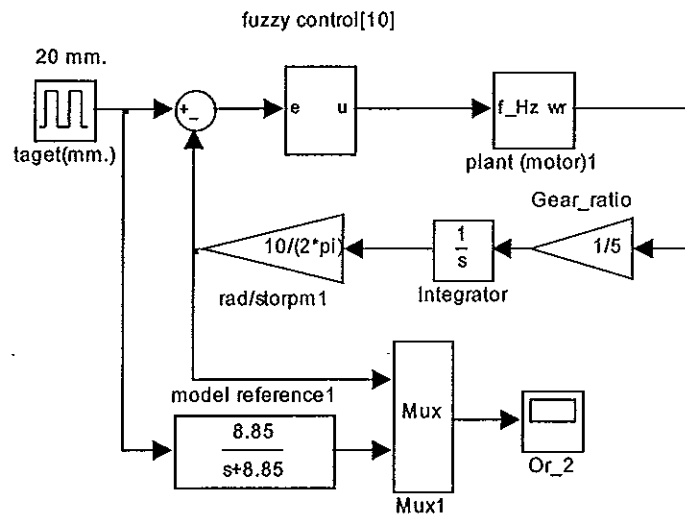
$$v_{ca} = v_{co} - v_{ao} \quad (3.24)$$

3.3.3 การหาโมเดลอ้างอิง

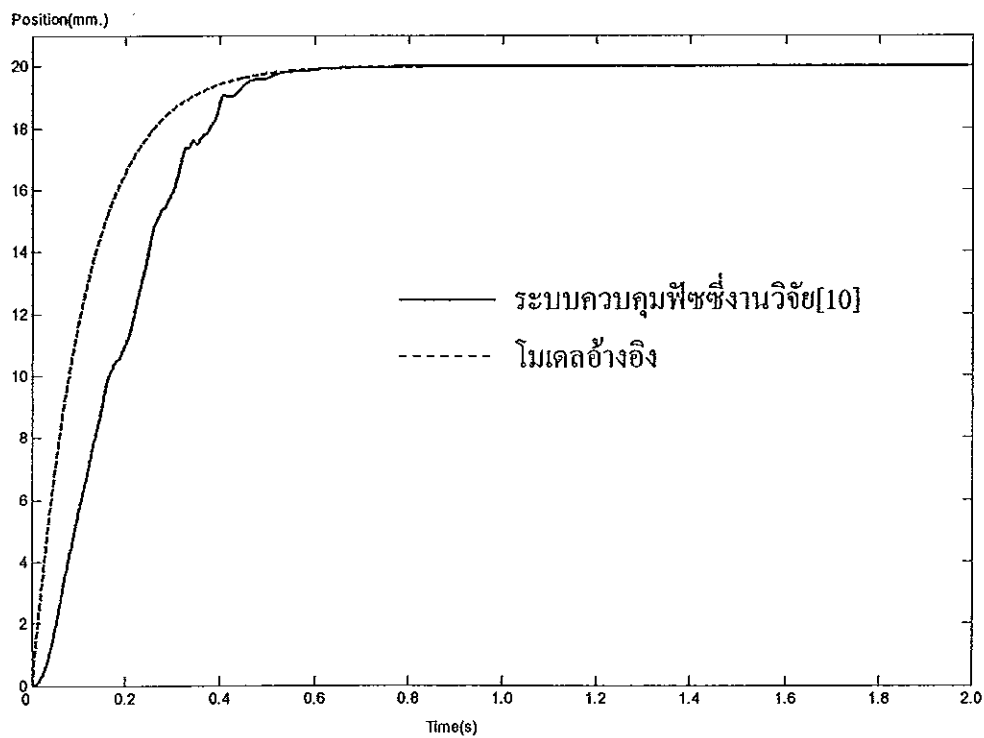
โมเดลอ้างอิงที่ใช้ในการทดสอบจะมี 2 ส่วน คือ โมเดลอ้างอิงของการควบคุมตำแหน่ง และโมเดลอ้างอิงของการควบคุมความเร็ว ซึ่งจะอธิบายวิธีการหาโมเดลอ้างอิงดังกล่าว ดังนี้

3.3.3.1 การหาโมเดลอ้างอิงของระบบควบคุมตำแหน่ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องหับ และตัดเหล็ก กำหนดให้เป็นสมการอันดับ 1 ซึ่งจะทดสอบระบบ โดยการจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB ดังภาพประกอบ 3-5 จะป้อนตำแหน่งการเคลื่อนที่ 20 มิลลิเมตร ให้กับระบบควบคุมพีซีซีในงานวิจัย [10] และโมเดลอ้างอิง พล็อตกราฟการเคลื่อนที่เปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของทั้งสอง หลังจากนั้นทำการปรับค่าตัวสมการ โมเดลอ้างอิงหลายครั้งจนได้ กราฟการควบคุมที่มีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 3-6 ซึ่งจะได้สมการ โมเดลอ้างอิงการควบคุมตำแหน่งคือ $\frac{8.85}{s+8.85}$



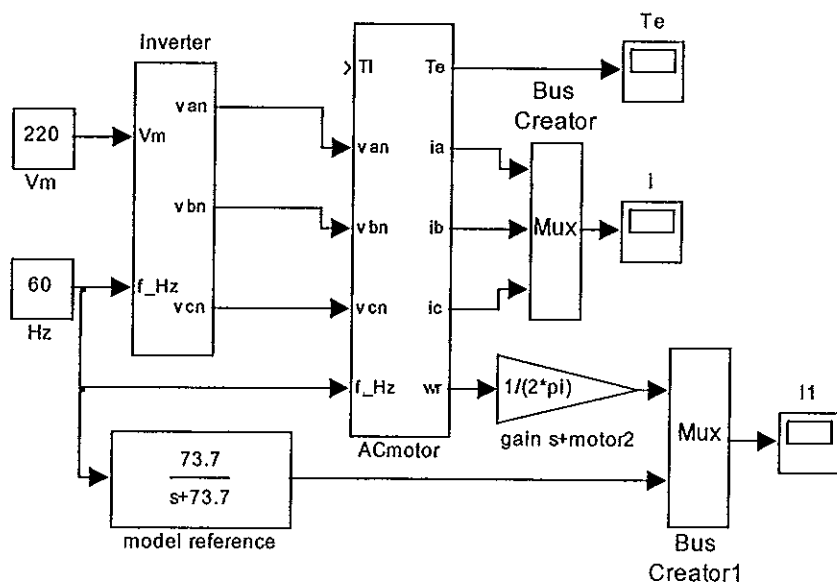
ภาพประกอบ 3-5 โครงสร้างการทดสอบหาโมเดลอ้างอิงการควบคุมตำแหน่ง



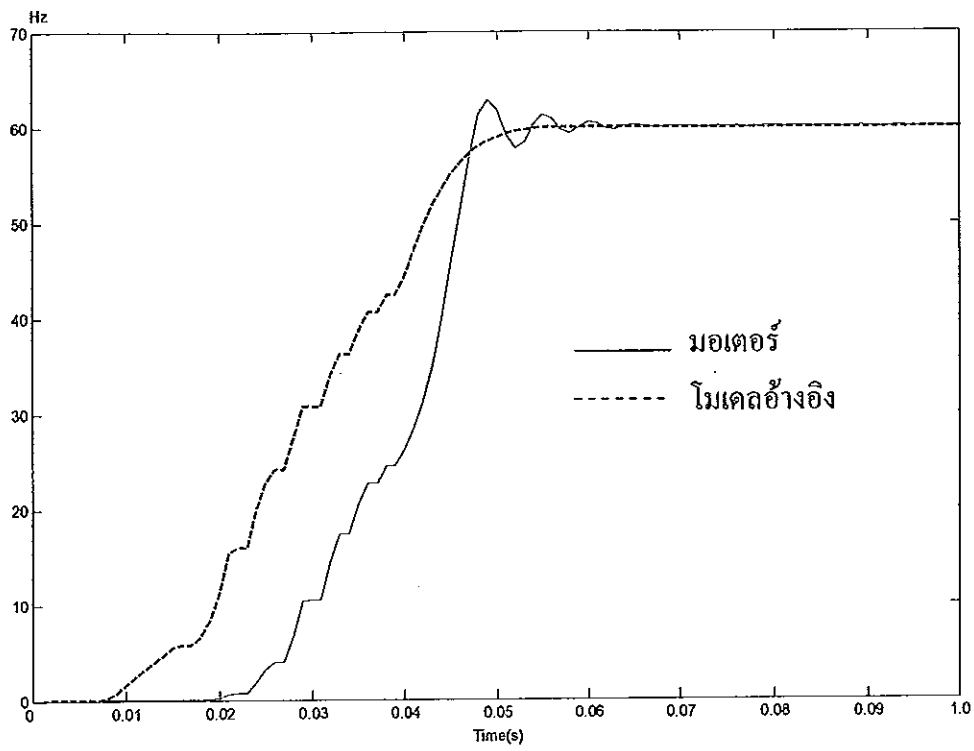
ภาพประกอบ 3-6 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมในงานวิจัยอ้างอิง[10] และ โมเดลอ้างอิง

3.3.3.2 การหาโมเดลอ้างอิงของระบบควบคุมความเร็ว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเร็วของเครื่องขับและตัดเหล็ก กำหนดให้เป็นสมการอันดับ 1 ซึ่งจะทดสอบระบบโดยการจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB ดังภาพประกอบ 3-7 จะป้อนค่าความถี่ควบคุม 60 Hz ให้กับมอเตอร์โดยผ่านตัวอินเวอร์เตอร์ และ โมเดลอ้างอิง พล็อตกราฟความถี่โดยการแปลงค่ากลับจากค่าความเร็ว ตามสมการ 2.1 หลังจากนั้นทำการปรับค่าตัวสมการ โมเดลอ้างอิงหลายครั้งจนได้ กราฟที่มีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 3-8 ซึ่งจะได้สมการโมเดลอ้างอิงความเร็วคือ $\frac{73.7}{s+73.7}$

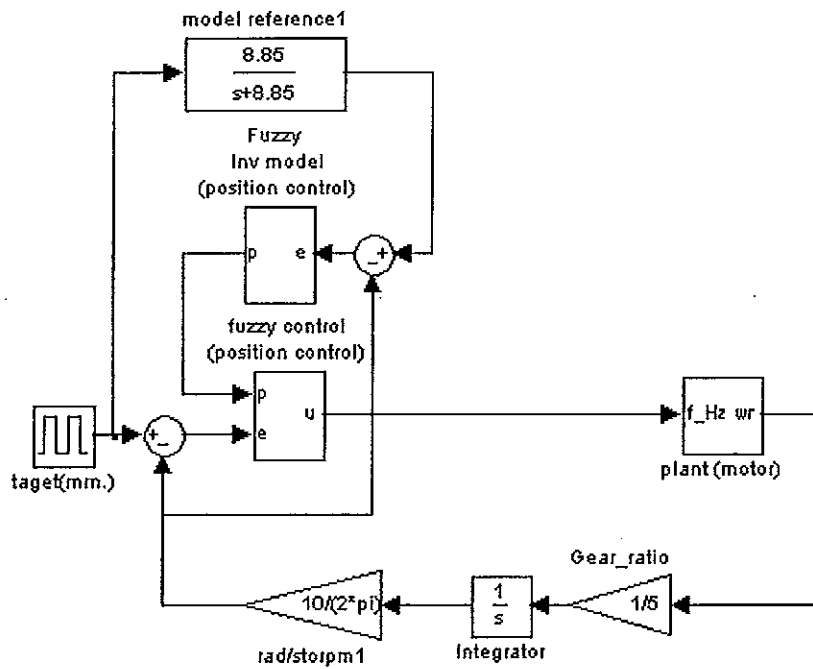


ภาพประกอบ 3-7 โครงสร้างการทดสอบหาโมเดลอ้างอิงการควบคุมตำแหน่ง

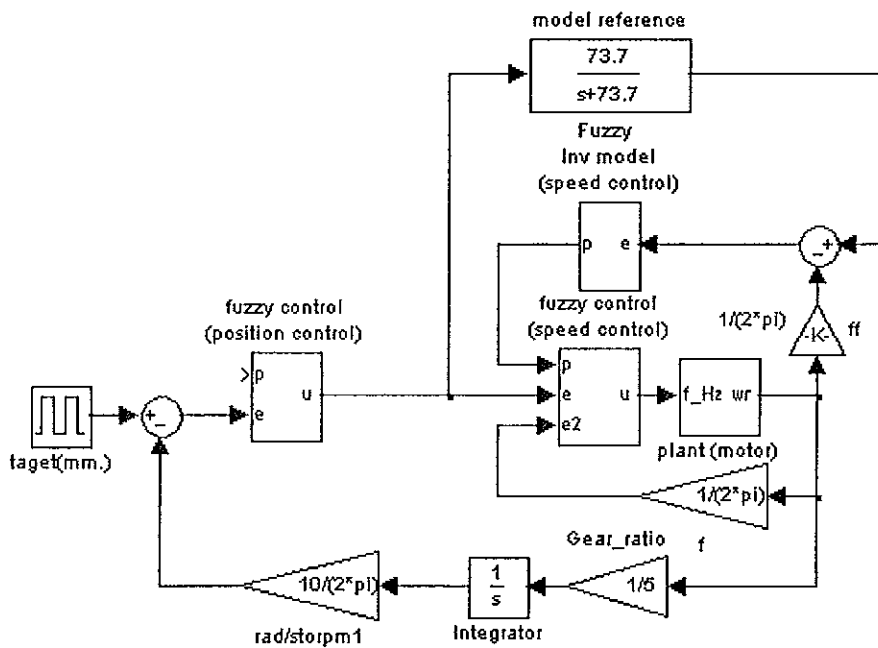


ภาพประกอบ 3-8 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถี่ซึ่งคำนวณจากความเร็วของ มอเตอร์ และโมเดลอ้างอิง

3.4 การจำลองการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์



ภาพประกอบ 3-9 โครงสร้างการสร้างกฎการควบคุมให้ฟuzzyที่ควบคุมตำแหน่ง



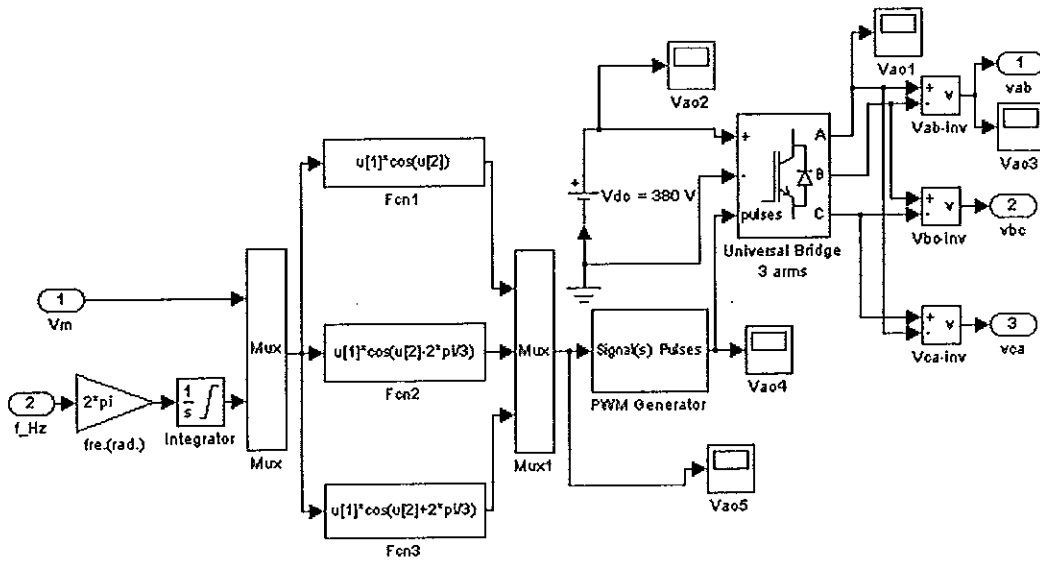
ภาพประกอบ 3-10 โครงสร้างการสร้างกฎการควบคุมให้ฟuzzyที่ควบคุมความเร็ว

การทดลองได้นำระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วดังภาพประกอบ 3-9 และ ภาพประกอบ 3-10 มาทดสอบการเรียนรู้,สร้างและปรับกฎการควบคุม ได้ออกแบบฟัซซี่เซตของ อินพุตไว้แล้วทั้งฟัซซี่ควบคุมตำแหน่งและฟัซซี่ควบคุมความเร็ว ดังรายละเอียดตามตาราง 3-1 การ ทดลองจะทำการจำลองการทำงานในโปรแกรม Simulink ใน MATLAB ในส่วนของโปรแกรมการ ควบคุมฟัซซี่ลอจิกจะเขียนเป็น S-Function สำหรับส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำ 3 เฟส , อินเวอร์เตอร์ จะนำแบบจำลองคณิตศาสตร์มาสร้างเป็นแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้ ทูลบ็อกซ์ระบบควบคุม (Control System Toolbox) ซึ่งจะได้อธิบายในแต่ละส่วนต่อไป

ตาราง 3-1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวควบคุมฟัซซี่ในระบบการควบคุม

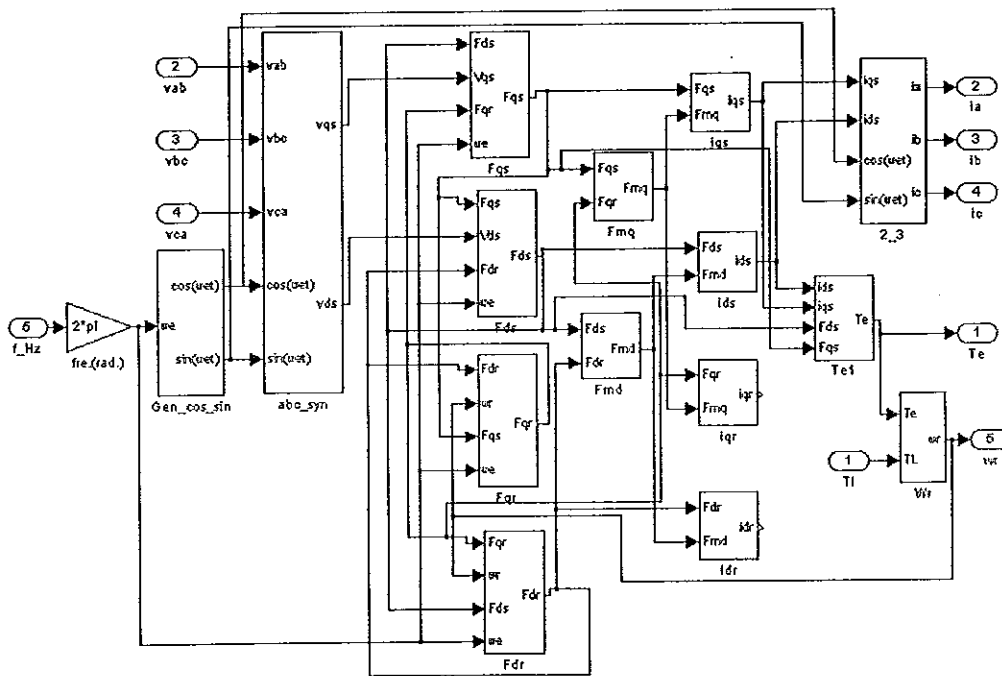
ตัวควบคุม	ความสัมพันธ์ของสัญญาณข้อมูล	
Fuzzy inverse model (position control)	Input	e= ผลตอบสนองReference model – ผลตอบสนองของพลานท์ (มอเตอร์)
		ce= eใหม่- eเก่า
	Output	ค่าปรับปรุ้งกฎของ Fuzzy position control
Fuzzy position control	Input	e= ตำแหน่งเป้าหมาย – ตำแหน่งปัจจุบัน
		ce= eใหม่- eเก่า
	Output	ค่าควบคุมตำแหน่งโดยส่งค่าความถี่ (Hz) ควบคุมให้ Fuzzy speed control
Fuzzy inverse model (speed control)	Input	e= ผลตอบสนองReference model – ผลตอบสนองของพลานท์ (มอเตอร์)
		ce= eใหม่-eเก่า
	Output	ค่าปรับปรุ้งกฎของ fuzzy speed control
Fuzzy speed control	Input	e1=ความถี่(Hz) ควบคุม(ให้)ได้ความเร็วตามเป้าหมาย)
		e2=ความเร็วของพลานท์ (มอเตอร์) ที่แปลงค่ากลับเป็นความถี่ (Hz) ควบคุม
	Output	ค่าควบคุมความเร็วโดยส่งค่าความถี่ (Hz) ควบคุมป้อนเข้า ตัวพลานท์ (มอเตอร์)

3.4.1 อินเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 3-11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนอินเวอร์เตอร์ [10]

3.4.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ



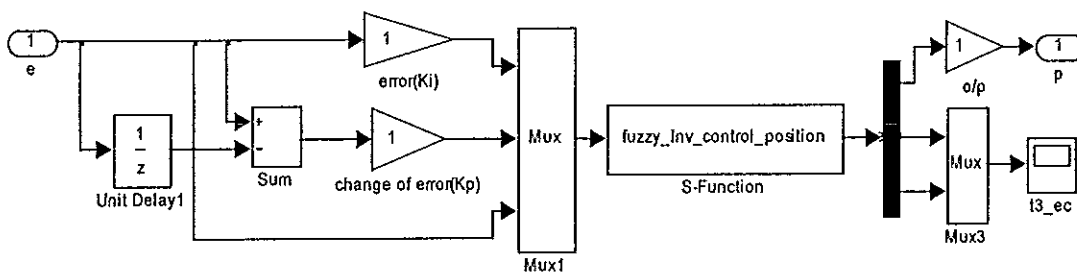
ภาพประกอบ 3-12 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำ [10]

3.4.3 ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก

ซึ่งจะแยกเป็นส่วนๆ ดังนี้

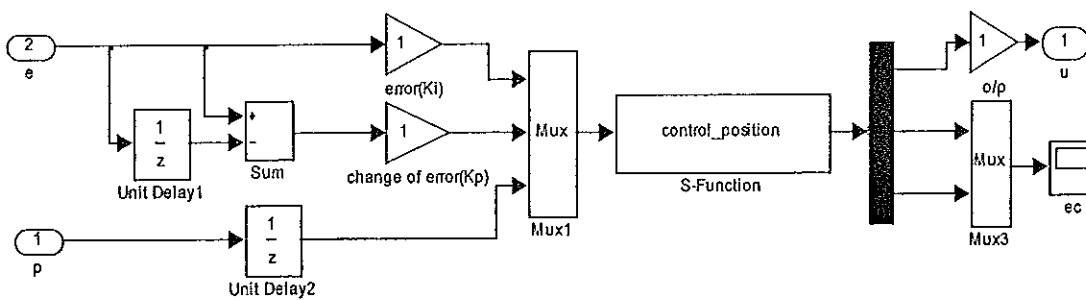
1. Fuzzy_Inv_control_position
2. Fuzzy control position
3. Fuzzy_Inv_speed_control
4. Fuzzy control speed

3.4.3.1 Fuzzy_Inv_control_position



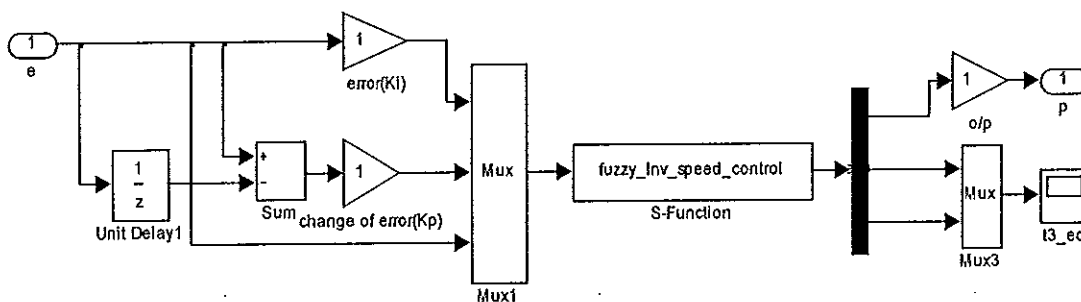
ภาพประกอบ 3-13 แบบจำลองของฟuzzyอินเวอร์สตำแหน่ง

3.4.3.2 Fuzzy control position



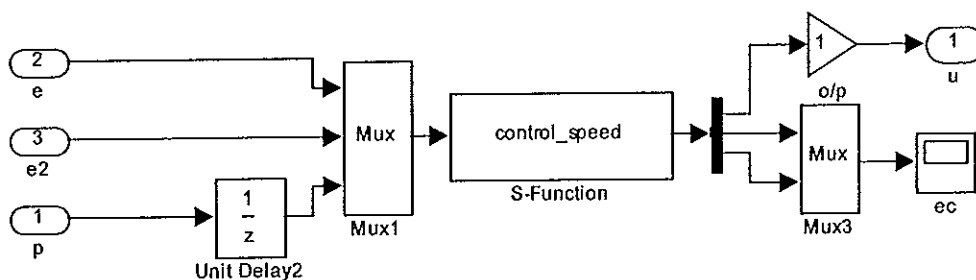
ภาพประกอบ 3-14 แบบจำลองของฟuzzyควบคุมตำแหน่ง

3.4.3.3 Fuzzy_Inv_speed_control



ภาพประกอบ 3-15 แบบจำลองของฟัซซี่อินเวอร์สความเร็ว

3.4.3.4 Fuzzy control speed



ภาพประกอบ 3-16 แบบจำลองของฟัซซี่ควบคุมความเร็ว

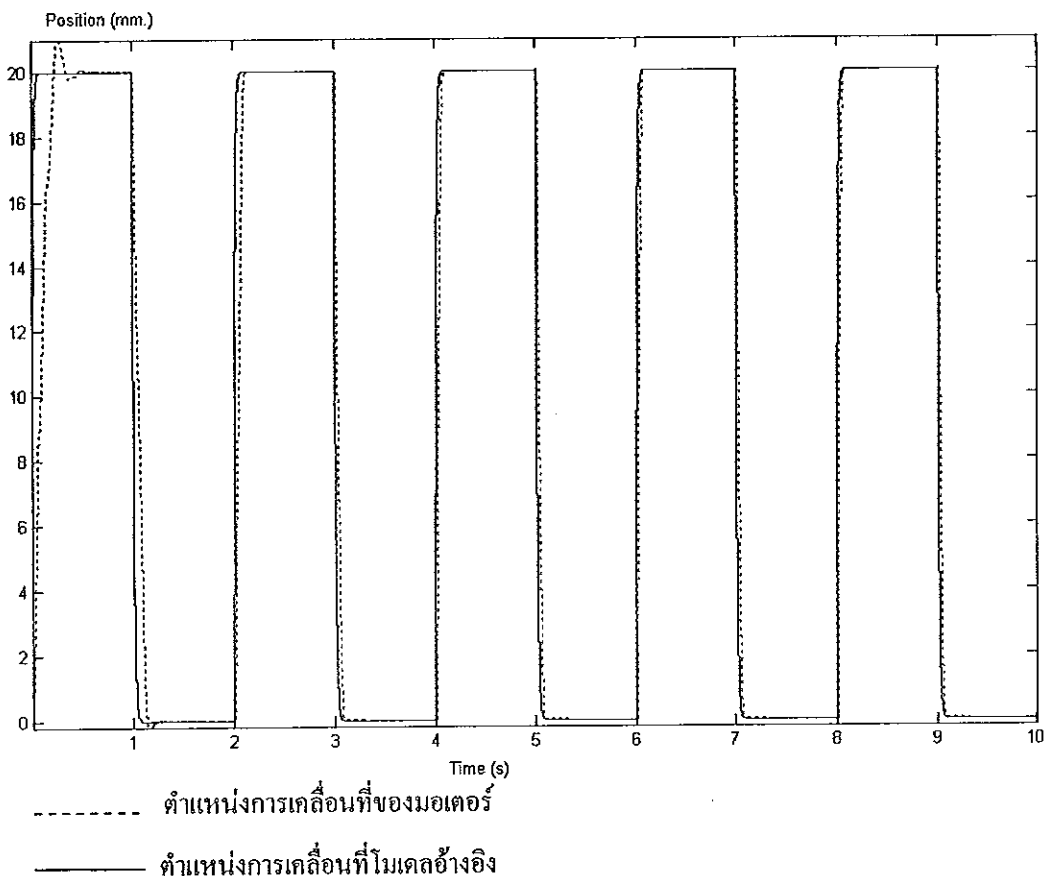
3.5 การทดลอง และผลการทดลอง

การทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

1. การสร้างกฎการควบคุมให้กับฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง
2. การสร้างกฎการควบคุมให้กับฟัซซี่ควบคุมความเร็ว และการทดสอบการปรับความเร็วอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด

3.5.1 การสร้างกฎการควบคุมให้กับฟิชซีควบคุมตำแหน่ง

การสร้างกฎการควบคุมให้กับฟิชซีควบคุมตำแหน่ง ทำได้โดยใช้โครงสร้างการควบคุมตามภาพประกอบ 3-9 ซึ่งจะมีส่วนของฟิชซีสองตัวคือ ฟิชซีควบคุมตำแหน่ง และฟิชซีอินเวอร์สตำแหน่ง โดยมีความสัมพันธ์ของสัญญาณตามตาราง 3-1 สำหรับขอบเขตของพารามิเตอร์ต่างๆ มีดังนี้ ฟิชซีควบคุมตำแหน่ง ($e = 20$ มิลลิเมตร, $ce = 0.6$ มิลลิเมตร และ $gu = 5$) ในส่วนของฟิชซีอินเวอร์สตำแหน่ง ($e = 24$ มิลลิเมตร, $ce = 0.2$ มิลลิเมตร และ $gu = 0.2$) ซึ่งค่าต่างๆ นั้น ได้มาจากการกำหนด และทดลองปรับค่าเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม และค่าความถี่ควบคุมมากที่สุดเท่ากับ 60 Hz ต่อจากนั้นก็ทำการทดสอบ โดยการป้อนตำแหน่งเป้าหมายที่ 20 มิลลิเมตร ให้กับระบบ และทำการบันทึกผลการเคลื่อนที่ ดังภาพประกอบ 3-17



ภาพประกอบ 3-17 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ในการสร้างกฎการควบคุมให้กับฟิชซีควบคุมตำแหน่ง

จากภาพประกอบที่ 3-17 จะเห็นได้ว่าระบบจะทำการสร้างกฎการควบคุมไปตลอด เมื่อได้กฎการควบคุมที่มีค่าความผิดพลาด ตามที่กำหนดก็จะหยุดการปรับกฎและบันทึกค่าของกฎที่ได้ เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมต่อไป ดังภาพประกอบที่ 3-18

fuzzyrules_ =

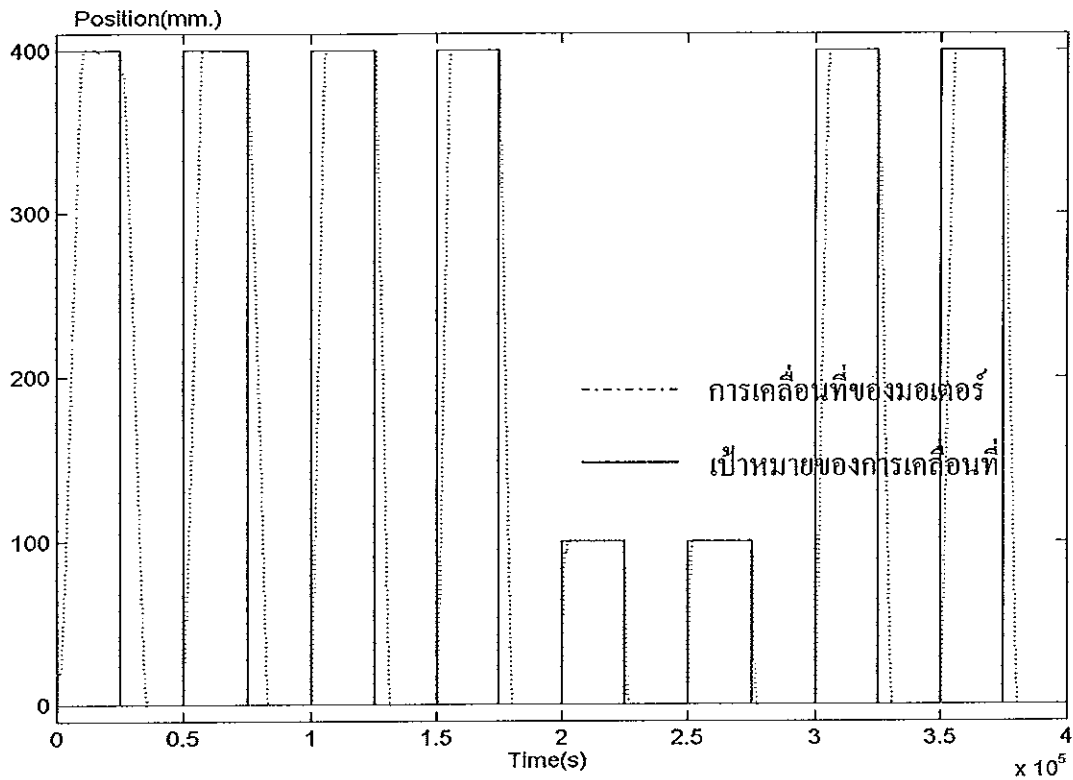
-0.0026	-0.0003	0	0	-25.3439	-60.0000	-60.0000	0	0	0	0
-0.0023	0	0	0	-18.1500	-60.0000	-60.0000	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-38.7331	-38.7331	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-30.1776	-30.1776	0	0	0	0
0	-0.0011	1.4915	-1.2135	-29.1281	-28.5891	-0.9825	0.9121	0.0952	0.0199	0
0	-0.0011	1.5206	0.2134	-23.4997	0.0004	25.0643	3.0367	0.3448	0.0231	0
0	0	6.2711	7.6689	12.8516	26.3087	16.5427	2.1246	0.2496	0.0032	0
0	0.6924	12.9777	18.4551	34.9241	28.7543	0	0	0	0	0
0	11.7874	17.8308	12.2131	40.4397	34.2699	0	0	0	0	0
1.0843	20.8455	29.2931	14.6378	60.0000	60.0000	19.2875	0	0	-0.0033	-0.0033
1.0843	9.7505	18.1981	14.6378	60.0000	60.0000	23.8605	0	0	-0.0033	-0.0033

fuzzyrules_ = [row][column] = [e][ce]

ภาพประกอบ 3-18 แสดงกฎฟัซซี่ควบคุมตำแหน่งที่ได้จากการปรับ

3.5.2 การสร้างกฎการควบคุมให้กับฟัซซี่ควบคุมความเร็ว และการทดสอบการปรับความเร็วอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด

จากภาพประกอบ 3-10 ซึ่งจะมีส่วนของฟัซซี่สามตัวคือ ฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง, ฟัซซี่ควบคุมความเร็ว และฟัซซี่อินเวอร์สความเร็ว โดยมีความสัมพันธ์ของสัญญาณตามตาราง 3-1 สำหรับขอบเขตของพารามิเตอร์ต่างๆ มีดังนี้ ฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง ($e_1 = 60$ Hz, $e_2 = 60$ Hz และ $g_u = 5$) ในส่วนของฟัซซี่อินเวอร์สความเร็ว ($e = 37.5$ Hz, $ce = 3.87$ Hz และ $g_u = 0.2$) ซึ่งค่าต่างๆ นั้นได้มาจากการกำหนดและทดลองปรับค่าเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม และค่าความถี่ควบคุมมากที่สุดอยู่ 75 Hz ต่อจากนั้นก็ทำการทดสอบโดยการป้อนตำแหน่งเป้าหมายที่ 400 มิลลิเมตร ให้กับระบบบันทึกผลการเคลื่อนที่ และผลตอบสนองของความเร็ว ดังภาพประกอบ 3-19 และ 3-21 เรียงตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายในแต่ละช่วงเวลาได้ดังนี้



ภาพประกอบ 3-19 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ในการสร้างกฎการควบคุมให้กับฟัซซี่ควบคุมความเร็ว และการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของโหลด

จากภาพประกอบ 3-15 สามารถอธิบายในแต่ละช่วงเวลาได้ดังนี้

- ช่วงเวลา $t = 0$ วินาที ถึง $t = 100$ วินาที

เป็นการสร้างกฎการควบคุมฟัซซี่ควบคุมความเร็ว ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ให้เข้าสู่เป้าหมายได้ที่ 400 mm. และกฎการควบคุมที่ได้จากการปรับ แสดงดังในภาพประกอบ 3-20

fuzzyrules =

-59.1811	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-51.2560	-22.0012	0	0
-5.8946	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-54.3346	-56.2649	-50.6560	-22.0012	0	0
0.6252	2.0061	-26.1312	-71.6527	-74.7645	-37.4799	-4.1866	0	0	0	0
0.4188	9.4802	-4.7407	-63.9643	-74.6584	-32.8887	-4.1866	0	0	0	0
0	1.3750	2.2521	-23.4520	-27.7545	-9.0981	-5.6726	0.0000	0	0	0
0	0	0	-11.2422	3.4110	5.4745	1.7962	10.9666	-0.0084	0	0
0	0	0	0	13.2907	24.2323	32.6783	20.5642	-2.2783	-1.1058	0
0	0	0	0	0.8000	38.8973	74.9020	61.5985	5.7381	-9.1218	-0.2476
0	0	0	0	0.6000	28.0166	65.7445	63.5007	23.1519	-2.2879	-0.2669
0	0	6.4000	27.8773	47.3511	45.3039	64.5378	75.0000	75.0000	75.0000	5.6403
0	0	6.4000	28.2773	64.0416	75.0000	75.0000	75.0000	75.0000	75.0000	58.5740

fuzzyrules = [row][column] = [e1][e2]

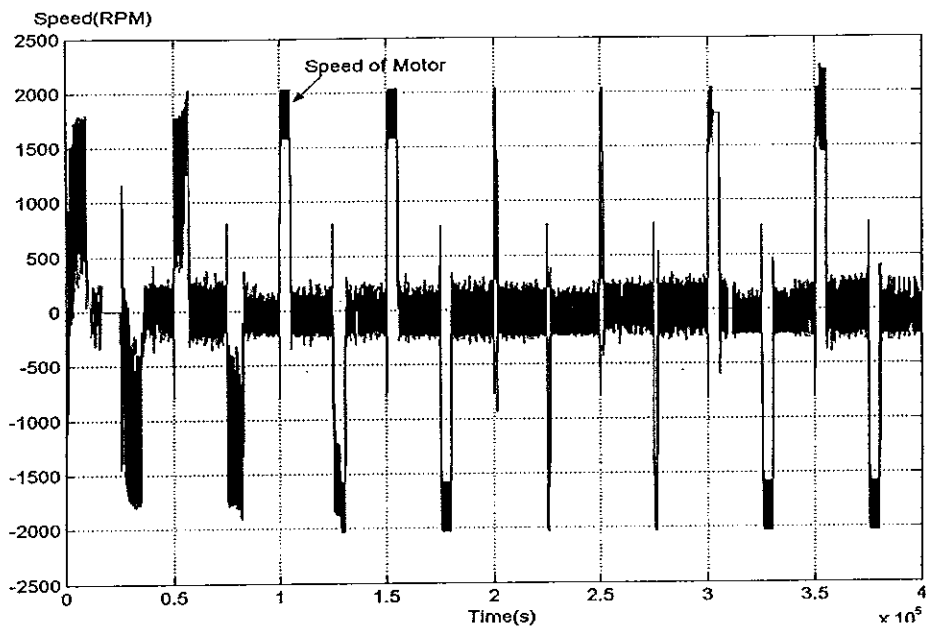
ภาพประกอบ 3-20 แสดงกฎฟัซซี่ควบคุมความเร็วที่ได้จากการปรับ

— ช่วงเวลา $t = 100$ วินาที ถึง $t = 300$ วินาที

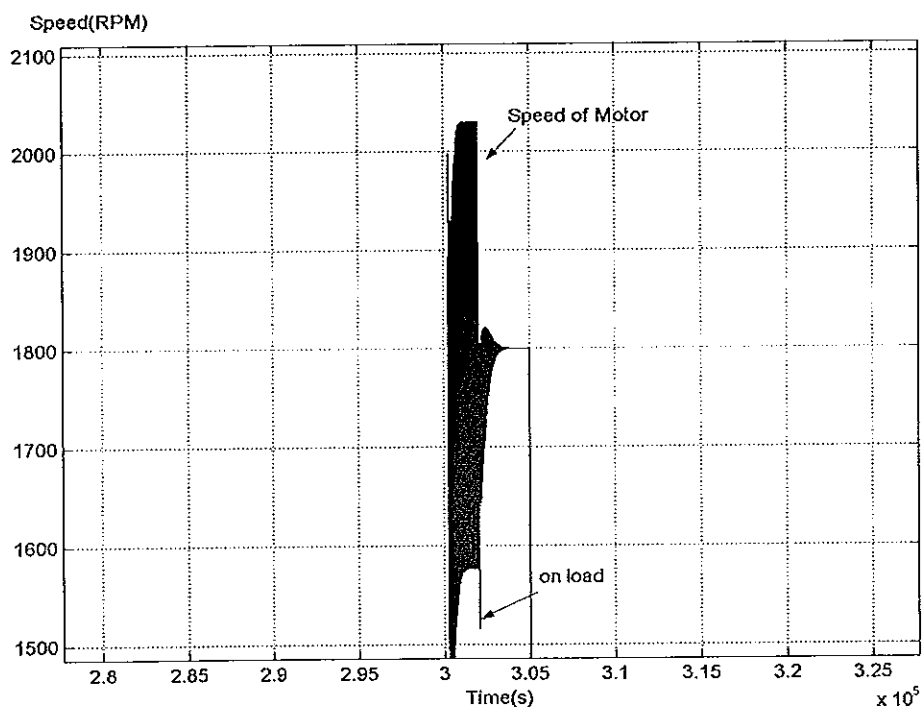
ทดสอบกฎที่ปรับได้ที่ระยะทาง 400 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร ซึ่งระบบสามารถควบคุมการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายใช้เวลา 5.75 วินาที และใช้เวลา 2.35 วินาที เรียงตามลำดับ

— ช่วงเวลา $t = 300$ วินาที ถึง $t = 400$ วินาที

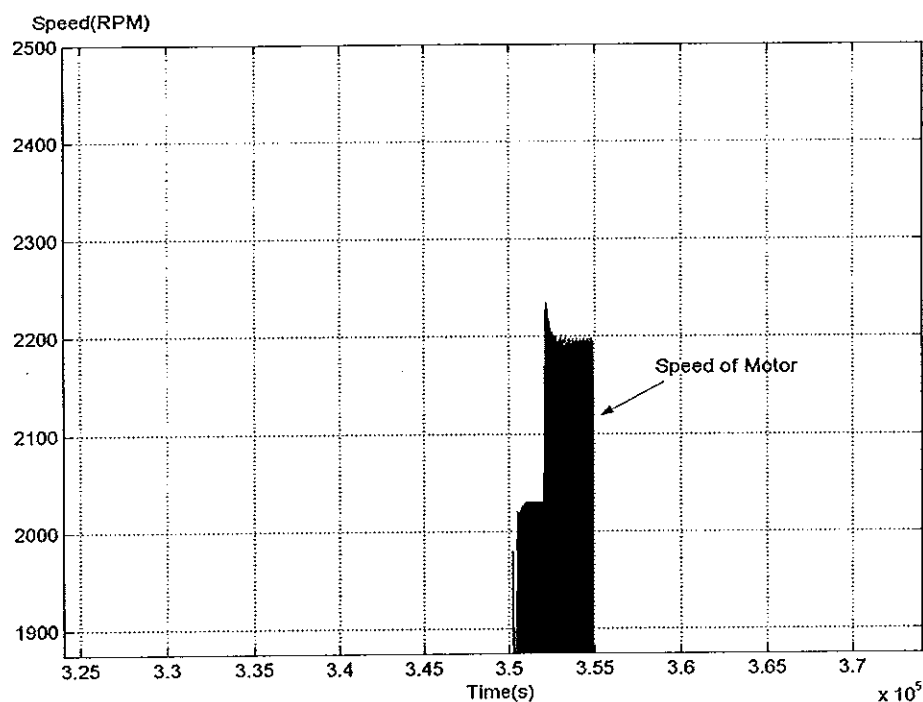
เป็นการทำงานในสถานะที่ 2 คือการปรับกฎเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง ที่เวลา $t = 302$ วินาที ถึง $t = 313$ วินาที จะเป็นการใส่โหลด 2 N.m ซึ่งระบบควบคุมการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายใช้เวลา 5.78 วินาที ที่เวลา $t = 302$ วินาที จะเห็นได้ว่าความเร็วของมอเตอร์จะลดลง และจะถูกปรับให้ความเร็วเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 3-22 และที่เวลา $t = 352$ วินาที ถึง $t = 363$ วินาที เป็นการเสริมแรง 2 N.m (ในทิศทางเดียวกับการหมุนของมอเตอร์) ทำให้มอเตอร์รับโหลดน้อยลง ระบบควบคุมการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายใช้เวลา 5.48 วินาที ที่เวลา $t = 363$ วินาที จะเห็นได้ว่ามอเตอร์จะมีความเร็วเพิ่มขึ้น และความเร็วของมอเตอร์ก็จะถูกปรับให้ลดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 3-23



ภาพประกอบ 3-21 ความเร็วของมอเตอร์ที่เวลาต่างๆ



ภาพประกอบ 3-22 ความเร็วของมอเตอร์ ขณะมีโหลด 2 N.m



ภาพประกอบ 3-23 ความเร็วของมอเตอร์ ขณะมีแรงเสถียร ขนาด 2 N.m

จากการทดลองสรุปได้ว่า ระบบสามารถเรียนรู้,สร้างและปรับกฎได้ด้วยตัวเอง ระบบสามารถที่จะปรับตัวเองได้เมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลง ซึ่งยังคงให้ผลการควบคุมตำแหน่งยังคงมีความแม่นยำ และเข้าสู่เป้าหมายในเวลาใกล้เคียงหรือเท่ากับเวลา ในสถานะ โหลดคงที่ค่าหนึ่งในสถานะปกติ

เมื่อทราบแบบจำลองของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์และทำการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์แล้ว ในบทความต่อไปจะกล่าวถึงการสร้างระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ในเครื่องพิมพ์และตัดเหล็ก เพื่อศึกษาการทำงานจริงต่อไป

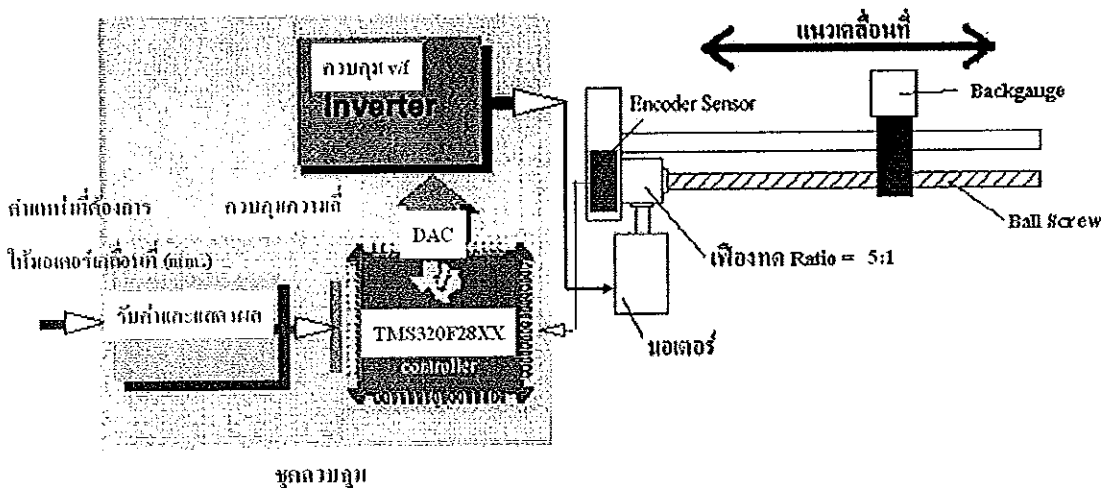
บทที่ 4

ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพิมพ์และตัดเหล็ก

จากบทที่ผ่านมา ได้ทราบถึงแบบจำลองของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพิมพ์และตัดเหล็ก และสร้างเป็นระบบการควบคุมจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองการทำงาน และทดสอบระบบควบคุม ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่าระบบสามารถทำการควบคุมและปรับกฎการควบคุมได้ ดังนั้นในบทนี้ จะเป็นการนำแบบจำลองเหล่านั้น มาสร้างเป็นระบบควบคุมจริง ซึ่งจะแยกอธิบายเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนฮาร์ดแวร์ และส่วนซอฟต์แวร์

4.1 ส่วนฮาร์ดแวร์

ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในเครื่องพิมพ์และตัดเหล็ก สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4-1



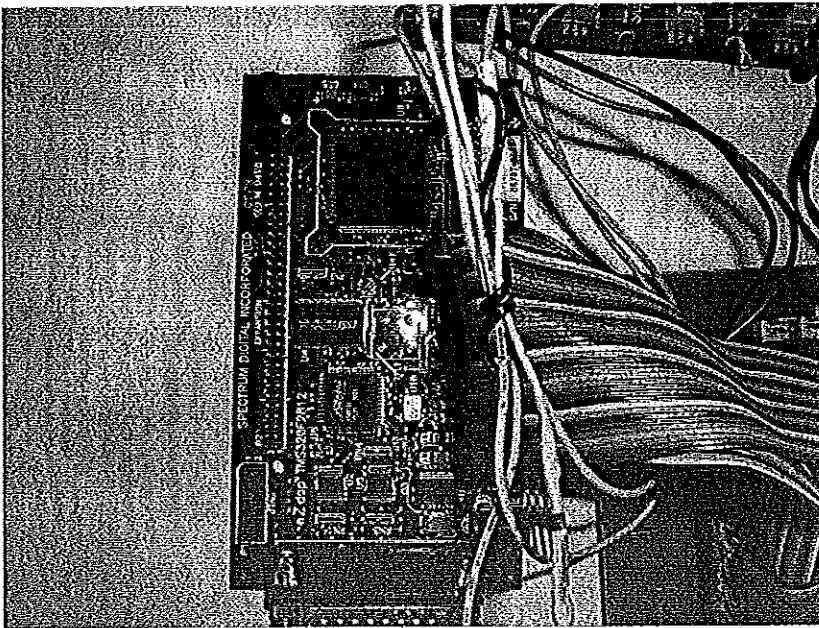
ภาพประกอบ 4-1 ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพิมพ์และตัดเหล็ก

ระบบควบคุมตำแหน่ง และความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องปั๊มและตัดเหล็กมี
ส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

- บอร์ดควบคุม TMS320F2812 DSP
- อินเวอร์เตอร์
- เอนโคเดอร์ (Encoder)
- ลิมิทสวิตช์
- บอร์ดเอาต์พุต
- บอร์ด D/A TLV5619-5639EVM

ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียด ในแต่ละส่วนต่อไป

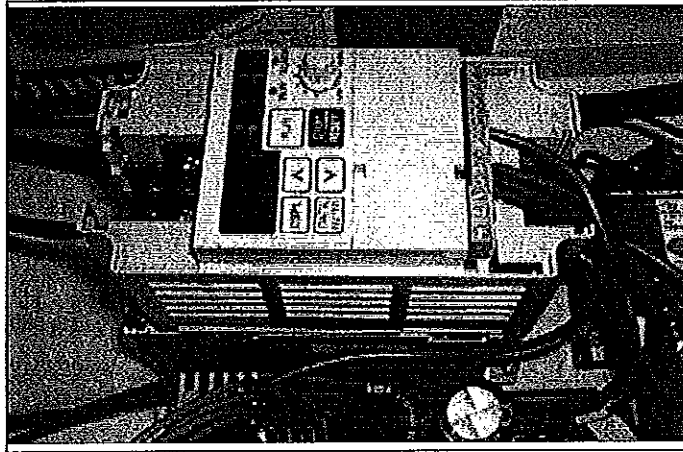
4.1.1 บอร์ดควบคุม DSP



ภาพประกอบ 4-2 รูปบอร์ดควบคุม TMS320F2812 DSP และอุปกรณ์ต่างๆ

บอร์ดควบคุมมีหน้าที่ประมวลผล, นำเข้าและส่งออกสัญญาณ โดยในส่วนนี้เป็น
ส่วนหลักของการควบคุมทั้งหมด

4.1.2 อินเวอร์เตอร์



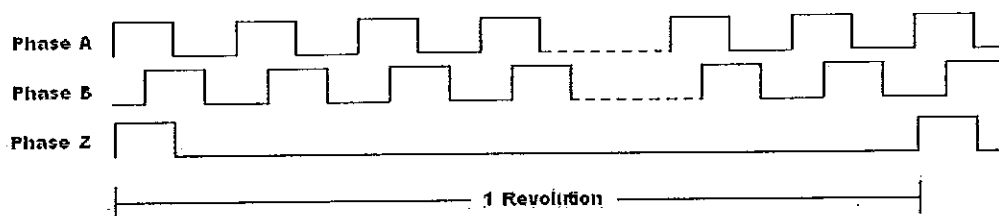
ภาพประกอบ 4-3 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ [10]

ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ นั้นมีรูปแบบหลายวิธี แต่ในงานที่ต้องการควบคุมความเร็ว, กำลัง, อัตราเร่งให้มีความแม่นยำสูงนั้น จะใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุม เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างครบถ้วน ง่าย มีการแสดงผลชัดเจน และราคาไม่สูงมากนัก จากภาพประกอบ 4-3 เป็นอินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Yaskawa Mini J7 Series แสดงผลเป็นตัวเลข สามารถควบคุมความเร็วแบบดิจิทัล และอนาล็อก สามารถตั้งความเร็วได้หลายระดับ และการควบคุมนั้น สามารถควบคุมผ่านแผงหน้าปัดได้โดยตรง หรือจะควบคุมผ่านวงจรถ่ายนอกก็ได้ ในการส่งค่าควบคุมความเร็วจากบอร์ดควบคุม DSP จะส่งมาเป็นสัญญาณอนาล็อก โดยตัวอินเวอร์เตอร์จะถูกโปรแกรมให้มีการรับค่า ทางพอร์ตรับข้อมูลแบบอนาล็อก ซึ่งจะทำให้ระดับความเร็วมีหลายระดับกว่าการควบคุมแบบดิจิทัล

4.1.3 เอนโคเดอร์

ตัวตรวจรู้ตำแหน่ง สามารถแบ่งตามโครงสร้างการเคลื่อนที่ได้เป็นสองแบบด้วยกันคือ เอนโคเดอร์ตำแหน่งหมุน (Rotation Position Encoder) และ เอนโคเดอร์ตำแหน่งแบบเคลื่อนที่แนวเส้นตรง (Linear Position Encoder) ในแต่ละแบบนี้สามารถจำแนกออกตาม

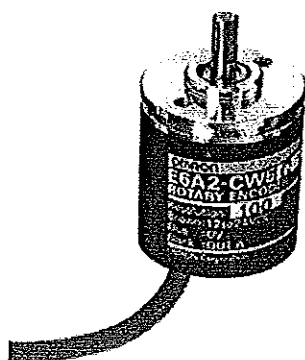
ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตได้เป็น 2 แบบหลักๆ คือ แบบเอนโคเดอร์แบบเพิ่มค่า (Incremental Encoder) และแบบเอนโคเดอร์แบบสัมบูรณ์ (Absolute Encoder)



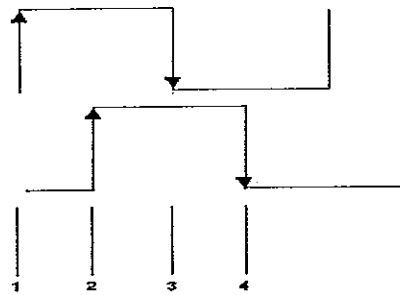
ภาพประกอบ 4-4 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของเอนโคเดอร์ตำแหน่งแบบเพิ่ม

สัญญาณเอาต์พุตจะมี 3 เส้น คือ เฟส A, เฟส B และเฟส Z โดย โดยที่พัลส์ ของเฟส A และเฟส B จะต่างกันอยู่ 90 องศา แต่การที่เฟสใดจะนำอีกเฟสหนึ่งนั้น จะขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของแกน และเมื่อหมุนครบรอบ จะมีพัลส์ออกมาทางเฟส Z ดังภาพประกอบ 4-4

ในงานวิจัยนี้จะใช้ แบบเอนโคเดอร์ตำแหน่งแบบเพิ่มค่า ยี่ห้อ OMRON รุ่น E6A2-CWZ3C ดังแสดงในภาพประกอบ 4-5 ที่ให้ 100 พัลส์ ต่อ 1 รอบ และอาศัยการตรวจจับขอบขาขึ้นและขาลงของทั้งเฟส A และเฟส B ทำให้สามารถแบ่ง 1 พัลส์ เป็น 4 ส่วน ดังนั้นในการหมุน 1 รอบก็จะสามารถแบ่งสเตปการหมุนได้เป็น 400 ส่วน ดังแสดงในภาพประกอบ 4-6

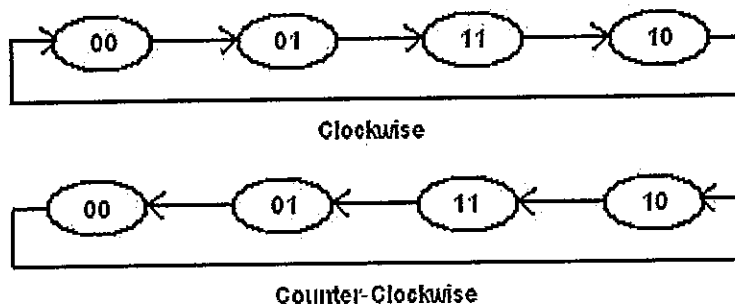


ภาพประกอบ 4-5 เอนโคเดอร์ตำแหน่งแบบเพิ่มค่า ยี่ห้อ OMRON [10]



ภาพประกอบ 4-6 การตรวจจับขอบขาขึ้น และขอบขาลงของทั้ง 2 เฟส

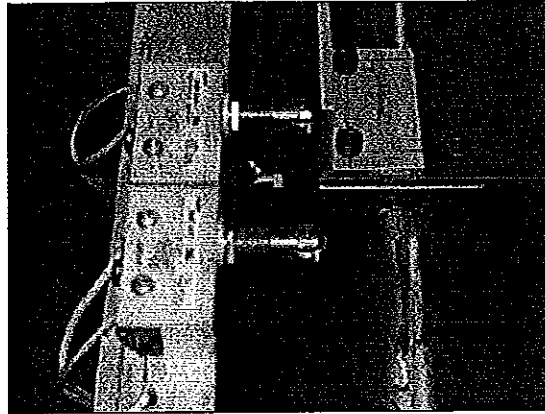
สำหรับการนับจำนวนพัลส์ของเอาท์พุทจะใช้ตัวบอร์ด์ DSP ซึ่งภายในบอร์ด์ DSP จะมีส่วนของการนับค่าจากเอนโคเดอร์โดยตรง โครงสร้างภายในอาศัยรูปแบบการตรวจจับสัญญาณและทิศทางการหมุน โดยจะมีลักษณะของเฟส ภาพประกอบ 4-7



ภาพประกอบ 4-7 วิธีการตรวจจับทิศทางการหมุนของเอนโคเดอร์

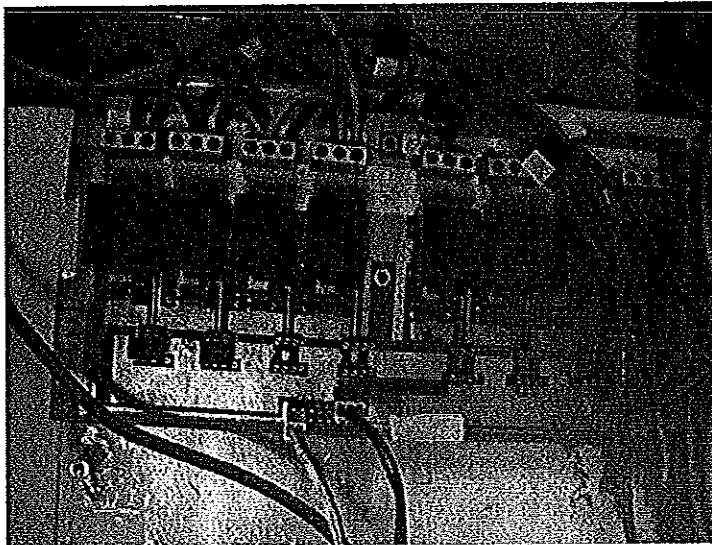
4.1.4 ลิ้มิตสวิตซ์

ลิ้มิตสวิตซ์จะมีอยู่ 2 จุด คือ จุดทำหน้าที่ป้องกันการเคลื่อนที่เกินขอบเขตการทำงาน โดยในที่นี้ระบบเคลื่อนที่ได้ 360.0 มิลลิเมตร ซึ่งระบบไฟวงจรหลักจะถูกตัดถ้าหากลิ้มิตสวิตซ์ถูกกด และอีกจุดทำหน้าที่ในกำหนดจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่เป็นตำแหน่งอ้างอิงที่ 0.0 มิลลิเมตร ซึ่งการหาตำแหน่งจุดเริ่มต้น จะใช้ลิ้มิตสวิตซ์ร่วมกับเฟส Z ของเอนโคเดอร์ เพื่อให้เกิดความแม่นยำมากขึ้น ตามภาพประกอบ 4-8



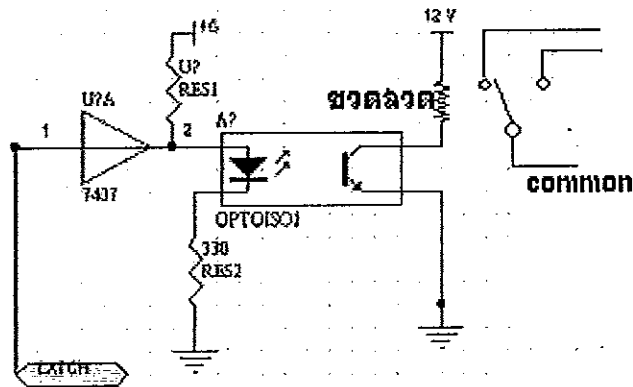
ภาพประกอบ 4-8 ลิ้มิตสวิตช์ ที่ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของตัววักระยะ [10]

4.1.5 บอร์ดเอาท์พุท



ภาพประกอบ 4-9 บอร์ดวงจรเอาท์พุท

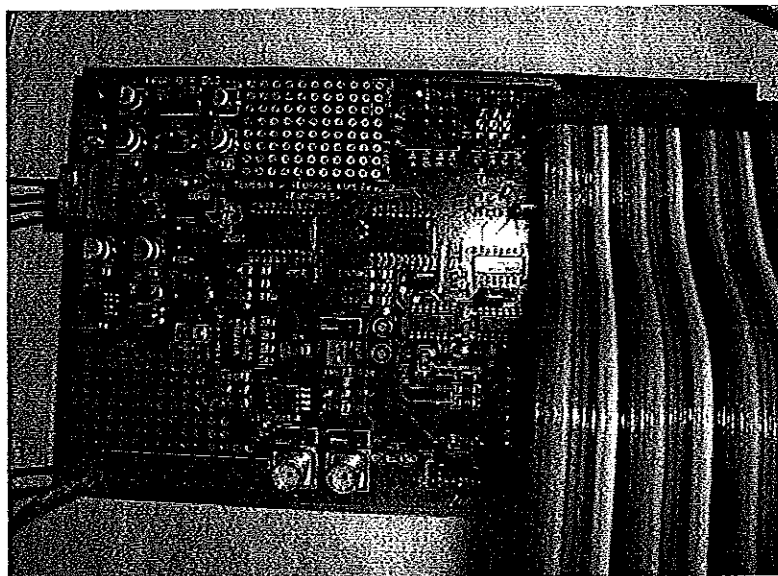
จากภาพประกอบ 4-9 เป็นบอร์ดที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอก โดยจะใช้รีเลย์ (relay) เป็นตัวตัดต่อไฟแรงสูง และจะมีออปโตไอโซเลเตอร์ (Opto-isolator) เบอร์ 4N37 แยกกราวด์ระหว่างบอร์ดควบคุม DSP และวงจรรีเลย์ ซึ่งมีวงจรตามภาพประกอบที่ 4-10 ซึ่งจะใช้ในการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์โดยต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 4-10 วงจรเอาต์พุต ควบคุมทิศทางหมุน [10]

4.1.6 บอร์ด D/A TLV5619-5639EVM

ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้จะควบคุมผ่านอินเวอร์เตอร์ v/f คงที่ ซึ่งจะส่งสัญญาณควบคุมอนาล็อก เพื่อที่จะให้ระดับความเร็วมีหลายระดับและเป็นเชิงเส้น โดยจะใช้บอร์ด D/A แปลงสัญญาณดิจิทัลจากบอร์ดควบคุม DSP เป็นสัญญาณอนาล็อกส่งเข้าอินเวอร์เตอร์ บอร์ด D/A ที่ใช้จะเป็นบอร์ด TLV5619-5639EVM 12-Bit Parallel DAC Evaluation Module ของบริษัท เทกส์ซัส ภายในบอร์ดจะมี ไอซีเบอร์ TLV5619 และ ไอซีเบอร์ TLV5639 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก ดังภาพประกอบ ที่ 4-11



ภาพประกอบ 4-11 บอร์ด D/A TLV5619-5639EVM

4.2 ส่วนซอฟต์แวร์

สำหรับส่วนซอฟต์แวร์ซึ่งจะเขียนโปรแกรมลงในบอร์ดควบคุม TMS320F2812 DSP ซึ่งแยกอธิบายเป็น 2 ส่วนหลักได้ดังนี้

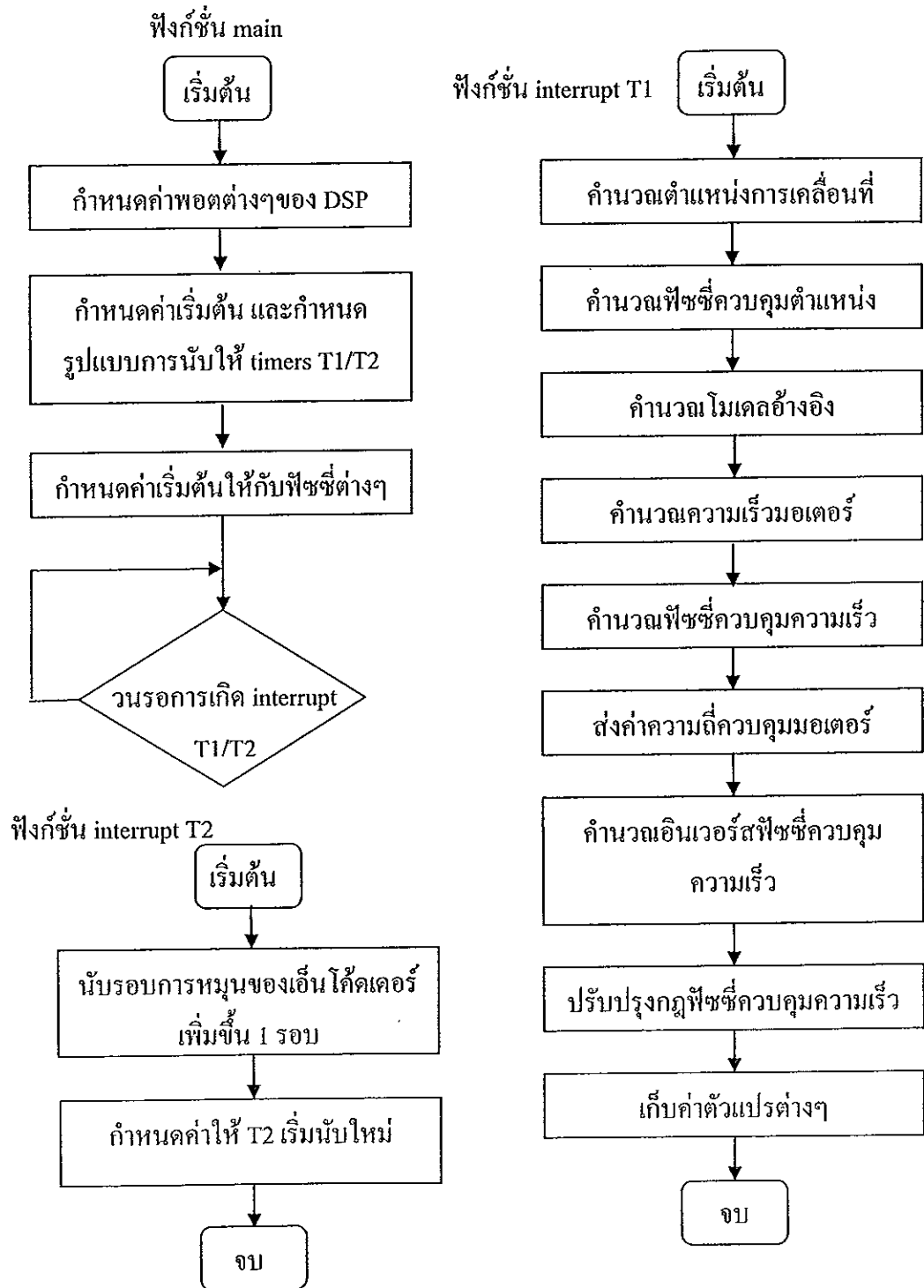
- โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมควบคุม
- การออกแบบตัวควบคุมพีซีซีลอจิก

4.2.1 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมควบคุม

ส่วนประกอบของโปรแกรมสามารถแสดงในรูปโฟลว์ชาร์ตการทำงานได้ดังนี้

- กระบวนการควบคุม
- การหาตำแหน่งจุดเริ่มต้น

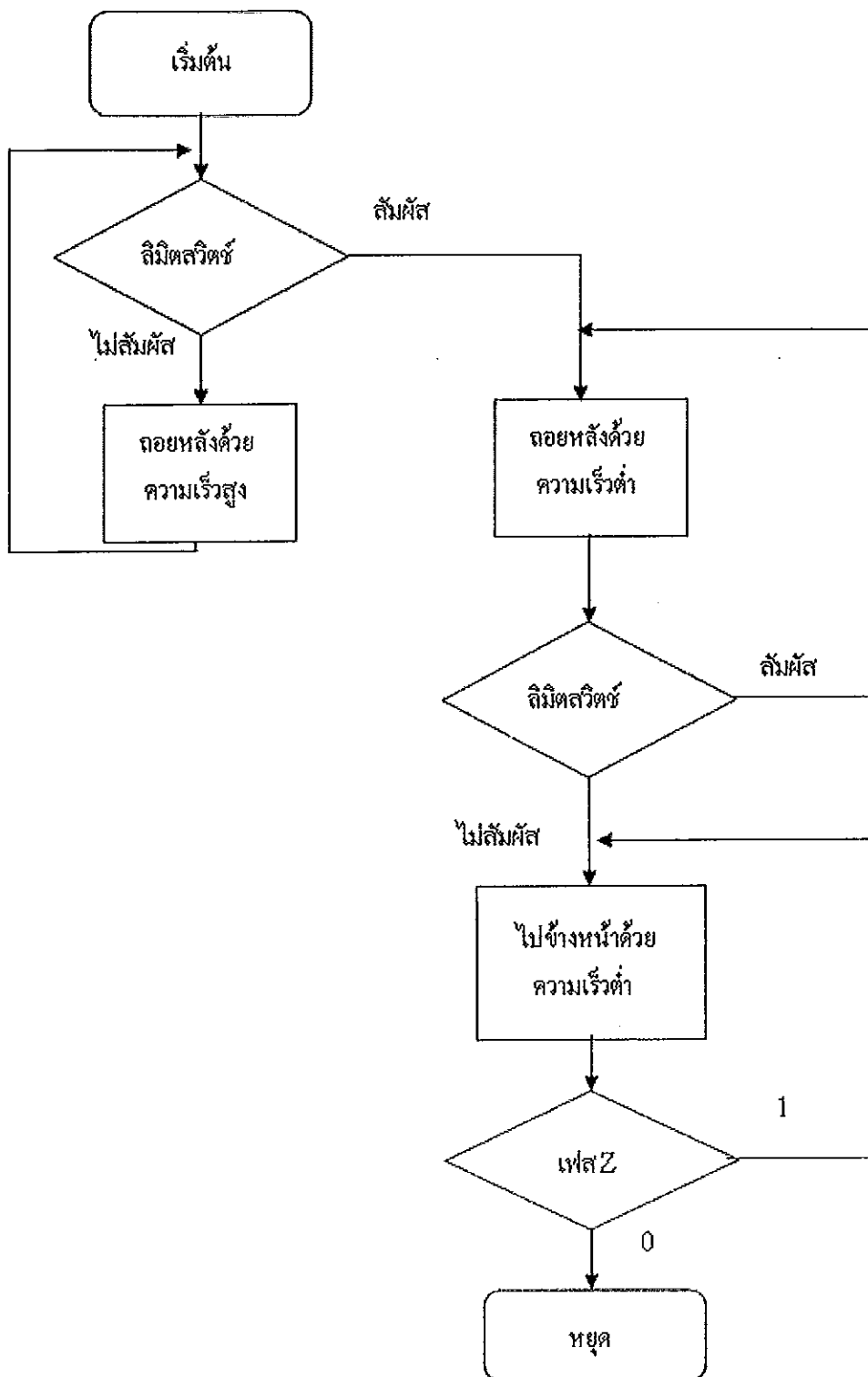
4.2.1.1 กระบวนการควบคุม



ภาพประกอบ 4-12 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมควบคุมตามโครงสร้างในภาพประกอบ 3-6

4.2.1.2 การหาตำแหน่งเริ่มต้น

การหาตำแหน่งเริ่มต้น จะใช้ลิมิตสวิตช์ร่วมกับสัญญาณพัลส์ เฟส Z จากโรตารี เอนโคเดอร์ ซึ่งสัญญาณพัลส์ เฟส Z นี้ จะมีทุกๆ การหมุนครบหนึ่งรอบของโรตารี เอนโคเดอร์ โดยจะติดตั้งลิมิตสวิตช์ บริเวณใกล้ๆกับจุดที่จะเกิดพัลส์ของเฟส Z นี้ เมื่อต้องการเข้าหาตำแหน่งเริ่มต้น ตัววัฏระยะจะเคลื่อนที่ถอยหลังจนกว่าจะสัมผัสลิมิตสวิตช์ แล้วจึงลดความเร็วและเคลื่อนที่ต่อไปจนกระทั่งลิมิตสวิตช์ไม่ถูกสัมผัส แล้วจึงหยุดและเคลื่อนที่กลับ โดยในการเคลื่อนที่กลับนี้ จะเป็นการเคลื่อนที่กลับไปจนกว่าจะเจอเฟส Z จึงสั่งหยุดมอเตอร์ หลักการทำงานของ การเข้าหาตำแหน่งเริ่มต้น เป็นดังภาพประกอบ 4-13



ภาพประกอบ 4-13 โฟลว์ชาร์ตการเข้าหาตำแหน่งเริ่มต้น

4.2.2 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึง วิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบ FMRLC ที่ใช้สำหรับการควบคุมตำแหน่งและความเร็วมอเตอร์ในเครื่องหีบและตัดเหล็ก โดยนำหลักการที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ใน Simulink MATLAB มาสร้างตัวควบคุมจริง ซึ่งจะแบ่งหลักการควบคุมออกเป็น 2 ส่วนคือ

- การควบคุมตำแหน่ง
- การควบคุมความเร็ว

4.2.2.1 การควบคุมตำแหน่ง

ในส่วนตัวควบคุมตำแหน่งจะมีตัวควบคุมฟัซซี่ 2 ตัว คือฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง (Fuzzy Position Control) และฟัซซี่อินเวอร์สตำแหน่ง (Fuzzy Inverse Position) ภาพประกอบ 3-9 ซึ่งจะได้อธิบายแต่ละส่วนดังนี้

4.2.2.1.1 ฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง

การออกแบบนั้นจะทำการกำหนดขอบเขตและกราฟความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตเท่านั้นในส่วนของโครงสร้างภายในของตัวฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง ก็ยังคงมีโครงสร้างพื้นฐานทั่วไปคือ ฟัซซี่ฟิเคชัน การอนุมาน และการดีฟัซซี่ฟิเคชัน ตัวแปรอินพุต 2 ตัว คือค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (e) และค่าการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (ce) โดยมีตัวแปรเอาต์พุตเป็นค่าความถี่ควบคุมที่ส่งให้ตัวมอเตอร์ ตัวแปรต่างๆ เหล่านี้จะถูกนำไปออกแบบกฎการควบคุมฟัซซี่ลอจิก โดยใช้หลักการควบคุมแบบ FMRLC

- การกำหนดขอบเขตและกราฟความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุต

อินพุตของระบบควบคุม ประกอบด้วยอินพุต 2 ตัว คือ

1. ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (Error,e) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าตำแหน่งเป้าหมาย (S_m^*) กับตำแหน่งที่เคลื่อนที่จริงของมอเตอร์ (S_m)

$$\text{Error}(e) = S_m^* (\text{Target Position}) - S_m (\text{Motor Position}) \quad (4.1)$$

2. ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (Change of Error,ce) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าความผิดพลาดของตำแหน่งล่าสุด (Lated Error) กับค่าความผิดพลาดของตำแหน่งก่อนหน้านั้น (Previous Error)

$$\text{Change of Error (ce)} = e_l (\text{Lated Error}) - e_p (\text{Previous Error}) \quad (4.2)$$

เอาต์พุตของระบบควบคุม ประกอบด้วยเอาต์พุต 1 ตัว คือ ค่าความถี่ที่ส่งให้กับตัวมอเตอร์

การกำหนดขอบเขตของพีชชีเซตอินพุต ทำได้โดย e เท่ากับ $(-20, 20)$ มิลลิเมตร และ ce เท่ากับ $(-0.5, 0.5)$ มิลลิเมตร ซึ่งขอบเขตของพีชชีเซต ce ได้จากการให้ระบบปรับอัตโนมัติ โดยจะกำหนดค่าเริ่มต้นไว้ค่าหนึ่งแล้วทำการเก็บค่าที่มากที่สุดในแต่ละรอบของการคำนวณในช่วงเวลาที่กำหนด และการออกแบบกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยจะเลือกกราฟเป็นแบบสามเหลี่ยม กำหนดตัวแปร ความกว้างของฐานสามเหลี่ยมเท่ากับ 0.4 โดยมีจุดศูนย์กลางของพีชชีเซต ดังนี้ $[-1.0, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0]$ และในส่วนของเอาต์พุต กำหนดค่าขอบเขตความถี่ที่ป้อนเข้ามอเตอร์เพื่อควบคุมความเร็ว ในที่นี้ใช้ค่า $(-60,60)$ ซึ่งการสื่อความหมายในการใช้งานจริงนั้นเครื่องหมายบวกจะเป็นการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และเครื่องหมายลบจะเป็นการเคลื่อนที่ในทางตรงข้าม ส่วนขนาดก็คือความถี่ควบคุมที่ป้อนเข้ามอเตอร์โดยผ่านตัวอินเวอร์เตอร์ สำหรับพีชชีเซตเอาต์พุต จะมีความกว้างฐานของกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.4 มีโครงสร้างดัง ภาพประกอบ 2-11 (a)

จากความสัมพันธ์ทั้งหมดที่ได้กำหนดไว้เป็นโครงสร้างของอินพุต และเอาต์พุต แล้วนั้นในส่วนของกฎการควบคุมไม่ได้กำหนดไว้ เนื่องจากระบบจะเป็นการสร้างกฎการควบคุมอัตโนมัติ ในลำดับต่อไปก็จะเป็นการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ พีชชีอินเวอร์สตำแหน่งซึ่งเป็นตัวสร้างกฎให้กับพีชชีควบคุมตำแหน่ง

4.2.2.1.2 ฟังก์ชันอินเวอร์สตำแหน่ง

การออกแบบนั้นจะทำการกำหนดขอบเขตและกราฟความเป็นสมาชิกของอินพุต, เอาท์พุตและการกำหนดกฎควบคุม ในส่วนของโครงสร้างภายในของตัวฟังก์ชันนี้ ก็ยังคงมีโครงสร้างพื้นฐานทั่วไปคือ ฟังก์ชันพีเคชัน การอนุมาน และการดีฟังก์ชันพีเคชัน มีตัวแปรอินพุต 2 ตัว คือค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (e) และค่าการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (ce) โดยมีตัวแปรเอาท์พุตเป็นค่าปรับกฎการควบคุม ซึ่งจะ去做การบวกเข้ากับจุดศูนย์กลางของกฎที่ถูกเรียกใช้ใน ตัวฟังก์ชันควบคุมตำแหน่งตาม วิธีการควบคุมแบบ FMRLC ในรายละเอียดในบทที่ 2

■ การกำหนดขอบเขตและกราฟความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาท์พุต

อินพุตของระบบควบคุม ประกอบด้วยอินพุต 2 ตัว คือ

1. ค่าผิดพลาด (Error,e) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโมเดลอ้างอิง (y_m) กับตำแหน่งการเคลื่อนที่จริงของมอเตอร์ (y)

$$\text{Error (e)} = y_m - y \quad (4.3)$$

2. ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด (Change of Error,ce) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าความผิดพลาดล่าสุด (Lated Error) กับค่าความผิดพลาดก่อนหน้านั้น (Previous Error)

$$\text{Change of Error (ce)} = e_l (\text{Lated Error}) - e_p (\text{Previous Error}) \quad (4.4)$$

เอาท์พุตของระบบควบคุม ประกอบด้วยเอาท์พุต 1 ตัว คือ ค่าความปรับปรุงกฎที่ส่งให้กับตัวฟังก์ชันควบคุมตำแหน่ง

การกำหนดขอบเขตของฟังก์ชันเซตอินพุต ทำได้โดย e เท่ากับ (-13, 13) และ ce เท่ากับ (-0.344, 0.344) ซึ่งขอบเขตของฟังก์ชันเซต ce ได้จากการให้ระบบปรับอัตโนมัติ และการออกแบบกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยจะเลือกกราฟเป็นแบบสามเหลี่ยม การกำหนดตัวแปรความกว้างฐานสามเหลี่ยมเท่ากับ 0.4 โดยมีจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันเซต ดังนี้ [-1.0, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0] และในส่วนของเอาท์พุตจะกำหนดค่าขอบเขต คือ (-0.2, 0.2) ซึ่งค่า

ดังกล่าวนี้ ได้จากการปรับจากการทดสอบจริง ซึ่งถ้าหากใช้ค่าที่มีค่ามากหรือน้อยเกินไป จะมีผลต่อความเร็วของการปรับกฎและอาจทำให้เกิดการแกว่งของการปรับกฎได้ ส่วนความกว้างฐานของกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกใช้ 0.4 มีโครงสร้างตาม ภาพประกอบ 2-11(a)

■ การกำหนดกฎการควบคุมตัวฟิชซีอินเวอร์สตำแหน่ง

ตัวฟิชซีอินเวอร์สตำแหน่ง จะมีกฎการควบคุมพื้นฐาน, เป็นการออกแบบกฎที่ง่าย และเป็นกฎเชิงเส้น ดังในภาพประกอบที่ 4-14

inverrules=[

-1.0000	-0.9000	-0.8000	-0.7000	-0.6000	-0.5000	-0.4000	-0.3000	-0.2000	-0.1000	0
-0.9000	-0.8000	-0.7000	-0.6000	-0.5000	-0.4000	-0.3000	-0.2000	-0.1000	0	0.1000
-0.8000	-0.7000	-0.6000	-0.5000	-0.4000	-0.3000	-0.2000	-0.1000	0	0.1000	0.2000
-0.7000	-0.6000	-0.5000	-0.4000	-0.3000	-0.2000	-0.1000	0	0.1000	0.2000	0.3000
-0.6000	-0.5000	-0.4000	-0.3000	-0.2000	-0.1000	0	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000
-0.5000	-0.4000	-0.3000	-0.2000	-0.1000	0	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000
-0.4000	-0.3000	-0.2000	-0.1000	0	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000
-0.3000	-0.2000	-0.1000	0	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000	0.7000
-0.2000	-0.1000	0	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000	0.7000	0.8000
-0.1000	0	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000	0.7000	0.8000	0.9000
0	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000	0.7000	0.8000	0.9000	1.0000]

inverrules=[row][colum]=[e][ce]

ภาพประกอบ 4-14 กฎการควบคุมของตัวฟิชซีอินเวอร์สตำแหน่ง

การควบคุมตำแหน่งนั้นจะใช้ฟิชซีอินเวอร์สตำแหน่ง ทำการสร้างกฎให้กับตัวฟิชซีที่ควบคุมตำแหน่งใน โหมดการทำงานการสร้างกฎเท่านั้น ซึ่งเมื่อได้กฎการควบคุมตำแหน่งที่เหมาะสมแล้ว ก็จะตัดตัวฟิชซีอินเวอร์สตำแหน่งออกไป จะไม่มีการปรับกฎของตัวฟิชซีที่ควบคุมตำแหน่งอีก จากการประยุกต์ใช้หลักการดังกล่าวทำให้การสร้างกฎของตัวควบคุมฟิชซีง่ายขึ้น ไม่ต้องปรับแต่งกฎอีกทำให้ไม่ต้องเสียเวลา เพียงแต่ทำการกำหนดขอบเขต และความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้น ลำดับต่อไปก็จะเป็นการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ในส่วนของการควบคุมความเร็ว

4.2.2.2 การควบคุมความเร็ว

ตัวควบคุมความเร็วจะมีตัวควบคุมฟัซซี่ 2 ตัวคือ ฟัซซี่ควบคุมความเร็ว (Fuzzy Speed Control) และฟัซซี่อินเวอร์สความเร็ว (Fuzzy Inverse Speed) ดังภาพประกอบ 3-10 ซึ่งจะได้อธิบายแต่ละส่วนดังนี้

4.2.2.2.1 ฟัซซี่ควบคุมความเร็ว

การออกแบบจะเหมือนกับการออกแบบตัวฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง คือทำการกำหนดขอบเขตของฟัซซี่เซตและกราฟความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตเท่านั้น จะต่างกันตรงการกำหนดความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุตและขอบเขตของฟัซซี่เซต ดังรายละเอียดต่อไปนี้

■ การกำหนดขอบเขตและกราฟความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุต

อินพุตของระบบควบคุม ประกอบด้วยอินพุต 2 ตัว คือ

1. ค่าความเร็วเป้าหมาย (Error,e1) รับค่ามาจากเอาต์พุตของฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง
2. ค่าความเร็วจริงของระบบ (Error,e2) ได้จากการวัดความเร็วของระบบ หรือความเร็วของมอเตอร์

เอาต์พุตของระบบควบคุม ประกอบด้วยเอาต์พุต 1 ตัว คือ ค่าความถี่ที่ส่งให้กับมอเตอร์

การกำหนดขอบเขตฟัซซี่เซตอินพุต ทำได้โดย e1 เท่ากับ (0,60) และ e2 เท่ากับ (0,60) ส่วนตัวแปรอื่นๆ มีความสัมพันธ์เหมือนกับฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง โดยมีจุดศูนย์กลางของฟัซซี่เซต ดังนี้ [0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0] และฟัซซี่เซตเอาต์พุต ได้กำหนดค่าขอบเขตความถี่ที่ป้อนเข้ามอเตอร์เพื่อควบคุมความเร็ว ในที่นี้ใช้ค่า (-65,65) ซึ่งจะมีค่ามากกว่าค่าที่ตัวฟัซซี่ควบคุมตำแหน่งส่งมาให้ เนื่องจากจะทำให้ระบบสามารถเพิ่มความเร็วขึ้นมาได้อีกถ้าหากมีโหลดเพิ่มขึ้น สำหรับความกว้างฐานของกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกใช้ 0.4

ในลำดับต่อไปก็จะเป็นการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ฟัซซี่อินเวอร์สความเร็ว ซึ่งเป็นตัวสร้างกฎให้กับฟัซซี่ควบคุมความเร็ว

4.2.2.2.2 ฟังก์ชันอินเวอร์สความเร็ว

การออกแบบนั้นจะเหมือนกับตัวฟังก์ชันอินเวอร์สตำแหน่ง จะต่างกันที่การกำหนดขอบเขตของตัวแปรและความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตเท่านั้น ซึ่งกฎของตัวควบคุมก็ใช้เหมือนกัน มีการกำหนดตัวแปรดังนี้

- การกำหนดขอบเขตและกราฟความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุต

อินพุตของระบบควบคุม ประกอบด้วยอินพุต 2 ตัว คือ

1. ค่าผิดพลาด (Error,e) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างความเร็วของโมเดลอ้างอิง (ω_m) กับความเร็วมอเตอร์ (ω)

$$\text{Error}(e) = \omega_m - \omega \quad (4.5)$$

2. ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด (Change of Error,ce) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าความผิดพลาดล่าสุด (Lated Error) กับค่าความผิดพลาดก่อนหน้านั้น (Previous error)

$$\text{Change of Error (ce)} = e_l (\text{Lated Error}) - e_p (\text{Previous Error}) \quad (4.6)$$

เอาต์พุตของระบบควบคุม ประกอบด้วยเอาต์พุต 1 ตัว คือ ค่าความปรับปรุงกฎส่งให้กับตัวฟังก์ชันควบคุมความเร็ว

การกำหนดขอบเขตฟังก์ชันอินพุตทำได้ e เท่ากับ (-60,60) และ ce เท่ากับ (-15.87,15.87) ซึ่งขอบเขตของฟังก์ชัน ce ได้จากการให้ระบบปรับอัตโนมัติ สำหรับกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิก จะเลือกกราฟเป็นแบบสามเหลี่ยม โดยกำหนดความกว้างฐานสามเหลี่ยมเท่ากับ 0.4 และฟังก์ชันเอาต์พุตจะกำหนดค่าขอบเขตเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดของการปรับในที่นี้ใช้ค่า (-0.2, 0.2) ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ ได้จากการทดลองปรับจากการทดสอบจริง ถ้าหากใช้ค่าที่มีค่ามากหรือน้อยเกินไป จะมีผลต่อความเร็วของการปรับกฎและอาจจะทำให้เกิดการแกว่งของการปรับกฎได้ และในส่วนความกว้างของฐานของกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกกำหนดเท่ากับ 0.4 ดังในภาพประกอบ 2-11(a)

- การกำหนดกฎการควบคุมตัวพืชซีอินเวอร์สความเร็ว

ตัวพืชซีอินเวอร์สความเร็วจะมีกฎการควบคุมพื้นฐาน,เป็นการออกแบบกฎที่ง่าย และเป็นกฎเชิงเส้น ดังในภาพประกอบ 4-14 ซึ่งเหมือนกับกฎของตัวพืชซีอินเวอร์สตำแหน่ง

สำหรับในบทนี้นั้นได้กล่าวถึงการสร้างตัวควบคุม โดยรวมทั้งหมด ซึ่งในบทต่อไปจะเป็นการทดสอบระบบการควบคุม

บทที่ 5

ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้ จะเป็นการทดลองการควบคุมจริง โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. การสร้างกฎการควบคุมให้กับฟิชชีควบคุมตำแหน่ง
2. การสร้างกฎการควบคุมให้กับฟิชชีควบคุมความเร็ว
3. การทดสอบการปรับความเร็วอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด

สำหรับรายละเอียดแต่ละส่วนการทดลองจะนำเสนอเป็นหัวข้อดังนี้

5.1 การสร้างกฎการควบคุมให้กับฟิชชีควบคุมตำแหน่ง

จากภาพประกอบ 3-9 แสดงโครงสร้างการสร้างกฎการควบคุมให้กับฟิชชีควบคุมตำแหน่งจะมีส่วนของฟิชชีสองตัวคือ ฟิชชีควบคุมตำแหน่งและฟิชชีอินเวอร์สตำแหน่ง ซึ่งฟิชชีอินเวอร์สตำแหน่งจะเป็นตัวสร้างกฎการควบคุมให้กับฟิชชีควบคุมตำแหน่ง โดยการเปรียบเทียบความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ โมเดลอ้างอิง กับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ตามหลักการควบคุมแบบ FMRLC และสรุปลำดับขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

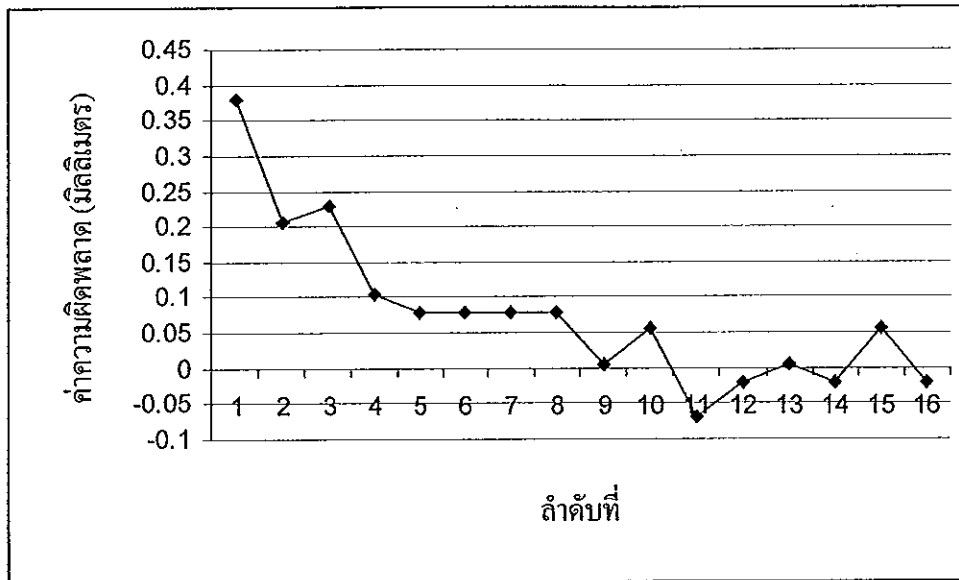
5.1.1 การบันทึกค่าการปรับกฎ

ป้อนตำแหน่งการเคลื่อนที่ 20 มิลลิเมตร (ที่เลือกใช้ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร ในการทดสอบเนื่องจากขอบเขตของฟิชชีเซตอินพุต ค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง ± 20 มิลลิเมตร) และบันทึกตำแหน่งการเคลื่อนที่เมื่อมอเตอร์หยุดนิ่งในแต่ละรอบ ดังตาราง 5-1 ซึ่งค่ากฎฟิชชีควบคุมตำแหน่งจะปรับในแต่ละรอบการเคลื่อนที่ เมื่อค่าความผิดพลาดได้ตามที่กำหนดจึงหยุดการสร้างกฎ และบันทึกกฎที่ได้ตามตาราง 5-2

ตาราง 5-1 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในรอบการปรับกฎพีชชี่ควบคุมตำแหน่ง

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.) (1)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.) (2)	ค่าความผิดพลาด (mm.) (1)-(2)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	20.0	19.625	0.375	1.54
2		19.800	0.200	1.47
3		19.775	0.225	1.45
4		19.900	0.100	1.45
5		19.925	0.075	1.39
6		19.925	0.075	1.39
7		19.925	0.075	1.39
8		19.925	0.075	1.38
9		20.000	0.000	1.39
10		19.950	0.050	1.36
11		20.075	-0.075	1.34
12		20.025	-0.025	1.33
13		20.000	0.000	1.37
14		20.025	-0.025	1.36
15		19.950	0.050	1.37
16		20.025	-0.025	1.35

จากผลการทดลองที่ได้ตามตาราง 5-1 สามารถนำมาพล็อตกราฟระหว่าง ลำดับที่ กับ ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย ได้ดังภาพประกอบ 5-1

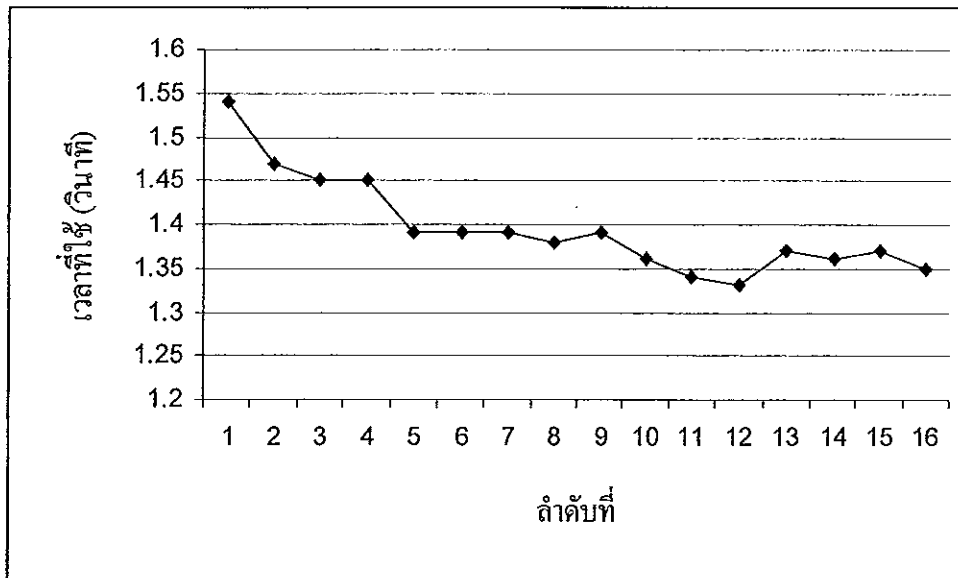


ภาพประกอบ 5-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ลำดับที่ และค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย

จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 5-1 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

1. ในรอบแรก หรือลำดับที่ 1 ของการเคลื่อนที่ กฎของฟิซซีควบคุมตำแหน่งมีค่าเป็น 0 ทำให้มีค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมายมาก คือ 0.375 มิลลิเมตร และกฎของฟิซซีควบคุมตำแหน่งจะถูกปรับไปเรื่อยๆ จนถึงลำดับที่ 16 ค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมายเท่ากับ -0.025 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองที่ได้ตามตาราง 5-1 สามารถนำมาพล็อตกราฟระหว่าง ลำดับที่ กับ ค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ได้ดังภาพประกอบ 5-2



ภาพประกอบ 5-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ลำดับที่ และค่าเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายที่ ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 5-2 สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

1. เวลาในการเข้าสู่เป้าหมายในแต่ละรอบของการปรับกฎจะเปลี่ยนแปลง และมีแนวโน้มการใช้เวลาเข้าสู่เป้าหมายน้อยลง เมื่อจำนวนรอบการปรับมากขึ้น ดังในลำดับที่ 16 จะใช้เวลาเข้าสู่เป้าหมาย 1.35 วินาที

ตาราง 5-2 แสดงกฎของฟังก์ชันความคุมตำแหน่งที่ได้จากการทดลอง

e\ce	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
-1.0											
-0.8											
-0.6											
-0.4											
-0.2											
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.072				
0.2	0.0	0.0	0.0	0.001	0.183	0.0	0.349				
0.4	0.0	0.0	0.0	0.075	0.792	1.0	0.052				
0.6	0.0	0.199	0.428	0.767	0.868	0.862	0.052				
0.8	0.998	0.998	1.0	1.0	1.0	1.0	0.398				0.680
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0				1.0

e คือ ค่าความผิดพลาด

ce คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด

-1.0,-0.8,-0.6,-0.4,-0.2,0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 คือ จุดศูนย์กลางของฟังก์ชันเซตอินพุต

5.1.2 การทดสอบกฎของพีชชีควบคุมตำแหน่ง

โดยการป้อนตำแหน่งการเคลื่อนที่ ที่ตำแหน่งต่างๆ จำนวน 10 รอบการเคลื่อนที่ และสรุปเป็นค่ามากที่สุด,ค่าน้อยสุด และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาด และเวลาที่ใช้ ตามลำดับ แสดงผลได้ตามตาราง 5-3

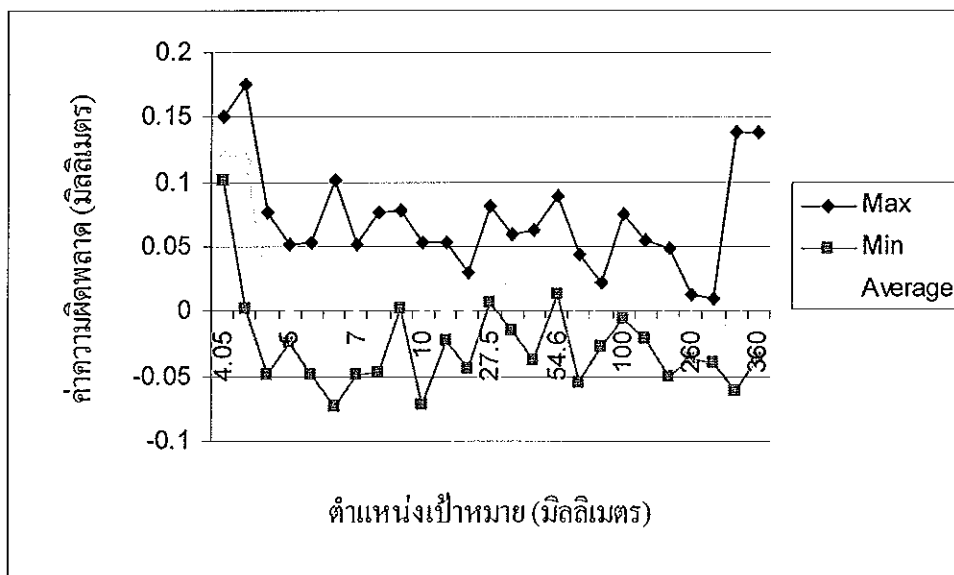
ตาราง. 5-3 ผลการทดสอบกฎของพีชชีควบคุมตำแหน่ง

ค่า ตำแหน่ง เป้าหมาย (mm.)	ค่าความผิดพลาด (mm.)			เวลาที่ใช้ (วินาที)		
	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยสุด	ค่าเฉลี่ย
4.05	0.150	0.100	0.125	2.01	1.75	1.87
4.1	0.175	0.000	0.125	1.90	1.35	1.73
4.5	0.075	-0.050	0.000	1.02	0.86	0.95
5.0	0.050	-0.025	0.000	1.41	0.88	0.95
5.150	0.050	-0.050	0.000	0.98	0.87	0.90
6.0	0.100	-0.075	0.025	1.42	0.87	0.97
7.0	0.050	-0.050	0.000	1.02	0.95	0.97
8.0	0.075	-0.050	0.025	1.07	0.95	1.00
9.0	0.075	0.000	0.025	1.68	1.00	1.10
10.0	0.050	-0.075	0.000	1.59	1.08	1.16
10.075	0.050	-0.025	0.000	1.17	1.06	1.10
20.0	0.025	-0.050	0.000	1.40	1.31	1.37
27.475	0.075	0.000	0.025	2.00	1.46	1.55
40.0	0.050	-0.025	0.025	1.70	1.64	1.67
50.0	0.050	-0.050	0.000	1.91	1.83	1.87
54.575	0.100	0.025	0.050	1.98	1.91	1.90
80.0	0.050	-0.050	-0.025	2.40	2.31	2.35

ตาราง 5-3 ผลการทดสอบกฎของพีซซีความคุมตำแหน่ง(ต่อ)

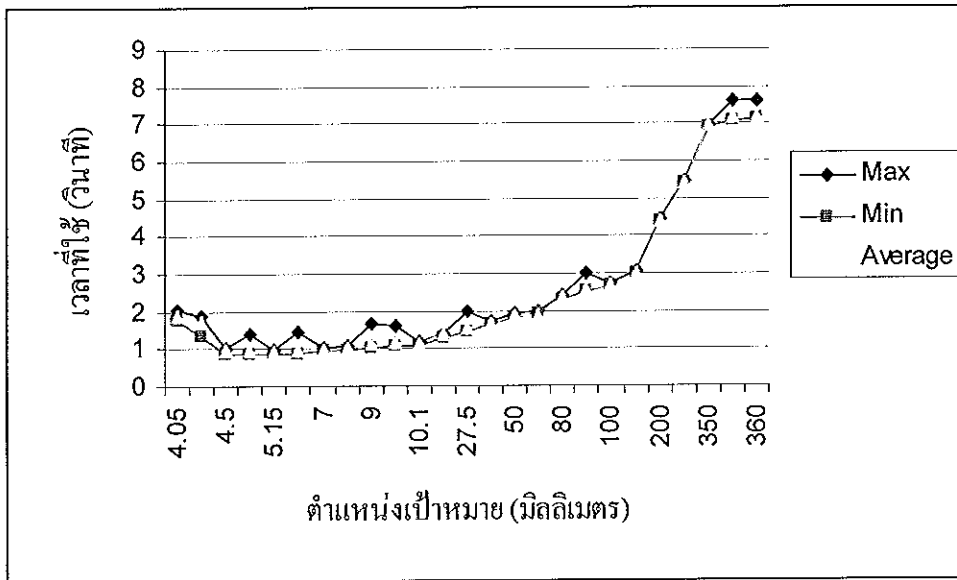
ค่า ตำแหน่ง เป้าหมาย (mm.)	ค่าความผิดพลาด (mm.)			เวลาที่ใช้ (วินาที)		
	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยสุด	ค่าเฉลี่ย
89.950	0.025	-0.025	0.000	3.02	2.50	2.58
100.0	0.075	0.000	0.000	2.74	2.68	2.70
119.425	0.050	-0.025	0.025	3.04	2.99	3.02
200.0	0.050	-0.050	0.000	4.47	4.38	4.41
260.250	0.025	-0.025	0.000	5.45	5.4	5.42
350.0	0.000	-0.050	0.000	6.98	6.92	6.95
359.875	0.150	-0.050	0.000	7.62	7.09	7.18
360.0	0.150	-0.025	0.025	7.63	7.12	7.19

จากผลการทดลองที่ได้ตามตาราง 5-3 สามารถนำมาพล็อตกราฟระหว่าง ค่าตำแหน่งเป้าหมาย กับค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมาย ได้ดังภาพประกอบ 5-3



ภาพประกอบ 5-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมาย และค่าความผิดพลาด

จากผลการทดลองที่ได้ตามตาราง 5-3 สามารถนำมาพล็อตกราฟระหว่าง ลำดับที่ กับ ค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ได้ดังภาพประกอบ 5-4



ภาพประกอบ 5-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมาย และค่าเวลาที่ใช้

จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 5-3 และ 5-4 สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

1. ค่าความผิดพลาดการเข้าสู่เป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีค่าเฉลี่ยที่ระยะทางต่างๆ 0.025 มิลลิเมตร
2. ค่าเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลง ขึ้นอยู่กับตำแหน่งเป้าหมาย
3. จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กฎของฟิซซีควบคุมตำแหน่งที่ได้จากการปรับอัตราโมเมนต์สามารถนำมาใช้ในการควบคุมได้

5.1.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลการควบคุมที่ได้จากการปรับอัตโนมัติ กับผลการทดลองจากงานวิจัย [10]

การเปรียบเทียบระหว่างผลการควบคุมที่ได้จากการปรับอัตโนมัติ กับผลการทดลองจากงานวิจัย [10] ซึ่งใช้วิธีการปรับ โดยผู้เชี่ยวชาญ ดังแสดงในตาราง 5-4 ทั้งสองระบบจะมีความแตกต่างกันที่ค่าความเร็วสูงสุด ในงานวิจัยนี้ระบบจะส่งค่าความเร็วควบคุมได้สูงสุด 60 Hz ส่วนในงานวิจัย [10] จะมีค่าความเร็วได้สูงสุดที่ 90 Hz เป็นผลทำให้ความเร็วในการเข้าสู่เป้าหมายได้แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 5-6 การเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการสร้างกฎการควบคุมแบบอัตโนมัติในงานวิจัยนี้ สามารถให้ผลการควบคุมโดยมีค่าความผิดพลาดใกล้เคียงกับงานวิจัย [10] ดังแสดงในภาพประกอบ 5-5 และในงานวิจัย [10] สามารถควบคุมได้ระย่น้อยสุด 0.075 มิลลิเมตร ในขณะที่ในงานวิจัยนี้สามารถเคลื่อนที่ได้น้อยสุด 4.050 มิลลิเมตร เนื่องจากกฎที่ได้จากการสร้างอัตโนมัติ นั้น ไม่ครอบคลุมทุกเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้ โดยการเพิ่มจำนวนกฎ หรือเปลี่ยนแปลงขอบเขตของฟังก์ชันเซตอินพุต

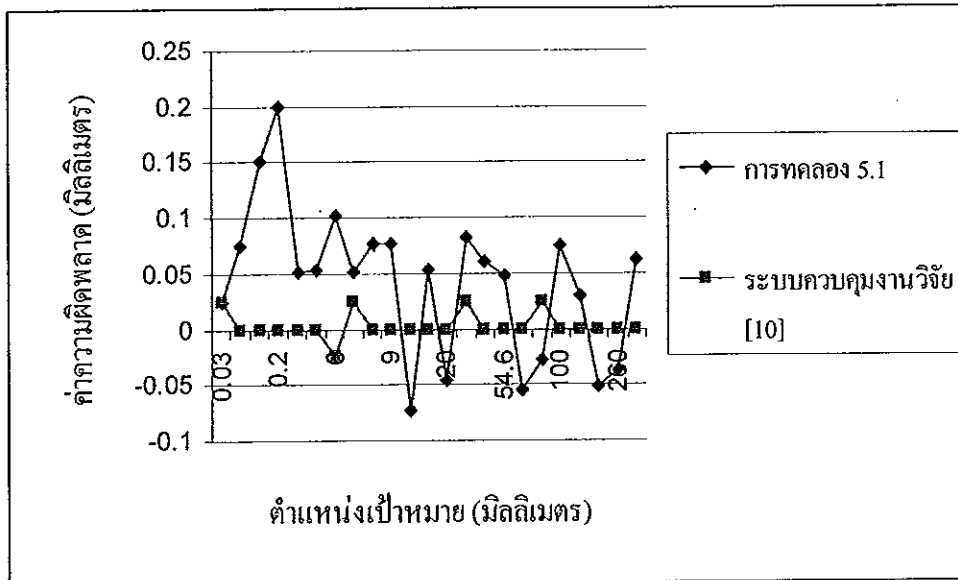
ตาราง 5-4 ผลการทดลองเชิงเปรียบเทียบระหว่าง ผลการควบคุมที่ได้จากการปรับอัตโนมัติ กับ ผลการทดลองจากงานวิจัย [10]

ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	เวลาที่ใช้เฉลี่ย (วินาที)		ค่าความผิดพลาด (mm.)	
	ฟังก์ชันควบคุมตำแหน่ง (5.1)	ระบบควบคุมงานวิจัย [10]	ฟังก์ชันควบคุมตำแหน่ง (5.1)	ระบบควบคุมงานวิจัย [10]
0.025	-	-	0.025	0.025
0.075	-	0.172	0.075	0
0.150	-	0.206	0.150	0
0.200	-	0.373	0.200	0
5.000	0.951	1.362	0.050	0
5.150	0.880	1.216	0.050	0
6.000	0.972	1.209	0.100	-0.025
7.000	0.973	1.092	0.050	0.025
8.000	1.002	0.660	0.075	0
9.000	1.060	0.654	0.075	0

ตาราง 5-4 ผลการทดลองเชิงเปรียบเทียบระหว่าง ผลการควบคุมที่ได้จากการปรับอัตรา โนมัต กับ ผลการทดลองจากงานวิจัย [10] (ต่อ)

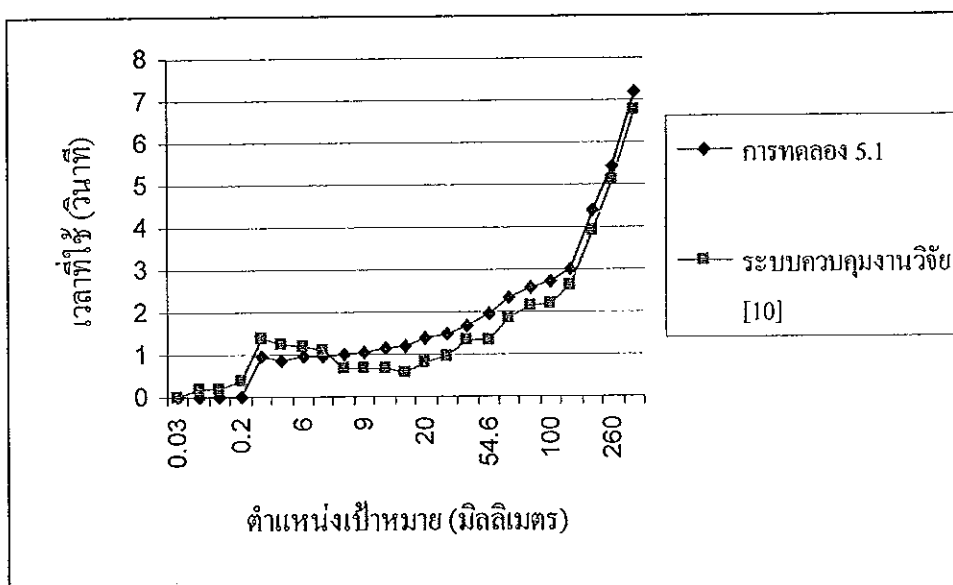
ค่าตำแหน่ง ที่ป้อน (mm.)	เวลาที่ใช้เฉลี่ย (วินาที)		ค่าความผิดพลาด (mm.)	
	พีชชีควบคุม ตำแหน่ง (5.1)	ระบบควบคุม งานวิจัย [10]	พีชชีควบคุม ตำแหน่ง (5.1)	ระบบควบคุม งานวิจัย [10]
10.000	1.160	0.666	-0.075	0
10.075	1.170	0.588	0.050	0
20.000	1.369	0.821	-0.050	0
27.475	1.500	0.940	0.075	0.025
40.000	1.674	1.322	0.050	0
54.575	1.934	1.355	0.050	0
80.000	2.350	1.862	-0.050	0
89.950	2.576	2.153	-0.025	0.025
100.000	2.720	2.181	0.075	0
119.425	3.022	2.596	0.025	0
200.000	4.400	3.920	-0.050	0
260.250	5.421	5.104	-0.025	0
360.000	7.187	6.759	0.050	0

จากผลการทดลองที่ได้ตามตาราง 5-4 สามารถนำมาพล็อตกราฟระหว่าง ตำแหน่ง เป้าหมาย กับค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมาย ได้ดังภาพประกอบ 5-5



ภาพประกอบ 5-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมาย และค่าความผิดพลาด

จากผลการทดลองที่ได้ตามตาราง 5-4 สามารถนำมาพล็อตกราฟระหว่าง ตำแหน่ง เป้าหมาย กับค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ได้ดังภาพประกอบ 5-6



ภาพประกอบ 5-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมาย และค่าเวลาที่ใช้

5.2 การสร้างกฎการควบคุมให้กับพีซีที่ควบคุมความเร็ว

เป้าหมายหลักของการออกแบบให้มีพีซีที่ควบคุมความเร็วก็เพื่อที่จะให้ระบบสามารถมีการปรับความเร็วได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด โดยใช้หลักการเดียวกันกับการสร้างกฎการควบคุมตำแหน่งแต่จะต่างกันตรงที่พีซีที่ควบคุมความเร็วจะมีการปรับกฎแบบออนไลน์ ดังโครงสร้างในภาพประกอบ 3-6 การสร้างกฎให้กับพีซีที่ควบคุมความเร็วในหัวข้อนี้เพื่อใช้เป็นกฎพื้นฐานเก็บไว้ในหน่วยความจำและใช้ในการควบคุมในสภาวะมีโหลดคงที่ค่าหนึ่ง มีลำดับขั้นการทดลองดังนี้

5.2.1 การบันทึกค่าการปรับกฎ

ป้อนตำแหน่งการเคลื่อนที่ 20 มิลลิเมตร ระบบก็จะทำการสร้างกฎการควบคุมให้กับพีซีที่ควบคุมความเร็ว ตัวควบคุมพีซีที่ความเร็วจะมีอินพุตสองตัวคือ e_1 คือความเร็วเป้าหมาย และ e_2 คือ ความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งคู่ลำดับของกฎจะถูกเรียกใช้ตามค่าที่ส่งมาจากพีซีที่ควบคุมตำแหน่ง ดังแสดงในภาพประกอบ 5-7

e1/e2	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0	t67										
0.1	t65	t66									
0.2	t62	t63	t64								
0.3	t58	t59	t60	t61							
0.4	t53	t54	t55	t56	t57						
0.5	t47	t48	t49	t50	t51	t52					
0.6	t40	t41	t42	t43	t44	t45	t46				
0.7	t32	t33	t34	t35	t36	t37	t38	t39			
0.8	t22	t24	t25	t26	t27	t28	t29	t30	t31		
0.9	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	
1.0	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11

t1-t67 แทนตำแหน่งกฏที่ถูกเรียกใช้ในช่วงเวลาต่างๆ

e1 คือ ความเร็วเป้าหมาย และ e2 คือ ความเร็วของมอเตอร์

0,0.1,0.2,0.3,0.4,...,1.0 เป็น จุดศูนย์กลางของฟิซซี่เซตอินพุต

ภาพประกอบ 5-7 การเคลื่อนที่ของกฏที่ถูกปรับ

จากภาพประกอบ 5-7 สมมุติว่าในแต่ละช่วงเวลามีการเรียกใช้กฏเพียงกฏเดียวเท่านั้นเพื่อจะแสดงให้เห็นลำดับของอินพุตทั้งสอง คือ e1 และ e2 ซึ่งในช่วงแรกฟิซซี่ควบคุมตำแหน่งส่งค่าความถี่ควบคุมเป้าหมาย 60 Hz หรือ ความเร็วที่ต้องการคือ 1800 rpm. ให้กับฟิซซี่ควบคุมความเร็ว ซึ่งจะทำให้กฏที่ถูกเรียกใช้ของฟิซซี่ควบคุมความเร็วคือ ตำแหน่ง t1 เนื่องจากความเร็วของมอเตอร์ขณะนี้ เป็น 0 rpm. และกฏที่ถูกเรียกใช้จะถูกปรับ ความเร็วของมอเตอร์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้กฏของฟิซซี่ควบคุมความเร็วขยับมาที่ t2 และจะขยับไปเรื่อยๆ จนถึง t11 ซึ่งความเร็วของมอเตอร์จะเท่ากับความเร็วเป้าหมายนั่นเอง และเมื่อฟิซซี่ควบคุมตำแหน่งปรับลดค่าความถี่ควบคุมเป้าหมายมาเป็น 54 Hz หรือความเร็วที่ต้องการ 1620 rpm. กฏของฟิซซี่ควบคุมความเร็วก็จะเปลี่ยนมาอยู่ที่ตำแหน่ง t21 แต่ในขณะนั้นกฏในตำแหน่งนี้มีค่าเป็น 0 จึงส่งค่าความถี่ควบคุม 0 Hz ให้กับมอเตอร์ ส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง กฏของฟิซซี่ควบคุมความเร็วก็จะเปลี่ยนมาอยู่ในตำแหน่ง t12 หรือ t13 หรือ t14 ... หรือ t21 เนื่องจากความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง เมื่อกฏของฟิซซี่ควบคุมความเร็วถูกปรับปรุง ส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์

เพิ่มขึ้นเท่ากับความเร็วเป้าหมายคือ 1620 rpm. กฎที่ถูกเรียกใช้ในช่วงเวลานี้คือ ตำแหน่ง e21 และที่ระดับความเร็วอื่นก็มีการปรับในลักษณะเดียวกัน กล่าวโดยสรุปคือ ฟิชซีควบคุมตำแหน่งจะเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ควบคุมเพื่อให้มอเตอร์เข้าสู่เป้าหมาย และในขณะเดียวกันฟิชซีควบคุมความเร็ว จะทำหน้าที่สร้างค่าความถี่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้ความเร็วมอเตอร์เท่ากับความเร็วที่รับมาจากฟิชซีควบคุมตำแหน่ง โดยมีตัวฟิชซีอินเวอร์สความเร็วทำหน้าที่เปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์กับความเร็วของโมเดลอ้างอิง แล้วทำการส่งค่าปรับกฎไปให้ฟิชซีควบคุมความเร็วเปลี่ยนแปลงกฎให้ส่งค่าความถี่ที่เหมาะสมต่อไป จากการทำงานดังกล่าวระบบก็จะสามารถควบคุมให้มอเตอร์เคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายได้ตามที่กำหนด และมีคุณสมบัติการปรับตัวเองได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด จากการทดสอบบันทึกผลค่าความผิดพลาดและเวลาเข้าสู่เป้าหมาย ดังตาราง 5-5 และกฎการควบคุมที่ได้จากการปรับกฎ ดังตาราง 5-6

ตาราง 5-5 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในรอบการปรับกฎฟิชซีที่ควบคุมความเร็ว

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความผิดพลาด (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	20.0	16.675	3.325	2.47
2		17.050	2.950	1.69
3		17.225	2.775	1.48
4		17.125	2.875	1.38
5		17.625	2.375	1.33
6		17.675	2.325	1.26
7		17.500	2.500	1.28
8		17.650	2.350	1.24
9		17.550	2.450	1.23
10		17.575	2.425	1.23
11		17.725	2.275	1.25
12		17.425	2.575	1.73
13		17.900	2.100	1.33
14		19.875	0.125	1.34
15		19.975	0.025	1.50
16		20.000	0.000	2.17
17		20.025	-0.025	1.97
18		20.050	-0.050	1.99
19		20.075	-0.075	2.10
20		20.200	-0.200	1.94
21		20.150	-0.150	1.92
22		20.075	-0.075	1.86
23		20.100	-0.100	1.88
24		20.050	-0.050	1.90
25		20.075	-0.075	1.79

ตาราง 5-5 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในรอบการปรับกฎพีชชีที่ควบคุมความเร็ว (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความผิดพลาด (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
26	20.0	20.100	-0.100	2.00
27		20.175	-0.175	1.74
28		20.100	-0.100	2.11
29		20.100	-0.100	2.09
30		20.125	-0.125	2.04
31		20.125	-0.125	1.97
32		20.225	-0.225	1.93
33		20.225	-0.225	1.87
34		20.275	-0.275	1.92
35		20.300	-0.300	1.82
36		20.250	-0.250	1.87
37		20.200	-0.200	1.95
38		20.250	-0.250	1.80
39		20.175	-0.175	1.73
40		20.225	-0.225	1.96
41		20.275	-0.275	1.86
42		20.250	-0.250	1.85
43		20.250	-0.250	1.63
44		20.325	-0.325	1.96
45		20.250	-0.250	1.77
46		20.250	-0.250	1.86
47		20.300	-0.300	1.71
48		20.250	-0.250	1.85
49		20.275	-0.275	1.69
50		20.375	-0.375	2.00

ตาราง 5-5 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในรอบการปรับกฎพีชชีควบคุมความเร็ว (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความผิดพลาด (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
51	20.0	20.275	-0.275	1.78
52		20.275	-0.275	1.73
53		20.300	-0.300	1.77
54		20.275	-0.275	1.89
55		20.250	-0.250	1.67
56		20.275	-0.275	1.73
57		20.300	-0.300	1.77
58		20.225	-0.225	1.94
59		20.300	-0.300	1.83
60		20.275	-0.275	1.77
61		20.300	-0.3	1.78
62		20.275	-0.275	1.72
63		20.275	-0.275	1.69
64		20.275	-0.275	1.74
65		20.300	-0.300	1.77
66		20.275	-0.275	1.71
67		20.275	-0.275	1.74
68		20.350	-0.350	1.61
69		20.350	-0.350	1.61
70		20.300	-0.300	1.71
71		20.275	-0.275	1.79
72		20.325	-0.325	1.61
73		20.300	-0.300	1.72
74		20.300	-0.300	1.63
75		20.300	-0.300	1.64

ตาราง 5-5 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในรอบการปรับกฎพีชซึ่งควบคุมความเร็ว (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความผิดพลาด (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
76	20.0	20.300	-0.300	1.58
77		20.300	-0.300	1.68
78		20.425	-0.425	1.89
79		20.300	-0.300	1.78
80		20.300	-0.300	1.67
81		20.300	-0.300	1.56
82		20.275	-0.275	1.73
83		20.300	-0.300	1.74
84		20.275	-0.275	1.71
85		20.300	-0.300	1.70
86		20.275	-0.275	1.73
87		20.300	-0.300	1.69
88		20.325	-0.325	1.51
89		20.300	-0.300	1.81
90		20.325	-0.325	1.70
91		20.325	-0.325	1.60
92		20.325	-0.325	1.73
93		20.325	-0.325	1.63
94		20.325	-0.325	1.61
95		20.300	-0.300	1.68
96		20.300	-0.300	1.65
97		20.300	-0.300	1.52
98		20.350	-0.350	1.68
99		20.300	-0.300	1.66
100		20.300	-0.300	1.59

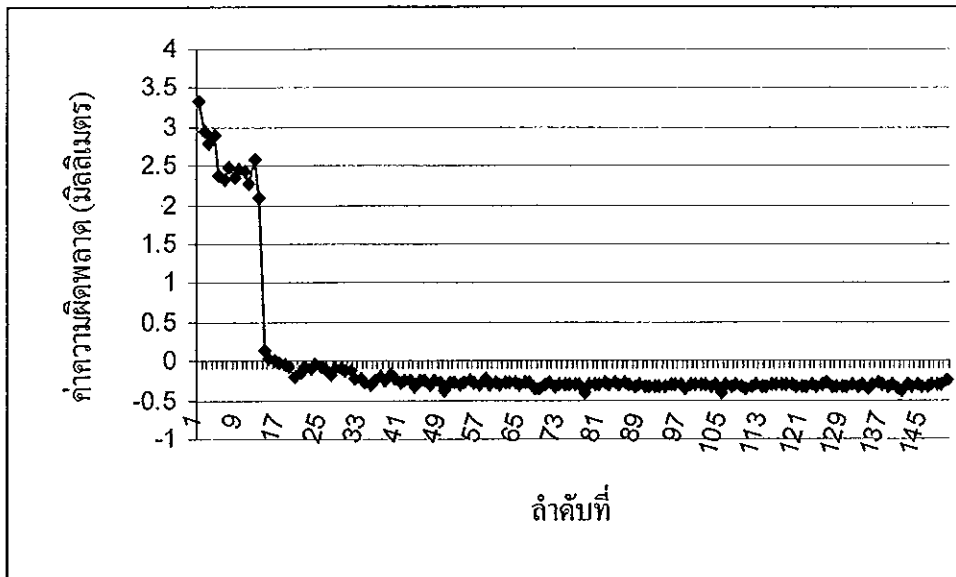
ตาราง 5-5 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในรอบการปรับกฎฟิชชีควบคุมความเร็ว (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความผิดพลาด (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
101	20.0	20.300	-0.300	1.60
102		20.300	-0.300	1.58
103		20.325	-0.325	1.67
104		20.300	-0.300	1.77
105		20.425	-0.425	1.72
106		20.300	-0.300	1.75
107		20.325	-0.325	1.59
108		20.300	-0.300	1.72
109		20.325	-0.325	1.56
110		20.350	-0.350	1.56
111		20.325	-0.325	1.61
112		20.300	-0.300	1.64
113		20.325	-0.325	1.60
114		20.325	-0.325	1.66
115		20.300	-0.300	1.55
116		20.300	-0.300	1.70
117		20.300	-0.300	1.57
118		20.300	-0.300	1.60
119		20.300	-0.300	1.57
120		20.325	-0.325	1.73
121		20.325	-0.325	1.66
122		20.325	-0.325	1.75
123		20.300	-0.300	1.64
124		20.325	-0.325	1.56
125		20.300	-0.300	1.61

ตาราง 5-5 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในรอบการปรับกฎฟิชซึ่งควบคุมความเร็ว (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความผิดพลาด (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
126	20.0	20.275	-0.275	1.78
127		20.325	-0.325	1.51
128		20.325	-0.325	1.73
129		20.325	-0.325	1.64
130		20.325	-0.325	1.49
131		20.300	-0.300	1.49
132		20.325	-0.325	1.70
133		20.300	-0.300	1.70
134		20.350	-0.350	1.54
135		20.300	-0.300	1.60
136		20.275	-0.275	1.72
137		20.300	-0.300	1.51
138		20.325	-0.325	1.57
139		20.300	-0.300	1.64
140		20.350	-0.350	1.55
141		20.375	-0.375	1.49
142		20.300	-0.300	1.66
143		20.325	-0.325	1.70
144		20.300	-0.300	1.59
145		20.325	-0.325	1.57
146		20.325	-0.325	1.66
147		20.300	-0.300	1.66
148		20.300	-0.300	1.70
149		20.300	-0.300	1.67
150		20.250	-0.250	1.59

จากผลการทดลองที่ได้ในตาราง 5-5 สามารถพล็อตกราฟระหว่าง ลำดับที่กับค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมาย ได้ดังภาพประกอบ 5-8

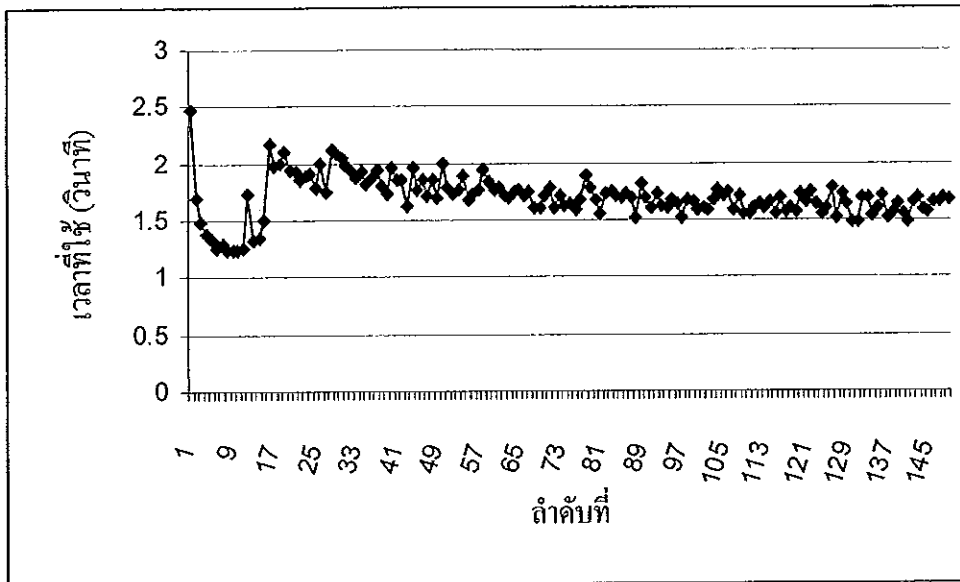


ภาพประกอบ 5-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ และค่าความผิดพลาด

จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 5-8 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

1. ลำดับการเคลื่อนที่ 1-16 ค่าความผิดพลาดลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากในการเคลื่อนที่ในแต่ละรอบจะมีการปรับกฎส่งผลให้ค่าความผิดพลาดการเข้าสู่เป้าหมายน้อยลง
2. ลำดับการเคลื่อนที่ 17-150 ค่าความผิดพลาดการเข้าสู่เป้าหมายมีค่าเป็นลบ แสดงว่ามอเตอร์เคลื่อนที่เลยเป้าหมาย และมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ -0.275 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองในตาราง 5-5 เมื่อพล็อตกราฟระหว่างลำดับการเคลื่อนที่กับ เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ได้ดังภาพประกอบ 5-9



ภาพประกอบ 5-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเคลื่อนที่และค่าเวลาที่ใช้

จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 5-9 แสดงให้เห็นว่าเวลาในการเข้าสู่เป้าหมาย นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรอบ ในลำดับที่ 1 ใช้เวลา 2.47 วินาที ค่าเวลาที่ใช้เฉลี่ยในช่วง ลำดับที่ 17-150 เท่ากับ 1.73 วินาที

ตาราง 5-6 แสดงกฎพีชคณิตความเร็วกึ่งที่ได้จากการทดลอง

e1\e2	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.327	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0	0.017	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.3	0	0.056	0.872	0.900	0.012	0	0	0	0	0	0
0.4	0.008	0.276	0.679	1.0	1.0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.008	0.302	0.569	1.0	1.0	0.426	0.299	0	0	0	0
0.6	0	0.074	0.349	1.0	0.317	0.484	0.970	0.017	0	0	0
0.7	0	0	0.0489	0.437	0.268	0.627	0.674	0.390	0.523	0	0
0.8	0	0.278	0.394	0.336	0.533	0.584	0.219	0.244	0.814	0.093	0
0.9	0.033	0.287	0.604	0.448	0.521	0.274	1.0	1.0	1.0	0.052	0
1.0	1.0	0.934	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.018	0

e1 คือ ความเร็วเป้าหมาย

e2 คือ ความเร็วของมอเตอร์

0,0.1,0.2,0.3,...,1.0 เป็นจุดศูนย์กลางของพีชคณิตอินพุต

5.2.2 ทดสอบกฎของฟิชเชอร์ควบคุมความเร็ว

โดยการป้อนตำแหน่งการเคลื่อนที่ ที่เป้าหมายต่างๆ จำนวน 10 รอบการเคลื่อนที่ และสรุปเป็นค่ามากที่สุด,ค่าน้อยสุด และค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาด และเวลาที่ใช้ ตามลำดับ แสดงผลได้ตาม ตารางที่ 5-7

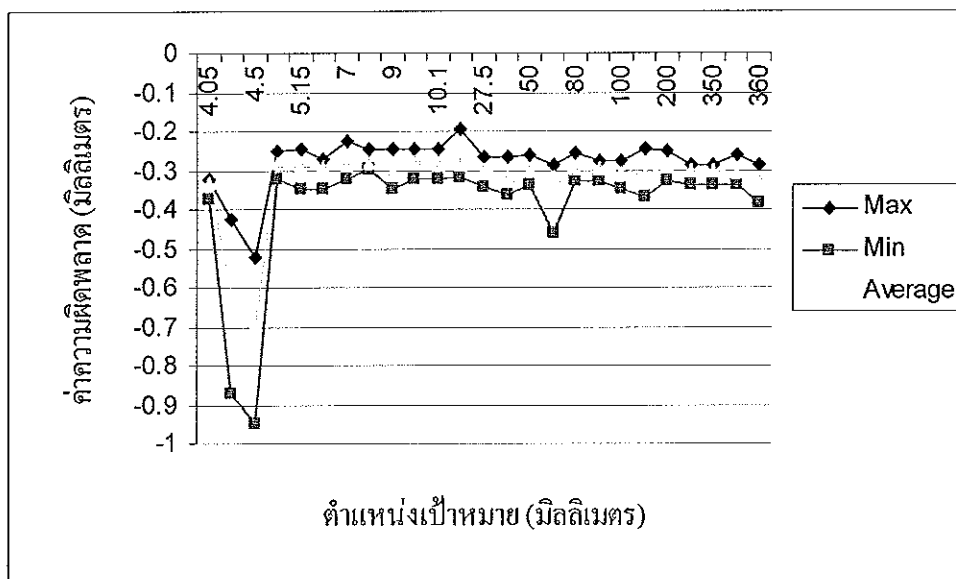
ตาราง 5-7 ผลการทดสอบกฎของฟิชเชอร์ควบคุมความเร็ว

ค่า ตำแหน่ง เป้าหมาย (mm.)	ค่าความผิดพลาด (mm.)			เวลาที่ใช้ (วินาที)		
	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยสุด	ค่าเฉลี่ย
4.05	-0.325	-0.375	-0.325	1.99	1.21	1.37
4.1	-0.425	-0.875	-0.625	1.23	0.91	1.05
4.5	-0.525	-0.950	-0.700	0.95	0.73	1.20
5.0	-0.250	-0.325	-0.275	1.29	0.79	1.04
5.150	-0.250	-0.350	-0.300	1.13	0.73	0.97
6.0	-0.275	-0.350	-0.300	1.38	0.96	1.13
7.0	-0.225	-0.325	-0.275	1.38	1.01	1.23
8.0	-0.250	-0.300	-0.275	1.43	0.83	1.22
9.0	-0.250	-0.350	-0.300	1.37	1.05	1.21
10.0	-0.250	-0.325	-0.275	1.82	0.99	1.36
10.075	-0.250	-0.325	-0.275	1.55	1.10	1.31
20.0	-0.200	-0.325	-0.275	1.75	1.30	1.52
27.475	-0.275	-0.350	-0.300	1.98	1.46	1.76
40.0	-0.275	-0.375	-0.325	2.15	1.85	2.00
50.0	-0.275	-0.350	-0.300	2.35	1.87	2.18
54.575	-0.275	-0.450	-0.325	2.63	1.93	2.17

ตาราง 5-7 ผลการทดสอบกฎของฟิซซีควบคุมความเร็ว (ต่อ)

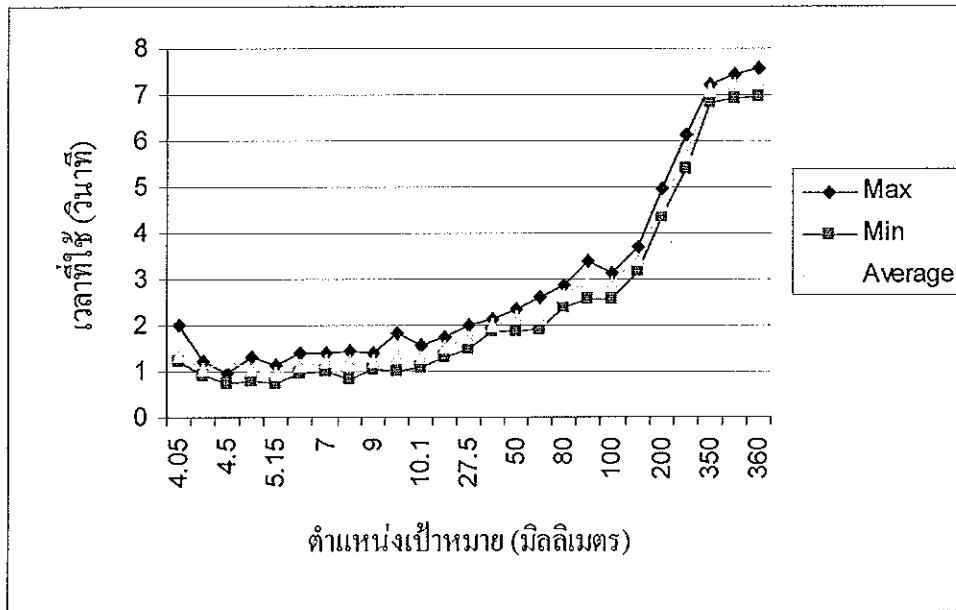
ค่า ตำแหน่ง เป้าหมาย (mm.)	ค่าความผิดพลาด (mm.)			เวลาที่ใช้ (วินาที)		
	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยสุด	ค่าเฉลี่ย
80.0	-0.250	-0.325	-0.300	2.85	2.40	2.64
89.950	-0.275	-0.325	-0.300	3.4	2.57	2.94
100.0	-0.275	-0.350	-0.300	3.14	2.55	2.92
119.425	-0.250	-0.375	-0.325	3.70	3.18	3.43
200.0	-0.250	-0.325	-0.300	4.95	4.35	4.60
260.250	-0.275	-0.325	-0.300	6.15	5.38	5.70
350.0	-0.300	-0.350	-0.300	7.22	6.83	7.10
359.875	-0.250	-0.325	-0.300	7.43	6.93	7.23
360.0	-0.250	-0.375	-0.325	7.56	6.96	7.30

จากผลการทดลองที่ได้จากตาราง 5-7 สามารถพล็อตกราฟระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายที่ระยะต่างๆ กับค่าความผิดพลาด แสดงได้ดังภาพประกอบ 5-10



ภาพประกอบ 5-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเป้าหมาย และค่าความผิดพลาด

จากผลการทดลองที่ได้จากตาราง 5-7 สามารถพล็อตกราฟระหว่างตำแหน่งเป้าหมายที่ระยะต่างๆ กับค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย แสดงได้ดังภาพประกอบ 5-11



ภาพประกอบ 5-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเป้าหมายที่ระยะต่างๆ และค่าเวลาที่ใช้

จากผลการทดลองตามภาพประกอบที่ 5-10 และ 5-11 สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

1. ค่าความผิดพลาดการเข้าสู่เป้าหมาย มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าเฉลี่ยที่ระยะทางต่างๆ ประมาณ -0.325 มิลลิเมตร
2. ค่าเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับตำแหน่งเป้าหมาย
3. จากการทดลองแสดงให้เห็นว่ากฎของฟิซซ์ควบคุมความเร็วที่ได้จากการปรับแบบอัตโนมัติ สามารถนำมาใช้ในการควบคุมได้

5.2.3 การเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการทดลอง 5.1 กับการทดลอง 5.2

การเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการทดลอง 5.1 กับการทดลอง 5.2 ดังแสดงในตาราง 5-8

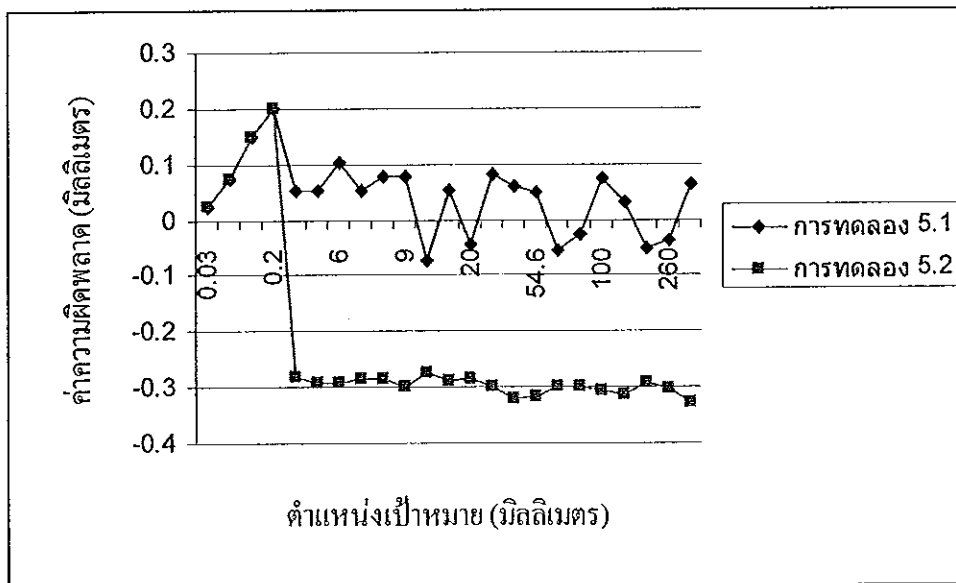
ตาราง 5-8 ผลการทดลองเชิงเปรียบเทียบระหว่าง การทดลอง 5.1 กับการทดลอง 5.2

ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	เวลาที่ใช้เฉลี่ย (วินาที)		ค่าความผิดพลาด (mm.)	
	พีชชีควบคุมตำแหน่ง (5.1)	พีชชีควบคุมความเร็ว (5.2)	พีชชีควบคุมตำแหน่ง (5.1)	พีชชีควบคุมความเร็ว (5.2)
0.025	-	-	0.025	0.025
0.075	-	-	0.075	0.075
0.150	-	-	0.150	0.150
0.200	-	-	0.200	0.200
5.000	0.95	1.04	0.050	-0.275
5.150	0.88	0.97	0.050	-0.300
6.000	0.97	1.13	0.100	-0.300
7.000	0.97	1.23	0.050	-0.275
8.000	1.00	1.22	0.075	-0.275
9.000	1.06	1.20	0.075	-0.300
10.000	1.16	1.36	-0.075	-0.275
10.075	1.17	1.31	0.050	-0.275
20.000	1.37	1.52	-0.050	-0.275
27.475	1.50	1.76	0.075	-0.300
40.000	1.67	2.00	0.050	-0.325
54.575	1.93	2.17	0.050	-0.325
80.000	2.35	2.64	-0.050	-0.300
89.950	2.58	2.94	-0.025	-0.300
100.000	2.72	2.92	0.075	-0.300
119.425	3.02	3.43	0.025	-0.325

ตาราง 5-8 ผลการทดลองเชิงเปรียบเทียบระหว่าง การทดลอง 5.1 กับการทดลอง 5.2 (ต่อ)

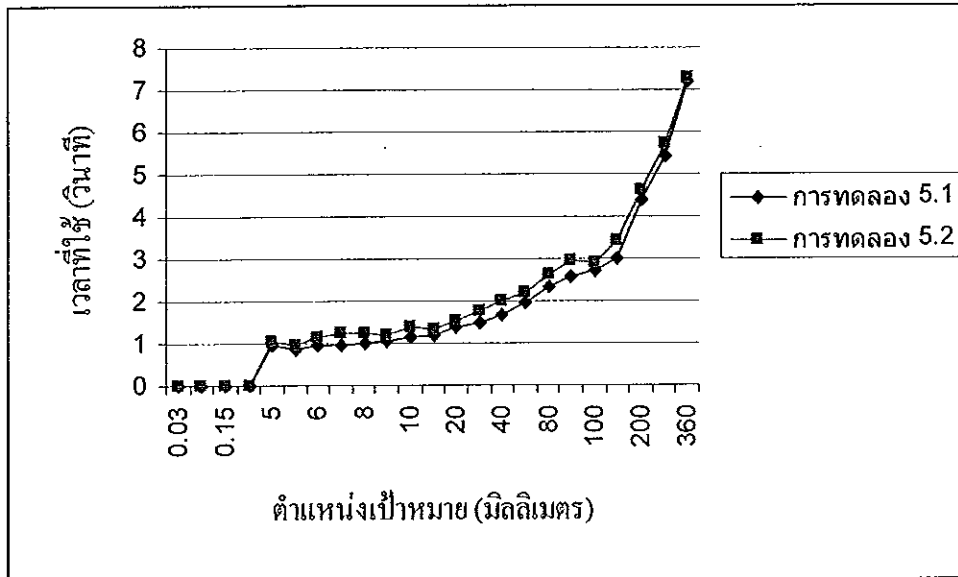
ค่าตำแหน่ง ที่ป้อน (mm.)	เวลาที่ใช้เฉลี่ย (วินาที)		ค่าความผิดพลาด (mm.)	
	พีซีซีควบคุม ตำแหน่ง (5.1)	พีซีซีควบคุม ความเร็ว (5.2)	พีซีซีควบคุม ตำแหน่ง (5.1)	พีซีซีควบคุม ความเร็ว (5.2)
200.000	4.40	4.60	-0.050	-0.300
260.250	5.42	5.70	-0.025	-0.300
360.000	7.19	7.30	0.075	-0.325

จากผลการทดลองที่ได้จากตาราง 5-8 สามารถพล็อตกราฟระหว่างตำแหน่งเป้าหมาย กับค่าความผิดพลาดเปรียบเทียบระหว่างการทดลอง 5.1 และการทดลอง 5.2 ดังภาพประกอบ 5-12



ภาพประกอบ 5-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายและค่าความผิดพลาด
เปรียบเทียบระหว่างการทดลอง 5.1 และ การทดลอง 5.2

จากผลการทดลองที่ได้จากตาราง 5-8 สามารถพล็อตกราฟระหว่าง ตำแหน่ง เป้าหมาย กับเวลาที่ใช้ เปรียบเทียบระหว่างการทดลอง 5.1 และการทดลอง 5.2 แสดงได้ดัง ภาพประกอบ 5-12



ภาพประกอบ 5-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมาย และเวลาที่ใช้ เปรียบเทียบ ระหว่างการทดลอง 5.1 และ การทดลอง 5.2

จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 5-12 และ 5-13 สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

1. พิจารณาค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมายจากภาพประกอบ 5-12 จะเห็นได้ว่าการทดลอง 5.1 มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่ามีค่าเฉลี่ย 0.025 มิลลิเมตร ส่วนการทดลอง 5.2 มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย -0.300 มิลลิเมตร
2. พิจารณาเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย จากภาพประกอบ 5-13 จะได้ว่าการทดลอง 5.1 ใช้เวลาในการเข้าสู่เป้าหมายน้อยกว่ามีค่าเฉลี่ย 2.23 วินาที ในขณะที่การทดลอง 5.2 ใช้เวลาในการสู่เป้าหมายเฉลี่ย 2.44 วินาที

5.3 การทดสอบการปรับความเร็วอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด

การทดสอบในส่วนนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดโดยเป้าหมายหลัก ต้องการให้ระบบยังคงเคลื่อนที่โดยใช้เวลาเท่ากับหรือใกล้เคียงกับเวลาในสถานะมีโหลดคงที่ค่าหนึ่ง โดยจะทำการทดสอบ 2 แบบดังนี้

1. การทดสอบระบบที่มีเฉพาะส่วนของตัวควบคุมพีซีซีควบคุมตำแหน่งเพียงอย่างเดียว โดยมีโครงสร้างการควบคุมตามภาพประกอบ 3-9
2. การทดสอบระบบที่มีส่วนของตัวควบคุมพีซีซีควบคุมตำแหน่ง และพีซีซีควบคุมความเร็ว ทำงานร่วมกัน โดยมีโครงสร้างการควบคุมตามภาพประกอบ 3-10

การทดลองทั้ง 2 แบบ ข้างต้นจะใช้ลำดับขั้นเหมือนกันดังนี้

ป้อนตำแหน่งการเคลื่อนที่ตำแหน่ง 100 มิลลิเมตร ที่ในสถานะไม่มีโหลด และมีโหลด 100 กิโลกรัม บันทึกผลการทดลองได้ตามตาราง 5-9 และ 5-10 ตามลำดับ และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ ผลการควบคุมทั้ง 2 แบบ ดังในตาราง 5-11

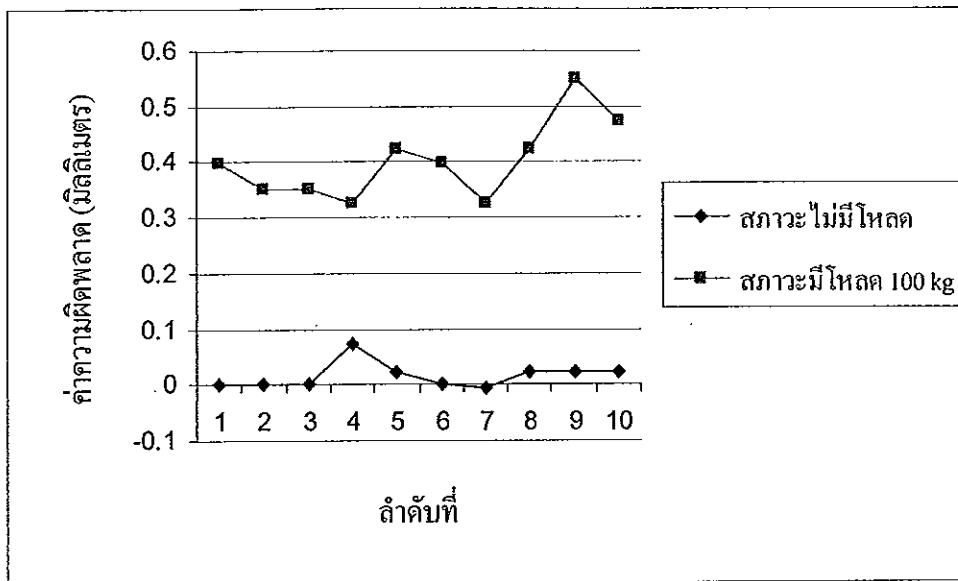
ตาราง 5-9 แสดงผลการควบคุมตำแหน่ง ในแบบการทดสอบที่ 1

ค่าตำแหน่ง ที่ป้อน (mm.) (1)	ไม่มีโหลด			มีโหลด 100 กิโลกรัม		
	ตำแหน่งที่ ได้ (mm.) (2)	ผิดพลาด (mm.) (1) - (2)	เวลา (วินาที)	ตำแหน่ง ที่ได้ (mm.) (3)	ผิดพลาด (mm.) (1) - (3)	เวลา (วินาที)
100.0	100.000	0.000	2.72	99.600	0.400	3.49
	100.000	0.000	2.70	99.650	0.350	3.04
	100.000	0.000	2.71	99.650	0.350	3.25
	99.925	0.075	2.74	99.675	0.325	3.33
	99.975	0.025	2.70	99.575	0.425	3.69
	100.000	0.000	2.68	99.600	0.400	3.43
	100.000	0.000	2.69	99.675	0.325	3.54
	99.975	0.025	2.69	99.575	0.425	3.33
	99.975	0.025	2.69	99.450	0.550	3.29
	99.975	0.025	2.72	99.525	0.475	3.95
เฉลี่ย	99.975	0.025	2.70	99.600	0.400	3.43

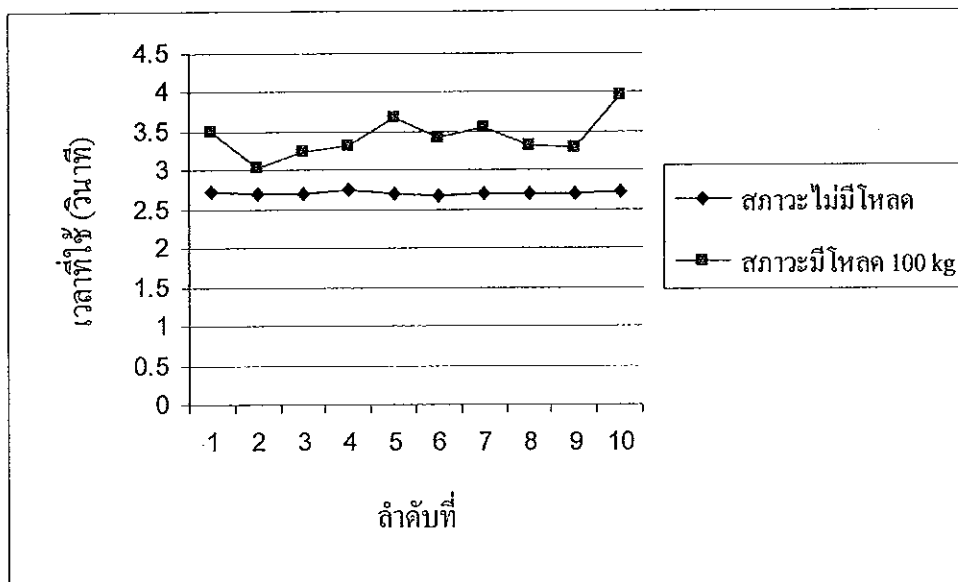
ข้อมูลในตาราง 5-9 สามารถพล็อตกราฟ ระหว่างลำดับที่ กับค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมายในสภาวะไม่มีโหลด และสภาวะมีโหลด 100 kg ดังแสดงในภาพประกอบ 5-14 และพล็อตกราฟระหว่างลำดับที่ กับค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสภาวะไม่มีโหลด และสภาวะมีโหลด 100 kg ดังแสดงในภาพประกอบ 5-15

ผลการทดลองตามภาพประกอบ 5-14 และ 5-15 สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

1. สภาวะมีโหลด 100 kg ค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมายมากขึ้น เฉลี่ย 0.400 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่าในสภาวะไม่มีโหลด 0.375 มิลลิเมตร และเวลาในการเข้าสู่เป้าหมายเฉลี่ย 2.70 วินาที มีค่ามากกว่าในสภาวะไม่มีโหลด 0.73 วินาที
2. ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบไม่มีความสามารถในการปรับตัวเองได้ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 5-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ กับค่าความผิดพลาด ในสถานะไม่มีโหลด และมีโหลด 100 kg



ภาพประกอบ 5-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ กับค่าเวลาที่ใช้ ในสถานะไม่มีโหลด และมีโหลด 100 kg

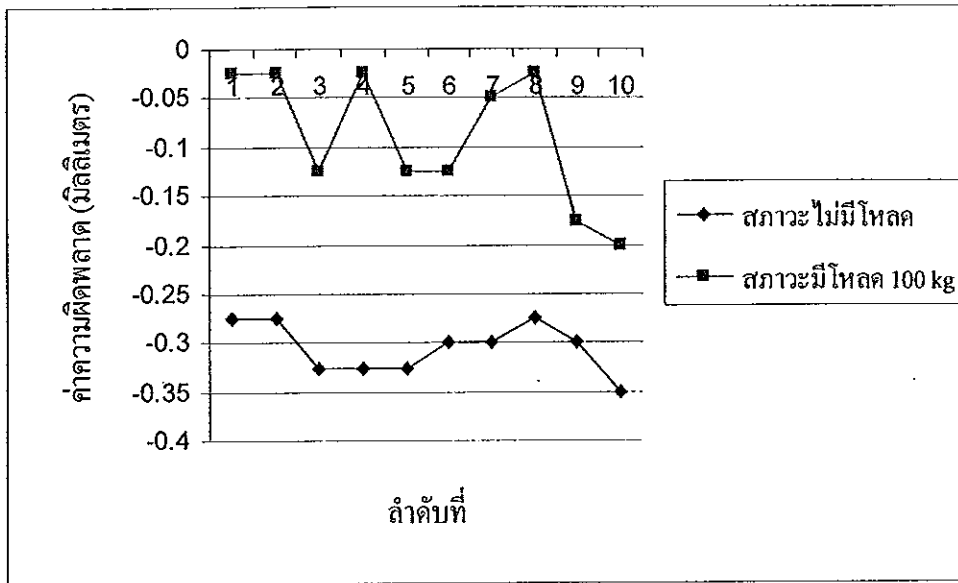
ตาราง 5-10 แสดงผลการควบคุมตำแหน่ง ในแบบการทดสอบที่ 2

ค่าตำแหน่ง ที่ป้อน (mm.) (1)	ไม่มีโหลด			มีโหลด 100 กิโลกรัม		
	ตำแหน่งที่ ได้ (mm.) (2)	ผิดพลาด (mm.) (1) - (2)	เวลา (วินาที)	ตำแหน่ง ที่ได้ (mm.) (3)	ผิดพลาด (mm.) (1) - (3)	เวลา (วินาที)
100.0	100.275	-0.275	3.02	100.025	-0.025	3.90
	100.275	-0.275	3.14	100.025	-0.025	3.64
	100.325	-0.325	2.92	100.125	-0.125	3.90
	100.325	-0.325	3.13	100.025	-0.025	3.91
	100.325	-0.325	3.09	100.125	-0.125	3.59
	100.300	-0.300	2.87	100.125	-0.125	3.50
	100.300	-0.300	2.86	100.050	-0.050	3.81
	100.275	-0.275	2.55	100.025	-0.025	3.29
	100.300	-0.300	2.85	100.175	-0.175	3.56
	100.350	-0.350	2.73	100.200	-0.200	3.30
เฉลี่ย	100.300	-0.300	2.92	100.100	-0.100	3.64

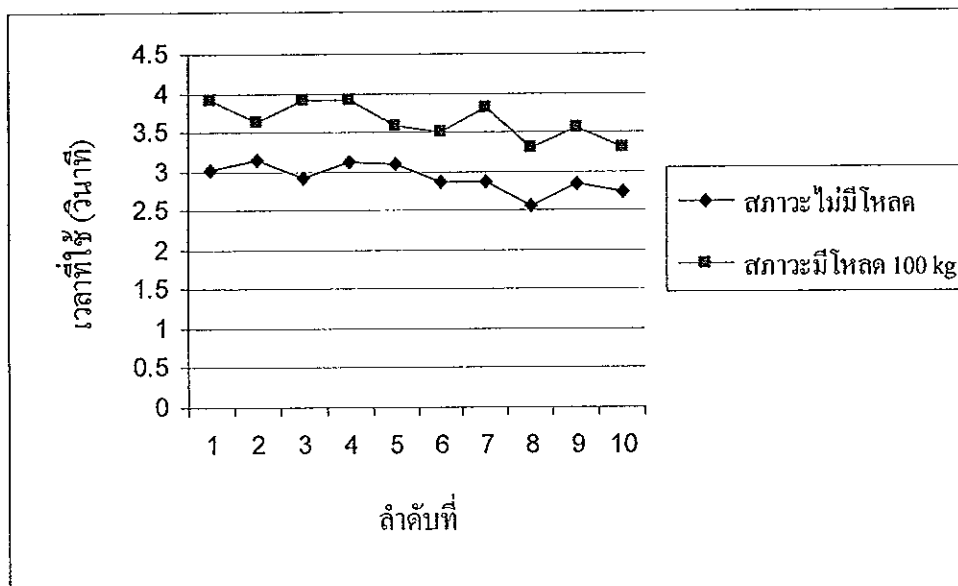
จากข้อมูลในตาราง 5-10 สามารถพล็อตกราฟ ระหว่างลำดับที่ กับค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสภาวะไม่มีโหลด และสภาวะมีโหลด 100 kg ดังแสดงในภาพประกอบ 5-16 และพล็อตกราฟระหว่างลำดับที่ กับค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสภาวะไม่มีโหลด และสภาวะมีโหลด 100 kg ดังแสดงในภาพประกอบ 5-17

จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 5-16 และ 5-17 สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

1. สภาวะมีโหลด 100 kg ค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมายน้อยลง เฉลี่ย -0.100 มิลลิเมตร น้อยกว่าในสภาวะไม่มีโหลด 0.200 มิลลิเมตร และเวลาในการเข้าสู่เป้าหมายเฉลี่ย 3.64 วินาที ซึ่งมากกว่าสภาวะไม่มีโหลด 0.72 วินาที
2. จากผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าระบบมีการปรับตัวเองได้เมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้น



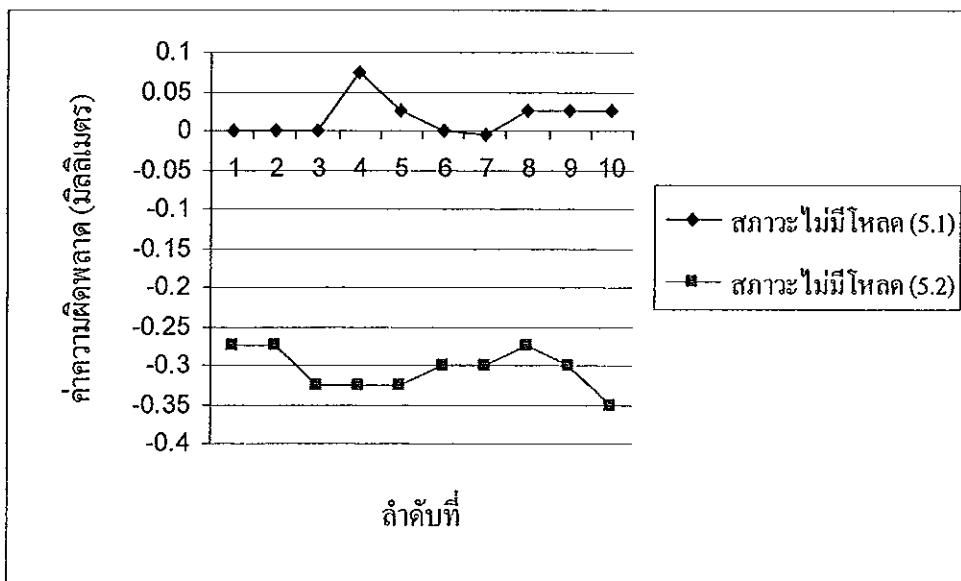
ภาพประกอบ 5-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ กับค่าความผิดพลาด ในสภาวะไม่มีไหลด์ และมีไหลด์ 100 kg



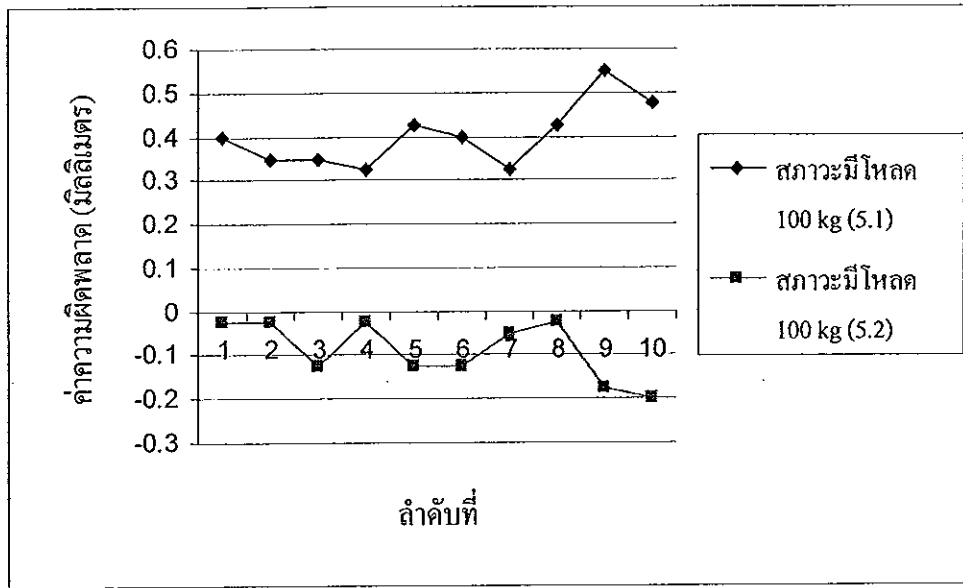
ภาพประกอบ 5-17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ กับค่าเวลาที่ใช้ ในสภาวะไม่มีไหลด์ และมีไหลด์ 100 kg

จากข้อมูลในตาราง 5-9 และ ตาราง 5-10 สามารถพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองแบบที่ 1 และ การทดลองแบบที่ 2 ได้ดังนี้

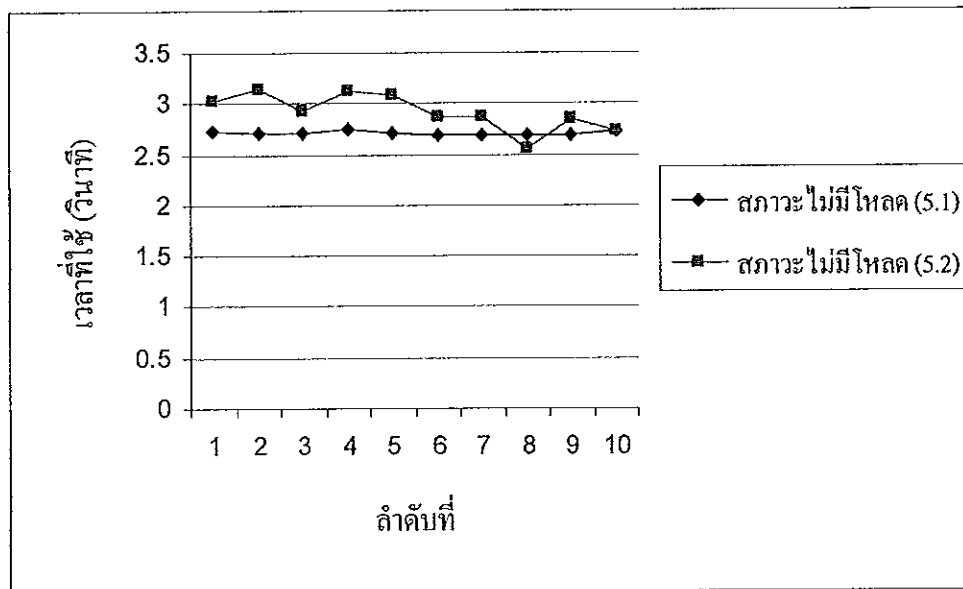
1. พล็อตกราฟระหว่างลำดับที่ กับค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสถานะไม่มีโหลด ดังแสดงในภาพประกอบ 5-18
2. พล็อตกราฟระหว่างลำดับที่ กับค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสถานะมีโหลด 100 kg ดังแสดงในภาพประกอบ 5-19
3. พล็อตกราฟ ระหว่าง ลำดับที่ กับค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสถานะไม่มีโหลด ดังแสดงในภาพประกอบ 5-20
4. พล็อตกราฟ ระหว่าง ลำดับที่ กับค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสถานะมีโหลด 100 kg ดังแสดงในภาพประกอบ 5-21



ภาพประกอบ 5-18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ และค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสถานะไม่มีโหลด



ภาพประกอบ 5-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ และค่าความคิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมาย
ในสถานะมีโหลด 100 kg



ภาพประกอบ 5-20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ และค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ใน
สถานะไม่มีโหลด



ภาพประกอบ 5-21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับที่ และค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ในสภาวะมีโหลด 100 kg

จากข้อมูลในตาราง 5-9 และ ตาราง 5-10 สามารถสรุปค่าเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบการควบคุมทั้ง 2 แบบได้ดังในตาราง 5-11

ตาราง 5-11 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการควบคุม ทั้ง 2 แบบการทดสอบ

การทดลอง แบบที่	ไม่มีโหลด			มีโหลด 100 กิโลกรัม		
	ตำแหน่งที่ ได้ (mm.) (1)	ผิดพลาด (mm.) (2)	เวลา (วินาที) (3)	ตำแหน่ง ที่ได้ (mm.) (4)	ผิดพลาด (mm.) (5)	เวลา (วินาที) (6)
1.	99.975	0.025	2.70	99.600	0.400	3.43
2.	100.300	-0.300	2.92	100.100	-0.100	3.64

จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 5-18,5-19,5-20,5-21 และตาราง 5-16 สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

1. สภาวะไม่มีโหลด การทดลองแบบที่ 1 ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 0.025 มิลลิเมตร
2. สภาวะมีโหลด 100 kg การทดลองแบบที่ 2 ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย -0.100 มิลลิเมตร
3. จากผลการเปรียบเทียบจะเห็นว่า ระบบควบคุมในการทดลองที่ 1 ไม่มีคุณสมบัติของการปรับตัวเองเมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้น แต่การทดลองในแบบที่ 2 ซึ่งมีตัวควบคุมฟัซซี่ตำแหน่ง ทำงานร่วมกับฟัซซี่ควบคุมความเร็ว มีคุณสมบัติการปรับตัวเองได้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวสรุปผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยด้านระบบควบคุมอัตโนมัติต่อไป

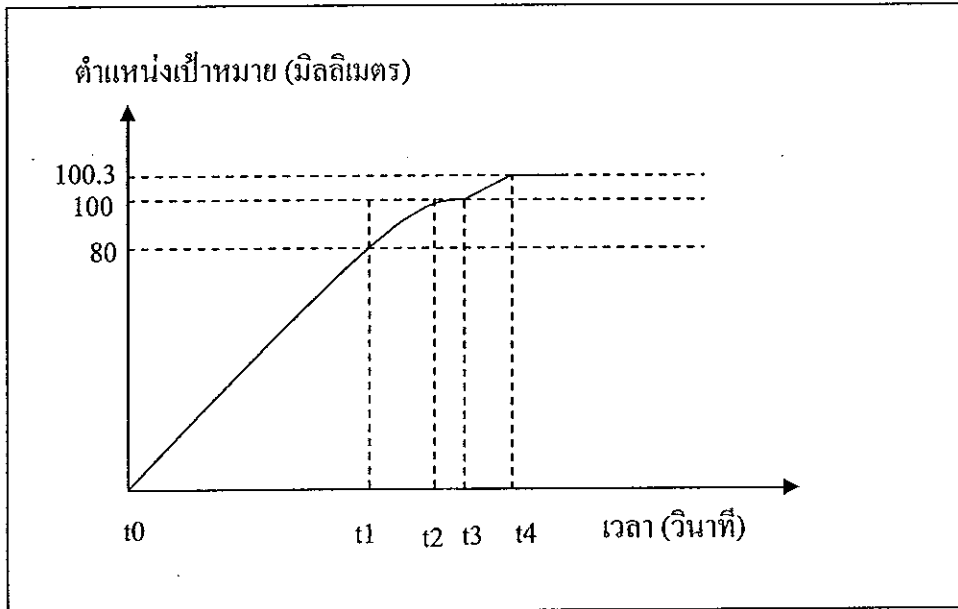
6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอ การประยุกต์หลักการควบคุมแบบ FMRLC มาใช้ในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งเป็นตัวขับในเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก โดยได้จำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อออกแบบระบบควบคุม และศึกษาพฤติกรรมของระบบ เมื่อได้แนวทางและรูปแบบการควบคุมที่สามารถให้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดี และมีความสามารถในการปรับตัวเองได้ ต่อจากนั้นนำรูปแบบการควบคุมดังกล่าวมาควบคุมระบบจริง โดยเขียนโปรแกรมลงบอร์ดควบคุม TMS320F2812 DSP และได้ทำการทดสอบระบบโดยมีการทดลอง 3 ส่วน คือ

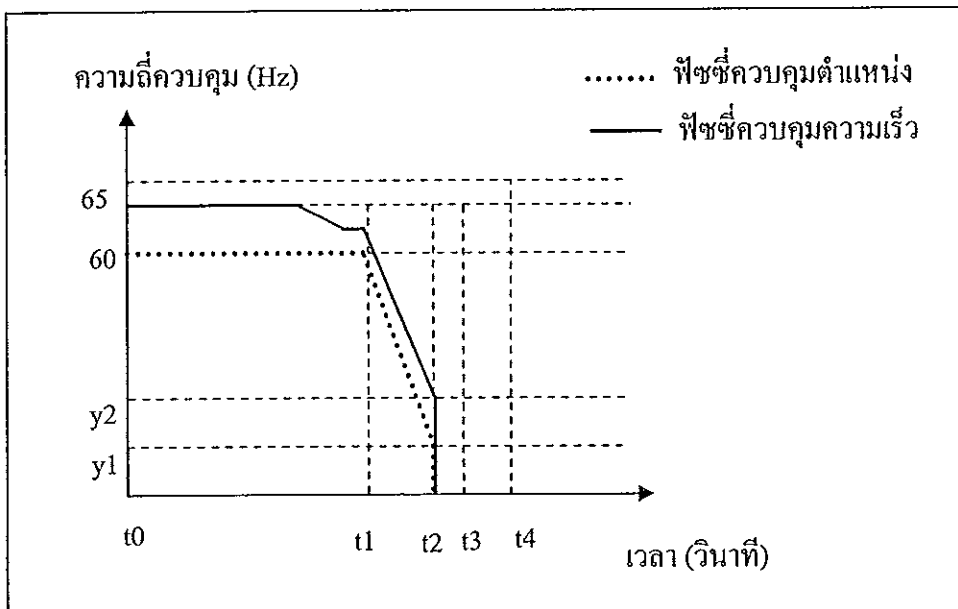
1. การสร้างกฎให้ฟuzzyควบคุมตำแหน่ง (การทดลองหัวข้อ 5.1) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กฎการควบคุมที่ได้จากการสร้างอัตโนมัติ นั้น สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้ และมีความผิดพลาดเฉลี่ย 0.025 มิลลิเมตร ซึ่งมีความใกล้เคียงกับผลการควบคุมที่ได้จากการสร้างกฎโดยผู้เชี่ยวชาญในงานวิจัย[10] แต่ว่าการควบคุมมีข้อจำกัดที่ตำแหน่งการเคลื่อนที่ น้อยสุดที่สามารถควบคุมได้อยู่ประมาณ 4.050 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเพิ่มจำนวนกฎการควบคุม หรือการปรับขอบเขตของฟuzzyเซตอินพุตในช่วงเข้าใกล้เป้าหมายให้มีฐานที่แคบลง

2. การสร้างกฎให้กับฟuzzyควบคุมความเร็ว (การทดลองหัวข้อ 5.2) เป้าหมายหลักของการสร้างตัวฟuzzyควบคุมความเร็วเพิ่มเข้าไปในระบบ เพื่อต้องการให้ระบบมีการปรับตัวเองได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด ได้กำหนดความสัมพันธ์ของฟuzzyเซตอินพุตเป็น ความเร็วเป้าหมายและความเร็วจริงของมอเตอร์ และเอาที่เป็นค่าความถี่ควบคุม ด้วยการกำหนดความสัมพันธ์ของอินพุตของฟuzzyควบคุมความเร็วดังกล่าวทำให้ได้รูปแบบการควบคุมที่สามารถปรับตัวเองได้ จากผลการทดลองพบว่า ระบบได้ทำการปรับกฎการควบคุมเพื่อให้ความเร็วของมอเตอร์ เท่ากับความเร็วของโมเดลอ้างอิง แต่เนื่องจากผลตอบสนองหรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วของ

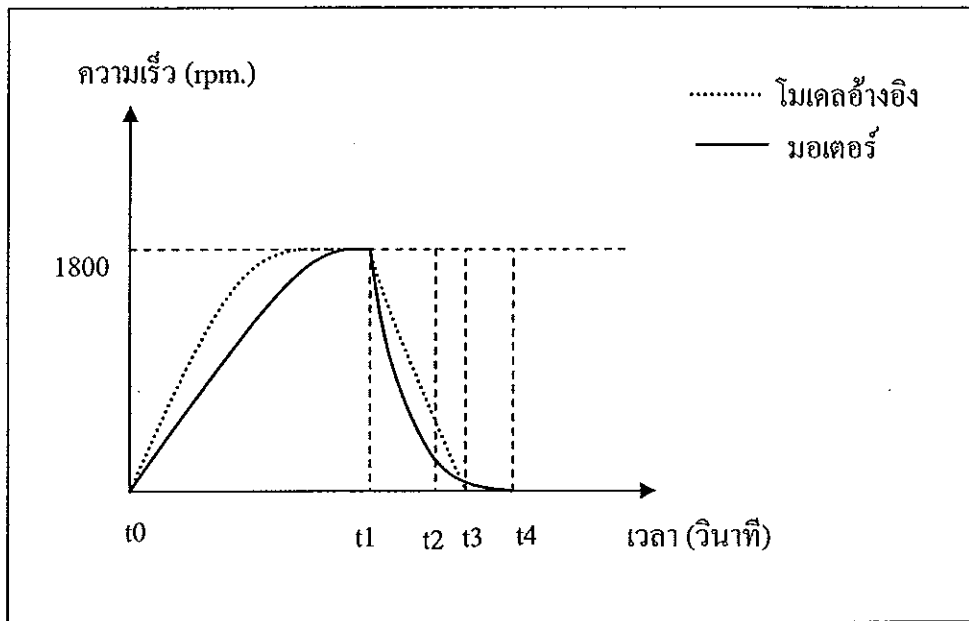
โมเดลอ้างอิงสามารถเปลี่ยนแปลงได้เร็วกว่า ความเร็วของมอเตอร์ จึงทำให้ระบบไม่สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์เท่ากับความเร็วของโมเดลอ้างอิงได้ ดังภาพประกอบ 6-1, 6-2 และ 6-3 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว และค่าความถี่ควบคุมที่ส่งเข้ามอเตอร์ดังในรายละเอียด



ภาพประกอบ 6-1 แสดงการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย 100 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 6-2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ควบคุม



ภาพประกอบ 6-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของ โมเดลอ้างอิงและมอเตอร์

— ช่วงเวลา t_0-t_1

ฟิซซีควบคุมตำแหน่งส่งความถี่ควบคุม 60 Hz ออกมาให้กับฟิซซีควบคุมความเร็ว และโมเดลอ้างอิง โมเดลอ้างอิงจะส่งผลตอบสนองความเร็วออกมา ตามภาพประกอบ 6-3 จะเห็นได้ว่าความเร็วของโมเดลอ้างอิงจะเร็วกว่ามอเตอร์ และในขณะนั้นฟิซซีควบคุมความเร็วจะส่งค่า 65 Hz ให้กับมอเตอร์เนื่องจากตัวฟิซซีอินเวอร์เตอร์ความเร็วประมวลผลว่าความเร็วมอเตอร์ช้ากว่าความเร็วของโมเดลอ้างอิงมาก ก็จะส่งค่าปรับแก้ให้กับฟิซซีควบคุมความเร็ว กฎของฟิซซีควบคุมความเร็วก็จะถูกปรับขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าความถี่ควบคุมสูงสุดคือ 65 Hz และเมื่อความเร็วของมอเตอร์เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเร็วของโมเดลอ้างอิง ตัวควบคุมฟิซซีอินเวอร์เตอร์ความเร็วจะส่งค่าปรับแก้ลดลงทำให้ฟิซซีควบคุมความเร็วส่งค่าความถี่ควบคุมลดลงจาก 65 Hz ดังในภาพประกอบ 6-2

— ช่วงเวลา t_1-t_2

ตำแหน่งการเคลื่อนที่เข้าใกล้เป้าหมาย ฟิซซีควบคุมตำแหน่งจะปรับลดความถี่ควบคุมลงมา โมเดลอ้างอิงและมอเตอร์ก็จะลดความเร็ว แต่มอเตอร์จะลดความเร็วได้เร็วกว่าโมเดลอ้างอิง ส่งผลให้ฟิซซีอินเวอร์เตอร์ความเร็วส่งค่าปรับแก้ฟิซซีควบคุมความเร็วเพิ่มค่าความถี่ควบคุมให้มอเตอร์มีความเร็วเท่ากับความเร็วของโมเดลอ้างอิง

— ช่วงเวลา t2-t3

ที่เวลา t3 มอเตอร์ต้องหยุดเนื่องจากถึงตำแหน่งเป้าหมายที่ 100 มิลลิเมตร และที่เวลา t2 เป็นเวลาที่ใกล้กับที่เวลา t3 มากๆ นั่นคือค่าสุดท้ายที่ระบบส่งควบคุมก่อนที่จะส่งค่าความถี่ 0 Hz เพื่อหยุดมอเตอร์ที่เวลา t3 จากภาพประกอบ 6-3 จะเห็นได้ว่าก่อนเวลา t2 ความเร็วของมอเตอร์ยังคงช้ากว่าความเร็วของโมเดลอ้างอิง ทำให้ที่เวลา t2 พีชชีควบคุมความเร็วยังคงส่งค่าความถี่ที่ค่อนข้างสูงเพื่อปรับให้ความเร็วมอเตอร์เท่ากับความเร็วของโมเดลอ้างอิง จึงทำให้มอเตอร์ไม่สามารถหยุดได้ที่เวลา t3

— ช่วงเวลา t3-t4

ช่วงเวลานี้มอเตอร์จะต้องหยุดเคลื่อนที่เนื่องจากถึงเป้าหมายที่ 100 มิลลิเมตร แต่มอเตอร์ไม่สามารถหยุดได้ทันทีทันใด จึงทำให้เกิดค่าความผิดพลาดของเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย -0.300 มิลลิเมตร ดังในภาพประกอบ 6-1

3. ทดสอบระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด ได้ทดสอบตัวควบคุมในหัวข้อ 5.1 และตัวควบคุมในหัวข้อ 5.2 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีชชีในหัวข้อ 5.2 นั้นมีการปรับตัวเองได้โดยมีค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมายได้น้อยลง คือประมาณ -0.100 มิลลิเมตร ในส่วนของตัวควบคุมในหัวข้อ 5.1 จะไม่สามารถควบคุมให้ระบบเข้าสู่เป้าหมายได้ดีเหมือนในสถานะที่ไม่มีโหลดเนื่องจากกฎการควบคุมจะไม่มีกรปรับปรุงอีก ทำให้ไม่สามารถปรับค่าความถี่ควบคุมขึ้นมาได้เมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่าความผิดพลาดการเข้าสู่เป้าหมาย 0.400 มิลลิเมตร

จากการทดลองดังกล่าวทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า ระบบควบคุมที่ได้ประยุกต์หลักการควบคุมแบบ FMRLC นั้น สามารถทำให้การสร้างกฎของตัวควบคุมพีชชีทำได้เร็วขึ้น และยังคงให้ผลการควบคุมได้ดีเช่นเดียวกับการสร้างกฎโดยอาศัยผู้เชี่ยวชาญ อีกทั้งระบบยังมีความสามารถในการปรับตัวเองได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด ในส่วนของความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายที่เกิดขึ้นสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยการสร้างโมเดลอ้างอิงจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบระบบจริง โครงสร้างการควบคุมในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมต่างๆ ได้

6.2 ปัญหา และข้อเสนอแนะ

4. ในงานวิจัยนี้ได้สร้างโมเดลอ้างอิง จากการทดสอบระบบอย่างคร่าวๆ ในแบบจำลอง ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่าระบบจริง นั้นไม่สามารถที่จะมีผลตอบสนองได้เหมือนกับโมเดลอ้างอิง ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดในการเข้าสู่เป้าหมาย ดังนั้นหากได้ทำการทดสอบระบบจริงเพื่อหาพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบแล้วนำมาสร้างเป็นโมเดลอ้างอิง ก็จะลดความผิดพลาดของการควบคุมลงได้

5. สัญญาณรบกวนที่เกิดจากมอเตอร์ทำให้บอร์ดควบคุม TMS320F2812 DSP ทำงานผิดพลาด จำเป็นต้องออกแบบวงจรแยกระบบกราวด์ของอุปกรณ์ ที่จะมาเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ดควบคุมดังกล่าว

6. เนื่องจากระบบควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยตัวควบคุมพีซี 4 ตัว ทำให้โปรแกรมควบคุมที่เขียนลงบอร์ดควบคุม TMS320F2812 DSP มีขนาดใหญ่และจำเป็นต้องใช้หน่วยความจำ RAM ในการประมวลผลค่อนข้างมาก ทำให้การเพิ่มจำนวนกฎของ พีซีที่ไม่ได้เนื่องจากบอร์ด TMS320F2812 DSP มีหน่วยความจำจำกัด ซึ่งจะต้องปรับปรุงบอร์ดให้มีหน่วยความจำมากขึ้น

7. จากหลักการโดยรวมแล้วระบบนั้น จะกำหนดขอบเขตของพีซีเซตอินพุทไว้คงที่ และทำการปรับกฎการควบคุม ซึ่งในงานวิจัย [9] ได้นำเสนอแนวทางในการปรับขอบเขตของพีซีเซตอินพุท และพีซีเซตเอาต์พุท ว่ามีผลกับความเร็วในการเข้าสู่เป้าหมาย ซึ่งถ้าหากระบบสามารถปรับกฎและขอบเขตกราฟพีซีเซตอินพุทพร้อมด้วย การควบคุมจะมีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งอาจนำหลักการจีเนติกอัลกอริทึม หรือ โครงข่ายประสาทเทียมมาร่วมด้วย น่าจะปรับปรุงระบบให้ดีขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] นภัทร วจันทเพนทร์ และ ประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ, 2544, “ทฤษฎีเครื่องกลไฟฟ้า 2”, กรุงเทพฯ, สกายบุ๊กส์.
- [2] ศิวะ หงษ์นภา, 2543, “ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ”, กรุงเทพฯ, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [3] ปริพนธ์ พัฒนศักดิ์วงศ์, 2545, “เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [4] สุเชียร เกียรติสุนทร, 2539, “พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุมในกระบวนการอุตสาหกรรม เล่ม 3”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [5] รศ.วิพันธ์ ปรีชาพานิช, 2547, “การวิเคราะห์ระบบควบคุมเวลาติสครีต”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] เดชา พวงดาวเรือง, 2543, “ตัวควบคุมพีซีที่เวลาจริงกฎเดียวสำหรับคุมค่าความเร็วมอเตอร์”, วิศวกรรมสาร มกค, ฉบับที่ 3 (กันยายน-ธันวาคม 2543), 76-83.
- [7] รัชณี สุภักพานิช , กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ และ นิमित บุญภิรมย์, 2541, “ตัวควบคุมพีซีแบบปรับกฎด้วยตัวเอง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, 437-440.
- [8] ภากร ศันสนีวานิช, สุวรรณ อรุณวิวัฒน์, เสริมศักดิ์ เลิศมนโรรัตน์ และ พิศิษฎ์ โภการัตน์กุล. “การควบคุมการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้พีซีลอจิกที่เรียนรู้ได้ด้วยตัวเอง”
- [9] ธิดาพร พิทักษ์พรพันธ์, สมพร ชาญประจักษ์วัฒน์, เสกสรร เกียรติสุไพบูลย์ และ ผศ.ดร. จงกล งามวิวิทย์. “ผลการเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวควบคุมพีซี”
- [10] ปราโมทย์ อริยาดิเรก, 2547, “การควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [11] วัชรพงศ์ ราชพงศ์, 2542, “การควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง และแรงดันเครื่องเงินเนอเรเตอร์กระแสสลับด้วยเครื่องควบคุม แบบพีซีสำหรับชุดมอเตอร์เงินเนอเรเตอร์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [12] สุริยนต์ ชมดี, 2544, “การลดการใช้พลังงานในการทำความเย็นโดยใช้การควบคุมแบบพีซีลอจิก”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- [13] กิติพงษ์ หงส์วรานนท์ และปัญชร ชัยศรี, 2546, “ระบบควบคุมเครื่องจักรพื้บนแผ่นโลหะ”,
ปริญญาทิพนธ์ สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [14] โชติช่วง นาคเหล็ก และ ชีรพล เรืองอินทร์, 2546, “ชุดควบคุมเอซีเซออร์ไวมอเตอร์โดยตัว
ควบคุมแบบประมวลสัญญาณดิจิทัล”, ปริญญาทิพนธ์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [15] Krishnan, R. 2001, “Electric Motor Drives”, Prentice Hall, Inc.
- [16] Bimal, K. Bose, 2002, “Modern Power Electronics and AC Drives”, Prentice Hall, Inc.
- [17] Krause, P.C. 1986, “Analysis of Electric Machinery”, McGraw-Hill Book Company.
- [18] Ouiguini, R.; Djeflal, K.; Oussedik, A. and Megartsi, R. 1997. “Speed control of an
induction motor using the fuzzy logic approach”, Industrial Electronics, 1997. ISIE '97.,
Proceeding of the IEEE International Symposium. 7-11 July 1997. pp. 1168-1172. vol. 3
- [19] Kevin M. Passino and Stephen Yurkovich, “Fuzzy Control”, Addison Wesley
Longman ,Inc.
- [20] Jeffery R.Layne and Kevin M.passino, “Fuzzy Model Reference Learning Control for
Cargo Ship Steering”, IEEE Control Magazine. 1993. pp. 457-462.
- [21] Ahmed EI Dessouky and Mohammed Tarbouchi, “Model Reference Adaptive Fuzzy
Control For Induction Motor Using Auto-Attentive Approach IEEE Control Magazine.
2000. pp. 719-723.
- [22] YASKAWA ELECTRIC CORPORATION, 2001, “VS mini J7 Series Instruction Manual
Compact General-Purpose Inverter”, Manual No. TOE-S606-12.1. June 2001.
- [23] Texas Instrument, “C281x C/C++ Header File and Peripheral Examples”,2003.
- [24] Texas Instrument, “TMS320F28x DSP System Control and Interrupts Reference
Guide”,2003.
- [25] Spectrum Digital, “eZdspTM F2812 Techical Reference”,2003.
- [26] Texas Instrument, “TLV5619-5639 Manual”,2000.
- [27] The Math Works Inc, 1997, “SIMULINK User’s Guide”, Version 2, January 1997.

ภาคผนวก

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความที่ 1 ได้รับการตีพิมพ์ในงาน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 ระหว่างวันที่ 9-10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2549 จัดขึ้นที่ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จ.ชลบุรี ประเทศไทย ในหัวข้อเรื่อง “ระบบควบคุมเครื่องพับและตัดเหล็กแบบปรับตัวเองได้ (An adaptive control system of a bending and cutting machine)”

ระบบควบคุม เครื่องปั๊มและตัดเหล็ก แบบปรับตัวเองได้

An adaptive control system of a bending and cutting machine

พรเจริญ สวัสดิ์รักษา, ปราโมทย์ อริยาดีเรก และ ธนศ เคารพพวงค์

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

E-mail: sawadde_j@hotmail.com, apramote@coe.psu.ac.th and kthanate@coe.psu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์หลักการควบคุมแบบฟัซซี่ โดยการเรียนรู้จากโมเดลอ้างอิง มาควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟส ซึ่งเป็นตัวขับเคลื่อนเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก เพื่อป้องกันเหล็กเข้าเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก จุดประสงค์เพื่อสร้างระบบที่สามารถเรียนรู้, สร้างและปรับกฎการควบคุมได้ ซึ่งระบบการควบคุมจะมี 2 ส่วนด้วยกัน คือ การควบคุมตำแหน่งและการควบคุมความเร็ว โดยจะมีการทำงาน 2 สภาวะคือ 1. การเรียนรู้และสร้างกฎการควบคุม และ 2. การปรับกฎการควบคุมเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง จากผลการทดสอบโดยจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB with SIMULINK พบว่า ตัวควบคุมตำแหน่งและความเร็วที่ประยุกต์หลักการควบคุม FMRLC สามารถทำการเรียนรู้, สร้างกฎการควบคุมตำแหน่งและความเร็ว โดยระบบสามารถควบคุมให้มอเตอร์เคลื่อนผ่านเหล็กเข้าสู่ตำแหน่งตามที่ต้องการและมีความแม่นยำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดระบบก็จะปรับการควบคุมได้ ซึ่งยังก่อให้เกิดกรณีที่เข้าสู่เป้าหมายโดยใช้เวลาได้ใกล้เคียงหรือเท่ากับในสภาวะโหลดคงที่ค่าหนึ่งที่กำหนดไว้

คำสำคัญ: ฟัซซี่ โดยการเรียนรู้จาก โมเดลอ้างอิง, มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟส

Abstract

This paper presents a fuzzy model reference learning control (FMRLC) strategy for controlling position and speed of 3 phase induction motor. The learning system can generate and adapt the fuzzy controller's knowledge base online by using FMRLC. It consists of two parts. One is the position controller, another the speed controller. They have two mode of operations the self-learning and generating the controlled rules and the adapting them when the load changes. From the simulation using MATLAB with SIMULINK, we found that the position and speed controllers can self-learn to generate the rules and obtain the accurate position and

speed of motor while the load changes. And the setting time of controlled system which load changes is relatively close to those which load is constant.

Keyword: Fuzzy Model Reference Learning Control (FMRLC), 3 phase induction motor.

1. บทนำ

การควบคุมตำแหน่งและความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับ สำหรับเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก[1] ได้ใช้หลักการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ซึ่งการสร้างและออกแบบกฎตัวควบคุมฟัซซี่อาศัยความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งต้องใช้เวลาในการออกแบบและปรับกฎตัวควบคุมฟัซซี่ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดระบบจะใช้เวลานานในการเข้าสู่เป้าหมาย จากปัญหาดังกล่าวจึงได้นำหลักการควบคุมแบบ Fuzzy Model Reference Learning Control (FMRLC) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งได้ออกแบบระบบควบคุมเป็น 2 ส่วนคือการควบคุมตำแหน่งและการควบคุมความเร็ว โดยเนื้อหาในงานวิจัยฉบับนี้ประกอบด้วย หลักการควบคุม แบบ Fuzzy Model Reference Learning Control (FMRLC), การทดลอง, ผลการทดลอง และในส่วนสุดท้ายจะเป็นสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

2. Fuzzy Model Reference Learning Control (FMRLC) [2-4]

โครงสร้างการควบคุมแบบ FMRLC แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักด้วยกันคือ 1.ตัวควบคุมฟัซซี่ (The Fuzzy Controller) 2. ตัวโมเดลอ้างอิง (The Reference Model) และ 3. กลไกหรือ กระบวนการเรียนรู้ โดยมีหลักการทำงานดังนี้ กลไกหรือกระบวนการเรียนรู้จะมีหน้าที่ ในการปรับกฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซี่ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบเข้าใกล้ผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิง โดยจะนำผลตอบสนองของระบบเปรียบเทียบกับผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิง แล้วประมวลผลส่งค่าไปปรับกฎของ

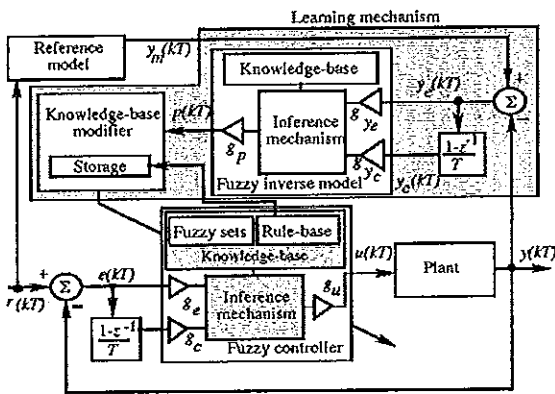
ตัวควบคุมฟัซซี่ สำหรับการทำงานในแต่ละส่วนจะอธิบายในลำดับต่อไป

2.1 ตัวควบคุมฟัซซี่(The Fuzzy Control)

จากระบบการควบคุมแบบ FMRLC ในรูปที่ 1 จะแสดงให้เห็นว่า สัญญาณ อินพุตของระบบ คือ $u(kT)$ และ เอาท์พุตของระบบคือ $y(kT)$ ส่วนสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าตัวควบคุมฟัซซี่จะประกอบด้วย ค่าความผิดพลาด($e(kT)$) ระหว่างค่าเป้าหมาย($r(kT)$)กับค่าผลตอบสนองของระบบ ($y(kT)$) และ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด($c(kT)$) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$e(kT) = r(kT) - y(kT) \tag{1}$$

$$c(kT) = (e(kT) - e(kT-T)) / T \tag{2}$$



รูปที่ 1 Fuzzy model reference learning control [2]

โดยทั่วไปการกำหนดขอบเขตของตัวแปรอินพุต และเอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่(universes of discourse) จะถูกนอร์มอลไลซ์(normalized) ให้อยู่ในช่วงระหว่าง[-1,1] และใช้ค่าเกณฑ์ g_e, g_c และ g_u ในการกำหนดขอบเขตของตัวแปรค่าความผิดพลาด($e(kT)$), ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด($c(kT)$) และ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่($u(kT)$) ตามลำดับ ในการกำหนดค่าขอบเขตของตัวแปรเหล่านี้ สามารถทำได้โดยการปรับโดยผู้เชี่ยวชาญ หรือปรับแบบอัตโนมัติ สำหรับการปรับแบบอัตโนมัตินั้นมีหลักการคือ ตัวควบคุมฟัซซี่จะทำการตรวจสอบค่าความผิดพลาด($e(kT)$) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด($c(kT)$) จะเลือกค่าสูงสุด มาเป็นค่าเกณฑ์ของแต่ละตัวแปรนั้นๆ ซึ่งจะกำหนดช่วงเวลาในการพิจารณาค่าตัวแปรดังกล่าว สามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการได้ดังนี้

$$g_e = 1 / \max TA \{e(kT)\} \tag{3}$$

$$g_c = 1 / \max TA \{c(kT)\} \tag{4}$$

2.2 โมเดลอ้างอิง (The Reference Model)

โมเดลอ้างอิงจะใช้สำหรับกำหนดค่าผลตอบสนองของระบบให้เป็นไปตามที่เราต้องการ โดยการออกแบบโมเดลอ้างอิงนั้น จะพิจารณาจากค่า เวลาไต่ขึ้น (rise time), ค่าพุ่งเกิน(overshoot)

2.3 กระบวนการเรียนรู้(The Learning Mechanism)

กระบวนการเรียนรู้(The Learning Mechanism) ทำหน้าที่ปรับกฎในฐานความรู้ของตัวควบคุมฟัซซี่ เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบเข้าใกล้ผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิง ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ 1. โมเดลอินเวอร์สฟัซซี่ (a fuzzy inverse model) และ 2. ตัวปรับฐานความรู้(a knowledge basemodifier)

1. โมเดลอินเวอร์สฟัซซี่ (a fuzzy inverse model) ทำหน้าที่ในการสร้างเอาท์พุต $p(kT)$ เพื่อที่จะทำให้ ค่าความผิดพลาด $y_c(kT)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นก็คือ การพยายามทำให้ผลตอบสนองของระบบมีผลตอบสนองเท่ากับผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิงนั่นเอง ตัวโมเดลอินเวอร์สฟัซซี่(a fuzzy inverse model) ดังแสดงในรูปที่ 1 ก็จะประกอบด้วย อินพุตค่าความผิดพลาด $y_c(kT)$ ระหว่างค่าผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิง($y_m(kT)$)กับค่าผลตอบสนองของระบบ ($y(kT)$) และ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด ($y_e(kT)$) สามารถแสดงได้ดังสมการ

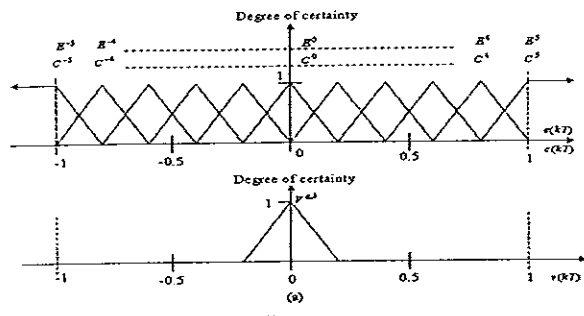
$$y_c(kT) = y_m(kT) - y(kT) \tag{5}$$

$$y_e(kT) = (y_c(kT) - y_c(kT-T)) / T \tag{6}$$

มีเกณฑ์ g_e, g_c และ g_p ในการกำหนดขอบเขตของตัวแปร ค่าความผิดพลาด(error $y_c(kT)$), ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด $y_e(kT)$ และ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่($p(kT)$)ตามลำดับ และได้ ออกแบบฟัซซี่เซต, ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และมีกฎการควบคุม กฎจะอยู่ในรูปของเงื่อนไขการตัดสินใจ

2. ตัวปรับฐานความรู้(a knowledge base modifier) ทำหน้าที่ในการปรับกฎการควบคุมฐานความรู้ของตัวควบคุมฟัซซี่ เพื่อให้สามารถควบคุมระบบให้ได้ผลตอบสนองเหมือนกับผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิง โดยอาศัยเอาท์พุต ที่ได้จากโมเดลอินเวอร์สฟัซซี่($p(kT)$) เป็นตัวที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกฎของฐานความรู้ของตัวควบคุมฟัซซี่ โดยเอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ จะมีค่าเท่ากับ $v(kT-T) + p(kT)$ ซึ่งในรูปที่ 2 จะแสดงให้เห็นว่า เริ่มต้นนั้น จะกำหนด ฟัซซี่เซตของอินพุตและฟัซซี่เซตเอาท์พุตไว้แล้วแต่จุดเซ็นเตอร์ของเอาท์พุต (center of output membership function on $v(kT)$) กำหนดค่าไว้เท่ากับศูนย์ ซึ่งการปรับกฎในฐานความรู้ก็คือการปรับค่าเซ็นเตอร์ของเอาท์พุตดังสมการที่(7)

$$v^{j, \dots, k, l, \dots, m}(kT) = v^{j, \dots, k, l, \dots, m}(kT - T) + p(kT) \tag{7}$$



Index of input membership functions on $e(kT)$

Center of input membership functions on $e(kT)$

Center values after update

Index of input membership functions on $e(kT)$

Center of output membership functions on $v(kT)$

Rule-base

		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	
-5	-1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4	0	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0

รูปที่ 2 Input – output universes of discourse and rule – base for the fuzzy controller[2]

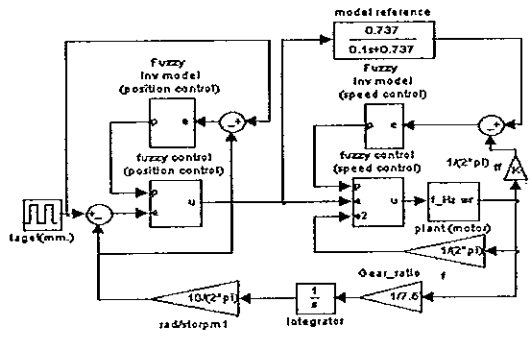
ตัวอย่าง สมมุติเอาท์พุทของโมเดลอินเวอร์สฟิซซี่ $p(kT) = 0.5$ ซึ่งเอาท์พุทของตัวควบคุมฟิซซี่ที่เวลา $kT-T$ จะถูกปรับปรุ่ค่า $(kT-T)+0.5$ และในขณะเวลา $kT-T$ นั้น $e(kT-T)=0.75$ และ $c(kT-T)=0.2$ ซึ่งกฎที่ถูกเรียกใช้ในการตัดสินใจจะมีสองกฎด้วยกันคือ

If E^3 and C^1 Then V^{3-1} และ If E^4 and C^1 Then V^{4-1} ซึ่งค่า $V^{3-1}(kT-T)$ และ $V^{4-1}(kT-T)$ มีค่าเท่ากับศูนย์เพราะฉะนั้นจากสมการที่ 7 จะได้ว่า $V^{3-1}(kT) = 0+0.5=0.5$ และ $V^{4-1}(kT) = 0+0.5=0.5$ ซึ่งจะเป็นการปรับปรุ่ค่าของกฎ ดังแสดงในรูปที่ 2

3. การทดลอง

การทดลองได้นำระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วดังรูปที่ 7 ทดสอบการเรียนรู้,สร้างและปรับกฎการควบคุมโดยเริ่มต้น กฎการควบคุมจะเป็นศูนย์หรือไม่มีกฎการควบคุม ซึ่งได้ออกแบบฟิซซี่เซ็ทของอินพุทไว้แล้วทั้งฟิซซี่ควบคุมตำแหน่งและฟิซซี่ควบคุมความเร็ว ดังรายละเอียดตามตารางที่ 1 การทดลองก็จะทำการจำลองการทำงานในโปรแกรม Simulink ใน MATLAB สำหรับการงานของระบบจะมี 2 สภาวะคือ 1. การเรียนรู้และสร้างกฎการควบคุมโดยตัวควบคุมตำแหน่งจะทำการสร้างกฎโดยไม่มีโมเดลอ้างอิงและจะไม่

การปรับกฎเมื่อผ่านการทำงานในสภาวะที่ 1 ในการทำงานสภาวะที่ 2. เป็นการปรับกฎการควบคุมเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงซึ่งตัวควบคุมความเร็วจะทำการปรับกฎอัตโนมัติโดยจะไม่มีโมเดลอ้างอิงซึ่งได้จากการออกแบบและประมาณพารามิเตอร์ของระบบ



รูปที่ 3 โครงสร้างการควบคุมตำแหน่งและความเร็ว

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุมฟิซซี่ในระบบควบคุม

ตัวควบคุม	ความสัมพันธ์ของสัญญาณข้อมูล	
Fuzzy inverse (position)	Input	e = ตำแหน่งเป้าหมาย - ตำแหน่งปัจจุบัน, $ce = e_{\text{ใหม่}} - e_{\text{เก่า}}$
	Out put	ค่าปรับปรุ่กฎ
Fuzzy position control	Input	e = ตำแหน่งเป้าหมาย - ตำแหน่งปัจจุบัน, $ce = e_{\text{ใหม่}} - e_{\text{เก่า}}$
	Out put	ค่าควบคุม(Hz)
Fuzzy inverse model (speed control)	Input	e = ผลตอบสนองReference model - ผลตอบสนองของมอเตอร์, $ce = e_{\text{ใหม่}} - e_{\text{เก่า}}$
	Out put	ค่าปรับปรุ่กฎ
Fuzzy speed control	Input	e = ความเร็วตามเป้าหมาย $e2$ = ความเร็วของมอเตอร์
	Out put	ค่าควบคุม(Hz)

4.ผลการทดลอง

จากรูปที่ 4 ช่วงเวลา $t = 0$ วินาที ถึง $t = 100$ วินาที เป็นการทำงานในสภาวะที่ 1 คือการสร้างกฎการควบคุม ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ให้ออกมาตามเป้าหมายได้ที่ 400 mm. ช่วงเวลา $t = 100$ วินาที ถึง $t = 300$ วินาที ตัวควบคุมตำแหน่งจะไม่มีการปรับกฎ ส่วนตัวควบคุมความเร็วยังคงปรับกฎ ระบบสามารถ

ควบคุมการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายที่ 400 mm. ใช้เวลา 5.75 วินาที และ 100 mm. ใช้เวลา 2.35 วินาที ที่ช่วงเวลา $t=300$ วินาที ถึง $t=400$ วินาที เป็นการทำงานในสภาวะที่ 2 คือการปรับกลูเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง ที่เวลา $t=302$ วินาที ถึง $t=313$ วินาที จะเป็นการใส่ โหลด 2 N.m ซึ่งระบบควบคุมการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายใช้เวลา 5.78 ms. และที่เวลา $t=352$ วินาที ถึง $t=363$ วินาที เป็นการเสริมแรง (ในทิศทางเดียวกับการหมุนของมอเตอร์) ทำให้มอเตอร์รับโหลด น้อยลงซึ่งระบบควบคุมการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายใช้เวลา 5.48 วินาที

function control_4x4 = [

-58.1171	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-33.1355	-4.4070	0
-5.1657	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-59.3119	-35.7658	-27.5563	-5.4809
5.5514	-12.4587	-14.9242	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-75.0000	-8.0371	0	0
0.7166	10.3943	-14.2392	-75.0000	-74.9248	-75.0000	-75.0000	-4.7442	-1.0266	0
0	16.1745	8.7202	-11.2388	-53.4164	-53.1824	-53.0794	-31.4531	-5.1345	0.2617
0	4.8119	19.8916	51.2785	39.1482	0.1912	27.0795	-57.0738	-25.6126	-11.7220
0	0.2204	27.9162	54.2587	54.4427	64.1177	69.7828	8.4933	-29.0921	-19.1355
0	0	25.6138	47.3111	75.0000	75.0000	74.5337	75.0000	73.5509	-12.3387
0	0	25.7336	44.4300	75.0000	75.0000	75.0000	75.0000	62.0193	6.4625
0	0	17.7147	44.9121	75.0000	75.0000	75.0000	75.0000	75.0000	12.1759
0	0	14.6950	35.0000	35.0000	75.0000	75.0000	75.0000	74.9354	14.5760

รูปที่ 5 กฎที่ได้ระหว่างการดำเนินงานของระบบควบคุม

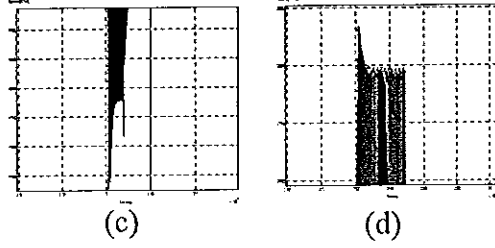
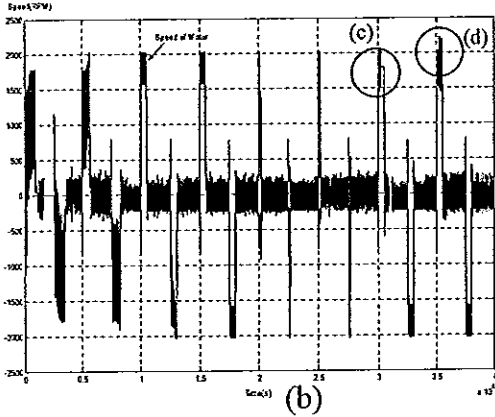
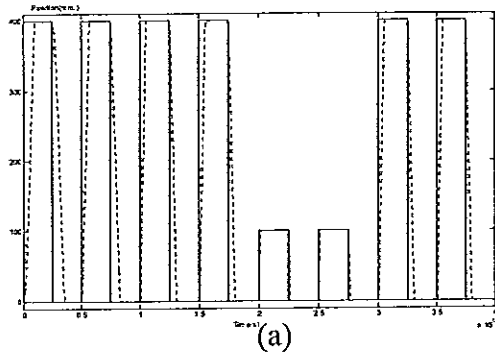
จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นค่าของกฎที่ทำการสร้างและ ปรับปรุงในระหว่างการควบคุม ซึ่งจะมี 2 ตัวควบคุมคือ พิกซ์ที่ควบคุม ตำแหน่ง และพิกซ์ที่ควบคุมความเร็ว ซึ่งมีความสัมพันธ์ของค่าตาม รูปที่ 2

5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองสรุปได้ว่า ระบบสามารถเรียนรู้, สร้างและ ปรับปรุงได้ด้วยตัวเองระบบสามารถที่จะปรับตัวเองได้เมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลง ซึ่งยังคงให้ผลการควบคุมตำแหน่งยังคงมีความแม่นยำ และเข้าสู่เป้าหมายในเวลาที่ไม่ใกล้เคียงหรือเท่ากับเวลา ในสภาวะ โหลด คงที่ค่าหนึ่ง ในสภาวะปกติสำหรับงานที่จะทำต่อไปคือการนำหลักการ ที่ได้ไปเขียนโปรแกรมควบคุมลงบอร์ดDSP เพื่อใช้ควบคุมในงานจริง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] โปรโมทย์ อริยาดิเรก, “การควบคุมตำแหน่งและความเร็วของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับเครื่องพิมพ์และตัดเหล็ก”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม คอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2547.
- [2] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich, “Fuzzy Control”, Addison Wesley Longman, Inc.
- [3] D.S. Reay, M.W. Dunnigan, “Learning issues in model reference based fuzzy control”, Control Theory and Applications IEEE, vol.144, pp. 605-611, 1997.
- [4] Jeffery R. Layne, Kevin M. Passino, “Fuzzy Model Reference Learning Control for Cargo Ship Steering”, Proceeding of the 1993 IEEE International Symposium, Aug 25-27, 1993.



รูปที่ 4 (a) ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ , (b) ความเร็วของ มอเตอร์ , (c) ความเร็วของมอเตอร์ขณะที่มีโหลด 2 N.m และ (d) ความเร็วของมอเตอร์ขณะที่มีแรงเสริมการหมุน 2 N.m

function control_4x4 = [

0.0976	0.0117	0	0	-69.0000	-69.0000	-69.0000	0	0	0	0
0	0	0	0	-2.3388	-68.0000	-69.0000	0	0	0	0
0	0	0	0	-1.7382	-59.9727	-59.9757	0	0	0	0
0	0	0	0	-1.5366	-46.0329	-45.1155	0	0	0	0
0	0	0	0	-59.0590	-59.9781	59.9811	0	0	0	0
0	0	0.0920	0.0334	-59.9879	-8.2469	69.0000	0	0	0	0
0.0013	-0.0135	0.1353	2.3921	-41.5961	69.0000	69.0000	0.3325	0	0	0
0.0013	0.0480	1.2150	0.1620	49.8262	45.5186	4.3120	0.0200	0	0	0
0.0495	0.1204	1.6264	16.7123	69.0000	69.0000	6.6979	1.7352	0	0	0
0.0311	1.3582	5.4151	32.4334	69.0000	69.0000	6.3447	1.5940	0	0	0
69.0000	69.0000	69.0000	69.0000	69.0000	69.0000	59.0333	41.4262	11.1613	0.0118	

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายพรเจริญ สวัสดิ์รักษา

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4512037

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ไฟฟ้ากำลัง)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้	2538

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนการศึกษา สำหรับพนักงาน บริษัท ทีโอที มหาชน จำกัด

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งวิศวกร 4 สังกัด ส่วนระบบบำรุงรักษากลางภูมิภาคที่ 4 บริษัท ทีโอที มหาชน จำกัด อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

พรเจริญ สวัสดิ์รักษา, ปราโมทย์ อริยาคิเรก และ ธเนศ เกียรพาพงศ์, “ระบบควบคุมเครื่องปั๊มและตัดเหล็กแบบปรับตัวเองได้”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 ระหว่างวันที่ 9-10 พฤศจิกายน 2549, เล่ม 2 หน้า 1061.