

การควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยระบบปรับด้วยตัวเองสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสสลับ

Self-Tuning Adaptive Control of Position and Speed for an AC Motor

วีรยุทธ พรสมิทธิกุล
Weerayut Pronsmithikun

๐

เลขที่	TJ223. 976 ๐64 ๒551 ๗	2
Lib. No.	311284	
	8 ก.ค. 2551	

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

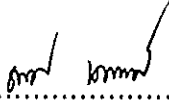
2551

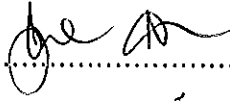
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยระบบปรับด้วยตัวเองสำหรับ
 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ
ผู้เขียน นายวีรยุทธ พรสมทิทธิกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

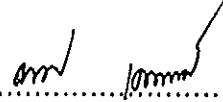
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


คณะกรรมการสอบ

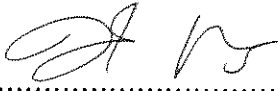

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ เคารพพงศ์)

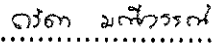

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม



.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ เคารพพงศ์)


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี กาญจนะเดชะ)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี กาญจนะเดชะ)


.....กรรมการ
(ดร.ธิดา มณีวรรณ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์


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

ชื่อวิทยานิพนธ์	การควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยระบบปรับด้วยตัวเองสำหรับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ
ผู้เขียน	นายวีรยุทธ พรสมิทธิกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2550

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมที่มีความสามารถในการปรับตัวเองได้ โดยใช้หลักการควบคุมแบบฟัซซี่ปรับตัวเองโดยการเรียนรู้ระบบในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อภาระมีการเปลี่ยนแปลง ตัวควบคุมตำแหน่งใช้การเคลื่อนที่แนวตรงออกแบบกฎที่ใช้ในการตัดสินใจของฟัซซี่ควบคุมตำแหน่ง ตัวควบคุมความเร็ว ประกอบด้วยส่วนเรียนรู้ระบบ โดยใช้หลักการถดถอยเส้นตรงเชิงเดียวหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ควบคุมและความเร็วของมอเตอร์ เพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวฟัซซี่ควบคุมความเร็ว และใช้หลักการถดถอยพหุคูณหาค่าความสัมพันธ์ของความถี่ควบคุม, กระแสที่สเตเตอร์ และความเร็วมอเตอร์ใหม่ในการปรับปรุงฟัซซี่ควบคุมความเร็ว ผลการทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 370 วัตต์ โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812 เป็นตัวควบคุมหลัก เมื่อภาระของมอเตอร์มีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 กิโลกรัม ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถเคลื่อนที่ได้ระยะสั้นสุดที่ 0.075 มิลลิเมตร ใช้เวลาเฉลี่ย 0.165 วินาที ระยะที่ตำแหน่งไกลสุดของชุดทดสอบ 360 มิลลิเมตร ใช้เวลาเฉลี่ย 8.063 วินาที เมื่อไม่มีภาระ และใช้เวลาเฉลี่ย 8.478 วินาที เมื่อมีภาระ 100 กิโลกรัม ค่าคลาดเคลื่อนของระบบอยู่ที่ ± 0.025 มิลลิเมตร

คำสำคัญ: ฟัซซี่ปรับตัวเองโดยการเรียนรู้ระบบ, การถดถอยเส้นตรงเชิงเดียว, การถดถอยพหุคูณ

Thesis Title Self-Tuning Adaptive Control of Position and Speed for an AC Motor
Author Mr.Weerayut Pronsmithikun
Major Program Computer Engineering
Academic Year 2007

Abstract

This thesis presents an implementation of the Model Identification Fuzzy Adaptive Controller for motor's position and speed control under varying load conditions. The position controller uses linear motion to create fuzzy rules. Linear regression is used to determine the initial fuzzy parameters of the speed controller. The linear regression is performed on the relation between the controller frequency and the motor speed parameters. During system adaptation, multiple regression is used to define the relation between the controller frequency, the stator current, and the motor speed parameters. The system is implemented on the TMS320F2812 digital signal processor and tested on a 370-watt induction motor under loads ranging from 0-100 kilograms. The system can move any loads to the minimum distance of 0.075 millimeters with the settling time of 0.165 seconds. The maximum travelling distance of 360 millimeters is the limit of our mechanic. The settling time for travelling to the maximum distance is 8.063 seconds under no load and 8.478 seconds under a 100-kilogram load. The steady state errors are ± 0.025 millimeters.

Keywords: Model Identification Fuzzy Adaptive Controller, simple linear regression, multiple regression.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ เคารพาทพงศ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และให้ความรู้ในด้านต่างๆ รวมถึงการให้การสนับสนุนในเรื่องอุปกรณ์ในการทำวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี กาญจนะเดชะ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และให้ความรู้ในด้านต่างๆ รวมถึงการให้การสนับสนุนในเรื่องอุปกรณ์ในการทำวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ลิ่มสกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.ถวิดา มณีวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ อาจารย์ปราโมทย์ อริยาดิเรก และ พรเจริญ สวัสดิ์รักษา ที่ได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ในเรื่อง ฟิชชี่ล่อจิกคอน โทรล และให้การช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาในระดับปริญญาโทตลอดระยะเวลา 2 ปีการศึกษา รวมทั้งขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้มอบทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

และสุดท้ายนี้ ขอน้อมรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ส่งเสริมให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในเรื่องต่างๆ จนกระทั่งข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการศึกษา

วีรยุทธ พรสมิทธิกุล

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(10)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(13)
คำอธิบายตัวแปร	(14)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 ภาพรวมของระบบ	4
2 ทฤษฎีและหลักการ	6
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	6
2.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	6
2.1.2 หลักการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	8
2.1.3 แบบจำลองพลศาสตร์ (Dynamic Model)	12
2.2 ตัวตรวจรู้ที่ใช้ในการวัดตำแหน่งและอัตราเร็วการหมุน	19
2.3 ทฤษฎีฟuzzyลอจิก	20
2.3.1 ทฤษฎีฟuzzyเซต	21
2.3.2 ฟuzzyเซต	22
2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	23
2.5 ตัวแปรทางภาษา	24
2.6 ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก.....	24
2.6.1 ฟuzzyฟิเคชัน	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 ฐานความรู้ฟัซซี่ลอจิก.....	25
2.6.3 กลไกอนุমান	26
2.6.4 คีฟัซซี่ฟัซซี่.....	28
2.7 การถดถอย (Regression).....	29
2.7.1 การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดี่ยว (Simple Linear Regression)	30
2.7.2 การถดถอยแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียล (Polynomial regression).....	33
2.8 ระบบควบคุมปรับเองได้ (Adaptive Control System)	35
2.8.1 Model Reference Adaptive Controllers (MRACs).....	36
2.8.2 Model Identification Adaptive Controllers (MIACs).....	37
3 การจำลองการทำงาน	39
3.1 การจำลองระบบการทำงาน	39
3.1.1 การทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของมอเตอร์โดยไม่มีตัวควบคุม	41
3.1.2 การประมาณค่าแบบการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดี่ยว.....	44
3.1.3 การประมาณค่าแบบการถดถอยพหุคูณ	45
3.1.4 ผังการทำงานส่วนควบคุมของระบบจำลองการทำงาน.....	46
3.2 ผลการจำลอง	48
4 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุม	54
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	54
4.2 การทำงานของระบบควบคุม	55
4.2.1 การควบคุมความเร็ว	56
4.2.2 การควบคุมตำแหน่ง.....	59
4.2.3 ผังงานการทำงานของระบบควบคุม.....	64
5 ผลการทดลองกับระบบจริงและการอภิปรายผลการทดลอง.....	67
5.1 การทดสอบความเร็วของมอเตอร์และผลควบคุมความเร็วของมอเตอร์.....	67
5.2 การทดสอบการควบคุมความเร็วและตำแหน่ง.....	71
5.2.1 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งแบบกำหนดตำแหน่งเป้าหมายคงที่.....	71
5.2.2 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งแบบต่อเนื่อง	88

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.3 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งแบบอื่นๆ	89
6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
6.1 สรุปผลการวิจัย	91
6.2 ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารอ้างอิง	94
ภาคผนวก ก	97
ภาคผนวก ข	120
ประวัติผู้เขียน	127

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
ตาราง 3-1 ตารางค่าทดสอบความเร็วมอเตอร์ (rpm) ที่ความถี่ (Hz) และแรงบิด (N.m) ต่างๆ	41
ตาราง 3-2 ตารางค่าทดสอบกระแสมอเตอร์ (A) ที่ความถี่ (Hz) และแรงบิด (N.m) ต่างๆ	42
ตาราง 4-1 ขอบเขตเชิงภาษาของอินพุตของ E_s ของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์	57
ตาราง 4-2 ค่าควอนไทซ์ของ CE_s ของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์	57
ตาราง 4-3 ค่าควอนไทซ์ของอินพุตของ E_p ของระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์	61
ตาราง 4-4 ค่าควอนไทซ์ของ CE_p ของระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์	61
ตาราง 4-5 ค่าเอาต์พุตทั้งหมดของทุกกรณีที่เกิดขึ้นในระบบควบคุม	62
ตาราง 4-6 ค่าความสัมพันธ์ของเอาต์พุตกับค่าความเร็วที่กำหนดให้กับมอเตอร์	63
ตาราง 5-1 ตารางความถี่ควบคุมสัญญาณดิจิทัล (f_{ctrl}) และความเร็วมอเตอร์ในหน่วย rpm.....	68
ตาราง 5-2 ตารางค่าความสัมพันธ์ที่หาจากการประมาณค่าถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว	68
ตาราง 5-3 ตารางเปรียบเทียบผลการควบคุมความเร็ว โดยการปรับเพียงครั้งเดียว จากจำนวนตัวอย่างที่ไม่เท่ากัน	69
ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ.....	72
ตาราง 5-5 ตารางผลการทดลองเชิงเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัย [12] และงานวิจัย [13]	83
ตาราง 5-6 ตารางแสดงค่า ระยะทางที่วัดได้ เวลาที่ใช้งานของค่าทดสอบการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง	88

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบ 1-1 ส่วนประกอบของระบบควบคุมความเร็วและตำแหน่ง.....	5
ภาพประกอบ 2-1 ภาพตัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกรงกระรอก [14].....	7
ภาพประกอบ 2-2 แสดงการควบคุมความเร็วด้วยการปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้า [15].....	10
ภาพประกอบ 2-3 แสดงคุณลักษณะของแรงบิดเมื่อค่าความต้านทานของโรเตอร์และสลิปเปลี่ยนแปลง[15].....	11
ภาพประกอบ 2-4 คุณลักษณะของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ เมื่อความถี่เปลี่ยนไป โดยแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดของมอเตอร์ กระแส ความถี่และค่าสลิป[15].....	12
ภาพประกอบ 2-5 แกน d เกิดสนามแม่เหล็กหลัก และแกน q เกิดสนามแม่เหล็กบน โรเตอร์[16] ..	12
ภาพประกอบ 2-6 การย้ายแกนของระบบไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่บนแกน d-q ในระบบแกนอ้างอิงคงที่ [16].....	13
ภาพประกอบ 2-7 การแปลงแรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง ไปอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (ω_e) [16]	15
ภาพประกอบ 2-8 วงจรสมมูลพลศาสตร์บนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิง โครนีส (ก) บนแกน q° (ข) บนแกน d°	16
ภาพประกอบ 2-9 แสดงพัลส์ที่ได้จากเอน โค้ดเดอร์แบบหมุนชนิดเพิ่มค่า	19
ภาพประกอบ 2-10 วิธีการตรวจจับทิศทางการหมุนของ โรตารีเอน โค้ดเดอร์	20
ภาพประกอบ 2-11 แสดงความเป็นสมาชิกของเซตคั้งเคิม (ก) กับ ฟัซซี่เซต (ข).....	21
ภาพประกอบ 2-12 พารามิเตอร์และรูปทรงของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม	23
ภาพประกอบ 2-13 ตัวแปรภาษากำหนดความเร็วของมอเตอร์	24
ภาพประกอบ 2-14 ระบบควบคุมโดยตัวควบคุมฟัซซี่.....	25
ภาพประกอบ 2-15 การอนุมาน โดยวิธีของแมมดานี.....	27
ภาพประกอบ 2-16 การถอดอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว.....	29
ภาพประกอบ 2-17 ตัวอย่างการปรับแต่งเส้นโค้งในลักษณะต่างๆ (ก) ผลรวมของค่าผิดพลาดน้อยสุด (ข) ผลรวมของค่าสมบูรณ์ของค่าผิดพลาดน้อยสุด (ค) ค่าน้อยสุดของค่าผิดพลาดที่มีค่าสูงที่สุด.....	32
ภาพประกอบ 2-18 เปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการถอดอย (ก) การถอดอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (ข) การถอดอยแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียล	34

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบ 2-19 การแบ่งรูปแบบระบบควบคุมปรับเอง [17].....	36
ภาพประกอบ 2-20 แสดงแผนผังบล็อกของระบบควบคุมแบบ MRACs.....	37
ภาพประกอบ 2-21 แสดงแผนผังบล็อกของระบบควบคุมแบบ MIACs.....	37
ภาพประกอบ 3-1 ภาพรวมของระบบจำลองการทำงาน	39
ภาพประกอบ 3-2 ระบบจำลอง MATLAB/SIMULINK ประกอบกันทุกส่วน	40
ภาพประกอบ 3-3 แบบจำลองทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของมอเตอร์.....	41
ภาพประกอบ 3-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วมอเตอร์ที่ภาระต่างๆ.....	43
ภาพประกอบ 3-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดือร์กับภาระมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ	43
ภาพประกอบ 3-6 ระบบจำลอง MATLAB/SIMULINK ส่วนตัวควบคุม	47
ภาพประกอบ 3-7 ผังการทำงานของตัวควบคุม	47
ภาพประกอบ 3-8 กราฟความสัมพันธ์แรงบิดภาระของมอเตอร์กับแกนเวลา.....	49
ภาพประกอบ 3-9 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วมอเตอร์และความเร็วมอเตอร์ที่ต้องการกับแกนเวลา	49
ภาพประกอบ 3-10 กราฟความสัมพันธ์ความถี่ควบคุมมอเตอร์กับแกนเวลา.....	49
ภาพประกอบ 3-11 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วของมอเตอร์กับแกนเวลาในช่วงทดสอบมอเตอร์	49
ภาพประกอบ 3-12 ผลการควบคุมในรอบที่ 1	50
ภาพประกอบ 3-13 ผลการควบคุมในรอบที่ 2	51
ภาพประกอบ 3-14 ผลการควบคุมในรอบที่ 3	52
ภาพประกอบ 4-1 การควบคุมความเร็วและตำแหน่ง โดยระบบปรับด้วยตัวเองสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับ.....	54
ภาพประกอบ 4-2 ระบบควบคุมความเร็วและตำแหน่ง	55
ภาพประกอบ 4-3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุต E_r	57
ภาพประกอบ 4-4 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเอาต์พุตฟuzzy ความเร็ว	58
ภาพประกอบ 4-5 การเปรียบเทียบเอาต์พุตการควบคุมความเร็วที่หาได้	59
ภาพประกอบ 4-6 กราฟการเปรียบเทียบความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ของฟuzzy ตำแหน่ง.....	60
ภาพประกอบ 4-7 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุต E_p	62

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบ 4-8 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุต CE_p	62
ภาพประกอบ 4-9 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเอาต์พุตพีซีซีตำแหน่ง	63
ภาพประกอบ 4-10 ผังงานส่วนโปรแกรมหลัก	65
ภาพประกอบ 4-11 ผังงานส่วนสัญญาณขัดจังหวะQEP (Interrupt QEP)	66
ภาพประกอบ 4-12 ผังงานสัญญาณขัดจังหวะรับข้อมูลช่องทางอนุกรม (Interrupt Serial Receiver)	66
ภาพประกอบ 5-1 เปรียบเทียบความถี่ของอินเวอร์เตอร์กับความถี่ควบคุมสัญญาณดิจิทัล(f_{test})....	67
ภาพประกอบ 5-2 การทดสอบความเร็วของมอเตอร์และผลการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ (ก) จำนวนตัวอย่าง 20 ค่ากระจายปรกติ (ข) จำนวนตัวอย่าง 10 ค่ากระจายปรกติ (ค) จำนวน ตัวอย่าง 10 ค่าสูง (ง) จำนวนตัวอย่าง 10 ค่าต่ำ (จ) จำนวนตัวอย่าง 5 ค่ากระจายปรกติ (ฉ) จำนวนตัวอย่าง 2 ค่าห่างกันมาก (ช) จำนวนตัวอย่าง 2 ค่าห่างกันน้อย.....	70
ภาพประกอบ 5-3 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่ระยะ 360.00 มิลลิเมตร	85
ภาพประกอบ 5-4 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่ระยะ 260.25 มิลลิเมตร	85
ภาพประกอบ 5-5 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่ระยะ 100.00 มิลลิเมตร	86
ภาพประกอบ 5-6 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่ระยะ 40.00 มิลลิเมตร	87
ภาพประกอบ 5-7 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่ระยะ 200.00 มิลลิเมตร	87
ภาพประกอบ 5-8 การทดลองระบบโดยใส่ภาระและไม่ใส่ภาระ ที่ความเร็ว 150 rpm และตำแหน่ง ที่ 187.50 มิลลิเมตร	89
ภาพประกอบ 5-9 การทดลองระบบโดยใส่ภาระและไม่ใส่ภาระ ที่ความเร็ว 250 rpm และตำแหน่ง ที่ 187.50 มิลลิเมตร	90

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

BCD	Binary Code Decoder
COA	Center of Area
DSP	Digital Signal Process
FMRLC	Fuzzy Model Reference Learning Control
GMP	Generalized Modus Ponens
GMT	Generalized Modus Tollens
MIACs	Model Identification Adaptive Controllers
MRACs	Model Reference Adaptive Controllers
MOM	Mean of Maximum
PWM	Pulse Width Modulation
QEP	Quadrature-Encoder Pulse
RAM	Random Access Memory
RMS	Root Mean Square
ROM	Read Only Memory
rpm	round per minute
STR	Self-Tuning Regulator

คำอธิบายตัวแปร

ω_r	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์
ω_{ref}	ความเร็วเชิงมุมอ้างอิง
ω_{max}	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์สูงสุด
V_m	แรงดันของมอเตอร์
m	ความชื้น
c	ค่าคงที่
T	ภาระของมอเตอร์
f	ความถี่
f_{max}	ความถี่สูงสุด
f_{test}	ความถี่ที่เป็นสัญญาณเคจิตอล
i_a	กระแสของมอเตอร์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) ศาสตร์ด้านการคำนวณ เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในงานควบคุมต่างๆ เนื่องจากความสามารถในการควบคุมที่ไม่จำเป็นต้องรู้แบบจำลองของระบบเหมือนระบบควบคุมแบบเดิม (PD, PI และ PID) ทำให้ลดความยุ่งยาก และเวลาการทำงานได้ แต่การออกแบบกฎของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก จะต้องอาศัยความรู้ และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ เพราะไม่มีกระบวนการเรียนรู้ในการปรับแต่งโครงสร้างซึ่งกฎ และตัวแปรต่าง ๆ ในตัวระบบเอง โครงสร้างของระบบควบคุมจะถูกกำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญในขอบเขตที่กำลังพิจารณาร่วมกับนักเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จึงมีความยุ่งยากมากขึ้นถ้าหาก ระบบมีความซับซ้อน จึงเกิดแนวคิดใหม่ในการพัฒนาตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ให้สามารถเรียนรู้ ระบบและปรับกฎการควบคุมได้ด้วยตัวเอง ซึ่งก็มีวิธีการหลายวิธี เช่น การใช้วิธีโครงข่ายเซลล์ประสาท (Neural Network), การใช้วิธีเจเนติก (Genetic Algorithm), การใช้หลักการควบคุมแบบ ฟัซซี่โดยการเรียนรู้จาก โมเดลอ้างอิง (Fuzzy Model Reference Learning Control) (FMRLC), การหาโมเดลจากตัวแปรทดสอบ (Model Identification Fuzzy Adaptive Controller with Regression) และวิธีอื่นๆ

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแต่ละตัว ถ้าจะหาแบบจำลองที่แน่นอนจะยุ่งยากและเสียเวลามาก จึงเกิดงานวิจัยนี้ขึ้น โดยเลือกใช้การควบคุมแบบปรับด้วยตัวเอง (Self-Tuning Regulator) โดยวิธีการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ควบคุม กระแสที่สเตเตอร์ และความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแต่ละตัว ด้วยหลักการถดถอย (Regression) นำค่าความสัมพันธ์ที่ได้มาสร้างและปรับกฎการควบคุมของฟัซซี่ลอจิกให้สามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแต่ละตัวได้ สำหรับในงานวิจัยนี้นั้นจะนำมาควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

1.2 การตรวจเอกสาร

จากแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK [1]- [8] ที่ได้ศึกษามา จึงเลือกใช้แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นสถานะชั่วคราวที่ใช้แบบจำลองไดนามิก d-q ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทำตามแบบจำลองของ Krause [8]

วรชาติ แซ่ก๊ก และพิชิต ถ้ายอง ได้นำเสนอการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยอาศัยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์ [9] โดยค่าแรงบิดของมอเตอร์สามารถคำนวณได้จากข้อมูลความเร็วของมอเตอร์ในขณะที่มอเตอร์เร่งความเร็วจากจุดหยุดนิ่งจนกระทั่งความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส เทคนิคที่ใช้เพิ่มช่วงเวลาในการเร่งความเร็วเพื่อลดผลกระทบจากทรานเซียนต์ทางไฟฟ้าที่จะมีผลต่อข้อมูลความเร็วโดยการคับปลิ่งล้อย่อยแรงเข้ากับเพลลาของมอเตอร์เพื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยให้แก่โรเตอร์ ในการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำต่างขนาดกันสามารถให้คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบได้อย่างเหมาะสม

ธีรเดช พิญญพงษ์, สืบสรวง กษาภรณ์กุล, ถนัด เหลืองนฤทัย, และกนกเวทย์ ตั้งพิมพ์รัตน์ ได้เสนอการออกแบบชุดควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ ชนิดลูปควบคุมกระแสภายใน โดยใช้ DSP [10] โดยมีเป้าหมายที่จะให้ทั้งวงจรการควบคุมกระแสและวงจรการคำนวณการทำงานแบบเวกเตอร์ ซึ่งรวบรวมการควบคุมความเร็วด้วย สามารถสร้างได้ด้วยวงจรดิจิทัลทั้งหมด โดยใช้ DSP เบอร์ TMS320C240 มาพัฒนาเป็นต้นแบบและได้ทำการทดลองกับมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า โดยบอร์ด DSP มีหน้าที่รับคำสั่งและแสดงผล, การอ่านความเร็วและกระแสจากตัวตรวจวัด, การคำนวณตามแบบของเวกเตอร์และลูปควบคุมความเร็ว, การคำนวณลูปควบคุมกระแสที่อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ รวมถึงการคำนวณหาสัญญาณขับเคลื่อน PWM ด้วยวิธี Space Vector แล้วส่งสัญญาณ PWM ให้กับวงจรภาคกำลังโดยตรง

ณัฐภัทร พันธุ์คง, อุดมศักดิ์ ยั่งยืน, และวีระพล โมนยะกุล ได้เสนอการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแรงบิดโดยตรงที่ไร้ตัววัดความเร็ว โดยใช้ตัวอินทิเกรตที่ปรับตัวได้ [11] มาใช้ประมาณค่าเส้นแรงแม่เหล็กของสเตเตอร์สำหรับการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ไร้ตัววัดความเร็ว โดยใช้แก้ปัญหาการขยับเลื่อน (Drift) และอิ่มตัว (Saturation) ของสัญญาณที่เกิดจากตัวอินทิเกรตเพียงอย่างเดียว (Pure Integrator) ด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านลำดับหนึ่ง เพื่อเป็นตัวชดเชยขนาดและมุมเฟสของเส้นแรงแม่เหล็กของสเตเตอร์ให้ถูกต้องสำหรับย่านความเร็วที่กว้างของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทดสอบโดยโปรแกรมจำลอง MATLAB/SIMULINK จะเห็นว่าปัญหาข้างต้นลดลง

ปราโมทย์ อริยาคิเรก ได้เสนอการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแส สลับสำหรับเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก [12] โดยใช้ตัวควบคุมพีชชีลอจิก เพื่อใช้ในการควบคุม ตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้ในเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก โดยมอเตอร์ ซึ่งเป็นตัวต้นกำลังของเครื่องปั๊มและตัดเหล็กนั้น สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นระยะทางสูงสุด 360 มิลลิเมตร ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นได้ทำการทดสอบการควบคุมผ่านระบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อศึกษาการออกแบบและปรับแต่งตัวควบคุมพีชชีลอจิก ทำให้สะดวกในการสร้างออกแบบตัวควบคุมของระบบจริงมากขึ้น และนำระบบจำลองมาสร้าง ระบบควบคุมที่สามารถใช้งานได้จริง เป็นการทำงานบนไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 8051 ซึ่งจะ ทำการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

พรเจริญ สวัสดิ์รักษา ได้เสนอระบบควบคุมเครื่องปั๊มและตัดเหล็กแบบปรับตัวเองได้ [13] โดยประยุกต์หลักการควบคุม แบบพีชชีโดยการเรียนรู้จากโมเดลอ้างอิง (Fuzzy Model Reference Learning Control) (FMRLC) มาควบคุมตำแหน่งและความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งเป็นตัวขับในเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก เพื่อป้องกันแผ่นเหล็กเข้าเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก ซึ่งระบบที่ ออกแบบนั้นสามารถเรียนรู้, สร้าง และปรับกฎการควบคุมได้ด้วยตัวเอง การควบคุมจริงได้ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เบอร์ TMS320F2812 เป็นตัวควบคุม ในการทดสอบการปรับความเร็ว อัตโนมัตินี้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระ

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ภายใต้สภาวะ ที่ภาระมีการเปลี่ยนแปลง
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการควบคุมแบบปรับเองได้ (Self-Tuning Adaptive Control) สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ให้มีประสิทธิภาพ โดยระบบจะต้องเข้าสู่เป้าหมายเร็ว และมีความแม่นยำสูง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะนำเสนอ การควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยระบบปรับด้วยตัวเอง สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ระบบควบคุมทั้งหมดเป็นซอฟต์แวร์ที่ประมวลผลโดยไมโคร โพรเซสเซอร์ โดยทำการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ ด้วยระบบควบคุมแบบปรับเอง

ได้ (Self-Tuning Adaptive Control System) เพื่อให้สามารถหมุนด้วยความเร็วรอบที่คงที่ได้ขณะ ภาระเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะทำให้การควบคุมเป็นไปได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ นอกจากนี้ชุดควบคุม จะต้องมีเสถียรภาพการทำงานตามที่ต้องการ โดยระบบจะต้องเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็วและ แม่นยำ

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
2. ศึกษาทฤษฎีการควบคุมดิจิทัล และเลือกวิธีการควบคุมที่มีความเหมาะสมในการ ควบคุมระบบ
3. ทำการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการสร้างตัวควบคุม
4. ออกแบบตัวควบคุมที่ใช้กับระบบ
5. จำลองการทำงานของระบบควบคุม เมื่อใส่ตัวควบคุมและไม่ใส่ตัวควบคุม โดยใช้ โปรแกรม MATLAB ทดสอบการทำงานของแบบจำลอง
6. ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และ ทดสอบการทำงาน
7. นำผลที่ทดสอบได้มาวิเคราะห์และประเมินผลจากการทดสอบ
8. จัดทำเอกสารฉบับสมบูรณ์สำหรับการวิจัย

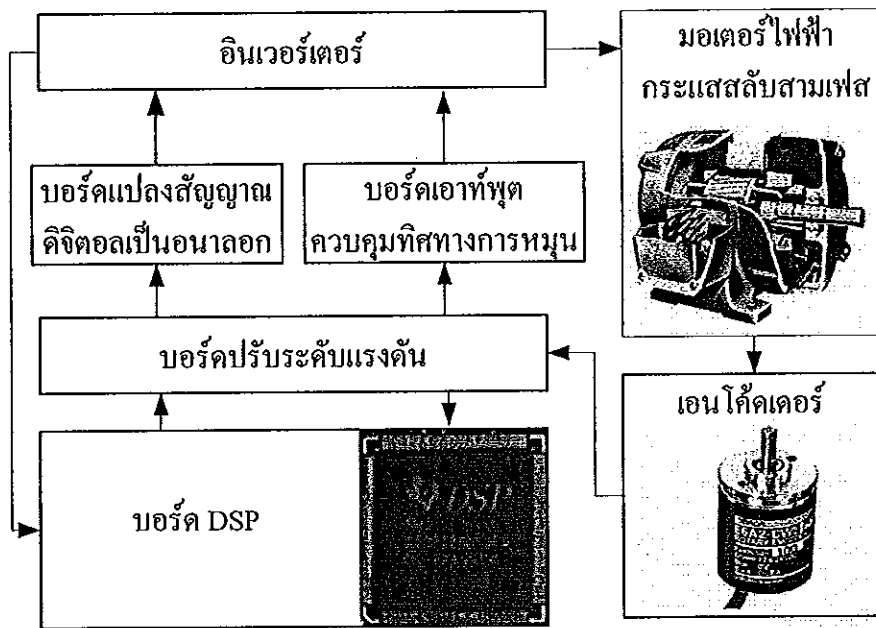
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ค้นแบบชุดควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่สามารถ นำไปใช้สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมได้
2. เสริมสร้างและพัฒนาความรู้ความเข้าใจในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และ นำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่น ๆ รวมถึงสามารถถ่ายทอดความรู้เหล่านี้ต่อไปได้

1.7 ภาพรวมของระบบ

การควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยระบบปรับด้วยตัวเองสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับ ส่วนประกอบต่างๆ ดังภาพประกอบ 1-1 โดยการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของ

มอเตอร์เหนี่ยวนำให้คงที่แบบปรับเองได้ในขณะที่ภาระของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ใช้วิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียวในช่วงแรก หากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ควบคุมและความเร็วมอเตอร์ที่เหมาะสมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวนั้น เพราะเป็นวิธีที่สะดวกและเสียเวลาในการเข้าสู่ระบบน้อย และหลังจากนั้นใช้วิธีการถดถอยแบบพหุคูณ เพื่อให้ส่วนควบคุมสามารถปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เข้าสู่ความเร็วอ้างอิงได้เร็วขึ้น ซึ่งระบบควบคุมปรับเองได้จะทำการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุดเพื่อหาตัวแปรในการควบคุมให้มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด



ภาพประกอบ 1-1 ส่วนประกอบของระบบควบคุมความเร็วและตำแหน่ง

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

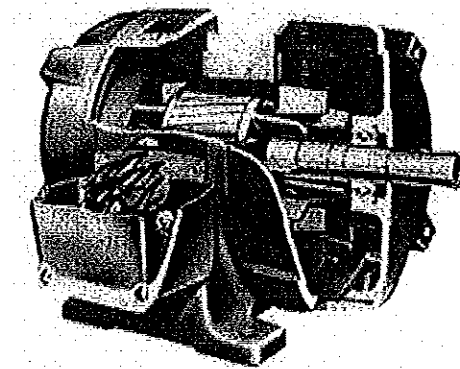
ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ โดยเนื้อหา กล่าวถึง หลักการต่างๆ ไปของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และแบบจำลองของมอเตอร์ สำหรับการนำไปทำเป็นระบบทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ตัวตรวจรู้ที่ใช้ในการ วัดตำแหน่งและอัตราเร็วการหมุน ทฤษฎีฟิซซีลोजิก การถดถอย (Regression) กล่าวถึงการถดถอย ที่ใช้สำหรับการประมาณค่า และสุดท้ายคือ ระบบควบคุมปรับเองได้ (Adaptive Control System)

2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันทั่วไป มีข้อดี คือ ไม่มีแปรง ถ่านทำให้สูญเสียเนื่องจากความเสียดสีมีค่าน้อย มีตัวประกอบกำลังสูง เริ่มหมุนได้ง่าย การบำรุงรักษา น้อย โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก ทนทาน ราคาถูก สร้างง่าย ไม่เสียหายง่ายและมีประสิทธิภาพสูง มีข้อเสียอยู่บ้าง คือ การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ทำได้ยากเนื่องจากความเร็วรอบจะแปรผัน กับภาระ แรงบิดเริ่มหมุนค่อนข้างต่ำกว่าแรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซันต์ ปัจจุบันได้มีการพัฒนามอเตอร์ชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจนเป็นที่ยอมรับกันในอุตสาหกรรม ทั่วไป

2.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ดังภาพประกอบ 2-1 ประกอบด้วย ขดลวดสเตเตอร์ โดยการกระตุ้นขดลวดทำได้โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่ตัวมัน และ สำหรับโรเตอร์ของมอเตอร์ชนิดนี้แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (squirrel-cage type) และ โรเตอร์แบบขดลวดพัน (wound rotor type) ภายในตัวโรเตอร์จะฝังตัวนำซึ่งอาจทำจาก แท่งทองแดงหรืออลูมิเนียมตัน (Solid aluminum or copper bar) โดยกระแสโรเตอร์เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำ



ภาพประกอบ 2-1 ภาพตัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกรงกระรอก [14]

2.1.1.1 สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันและทำเป็นช่องสล็อตไว้บรรจุขดลวด ความเร็วรอบของมอเตอร์จะแปรผันตรงตามจำนวนขั้วแม่เหล็ก เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กคงตัวค่าหนึ่ง ซึ่งหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ω_s (โดยที่ $\omega_s = \frac{120f}{P}$) สนามแม่เหล็กหมุนจะเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในตัวหมุน โดยเป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำ

2.1.1.2 โรเตอร์ (Rotor)

โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบ่งออกเป็น 2 แบบ

(1) โรเตอร์แบบขดลวด หรือเฟสขดลวด (wound rotor or phase wound rotor) เรียกมอเตอร์ชนิดนี้ว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสขดลวด หรือสลีปรिंगมอเตอร์ พบมากในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส การพันขดลวดจะเป็นแบบสองชั้นเหมือนกับขดลวดที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ภายในตัวหมุนจะถูกต่อแบบสตาร์ มีปลายออกมา 3 เส้น ต่อเข้ากับสลีปรिंगที่ติดกับเพลลาของตัวหมุน เราสามารถนำความต้านทานที่ต่อแบบสตาร์มาต่อเข้ากับสลีปรिंगที่ต่อจากขดลวดในตัวหมุนแบบขดลวดเพื่อเพิ่มแรงบิดเริ่มหมุน เมื่อมอเตอร์หมุนเข้าสู่ความเร็วปรกติ สลีปรึงจะถูกตัดวงจร ทำให้ตัวหมุนทำงานแบบกรงกระรอก

(2) ตัวหมุนแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) มอเตอร์ที่ใช้ตัวหมุนชนิดนี้เรียกว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก มีประมาณ 90% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทั้งนี้เนื่องจากทำได้ง่ายและทนทาน โดยประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอก และถูกทำให้

เป็นช่องสล็อตขนานกันเพื่อบรรจุตัวนำของตัวหมุน ลงในสล็อตนั้น ตัวนำที่ฝังจะเป็นแท่งทองแดง อะลูมิเนียม หรืออัลลอย โดยในหนึ่งสล็อตจะบรรจุตัวนำเพียง 1 แท่งเท่านั้น ปลายสุดของแท่งตัวนำ ทั้ง 2 ด้าน จะถูกัดดวงจรเข้าด้วยกัน จึงไม่สามารถที่จะนำความต้านทานจากภายนอกมาต่ออนุกรม เข้ากับวงจรตัวหมุนเพื่อช่วยการเริ่มหมุนได้ สล็อตของตัวหมุนจะวางให้มีลักษณะที่ไม่ขนานเพลลา โดยเฉียงเล็กน้อย เพื่อช่วยให้มอเตอร์หมุนได้เร็ว ด้วยการลดการฮัมของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic hum) และช่วยในการลดการเกิดการถลอกของตัวหมุนอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ที่พื้น ของสเตเตอร์ กับ โรเตอร์ ส่วนโรเตอร์แบบอื่นๆ ก็มีลักษณะคล้ายกันกับตัวหมุนแบบกรงกระรอก โดยประกอบด้วยแท่งเหล็กทรงกระบอกตัน มอเตอร์จะหมุนได้ขึ้นอยู่กับผลของการเกิดกระแส ไหลวนในแท่งเหล็กของโรเตอร์

2.1.2 หลักการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

จากความสำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ได้กล่าวมาการควบคุมความเร็วของมอเตอร์จึงมีความจำเป็น ซึ่งถือได้ว่าเป็นตัวขับเคลื่อนที่สำคัญและมีบทบาทอย่างมากในแวดวงอุตสาหกรรม ดังนั้นพื้นฐานการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จึงถือว่าเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับผู้ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมและดูแลบำรุงรักษาเครื่องจักรกลในระบบอุตสาหกรรม เมื่อนึกถึงวิธีการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ส่วนใหญ่จะนึกถึงสมการความเร็ว สนามแม่เหล็กหมุน หรือความเร็วซิงโครนัส

หลักการควบคุมความเร็ว คือ ต้องควบคุมความเร็วซิงโครนัสให้ได้จึงจะสามารถควบคุมความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังสมการ

$$\omega_s = \frac{120f}{P} \quad (2-1)$$

$$\omega_r = \frac{(1-S)120f}{P} \quad (2-2)$$

โดย ω_s คือ ความเร็วซิงโครนัส
 ω_r คือ ความเร็วของโรเตอร์
 f คือ ความถี่ของคลื่นไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป
 P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก
 S คือ ค่าสลิป

จากสมการข้างต้น หากพิจารณาที่ความเร็วโรเตอร์ (Rotor speed) ซึ่งเป็นความเร็วจริงที่ขับโหลด จะพบว่า การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถกระทำได้ 3 วิธีดังนี้

2.1.2.1 การเปลี่ยนแปลงขั้วแม่เหล็ก (Pole Number Changing)

โดยทั่วไปหากกล่าวถึงมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาตรฐานเราจะนึกถึงมอเตอร์ชนิดที่มี 4 ขั้วแม่เหล็ก การจะเปลี่ยนแปลงความเร็วโดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็กให้เพิ่มขึ้นหรือว่าลดลงนั้นถือว่ากระทำได้ยากหรือทำไม่ได้เลย นอกเสียจากต้องพันขดลวดใหม่ ดังนั้น การจะควบคุมความเร็ว โดยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กจะกระทำได้อีกก็ต่อเมื่อมอเตอร์มีการใช้มอเตอร์ที่ออกแบบมาพิเศษ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็กได้ เช่น มอเตอร์แบบ Dahlander หรือ two separated winding เป็นต้น

การเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยวิธีนี้ไม่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความเร็วรอบสม่ำเสมอ เนื่องจากการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กในแต่ละครั้งจะทำให้จำนวนรอบมอเตอร์เพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นขั้น เช่น ถ้าเปลี่ยนจาก 4 ขั้วแม่เหล็ก (4 Pole 50 Hz) ไปเป็น 2 ขั้วแม่เหล็กจะทำให้ความเร็วเชิง โครนัสเพิ่มขึ้นจาก 1500 รอบต่อนาทีไปเป็น 3000 รอบต่อนาที ซึ่งจะทำให้เกิดการกระชากหรือเกิดการกระตุก ดังนั้นหากมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในขณะที่ขับโหลดอยู่ก็ทำให้เกิดการเสียหายได้ทั้งที่ตัวมอเตอร์และที่ตัวเครื่องจักรนั้นๆ นอกจากนั้นมอเตอร์ยังมีราคาสูงกว่ามอเตอร์มาตรฐานทั่วไปอีกด้วย

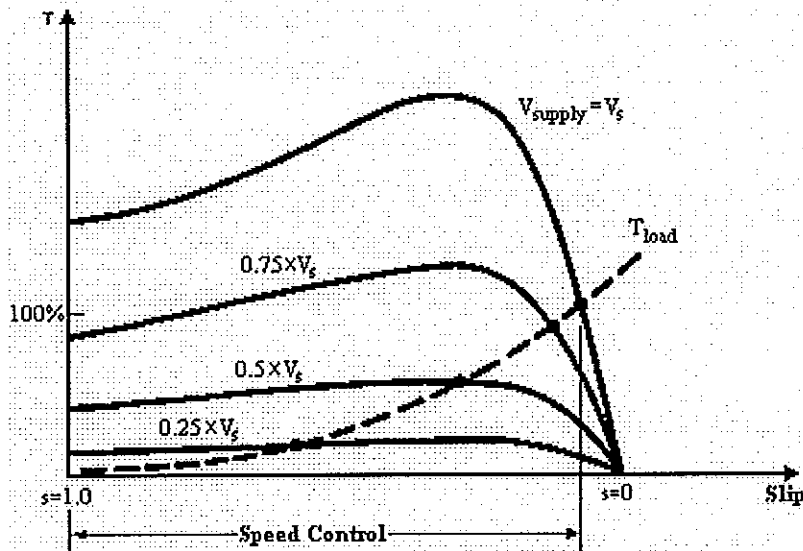
2.1.2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าสลิป (Slip Control)

การควบคุมความเร็วรอบโดยการเปลี่ยนแปลงสลิปนั้นสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์ และปรับแต่งที่ตัวโรเตอร์ (กรณี สลิป-ริงมอเตอร์)

2.1.2.2.1 เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์ (Change of the stator voltage)

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยทั่วไปหากต่อกับแหล่งจ่ายที่มีแรงดันและความถี่คงที่ มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วค่อนข้างคงที่ (มีสลิปประมาณ 3-5% ของความเร็วเชิง โครนัส) โดยแรงบิดจะขึ้นกับระดับแรงดัน แต่ถ้าทำการลดระดับแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะทำให้แรงบิดและ สลิป (S) เปลี่ยนแปลง โดยแรงบิดจะแปรผันตามแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง ($T \propto U^2$)

ตัวอย่างเช่น เมื่อลดแรงดันลง 10% จะส่งผลให้แรงบิดลดลง 19% ดังภาพประกอบ 2-2 (ความเร็วรอบลดลง ส่วนสลลิปจะเพิ่มขึ้น)



ภาพประกอบ 2-2 แสดงการควบคุมความเร็วด้วยการปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้า [15]

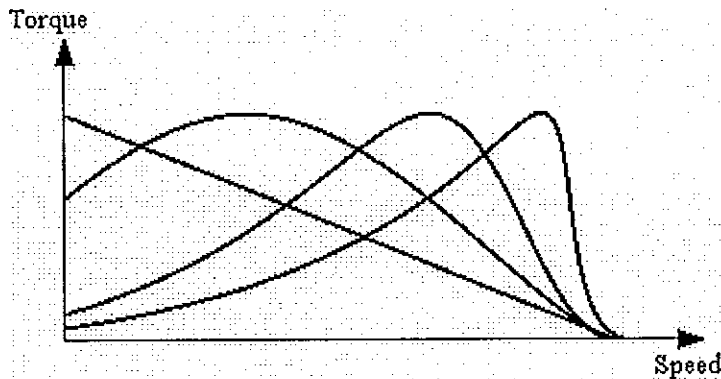
การควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีนี้จะไม่ค่อยนิยมใช้ในอุตสาหกรรมมากนัก เนื่องจากสลลิปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบน้อย จะเหมาะสำหรับโหลดประเภทปั๊มแรงเหวี่ยง (Centrifugal Pump) พัดลม (Fan) หรือโบลเวอร์ (Blower) เป็นต้น นอกจากนี้ผลของสลลิปยังทำให้เกิดการสูญเสียในขดลวดความต้านทานสูงและประสิทธิภาพมอเตอร์ต่ำในขณะที่ความเร็วรอบต่ำ

2.1.2.2.2 ปรับแต่งที่ตัวโรเตอร์ (Rotor control)

การเปลี่ยนแปลงในโรเตอร์สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มค่าความต้านทานให้กับวงจรโรเตอร์ (Change of rotor resistors) และ ต่อวงจรโรเตอร์คาสเคด (Cascade Couplings) เข้ากับเครื่องจักรกลไฟฟ้าตัวอื่นหรือวงจรเรียงกระแส (rectifier circuits)

- การเพิ่มค่าความต้านทานให้กับวงจรโรเตอร์ (Change of rotor resistors)

วิธีการเปลี่ยนค่าความต้านทานที่โรเตอร์ กระทำได้โดยการต่อตัวความต้านทานผ่านสลลิปริง เข้ากับขดลวดในโรเตอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียในโรเตอร์เพิ่มขึ้น, สลิปเพิ่มขึ้น (ความเร็วมอเตอร์ลดลง) และให้แรงบิดมอเตอร์เปลี่ยนแปลง ดังภาพประกอบ 2-3



ภาพประกอบ 2-3 แสดงคุณลักษณะของแรงบิดเมื่อค่าความต้านทานของโรเตอร์และสลลิปเปลี่ยนแปลง[15]

จากภาพประกอบ 2-3 จะเห็นว่าค่าแรงบิดสูงสุดยังอยู่ตำแหน่งเดิม ส่วนความเร็วรอบ (Speed) จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความต้านทานที่ต่อผ่านสลลิปจริงเข้าไปยังวงจรรโรเตอร์

- วงจรรโรเตอร์คาสเคด (Cascade Couplings)

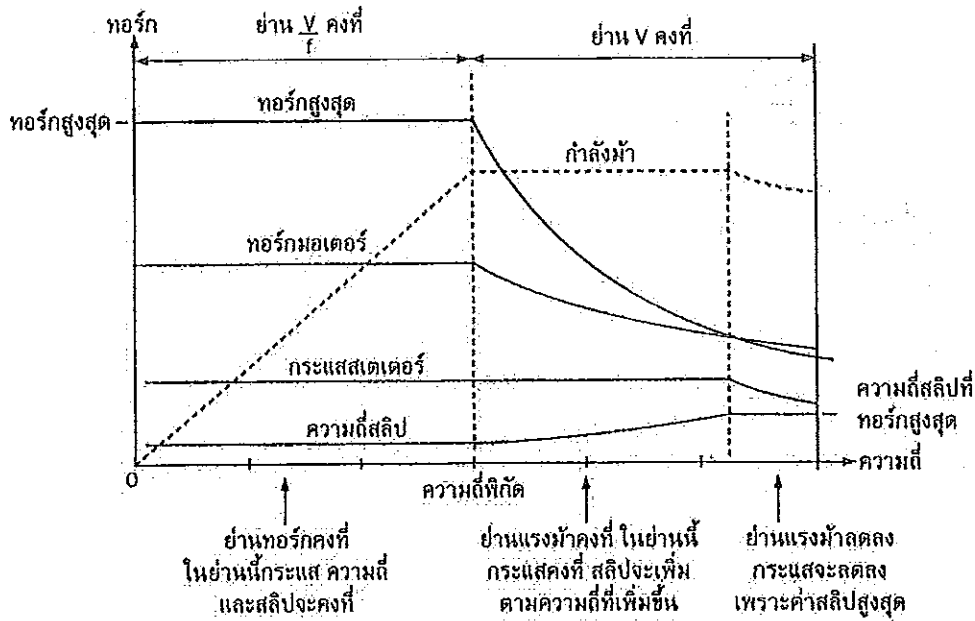
วิธีนี้วงจรรโรเตอร์จะต่อผ่านเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงหรือวงจรควบคุมการเรียงกระแสตรง (Controlled rectifier circuits) แทนที่การต่อเข้ากับค่าความต้านทาน (Ohmic resistance)

2.1.2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่จากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Frequency regulation)

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยการควบคุมความถี่ที่รับค่าได้นั้น เป็นวิธีที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง เพราะว่าย่านของการควบคุมความเร็วกว้างมากกว่าวิธีอื่น ๆ การปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับ 3 เฟส ที่ป้อนให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์ มี 2 วิธี

- วิธีควบคุมโดยตรงโดยใช้วงจรรไซโคลคอนเวอร์เตอร์
- วิธีควบคุมโดยการเชื่อมโยงโดยใช้อินเวอร์เตอร์

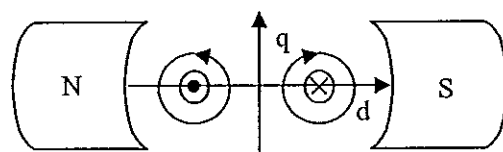
คุณลักษณะของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เมื่อความถี่เปลี่ยนไป ได้แสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดของมอเตอร์ กระแส ความถี่และค่าสลลิป ใ้ดังภาพประกอบ 2-4



ภาพประกอบ 2-4 คุณลักษณะของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ เมื่อความถี่เปลี่ยนไป โดยแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดของมอเตอร์ กระแส ความถี่และค่าสลิป[15]

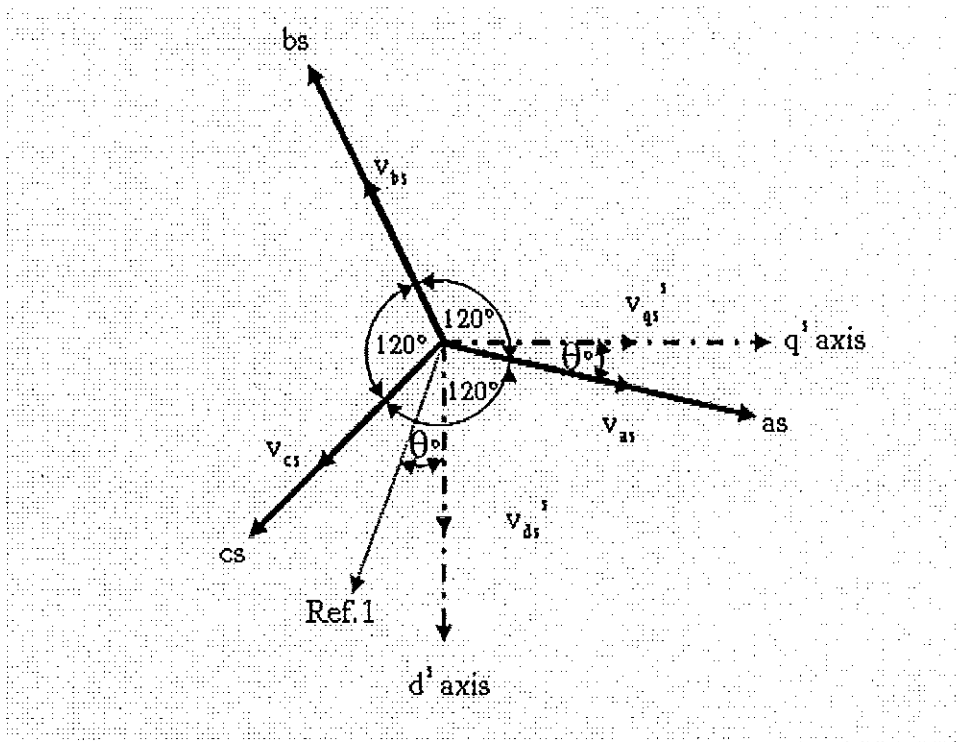
2.1.3 แบบจำลองพลศาสตร์ (Dynamic Model)

ถ้าสังเกตกราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมให้แรงดันต่อความถี่ (V/f) คงที่ กับกราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแล้ว จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวของมอเตอร์ทั้งสองชนิดมีลักษณะเหมือนกัน แต่การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงจะง่ายกว่ามากๆ ในขณะที่การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับค่อนข้างสลับซับซ้อน ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะมองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นมอเตอร์กระแสตรงเพื่อง่ายต่อการควบคุม วิธีดังกล่าวสามารถทำได้โดยการโอนย้ายตัวแปรต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้มาอยู่บนแกน d-q ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแสดงไว้ดังภาพประกอบ 2-5



ภาพประกอบ 2-5 แกน d เกิดสนามแม่เหล็กหลัก และแกน q เกิดสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์[16]

โดยที่แกน d-q นี้ยังสามารถที่จะพิจารณาให้เป็นแกนที่อยู่กับที่หรือเป็นแกนที่หมุนได้ด้วยความเร็วเชิงมุม (ω_e) ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการที่จะพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้อยู่ในรูปสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ยึดนิ่งอยู่กับที่ โดยการย้ายแกนได้แสดงไว้ดังภาพประกอบ 2-6 เป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันที่จ่ายให้ สเตเตอร์ as, bs และ cs กับแกน d' และ q' ซึ่งจะทำการย้ายแกนของแรงดัน 3 เฟสเข้าหาสำหรับสัญลักษณ์ของเฟส a, b, c และแกน d, q นั้น จะใช้สัญลักษณ์ s ตัวต่างเพื่อบอกว่าเฟสเซอร์และแกนที่อ้างอิงอยู่บนสเตเตอร์ ส่วน s ตัวบนแทนแกนอ้างอิงที่อยู่นิ่ง (stationary axis) มุม θ เป็นมุมระหว่างเฟส a และแกน q' ซึ่งจะมีค่าเป็นเท่าใดก็ได้ เริ่มการพิจารณา ดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 2-6 การย้ายแกนของระบบไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่บนแกน d-q ในระบบแกนอ้างอิงคงที่ [16]

- พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน v_{ds}^s และ v_{qs}^s บนแกน as องค์ประกอบของ v_{qs}^s บนแกน as คือ $v_{qs}^s \cos(\theta)$ และองค์ประกอบของ v_{ds}^s บนแกน as คือ $v_{ds}^s \sin(\theta)$ ทั้งนี้อ้างอิงมุม θ กับแกน Ref.1 ซึ่งตั้งฉากกับ as ทำให้แกน Ref.1 ทำมุม θ กับแกน d' ด้วย
- พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน v_{ds}^s และ v_{qs}^s บนแกน bs องค์ประกอบของ v_{qs}^s บนแกน bs คือ $v_{qs}^s \cos(\theta - 120)$ และองค์ประกอบของ v_{ds}^s บนแกน bs คือ $v_{ds}^s \sin(\theta - 120)$

- พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน v_{ds}^s และ v_{qs}^s บนแกน cs องค์ประกอบของ v_{qs}^s บนแกน cs คือ $v_{qs}^s \cos(\theta + 120)$ และองค์ประกอบของ v_{ds}^s บนแกน cs คือ $v_{ds}^s \sin(\theta + 120)$

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

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - 120) & \sin(\theta - 120) & 1 \\ \cos(\theta + 120) & \sin(\theta + 120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \\ v_{os}^s \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

โดย v_{os}^s คือ องค์ประกอบของแรงดันลำดับศูนย์ (Zero-sequence component)

v_{os}^s ในภาวะที่เฟสทั้งสามเกิดสมดุล แรงดันลำดับศูนย์จะไม่ปรากฏ แต่ที่ต้องเขียนไว้เนื่องจากทางด้านซ้ายมือของสมการมีสมาชิกอยู่ 3 ตัว ดังนั้นในพจน์ของไฟฟ้ากระแสตรง จึงต้องมีสมาชิกอยู่ 3 ตัวด้วย แต่ส่วนที่เป็นแรงดันลำดับศูนย์นี้ เมื่อไปปรากฏเป็นส่วนหนึ่งในสมการของ v_{as} , v_{bs} และ v_{cs} เฟสเซอร์หนึ่งหน่วยของแรงดันลำดับศูนย์ที่แฝงอยู่ในเฟสทั้งสามนี้ ก็จะเกิดสมดุลและหักล้างกัน ไปเอง

จากสมการ (2-3) ทำอินเวอร์สเมตริกซ์ จะได้

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \\ v_{os}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 120) & \sin(\theta + 120) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

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

$$v_{as} = v_{qs}^s \quad (2-5)$$

$$v_{bs} = -\frac{1}{2}v_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s \quad (2-6)$$

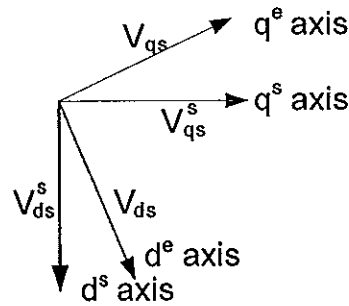
$$v_{cs} = -\frac{1}{2}v_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s \quad (2-7)$$

และจากสมการที่ได้ทำอินเวอร์สเมตริกซ์ จะได้

$$v_{qs}^s = \frac{2}{3}v_{as} - \frac{1}{3}v_{bs} - \frac{1}{3}v_{cs} = v_{as} \quad (2-8)$$

$$v_{ds}^s = -\frac{1}{\sqrt{3}}v_{bs} + \frac{1}{\sqrt{3}}v_{cs} \quad (2-9)$$

แรงดันบนแกนอ้างอิงพิกัดนี้ สามารถแปลงไปอยู่บนแกนอ้างอิงซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (ω_e) ได้โดยใช้ภาพประกอบ 2-7 ช่วย



ภาพประกอบ 2-7 การแปลงแรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่งไปอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (ω_e) [16]

เพื่อให้่ายต่อการเขียน เราจะเขียน v_{ds} และ v_{qs} ซึ่งอยู่บนแกน d^s และ q^s โดยละเว้นการเขียนตัวห้อย e ไว้ข้างบน จากภาพประกอบ 2-7 จะได้ว่า

$$v_{qs} = v_{qs}^s \cos \omega_e t - v_{ds}^s \sin \omega_e t \quad (2-10)$$

$$v_{ds} = v_{qs}^s \sin \omega_e t + v_{ds}^s \cos \omega_e t \quad (2-11)$$

และสามารถแปลงแกนเคลื่อนที่ให้มีอยู่บนแกนหยุดนิ่งได้ดังนี้

$$v_{qs}^s = v_{qs} \cos \omega_e t + v_{ds} \sin \omega_e t \quad (2-12)$$

$$v_{ds}^s = -v_{qs} \sin \omega_e t + v_{ds} \cos \omega_e t \quad (2-13)$$

เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนมากขึ้น ให้พิจารณาตัวอย่างดังต่อไปนี้

$$v_{as} = V_{sm} \cos \omega_e t \quad (2-14)$$

$$v_{bs} = V_{sm} \cos(\omega_e t - 120) \quad (2-15)$$

$$v_{cs} = V_{sm} \cos(\omega_e t + 120) \quad (2-16)$$

ทำการแปลงแรงดันทั้ง 3 เฟสให้ไปอยู่บนแกน qs และ ds จะได้ว่า

$$v_{qs}^s = V_{sm} \cos \omega_e t \quad (2-17)$$

$$v_{ds}^s = -V_{sm} \sin \omega_e t \quad (2-18)$$

จากนั้นก็แปลงแรงดันบนแกนหยุดนิ่งให้ไปอยู่บนแกนที่เคลื่อนที่ จะได้ว่า

$$v_{qs} = V_{sm} = \hat{V}_m \quad (2-19)$$

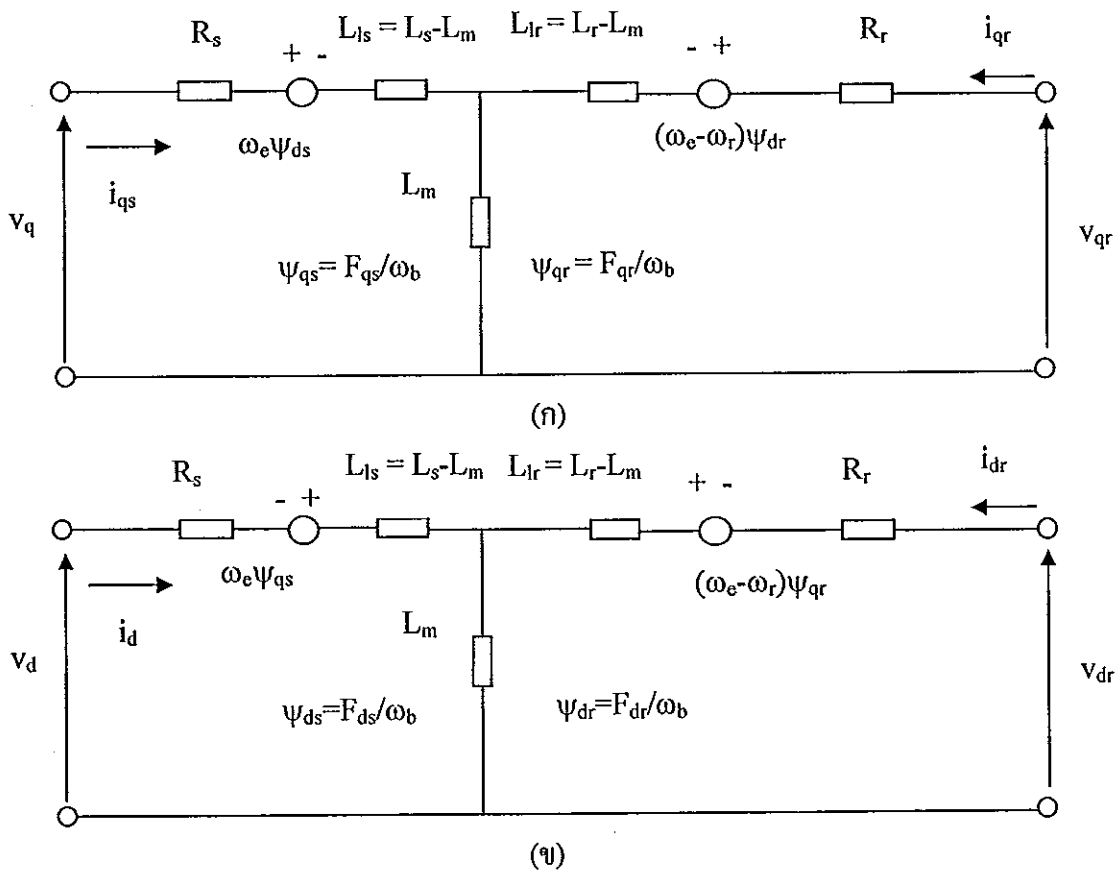
$$v_{ds} = 0 \quad (2-20)$$

โดย \hat{V}_m คือ แรงดันเทียบเท่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพราะไม่มีส่วนของคลื่นรูปไซน์

จากความสัมพันธ์ตามสมการข้างต้น จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์และมีความเร็วเชิงมุม (ω_e) เมื่อสังเกตบนแกนหยุดนิ่ง กลับไปปรากฏเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงบนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโครนัส (ω_r) และสิ่งที่สังเกตได้อีกอย่าง

หนึ่งก็คือแรงดันที่ไปปรากฏนั้น จะเป็นแรงดันซึ่งอยู่บนแกน q ซึ่งแกน q นี้ถ้าเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงคือแกนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจาก โรเตอร์และขดลวดซึ่งอยู่บน โรเตอร์ของมอเตอร์ กระแสตรง คือ อาร์เมเจอร์ ในขณะที่แรงดันบนแกน q ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เกิดจากการจ่ายไฟเข้าทางสเตเตอร์ ซึ่งเป็นที่วางขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเช่นกัน ดังนั้นถ้ามองในมุมของแกน d-q แล้วขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งอยู่บน โรเตอร์ ก็คืออาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งอยู่บนสเตเตอร์นั่นเอง และจากสมการ $v_{ds} = 0$ ก็เพราะยังไม่พิจารณาถึงแรงเคลื่อน ไฟฟ้าบนโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั่นเอง

แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นรูปแบบการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยอ้อม ในการศึกษาการทำงานที่สภาวะชั่วคราว เป็นแบบจำลองไดนามิก d-q ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (d-q dynamic model) ตามแบบจำลองของไครสซ์ (Krause's model) ดังรายละเอียดใน [8] โดยมีวงจรมูลดั่งภาพประกอบ 2-8



ภาพประกอบ 2-8 วงจรมูลศาสตร์บนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิง โครนัต

(ก) บนแกน q° (ข) บนแกน d°

จากแบบจำลองดังกล่าว สามารถเขียนสมการในรูปของ ฟลักซ์ (Flux linkage) ได้ดังนี้

$$\frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{mq} + F_{qs}) \right] \quad (2-21)$$

$$\frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{md} + F_{ds}) \right] \quad (2-22)$$

$$\frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b \left[v_{qr} - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{mq} - F_{qr}) \right] \quad (2-23)$$

$$\frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b \left[v_{dr} + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{md} - F_{dr}) \right] \quad (2-24)$$

$$F_{mq} = X_{ml}^* \left[\frac{F_{qs}}{X_{ls}} + \frac{F_{qr}}{X_{lr}} \right] \quad (2-25)$$

$$F_{md} = X_{ml}^* \left[\frac{F_{ds}}{X_{ls}} + \frac{F_{dr}}{X_{lr}} \right] \quad (2-26)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} (F_{qs} - F_{mq}) \quad (2-27)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} (F_{ds} - F_{md}) \quad (2-28)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{X_{lr}} (F_{qr} - F_{mq}) \quad (2-29)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{X_{lr}} (F_{dr} - F_{md}) \quad (2-30)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{n_p}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} (F_{ds} i_{qs} - F_{qs} i_{ds}) \quad (2-31)$$

$$T_e - T_L = J \left(\frac{2}{n_p} \right) \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2-32)$$

- โดย d คือ แกน d (direct axis)
 q คือ แกน q (quadrature axis)
 s คือ ตัวแปรสเตเตอร์ (stator variable)
 r คือ ตัวแปรโรเตอร์ (rotor variable)
 F_{ij} คือ flux linkage ($i=d, q$ and $j=s, r$)
 v_{qs}, v_{ds} คือ แรงดันสเตเตอร์แกน q และ d (q and d-axis stator voltages)
 v_{qr}, v_{dr} คือ แรงดันโรเตอร์แกน q และ d (q and d-axis rotor voltages)
 F_{mq}, F_{md} คือ ฟลักซ์แมกนีไทซิงแกน q และ d (q and d axis magnetizing flux linkages)
 R_r คือ ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ (rotor resistance)

- R_s คือ ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (stator resistance)
- X_{ls} คือ รีแอกแตนซ์รั่วไหลของสเตเตอร์ (stator leakage reactance) ($\omega_b L_{ls}$)
- X_{lr} คือ รีแอกแตนซ์รั่วไหลของโรเตอร์ (rotor leakage reactance) ($\omega_b L_{lr}$)
- X_m คือ รีแอกแตนซ์รั่วไหลของสนามแม่เหล็ก (magnetizing leakage reactance) ($\omega_b L_m$)
- X_{ml}^* คือ $\frac{1}{\left(\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lr}}\right)}$
- i_{qs}, i_{ds} คือ กระแสสเตเตอร์ในแกน q และ d (q and d-axis stator currents)
- i_{qr}, i_{dr} คือ กระแสโรเตอร์ในแกน q และ d (q and d-axis rotor currents)
- n_p คือ จำนวนคู่ของขั้ว (number of poles)
- J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia)
- T_o คือ แรงบิดทางไฟฟ้า (electrical output torque)
- T_L คือ แรงบิดของโหลด (load torque)
- ω_e คือ ความถี่เชิงมุมสเตเตอร์ (stator angular electrical frequency)
- ω_b คือ ความถี่ฐานเชิงมุมมอเตอร์ (motor angular electrical base frequency)
- ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ (rotor angular electrical speed)

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้

v_{qs}, v_{dr} ในสมการ (2-23) และสมการ (2-24) เป็นศูนย์

แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส สามารถแสดงได้ดังสมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential equation) ข้างต้น ในการแก้สมการเหล่านี้ จำเป็นต้องแปลงให้อยู่ในรูปสเตตสเปซ (State-space form) $\dot{x} = Ax + b$

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

ในการแปลงให้อยู่ในรูปสเตตสเปซ ทำได้โดยการแทนสมการ (2-25) และสมการ (2-26) ลงในสมการ (2-21) ถึง สมการ (2-24) แล้วรวมพจน์ที่เหมือนกันเข้าด้วยกัน จะได้สมการแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในรูปสเตตสเปซ ดังนี้

$$\frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} F_{qr} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1 \right) F_{qs} \right) \right] \quad (2-33)$$

$$\frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} F_{dr} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1 \right) F_{ds} \right) \right] \quad (2-34)$$

$$\frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b \left[-\frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} F_{qs} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} - 1 \right) F_{qr} \right) \right] \quad (2-35)$$

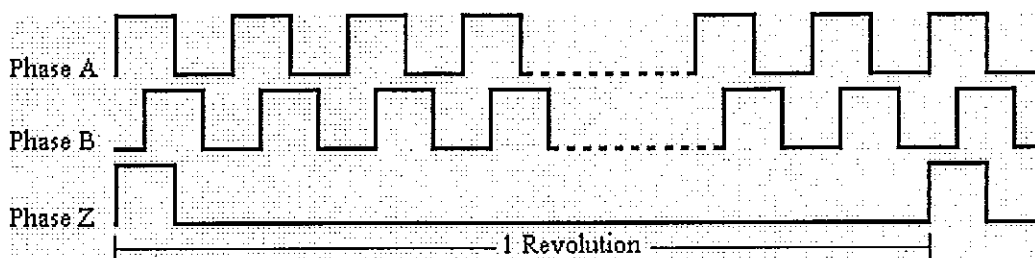
$$\frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b \left[\frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} F_{ds} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} - 1 \right) F_{dr} \right) \right] \quad (2-36)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \left(\frac{n_p}{2J} \right) (T_e - T_L) \quad (2-37)$$

2.2 ตัวตรวจรู้ที่ใช้ในการวัดตำแหน่งและอัตราเร็วการหมุน

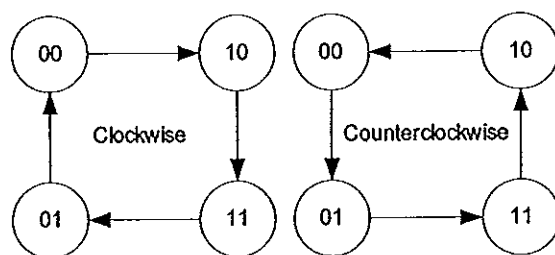
ตัวตรวจรู้ที่นิยมนำมาใช้ในการวัดตำแหน่งและอัตราเร็วการหมุนคือเอนโค้ดเดอร์ ซึ่งแบบเอนโค้ดเดอร์นิยมนำมาประยุกต์เพื่อวัดตำแหน่งและอัตราเร็วการหมุนคือเอนโค้ดเดอร์แบบหมุนซึ่งมีอยู่ 3 ชนิด คือ

1. เอนโค้ดเดอร์แบบหมุนชนิดให้ผลสมบูรณ์ (Absolute rotary encoder) จะให้ค่าตำแหน่งการหมุนของแกน ข้อมูลที่ได้จะเป็นค่าตำแหน่ง ณ จุดนั้นๆ ซึ่งข้อมูลอาจจะอยู่ในรูปแบบ บีซีดี (BCD) หรือรหัสเกรย์ (gray code)
2. เอนโค้ดเดอร์แบบหมุนชนิดหลายรอบ (Multi-turn rotary encoder) เหมือนกับเอนโค้ดเดอร์แบบหมุนชนิดให้ผลสมบูรณ์ แต่สามารถอ่านค่าจากการหมุนในหลายๆ รอบได้
3. เอนโค้ดเดอร์แบบหมุนชนิดเพิ่มค่า (Incremental rotary encoder) ที่ให้ค่าในรูปของการเปลี่ยนแปลงเฟสในการหมุน ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของเฟสที่ต่างกัน 90 องศา มีเส้นสัญญาณเอาต์พุต 3 เส้น คือ เฟส A, เฟส B และเฟส Z โดยเมื่อมีการหมุนแกนของโรตารีเอนโค้ดเดอร์ จะมีสัญญาณพัลส์ ออกมาทางสายทั้ง 3 เส้น โดยที่พัลส์ ของเฟส A และเฟส B จะต่างกันอยู่ 90 องศา แต่การที่เฟสใดจะนำอีกเฟสหนึ่งนั้น จะขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของแกน และเมื่อหมุนครบรอบทุกครั้ง จะมีพัลส์ออกมาทางเฟส Z ด้วย ดังภาพประกอบ 2-9



ภาพประกอบ 2-9 แสดงพัลส์ที่ได้จากเอนโค้ดเดอร์แบบหมุนชนิดเพิ่มค่า

ความแตกต่างของการนำระหว่างสัญญาณ A และสัญญาณ B สามารถแยกได้ว่าเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือเป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งสามารถเขียนสถานะการหมุนของเอนโค้ดเดอร์ได้ดังภาพประกอบ 2-10 ตัวอย่าง สมมติให้ค่าสัญญาณ B และสัญญาณ A เริ่มต้นเป็น "00" ตามลำดับ ถ้าสถานะต่อไปเป็น "10", "11" และ "01" แล้วจะได้ว่าเอนโค้ดเดอร์หมุนแบบตามเข็มนาฬิกา ถ้าสถานะต่อไปเป็น "01" แสดงว่าเอนโค้ดเดอร์ยังหมุนตามเข็มนาฬิกาต่อไป แต่ถ้าสถานะที่ต่อจาก "11" เป็น "10" แสดงว่าเอนโค้ดเดอร์กำลังเปลี่ยนทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา



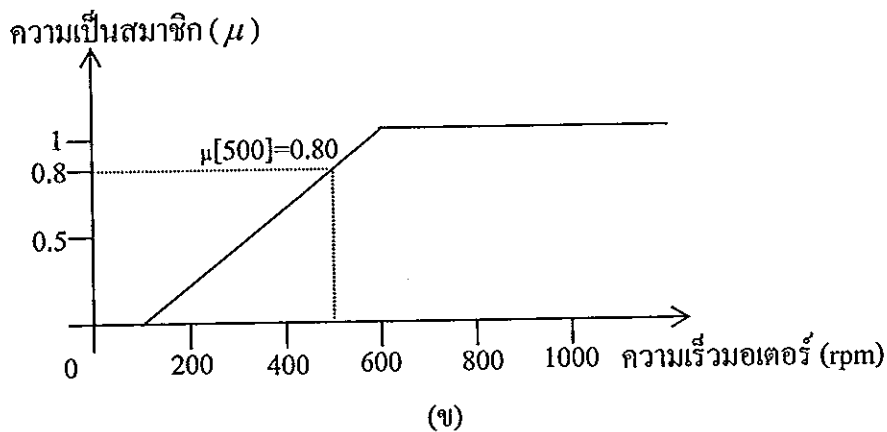
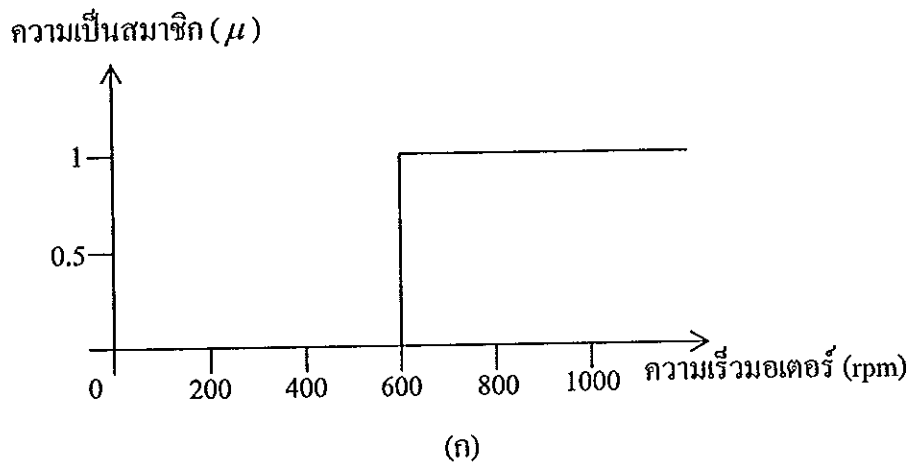
ภาพประกอบ 2-10 วิธีการตรวจจับทิศทางการหมุนของโรตารีเอนโค้ดเดอร์

2.3 ทฤษฎีฟัซซี่ลอจิก

หลักการพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (Fundamentals on Fuzzy Logic Controller) ฟัซซี่ลอจิกที่คิดค้นโดย L. A. Zadeh ในปี ค.ศ. 1965 ซึ่งเป็นผลงานวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอก ฟัซซี่ลอจิกเป็นตรรกะที่อยู่บนพื้นฐานความเป็นจริงที่ว่า ทุกสิ่งบนโลกแห่งความเป็นจริงไม่ใช่มีเฉพาะสิ่งมีความแน่นอนเท่านั้น แต่มีหลายสิ่งหลายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างไม่เที่ยงและไม่แน่นอน (uncertain) อาจเป็นสิ่งที่คลุมเครือ (fuzzy) ไม่ใช่ชัดเจน (unexact) ยกตัวอย่างเช่น เซตของอายุคน อาจแบ่งเป็น วัยทารก วัยเด็ก วัยรุ่น วัยกลางคน และวัยชรา จะเห็นได้ว่าในแต่ละช่วงอายุคนไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่าวัยทารกกับวัยเด็กแยกจากกันแน่ชัดช่วงใด วัยทารกอาจถูกตีความว่าเป็นอายุระหว่าง 0 ถึง 1 ปี บางคนอาจตีความว่าวัยทารกอยู่ในช่วงอายุ 0 ถึง 2 ปี ในทำนองเดียวกัน วัยเด็กและวัยรุ่น ก็ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าช่วงต่อของอายุควรอยู่ในช่วงใด อาจตีความว่าวัยเด็กมีอายุอยู่ในช่วง 1 ถึง 12 ปี หรืออาจเป็น 2 ถึง 10 ปี เป็นต้น สิ่งเหล่านี้เป็นตัวอย่างของความไม่แน่นอน ซึ่งเป็นลักษณะทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั่วไป เซตของเหตุการณ์ที่ไม่แน่นอนเช่นนี้เรียกว่าฟัซซี่เซต (fuzzy set)

2.3.1 ทฤษฎีฟuzzyเซต

ทฤษฎีฟuzzyเซตเป็นการรวมสมาชิกของหลายๆ เซตดั้งเดิมที่มีอยู่จริงและพหุมีลักษณะที่รวมกลุ่มกันได้ โดยฟuzzyเซตยอมรับความเป็นสมาชิกเพียงบางส่วน ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงทีละน้อย ระหว่างการมีคุณสมบัติความเป็นสมาชิกครบถ้วนกับไม่มีคุณสมบัติของความเป็นสมาชิกเลยระบบฟuzzyลอจิกสามารถทำงานได้หากมีส่วนของสมาชิกที่มีลักษณะที่ถูกต้องเพียงบางส่วน และคิดเพียงบางส่วนโดยมีค่าความเป็นสมาชิกต่างกัน อยู่ระหว่าง 0 และ 1 ดังภาพประกอบ 2-11 แสดงความเป็นสมาชิกของเซตดั้งเดิม (ก) กับ ฟuzzyเซต (ข) ที่ต่างก็แสดงความ เป็นสมาชิกของความเร็วของมอเตอร์



ภาพประกอบ 2-11 แสดงความเป็นสมาชิกของเซตดั้งเดิม (ก) กับ ฟuzzyเซต (ข)

ภาพประกอบ 2-11 (ก) เป็นการแสดงชี้ให้เห็นชัดว่า ความเร็วของมอเตอร์ที่มากกว่า หรือเท่ากับ 600 rpm เป็นความเร็วสูง (ลอจิก 1) แต่ถ้าน้อยกว่า 600 rpm เป็นความเร็วต่ำ

(ลอจิก 0) ส่วนภาพประกอบ 2-11 (ข) แสดงความต่อเนื่องของความเป็นสมาชิกความเร็วของมอเตอร์ โดยที่ความเร็วของมอเตอร์ที่ 100 rpm บอกได้ชัดเจนว่าไม่ใช่ความเร็วสูง แต่ที่ความเร็ว 1100 rpm ตอบได้ว่าเป็นความเร็วสูง และถ้าที่ความเร็ว 500 rpm ถือว่าความเร็วสูง 80% หรือมีค่าความเป็นสมาชิกของความเร็วเท่ากับ 0.80 และที่ความเร็ว 350 rpm มีค่าความเป็นสมาชิกของความเร็วเท่ากับ 0.50 ส่วนเส้นโค้งในรูปเรียกว่า ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต “ความเร็วของมอเตอร์” นั่นคือ ทุกค่าจะมีความเป็นสมาชิกของความเร็วที่แตกต่างกัน ช่วงความเร็วที่เดินไปได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1500 rpm เรียกว่าเอกภพสัมพัทธ์

2.3.2 ฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต คือ เซตคู่ลำดับของสมาชิกในเอกภพสัมพัทธ์ที่สนใจและระดับความเป็นสมาชิกเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (2-38)$$

โดยที่ A คือ ฟัซซีเซต

$x \in U$ คือ x เป็นสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์

$\mu_A(x)$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A

คู่ลำดับของ ตัวแปร x กับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A โดยที่ x เป็นสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์

ถ้า U เป็นค่าต่อเนื่อง ฟัซซีเซต A สามารถเขียนแทนด้วยสมการ (2-38)

$$A = \int_U \mu_A(x) \quad (2-39)$$

เครื่องหมาย " \int " หมายถึง การทำยูเนียนตามทฤษฎีเซต

ถ้า A เป็นความไม่ต่อเนื่อง มีขอบเขต สามารถกำหนดฟัซซีเซต ได้ดังนี้

$$A = \sum_U \mu_A(x) \quad (2-40)$$

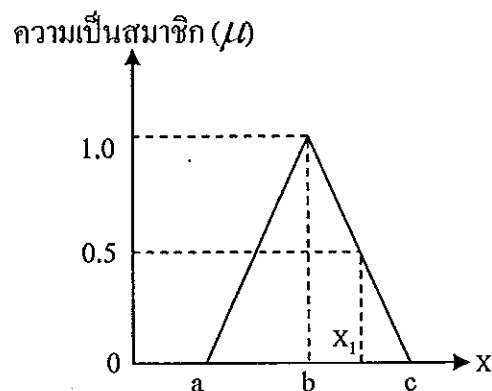
โครงสร้างของระบบฟัซซีสามารถเข้าใจได้เนื่องจากสามารถตีความให้ในรูปแบบ If-Then ซึ่งสอดคล้องกับตรรกะความคิดของมนุษย์ และนอกจากนั้น ฟัซซีลอจิกยังช่วยในการตัดสินใจที่คลุมเครือยอมให้การตัดสินใจเป็นแบบส่วน ไม่ใช่ผิดหรือถูกเพียงสองสถานะ แต่จะเป็นดีกรีของความถูกหรือผิด ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติอยู่แล้ว

2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ การกำหนดเป็นตัวเลข และการกำหนดเป็นฟังก์ชัน ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบการกำหนดเป็นตัวเลขเป็นการนิยามเชิงตัวเลขแสดงขีดสูงสุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตนั้นเป็นเวกเตอร์ของจำนวน ซึ่งขนาดขึ้นอยู่กับระดับของการแบ่งย่อย ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบการนิยามฟังก์ชันเป็นการกำหนดสมาชิกของฟuzzyเซตสำหรับแสดงให้เห็นเชิงวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งสมาชิก (Membership grade) ขององค์ประกอบแต่ละตัวในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนดได้ ทำให้การแบ่งความเป็นสมาชิกแบบการนิยามฟังก์ชันมีความละเอียดมากกว่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบการกำหนดเป็นตัวเลขเป็นการนิยามเชิงตัวเลข

ลักษณะการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Δ หรือ T-function) กำหนดนิยามในดังต่อไปนี้

$$\mu(x_i) = \begin{cases} 0 & , x_i \leq a \\ \frac{(x_i - a)}{(b - a)} & , a < x_i < b \\ \frac{(x_i - b)}{(c - b)} & , b < x_i < c \\ 0 & , x_i \geq c \end{cases} \quad (2-41)$$



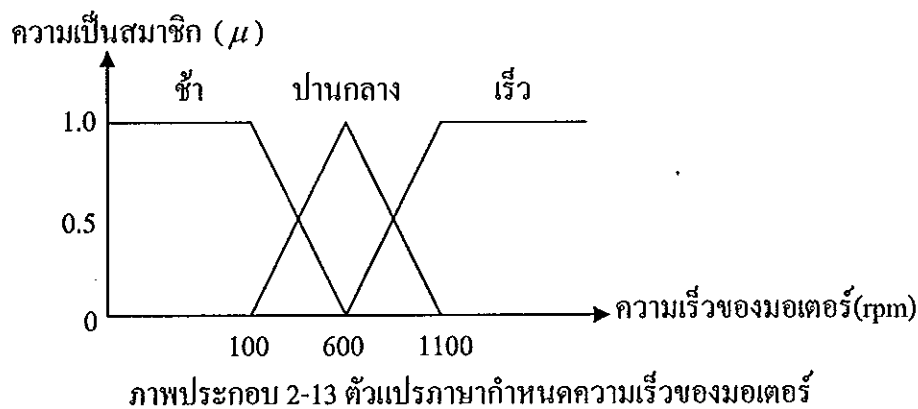
ภาพประกอบ 2-12 พารามิเตอร์และรูปทรงของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม

ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม หรือแบบ T เป็นฟังก์ชันที่มีลักษณะรูปร่างแน่นอน ซึ่งถูกพิจารณาถึงคุณสมบัติโดยการเลือกพารามิเตอร์ดังแสดงในภาพประกอบ 2-12 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบนี้ปกติใช้กำหนดคุณสมบัติสมาชิกไม่เป็น 0

2.5 ตัวแปรทางภาษา

ตัวแปรทางภาษา (Linguistic variables) คือ คำพูดหรือประโยคทางธรรมชาติที่สามารถเข้าใจได้ทั่วไป ในการให้ความหมายเพื่อความสะดวกสำหรับการวิเคราะห์ระบบ การประมาณการ สรุปข้อมูลและตีความจำนวนเซตคั้งเดิมในเทอมของฟัซซี่เซต

ตัวอย่างของตัวแปรภาษาความเร็วของมอเตอร์ ดังภาพประกอบ 2-13 ประกอบด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตของความเร็วของมอเตอร์ 3 ฟังก์ชัน คือ เร็ว, ปานกลาง และช้า โดยนำตัวแปรภาษาดังกล่าวไปกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต



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

x คือ ชื่อตัวแปร เช่น ความเร็ว เป็นต้น

$T(x)$ คือ เซตตัวแปรทั้งหมดของตัวแปร x {เช่น เร็ว, ปานกลาง และช้า}

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

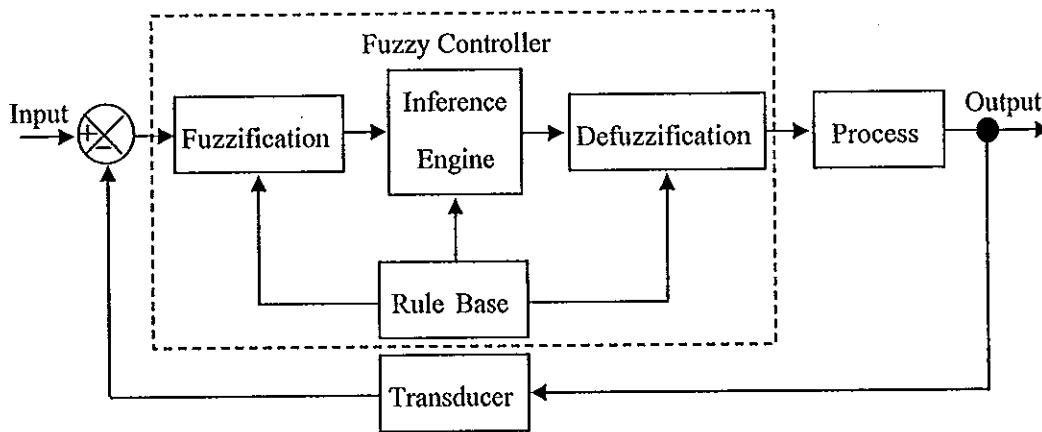
M คือ ความสัมพันธ์ของ x แต่ละค่า

2.6 ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy logic controller) สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ ชนิดแมมดานิ (Mamdani type) และชนิดทากาจิ-ซูกะโน (Takagi-Sugeno type) หรือเรียกชื่อย่อว่า ชนิดทีเอส (TS type) โดยเรียกตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่ใช้กฎทีเอสว่า ตัวควบคุมทีเอสฟัซซี่ลอจิก และเรียกตัวควบคุมที่ใช้กฎแมมดานิฟัซซี่ลอจิกว่า ตัวควบคุมแมมดานิฟัซซี่ลอจิก หรือในบางครั้งเมื่อกล่าวถึงตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกทั่ว ๆ ไปก็จะหมายถึงตัวควบคุมแมมดานิฟัซซี่ลอจิก

2.6.1 ฟัชซีฟิเคชัน

การฟัชซีฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงข้อมูลแบบธรรมดาให้ไปอยู่ในรูปของตัวแปรทางภาษาหรือตัวแปรฟัชซีลอจิก การแปลงข้อมูลทางด้านอินพุตที่ประกอบด้วยเซตของค่าความผิดพลาด (Error: E) และเซตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด (Change of Error: CE) ของค่าเป้าหมายและค่าที่วัดได้ตามลำดับ จากภาพประกอบ 2-14 แสดงระบบควบคุมฟัชซีที่มีด้วยตัวควบคุมฟัชซีลอจิกที่ประกอบด้วย ฟัชซีฟิเคชัน ฐานความรู้ กลไกอนุมาน ดีฟัชซีฟิเคชัน กระบวนการ และ ทรานสดิวเซอร์



ภาพประกอบ 2-14 ระบบควบคุมโดยตัวควบคุมฟัชซี

การเลือกจำนวนและลักษณะรูปร่างของฟัชซีเซต คือ พารามิเตอร์หนึ่งในการออกแบบตัวควบคุมฟัชซีลอจิก ซึ่งขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้ออกแบบ โดยอาศัยหลักเกณฑ์ต่าง ๆ เช่น ความรู้และประสบการณ์ที่มีต่อกระบวนการที่จะควบคุม เพราะไม่มีหลักการและขั้นตอนทางคณิตศาสตร์ในการเลือกอินพุตฟัชซีเซต โดยทั่วไปจำนวนฟัชซีเซตสำหรับแต่ละตัวแปรอินพุตอาจจะเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ แต่อยู่ในช่วง 2 ถึง 13 ฟัชซีเซต (ไม่ควรมากกว่านี้)

2.6.2 ฐานความรู้ฟัชซีลอจิก

ฐานความรู้ฟัชซีลอจิกประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ฐานข้อมูล (database) สำหรับเก็บฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัชซีเซตและสเกลที่ใช้ในการนอร์มอลไลเซชัน (normalization) และฐานกฎ (rule base) เป็นส่วนที่เก็บกฎที่ใช้ในการควบคุมระบบ ซึ่งอยู่ในรูป

ของ 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 ใช้ความรู้และประสบการณ์ที่มีต่อกระบวนการที่ถูกควบคุมโดยอยู่บนพื้นฐานของการลองผิดลองถูกจนได้ผลตอบสนองเป็นที่พอใจ

2.6.3 กลไกอนุมาน

หน่วยกลไกอนุมานทำหน้าที่หาผลลัพธ์ของกฎการควบคุมจากค่าตัวแปรอินพุตฟัซซี่เซตค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากปฏิบัติการฟัซซี่ลอจิกในส่วนมูลเหตุและเงื่อนไขโดยทั่วไป การเชื่อมโยงของเหตุผลจะมี 2 ชนิด คือ

- Generalized modus ponens (GMP) คือการสรุปจากเหตุไปหาผล

รูปแบบ Premise : x is A'
 Implication : if x is A then y is B
 Consequence : y is B'

- Generalized modus tollens (GMT) คือการสรุปจากผลไปหาเหตุ

รูปแบบ Premise : y is B'
 Implication : if x is A then y is B
 Consequence : x is A'

โดย A, A', B, B' คือ ฟัซซี่เซต

x, y คือ ตัวแปรทางภาษา

$$\mu_R(x, y) = f_{imp}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad ; x \in U, y \in V \quad (2-42)$$

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

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

f_{imp} คือ ฟังก์ชันการอิมพลีเคชัน (Implication) หรือฟังก์ชันการเชื่อมโยงค่าความเป็นสมาชิกของความสัมพันธ์ฟัซซี่ลอจิก

โดยทั่วไป ในการสร้างตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกจะนิยมใช้การเชื่อมโยงแบบ GMP และใช้ f_{imp} ด้วยวิธีแมมดานี โดยสร้างเป็นกฎได้ดังนี้

R1: IF X IS A1 AND Y IS B1 THEN Z IS C1

R2: IF X IS A2 AND Y IS B2 THEN Z IS C2

โดย A_1, B_1, A_2, B_2 คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต
 C_1, C_2 คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต
 R_1, R_2 คือ กฎความสัมพันธ์ฟัซซี่ลอจิก
 Z คือ ตัวแปรทางภาษาในเอกภพสัมพัทธ์ U V และ W ตามลำดับ

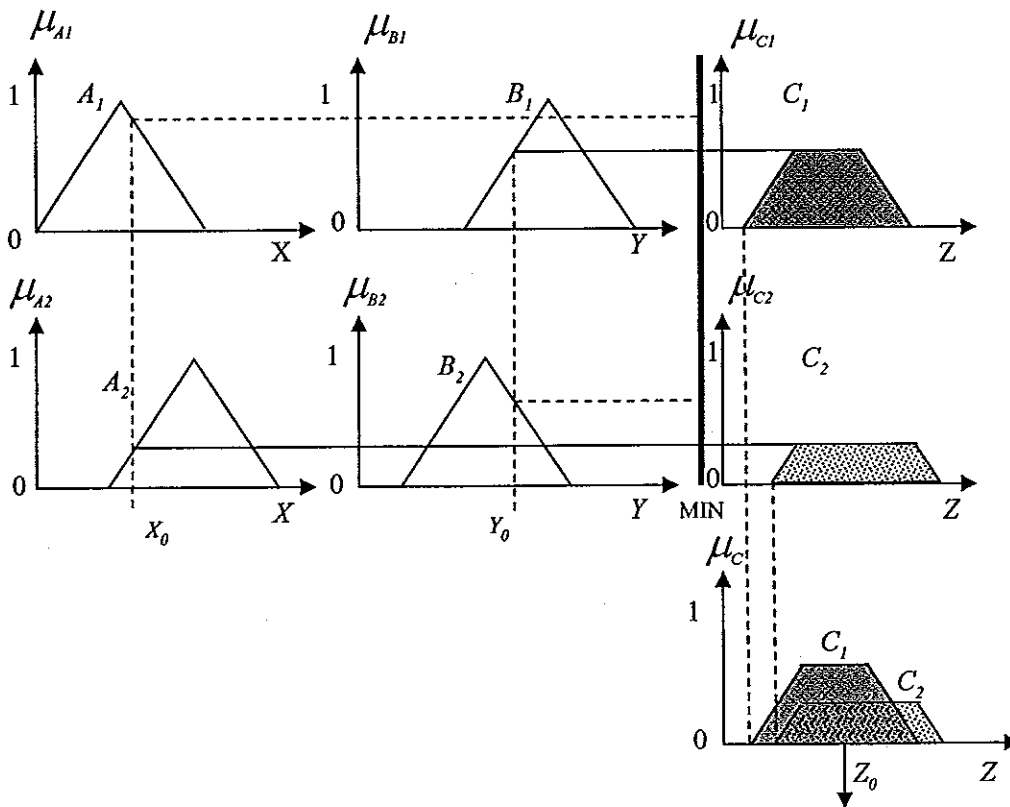
$$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0)) \tag{2-43}$$

$$\alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0)) \tag{2-44}$$

$$\mu_{c_i}(z) = \min(\alpha_i, \mu_c(z)) \tag{2-45}$$

$$\mu_c(z) = \max(\mu_{c_1}, \mu_{c_2}) \tag{2-46}$$

โดย α_1, α_2 คือ ระดับความเป็นสมาชิกของ 2 อินพุต (fire strength)
 จะได้ค่าความเป็นสมาชิกของผลสรุป (μ_c) ผลของการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกสามารถทำการอนุมานในแบบของแมมดานีได้ดังในภาพประกอบ 2-15



ภาพประกอบ 2-15 การอนุมานโดยวิธีของแมมดานี

2.6.4 ดีฟัซซีฟิเคชัน

หน่วยดีฟัซซีฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงผลลัพธ์กฎการควบคุมที่อยู่ในรูปตัวแปรฟัซซีลอจิกให้เป็นคริสปีเซต และทำการสเกลกลับมาให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์เดิมที่จะเป็นฟัซซีฟิเคชันการดีฟัซซีไฟเออร์ นั้นมีหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงวิธีที่นิยมใช้เพียง 2 วิธี ดังนี้

2.6.4.1 การเลือกค่าสูงสุด (Mean Of Maximum: MOM)

เป็นวิธีการที่ง่ายสุดในการเลือกข้อมูลเอาต์พุต (Z_0) เป็นการใช้ค่าสูงสุดของค่าระดับการเป็นสมาชิกจากการกระทำหลาย ๆ แบบแล้วเลือกกระทำเพียงหนึ่งรูปแบบ

$$Z_0 = \max_{x \in U} \mu_A(x) \quad (2-47)$$

ถ้าหากเกิดการกระทำที่มีค่า μ สูงสุดเท่ากันสองค่าจะต้องใช้รูปแบบการแก้ปัญหา อีกลักษณะหนึ่งคือ ใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลอินพุต

$$Z_0 = \sum_{j=1}^L \frac{V_j}{J} \quad (2-48)$$

เมื่อ V_j คือค่าเอาต์พุตสูงสุดที่มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากัน

J คือจำนวนเอาต์พุตที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน

นั่นคือ $V_j = \max \mu_A(x)$

$j = |\{x\}|$ เป็นจำนวนของความเป็นสมาชิก

2.6.4.2 การเลือกค่าศูนย์กลาง (Center Of Area: COA)

เป็นการแบ่งจุดศูนย์กลางของพื้นที่ค่าความเป็นสมาชิกออกเป็นสองส่วนเพื่อหาจุดศูนย์กลางของน้ำหนัก ค่าของเอาต์พุตแสดงได้ดังนี้

$$Z_0 = \frac{\int v \mu_B(v) dv}{\int \mu_B(v) dv} \quad (2-49)$$

สำหรับเอกภพสัมพัทธ์ที่มีสมาชิกเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ที่แบ่งระดับข้อมูลเอาต์พุตออกเป็น n ระดับ แสดงได้ดังสมการ (2-23)

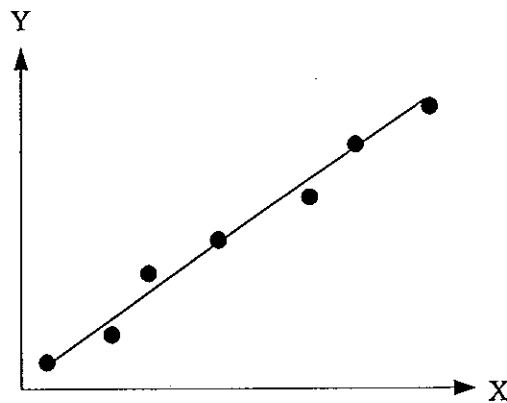
$$Z_0 = \frac{\sum_{k=1}^n v_k \mu_{v(v_k)}}{\sum_{k=1}^n \mu_{v(v_k)}} \quad (2-50)$$

เมื่อ v_k คือ ค่าเอาต์พุตแต่ละส่วน
 μ_v คือ ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตแต่ละส่วน

2.7 การถดถอย (Regression)

การถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติอย่างหนึ่งที่ใช้ในการตรวจหาหรือตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป ในงานทางด้านวิศวกรรมสามารถนำการถดถอยมาใช้ในการปรับแต่งเส้นโค้ง (Curve fitting) เพื่อทำการหาแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามของข้อมูลจากการทดลองได้ การถดถอยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ การถดถอยเชิงเดียว (Sample regression), การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression), และการถดถอยแบบเส้นโค้ง (Curvilinear regression)

การถดถอยเชิงเดียว (Sample regression) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 จุดคือตัวแปรต้น 1 จุด และตัวแปรตาม 1 จุด โดยอยู่ในรูปฟังก์ชัน $Y = f(X)$ โดย X แทนตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ (Independent variable) และ Y แทนตัวแปรตาม (Dependent variable) ในกรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นเส้นตรงเรียกว่า การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (Sample linear regression) ดังแสดงตัวอย่างในภาพประกอบ 2-16 และยังมีการหาความสัมพันธ์ที่ไม่แปรผันกันตามเส้นตรง โดยวิธีนี้จะต้องกำหนดกำลังสูงสุดของโพลีโนเมียล



ภาพประกอบ 2-16 การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว

การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 3 ชุด ขึ้นไป โดยมีตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ 1 ชุดและตัวแปรตาม 2 ชุดขึ้นไป โดยรูปแบบของฟังก์ชันของการถดถอยพหุคูณจะอยู่ในรูป $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ ในกรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นเส้นตรงเรียกว่า การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression)

การถดถอยแบบเส้นโค้ง (Curvilinear regression) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามโดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามไม่เป็นเส้นตรง ในการพิจารณาการถดถอยแบบเส้นโค้งเป็นได้ทั้งกรณีที่เป็นการถดถอยเชิงเดียว (Simple regression) และการถดถอยพหุคูณ (Multiple regression)

กรณีที่ข้อมูลได้จากการทดลองหรือทำการทดสอบข้อมูลที่ได้ อาจมีความผิดพลาด (Error) เกิดขึ้นทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามอาจไม่ใช่ความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง หรือทำให้ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเป็นสมการได้ ดังนั้นจึงต้องทำการหาแนวโน้มของความสัมพันธ์นั้น โดยให้ค่าความผิดพลาดระหว่างแนวโน้มที่ทำการคำนวณได้กับข้อมูลที่ได้จากการบันทึกจริงมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งวิธีการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยที่ให้ความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุดเรียกว่าวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least-squares method) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.7.1 การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (Simple Linear Regression)

ในการหาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีลักษณะการจัดเรียงข้อมูลเป็นเส้นตรงจะเรียกว่าการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (Simple Linear Regression) โดยมีสมการความสัมพันธ์ของข้อมูลของตัวแปรต้นและตัวแปรตาม $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ เป็นดังนี้

$$y = a_0 + a_1x + e \quad (2-51)$$

โดย a_0 คือ สัมประสิทธิ์ของสมการแทนจุดตัดแกน y

a_1 คือ สัมประสิทธิ์ของสมการแทนความชันของเส้นตรง

e คือ ความผิดพลาด (Error) ระหว่างสมการถดถอยและข้อมูลจริง

จากสมการที่ (2-51) ค่าความผิดพลาด (Error) จะแทนผลต่างในแกนของตัวแปรตามโดยเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$e = y - a_0 - a_1x \quad (2-52)$$

จากสมการที่ (2-52) สามารถแยกพจน์ทางด้านขวาของสมการออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ได้จากการบันทึกจริงคือ y และส่วนที่เป็นสมการถดถอยคือ $a_0 + a_1x$ ซึ่งมีลักษณะเป็นสมการเส้นตรงดังสมการที่ 3

$$\hat{y} = a_0 + a_1x \quad (2-53)$$

จากสมการที่ (2-53) หนทางหนึ่งในการเลือกสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด เพื่อที่จะนำมาใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม คือ การทำให้ค่าความผิดพลาด (Error) มีค่าน้อยที่สุด จากสมการที่ (2-53) เมื่อแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของค่าความผิดพลาดในแต่ละจุดข้อมูลจะได้

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i) \quad (2-54)$$

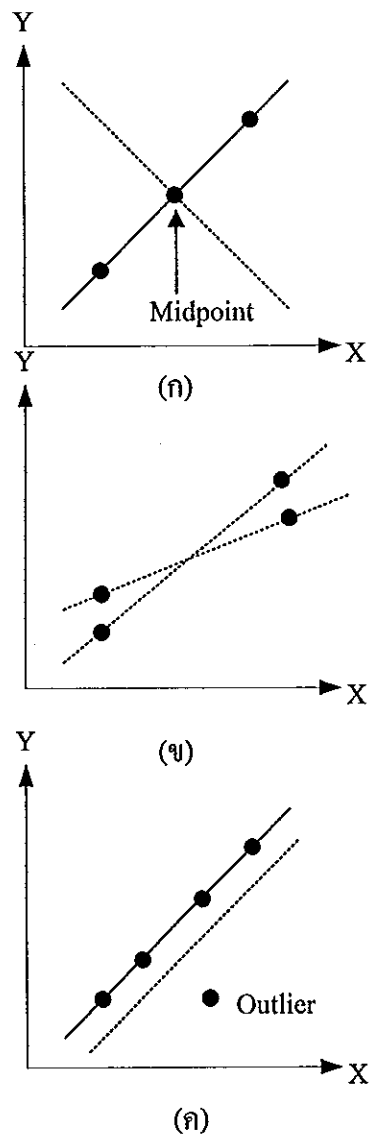
โดยที่ค่า n แทนจำนวนข้อมูลทั้งหมด จากสมการที่ (2-54) พบว่าถ้ากำหนดให้ค่าความผิดพลาดระหว่างข้อมูลที่บันทึกได้ กับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากสมการถดถอยมีค่าน้อยสุดนั้นยังไม่เพียงพอโดยพิจารณาจากภาพประกอบ 2-17 จากภาพประกอบ 2-17 (ก) พบว่าเมื่อทำการหาผลรวมของค่าความผิดพลาดให้มีค่าต่ำที่สุด แม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะให้ความผิดพลาดที่ต่ำที่สุดก็จริง แต่เนื่องจากความผิดพลาดมีค่าทั้งบวกและลบ ดังนั้นในกรณีของเส้นประแสดงให้เห็นถึงข้อเสียของวิธีการนี้ คือ ให้ผลรวมของค่าความผิดพลาดต่ำที่สุดเช่นกัน แต่แนวโน้มที่ไม่ถูกต้อง

ในส่วนผลรวมของค่าสมบูรณ์ของค่าผิดพลาดน้อยสุดดังแสดงในภาพประกอบ 2-17 (ข) มีสมการอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\sum_{i=1}^n |e_i| = \sum_{i=1}^n |y_i - a_0 - a_1x_i| \quad (2-55)$$

จากสมการที่ (2-55) แสดงดังภาพประกอบ 2-17 (ข) ซึ่งแสดงดังเส้นประ 2 เส้น แสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งเส้นโค้ง ด้วยวิธีค่าสมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดน้อยสุดจะให้เส้นแนวโน้มที่เหมาะสมมากกว่า 1 เส้น

ส่วนวิธีการค่าต่ำที่สุดของค่าสูงสุดหรือการหาค่าน้อยสุดของค่าความผิดพลาดที่มีค่ามากที่สุดนั้น เป็นการทำให้ระยะผิดพลาดระหว่างจุดข้อมูลที่มีการกระจายตัวออกห่างจากเส้นแนวโน้มมากที่สุด ให้มีค่าน้อยที่สุดดังแสดงในภาพประกอบ 2-17 (ค) จากรูปดังกล่าว แนวเส้นประคือแนวเส้นแนวโน้มที่ทำการค่าต่ำที่สุดของค่าสูงสุด แล้วซึ่งปกติเส้นแนวโน้มที่แท้จริงเป็นเส้นทึบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีที่ค่าความผิดพลาดมีค่ามากๆ นั้น วิธีการค่าต่ำที่สุดของค่าสูงสุดจะให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจนัก



ภาพประกอบ 2-17 ตัวอย่างการปรับแต่งเส้นโค้งในลักษณะต่างๆ (ก) ผลรวมของค่าผิดพลาดน้อยสุด (ข) ผลรวมของค่าสมบูรณ์ของค่าผิดพลาดน้อยสุด (ค) ค่าน้อยสุดของค่าผิดพลาดที่มีค่าสูงที่สุด

เพื่อที่จะกำจัดปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นจากการหาแนวโน้มของเส้นโค้งทั้ง 3 วิธี วิธีที่เหมาะสมที่สุดคือการน้อยสุดของค่ากำลังสองของความผิดพลาดโดยสมการจะอยู่ในรูป

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \quad (2-56)$$

SSE คือ Sum of Square of Error หรือ Unexplained Sum of Square

กำหนดให้ $\sum_{i=0}^n x_i = \sum x_i$

จากสมการที่ (2-52) สมการของแนวโน้มของข้อมูลจะอยู่ในรูปของ $a_0 + a_1x$ ดังนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 จะใช้วิธีการหาอนุพันธ์ย่อย โดยทำอนุพันธ์ย่อยสมการที่ (2-56) เทียบกับตัวแปรทั้งสองตัว

$$\frac{\partial SSE}{\partial a_0} = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1x_i) \quad (2-57)$$

$$\frac{\partial SSE}{\partial a_1} = -2 \sum [(y_i - a_0 - a_1x_i)x_i] \quad (2-58)$$

จากสมการที่ (2-57) และ (2-58) เมื่อต้องการค่าความผิดพลาดต่ำที่สุดดังนั้นค่าการหาอนุพันธ์ย่อยจะต้องเท่ากับ 0 ดังนั้นจะได้

$$\sum y_i = na_0 + \sum a_1x_i \quad (2-59)$$

$$\sum y_i x_i = \sum a_0 x_i + \sum a_1 x_i^2 \quad (2-60)$$

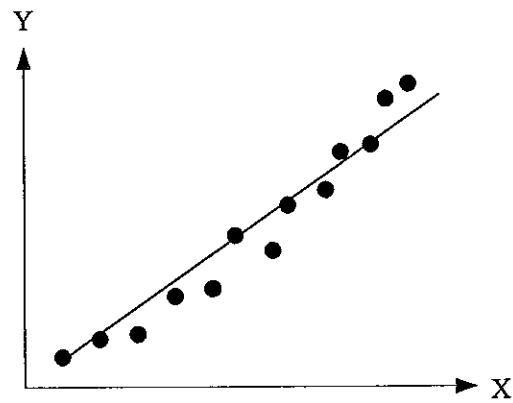
จากสมการที่ (2-59) และสมการที่ (2-60) เมื่อทำการแก้สมการทั้งสองจะได้สัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 ดังนี้

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (2-61)$$

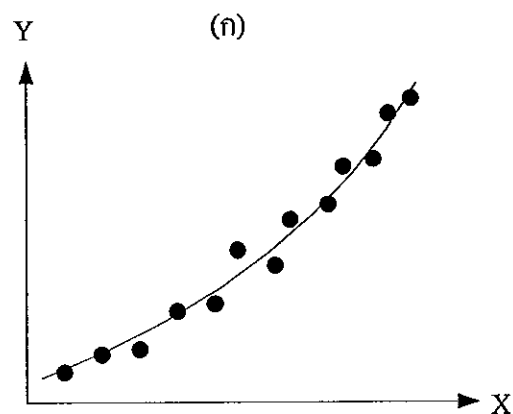
$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2-62)$$

2.7.2 การถดถอยแบบเส้นโค้งโพลิโนเมียล (Polynomial regression)

ข้อมูลทางด้านวิศวกรรมโดยทั่วไปแล้วส่วนมากจะไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นการหาแนวโน้มข้อมูล โดยการแทนด้วยสมการเส้นตรงนั้นยังไม่เพียงพอต่อการจัดเรียงตัวของข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบ 2-18 โดยจากภาพประกอบ 2-18 (ก) กราฟแนวโน้มที่ได้จากสมการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (Simple linear regression) ยังไม่เพียงพอต่อการจัดเรียงตัวของข้อมูลเมื่อเปรียบเทียบกับภาพประกอบ 2-18 (ข) เป็นกราฟแนวโน้มที่ได้จากสมการถดถอยแบบเส้นโค้งโพลิโนเมียล (Polynomial regression) ซึ่งการถดถอยที่เป็นในลักษณะเส้นโค้งแบบโพลิโนเมียลนี้เป็นแบบหนึ่งของการถดถอยพหุคูณ (Multiple regression)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 2-18 เปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการถดถอย (ก) การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว
(ข) การถดถอยแบบเส้นโค้งพหุนาม

ตัวอย่าง สมการ พหุนามกำลังสอง คือ

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + e \quad (2-63)$$

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + e \quad (2-64)$$

จากสมการที่ (2-63) ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการ พหุนามกำลังสองเมื่อเปรียบเทียบกับสมการเชิงเส้นแบบหลายตัวแปรคั่งสมการที่ (2-64) โดยที่ $x \equiv x_1$ และ $x^2 \equiv x_2$

สมการทั่วไปของเส้นโค้งพหุนาม

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e \quad (2-65)$$

m แทนเลขชี้กำลังสูงสุดของพหุนามจากสมการที่ (2-65) สมการถดถอยแบบพหุนามคือ $a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$ ซึ่งค่ากำลังสองของค่าความผิดพลาดจะอยู่ในรูปแบบคล้ายกับกรณีเส้นตรง

$$\hat{y} = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (2-66)$$

จากสมการที่ (2-66) ผลต่างกำลังสองของข้อมูลจริงและข้อมูลจริงและข้อมูลจากสมการถดถอยคือ

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_mx_i^m)^2 \quad (2-67)$$

ในการหาสัมประสิทธิ์ของสมการ โพลีโนเมียลจะอยู่ในรูปแบบ

$$\begin{aligned} \frac{\partial SSE}{\partial a_0} &= -2 \sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_mx_i^m) \\ \frac{\partial SSE}{\partial a_1} &= -2 \sum x_i (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_mx_i^m) \\ \frac{\partial SSE}{\partial a_2} &= -2 \sum x_i^2 (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_mx_i^m) \\ &\vdots \\ \frac{\partial SSE}{\partial a_m} &= -2 \sum x_i^m (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_mx_i^m) \end{aligned} \quad (2-68)$$

จากสมการที่ (2-68) กำหนดให้ผลการคำนวณหาอนุพันธ์ย่อยเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

เมื่อจัดรูปแบบใหม่จะได้

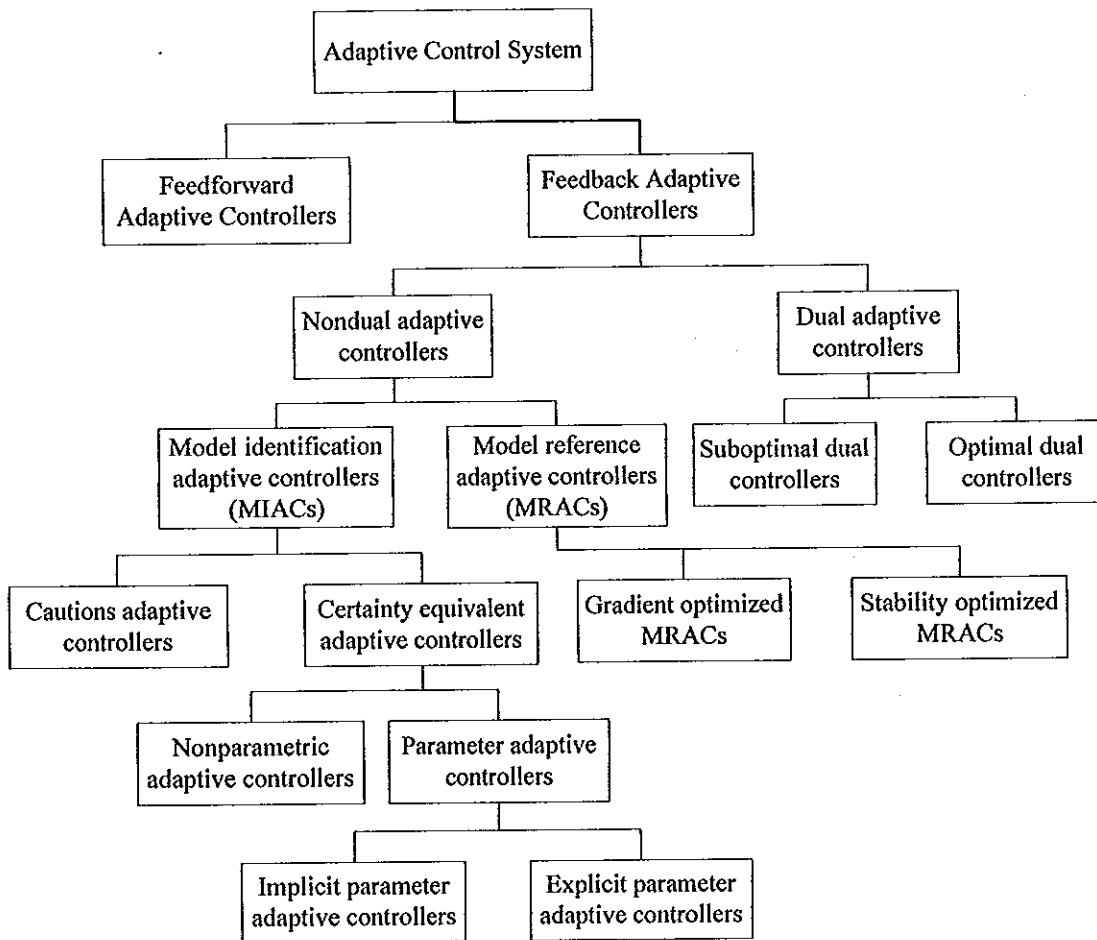
$$\begin{aligned} (n)a_0 + (\sum x_i)a_1 + (\sum x_i^2)a_2 + \dots + (\sum x_i^m)a_m &= \sum y_i \\ (\sum x_i)a_0 + (\sum x_i^2)a_1 + (\sum x_i^3)a_2 + \dots + (\sum x_i^m)a_m &= \sum x_i y_i \\ (\sum x_i^2)a_0 + (\sum x_i^3)a_1 + (\sum x_i^4)a_2 + \dots + (\sum x_i^m)a_m &= \sum x_i^2 y_i \\ &\vdots \\ (\sum x_i^m)a_0 + (\sum x_i^{m+1})a_1 + (\sum x_i^{m+2})a_2 + \dots + (\sum x_i^{2m})a_m &= \sum x_i^m y_i \end{aligned} \quad (2-69)$$

จากสมการที่ (2-69) ค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าคือ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ เพื่อทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวสามารถทำได้โดยการแก้สมการ m ตัวแปร โดยจำนวนสัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับค่าเลขชี้กำลังสูงสุดของสมการ โพลีโนเมียล

ในการประมาณแบบกำลังสองน้อยสุด (Least-squares) การเพิ่มความถูกต้องของการทดสอบสัญญาณ ในการทดลองนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการประมาณแบบกำลังสองน้อยสุดจะมีความถูกต้องสูงเมื่อมีข้อมูลในการสังเกตมากกว่า 20 [25]

2.8 ระบบควบคุมปรับเองได้ (Adaptive Control System)

ระบบควบคุมปรับเองได้สามารถแบ่งรูปแบบระบบควบคุมปรับเอง [17] สามารถเขียนเป็นแผนภาพดังภาพประกอบ 2-19 ที่ได้แสดงไว้

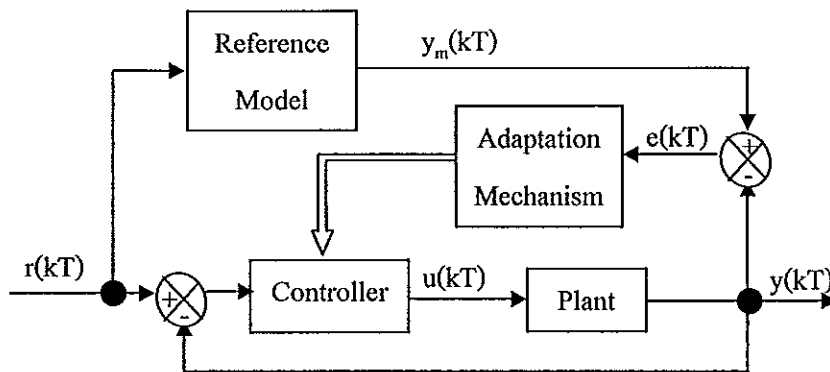


ภาพประกอบ 2-19 การแบ่งรูปแบบระบบควบคุมปรับเอง [17]

ระบบควบคุมที่นิยมใช้งาน คือ ระบบควบคุมแบบ Model Reference Adaptive Controllers (MRACs) และระบบควบคุมแบบ Model Identification Adaptive Controllers (MIACs) แต่ละระบบก็มีข้อดีต่างกัน โดยระบบ MRACs จะเหมาะกับระบบที่มีระบบอ้างอิง โดยระบบปรับตัวเพื่อให้ระบบควบคุมมีผลตามระบบอ้างอิง ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกวิธี MIACs ในการควบคุม โดยหลักการควบคุมจะกล่าวถึงต่อไป

2.8.1 Model Reference Adaptive Controllers (MRACs)

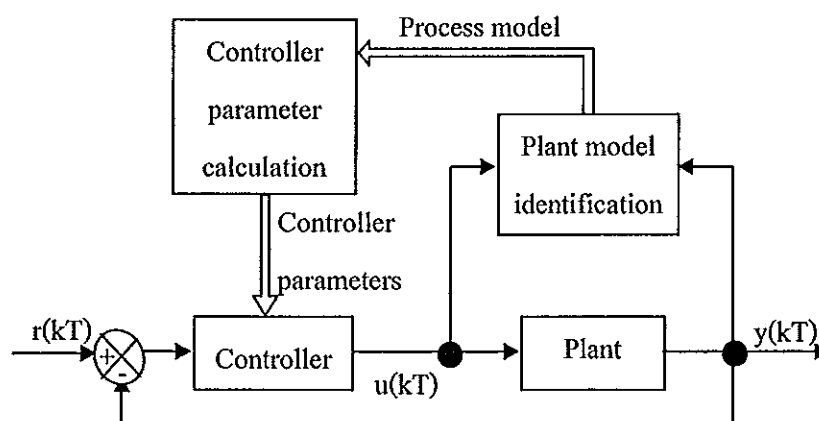
ทำให้ระบบประพจน์ตัวเหมือนรูปแบบอ้างอิง และรูปแบบอ้างอิงซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมนั้นสร้างให้ตรงตามคุณลักษณะ (Specification) ที่ต้องการ ลักษณะการควบคุมแบบ MRACs แสดงดังภาพประกอบ 2-20



ภาพประกอบ 2-20 แสดงแผนผังบล็อกของระบบควบคุมแบบ MRACs

หลักการทํางานของบล็อกระบบควบคุมแบบ MRACs สัญญาณ $r(kT)$ จะถูกส่งเข้าโมเดลอ้างอิง (Reference Model) และอุปกรณ์ควบคุม (Controller) ซึ่งสัญญาณรับเข้าเมื่อผ่านเข้าโมเดลอ้างอิง จะทำให้เกิดผลตอบสนองออกมาตามที่เรารู้ได้ออกแบบโมเดลอ้างอิง และสัญญาณ y_m ก็จะถูกส่งมาคำนวณค่าคลาดเคลื่อน (Error) โดยลบกับสัญญาณที่ผ่านตัวอุปกรณ์ควบคุม และระบบที่ต้องการ (Plant) ซึ่งมีการตอบสนองต่อสัญญาณรับเข้าเดียวกันกับโมเดลอ้างอิง จากการคำนวณค่าคลาดเคลื่อน สัญญาณค่าคลาดเคลื่อนนี้จะถูกส่งมาเพื่อคำนวณปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวอุปกรณ์ควบคุม เพื่อควบคุมระบบที่ต้องการให้มีผลตอบสนองเหมือนกับโมเดลอ้างอิงนั่นก็คือ พยายามทำให้ค่าคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์

2.8.2 Model Identification Adaptive Controllers (MIACs)



ภาพประกอบ 2-21 แสดงแผนผังบล็อกของระบบควบคุมแบบ MIACs

Model Identification Adaptive Controllers (MIACs) หรือเรียกว่า Self-Tuning Regulator (STR) จากภาพประกอบ 2-21 เป็นลักษณะการทำงานของระบบ Self-Tuning Regulator โดยจะมีการทำงาน คือ ดูปวงในเป็นรูปควบคุมป้อนกลับจากพฤติกรรมของระบบมาเข้าตัวควบคุม ดูปวงนอกสำหรับปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ประกอบด้วยตัวประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ เรียงซ้ำ กับบล็อกคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

อุปกรณ์ควบคุมของ Self-Tuning Regulator จึงประกอบด้วยตัวประมาณค่าพารามิเตอร์แบบเรียงซ้ำ หรือการตรวจรู้ระบบ (Plant identifier) กับกระบวนการคำนวณ ออกแบบตัวควบคุม ในลักษณะที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณปัจจุบัน ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์ที่ตัวควบคุมป้อนกลับ แต่ละครั้งในการชักตัวอย่าง จึงประมาณค่าพารามิเตอร์ใหม่ทุกครั้ง แล้วออกแบบตัวควบคุมเหมือนว่าค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ในปัจจุบันนั้นเป็นค่าแท้จริง การทำเช่นนี้เรียกว่า เป็น ระบบควบคุมแบบปรับด้วยตัวเองอย่างแท้จริง (Certainty equivalence adaptive control)

กระบวนการในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของที่ต้องการ (Plant) และกระบวนการในการออกแบบตัวควบคุม แต่ละกระบวนการนี้ต่างมีวิธีการต่างๆ กัน โดยกระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์มีหลายวิธี เช่น stochastic approximation, least-squares, extended and generalized least-squares, maximum likelihood, extended Kalman filtering เป็นต้น ส่วนในกระบวนการออกแบบตัวควบคุมเมื่อทราบพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการแล้วก็มี เช่น PID control, phase-lag and phase-lead compensators, pole-placement methods เป็นต้น การจะนำวิธีไหนในการประมาณค่าพารามิเตอร์มาใช้กับวิธีไหนในการออกแบบตัวควบคุมต้องให้ได้ลักษณะที่เรียกว่า Self-Tuning property ด้วย คือ ได้คุณสมบัติที่กำหนดการทำงาน หรือการปฏิบัติการของ อุปกรณ์ควบคุมต้องตรงกับการปฏิบัติการที่จะได้รับ หากทราบพารามิเตอร์ที่แท้จริงของระบบ ดังนั้นจะจับคู่ไหนมาใช้ต้องศึกษาปัญหาของเสถียรภาพ (Stability) ปัญหาการลู่เข้า (Convergence) และปัญหาการปฏิบัติการตามที่กล่าว และจากการที่ได้ศึกษามา [22] พบว่า สำหรับในบางสถานการณ์ใช้การประมาณค่าแบบ least-squares อย่างง่าย กับการควบคุมแบบ minimum-variance จะได้ Self-Tuning property

จากหลักการมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำสามเฟส ทฤษฎีการถดถอย และทฤษฎีการควบคุมแบบพีชชีลอจิก MIACs ที่กล่าวมา จะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมใช้งานวิจัยนี้ ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 3

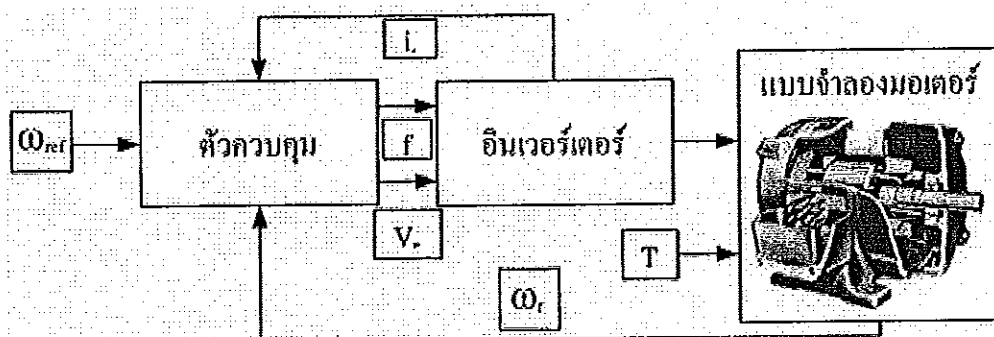
การจำลองการทำงาน

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงการจำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยใช้พีซีซึ่งลอจิกสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเนื้อหาที่จะกล่าวถึง การจำลองระบบการทำงาน ผังการทำงานส่วนควบคุมของระบบจำลองการทำงาน การทดสอบ การประมาณค่าแบบการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว การประมาณค่าแบบการถดถอยพหุคูณ และผลการจำลองเป็นเนื้อหาของบทนี้

3.1 การจำลองระบบการทำงาน

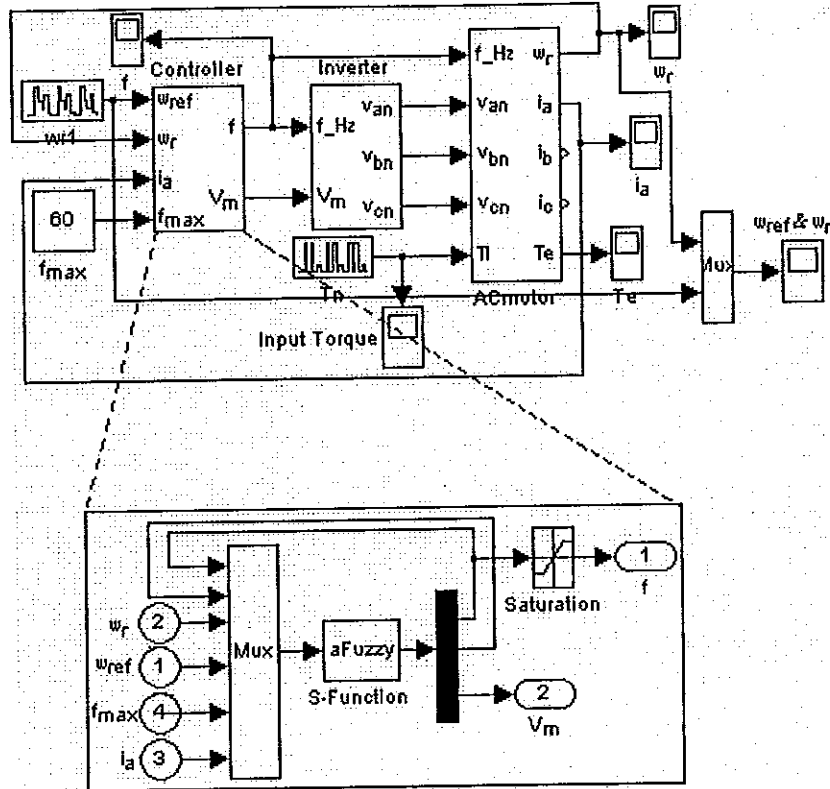
การจำลองระบบการทำงานเป็นส่วนการทดสอบระบบควบคุมและศึกษาการทำงานของระบบเพื่อที่จะสามารถออกแบบระบบควบคุมและทดลองควบคุมการทำงานก่อนที่จะไปทดสอบระบบจริง ระบบจำลองนี้สามารถลดต้นทุนการทำงาน ลดเวลาการทำงาน และลดความเสี่ยงการเกิดความเสียหายของอุปกรณ์ ได้

ภาพรวมของการจำลองระบบการทำงานสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 3-1 แบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส [12] ซึ่งได้กล่าวมาในบทก่อนหน้านี้ แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ [12] ทำหน้าที่รับความถี่และแรงดันสูงสุดเพื่อสร้างไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสป้อนให้กับมอเตอร์ และตัวควบคุม จะกล่าวในส่วนต่อไป



ภาพประกอบ 3-1 ภาพรวมของระบบจำลองการทำงาน

การจำลองระบบการทำงานใช้อุปกรณ์ของ MATLAB/SIMULINK มาช่วยในการจำลองการทำงานของระบบ โดยแสดงไว้ดังภาพประกอบ 3-2 จากภาพจะเห็นได้ว่าอินพุตของระบบจะมีความเร็วอ้างอิง ภาระของมอเตอร์ และกำหนดค่าทั่วไปของระบบ

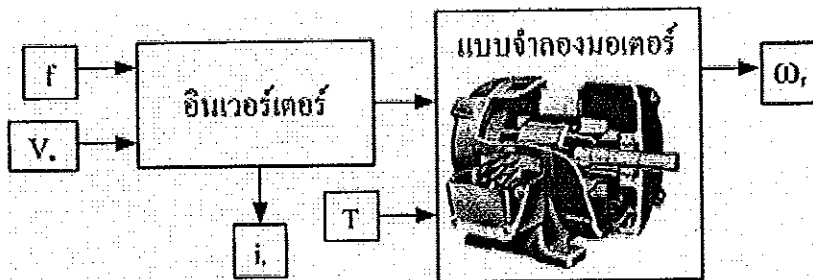


ภาพประกอบ 3-2 ระบบจำลอง MATLAB/SIMULINK ประกอบกันทุกส่วน

ขั้นตอนในการออกแบบตัวควบคุมสามารถแจกแจงขั้นตอนได้ คือ การทดสอบแบบจำลองมอเตอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ควบคุม กระแสที่สเตเตอร์ และความเร็วของมอเตอร์ โดยไม่มีตัวควบคุม ด้วยหลักการประมาณค่าแบบการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว และการประมาณค่าแบบการถดถอยพหุคูณ จากนั้นจะแสดงตัวควบคุมออกมาเป็นผังการทำงาน ซึ่งจะใช้หลักการประมาณค่าแบบการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียวในช่วงทดสอบก่อนเริ่มการควบคุม หลังจากนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระของมอเตอร์จึงใช้การประมาณค่าแบบการถดถอยพหุคูณ

3.1.1 การทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของมอเตอร์โดยไม่มีตัวควบคุม

การทดสอบหาความสัมพันธ์ของมอเตอร์โดยตัดส่วนควบคุมออก แล้วทำการป้อนความถี่ (f) (Hz) และภาระของมอเตอร์ (T) (N.m) โดยตรงดังภาพประกอบ 3-3 สามารถวัดค่าความเร็วและกระแสของมอเตอร์ ได้ดังตาราง 3-1 คือ ค่าความเร็วมอเตอร์ (ω_r) (rpm) และตาราง 3-2 คือ ค่ากระแสของมอเตอร์ (A)



ภาพประกอบ 3-3 แบบจำลองทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของมอเตอร์

ตาราง 3-1 ตารางค่าทดสอบความเร็วมอเตอร์ (rpm) ที่ความถี่ (Hz) และแรงบิด (N.m) ต่างๆ

f \ T	0	0.5	1	1.5	2	2.5
54.5455	342.6951	337.4158	331.7112	325.446	318.5622	310.8043
51.8182	325.5787	320.8318	315.6773	310.1546	304.0246	297.2531
49.0909	308.4574	304.1693	299.6033	294.6865	289.3008	283.3981
46.3636	291.3495	287.5156	283.4477	279.0904	274.3855	269.2439
43.6364	274.1708	270.807	267.2233	263.4074	259.3184	254.894
40.9091	257.073	254.1052	250.9528	247.6244	244.0783	240.2753
38.1818	239.9352	237.3283	234.6129	231.7668	228.6771	225.4447
35.4545	222.7657	220.5274	218.2495	215.781	213.1655	210.4308
32.7273	205.6743	203.7536	201.7538	199.6958	197.4982	195.2109
30	188.4695	186.8768	185.2083	183.5021	181.6317	179.7875
27.2727	171.3644	170.0372	168.8116	167.2116	165.7776	164.2618
24.5455	154.2058	153.1741	152.0526	150.9793	149.658	148.4339
21.8182	137.1096	136.2405	135.3239	134.4459	133.4781	132.4924

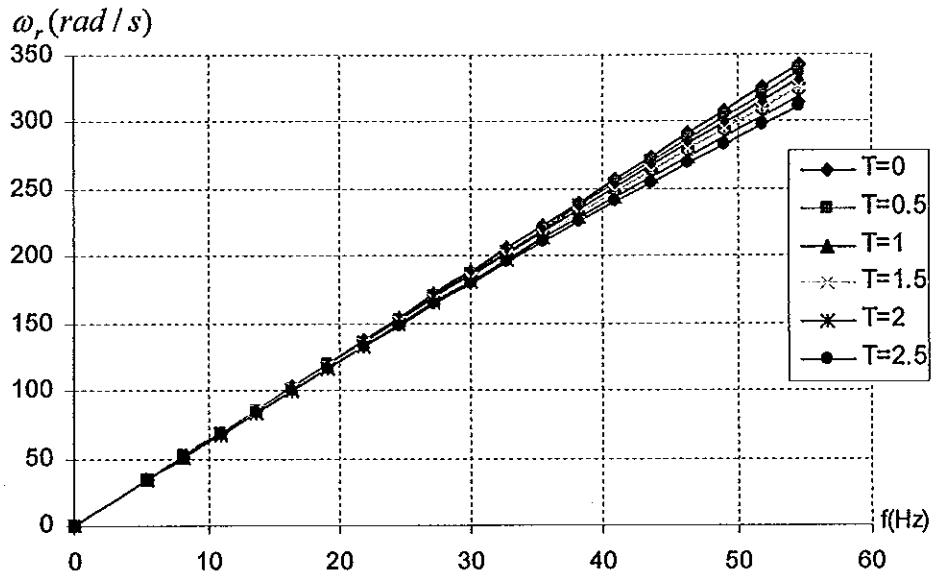
ตาราง 3-1 ตารางค่าทดสอบความถี่มอเตอร์ (rpm) ที่ความถี่ (Hz) และแรงบิด (N.m) ต่างๆ (ต่อ)

T \ f	0	0.5	1	1.5	2	2.5
19.0909	119.931	119.3699	118.6034	118.0115	117.2434	116.448
16.3636	102.8191	102.4018	101.8643	101.3936	100.7717	100.3081
13.6364	85.757	85.419	85.0074	84.6517	84.2973	83.8655
10.9091	68.5824	68.4512	68.0903	67.8379	67.605	67.494
8.1818	51.4345	51.7864	51.0966	50.9911	50.8323	50.6068
5.4545	34.4815	34.2847	35.1335	34.3517	34.9508	34.0241
0	0.3037	0.2989	0.4027	0.3086	0.1055	0.2494

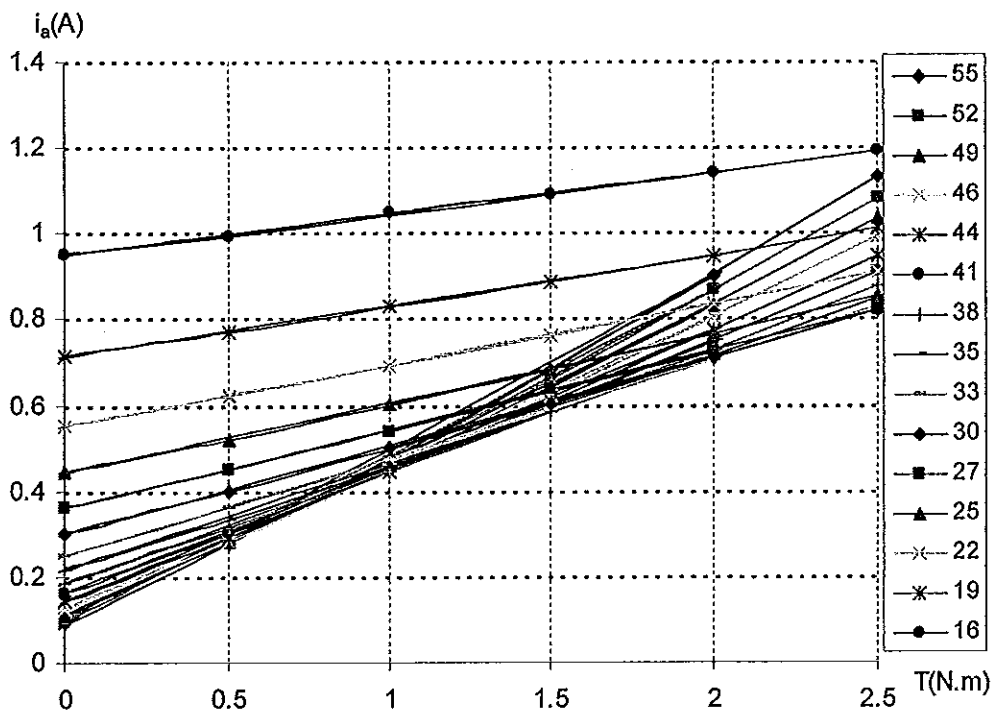
ตาราง 3-2 ตารางค่าทดสอบกระแสมอเตอร์ (A) ที่ความถี่ (Hz) และแรงบิด (N.m) ต่างๆ

T \ f	0	0.5	1	1.5	2	2.5
54.5455	0.0923	0.2795	0.4738	0.6821	0.8984	1.1301
51.8182	0.1025	0.2809	0.4677	0.6603	0.8656	1.0820
49.0909	0.1130	0.2831	0.4576	0.6395	0.8319	1.0338
46.3636	0.1260	0.2845	0.4500	0.6224	0.7998	0.9899
43.6364	0.1445	0.2916	0.4460	0.6055	0.7737	0.9457
40.9091	0.1629	0.3018	0.4438	0.5945	0.7465	0.9077
38.1818	0.1871	0.3143	0.4467	0.5844	0.7286	0.8754
35.4545	0.2171	0.3341	0.4545	0.5821	0.7138	0.8473
32.7273	0.2514	0.3617	0.4729	0.5866	0.7060	0.8283
30.0000	0.3007	0.4005	0.5001	0.6037	0.7086	0.8203
27.2727	0.3635	0.4516	0.5375	0.6335	0.7248	0.8213
24.5455	0.4433	0.5191	0.6006	0.6813	0.7650	0.8520
21.8182	0.5524	0.6224	0.6922	0.761	0.8332	0.9065
19.0909	0.7118	0.7684	0.8299	0.8877	0.9479	1.0107
16.3636	0.9489	0.9943	1.0454	1.0904	1.1410	1.1894

จากตารางข้างต้นนำมาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ ตาราง 3-1 สามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ ได้ดังภาพประกอบ 3-4 ตาราง 3-2 สามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ ได้ดัง ภาพประกอบ 3-5



ภาพประกอบ 3-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วมอเตอร์ที่ภาระต่างๆ



ภาพประกอบ 3-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเตเตอร์กับภาระมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วมอเตอร์ที่ภาระต่างๆ ดังภาพประกอบ 3-4 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (3-2) ในการประมาณค่าแบบการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเตเตอร์กับภาระมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ ดังภาพประกอบ 3-5 จะเห็นได้ว่ากระแสเตเตอร์ของมอเตอร์จะแปรผันตรงกับภาระของมอเตอร์ที่ได้รับ จึงสามารถอธิบายสมการความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรได้ดังสมการ (3-9) ในการประมาณค่าแบบการถดถอยพหุคูณ

3.1.2 การประมาณค่าแบบการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว

สมการทั่วไปของการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียวมาจากสมการความเร็วทั่วไปของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสดังสมการ(3-1)

$$\omega_r(S, f, P) = \frac{120 \cdot (1-S) \cdot f}{P} \quad (3-1)$$

เมื่อ S: ค่าสลลิปของมอเตอร์
P: จำนวนขั้วมอเตอร์
f: ความถี่ที่สเตเตอร์มอเตอร์

โดยค่าสลลิป(S) จะขึ้นอยู่กับ

- กำลังที่สูญเสียในขดลวดสเตเตอร์
- กำลังสูญเสียในแกนเหล็กสเตเตอร์
- กำลังที่สูญเสียในขดลวดโรเตอร์
- กำลังที่สูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลม
- กำลังที่เพลารอเตอร์(ภาระของมอเตอร์)

มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังที่สูญเสียที่โรเตอร์

เมื่อนำมาเขียนเป็นสมการทั่วไปของการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว

$$\omega_r(f) = m_f \cdot f + C + e \quad (3-2)$$

เมื่อ m_f : สัมประสิทธิ์ความชันของความสัมพันธ์

C: ค่าคงที่จุดตัดบนแกน ω_r

e: ค่าความผิดพลาด

เมื่อแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของค่าความผิดพลาด ในแต่ละจุดข้อมูลจะได้

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (\omega_{r_i} - C - m_f \cdot f_i) \quad (3-3)$$

โดยที่ค่า n แทนจำนวนข้อมูลทั้งหมด การหาค่ากำลังสองของความผิดพลาดน้อยสุด โดยสมการจะอยู่ในรูป

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (\omega_{r_i} - C - m_f \cdot f_i)^2 \quad (3-4)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์ m_f และ C จะใช้วิธีอนุพันธ์ย่อย โดยทำอนุพันธ์ย่อยสมการที่ (3-4) เทียบกับตัวแปรทั้งสองตัว เมื่อต้องการค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด ดังนั้นค่าอนุพันธ์ย่อยจะต้องเท่ากับ 0 ดังนั้นเมื่อทำการแก้สมการทั้งสองจะได้สัมประสิทธิ์ m_f และ C ดังนี้

$$m_f = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n f_i \cdot \omega_{r_i} - \sum_{i=1}^n f_i \cdot \sum_{i=1}^n \omega_{r_i}}{n \cdot \sum_{i=1}^n f_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n f_i \right)^2} \quad (3-5)$$

$$C = \bar{\omega}_r - m_f \cdot \bar{f} \quad (3-6)$$

3.1.3 การประมาณค่าแบบการถดถอยพหุคูณ

จากสมการทั่วไปของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (3-1) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความถี่ที่ภาระของมอเตอร์ต่างๆกันดังภาพประกอบ 3-4 จะแสดงให้เห็นว่าค่า S ในสมการ (3-1) จะมีค่าแปรผันตรงกับภาระของมอเตอร์ที่ได้รับ เมื่อนำมาเขียนเป็นสมการทั่วไปของการถดถอยพหุคูณจะได้

$$\omega_r(T, f) = (m_f + m_T \cdot T) \cdot f + C + e \quad (3-7)$$

จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างภาระของมอเตอร์กับกระแสที่สเตเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ในหัวข้อก่อนหน้านี้ จึงสามารถเขียนสมการทั่วไปของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในการถดถอยแบบพหุคูณเป็น

$$\omega_r(i_a, f) = (m_f + m_T \cdot (k_a \cdot i_a + C_i)) \cdot f + C + e \quad (3-8)$$

จัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\omega_r = m_1 \cdot f + m_2 \cdot i_a \cdot f + C + e \quad (3-9)$$

โดยที่ $m_1 = m_f + m_T \cdot C_i$ (3-10)

$$m_2 = m_T \cdot k_a \quad (3-11)$$

เมื่อแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของค่าความผิดพลาด ในแต่ละจุดข้อมูลจะได้

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (\omega_{r_i} - m_1 \cdot f_i - m_2 \cdot i_{ai} \cdot f_i - C) \quad (3-12)$$

โดยที่ค่า n แทนจำนวนข้อมูลทั้งหมด การหาค่ากำลังสองของความผิดพลาดน้อยสุดโดยสมการจะอยู่ในรูป

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (\omega_{r_i} - m_1 \cdot f_i - m_2 \cdot i_a \cdot f_i - C)^2 \quad (3-13)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์ m_1 , m_2 และ C จะใช้วิธีการหาอนุพันธ์ย่อยโดยทำอนุพันธ์ย่อยสมการที่ (3-13) เทียบกับตัวแปรทั้งสามตัว เมื่อต้องการค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด ดังนั้นค่าอนุพันธ์ย่อยจะต้องเท่ากับ 0 ดังนั้นเมื่อแก้สมการทั้งสองจะได้สัมประสิทธิ์ m_1 , m_2 และ C ดังนี้

$$A = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum f & \sum i_a \cdot f \\ \sum f & \sum f^2 & \sum i_a \cdot f^2 \\ \sum i_a \cdot f & \sum i_a \cdot f^2 & \sum i_a^2 \cdot f^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum \omega_r & \sum f & \sum i_a \cdot f \\ \sum \omega_r \cdot f & \sum f^2 & \sum i_a \cdot f^2 \\ \sum \omega_r \cdot i_a \cdot f & \sum i_a \cdot f^2 & \sum i_a^2 \cdot f^2 \end{vmatrix}} \quad (3-14)$$

$$C = \frac{\begin{vmatrix} \sum \omega_r & \sum f & \sum i_a \cdot f \\ \sum \omega_r \cdot f & \sum f^2 & \sum i_a \cdot f^2 \\ \sum \omega_r \cdot i_a \cdot f & \sum i_a \cdot f^2 & \sum i_a^2 \cdot f^2 \end{vmatrix}}{A} \quad (3-15)$$

$$m_1 = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum \omega_r & \sum i_a \cdot f \\ \sum f & \sum \omega_r \cdot f & \sum i_a \cdot f^2 \\ \sum i_a \cdot f & \sum \omega_r \cdot i_a \cdot f & \sum i_a^2 \cdot f^2 \end{vmatrix}}{A} \quad (3-16)$$

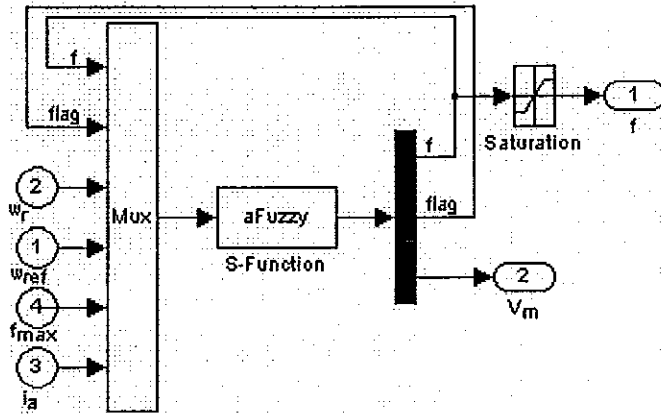
$$m_2 = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum \omega_r & \sum \omega_a \cdot f \\ \sum f & \sum \omega_r \cdot f & \sum \omega_a \cdot f^2 \\ \sum i_a \cdot f & \sum \omega_r \cdot i_a \cdot f & \sum \omega_a^2 \cdot f^2 \end{vmatrix}}{A} \quad (3-17)$$

$$\text{โดยที่ } \sum x = \sum_{i=1}^n x_i$$

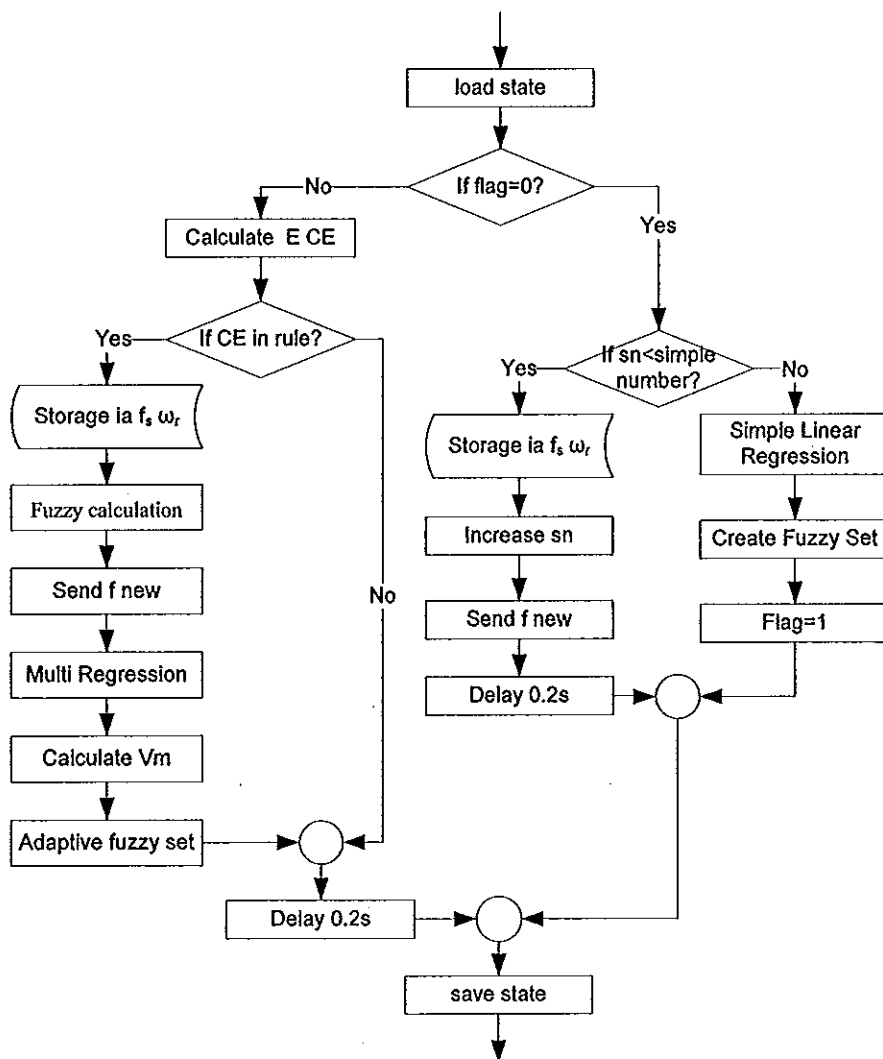
3.1.4 ฝั่งการทำงานส่วนควบคุมของระบบจำลองการทำงาน

ตัวควบคุมดังภาพประกอบ 3-6 โดยมีสัญญาณอินพุต 6 ค่า คือ ความถี่ก่อนหน้า สัญญาณบอกสถานะ (flag) ความเร็วมอเตอร์ปัจจุบัน ความเร็วอ้างอิง ความถี่สูงสุด และกระแสมอเตอร์ปัจจุบัน ตามลำดับบนลงล่าง โดยสัญญาณบอกสถานะใช้สำหรับบอกตัวควบคุมว่าเป็นช่วงทดสอบก่อนเริ่มการควบคุมระบบ เพื่อหาตัวแปรควบคุมเบื้องต้น หรือช่วงที่ใช้ตัวแปรควบคุมใน

การควบคุมระบบ สัญญาณเอาต์พุต 3 ค่า คือ ความถี่ควบคุม สัญญาณบอกสถานะ และแรงดันควบคุม ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3-6 ระบบจำลอง MATLAB/SIMULINK ส่วนตัวควบคุม



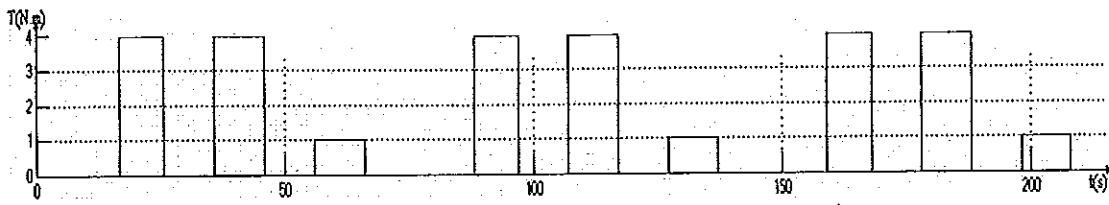
ภาพประกอบ 3-7 ผังการทำงานของตัวควบคุม

การทำงานของตัวควบคุมในระบบจำลองการทำงาน สามารถแสดงผังการทำงานของตัวควบคุมดังกล่าวประกอบ 3-7 ช่วงก่อนเริ่มทำงานจะต้องมีการกำหนดค่าทั่วไปของมอเตอร์และค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม (flag, sample number, ความถี่สูงสุด) ก่อนเริ่มการทำงาน ถ้าเริ่มต้น flag เป็น 0 จะเริ่มต้นด้วยการทดสอบมอเตอร์ ตามจำนวนสุ่มตัวอย่าง (sample number) ที่กำหนดไว้ จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ควบคุมกับความเร็วของมอเตอร์ ด้วยหลักการประมาณค่าแบบการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว และสร้างตัวควบคุมแบบพีซซีลอจิกขึ้น โดยให้เอาท์พุทของพีซซีเป็นไปตามความสัมพันธ์ที่หาได้ หลังจากนั้นจึงกำหนดค่า flag เป็น 1 จะเป็นการควบคุมระบบให้เข้าสู่เป้าหมาย และจะทำการเก็บค่าของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง แล้วนำมาหาค่าความสัมพันธ์ใหม่ระหว่างความถี่ควบคุม กระแสที่สเตเตอร์ และความเร็วของมอเตอร์ ด้วยวิธีการประมาณค่าแบบการถดถอยแบบพหุคูณ ทำการปรับตัวควบคุมพีซซีให้มีเอาท์พุทเป็นไปตามความสัมพันธ์ใหม่ที่หาได้

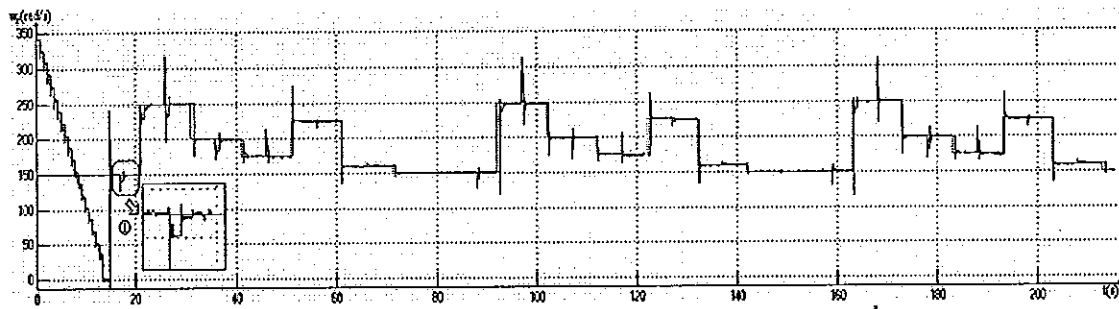
ทั้งหมดนี้คือ การหาตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยหลักการประมาณค่าแบบการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว และการประมาณค่าแบบการถดถอยแบบพหุคูณ โดยผลการทดลองจะแสดงในหัวข้อถัดไป

3.2 ผลการจำลอง

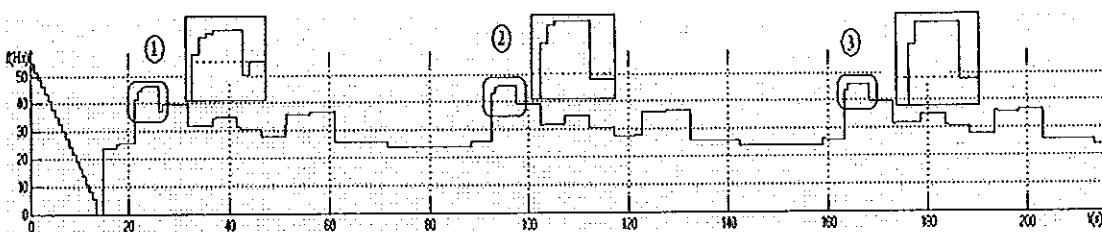
ผลการจำลองของระบบควบคุมแบบปรับเองได้ โดยผลของการจำลองระบบควบคุมแบบปรับเองได้แสดงในภาพประกอบ 3-8 กราฟความสัมพันธ์แรงบิดภาระของมอเตอร์กับแกนเวลา ภาพประกอบ 3-9 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วมอเตอร์และความเร็วมอเตอร์ที่ต้องการกับแกนเวลา และภาพประกอบ 3-10 กราฟความสัมพันธ์ความถี่ควบคุมมอเตอร์กับแกนเวลา โดยการจำลองจะควบคุมให้มีความเร็วอ้างอิงและภาระของมอเตอร์ซ้ำแบบเดิมจำนวน 3 รอบ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง โดยจะขยายภาพประกอบดังกล่าวเพิ่มให้สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของระบบปรับด้วยตัวเองได้ชัดเจนมากขึ้น ประกอบด้วย ภาพประกอบ 3-11 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วของมอเตอร์กับแกนเวลาในช่วงทดสอบมอเตอร์ ภาพประกอบ 3-12 ผลการควบคุมในรอบที่ 1 ภาพประกอบ 3-13 ผลการควบคุมในรอบที่ 2 และภาพประกอบ 3-14 ผลการควบคุมในรอบที่ 3



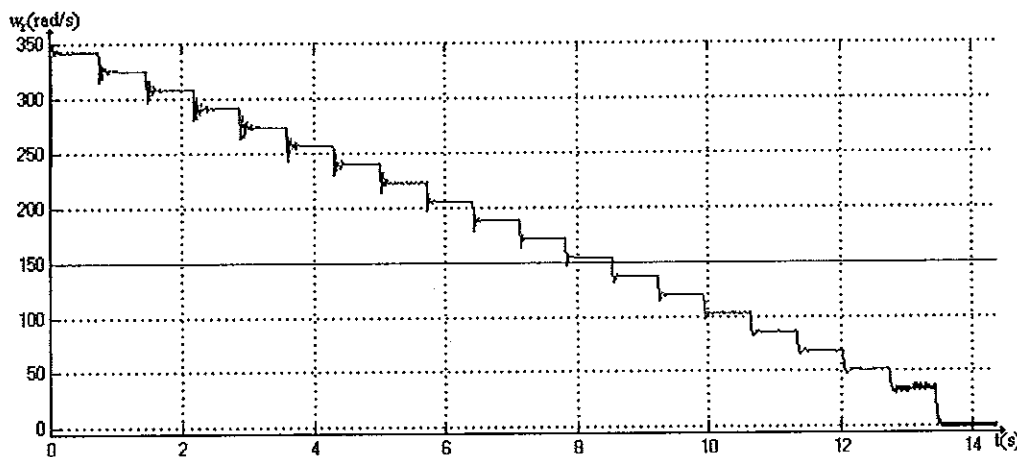
ภาพประกอบ 3-8 กราฟความสัมพันธ์แรงบิดภาระของมอเตอร์กับแกนเวลา



ภาพประกอบ 3-9 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วมอเตอร์และความเร็วมอเตอร์ที่ต้องการกับแกนเวลา



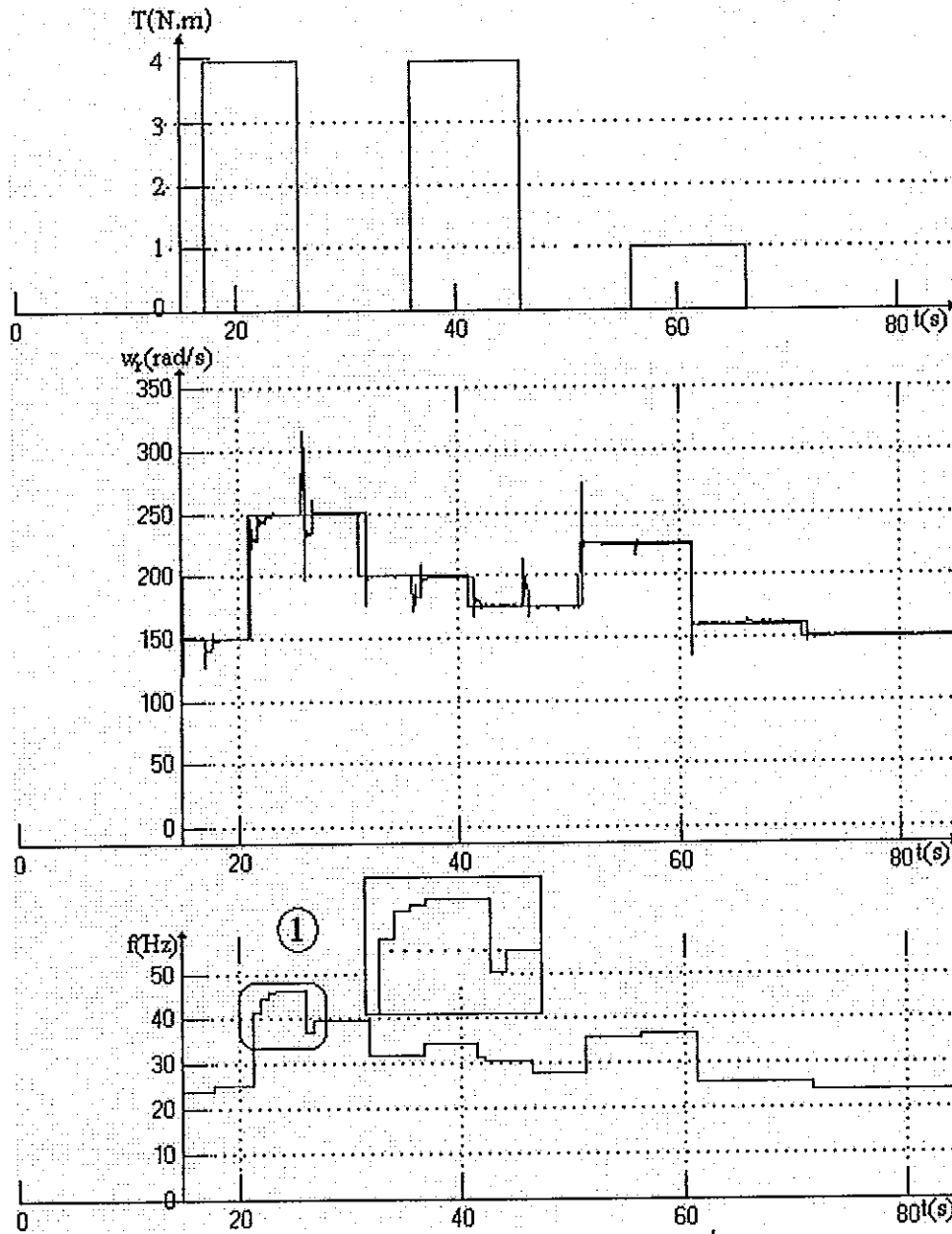
ภาพประกอบ 3-10 กราฟความสัมพันธ์ความถี่ควบคุมมอเตอร์กับแกนเวลา



ภาพประกอบ 3-11 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วของมอเตอร์กับแกนเวลาในช่วงทดสอบมอเตอร์

ภาพประกอบ 3-11 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วของมอเตอร์กับแกนเวลาในช่วงทดสอบมอเตอร์ แสดงช่วงที่ระบบควบคุมทำการส่งความถี่ออกไปทดสอบมอเตอร์โดยกำหนดค่า

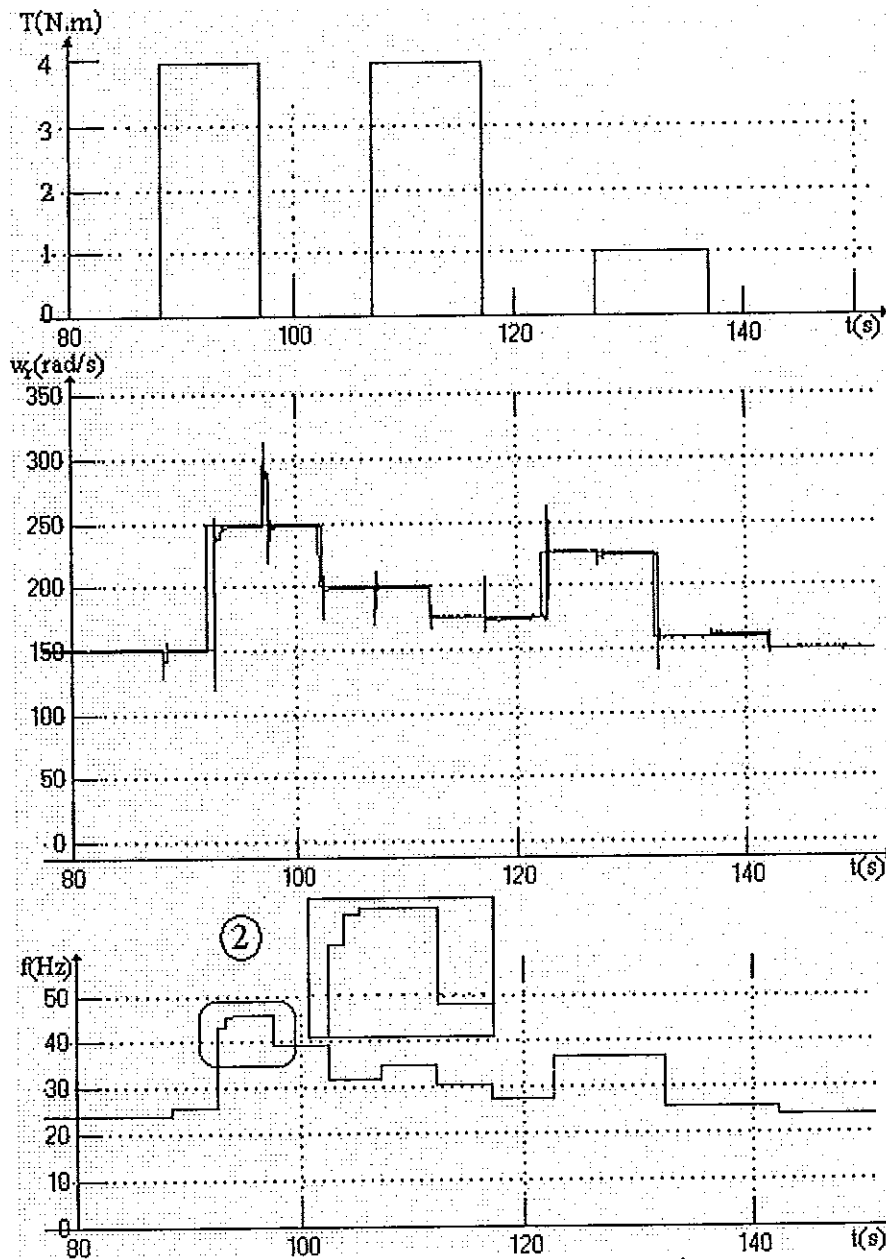
ทดสอบไว้เท่ากับ 20 ค่าเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ควบคุมและความเร็วของมอเตอร์ ด้วยวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว เพื่อใช้ค่าที่ได้ในการควบคุมการทำงานในช่วงแรก เพราะสามารถหาตัวแปรควบคุมที่มีความใกล้เคียงกับระบบ ซึ่งการทำงานตามผังงานดังที่กล่าวมา



ภาพประกอบ 3-12 ผลการควบคุมในรอบที่ 1

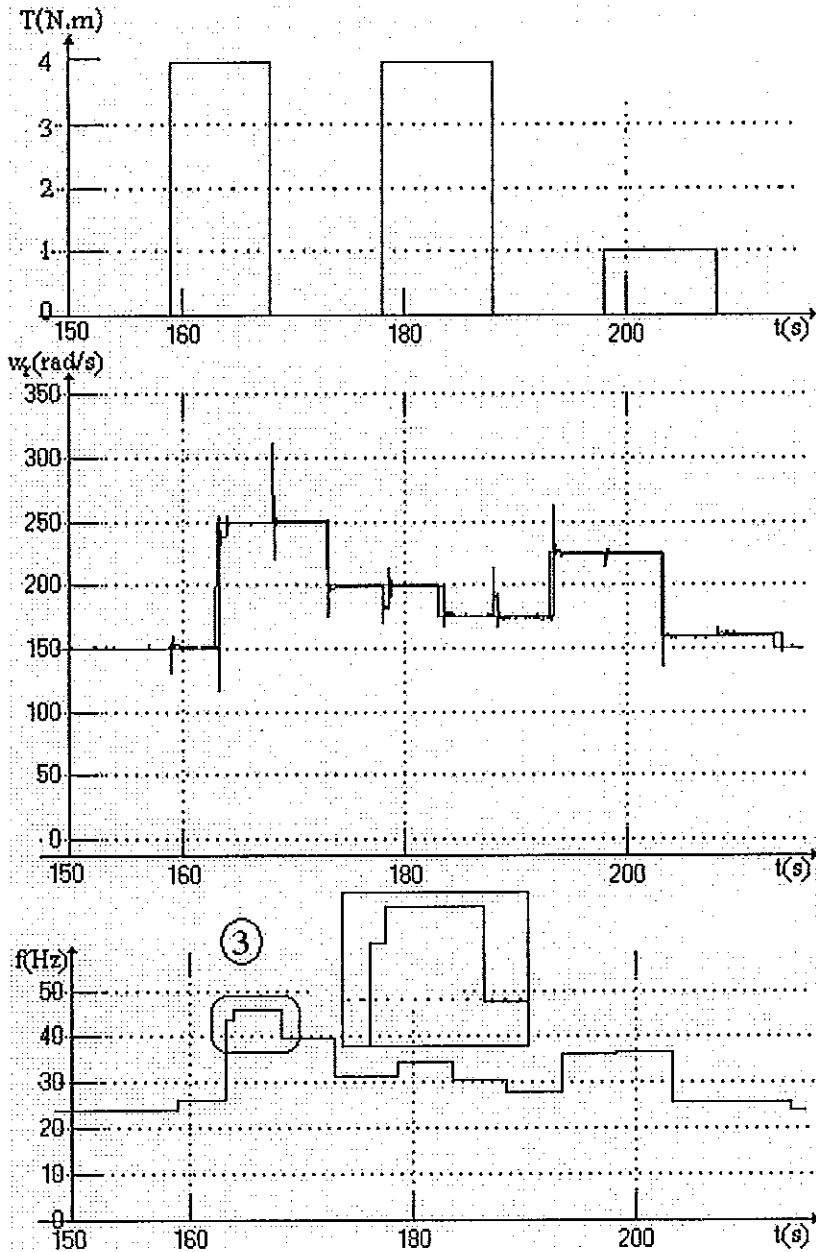
ผลการจำลองในช่วงแรกหลังจากการทดสอบเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ควบคุมและความเร็วของมอเตอร์ ด้วยวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว ดังภาพประกอบ 3-12 วินาทีที่ 17 เป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 0 N.m ไปเป็น 4 N.m ทำให้ความเร็วรอบ

มอเตอร์ลดลงชั่วขณะหนึ่งจากนั้นตัวควบคุมก็ปรับความเร็วให้เข้าสู่ความเร็วอ้างอิงได้โดยปรับค่าเพียงครั้งเดียว หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนความเร็วอ้างอิงเป็น 250 rad/s แต่แรงบิดภาระยังเป็น 4 N.m ช่วงนี้ระบบควบคุมยังใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ควบคุมและความเร็วของมอเตอร์ จากวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียวในการปรับความเร็วให้เข้าสู่ความเร็วอ้างอิงต้องปรับค่าความถี่ถึง 4 ครั้ง



ภาพประกอบ 3-13 ผลการควบคุมในรอบที่ 2

ผลการควบคุมในรอบที่ 2 ดังภาพประกอบ 3-13 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการควบคุมในรอบแรก จะเห็นว่าตัวควบคุมใช้จำนวนครั้งในการปรับความเร็วให้เข้าสู่ความเร็วเป้าหมายน้อยลงเหลือ 3 ครั้ง เนื่องจากระบบควบคุมได้นำวิธีการประมาณค่าการถดถอยแบบพหุคูณมาใช้ ทำให้ระบบควบคุมสามารถทำงานได้ถูกต้องมากขึ้น



ภาพประกอบ 3-14 ผลการควบคุมในรอบที่ 3

ผลการควบคุมในรอบที่ 3 ดังภาพประกอบ 3-14 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการควบคุมในรอบที่ 2 จะเห็นว่าตัวควบคุมใช้จำนวนครั้งในการปรับความเร็วให้เข้าสู่ความเร็ว

เป้าหมายน้อยลงเหลือ 2 ครั้ง เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการประมาณค่าการถดถอยแบบพหุคูณมีมากขึ้น ทำให้ค่าที่ได้จากการประมาณมีความถูกต้องมากขึ้น จากผลการจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถพัฒนาตัวเองให้สามารถควบคุมความเร็วได้อย่างเหมาะสม

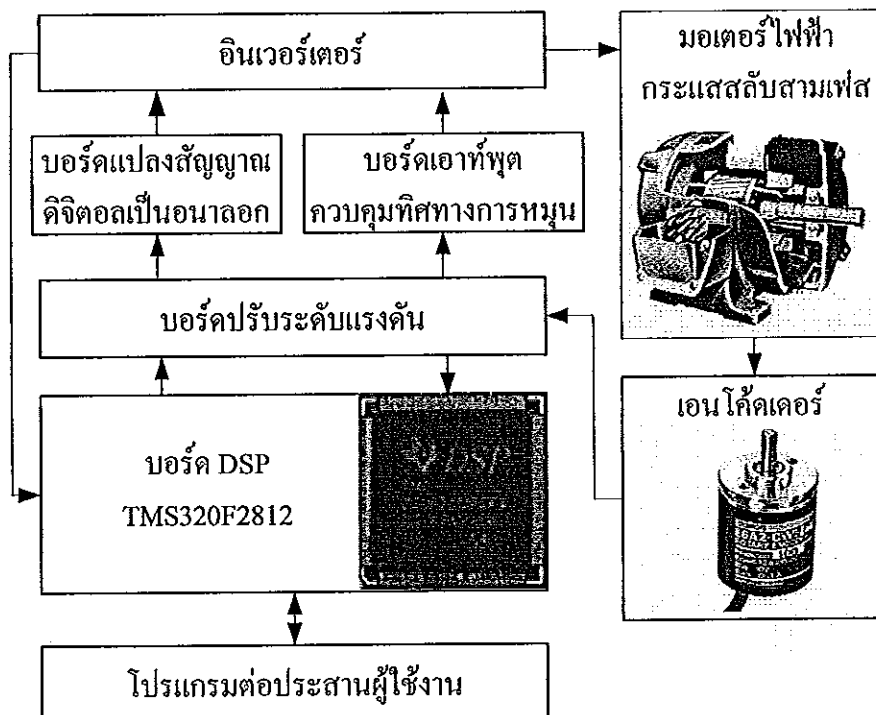
บทที่ 4

การทดสอบการทำงานของระบบควบคุม

ผลการจำลองระบบในบทที่ผ่านมา แบบจำลองระบบควบคุมความเร็วโดยระบบปรับตัวเองได้สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อศึกษาการทำงานและการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งได้ผลตอบสนองที่เหมาะสม จึงนำหลักการดังกล่าวมาใช้ในการควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยระบบปรับตัวเองสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อสนับสนุนความถูกต้องของหลักการที่ได้จากการทำแบบจำลองระบบควบคุมที่ได้กล่าวมาในบทก่อนหน้า โดยจะอธิบายส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้งาน และการทำงานของระบบควบคุม

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

การควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยระบบปรับตัวเองสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถแสดงได้ภาพประกอบ 4-1 อุปกรณ์ต่างๆ สามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก

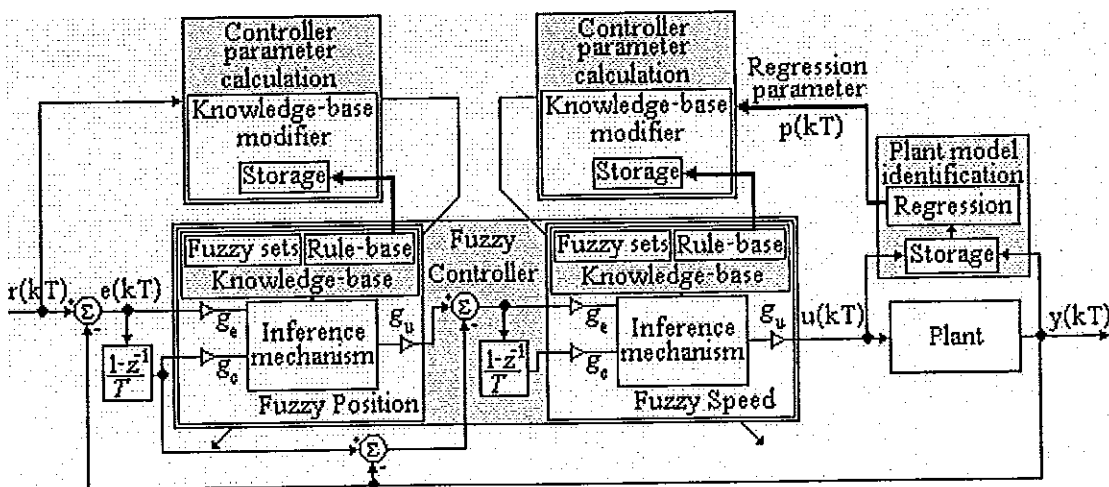


ภาพประกอบ 4-1 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยระบบปรับตัวเองสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

4.2 การทำงานของระบบควบคุม

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึง วิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่ใช้สำหรับการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมความเร็ว, และการควบคุมตำแหน่ง ดังภาพประกอบ 4-2 จากนั้นจะอธิบายถึงผังงานการทำงานของระบบควบคุม

ระบบฟัซซี่ควบคุมประกอบด้วย ฟัซซี่ตำแหน่งและฟัซซี่ความเร็ว ฟัซซี่ตำแหน่งจะมีอินพุตค่านวนจากตำแหน่งเป้าหมายและตำแหน่งของระบบ ส่วนเอาต์พุตฟัซซี่ตำแหน่ง คือ ความเร็วอ้างอิงของมอเตอร์ ฟัซซี่ความเร็วจะมีอินพุตค่านวนจากความเร็วอ้างอิงและความเร็วของระบบ ส่วนเอาต์พุตของฟัซซี่ความเร็ว คือ ความถี่ควบคุมส่งไปควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ โดยการทำงานจะหาค่าคลาดเคลื่อนตำแหน่งเป้าหมายส่งให้กับฟัซซี่ตำแหน่งตัดสินใจหาค่าความเร็วอ้างอิงของมอเตอร์ และหาค่าคลาดเคลื่อนของความเร็วมอเตอร์กับความเร็วอ้างอิงส่งค่าความคลาดเคลื่อนความเร็วนั้นให้ฟัซซี่ความเร็วตัดสินใจหาความถี่ไปควบคุมระบบการทำงาน ส่วนการปรับปรุงตัวควบคุมฟัซซี่ความเร็วแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกหาตัวแปรควบคุมเริ่มต้นให้กับระบบควบคุม โดยจะส่งความถี่ควบคุมมอเตอร์ไปทดสอบมอเตอร์จำนวน 20 ค่า และเก็บค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ความถี่นั้น จากนั้นใช้หลักการถดถอยเส้นตรงเชิงเดียว หาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ควบคุม และความเร็วของมอเตอร์ ขั้นตอนที่สองควบคุมการทำงานของระบบเมื่อการะมีการเปลี่ยนแปลงก็จะมีการเก็บค่าความถี่ควบคุม, กระแสที่สเตเตอร์ และความเร็วมอเตอร์ของระบบมาทำการประมาณค่าด้วยหลักการถดถอยพหุคูณ ค่าความสัมพันธ์ที่หาได้นำไปปรับปรุงระบบฟัซซี่ควบคุมความเร็วให้ระบบอินพุตฟัซซี่ให้ค่าเอาต์พุตตามความสัมพันธ์ที่ได้รับ



ภาพประกอบ 4-2 ระบบควบคุมความเร็วและตำแหน่ง

โครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกประกอบด้วย ฟuzzyฟิเคชัน การอนุมาน และการดีฟuzzyฟิเคชัน โดยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกที่ใช้จะอนุมานในแบบแมนดานิ (Mamdani) ที่มีตัวแปรอินพุต 2 ตัว คือ ค่าคลาดเคลื่อน (E) และค่าการเปลี่ยนแปลงค่าคลาดเคลื่อน (CE) โดยมีเอาต์พุต (Y) ตัวแปรเหล่านี้นำไปออกแบบกฎการควบคุมฟuzzyลอจิก ในการออกแบบตัวควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้ฟuzzyลอจิกได้ทำการออกแบบดังนี้

4.2.1 การควบคุมความเร็ว

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์สามเฟสเหนี่ยวนำจะควบคุมผ่านอินเวอร์เตอร์ โดยมีบิตควบคุมทิศทางจำนวน 2 บิต และควบคุมความเร็วด้วยการส่งสัญญาณอัลตราลอกไปควบคุมความถี่อินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายไฟให้กับมอเตอร์สามเฟสเหนี่ยวนำ

4.2.1.1 การฟuzzyฟิเคชันของอินพุต

การสร้างฟuzzyเคชันของอินพุต แบ่งเป็นการหาขอบเขตเชิงภาษาของอินพุต และทำการสร้างระดับความเป็นสมาชิกที่เป็นไปได้ ประกอบด้วยอินพุต 2 ตัว ได้แก่

1. ค่าผิดพลาดของความเร็ว (Error, E_e) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าความเร็วเป้าหมายกับความเร็วที่เคลื่อนที่จริงของมอเตอร์

$$\text{Error } (E_e) = \omega_{ref} \text{ (target Speed)} - \omega_r \text{ (motor Speed)} \quad (4-1)$$

2. ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของความเร็ว (Change of error, CE_e) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าความผิดพลาดของความเร็วล่าสุด (current error) กับค่าความผิดพลาดของความเร็วก่อนหน้านั้น (previous error)

$$\text{Change of error } (CE_e) = E_c \text{ (current error)} - E_p \text{ (previous error)} \quad (4-2)$$

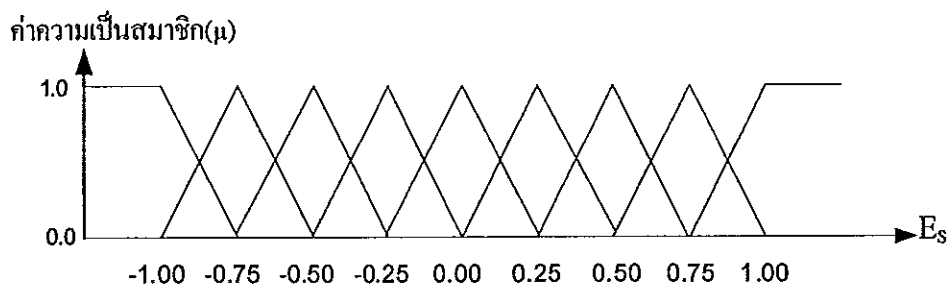
การหาขอบเขตเชิงภาษาของอินพุตได้จากการคำนวณของค่าทดสอบมอเตอร์ในช่วงเริ่มต้น โดยขอบเขตเชิงภาษาของอินพุตของ E_e ของระบบควบคุมได้ถูกกำหนดไว้ในรูปของตัวคูณ ดังตาราง 4-1 เพื่อนำไปคูณกับค่าความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ที่ทดสอบ จะได้ขอบเขตเชิงภาษาของอินพุตของ E_e ของระบบควบคุมที่ใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับตัวนั้น ค่าความเป็นสมาชิกของ E_e จะใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4-3 และค่าควอนไทซ์ (quantized value) ของ CE_e ที่กำหนดขึ้น เพื่อลดจำนวนของอินพุตที่จะนำมาทำฟuzzyฟิเคชัน ได้กำหนดไว้ในตาราง 4-2 โดยตัวแปรทางอินพุตทั้งสองตัวนี้ ต้องนำมาผ่านขั้นตอนของการฟuzzyฟิเคชันในรูปของฟuzzyของอินพุต

ตาราง 4-1 ขอบเขตเชิงภาษาของอินพุตของ E_s ของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์

Error Speed (E_s , pps.)
$1.00 \times \omega_{\max} \leq E_s$
$0.75 \times \omega_{\max} \leq E_s < 1.00 \times \omega_{\max}$
$0.50 \times \omega_{\max} \leq E_s < 0.75 \times \omega_{\max}$
$0.25 \times \omega_{\max} \leq E_s < 0.50 \times \omega_{\max}$
$-0.25 \times \omega_{\max} \leq E_s < 0.25 \times \omega_{\max}$
$-0.50 \times \omega_{\max} \leq E_s < -0.25 \times \omega_{\max}$
$-0.75 \times \omega_{\max} \leq E_s < -0.50 \times \omega_{\max}$
$-1.00 \times \omega_{\max} \leq E_s < -0.75 \times \omega_{\max}$
$E_s < -1.00 \times \omega_{\max}$

ตาราง 4-2 ค่าควอนไทซ์ของ CE_s ของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์

Change of error Speed (CE, pps.)	Quantized value
$0.02 \times \omega_{\max} \geq CE_s > 0.01 \times \omega_{\max}$	0.5
$0.01 \times \omega_{\max} \geq CE_s \geq -0.01 \times \omega_{\max}$	1
$-0.01 \times \omega_{\max} > CE_s \geq -0.02 \times \omega_{\max}$	0.5

ภาพประกอบ 4-3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุต E_s

4.2.1.2 การสร้างเงื่อนไขหรือกฎการควบคุม

การสร้างเงื่อนไขหรือกฎการควบคุมใช้หลักการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว โดยนำขอบเขตเชิงภาษาของอินพุต E_s มาใช้ร่วมกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยหลักการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว โดยการสร้างขอบเขตเชิงภาษาของเอาต์พุต f ได้จากการคำนวณดังสมการ (4-3)

$$f_{\mu} = \frac{(E_i - c)}{(E_0 - c)} \times Q(CE_i) \quad (4-3)$$

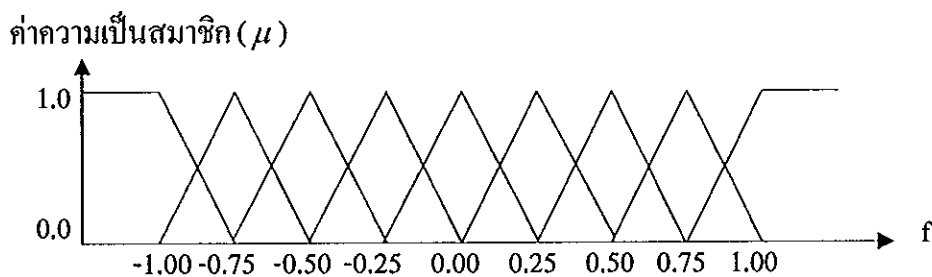
E_i คือ ขอบเขตเชิงภาษาของอินพุต E_i

$Q(CE)$ คือ ค่าควอนไทล์ของอินพุต CE_i

c คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยหลักการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว

จากขอบเขตเชิงภาษาสามารถแสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเอาต์พุตฟัซซี

ความเร็ว ได้ดังภาพประกอบ 4-4



ภาพประกอบ 4-4 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเอาต์พุตฟัซซีความเร็ว

ขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างเงื่อนไขหรือกฎการควบคุม เพื่อนำมาใช้ในการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ให้สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ตามต้องการ โดยกฎการควบคุมนี้จะเป็นส่วนในการกำหนดให้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกทำการควบคุม เมื่อมอเตอร์มีความเร็วไม่ตรงกับความเร็วอ้างอิง (ω_{ref}) โดยค่าเอาต์พุตฟัซซีนี้จะถูกนำไปควบคุมความเร็วมอเตอร์ต่อไป

4.2.1.3 การดีฟัซซิฟิเคชันของเอาต์พุต และการกำหนดวิธีการรวมผลของฟัซซีความเร็ว

การดีฟัซซิฟิเคชันของเอาต์พุต และการกำหนดวิธีการรวมผลของฟัซซีความเร็ว พิจารณาความเป็นไปได้ของค่าเอาต์พุต จะเห็นว่าในแต่ละอินพุตจะได้ค่าเอาต์พุตฟัซซีออกมาหลายค่า จึงต้องหาค่าที่แม่นยำเพียงค่าเดียว เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตที่แท้จริงของตัวควบคุม ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีการหาค่าศูนย์กลางเพื่อหาค่าเซนทรอยด์ โดยหาได้จากสูตร

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i \times Y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (4-4)$$

เมื่อ Y คือ เอาต์พุตของแต่ละขอบเขตสมาชิก

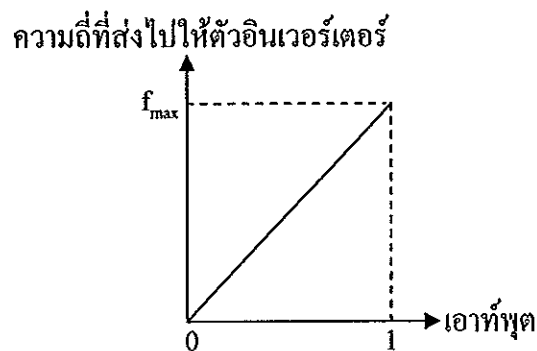
μ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละเอาต์พุต

n คือ จำนวนสมาชิกทั้งหมด

เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในทุกๆกรณีที่สามารถเกิดขึ้น โดยใช้เงื่อนไขตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น จะได้ผลลัพธ์เอาต์พุตที่นำไปเปรียบเทียบหาค่าความถี่ควบคุมตัวอินเวอร์เตอร์ต่อไป

4.2.1.4 การเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตที่หาได้

เอาต์พุตที่ได้จะมีค่าแปรผันตรงกับความถี่ที่จะส่งไปกับตัวอินเวอร์เตอร์ ดังภาพประกอบ 4-5 ส่วนค่าที่เป็นลบจะเป็นการหมุนที่กลับทิศทาง ซึ่งมีบิตควบคุมทิศทางแยกออกจากความถี่ที่ส่งไปให้กับตัวอินเวอร์เตอร์ จากค่าเอาต์พุตทำให้การควบคุมมอเตอร์ให้มีความเร็วตามเป้าหมายที่ต้องการ

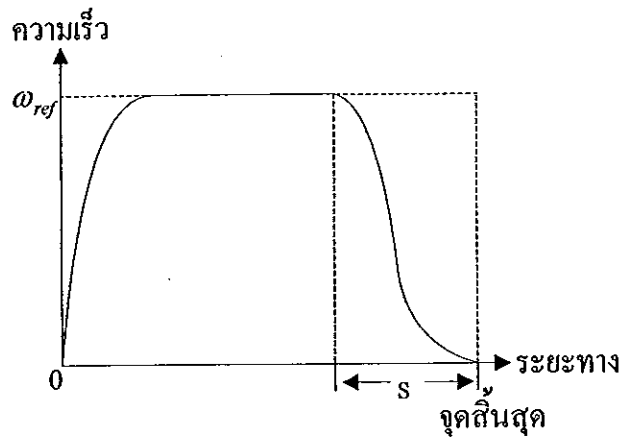


ภาพประกอบ 4-5 การเปรียบเทียบเอาต์พุตการควบคุมความเร็วที่หาได้

ระบบทดสอบตัวอินเวอร์เตอร์รับสัญญาณควบคุมเป็นอนาลอก ซึ่งสัญญาณอนาลอกนี้จะถูกสร้างมาจากไอซี DAC0800

4.2.2 การควบคุมตำแหน่ง

หลักการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสในการทดสอบออกแบบ ซึ่งจะทำงานเมื่อมอเตอร์เข้าสู่ระยะ S ที่กำหนดไว้ โดย S ได้มากจากการคำนวณในช่วงรับข้อมูลตำแหน่ง โดยใช้พีชชีเซตที่มีเอาต์พุตเป็นความเร็วของมอเตอร์ หลักการออกแบบพีชชีควบคุมตำแหน่งออกแบบให้มีเอาต์พุตดังภาพประกอบ 4-6 โดยจะส่งค่าเอาต์พุตไปให้พีชชีควบคุมความเร็วต่อไป



ภาพประกอบ 4-6 กราฟการเปรียบเทียบความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ของฟิชซีตำแหน่ง

4.2.2.1 การฟิชซีฟิเคชันของอินพุต

การสร้างฟิชซีเคชันของอินพุต แบ่งเป็นการหาขอบเขตเชิงภาษาของอินพุต และทำการสร้างระดับความเป็นสมาชิกที่เป็นไปได้

อินพุตของระบบควบคุมตำแหน่ง ประกอบด้วยอินพุต 2 ตัว ได้แก่

1. ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (Error, E_p) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างตำแหน่งเป้าหมาย (target position, P_t) กับตำแหน่งที่เคลื่อนที่จริงของมอเตอร์ (motor position, P_m)

$$\text{Error } (E_p) = P_t \text{ (target position)} - P_m \text{ (motor position)} \quad (4-5)$$

2. ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (Change of error, CE_p) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่าง ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งล่าสุด (current error, E_c) กับค่าความผิดพลาดของตำแหน่งก่อนหน้านั้น (previous error, E_p)

$$\text{Change of error } (CE_p) = (\text{current error}) - E_p \text{ (previous error)} \quad (4-6)$$

การหาขอบเขตเชิงภาษาของอินพุตความผิดพลาดตำแหน่ง E_p จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วเป้าหมายที่ต้องการ โดยจะกำหนดขอบเขตเชิงภาษาตามสมการ

$$v^2 = u^2 + 2as \quad (4-7)$$

ซึ่งค่า P_{max} จะให้มีความเท่ากับ $P_{max} = 2s$ เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถเข้าสู่เป้าหมายได้ โดยค่าควอนไทซ์ของ E_p ของระบบควบคุมได้ถูกกำหนดไว้ในรูปของตัวคูณ เมื่อได้ค่าจากการคำนวณจะนำไปคูณกับค่าควอนไทซ์ของ E_p จะได้ฟิชซีอินพุตของ E_p ที่ใช้กับการควบคุม

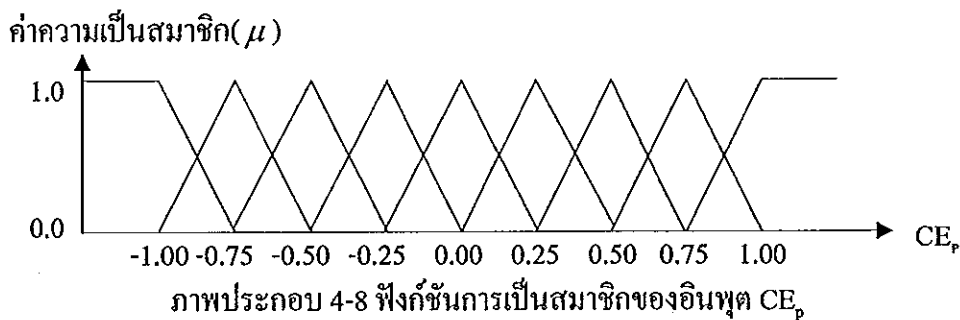
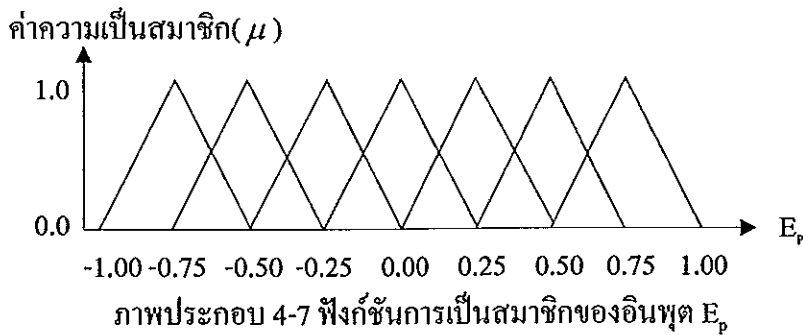
ตำแหน่งของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยตัวแปรทางอินพุตทั้งสองตัวนี้ ต้องนำมาขึ้นตอนของการฟัซซีฟิเคชันในรูปของฟัซซีของอินพุต โดยการเปรียบเทียบค่าตัวแปรทางอินพุตกับตาราง 4-1 ซึ่งเป็นค่าควอนไทซ์ (quantized value) ที่กำหนดขึ้น ทำให้สามารถลดจำนวนของอินพุตที่จะนำมาทำฟัซซีฟิเคชันได้

ตาราง 4-3 ค่าควอนไทซ์ของอินพุตของ E_p ของระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์

Error Speed (E_p , mm.)	Quantized value
$0.75 \times P_{\max} \leq E_p < 1.00 \times P_{\max}$	3
$0.50 \times P_{\max} \leq E_p < 0.75 \times P_{\max}$	2
$0.25 \times P_{\max} \leq E_p < 0.50 \times P_{\max}$	1
$-0.25 \times P_{\max} \leq E_p < 0.25 \times P_{\max}$	0
$-0.50 \times P_{\max} \leq E_p < -0.25 \times P_{\max}$	-1
$-0.75 \times P_{\max} \leq E_p < -0.50 \times P_{\max}$	-2
$-1.00 \times P_{\max} \leq E_p < -0.75 \times P_{\max}$	-3

ตาราง 4-4 ค่าควอนไทซ์ของ CE_p ของระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์

Change of error Speed (CE_p , mm.)	Quantized value
$1.00 \times \omega_{\max} \leq CE_p$	4
$0.75 \times \omega_{\max} \leq CE_p < 1.00 \times \omega_{\max}$	3
$0.50 \times \omega_{\max} \leq CE_p < 0.75 \times \omega_{\max}$	2
$0.25 \times \omega_{\max} \leq CE_p < 0.50 \times \omega_{\max}$	1
$-0.25 \times \omega_{\max} \leq CE_p < 0.25 \times \omega_{\max}$	0
$-0.50 \times \omega_{\max} \leq CE_p < -0.25 \times \omega_{\max}$	-1
$-0.75 \times \omega_{\max} \leq CE_p < -0.50 \times \omega_{\max}$	-2
$-1.00 \times \omega_{\max} \leq CE_p < -0.75 \times \omega_{\max}$	-3
$CE_p < -1.00 \times \omega_{\max}$	-4



4.2.2.2 การดีฟัซซิฟิเคชันของเอาต์พุต และการกำหนดวิธีการรวมผลของฟัซซีตำแหน่ง

การดีฟัซซิเคชันของเอาต์พุต และการกำหนดวิธีการรวมผลของฟัซซีตำแหน่ง พิจารณาความเป็นไปได้ของค่าเอาต์พุต จะเห็นว่าในแต่ละอินพุตจะได้ค่าเอาต์พุตฟัซซีออกมาหลายค่า จึงต้องหาค่าที่แม่นยำเพียงค่าเดียว เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตที่แท้จริงของตัวควบคุม ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีเดียวกับการดีฟัซซิเคชันของเอาต์พุต และการกำหนดวิธีการรวมผลของฟัซซีความเร็ว ดังสมการ (4-4) โดยมีค่าความเป็นสมาชิกดังตาราง 4-5 เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในทุกๆกรณีที่สามารรถเกิดขึ้น โดยใช้เงื่อนไขตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น จะได้ผลลัพธ์เอาต์พุตที่นำไปเปรียบเทียบหาค่าความเร็วควบคุม เพื่อส่งความเร็วนั้นให้ฟัซซีความเร็วตัดสินใจต่อไป

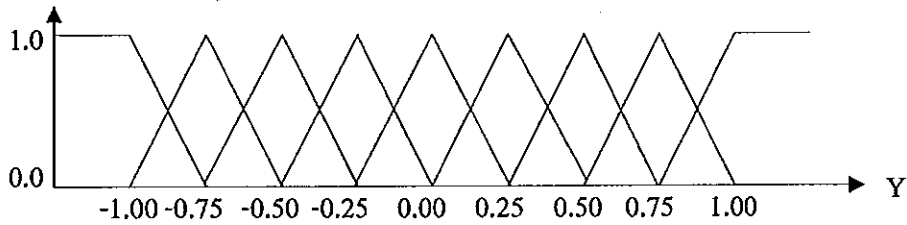
ตาราง 4-5 ค่าเอาต์พุตทั้งหมดของทุกกรณีที่เกิดขึ้นในระบบควบคุม

CE \ E	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-3	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.6	-0.3	-0.3	0.3	0.3
-2	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.4	-0.2	0	0.4	0.4
-1	-0.9	-0.9	-0.6	-0.6	-0.3	0.3	0.3	0.6	0.6

ตาราง 4-5 ค่าเอาต์พุตทั้งหมดของทุกกรณีที่เกิดขึ้นในระบบควบคุม (ต่อ)

CE \ E	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
0	-0.9	-0.4	-0.4	-0.3	0	0.3	0.4	0.4	0.9
1	-0.6	-0.6	-0.4	-0.4	0.3	0.4	0.4	0.9	0.9
2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9
3	-0.3	-0.3	0	0.1	0.6	0.6	0.6	0.9	0.9

ค่าความเป็นสมาชิก (μ)



ภาพประกอบ 4-9 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเอาต์พุตฟัซซี่ตำแหน่ง

4.2.2.3 การเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตที่หาได้

จากตาราง 4-5 เป็นค่าความเร็วที่ต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไป เนื่องจากเมื่อทำการดีฟัซซิฟิเคชันเสร็จแล้ว จะได้ผลลัพธ์ในรูปเอาต์พุต แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ได้โดยตรง จึงต้องทำการเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตที่หาได้ในตาราง 4-5 เป็นค่าความเร็วที่ต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนที่ โดยการนำเอาต์พุตไปเปรียบเทียบกับค่าในตาราง 4-6 เพื่อหาค่าความเร็วที่กำหนดให้มอเตอร์

ตาราง 4-6 ค่าความสัมพันธ์ของเอาต์พุตกับค่าความเร็วที่กำหนดให้กับมอเตอร์

เอาต์พุต	ค่าความเร็วที่กำหนด
[0.81,1.00]	ω_{ref}
[0.61,0.80]	8
[0.51,0.60]	6
[0.31,0.50]	4
[0.01,0.30]	2

ตาราง 4-6 ค่าความสัมพันธ์ของเอาท์พุทกับค่าความเร็วที่กำหนดให้กับมอเตอร์ (ต่อ)

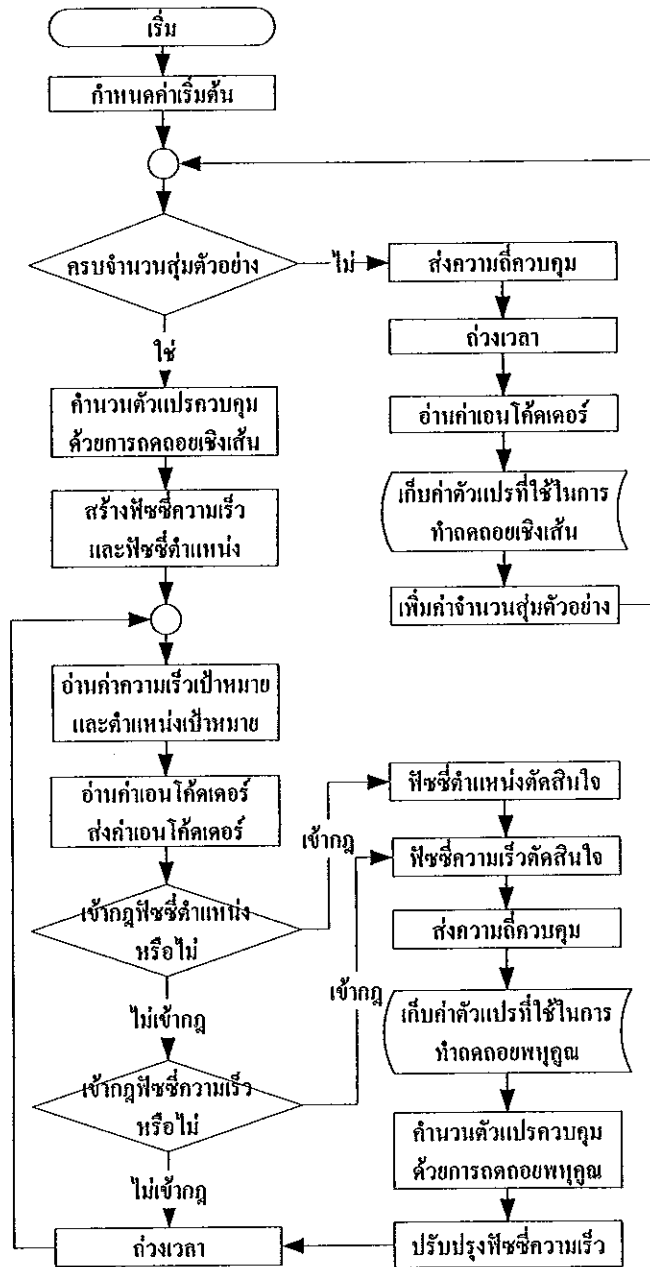
เอาท์พุท	ค่าความเร็วที่กำหนด
0	0
[-0.30,-0.01]	-2
[-0.50,-0.31]	-4
[-0.60,-0.51]	-6
[-0.80,-0.61]	-8
[-1.00,-0.81]	$-\omega_{ref}$

4.2.3 ฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุม

การทำงานของระบบควบคุมสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันในส่วนของบอร์ด DSP ได้ โดยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนโปรแกรมหลัก ส่วนสัญญาณขัดจังหวะ QEP (Quadrature-Encoder Pulse) (Interrupt QEP) และสัญญาณขัดจังหวะรับข้อมูลช่องทางอนุกรม (Interrupt Serial Receiver) สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันดังต่อไปนี้

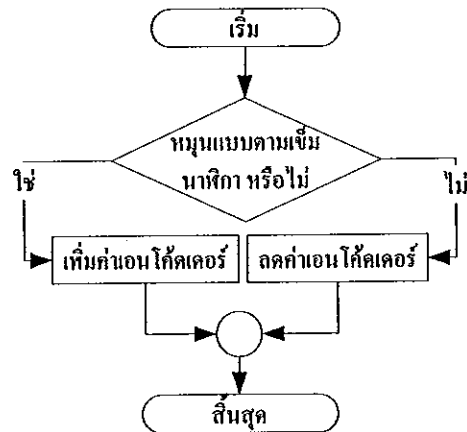
ฟังก์ชันส่วนโปรแกรมหลัก ดังภาพประกอบ 4-10 ส่วนนี้เป็นส่วนควบคุมการทำงานระบบ และส่งค่าเอนโค้ดเดอร์ให้โปรแกรมต่อประสานผู้ใช้ เพื่อนำค่าไปแสดงให้ผู้ใช้ด้วย การทำงานของส่วนโปรแกรมหลัก คือ เริ่มต้นจะเป็นการกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้น เช่น จำนวนลุ่มตัวอย่าง ความถี่สูงสุด และอื่นๆ จากนั้นจะเป็นส่วนการสุ่มเก็บค่าตัวอย่างการควบคุม โดยการส่งความถี่ควบคุมไปทดสอบมอเตอร์ และเก็บค่าความเร็วของความถี่ควบคุมนั้นไว้ ตามจำนวนที่ได้กำหนดไว้ในส่วนเริ่มต้น เมื่อครบตามจำนวนที่กำหนดไว้แล้ว จะเป็นส่วนการหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ควบคุมและความเร็วของมอเตอร์ ด้วยหลักการประมาณค่าถดถอยเส้นตรงเชิงเดียว จากค่าตัวอย่างที่เก็บมา เมื่อได้ค่าความสัมพันธ์จะทำการสร้างตัวควบคุมพีชชี กำหนดขอบเขตอินพุตของความคลาดเคลื่อน (E) การเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อน (CE) และกฎของพีชชี หลังจากนั้นจะเป็นการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ โดยเริ่มต้นจะอ่านค่าตำแหน่ง ความเร็วเป้าหมาย ตำแหน่งปัจจุบันของมอเตอร์ และคำนวณหาความคลาดเคลื่อน (E) และการเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อน (CE) จากนั้นให้พีชชีตำแหน่งตัดสินใจก่อน จึงให้พีชชีความเร็วตัดสินใจ และเก็บค่าความเร็วมอเตอร์ ความถี่ และกระแสที่สเตเตอร์ เอาไว้เพื่อนำมาคำนวณหาตัวแปรควบคุมใหม่ด้วยหลักการถดถอยแบบพหุคูณ มาปรับปรุงตัวพีชชีความเร็วให้สามารถทำงานได้ถูกต้องมากขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระของมอเตอร์ เมื่อได้เอาท์พุทของ

พีชชีความเร็วจะส่งไปควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมมอเตอร์ให้เคลื่อนที่เข้าตำแหน่งเป้าหมายด้วยความเร็วตามที่ต้องการต่อไป การทำงานของโปรแกรมหลักจะมีความถี่ในการทำงานทุกๆ (Sampling time) 0.2 วินาที



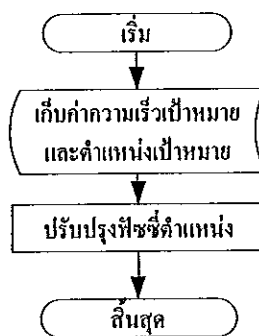
ภาพประกอบ 4-10 ผังงานส่วน โปรแกรมหลัก

ผังงานส่วนสัญญาณขัดจังหวะ QEP (Interrupt QEP) ดังภาพประกอบ 4-11 ส่วนนี้ ทำการนับค่าเอนโค้ดเดอร์ ถ้าเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกาจะเพิ่มค่าเอนโค้ดเดอร์ และหมุนทวนเข็มนาฬิกาจะลดค่าเอนโค้ดเดอร์



ภาพประกอบ 4-11 ผังงานส่วนสัญญาณขัดจังหวะ QEP (Interrupt QEP)

ผังงานสัญญาณขัดจังหวะรับข้อมูลช่องทางอนุกรม (Interrupt Serial Receiver) ดังภาพประกอบ 4-12 จะเริ่มทำงานเมื่อมีการรับข้อมูลที่ส่งมาจากโปรแกรมต่อประสานผู้ใช้ โดยจะเก็บค่าข้อมูลที่ส่งมาทำการถอดรหัสออกมาเป็น คำสั่ง ตำแหน่งเป้าหมาย และความเร็วอ้างอิง เก็บไว้ในโปรแกรมหลักต่อไป และมีส่วนการปรับปรุงตัวพีชซีตำแหน่งตามหลักการที่ได้กล่าวมา



ภาพประกอบ 4-12 ผังงานสัญญาณขัดจังหวะรับข้อมูลช่องทางอนุกรม (Interrupt Serial Receiver)

จากการทำงานทั้งหมดนี้จะอธิบายผลการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์โดยระบบปรับด้วยตัวเอง จะกล่าวในบทต่อไป

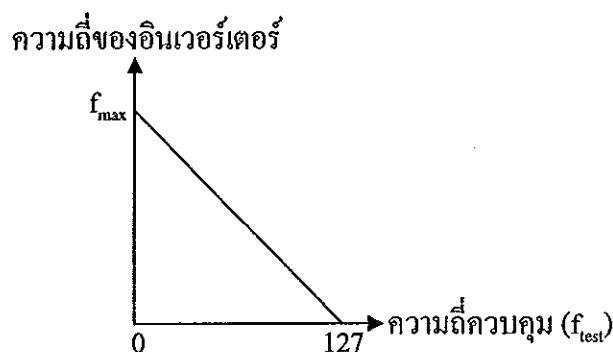
บทที่ 5

ผลการทดลองกับระบบจริงและการอภิปรายผลการทดลอง

บทนี้อธิบายถึงผลจากการทดสอบการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ตามขั้นตอนที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 โดยจะแบ่งการทดสอบดังนี้ คือ การทดสอบความเร็วของมอเตอร์และตัวพีซีที่ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ การทดสอบการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์โดยกำหนดตำแหน่งคงที่ โดยเปลี่ยนแปลงภาระของมอเตอร์ เพื่อสังเกตการปรับปรุ้งตัวควบคุม และตำแหน่งแบบต่อเนื่อง เพื่อสังเกตความคลาดเคลื่อนแบบต่อเนื่อง และทดสอบการควบคุมความเร็วและตำแหน่ง โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วสูงสุด

5.1 การทดสอบความเร็วของมอเตอร์และผลควบคุมความเร็วของมอเตอร์

การทดสอบความเร็วของมอเตอร์และตัวพีซีที่ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ด้วยหลักการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว ซึ่งมีค่าตารางค่าที่ใช้ทดสอบ ดังตาราง 5-1 โดยค่าความถี่ที่ส่งไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (f_{test}) ซึ่งเปรียบเทียบกับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ได้ดังภาพประกอบ 5-1 ตาราง 5-2 แสดงค่าความสัมพันธ์ที่หาได้จากการทำถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว และตาราง 5-3 ตารางเปรียบเทียบการควบคุมความเร็วโดยการปรับเพียงครั้งเดียว จากจำนวนตัวอย่างที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าการทำถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียวใช้ค่าทดสอบเพียง 5 ค่าระบบควบคุมความเร็วเบื้องต้นก็สามารถควบคุมการทำงานของระบบได้ถูกต้อง โดยมีภาพประกอบ 5-2 แสดงการทดสอบความเร็วของมอเตอร์และผลการควบคุมความเร็วของมอเตอร์



ภาพประกอบ 5-1 เปรียบเทียบความถี่ของอินเวอร์เตอร์กับความถี่ควบคุมสัญญาณดิจิทัล (f_{test})

ตาราง 5-1 ตารางความถี่ควบคุมสัญญาณดิจิทัล (f_{test}) และความเร็วมอเตอร์ในหน่วย rpm.

f_{test}	ω_r (rpm)						
	20 norm	10 norm	10 max	10 min	5 norm	2 max	2 min
0	257	257	257		257	257	
6	245		245				
13	231	231	231				
19	219		219				
26	205	205	205				
32	193		193		194		
38	181	181	181				
45	167		167				
51	155	155	155				
58	141		141				141
64	129	129		129	130		129
70	118			117			
77	104	104		104			
83	92			92			
90	78	78		78			
96	66			66	66		
102	54	55		54			
109	40			41			
115	28	29		29			
122	14			14	14	14	

* norm คือ ค่ากระจายปกติ

ตาราง 5-2 ตารางค่าความสัมพันธ์ที่หาจากการประมาณค่าลดรอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว

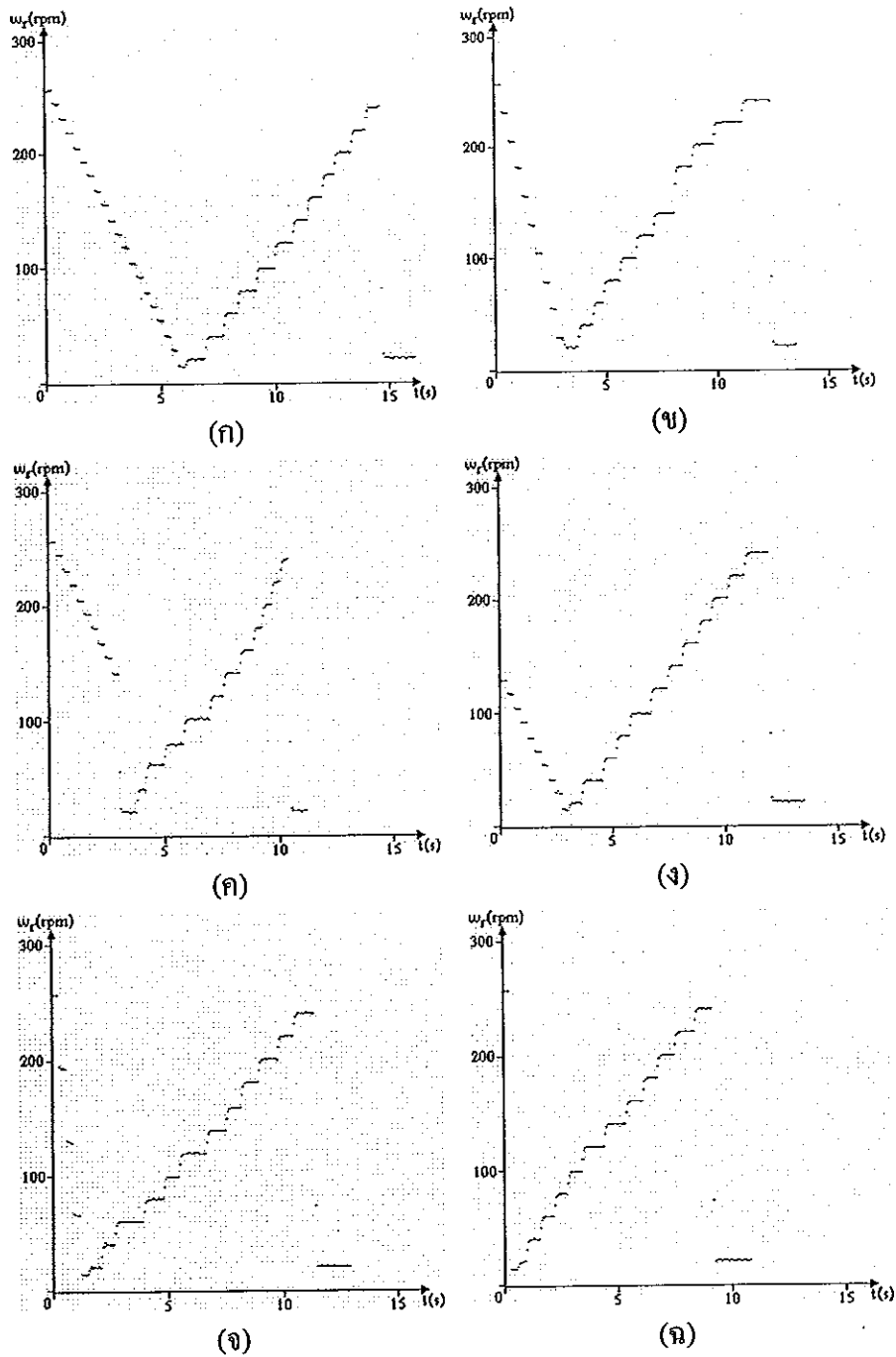
จำนวนตัวอย่าง	m	c
20 ค่ากระจายปกติ	-6.617642	856.2526
10 ค่าต่ำ	-6.592612	854.3943
10 ค่าสูง	-6.636775	857.0391

จำนวนตัวอย่าง	m	c
10 ค่ากระจายปรกติ	-6.612947	856.5057
5 ค่ากระจายปรกติ	-6.629799	857.9514
2 ค่าห่างกันมาก	-6.631147	856.9999
2 ค่าห่างกันน้อย	-6.5	849

ตาราง 5-3 ตารางเปรียบเทียบผลการควบคุมความเร็วโดยการปรับเพียงครั้งเดียว จากจำนวนตัวอย่างที่ไม่เท่ากัน

ω_{ref} (rpm)	ω_r (rpm)						
	20 Norm	10 min	10 max	10 norm	5 norm	2 max	2 min
20	21	21	21	21	20	21	18
40	40	40	40	40	40	40	38
60	60	60	62	60	60	60	60
80	79	80	80	79	80	80	80
100	99	99	101	99	99	99	99
120	121	121	121	119	119	121	119
140	141	141	141	139	139	141	141
160	161	161	161		159	161	161
180	181	181	181	181	181	181	181
200	200	201	201	201	201	201	201
220	220	221	221	221	220	221	222
240	240	241	240	241	240	241	243
20	21	21	21	21	20	21	18

จากข้อมูลข้างต้นได้มาจากการทดสอบดังภาพประกอบ 5-2 การทดสอบความเร็วของมอเตอร์และผลการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ช่วงแรกเป็นการสุ่มตัวอย่างทดสอบมอเตอร์และทำการประมาณค่าด้วยการถดถอยเส้นตรงเชิงเดียว ปรับค่าพีซีซีลอจิกควบคุมความเร็ว จากนั้นทดสอบกำหนดความเร็วให้มอเตอร์ปรับได้ผลการทดสอบดังตาราง 5-3 จากผลการทดสอบจำนวนตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่างกระจายแบบปรกติ การควบคุมก็สามารถควบคุมได้ถูกต้อง

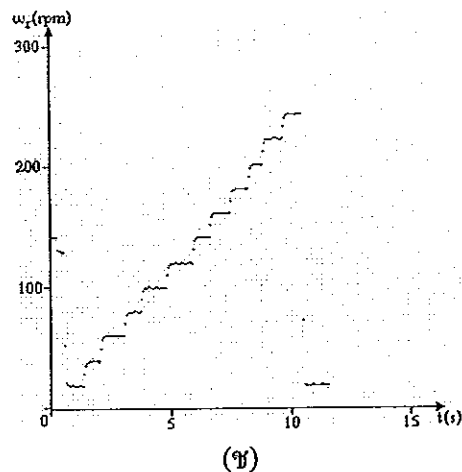


ภาพประกอบ 5-2 การทดสอบความเร็วของมอเตอร์และผลการควบคุมความเร็วของมอเตอร์

(ก) จำนวนตัวอย่าง 20 ค่ากระจายปกติ (ข) จำนวนตัวอย่าง 10 ค่ากระจายปกติ

(ค) จำนวนตัวอย่าง 10 ค่าสูง (ง) จำนวนตัวอย่าง 10 ค่าต่ำ (จ) จำนวนตัวอย่าง 5 ค่ากระจายปกติ

(ฉ) จำนวนตัวอย่าง 2 ค่าห่างกันมาก (ช) จำนวนตัวอย่าง 2 ค่าห่างกันน้อย



- ภาพประกอบ 5-2 การทดสอบความเร็วของมอเตอร์และผลการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ (ต่อ)
- (ก) จำนวนตัวอย่าง 20 ค่ากระจายปรกติ (ข) จำนวนตัวอย่าง 10 ค่ากระจายปรกติ
 - (ค) จำนวนตัวอย่าง 10 ค่าสูง (ง) จำนวนตัวอย่าง 10 ค่าต่ำ (จ) จำนวนตัวอย่าง 5 ค่ากระจายปรกติ
 - (ฉ) จำนวนตัวอย่าง 2 ค่าห่างกันมาก (ช) จำนวนตัวอย่าง 2 ค่าห่างกันน้อย

5.2 การทดสอบการควบคุมความเร็วและตำแหน่ง

การทดสอบการควบคุมความเร็วและตำแหน่ง โดยกำหนดตำแหน่งเป้าหมายที่ระยะต่างๆ กัน เพื่อบันทึกเวลาที่ใช้เข้าสู่เป้าหมายและค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้

5.2.1 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งแบบกำหนดตำแหน่งเป้าหมายคงที่

การควบคุมความเร็วและตำแหน่งแบบกำหนดตำแหน่งเป้าหมายคงที่ โดยกำหนดตำแหน่งเป้าหมายที่ตำแหน่งต่างๆ จำนวน 10 รอบการเคลื่อนที่ โดยกำหนดความถี่ที่ป้อนให้มอเตอร์สูงสุดที่ 60 Hz ผลการเคลื่อนที่ดังตาราง 5-4 โดยมีค่าตำแหน่งที่วัดได้ เวลาที่ใช้ และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดหาด้วยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square (RMS))

ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	0.075	0.100	-0.025	0.156
2		0.075	0.000	0.156
3		0.100	-0.025	0.172
4		0.075	0.000	0.172
5		0.050	0.025	0.187
6		0.050	0.025	0.156
7		0.075	0.000	0.156
8		0.075	0.000	0.172
9		0.075	0.000	0.156
10		0.075	0.000	0.156
เฉลี่ย		0.075	0.016	0.164
1	0.15	0.150	0.000	0.203
2		0.150	0.000	0.203
3		0.150	0.000	0.187
4		0.150	0.000	0.203
5		0.150	0.000	0.203
6		0.150	0.000	0.203
7		0.175	-0.025	0.187
8		0.150	0.000	0.203
9		0.150	0.000	0.188
10		0.175	-0.025	0.203
เฉลี่ย		0.155	0.011	0.198

ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	0.20	0.200	0.000	0.219
2		0.225	-0.025	0.218
3		0.200	0.000	0.218
4		0.200	0.000	0.219
5		0.225	-0.025	0.218
6		0.225	-0.025	0.218
7		0.200	0.000	0.218
8		0.200	0.000	0.219
9		0.200	0.000	0.218
10		0.225	-0.025	0.218
เฉลี่ย		0.210	0.016	0.218
1	5.00	5.000	0.000	0.765
2		5.000	0.000	0.766
3		4.975	0.025	0.765
4		5.000	0.000	0.750
5		4.975	0.025	0.750
6		4.975	0.025	0.828
7		5.000	0.000	0.750
8		4.975	0.025	0.750
9		5.000	0.000	0.766
10		5.025	-0.025	0.766
เฉลี่ย		4.993	0.018	0.766

ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	5.15	5.150	0.000	0.797
2		5.125	0.025	0.782
3		5.125	0.025	0.781
4		5.125	0.025	0.765
5		5.150	0.000	0.781
6		5.125	0.025	0.782
7		5.125	0.025	0.781
8		5.175	-0.025	0.782
9		5.150	0.000	0.781
10		5.125	0.025	0.782
เฉลี่ย		5.138	0.021	0.781
1	6.00	6.025	-0.025	0.844
2		6.000	0.000	0.843
3		5.975	0.025	0.828
4		6.000	0.000	0.860
5		6.025	-0.025	0.844
6		6.000	0.000	0.828
7		6.000	0.000	0.843
8		5.975	0.025	0.844
9		5.975	0.025	0.844
10		5.975	0.025	0.844
เฉลี่ย		5.995	0.019	0.842

ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	7.00	6.975	0.025	0.906
2		7.000	0.000	0.906
3		6.975	0.025	0.906
4		6.975	0.025	0.906
5		6.975	0.025	0.906
6		7.025	-0.025	0.906
7		7.025	-0.025	0.922
8		6.975	0.025	0.906
9		6.975	0.025	0.890
10		7.000	0.000	0.906
เฉลี่ย		6.990	0.022	0.906
1	8.00	8.000	0.000	0.969
2		8.000	0.000	0.953
3		8.000	0.000	0.969
4		7.975	0.025	0.938
5		7.975	0.025	0.969
6		8.000	0.000	0.953
7		7.975	0.025	0.953
8		7.975	0.025	0.953
9		8.000	0.000	0.968
10		8.000	0.000	0.953
เฉลี่ย		7.990	0.016	0.958

ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	9.00	9.000	0.000	1.000
2		8.975	0.025	1.000
3		9.000	0.000	0.968
4		9.000	0.000	0.969
5		8.975	0.025	0.953
6		8.975	0.025	0.984
7		9.000	0.000	0.985
8		9.000	0.000	0.984
9		8.975	0.025	1.000
10		9.025	-0.025	0.985
เฉลี่ย		8.993	0.018	0.983
1	10.00	9.975	0.025	1.000
2		10.000	0.000	1.031
3		9.975	0.025	1.015
4		10.00	0.000	1.031
5		10.000	0.000	1.016
6		9.975	0.025	1.015
7		9.975	0.025	1.000
8		10.000	0.000	1.016
9		10.000	0.000	1.000
10		10.025	-0.025	1.000
เฉลี่ย		9.993	0.018	1.012

ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	10.075	10.050	0.025	1.016
2		10.075	0.000	1.016
3		10.100	-0.025	1.015
4		10.100	-0.025	1.031
5		10.075	0.000	1.015
6		10.050	0.025	1.031
7		10.075	0.000	1.015
8		10.075	0.000	1.015
9		10.075	0.000	1.016
10		10.075	0.000	1.016
เฉลี่ย		10.075	0.016	1.019
1	20.00	20.000	0.000	1.406
2		19.975	0.025	1.391
3		19.975	0.025	1.390
4		19.975	0.025	1.390
5		20.000	0.000	1.390
6		19.975	0.025	1.359
7		20.000	0.000	1.406
8		20.000	0.000	1.391
9		20.000	0.000	1.406
10		20.000	0.000	1.406
เฉลี่ย		19.990	0.016	1.394

ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	27.475	27.475	0.000	1.531
2		27.475	0.000	1.562
3		27.500	-0.025	1.531
4		27.475	0.000	1.562
5		27.500	-0.025	1.547
6		27.450	0.025	1.562
7		27.450	0.025	1.547
8		27.475	0.000	1.562
9		27.500	-0.025	1.563
10		27.475	0.000	1.547
เฉลี่ย		27.478	0.018	1.551
1	40.00	40.000	0.000	2.110
2		40.000	0.000	2.360
3		39.975	0.025	2.330
4		40.000	0.000	2.080
5		40.000	0.000	2.160
6		40.000	0.000	2.310
7		39.975	0.025	2.360
8		40.025	-0.025	2.130
9		39.975	0.025	2.330
10		40.000	0.000	2.310
เฉลี่ย		39.995	0.016	2.248

ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	54.575	54.575	0.000	2.312
2		54.575	0.000	2.312
3		54.575	0.000	2.297
4		54.575	0.000	2.328
5		54.575	0.000	2.281
6		54.550	0.025	2.281
7		54.575	0.000	2.297
8		54.575	0.000	2.281
9		54.550	0.025	2.250
10		54.575	0.000	2.250
เฉลี่ย		54.570	0.011	2.289
1	80.00	80.025	-0.025	2.741
2		79.975	0.025	2.803
3		79.975	0.025	2.772
4		80.000	0.000	2.803
5		79.975	0.025	2.803
6		79.975	0.025	2.787
7		79.975	0.025	2.756
8		80.000	0.000	2.818
9		79.975	0.025	2.756
10		79.975	0.025	2.803
เฉลี่ย		79.985	0.022	2.784

ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	89.95	89.950	0.000	2.959
2		89.925	0.025	3.037
3		89.950	0.000	3.006
4		89.925	0.025	3.022
5		89.950	0.000	3.038
6		89.925	0.025	3.084
7		89.950	0.000	3.006
8		89.950	0.000	2.990
9		89.925	0.025	3.085
10		89.925	0.025	3.006
เฉลี่ย		89.938	0.018	3.023
1	100.00	99.975	0.025	3.828
2		100.000	0.000	3.781
3		100.000	0.000	3.750
4		99.975	0.025	3.688
5		100.000	0.000	3.781
6		99.975	0.025	3.765
7		100.000	0.000	3.782
8		99.975	0.025	3.750
9		99.975	0.025	3.797
10		99.975	0.025	3.781
เฉลี่ย		99.985	0.019	3.770

ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	119.425	119.400	0.025	3.703
2		119.400	0.025	4.000
3		119.400	0.025	3.985
4		119.400	0.025	3.782
5		119.425	0.000	3.984
6		119.400	0.025	4.046
7		119.400	0.025	3.953
8		119.425	0.000	3.735
9		119.400	0.025	3.969
10		119.425	0.000	4.000
เฉลี่ย		119.408	0.021	3.916
1	200.00	200.00	0.000	4.937
2		199.975	0.025	5.062
3		199.975	0.025	5.015
4		200.00	0.000	4.953
5		200.000	0.000	4.984
6		200.000	0.000	4.937
7		199.975	0.025	5.000
8		199.975	0.025	4.969
9		199.975	0.025	4.969
10		200.000	0.000	4.953
เฉลี่ย		199.988	0.018	4.978

ตาราง 5-4 ตารางแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	ค่าตำแหน่งที่ป้อน (mm.)	ค่าตำแหน่งที่วัดได้ (mm.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (mm.)	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1	260.25	260.250	0.000	6.266
2		260.225	0.025	6.219
3		260.250	0.000	6.156
4		260.225	0.025	6.141
5		260.250	0.000	6.094
6		260.250	0.000	6.157
7		260.225	0.025	6.125
8		260.225	0.025	6.188
9		260.225	0.025	6.250
10		260.250	0.000	6.234
เฉลี่ย		260.238	0.018	6.183
1	360.00	359.975	0.025	8.141
2		360.000	0.000	8.125
3		360.000	0.000	8.062
4		359.975	0.025	8.094
5		360.000	0.000	8.062
6		359.975	0.025	8.047
7		360.000	0.000	7.985
8		359.975	0.025	7.937
9		359.975	0.025	7.953
10		359.975	0.025	7.938
เฉลี่ย		359.985	0.019	8.034

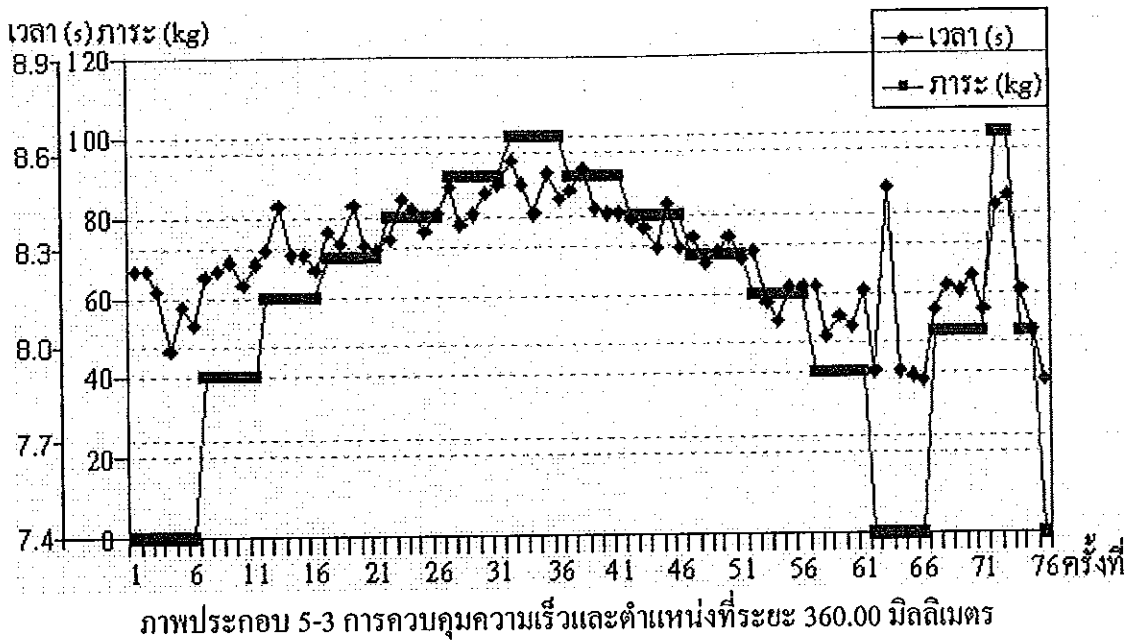
จากข้อมูลในตาราง 5-4 นำผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจากงานวิจัย [12] ซึ่งใช้วิธีการปรับโดยผู้เชี่ยวชาญ และผลการทดลองจากงานวิจัย [13] ที่ใช้ระบบ FMRLC (Fuzzy Model Reference Learning Control) ดังแสดงในตาราง 5-5 ซึ่งในงานวิจัยนี้และงานวิจัย [13] ระบบจะส่งค่าความเร็วควบคุมได้สูงสุด 60 Hz ซึ่งแตกต่างกันที่ค่าความเร็วสูงสุดในงานวิจัย [12] มีค่าความเร็วได้สูงสุดที่ 90Hz เป็นผลทำให้ความเร็วในการเข้าสู่เป้าหมายได้แตกต่างกัน การเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการสร้างกฎการควบคุมแบบอัตโนมัติในงานวิจัยนี้ สามารถให้ผลการควบคุมได้ใกล้เคียงกับงานวิจัย [12] และงานวิจัย [13] ซึ่งผลการควบคุมในระยะใกล้การเข้าสู่เป้าหมายใช้เวลาน้อยกว่างานวิจัย [12] และงานวิจัย [13] แต่ในระยะที่ไกลใช้เวลามากกว่า เพราะฟัซซี่ดำเนินการเพื่อระยะหยุดเพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถเข้าสู่เป้าหมายได้แน่นอน งานวิจัยนี้และงานวิจัย [12] สามารถควบคุมได้ระยะน้อยสุด 0.075 มิลลิเมตร ส่วนงานวิจัย [13] สามารถเคลื่อนที่ได้น้อยสุด 4.10 มิลลิเมตร

ตาราง 5-5 ตารางผลการทดลองเชิงเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัย [12] และงานวิจัย [13]

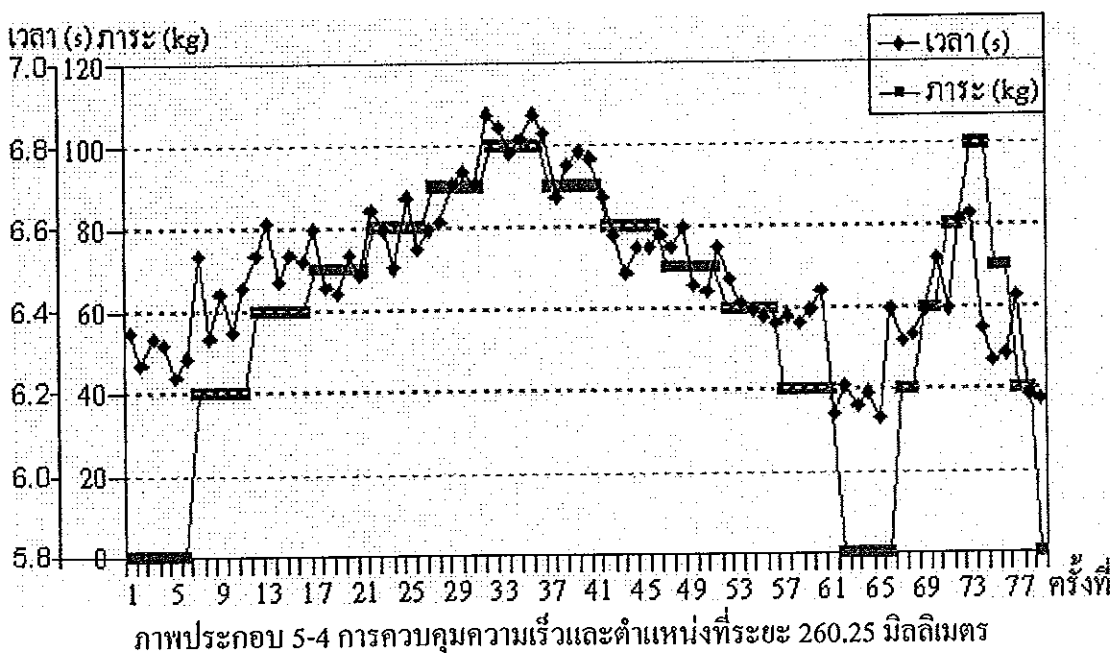
ค่าตำแหน่ง ที่ป้อน (mm.)	เวลาที่ใช้เฉลี่ย (วินาที)			ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด (mm.)		
	ระบบควบคุม งานวิจัยนี้	ระบบควบคุม งานวิจัย [13]	ระบบควบคุม งานวิจัย [12]	ระบบควบคุม งานวิจัยนี้	ระบบควบคุม งานวิจัย [13]	ระบบควบคุม งานวิจัย [12]
0.025	-	-	-	0.025	0.025	0.025
0.075	0.165	-	0.172	0.025	0.075	0
0.15	0.198	-	0.206	0.025	0.15	0
0.20	0.218	-	0.373	0.025	0.2	0
5.00	0.766	0.951	1.362	0.025	0.05	0
5.15	0.781	0.88	1.216	0.025	0.05	0
6.00	0.842	0.972	1.209	0.025	0.1	-0.025
7.00	0.906	0.973	1.092	0.025	0.05	0.025
8.00	0.958	1.002	0.66	0.025	0.075	0
9.00	0.983	1.06	0.654	0.025	0.075	0
10.00	1.012	1.16	0.666	0.025	-0.075	0
10.075	1.019	1.17	0.588	0.025	0.05	0

ค่าตำแหน่ง ที่ป้อน (mm.)	เวลาที่ใช้เฉลี่ย (วินาที)			ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด (mm.)		
	ระบบควบคุม งานวิจัยนี้	ระบบควบคุม งานวิจัย [13]	ระบบควบคุม งานวิจัย [12]	ระบบควบคุม งานวิจัยนี้	ระบบควบคุม งานวิจัย [13]	ระบบควบคุม งานวิจัย [12]
20.00	1.394	1.369	0.821	0.025	-0.05	0
27.475	1.551	1.5	0.94	0.025	0.075	0.025
40.00	2.248	1.674	1.322	0.025	0.05	0
54.575	2.289	1.934	1.355	0.025	0.05	0
80.00	2.784	2.35	1.862	0.025	-0.05	0
89.95	3.023	2.576	2.153	0.025	-0.025	0.025
100.00	3.770	2.72	2.181	0.025	0.075	0
119.425	3.916	3.022	2.596	0.025	0.025	0
200.00	4.978	4.4	3.92	0.025	-0.05	0
260.25	6.183	5.421	5.104	0.025	-0.025	0
360.00	8.034	7.187	6.759	0.025	0.075	0

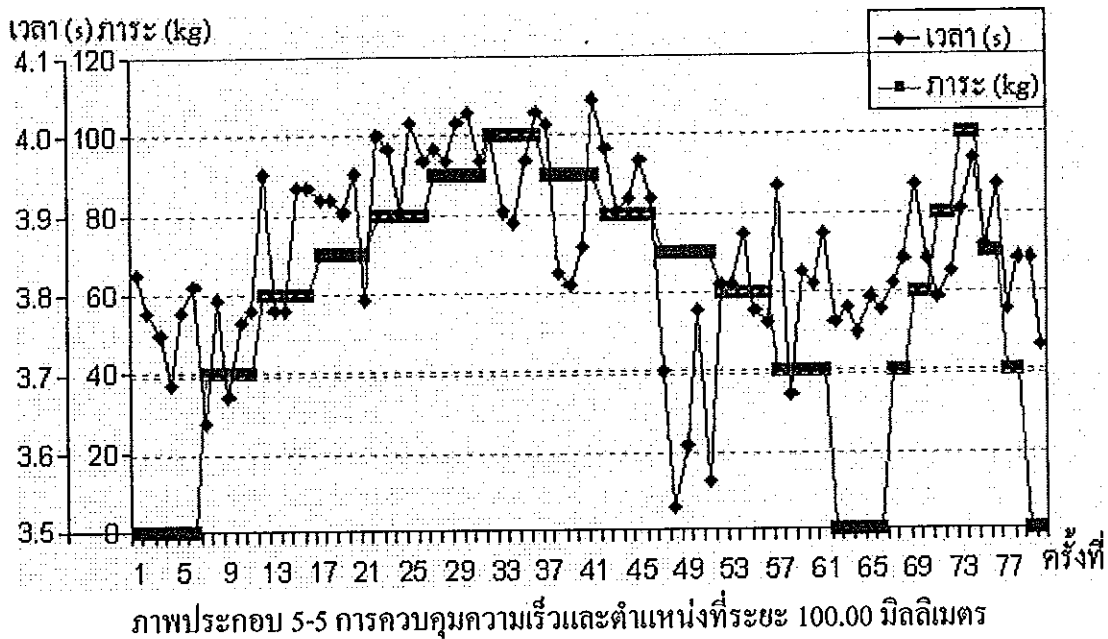
การควบคุมความเร็วและตำแหน่ง โดยกำหนดตำแหน่งคงที่ มีการเปลี่ยนแปลง
 ภาระของมอเตอร์ โดยเคลื่อนที่จำนวน 5 รอบ แล้วทำการเปลี่ยนแปลงภาระของมอเตอร์ สังเกตการ
 ปรับปรุงของตัวควบคุมเห็นว่าในบางช่วงที่ตัวควบคุมไม่สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ แต่
 ในช่วงถัดไปการควบคุมก็สามารถปรับเปลี่ยนได้เหมือนเดิม สามารถดูข้อมูลเพิ่มเติมได้ใน
 ภาคผนวก ก



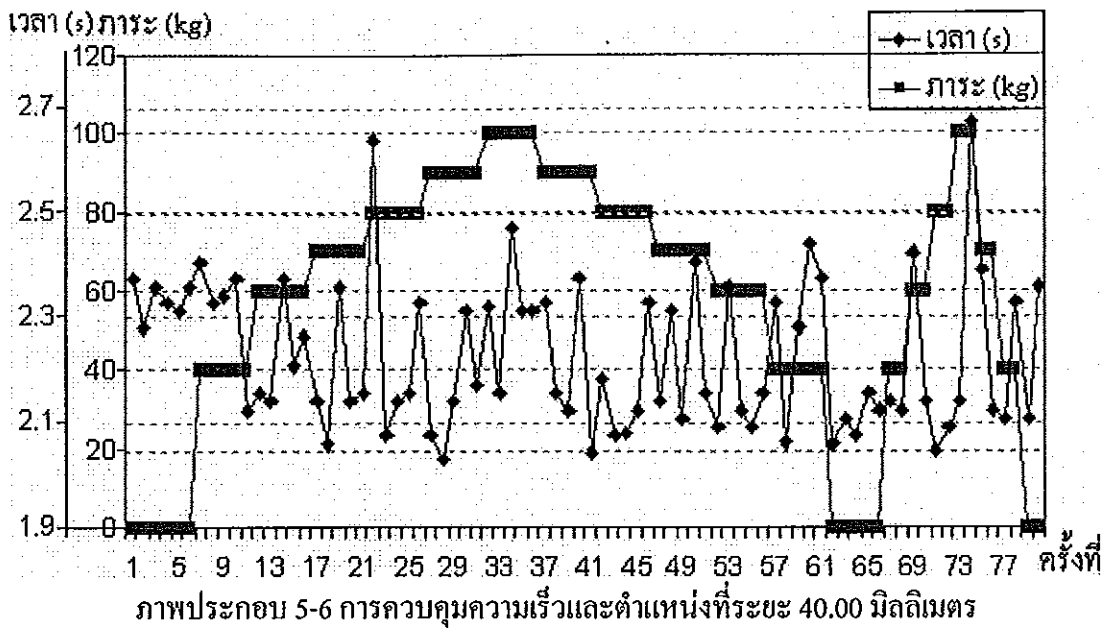
ภาพประกอบ 5-3 แสดงการควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 360.00 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่วัดได้ 360.00 ± 0.025 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้เฉลี่ย 8.269 วินาที จากภาพแสดงให้เห็นในช่วงภาระของมอเตอร์ที่เท่ากันการควบคุมครั้งหลังจะใช้เวลาน้อยกว่าครั้งแรก เพราะเกิดจากการปรับปรุงของฟีดแบ็คที่ช่วยให้สามารถปรับระบบให้เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วขึ้น แต่ครั้งที่ 64 เกิดการใช้เวลาสูงเกิดจากระบบฟีดแบ็คกำหนดระยะหยุดมากขึ้น (ระยะหยุด 13.05 มิลลิเมตร ซึ่งก่อนหน้าระยะหยุดอยู่ที่ประมาณ 11-12 มิลลิเมตร) ทำให้การเข้าสู่เป้าหมายใช้เวลานานกว่าเดิม



ภาพประกอบ 5-4 แสดงการควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 260.25 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่วัดได้ 260.25 ± 0.025 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้เฉลี่ย 6.486 วินาที จากภาพแสดงให้เห็นในช่วงภาระของมอเตอร์ที่เท่ากันการควบคุมครั้งหลังจะใช้เวลาน้อยกว่าครั้งแรก เพราะเกิดจากการปรับปรุงของฟิวซ์ลอคจิกที่ทำให้สามารถปรับระบบให้เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วขึ้น

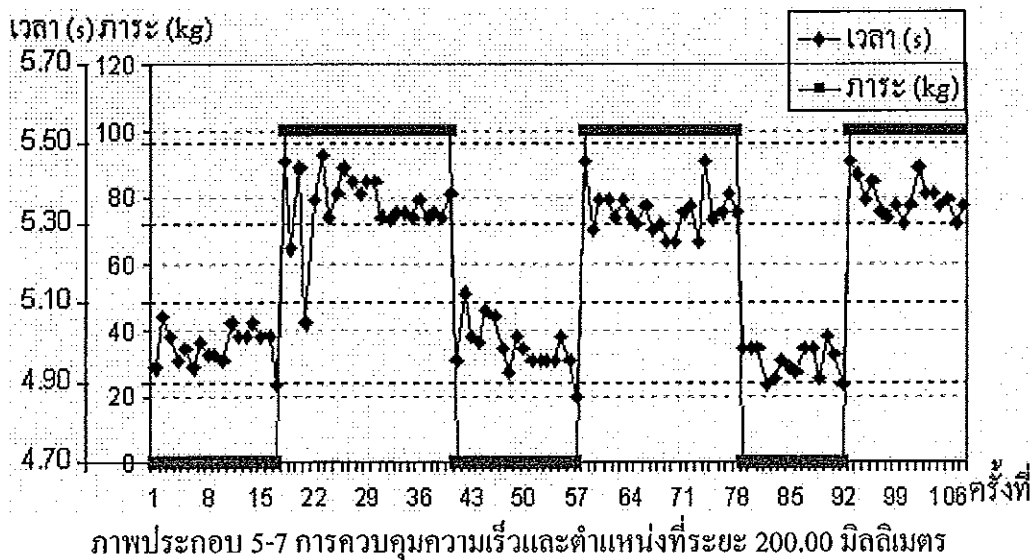


ภาพประกอบ 5-5 แสดงการควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 100.00 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่วัดได้ 100.00 ± 0.025 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้เฉลี่ย 3.853 วินาที การควบคุมในช่วงนี้เริ่มจะมองไม่เห็นความสามารถของระบบควบคุมที่ชัดเจน การตัดสินใจระยะหยุดของระบบฟิวซ์ลอคตำแหน่งมีผลต่อเวลาที่มากเมื่อเปรียบเทียบกับระยะที่ไกล ช่วงเปลี่ยนแปลงภาระมอเตอร์จาก 80 กิโลกรัม ไปเป็น 70 กิโลกรัม เป็นน้ำหนักช่วงที่มีผลกับความเร็วมอเตอร์มากกับน้อย (Critical) ในการปรับความเร็วเป็นความเร็วสูงสุดได้และในขณะนั้นฟิวซ์ลอคจิกยังกำหนดระยะหยุดไว้เท่ากับระยะหยุดที่ภาระ 80 กิโลกรัม ทำให้เวลาที่ใช้ในช่วงภาระ 70 กิโลกรัมใช้เวลาน้อย



ภาพประกอบ 5-6 แสดงการควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 40.00 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่วัดได้ 40.00 ± 0.025 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้เฉลี่ย 2.228 วินาที จากข้อมูลข้างต้น แสดงให้เห็นว่าระยะเป้าหมายที่น้อยกว่า 40.00 มิลลิเมตร ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของการปรับปรุงฟิซซ์ที่เกิดขึ้น

การควบคุมความเร็วและตำแหน่ง โดยกำหนดตำแหน่งคงที่ มีการเปลี่ยนแปลงภาระของมอเตอร์ โดยเคลื่อนที่ประมาณ 20 รอบ แล้วทำการเปลี่ยนแปลงภาระของมอเตอร์ ถึงเหตุการณ์ปรับของตัวควบคุม



ภาพประกอบ 5-7 แสดงการควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 200.00 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่วัดได้ 200.00 ± 0.025 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้เฉลี่ย 5.181 วินาที การทดสอบแบบนี้ เพื่อแสดงให้เห็นการปรับของตัวควบคุมเมื่อได้รับภาระแบบเดิมนานๆ และจะได้สังเกตการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระแบบทันทีทันใด จะเห็นได้ว่าระบบเมื่อเริ่มเปลี่ยนแปลงภาระของมอเตอร์ทำให้เวลาที่ใช้มาก แต่เมื่อทดสอบไปหลายครั้งขึ้นระบบก็สามารถปรับให้เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วขึ้น แสดงให้เห็นว่าระบบปรับด้วยตัวเองสามารถปรับให้ระบบเข้าสู่เป้าหมายได้เร็วขึ้น ข้อมูลสามารถดูข้อมูลเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก แต่ในครั้งที่ 22 จะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ น้อย เป็นเพราะว่ามอเตอร์สามารถปรับความเร็วในช่วงเริ่มสตาร์ทให้มีความเร็วสูงกว่าช่วงที่มีการอื่นๆ และตัวควบคุมพีซีที่กำหนดระยะหยุดไว้น้อยกว่าเดิมเล็กน้อย สามารถดูข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่ ภาคผนวก ก

5.2.2 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งแบบต่อเนื่อง

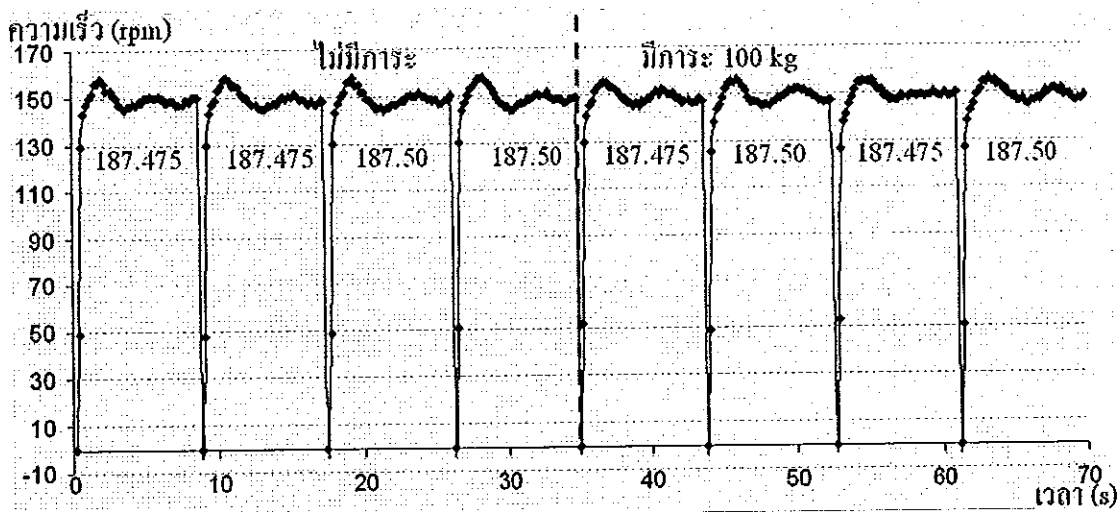
การทดสอบต่อไปเป็นการทดสอบแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่อง โดยจะมีการทดสอบการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง โดยจะจับเวลาของแต่ละช่วงที่ใช้งาน ดังตาราง 5-6 เพื่อสังเกตความคลาดเคลื่อนแบบต่อเนื่อง จากการทดสอบความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลถึงตำแหน่ง ถัดไปที่เคลื่อนที่ไป โดยมีค่าต่างๆดังนี้ ตำแหน่งเป้าหมาย มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร ตำแหน่งที่วัดได้ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร และเวลาที่ใช้ มีหน่วยเป็น วินาที

ตาราง 5-6 ตารางแสดงค่า ระยะทางที่วัดได้ เวลาที่ใช้งานของค่าทดสอบการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง

เป้าหมาย	10	20	40	80	120	150	200	250	300	350
ภาระ(kg)	0	40	80	100	80	60	0	50	100	50
วัดได้	10.025	20	40	80	119.975	150	200	250	300	349.975
เวลา	1.125	1.625	1.765	1.578	2.578	2.781	2.5	2.875	2.344	2.75
ภาระ(kg)	0									
วัดได้	10	20	40	80.025	120	150	200	250	299.975	350
เวลา	1.14	1.594	1.703	1.453	2.25	2.797	2.469	2.531	2.281	2.5
ภาระ(kg)	90									
วัดได้	10	20	40	80	119.975	150	200	249.975	300	350
เวลา	1.141	1.594	1.734	1.407	2.25	2.859	2.531	2.594	2.375	2.344

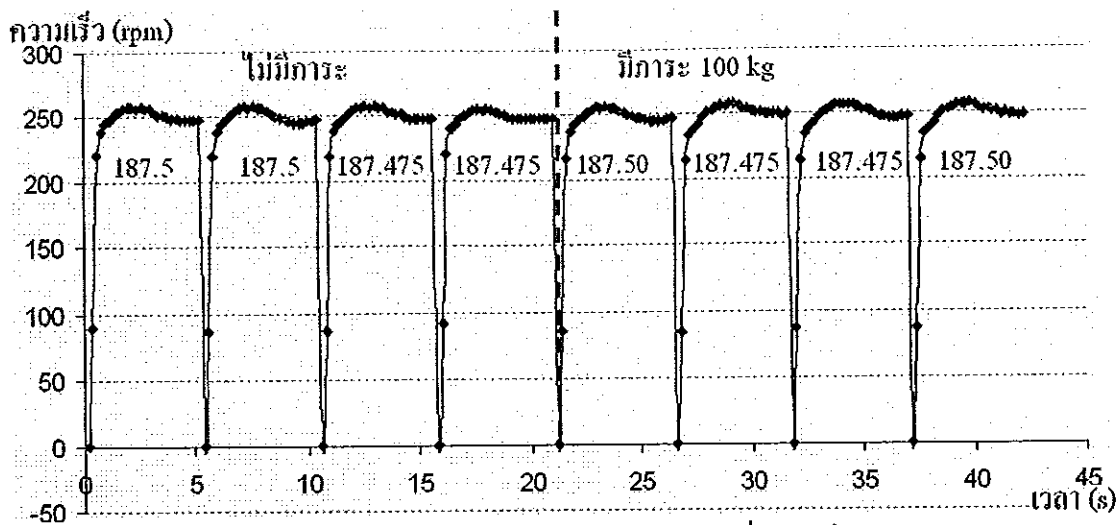
5.2.3 การควบคุมความเร็วและตำแหน่งแบบอื่นๆ

การทดสอบแบบอื่นๆ ทดสอบการควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยเปลี่ยนแปลงความเร็วสูงสุด เพื่อสังเกตการปรับความเร็วของฟิชซีความเร็วว่าสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้เข้าสู่ความเร็วเป้าหมายได้หรือไม่ แสดงดังภาพประกอบ 5-8 และภาพประกอบ 5-9 โดยกำหนดค่าความเร็วต่างกันและตำแหน่งคงที่



ภาพประกอบ 5-8 การทดลองระบบโดยใส่ภาระและไม่ใส่ภาระ ที่ความเร็ว 150 rpm และตำแหน่งที่ 187.50 มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 5-8 เป็นการทดสอบระบบโดยไม่มีใส่ภาระและไม่ใส่ภาระ 100 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที และตำแหน่งที่ 187.50 มิลลิเมตร โดยตำแหน่งที่วัดได้ คือ 187.475 มิลลิเมตร 187.475 มิลลิเมตร 187.50 มิลลิเมตร 187.50 มิลลิเมตร 187.475 มิลลิเมตร 187.50 มิลลิเมตร 187.475 มิลลิเมตร และ 187.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากภาพประกอบ 5-8 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถปรับความเร็วให้เข้ามีความเร็ว 150 rpm ได้ถึงแม้จะมีภาระหรือไม่มีภาระก็ตาม



ภาพประกอบ 5-9 การทดลองระบบโดยใส่ภาระและไม่ใส่ภาระ ที่ความเร็ว 250 rpm และตำแหน่งที่ 187.50 มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 5-9 เป็นการทดลองระบบโดยใส่ภาระและไม่ใส่ภาระ 100 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที และตำแหน่งที่ 187.50 มิลลิเมตร โดยตำแหน่งที่วัดได้ คือ 187.5 มิลลิเมตร 187.5 มิลลิเมตร 187.475 มิลลิเมตร 187.475 มิลลิเมตร 187.50 มิลลิเมตร 187.475 มิลลิเมตร 187.475 มิลลิเมตร และ 187.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากภาพประกอบ 5-9 แสดงให้เห็นว่าระบบก็สามารถปรับความเร็วให้เข้ามีความเร็ว 250 rpm ได้ถึงแม้จะมีภาระหรือไม่มีภาระก็ตาม

จากภาพประกอบ 5-8 และภาพประกอบ 5-9 สามารถสรุปได้ว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมที่ความเร็วต่าง ๆ กันได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระของมอเตอร์ก็สามารถควบคุมความเร็วให้เข้าสู่ความเร็วเป้าหมายได้ และระบบควบคุมก็ยังสามารถควบคุมการเข้าสู่ตำแหน่งได้ถูกต้องเช่นกัน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวสรุปผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อประโยชน์ต่อการทำวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์ต่อไป

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่สามารถปรับเองได้ เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ โดยในการทดลองนั้น ได้ทำการทดลองบนระบบจำลองการเคลื่อนที่ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และระบบการเคลื่อนที่จริงควบคู่กันไป ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการปรับค่าของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

การทดลองระบบจำลองการเคลื่อนที่ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยแบบจำลองได้อธิบายในหัวข้อ 3.1 ซึ่งแบบจำลองจะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ควบคุม กระแสที่สเตเตอร์ และความเร็วของมอเตอร์เอง จากการทดสอบมอเตอร์ในช่วงแรก เก็บค่าระบบมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ควบคุมและความเร็วของมอเตอร์ ด้วยหลักการประมาณค่าถดถอยเส้นตรงเชิงเดียว เนื่องจากช่วงทดสอบระบบสะดวก และสามารถควบคุมการทำงานได้ใกล้เคียงกับระบบจริง เมื่อมีการเปลี่ยนความเร็วหรือภาระของมอเตอร์อย่างใดอย่างหนึ่ง การควบคุมการทำงานก็สามารถทำได้ดี หลังจากนั้นระบบมีการเก็บค่าข้อมูลเพิ่มขณะที่มอเตอร์มีภาระ หลังจากนั้นจึงปรับปรุงตัวควบคุมใหม่ จากค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ควบคุม กระแสที่สเตเตอร์ และความเร็วของมอเตอร์ ด้วยวิธีการประมาณค่าถดถอยแบบพหุคูณ ทำให้ระบบสามารถปรับความเร็วได้ถูกต้องมากขึ้น เมื่อมีข้อมูลมากขึ้น ดังแสดงในหัวข้อ 3.2

การควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยระบบปรับด้วยตัวเองสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ 2 ตัว คือ ฟัซซี่ตำแหน่ง และฟัซซี่ความเร็ว การทำงานจะให้ฟัซซี่ตำแหน่งเป็นตัวตัดสินใจก่อน ระบบฟัซซี่ตำแหน่งจะเป็นตัวควบคุมที่ตัดสินใจในการเปลี่ยนความเร็วมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์อยู่ที่ระยะต่างๆ เพื่อคำนวณความเร็วที่ต้องการ ซึ่งเอาที่ฟุตของฟัซซี่

ตำแหน่งเป็นความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งจะส่งต่อให้พีชชีความเร็วตัดสินใจเพื่อหาค่าเอาต์พุตที่เป็นความถี่ส่งไปควบคุมความเร็วมอเตอร์ผ่านอินเวอร์เตอร์

การทำงานของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์จะทำการหาความสัมพันธ์เองจากการทดสอบมอเตอร์ในช่วงแรก เก็บค่าระบบมาหาความสัมพันธ์ด้วยหลักการประมาณค่า ถดถอยเส้นตรงเชิงเดียว การควบคุมความเร็วของมอเตอร์สามารถปรับได้ถูกต้องดังแสดงไว้ในหัวข้อ 5.1 การทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระของมอเตอร์ก็สามารถควบคุมให้เข้าสู่เป้าหมายได้ ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบอยู่ที่ ± 0.025 มิลลิเมตร การควบคุมแบบระยะต่อเนื่องระบบก็สามารถเข้าสู่เป้าหมายโดยมี ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบอยู่ที่ ± 0.025 มิลลิเมตร

การวัดเวลาในการทดลองของวิทยานิพนธ์นี้วัดเวลาโดยโปรแกรม โดยจับเวลาเริ่มต้นเมื่อโปรแกรมได้ส่งข้อมูลให้กับบอร์ด DSP และสิ้นสุดการจับเวลาเมื่อได้รับบิตหยุดจากบอร์ด DSP เวลาที่ได้ใช้เวลาของเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นหลัก และค่าความคลาดเคลื่อนใช้เอนโค้ดเดอร์ในการวัด โดยบอร์ด DSP จะส่งค่าตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์มาทุกๆ 0.2 วินาที จนถึงตำแหน่งหยุดของมอเตอร์ และมีการหน่วงเวลาหลังคำสั่งหยุดเพื่อให้มอเตอร์หยุดก่อนส่งตำแหน่งสุดท้ายมาให้โปรแกรมบนคอมพิวเตอร์หาค่าคลาดเคลื่อนของระบบ

ข้อดีของระบบควบคุมนี้ คือ การออกแบบการควบคุมที่มองมอเตอร์แบบกล่องดำ จึงไม่จำเป็นต้องทราบรายละเอียดของมอเตอร์ โดยระบบควบคุมจะต้องรู้อินพุตที่ป้อนให้มอเตอร์ และทราบเอาต์พุตที่ออกมา จากนั้นระบบควบคุมจะนำค่าดังกล่าวมาหาความสัมพันธ์และปรับปรุงตัวควบคุมให้เข้ากับมอเตอร์ตัวนั้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้หลักการของการประมาณค่าถดถอยเส้นตรงเชิงเดียว และการประมาณค่าถดถอยแบบพหุคูณ เพื่อนำค่าความสัมพันธ์ไปปรับปรุงกฎของตัวควบคุมพีชชีลอจิก จึงทำให้ระบบต้องมีการทดสอบเบื้องต้นก่อนเพื่อหาความสัมพันธ์ดังแสดงในหัวข้อ 5.1

ระบบควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยระบบปรับด้วยตัวเองสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเปรียบเทียบกับการทำงานกับงานวิจัย [12] และงานวิจัย [13] เห็นว่าการควบคุมในระยะสั้นใช้เวลาน้อยกว่า แต่การควบคุมในระยะไกลใช้เวลามากกว่างานวิจัย [13] เพราะว่าการเลือกระยะหยุดของพีชชีตำแหน่งเพื่อให้มั่นใจว่ามอเตอร์สามารถหยุดได้ในตำแหน่งที่ต้องการ จึงทำให้เวลาที่ใช้มากกว่า ส่วนงานวิจัย [12] ใช้ความถี่ป้อนมอเตอร์ 90 Hz จึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับเวลาในช่วงระยะไกลได้ งานวิจัยนี้และงานวิจัย [12] สามารถควบคุมได้ระยะน้อยสุด 0.075 มิลลิเมตร ส่วนงานวิจัย [13] สามารถเคลื่อนที่ได้น้อยสุด 4.10 มิลลิเมตร และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วง ± 0.025 มิลลิเมตร มีค่าน้อยกว่างานวิจัย [13] เมื่อเปรียบเทียบช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระของมอเตอร์งานวิจัย [13] ที่ภาระ 100 กิโลกรัม ที่ตำแหน่ง 100 มิลลิเมตร ค่า

ความคลาดเคลื่อนของระบบนี้ไม่เพิ่มขึ้น แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของงานวิจัย [13] มีค่าเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้งานวิจัยนี้เวลาที่ใช้ 3.770 วินาที เมื่อไม่มีภาระ มีภาระ 100 กิโลกรัม ใช้เวลา 3.953 วินาที งานวิจัย [13] เวลาที่ใช้ 2.70 วินาที เมื่อไม่มีภาระ มีภาระ 100 กิโลกรัม ใช้เวลา 3.43 วินาที การเปลี่ยนแปลงเวลาที่ไม่มีภาระ และภาระ 100 กิโลกรัม งานวิจัยนี้การเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้น้อยกว่า งานวิจัย [13]

6.2 ข้อเสนอแนะ

การปรับตัวฟิชซีตำแหน่งควรจะใช้ภาระของมอเตอร์เข้ามามีส่วนร่วมด้วย เนื่องจากภาระของมอเตอร์จะส่งผลให้ระยะในการหยุดของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งในตอนนี้ใช้การเฟ้อระยะหยุดให้มากขึ้น ถ้านำภาระของมอเตอร์เข้ามาช่วยอาจจะทำให้ระบบเข้าสู่เป้าหมายได้เร็วขึ้น โดยสามารถกำหนดระยะหยุดที่น้อยลงได้

สัญญาณรบกวนที่เกิดจากมอเตอร์และอุปกรณ์รอบข้างทำให้ การควบคุมการเข้าสู่จุดเริ่มต้นมีความผิดพลาดบางครั้ง จึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรแยกระบบกราวด์ของอุปกรณ์ ที่จะมาเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ดควบคุมดังกล่าว

การป้อนกลับของอินเวอร์เตอร์ส่วนกระแสที่ส่งให้มอเตอร์ไม่สามารถใช้งานได้ จึงปรับเปลี่ยนการปรับปรุงตัวฟิชซีด้วยการเก็บค่าความเร็วล่าสุดมาใช้แทน

ในการวัดค่าต่างๆ ที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์ผลนั้น เช่น การวัดเวลาเข้าสู่เป้าหมาย และค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง พบว่าจะต้องใช้เครื่องมือที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพที่เชื่อถือได้ มิฉะนั้นอาจทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Wade, M.W. Dunnigan, B.W. Williams, "Modeling and simulation of induction machine vector control with rotor resistance identification," IEEE Transactions on Power Electronics, vol.12, no.3, pp.495-506, 1997.
- [2] C. Millet, D.Leroux, C.Bergmann, "Field Oriented Control of Induction Machine- Simulation and Realization," Proceedings of Advanced Motion Control, pp.180-185, 1996.
- [3] M.A. Ouhrouche, N. Lechevin, S. Abourida, "RT-Lab Based Real-Time Simulation of a Direct Field-Oriented Controller for an Induction Motor," Electrimacs, 2002.
- [4] Hakju Lee, Jaedo Lee, Sejin Seong, "Approach to fuzzy control of an indirect field-oriented induction motor drives," Proceedings of IEEE International Symposium, vol. 2, pp.1119-1123, 2001.
- [5] T.S. Radwan, M.F. Rahman, "Performances of Novel Fuzzy Logic Based Indirect Vector Control for Induction motor Drive," Industry Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE, vol.2, pp.1225-1231, 2000.
- [6] M.A. Ouhrouche, "Simulation of a Direct Field-Oriented Controller for an Induction Motor Using MATLAB with Simulink Software Package," Proceeding of the IASTED International Conference MS'2000, 2000.
- [7] Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert, "Simulink Implementation of Induction Machine Model- A Modular Approach," International Electric Machines and Drives Conference, 2003.
- [8] P.C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [9] วรชาติ แซ่ก๊ก และพิชิต ถ้ายอง, "การหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยวิธีการเร่งความเร็วมอเตอร์", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24), 22-23 พฤศจิกายน 2544 หน้า 199-204.
- [10] ชีรเดช พิญญพงษ์, สืบสรวง คชาภรณ์กุล, ถนัด เหลืองนฤทัย, และกนกเวทย์ ตั้งพิมพ์รัตน์, "การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ ชนิดมีลู่วควบคุมกระแสอยู่ภายในโดยใช้ DSP", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 23 (EECON-23), 23-24 พฤศจิกายน 2543 หน้า 205-208.
- [11] ณัฐภัทร พันธุ์คง, อุดมศักดิ์ ชัยขันธ์, และวีระพล โมณะะกุล "การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแรงบิด โดยตรงที่ไร้ตัววัดความเร็วโดยใช้ตัวอินทิเกรตที่ปรับตัวได้", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24), 22-23 พฤศจิกายน 2544 หน้า 387-392.

- [12] ปราโมทย์ อริยาดิเรก, 2547, “การควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [13] พรเจริญ สวัสดิ์รักษา, 2550, “ระบบควบคุมเครื่องปั๊มและตัดเหล็กแบบปรับตัวเองได้”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [14] http://202.44.14.44/mte_learning/Energy_Conservation_in_Industrial_Plant/5_4_3.html, last access 15 Oct 2007.
- [15] ปริพนธ์ พัฒนสัตยวงศ์. 2545. เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [16] ศิวะ หงษ์นภา. 2543. ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [17] Thomas W. O’Gorman. “An adaptive permutation test procedure for several common tests of significance” Division of Statistics, Department of Mathematical Sciences, Northern Illinois University, DeKalb, IL 60115, USA. Received 1 September 1999; revised 1 January 2000. Available online 8 January 2001.
- [18] รศ.วิพันธ์ ปรีชาพานิช. 2547. การวิเคราะห์ระบบควบคุมเวลาติสกรีต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] เกษม อุทัยไขฟ้า และ คณะ “การควบคุมตำแหน่งด้วยตัวควบคุมแบบพีซี” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย.
- [20] Isermann,R.; Lachmann,K.H. and Matko,D. 1992. Adaptive Control Systems. BPPC Wheatons Ltd, Exeter
- [21] Eric Unkauf and David Torrey, “Direct Model Reference Control of an Induction Motor “, IEEE
- [22] Astrom,K.j and B. Wittenmark.1984. Computer Controlled System.
- [23] Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert, “Simulink Implementation of Induction Machine Model- A Modular Approach,” International Electric Machines and Drives Conference, 2003.
- [24] Dimiter Driankov; Hans Hellendoom. and Michael Reinfrank. 1993. An Introduction to Fuzzy Control, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- [25] David G. Kleinbaum; Lawrence L. Kuper; Kieth E. Muller. and Azthar Nizam. 1998.
Applied Regression Analysis and Other Multivariable Method, 3th Edition The United
states of America: Duxbury Press.
- [26] กิติพงษ์ หงส์วรานนท์ และปริญชร ชัยศรี. 2546. “ระบบควบคุมเครื่องจักรปั๊มแผ่น โลหะ”,
ปริญญาานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

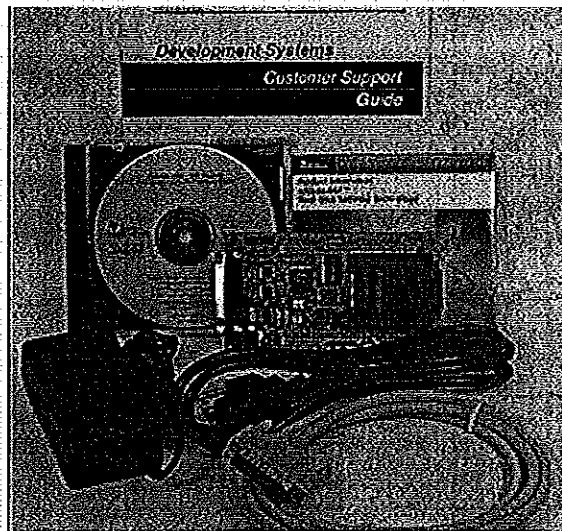
ภาคผนวก ก

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบการควบคุมความเร็วและตำแหน่งโดยระบบปรับด้วยตัวเองสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

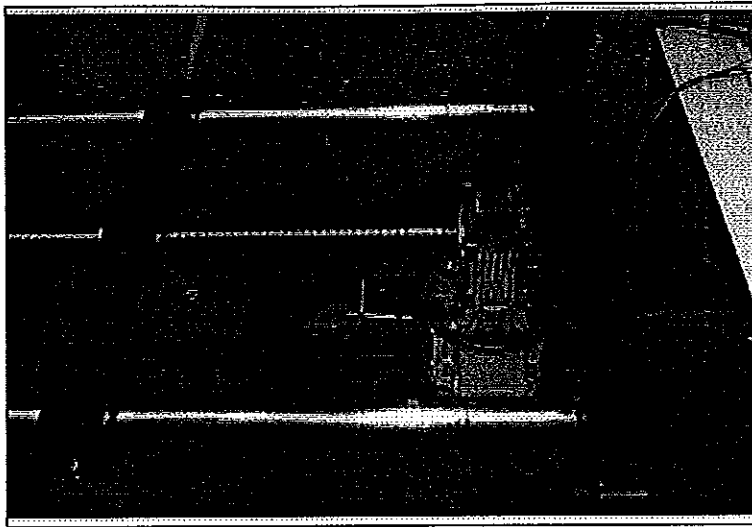
1.1. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer) ที่ใช้ในการทำงานวิจัยนี้เป็นคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลางเป็น Pentium 4 อัตราเร็ว 2.4 GHz และหน่วยความจำ RAM ขนาด 1 GB

1.2. บอร์ดประมวลผล DSP (Digital Signal Processing) ยี่ห้อ Texas Instruments รุ่น TMS320F2812 มีความเร็วในการประมวลผล 150 MHz หน่วยความจำ RAM ขนาด 18 kBytes หน่วยความจำ ROM ขนาด 128 kBytes เป็นบอร์ดควบคุมมีหน้าที่ประมวลผลและส่งเข้าหรือรับสัญญาณมาจัดการ โดยในส่วนนี้เป็นส่วนหลักของการควบคุมทั้งหมด ดังรูปที่ 1



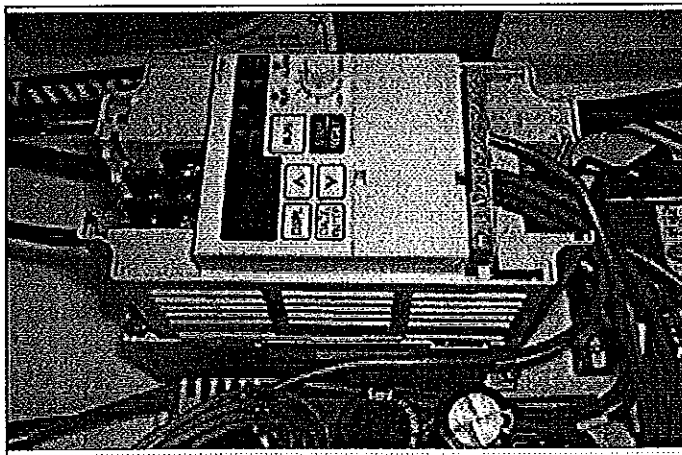
รูปที่ 1 รูปบอร์ดควบคุม DSP

1.3. มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบเป็นยี่ห้อ Semens ขนาด 0.5 แรงม้า
ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 มอเตอร์เหนียวนำสามเฟสที่ใช้ และระบบจับเคลื่อน

1.4. อินเวอร์เตอร์ เป็นอินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Yaskawa mini J7 Series ดังรูปที่ 3 แสดงผลเป็นตัวเลข สามารถควบคุมความเร็วแบบดิจิทัล และอนาลอก สามารถตั้งความเร็วได้หลายระดับ และการควบคุมนั้น เราสามารถควบคุมผ่านแผงหน้าปัดได้โดยตรง หรือจะควบคุมผ่านวงจรภายนอกก็ได้ ในการตั้งค่าควบคุมความเร็วจะส่งมาเป็นสัญญาณอนาลอก โดยตัวอินเวอร์เตอร์จะถูกโปรแกรมให้มีการรับค่าทางพอร์ตรับข้อมูลแบบอนาลอก ซึ่งจะทำให้ระดับความเร็วมีหลายระดับกว่าการควบคุมแบบดิจิทัล



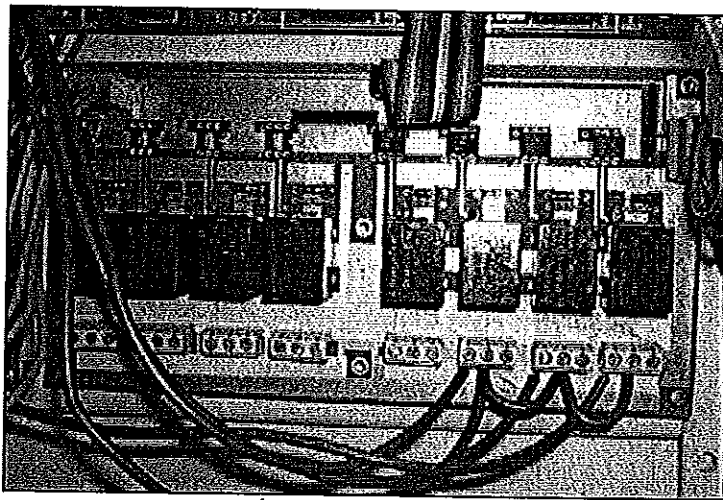
รูปที่ 3 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์

1.5. บอร์ดปรับระดับแรงดันเป็นวงจรที่ใช้สำหรับรับสัญญาณจากอุปกรณ์ภายนอก เช่น ลิมิตสวิตช์ สัญญาณเอนโค้ดเดอร์ และเป็นวงจรแปลงสัญญาณจากบอร์ด DSP TMS320F2812

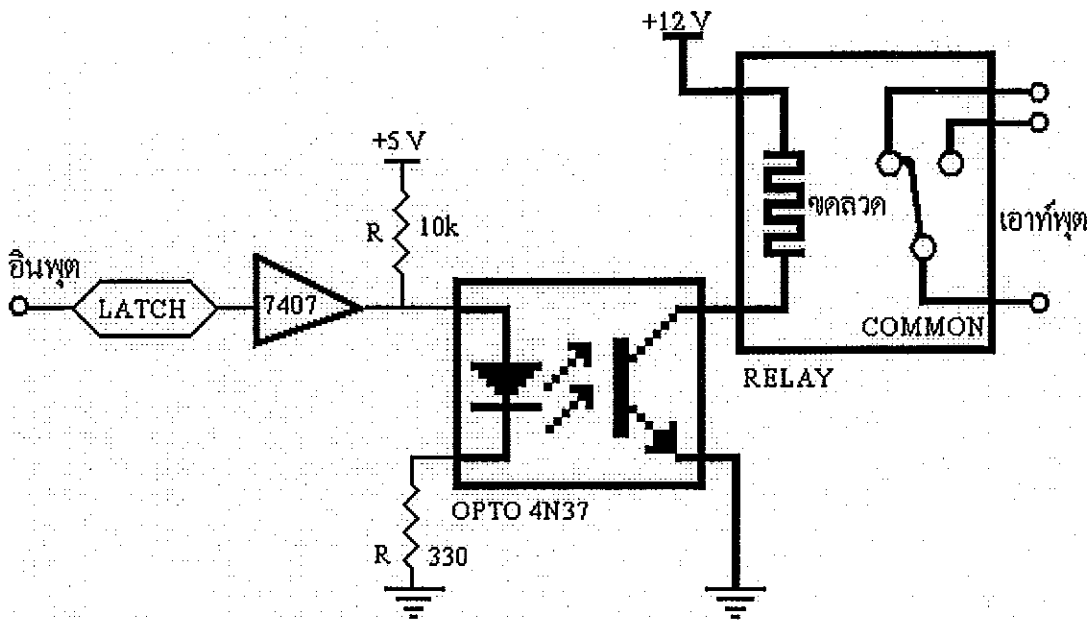
เพื่อไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกอีกด้วย ซึ่งบอร์ดบัฟเฟอร์จะประกอบด้วยวงจร step up/step down โดยใช้ไอซี เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลระหว่างบอร์ด DSP TMS320F2812 กับอุปกรณ์ภายนอก เนื่องจากบอร์ด DSP TMS320F2812 จะใช้แรงดัน 3.3V แต่อุปกรณ์ภายนอกใช้แรงดัน 5V จึงต้องมีการทำ step up แรงดันเพื่อให้บอร์ด DSP TMS320F2812 สามารถทำงานกับอุปกรณ์ภายนอกได้ และวงจร step down จะเปลี่ยนแรงดันจากอุปกรณ์ภายนอกที่เป็น 5V ให้เป็น 3.3V เพื่อส่งให้บอร์ด DSP TMS320F2812

1.6. วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อก(D/A Converter) โดยใช้ไอซี DAC0800 เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อกไปควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และยังมียังมีวงจรแยกกราวด์ด้วย

1.7. บอร์ดเอาต์พุตควบคุมทิศทางหมุน ดังรูปที่ 4 บอร์ดทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอก ประกอบด้วย แลทซ์ ไอซีเบอร์ 74LS373 เป็นตัวค้างค่าข้อมูลไว้ในกรณีที่ไม่ต้องการให้ข้อมูลภายนอกเปลี่ยนแปลง บัฟเฟอร์ ไอซีบัฟเฟอร์เบอร์ 74LS07 ต่อแบบเปิดขา collector ช่วยลดการใช้กระแสของวงจร รีเลย์(relay) เป็นตัวตัดต่อไฟแรงสูง และจะมีออปโตไอโซเลเตอร์ (opto-isolator) เบอร์ 4N37 แยกกราวด์ระหว่างบอร์ดควบคุม DSP วงจรรีเลย์ ซึ่งมีวงจรถามรูปที่ 5 ซึ่งจะใช้ในการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ โดยต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์



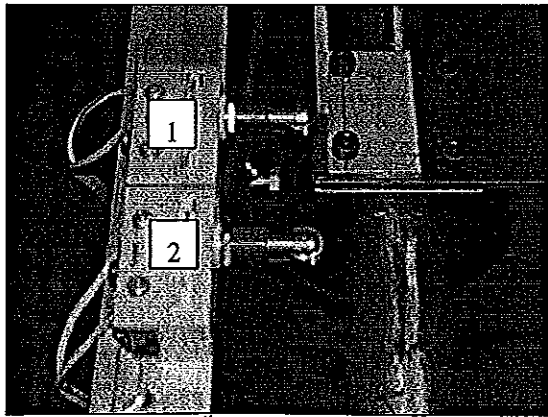
รูปที่ 4 บอร์ดวงจรเอาต์พุต



รูปที่ 5 วงจรเอาต์พุต ควบคุมทิศทางการหมุน

1.8. เอนโค้ดเดอร์ตำแหน่งแบบเพิ่มค่า ยี่ห้อ OMRON รุ่น E6A2-CWZ3C ให้ 100 พัลส์ ต่อ 1 รอบ และอาศัยการตรวจจับขอบขาขึ้นและขาลงของทั้งเฟส A และเฟส B ทำให้สามารถแบ่ง 1 พัลส์ เป็น 4 ส่วน ดังนั้นในการหมุน 1 รอบก็จะสามารถแบ่งสเตปการหมุนได้เป็น 400 ส่วน

1.9. ลิมิตสวิตช์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดจุดเริ่มต้นของการควบคุม และใช้ป้องกันไม่ให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย เมื่อบอร์ดควบคุมไม่สามารถทำงานได้ ดังรูปที่ 6 ลิมิตสวิตช์ตัวที่ 1 ใช้สำหรับกำหนดจุดเริ่มต้นของการควบคุม และลิมิตสวิตช์ตัวที่ 2 ใช้สำหรับป้องกันไม่ให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย เมื่อบอร์ดควบคุมไม่สามารถทำงานได้ โดยจะทำการตัดไฟของวงจรหลัก



รูปที่ 6 ลิมิตสวิตช์ ที่ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของตัววัดระยะ

2. ตารางทดสอบการควบคุมความเร็วและตำแหน่ง

ตารางทดสอบควบคุมความเร็วและตำแหน่ง โดยกำหนดระยะงอที่ทำการเปลี่ยนแปลงภาระของมอเตอร์ในหัวข้อ 5.2.1

ตาราง 1 ตารางการควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 360.00 มิลลิเมตร

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
0.00	360.00	359.975	8.235	0.025
0.00	360.00	359.975	8.234	0.025
0.00	360.00	359.975	8.172	0.025
0.00	360.00	360.000	7.984	0.000
0.00	360.00	360.000	8.125	0.000
0.00	360.00	359.975	8.063	0.025
40.00	360.00	360.000	8.219	0.000
40.00	360.00	360.000	8.234	0.000
40.00	360.00	359.975	8.265	0.025
40.00	360.00	359.975	8.187	0.025
40.00	360.00	360.000	8.258	0.000
60.00	360.00	360.025	8.297	-0.025
60.00	360.00	360.000	8.437	0.000
60.00	360.00	360.000	8.281	0.000
60.00	360.00	360.000	8.281	0.000
60.00	360.00	360.000	8.235	0.000
70.00	360.00	360.000	8.359	0.000
70.00	360.00	359.975	8.313	0.025
70.00	360.00	359.975	8.437	0.025
70.00	360.00	360.000	8.312	0.000

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
70.00	360.00	359.975	8.297	0.025
80.00	360.00	359.975	8.328	0.025
80.00	360.00	360.000	8.453	0.000
80.00	360.00	360.000	8.422	0.000
80.00	360.00	359.975	8.359	0.025
80.00	360.00	360.000	8.407	0.000
90.00	360.00	359.975	8.495	0.025
90.00	360.00	360.000	8.375	0.000
90.00	360.00	359.975	8.406	0.025
90.00	360.00	360.000	8.473	0.000
90.00	360.00	359.975	8.500	0.025
100.00	360.00	360.000	8.578	0.000
100.00	360.00	359.975	8.500	0.025
100.00	360.00	359.975	8.407	0.025
100.00	360.00	359.975	8.532	0.025
100.00	360.00	359.975	8.453	0.025
90.00	360.00	359.975	8.485	0.025
90.00	360.00	359.975	8.547	0.025
90.00	360.00	359.975	8.422	0.025
90.00	360.00	360.000	8.406	0.000
90.00	360.00	359.975	8.407	0.025
80.00	360.00	360.000	8.391	0.000
80.00	360.00	359.975	8.360	0.025
80.00	360.00	360.000	8.297	0.000
80.00	360.00	359.975	8.435	0.025
80.00	360.00	359.975	8.297	0.025

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
70.00	360.00	360.000	8.329	0.000
70.00	360.00	360.000	8.250	0.000
70.00	360.00	359.975	8.282	0.025
70.00	360.00	359.975	8.328	0.025
70.00	360.00	359.975	8.265	0.025
60.00	360.00	360.000	8.281	0.000
60.00	360.00	360.000	8.125	0.000
60.00	360.00	359.975	8.062	0.025
60.00	360.00	359.975	8.171	0.025
60.00	360.00	359.975	8.172	0.025
40.00	360.00	359.975	8.172	0.025
40.00	360.00	360.025	8.015	-0.025
40.00	360.00	359.975	8.078	0.025
40.00	360.00	359.975	8.047	0.025
40.00	360.00	360.000	8.156	0.000
0.00	360.00	360.000	7.907	0.000
0.00	360.00	360.000	8.484	0.000
0.00	360.00	359.975	7.906	0.025
0.00	360.00	359.975	7.891	0.025
0.00	360.00	359.975	7.875	0.025
50.00	360.00	360.000	8.094	0.000
50.00	360.00	359.975	8.172	0.025
50.00	360.00	359.975	8.156	0.025
50.00	360.00	360.000	8.204	0.000
50.00	360.00	360.000	8.094	0.000
100.00	360.00	359.975	8.422	0.025

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
100.00	360.00	359.975	8.453	0.025
50.00	360.00	359.975	8.156	0.025
50.00	360.00	359.975	8.031	0.025
0.00	360.00	360.000	7.875	0.000
เฉลี่ย	360.00	360.000±0.025	8.269	±0.025

ตาราง 2 ตารางการควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 260.25 มิลลิเมตร

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
0.00	260.25	260.225	6.344	0.025
0.00	260.25	260.250	6.266	0.000
0.00	260.25	260.225	6.328	0.025
0.00	260.25	260.225	6.312	0.025
0.00	260.25	260.250	6.234	0.000
0.00	260.25	260.225	6.281	0.025
40.00	260.25	260.250	6.531	0.000
40.00	260.25	260.225	6.328	0.025
40.00	260.25	260.250	6.437	0.000
40.00	260.25	260.250	6.344	0.000
40.00	260.25	260.250	6.453	0.000
60.00	260.25	260.250	6.531	0.000
60.00	260.25	260.225	6.610	0.025
60.00	260.25	260.225	6.469	0.025
60.00	260.25	260.225	6.531	0.025
60.00	260.25	260.225	6.516	0.025
70.00	260.25	260.225	6.593	0.025

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
70.00	260.25	260.250	6.453	0.000
70.00	260.25	260.250	6.438	0.000
70.00	260.25	260.225	6.532	0.025
70.00	260.25	260.225	6.485	0.025
80.00	260.25	260.250	6.640	0.000
80.00	260.25	260.250	6.594	0.000
80.00	260.25	260.225	6.500	0.025
80.00	260.25	260.225	6.672	0.025
80.00	260.25	260.225	6.547	0.025
90.00	260.25	260.225	6.593	0.025
90.00	260.25	260.250	6.610	0.000
90.00	260.25	260.225	6.703	0.025
90.00	260.25	260.250	6.734	0.000
90.00	260.25	260.250	6.703	0.000
100.00	260.25	260.225	6.875	0.025
100.00	260.25	260.250	6.844	0.000
100.00	260.25	260.250	6.781	0.025
100.00	260.25	260.250	6.813	0.000
100.00	260.25	260.225	6.875	0.000
90.00	260.25	260.225	6.828	0.025
90.00	260.25	260.225	6.672	0.025
90.00	260.25	260.225	6.750	0.025
90.00	260.25	260.250	6.781	0.000
90.00	260.25	260.225	6.765	0.025
80.00	260.25	260.225	6.672	0.025
80.00	260.25	260.225	6.578	0.025

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
80.00	260.25	260.225	6.485	0.025
80.00	260.25	260.250	6.547	0.000
80.00	260.25	260.225	6.547	0.025
70.00	260.25	260.225	6.578	0.025
70.00	260.25	260.275	6.547	-0.025
70.00	260.25	260.225	6.594	0.025
70.00	260.25	260.225	6.454	0.025
70.00	260.25	260.225	6.438	0.025
60.00	260.25	260.250	6.547	0.000
60.00	260.25	260.225	6.469	0.025
60.00	260.25	260.225	6.406	0.025
60.00	260.25	260.225	6.391	0.025
60.00	260.25	260.225	6.375	0.025
40.00	260.25	260.275	6.360	-0.025
40.00	260.25	260.225	6.375	0.025
40.00	260.25	260.225	6.359	0.025
40.00	260.25	260.250	6.390	0.000
40.00	260.25	260.225	6.438	0.025
0.00	260.25	260.250	6.140	0.000
0.00	260.25	260.225	6.203	0.025
0.00	260.25	260.225	6.156	0.025
0.00	260.25	260.225	6.188	0.025
0.00	260.25	260.250	6.125	0.000
40.00	260.25	260.225	6.390	0.025
40.00	260.25	260.225	6.313	0.025
60.00	260.25	260.250	6.328	0.000

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
60.00	260.25	260.225	6.390	0.025
80.00	260.25	260.250	6.516	0.000
80.00	260.25	260.225	6.391	0.025
100.00	260.25	260.225	6.610	0.025
100.00	260.25	260.225	6.625	0.025
70.00	260.25	260.225	6.343	0.025
70.00	260.25	260.225	6.266	0.025
40.00	260.25	260.250	6.281	0.000
40.00	260.25	260.225	6.421	0.025
0.00	260.25	260.250	6.187	0.000
0.00	260.25	260.225	6.172	0.025
เฉลี่ย	260.25	260.250	6.486	0.025

ตาราง 3 ตารางการควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 100.00 มิลลิเมตร

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
0.00	100.00	99.975	3.828	0.025
0.00	100.00	100.000	3.781	0.000
0.00	100.00	100.000	3.750	0.000
0.00	100.00	99.975	3.688	0.025
0.00	100.00	100.000	3.781	0.000
0.00	100.00	100.000	3.812	0.000
40.00	100.00	99.975	3.641	0.025
40.00	100.00	99.975	3.797	0.025
40.00	100.00	100.000	3.672	0.000
40.00	100.00	100.000	3.766	0.000

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
40.00	100.00	99.975	3.782	0.025
60.00	100.00	99.975	3.953	0.025
60.00	100.00	99.975	3.782	0.025
60.00	100.00	99.975	3.782	0.025
60.00	100.00	100.000	3.938	0.000
60.00	100.00	100.000	3.937	0.000
70.00	100.00	100.000	3.922	0.000
70.00	100.00	100.000	3.922	0.000
70.00	100.00	100.000	3.906	0.000
70.00	100.00	100.000	3.953	0.000
70.00	100.00	100.000	3.797	0.000
80.00	100.00	100.025	4.000	-0.025
80.00	100.00	100.000	3.984	0.000
80.00	100.00	99.975	3.906	0.025
80.00	100.00	100.000	4.016	0.000
80.00	100.00	100.000	3.968	0.000
90.00	100.00	99.975	3.985	0.025
90.00	100.00	100.000	3.969	0.000
90.00	100.00	99.975	4.016	0.025
90.00	100.00	100.000	4.031	0.000
90.00	100.00	100.000	3.969	0.000
100.00	100.00	99.975	4.000	0.025
100.00	100.00	99.975	3.906	0.025
100.00	100.00	99.975	3.891	0.025
100.00	100.00	100.000	3.968	0.000
100.00	100.00	99.975	4.031	0.025

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
90.00	100.00	100.000	4.015	0.000
90.00	100.00	99.975	3.828	0.025
90.00	100.00	99.975	3.813	0.025
90.00	100.00	99.975	3.860	0.025
90.00	100.00	99.975	4.047	0.025
80.00	100.00	99.975	3.984	0.025
80.00	100.00	99.975	3.906	0.025
80.00	100.00	100.025	3.922	-0.025
80.00	100.00	100.025	3.969	-0.025
80.00	100.00	100.000	3.922	0.000
70.00	100.00	100.000	3.703	0.000
70.00	100.00	99.975	3.532	0.025
70.00	100.00	99.975	3.610	0.025
70.00	100.00	100.000	3.781	0.000
70.00	100.00	100.000	3.563	0.000
60.00	100.00	99.975	3.813	0.025
60.00	100.00	99.975	3.813	0.025
60.00	100.00	100.000	3.875	0.000
60.00	100.00	99.975	3.781	0.025
60.00	100.00	100.000	3.765	0.000
40.00	100.00	100.000	3.937	0.000
40.00	100.00	99.975	3.672	0.025
40.00	100.00	99.975	3.828	0.025
40.00	100.00	100.000	3.812	0.000
40.00	100.00	100.000	3.875	0.000
0.00	100.00	99.975	3.765	0.025

น้ำหนักของ ภาระ(kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
0.00	100.00	100.000	3.782	0.000
0.00	100.00	99.975	3.750	0.025
0.00	100.00	99.975	3.797	0.025
0.00	100.00	99.975	3.781	0.025
40.00	100.00	99.975	3.813	0.025
40.00	100.00	99.975	3.843	0.025
60.00	100.00	99.975	3.938	0.025
60.00	100.00	99.975	3.844	0.025
80.00	100.00	99.975	3.797	0.025
80.00	100.00	100.000	3.828	0.000
100.00	100.00	100.000	3.906	0.000
100.00	100.00	99.975	3.969	0.025
70.00	100.00	99.975	3.859	0.025
70.00	100.00	99.975	3.937	0.025
40.00	100.00	99.975	3.781	0.025
40.00	100.00	99.975	3.844	0.025
0.00	100.00	99.975	3.843	0.025
0.00	100.00	100.000	3.735	0.000
เฉลี่ย	100.00	100.000±0.025	3.853	±0.025

ตาราง 4 ตารางการควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 40.00 มิลลิเมตร

น้ำหนักของภาระ (kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
0.00	40.00	40.000	2.375	0.000
0.00	40.00	40.000	2.282	0.000
0.00	40.00	40.000	2.360	0.000

น้ำหนักของภาระ (kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
0.00	40.00	40.000	2.329	0.000
0.00	40.00	39.975	2.313	0.025
0.00	40.00	40.000	2.359	0.000
40.00	40.00	40.000	2.406	0.000
40.00	40.00	40.000	2.328	0.000
40.00	40.00	40.000	2.343	0.000
40.00	40.00	40.000	2.375	0.000
40.00	40.00	40.000	2.125	0.000
60.00	40.00	40.025	2.156	-0.025
60.00	40.00	40.000	2.141	0.000
60.00	40.00	39.975	2.375	0.025
60.00	40.00	40.000	2.210	0.000
60.00	40.00	40.000	2.266	0.000
70.00	40.00	39.975	2.141	0.025
70.00	40.00	39.975	2.062	0.025
70.00	40.00	40.025	2.359	-0.025
70.00	40.00	40.000	2.141	0.000
70.00	40.00	40.000	2.156	0.000
80.00	40.00	39.975	2.640	0.025
80.00	40.00	40.000	2.078	0.000
80.00	40.00	40.025	2.141	-0.025
80.00	40.00	40.000	2.157	0.000
80.00	40.00	40.000	2.328	0.000
90.00	40.00	40.000	2.078	0.000
90.00	40.00	40.000	2.031	0.000
90.00	40.00	40.000	2.141	0.000

น้ำหนักของภาระ (kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
90.00	40.00	40.000	2.312	0.000
90.00	40.00	40.000	2.172	0.000
100.00	40.00	40.000	2.320	0.000
100.00	40.00	40.025	2.156	-0.025
100.00	40.00	40.000	2.469	0.000
100.00	40.00	40.000	2.313	0.000
100.00	40.00	40.000	2.312	0.000
90.00	40.00	40.000	2.328	0.000
90.00	40.00	40.000	2.156	0.000
90.00	40.00	40.000	2.125	0.000
90.00	40.00	40.000	2.375	0.000
90.00	40.00	40.000	2.046	0.000
80.00	40.00	40.000	2.187	0.000
80.00	40.00	40.025	2.078	-0.025
80.00	40.00	40.000	2.079	0.000
80.00	40.00	40.000	2.125	0.000
80.00	40.00	39.975	2.328	0.025
70.00	40.00	40.000	2.141	0.000
70.00	40.00	39.975	2.312	0.025
70.00	40.00	40.025	2.109	-0.025
70.00	40.00	39.975	2.406	0.025
70.00	40.00	40.025	2.156	-0.025
60.00	40.00	40.000	2.093	0.000
60.00	40.00	39.975	2.359	0.025
60.00	40.00	40.000	2.125	0.000
60.00	40.00	39.975	2.094	0.025

น้ำหนักของภาระ (kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
60.00	40.00	40.025	2.156	-0.025
40.00	40.00	40.000	2.329	0.000
40.00	40.00	40.000	2.063	0.000
40.00	40.00	40.025	2.281	-0.025
40.00	40.00	40.000	2.438	0.000
40.00	40.00	39.975	2.375	0.025
0.00	40.00	40.025	2.062	-0.025
0.00	40.00	40.000	2.109	0.000
0.00	40.00	40.000	2.078	0.000
0.00	40.00	40.000	2.156	0.000
0.00	40.00	40.025	2.125	-0.025
40.00	40.00	40.000	2.140	0.000
40.00	40.00	40.000	2.125	0.000
60.00	40.00	40.000	2.422	0.000
60.00	40.00	39.975	2.140	0.025
80.00	40.00	40.000	2.047	0.000
80.00	40.00	40.000	2.094	0.000
100.00	40.00	40.000	2.141	0.000
100.00	40.00	39.975	2.672	0.025
70.00	40.00	39.975	2.391	0.025
70.00	40.00	39.975	2.125	0.025
40.00	40.00	40.000	2.109	0.000
40.00	40.00	40.000	2.328	0.000
0.00	40.00	39.975	2.109	0.025
0.00	40.00	39.975	2.359	0.025
เฉลี่ย	40.00	40.000±0.025	2.228	±0.025

ตาราง 5 ตารางการควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 200.00 มิลลิเมตร

น้ำหนักของภาระ (kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
0.00	200.00	199.975	4.937	0.025
0.00	200.00	200.000	5.062	0.000
0.00	200.00	200.000	5.015	0.000
0.00	200.00	200.000	4.953	0.000
0.00	200.00	200.000	4.984	0.000
0.00	200.00	199.975	4.937	0.025
0.00	200.00	200.000	5.000	0.000
0.00	200.00	200.000	4.969	0.000
0.00	200.00	199.975	4.969	0.025
0.00	200.00	199.975	4.953	0.025
0.00	200.00	199.975	5.047	0.025
0.00	200.00	200.000	5.016	0.000
0.00	200.00	200.000	5.016	0.000
0.00	200.00	199.975	5.047	0.025
0.00	200.00	200.000	5.016	0.000
0.00	200.00	200.000	5.016	0.000
0.00	200.00	200.000	4.891	0.000
100.00	200.00	199.975	5.453	0.025
100.00	200.00	200.000	5.235	0.000
100.00	200.00	200.000	5.438	0.000
100.00	200.00	200.000	5.047	0.000
100.00	200.00	199.975	5.357	0.025
100.00	200.00	200.000	5.469	0.000
100.00	200.00	200.000	5.313	0.000
100.00	200.00	200.000	5.375	0.000

น้ำหนักของภาระ (kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
100.00	200.00	199.975	5.437	0.025
100.00	200.00	199.975	5.407	0.025
100.00	200.00	200.000	5.375	0.000
100.00	200.00	200.000	5.406	0.000
100.00	200.00	200.000	5.406	0.000
100.00	200.00	199.975	5.313	0.025
100.00	200.00	200.000	5.312	0.000
100.00	200.00	199.975	5.328	0.025
100.00	200.00	200.000	5.328	0.000
100.00	200.00	200.000	5.313	0.000
100.00	200.00	200.000	5.359	0.000
100.00	200.00	200.000	5.313	0.000
100.00	200.00	199.975	5.328	0.025
100.00	200.00	199.975	5.313	0.025
100.00	200.00	200.000	5.375	0.000
0.00	200.00	200.000	4.954	0.000
0.00	200.00	199.975	5.125	0.025
0.00	200.00	199.975	5.016	0.025
0.00	200.00	199.975	5.000	0.025
0.00	200.00	199.975	5.078	0.025
0.00	200.00	199.975	5.062	0.025
0.00	200.00	200.000	4.984	0.000
0.00	200.00	199.975	4.922	0.025
0.00	200.00	200.000	5.016	0.000
0.00	200.00	199.975	4.984	0.025
0.00	200.00	200.000	4.954	0.000

น้ำหนักของภาระ (kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
0.00	200.00	199.975	4.953	0.025
0.00	200.00	199.975	4.953	0.025
0.00	200.00	199.975	4.953	0.025
0.00	200.00	200.000	5.016	0.000
0.00	200.00	199.975	4.953	0.025
0.00	200.00	200.000	4.859	0.000
100.00	200.00	199.975	5.453	0.025
100.00	200.00	199.975	5.281	0.025
100.00	200.00	199.975	5.360	0.025
100.00	200.00	200.000	5.360	0.000
100.00	200.00	200.000	5.313	0.000
100.00	200.00	200.000	5.360	0.000
100.00	200.00	199.975	5.313	0.025
100.00	200.00	200.000	5.297	0.000
100.00	200.00	200.000	5.344	0.000
100.00	200.00	199.975	5.281	0.025
100.00	200.00	200.000	5.297	0.000
100.00	200.00	199.975	5.250	0.025
100.00	200.00	199.975	5.250	0.025
100.00	200.00	200.000	5.328	0.000
100.00	200.00	199.975	5.344	0.025
100.00	200.00	199.975	5.250	0.025
100.00	200.00	200.000	5.454	0.000
100.00	200.00	200.000	5.312	0.000
100.00	200.00	199.975	5.328	0.025
100.00	200.00	200.000	5.375	0.000

น้ำหนักของภาระ (kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
100.00	200.00	199.975	5.328	0.025
0.00	200.00	200.000	4.985	0.000
0.00	200.00	199.975	4.984	0.025
0.00	200.00	199.975	4.984	0.025
0.00	200.00	199.975	4.891	0.025
0.00	200.00	199.975	4.906	0.025
0.00	200.00	200.000	4.953	0.000
0.00	200.00	200.000	4.937	0.000
0.00	200.00	199.975	4.922	0.025
0.00	200.00	199.975	4.984	0.025
0.00	200.00	200.000	4.984	0.000
0.00	200.00	199.975	4.906	0.025
0.00	200.00	199.975	5.016	0.025
0.00	200.00	199.975	4.969	0.025
0.00	200.00	200.000	4.890	0.000
100.00	200.00	200.000	5.453	0.000
100.00	200.00	200.000	5.422	0.000
100.00	200.00	199.975	5.360	0.025
100.00	200.00	199.975	5.406	0.025
100.00	200.00	199.975	5.328	0.025
100.00	200.00	199.975	5.313	0.025
100.00	200.00	199.975	5.344	0.025
100.00	200.00	199.975	5.297	0.025
100.00	200.00	200.000	5.343	0.000
100.00	200.00	199.975	5.437	0.025
100.00	200.00	199.975	5.375	0.025

น้ำหนักของภาระ (kg)	ระยะที่กำหนด (mm)	ระยะที่วัดได้ (mm)	เวลาที่ใช้ (s)	ความคลาดเคลื่อน (mm)
100.00	200.00	200.000	5.375	0.000
100.00	200.00	199.975	5.343	0.025
100.00	200.00	200.000	5.360	0.000
100.00	200.00	199.975	5.297	0.025
100.00	200.00	199.975	5.343	0.025
เฉลี่ย	200.00	200.000 ± 0.025	5.181	± 0.025

ตาราง 6 ตารางการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ครั้งที่ 22 กับ 23 โดยเก็บค่ามาทุกๆ 0.2 วินาที

ครั้งที่	ครั้งที่ 22	ครั้งที่ 23	ครั้งที่	ครั้งที่ 22	ครั้งที่ 23
1	0.000	0.000	11	98.625	98.175
2	3.275	3.000	12	109.425	108.975
3	12.775	12.425	13	120.250	119.775
4	23.275	22.875	14	131.050	130.575
5	33.925	33.500	15	141.875	141.375
6	44.675	44.225	16	152.700	152.200
7	55.450	55.000	17	163.525	163.000
8	66.225	65.775	18	174.350	173.825
9	77.025	76.575	19	185.175	184.650
10	87.825	87.375	20	200.000	199.975

ภาคผนวก ข

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในงานการประชุมวิชาการ The 2nd National Conference on Computing and Information Technology (NCCIT'06) ระหว่างวันที่ 19-20 พฤษภาคม 2549, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในหัวข้อเรื่อง “การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามเวลาจริงแบบระบบปรับเองได้ (Real Time Speed Control of Induction Motor by Linear Regression)”

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามเวลาจริงแบบระบบปรับเองได้

Real Time Speed Control of Induction Motor by Linear Regression

วีรยุทธ พรสมิทธิกุล¹, ชนศ เคารพพวงศ์², มนตรี กาญจนะเดชะ³

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
weerayutpsmith@hotmail.com¹, kthanate@coe.psu.ac.th², montri@coe.psu.ac.th³

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ กระบวนการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้คงที่แบบปรับเองได้ ในขณะที่ภาระของระบบมีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้วิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียวในช่วงเริ่มต้น เพื่อหาค่าตัวแปรความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่สเตเตอร์และความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากนั้นใช้วิธีการถดถอยเชิงซ้อนเพื่อหาค่าตัวแปรความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่สเตเตอร์, กระแสที่สเตเตอร์, และความเร็วมอเตอร์ เพื่อให้ส่วนควบคุมสามารถปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เข้าสู่ความเร็วอ้างอิงไม่ว่าภาระของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงมากเท่าไรก็ตาม โดยแนวความคิดนี้ได้เสนอผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรม *MATLAB with SIMULINK*

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำ, ระบบควบคุมแบบปรับเอง, การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว, การถดถอยเชิงซ้อน

Abstract

This paper proposes an adaptive controlling process for induction motor's speed while system's load is changing. This system uses a simple linear regression in an initial state to define the relative between stator's frequency and motor's speed parameters. The multiple regression has been employed to define the relation among stator's frequency, stator's current, and motor's speed parameters, for control induction motor's speed while system's load is changed. The proposed system was

simulated using SIMULINK in MATLAB. The results showed that the proposed process working efficiently.

Keyword: Induction Motor, adaptive control, simple linear regression, multiple regression.

1. บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบเหนี่ยวนำนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เพราะเปรียบเทียบกับมอเตอร์ซิงโครนัสพบว่ามีราคาถูก ความเร็วค่อนข้างคงที่ง่ายต่อการบำรุงรักษา ยังมีความแข็งแรงทนทาน มีประสิทธิภาพสูง และสามารถสตาร์ทได้โดยไม่ต้องการแรงบิดสูงขณะสตาร์ท แต่การเปลี่ยนแปลงภาระของมอเตอร์ทำให้ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลง เช่น เครื่องกลึงโลหะเมื่อใบมีดเข้าไปกลึง โลหะจะทำให้เกิดภาระที่สูงกับมอเตอร์แล้วภาระนั้นก็ค่อยๆลดลง ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วไม่คงที่ จะทำให้โลหะที่กลึงไม่เรียบเพื่อที่จะทำให้อัตราการเหนี่ยวนำสามารถหมุนให้มีความเร็วคงที่ในสภาวะที่ภาระมีการเปลี่ยนแปลงได้เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้คงที่แบบปรับเองได้ ในขณะที่ภาระของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ใช้วิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียวในช่วงแรก หาค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะว่าการคำนวณหาตัวแปรควบคุมง่ายและเสียเวลาในการเข้าสู่ระบบน้อย และหลังจากนั้น

ใช้วิธีการลดอเนียงซ้อน เพื่อให้ส่วนควบคุมสามารถปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เข้าสู่ความเร็วอ้างอิงได้เร็วขึ้น ซึ่งระบบควบคุมปรับเองได้จะทำการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุดเพื่อหาตัวแปรในการควบคุมให้มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

จากการศึกษางานวิจัยอื่น [1-8] ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK งานวิจัย [1-7] ได้บอกถึงบล็อกไดอะแกรมโดยรวม แต่ขาดรายละเอียดของบล็อกภายในและระบบควบคุมที่ใช้ และในงานวิจัยมีการใช้ S-function ที่อยู่ในรูป Software source code [1] แทน SIMULINK block [2-5] ซึ่งพบว่ายากกว่ามากเพราะต้องทำการเขียนโปรแกรมเพื่อเข้าถึงตัวแปรแต่ละตัวในแบบจำลองงานวิจัย [8] แสดงแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ Space vector model ส่วนแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ได้ทำตามแบบจำลองของ Krause [9] ซึ่งเป็นสถานะชั่วครู่ที่ใช้แบบจำลองไดนามิก d-q ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ภาพรวมของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งใช้รูปแบบการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยอ้อม ในการศึกษาการทำงานที่สถานะชั่วครู่ใช้แบบจำลองไดนามิก d-q ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (d-q dynamic model) สร้างจากแบบจำลองของ Krause (Krause's model) ดังรายละเอียดใน [9] สามารถเขียนสมการในรูปแบบของฟลักซ์ (Flux linkage) ได้ดังนี้

$$\frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{mq} + F_{qs}) \right] \quad (1)$$

$$\frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{md} + F_{ds}) \right] \quad (2)$$

$$\frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b \left[v_{qr} - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{mq} - F_{qr}) \right] \quad (3)$$

$$\frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b \left[v_{dr} + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{md} - F_{dr}) \right] \quad (4)$$

$$F_{mq} = X_{ml}^* \left[\frac{F_{qs}}{X_{ls}} + \frac{F_{qr}}{X_{lr}} \right] \quad (5)$$

$$F_{md} = X_{ml}^* \left[\frac{F_{ds}}{X_{ls}} + \frac{F_{dr}}{X_{lr}} \right] \quad (6)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} (F_{qs} - F_{mq}) \quad (7)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} (F_{ds} - F_{md}) \quad (8)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{X_{lr}} (F_{qr} - F_{mq}) \quad (9)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{X_{lr}} (F_{dr} - F_{md}) \quad (10)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{n_p}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} (F_{ds} i_{qs} - F_{qs} i_{ds}) \quad (11)$$

$$T_e - T_L = J \left(\frac{2}{n_p} \right) \frac{d\omega_r}{dt} \quad (12)$$

เมื่อ v_{qs}, v_{ds} : แรงดันสเตเตอร์แกน q และ d

v_{qr}, v_{dr} : แรงดันโรเตอร์แกน q และ d

F_{mq}, F_{md} : ฟลักซ์แมกนีไทซิงแกน q และ d

R_r : ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์

R_s : ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

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

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

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

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

i_{qs}, i_{ds} : กระแสสเตเตอร์ในแกน q และ d

i_{qr}, i_{dr} : กระแสโรเตอร์ในแกน q และ d

n_p : จำนวนคู่ของขั้ว

J: โมเมนต์ความเฉื่อย

T_e : แรงบิดทางไฟฟ้า

T_L : แรงบิดของภาระ

ω_e : ความถี่เชิงมุมสเตเตอร์

ω_b : ความถี่ฐานเชิงมุมมอเตอร์

ω_r : ความเร็วเชิงมุมโรเตอร์

2 การประมาณค่าแบบการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว

สมการทั่วไปของการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว จากสมการความเร็วทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$\omega_r(S, f, P) = \frac{(1-S) \cdot 120 \cdot f}{P} \quad (13)$$

เมื่อ S: ค่าสลิปของมอเตอร์
P: จำนวนขั้วมอเตอร์
f: ความถี่ที่สเตเตอร์มอเตอร์

เมื่อนำมาเขียนเป็นสมการทั่วไปของการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว

$$\omega_r(f) = m_f \cdot f + C + e \quad (14)$$

เมื่อ m_f : สัมประสิทธิ์ความชันของความสัมพันธ์
C: ค่าคงที่จุดตัดบนแกน ω_r
e: ค่าความคลาดเคลื่อน

เมื่อแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละจุดข้อมูลจะได้

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (\omega_{r_i} - C - m_f \cdot f_i) \quad (15)$$

โดยที่ค่า n แทนจำนวนข้อมูลทั้งหมด การหาค่ากำลังสองของความคลาดเคลื่อนน้อยสุดโดยสมการจะอยู่ในรูป

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (\omega_{r_i} - C - m_f \cdot f_i)^2 \quad (16)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์ m_f และ C จะใช้วิธีอนุพันธ์ย่อย โดยอนุพันธ์ย่อยสมการที่ (16) เทียบกับตัวแปรทั้งสองตัว เมื่อต้องการค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด ดังนั้นค่าอนุพันธ์ย่อยต้องเท่ากับ 0 ดังนั้นเมื่อทำการแก้สมการทั้งสองจะได้สัมประสิทธิ์ m_f และ C ดังนี้

$$m_f = \frac{n \sum_{i=1}^n f_i \cdot \omega_{r_i} - \sum_{i=1}^n f_i \cdot \sum_{i=1}^n \omega_{r_i}}{n \sum_{i=1}^n f_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n f_i \right)^2} \quad (17)$$

$$C = \overline{\omega_r} - m_f \cdot \overline{f} \quad (18)$$

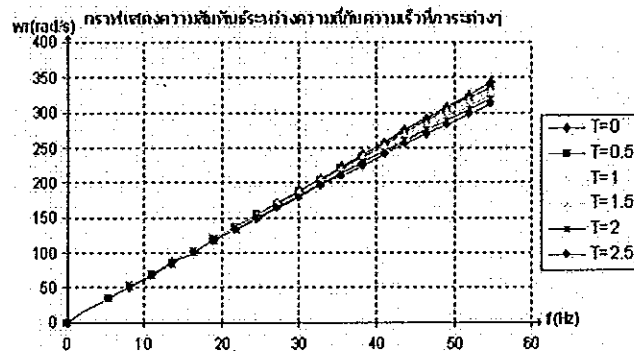
การประมาณแบบกำลังสองของความคลาดเคลื่อนน้อยสุดมีความถูกต้องสูงเมื่อมีข้อมูลในการสังเกตมากกว่า 20 ข้อมูล

2.3 การประมาณค่าแบบการถดถอยเชิงซ้อน

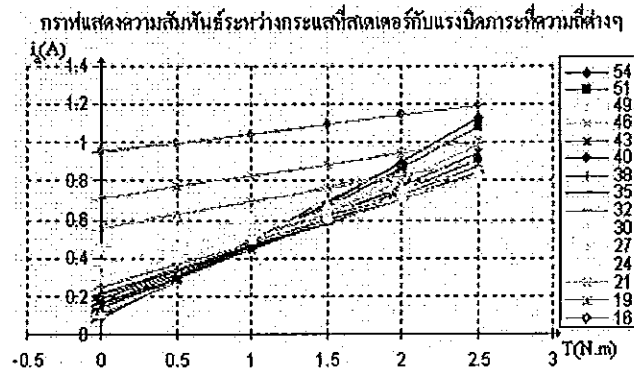
จากสมการทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (13) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความถี่ที่ภาระของมอเตอร์ต่างกันดังภาพที่ 1 จะแสดงให้เห็นว่าค่า S ในสมการที่ (13) จะมีค่าแปรผันตรงกับภาระของมอเตอร์ที่ได้รับ เมื่อนำมาเขียนเป็นสมการทั่วไปของการถดถอยเชิงซ้อนจะได้

$$\omega_r(T, f) = (m_f + m_T \cdot T) f + C + e \quad (19)$$

แต่ในระบบทั่วไปการหาภาระของมอเตอร์มีความยุ่งยาก จึงใช้กระแสที่สเตเตอร์แทนเพราะกระแสสเตเตอร์จะแปรผันตรงกับภาระของมอเตอร์ที่ได้รับดังแสดงไว้ในภาพที่ 2



ภาพที่ 1: ภาพกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความถี่ของมอเตอร์เมื่อรับภาระ (T) ต่างๆกัน



ภาพที่ 2: ภาพกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่สเตเตอร์กับภาระที่มอเตอร์ได้รับที่ความถี่ต่างๆ

จากสมการทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถเขียนในการถดถอยเชิงซ้อนเป็น

$$\omega_r(i_a, f) = (m_f + m_T \cdot (k_a \cdot i_a + C_{i_a})) f + C + e \quad (20)$$

จัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\omega_r = m_1 \cdot f + m_2 \cdot i_a \cdot f + C + e \quad (21)$$

โดยที่ $m_1 = m_f + m_T \cdot C_{i_a}$ (22)

$$m_2 = m_T \cdot k_a \quad (23)$$

เมื่อแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของค่าความคลาดเคลื่อน

ในแต่ละจุดข้อมูลจะได้

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (\omega_{r_i} - m_1 \cdot f_i - m_2 \cdot i_{a_i} \cdot f_i - C) \quad (24)$$

โดยที่ค่า n แทนจำนวนข้อมูลทั้งหมด การหาค่ากำลังสอง

ของความคลาดเคลื่อนน้อยสุดโดยสมการจะอยู่ในรูป

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (\omega_{r_i} - m_1 \cdot f_i - m_2 \cdot i_{a_i} \cdot f_i - C)^2 \quad (25)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์ m_1 , m_2 และ C จะใช้วิธีอนุพันธ์ย่อย

โดยทำอนุพันธ์ย่อยสมการที่ (25) เทียบกับตัวแปรทั้งสามตัว

เมื่อต้องการค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด ดังนั้นค่าอนุพันธ์ย่อย

จะต้องเท่ากับ 0 ดังนั้นเมื่อทำการแก้สมการทั้งสองจะได้

สัมประสิทธิ์ m_1 , m_2 และ C ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} n & \sum f & \sum i_a \cdot f \\ \sum f & \sum f^2 & \sum i_a \cdot f^2 \\ \sum i_a \cdot f & \sum i_a \cdot f^2 & \sum i_a^2 \cdot f^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$C = \frac{\begin{bmatrix} \sum \omega_r & \sum f & \sum i_a \cdot f \\ \sum \omega_r \cdot f & \sum f^2 & \sum i_a \cdot f^2 \\ \sum \omega_r \cdot i_a \cdot f & \sum i_a \cdot f^2 & \sum i_a^2 \cdot f^2 \end{bmatrix}}{A} \quad (27)$$

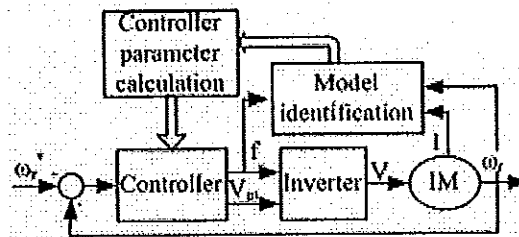
$$m_1 = \frac{\begin{bmatrix} n & \sum \omega_r & \sum i_a \cdot f \\ \sum f & \sum \omega_r \cdot f & \sum i_a \cdot f^2 \\ \sum i_a \cdot f & \sum \omega_r \cdot i_a \cdot f & \sum i_a^2 \cdot f^2 \end{bmatrix}}{A} \quad (28)$$

$$m_2 = \frac{\begin{bmatrix} n & \sum f & \sum \omega_r \\ \sum f & \sum f^2 & \sum \omega_r \cdot f \\ \sum i_a \cdot f & \sum i_a \cdot f^2 & \sum \omega_r \cdot i_a \cdot f \end{bmatrix}}{A} \quad (29)$$

โดยที่ $\sum x = \sum_{i=1}^n x_i$

2.4 รูปแบบระบบจำลอง

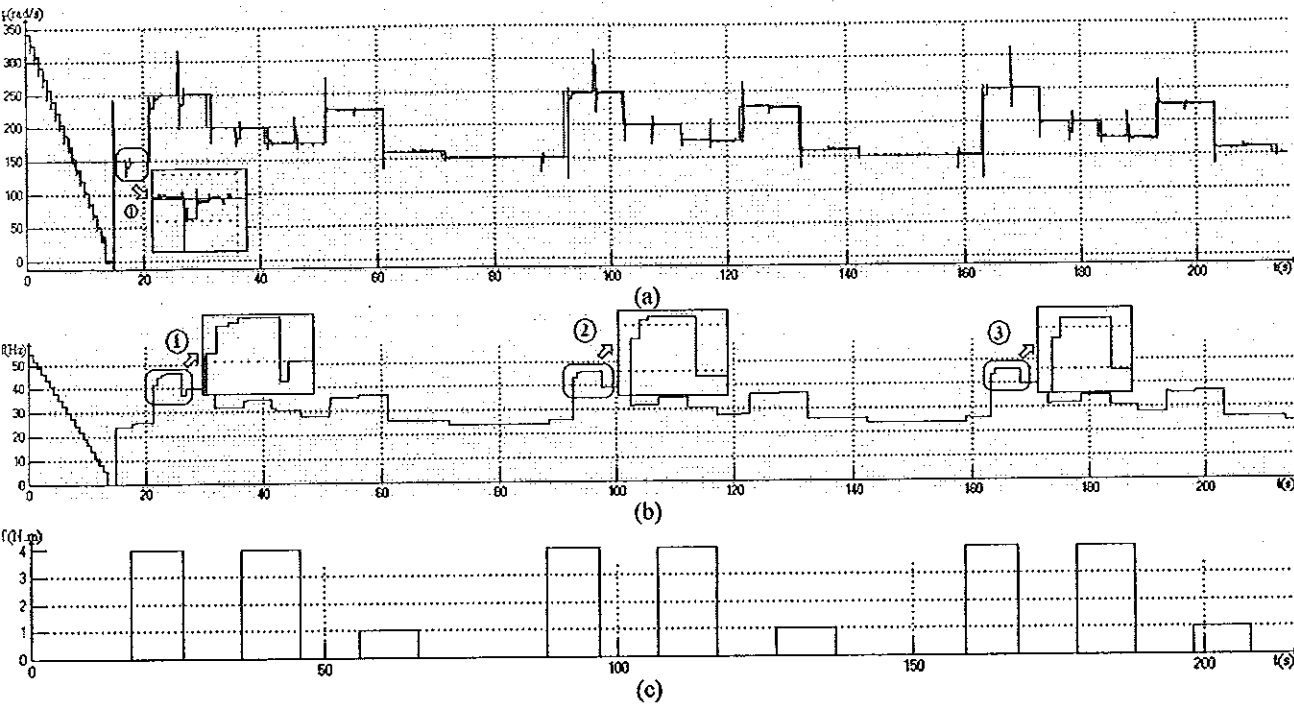
แบบจำลองจะแบ่งเป็น 5 ส่วน คือ ส่วนของมอเตอร์ ส่วนของอินเวอร์เตอร์ ส่วนการระบุระบบ ส่วนการคำนวณค่าตัวแปร และส่วนของการนำตัวแปรไปใช้ในการควบคุมระบบ ซึ่งได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3 โดยระบบจะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างเข้ามาเพื่อประมาณค่าในการหาตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมขึ้นมาที่เหมาะสมกับระบบนั้นๆ โดยใช้การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียวในช่วงแรก หาค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะว่าการคำนวณหาตัวแปรควบคุมง่ายและเสียเวลาในการเข้าสู่ระบบน้อย และหลังจากนั้นใช้วิธีการถดถอยเชิงซ้อน เพื่อให้ส่วนควบคุมสามารถปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เข้าสู่ความเร็วอ้างอิงได้เร็วขึ้น ซึ่งระบบควบคุมปรับเองได้จะทำการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุดเพื่อหาตัวแปรในการควบคุมให้มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด



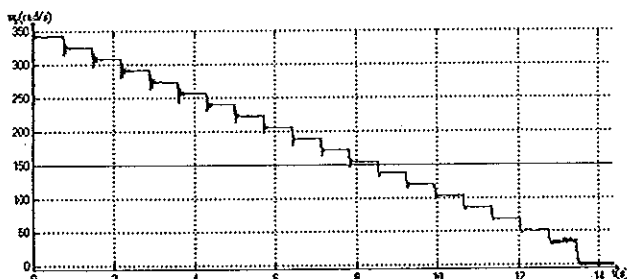
ภาพที่ 3: ภาพการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเวลาดำเนินการโดยระบบควบคุมแบบปรับเองได้

3. ผลการจำลองการทำงาน

ผลการจำลองของระบบควบคุมแบบปรับเองได้ โดยระบบทั้งหมดได้แสดงในภาพที่ 4 ซึ่งจะประกอบด้วยภาพที่ 4(a) ภาพความเร็วมอเตอร์และความเร็วมอเตอร์อ้างอิงกับแกนเวลา ภาพที่ 4(b) ภาพความถี่ของมอเตอร์กับแกนเวลา ภาพที่ 4(c) ภาพแรงบิดภาระของมอเตอร์กับแกนเวลา และภาพที่ 5 เป็นเวลาช่วงเริ่มต้น เป็นช่วงที่ระบบควบคุมทำการส่งความถี่ออกไปทดสอบมอเตอร์จำนวน 20 ครั้ง เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่สเตรเตอร์กับความเร็วของมอเตอร์ ด้วยวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียวเพื่อใช้ค่าที่ได้ในการหาค่าตัวแปรควบคุม



ภาพที่ 4: (a) ภาพความเร็วมอเตอร์และความเร็วมอเตอร์อ้างอิงกับแกนเวลา
 (b) ภาพความถี่ของมอเตอร์กับแกนเวลา
 (c) ภาพแรงบิดภาระของมอเตอร์กับแกนเวลา



ภาพที่ 5: ภาพความเร็วของมอเตอร์กับแกนเวลาในช่วงเริ่มต้น

ภาพการทำงานของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบปรับเองได้ จากภาพที่ 4(a)(1) พบว่าเมื่อระบบได้รับแรงบิดภาระขนาด 4 N.m ความเร็วของมอเตอร์ลดลงช่วงหนึ่งจากนั้นตัวควบคุมก็ปรับความเร็วให้เข้าสู่ความเร็วอ้างอิงได้โดยปรับค่าเพียงครั้งเดียว หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนความเร็วอ้างอิงเป็น 250 rad/s แต่แรงบิดภาระยังเป็น 4 N.m ช่วงนี้ระบบควบคุมใช้ค่าตัวแปรควบคุมจากวิธีการลดรอบแบบเส้นตรงเชิงเดียวในการปรับความเร็วให้

เข้าสู่ความเร็วอ้างอิงต้องปรับค่าความถี่ 4 ครั้ง ดังในภาพที่ 4(b)(1) แต่เมื่อระบบได้ทำงานต่อไประบบจะเก็บค่าตัวแปรมาทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่สเตเตอร์, กระแสที่สเตเตอร์, และความเร็วมอเตอร์ ด้วยวิธีการลดรอบเชิงซ้อน และนำค่าตัวแปรที่ได้ไปใช้ในระบบควบคุม ทำให้การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถปรับตัวให้เข้าสู่ความเร็วอ้างอิงได้ถูกต้องมากขึ้นทำให้การปรับค่าความถี่ลดลงเหลือ 3 ครั้ง ดังในภาพที่ 4(b)(2) เมื่อระบบเก็บค่าตัวแปรในการหาความสัมพันธ์มากขึ้นก็สามารถปรับความเร็วให้เข้าสู่ความเร็วอ้างอิงมีความผิดพลาดน้อยลงอีกทำให้การปรับค่าความถี่เหลือ 2 ครั้ง ดังในภาพที่ 4(b)(3) จากการจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถพัฒนาตัวเองให้สามารถควบคุมความเร็วได้อย่างเหมาะสม

สรุป

จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นได้ว่า ระบบควบคุมโดยระบบปรับเองได้ มีข้อดีคือระบบจะทำงานโดยอัตโนมัติ ง่ายต่อการใช้งาน โดยระบบจะทำการหาค่าตัวแปรในการควบคุม แต่ต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งในการระบุระบบที่ถูกควบคุม เมื่อเวลาช่วงดังกล่าวระบบควบคุมแบบปรับเองได้สามารถทำการควบคุมความเร็วได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว จากผลการจำลองการทำงานของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์นี้ ย่นนำตามเวลาจริงแบบระบบปรับเองได้ จะทำการเขียนโปรแกรมในบอร์ดควบคุม DSP เพื่อใช้กับมอเตอร์จริงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [] S. Wade, M.W. Dunnigan, B.W. Williams, "Modeling and simulation of induction machine vector control with rotor resistance identification," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.12, no.3, pp.495-506, 1997.
- [] C. Millet, D.Leroux, C.Bergmann, "Field Oriented Control of Induction Machine- Simulation and Realization," *Proceedings of Advanced Motion Control*, pp.180-185, 1996.
- [] M.A. Ouhrouche, N. Lechevin, S. Abourida, "RT-Lab Based Real-Time Simulation of a Direct Field-Oriented Controller for an Induction Motor," *Electrimacs*, 2002.
- [] Hakju Lee, Jaedo Lee, Sejin Seong, "Approach to fuzzy control of an indirect field-oriented induction motor drives," *Proceedings of IEEE International Symposium*, vol. 2, pp.1119-1123, 2001.
- [] T.S. Radwan, M.F. Rahman, "Performances of Novel Fuzzy Logic Based Indirect Vector Control for Induction motor Drive," *Industry Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE*, vol.2, pp.1225-1231, 2000.
- [] M.A. Ouhrouche, "Simulation of a Direct Field-Oriented Controller for an Induction Motor Using MATLAB with Simulink Software Package," *Proceeding of the IASTED International Conference MS'2000*, 2000.
- [] Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert, "Simulink Implementation of Induction Machine Model- A Modular Approach," *International Electric Machines and Drives Conference*, 2003.
- [] D. Loguc, P.T. Krein, "Simulation of Electric Machinery and Power Electronics Interfacing using MATLAB and Simulink," *Computers in Power Electronics, COMPEL 2000*, pp.34-39, 2000.
- [] P.C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", *McGraw-Hill Book Company*, 1986.

- [10] Thomas W. O'Gorman. "An adaptive permutation test procedure for several common tests of significance" *Division of Statistics, Department of Mathematical Sciences, Northern Illinois University, DeKalb, IL 60115, USA*, 2001.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายวีรยุทธ พรสมิทธิกุล		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4612102		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2546	

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษยก้นกฏี คณะวิศวกรรมศาสตร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วีรยุทธ พรสมิทธิกุล, ธเนศ เคารพาทพงศ์ และ มนตรี กาญจนะเคชะ, “การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามเวลาจริงแบบระบบปรับเองได้ (Real Time Speed Control of Induction Motor by Linear Regression)”, การประชุมทางวิชาการระดับชาติด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ ครั้งที่ 2, 19-20 พฤษภาคม 2549, หน้า 105.