

ตัวควบคุมแรงบิดของเครื่องขันสกรูอัตโนมัติในกระบวนการขันสกรู
โดยใช้แบบจำลองอ้างอิงแบบปรับตัวได้

นายเฉลิมพล ผิวไหมคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**TORQUE CONTROLLER OF AUTOMATIC SCREW
MACHINE IN SCREW FASTENING PROCESS USING
MODEL REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM**

Chalermpon Pewmaikam

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2012

ตัวควบคุมแรงบิดของเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติในกระบวนการขึ้นสกรู
โดยใช้แบบจำลองอ้างอิงแบบปรับตัวได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.เกียรติ สุลักษณ์)
กรรมการ

(ศ. ดร.สุกิจ ลิ้มปิ๋มจันท์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เฉลิมพล ผิวไหมคำ : ตัวควบคุมแรงบิดของเครื่องขันสกรูอัตโนมัติในกระบวนการ
ขันสกรูโดยใช้แบบจำลองอ้างอิงแบบปรับตัวได้ (TORQUE CONTROLLER OF
AUTOMATIC SCREW MACHINE IN SCREW FASTENING PROCESS USING
MODEL REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.จิระพล ศรีเสริญผล, 155 หน้า.

กระบวนการขันสกรูด้วยเครื่องขันสกรูอัตโนมัติเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญใน
อุตสาหกรรม การขันสกรูด้วยเครื่องขันสกรูอัตโนมัติจำเป็นต้องใช้ค่าแรงบิดที่แม่นยำ เพื่อใช้
ตอบสนองให้เครื่องทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการควบคุมแรงบิดให้แม่นยำทำได้
ค่อนข้างยากและมักมีความคลาดเคลื่อนจากสาเหตุต่าง ๆ อาทิ ร่องสกรูชำรุดหรือไม่เป็นไปตาม
มาตรฐาน เป็นต้น ส่งผลให้ค่าแรงบิดภายนอกที่กระทำกับระบบควบคุมแรงบิดของเครื่องมีค่าไม่
คงที่และเปลี่ยนแปลงตามเวลา ส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านผลการตอบสนองของเครื่องขันสกรู
งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแรงบิดของเครื่องขันสกรูอัตโนมัติ ระบบควบคุมของ
เครื่องเป็นแบบป้อนกลับ ที่อาศัยอุปกรณ์ตรวจรู้ความเร็ว (Speed sensor) และอุปกรณ์ตรวจรู้
กระแส (Current sensor) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด ผลวัดที่ได้ถูกนำไปตรวจสอบระบบควบคุมและ
ประมาณค่าแรงบิดป้อนกลับของเครื่อง โดยใช้ตัวสังเกตร่วมกับการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง
แบบปรับตัวได้ด้วยวิธีพีชชีลอจิก ผลที่ได้ช่วยให้ทราบค่าแรงบิดลัพท์และแรงบิดภายนอกที่กระทำ
กับระบบ ระบบควบคุมแรงบิดจึงมีประสิทธิภาพด้านผลการตอบสนองดีขึ้น รวมทั้งได้ข้อมูลของ
แรงบิดภายนอกที่กระทำกับระบบ เพื่อนำไปประมาณสถานการณ์ของเครื่องขันสกรูอัตโนมัติได้
อย่างแม่นยำขึ้น

CHALERMPON PEWMAIKAM : TORQUE CONTROLLER OF
AUTOMATIC SCREW MACHINE IN SCREW FASTENING PROCESS
USING MODEL REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D., 155 PP.

DC MOTOR/ TORQUE CONTROL SYSTEM DESIGN/ OBSERVER/ ADAPTIVE
LOAD TORQUE COMPENSATOR/ FUZZY LOGIC CONTROL.

Screw fastening process with using automatic screw machine plays an important role in the industrial applications. To do the process efficiently, it requires an accurate output torque value. However, it is hardly to maintain the required output torque. Also there are some deviations caused by using the damaged screw grooves or the nonstandard screw groove, etc. Consequently, the disturbance torque is unsteady, which make automatic screw machines respond inefficiently. This research presents the torque controller design of automatic screw machine. The controller of the machine has been design based on the concept of feedback control system. The speed sensor and current sensor are used to monitor the torque. Output data from the sensor is monitor the control system and to estimate the output torque of the machine. Use the observer with adaptive load torque compensation by fuzzy logic method. As a result, the output torque and the disturbance torque can be a calculated precisely. The response of the torque control system is improved. Furthermore, results of disturbance torque can be used to make the automatic screw machine working more accurately.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้
ทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก (OROG) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัย
ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษาที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาโดยตลอด และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย และให้โอกาสการทำงานในหลายด้านด้วยความกรุณาเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุกัญญ์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำด้านวิชาการ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ จำพิศ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตากรุณา

คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ คุณอารักษ์พรรณ ศรีอักษรวิทยา และคณะเจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่าง ๆ

วิศวกรศูนย์เครื่องมือและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือที่ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณครู อาจารย์ ทุกท่านที่เคยสั่งสอนวิชาและสนับสนุนด้านการศึกษา เป็นอย่างดี จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และสนับสนุนด้านการศึกษาเป็นอย่างดี จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

เฉลิมพล ผิวไหมคำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์	3
2 ปรัชญารวบรวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ตัวสังเกต.....	5
2.1.1 การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม	5
2.2 ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก.....	9
2.3 ปรัชญารวบรวมที่เกี่ยวข้อง	10
2.5 สรุป	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	15
3.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	16
3.2	การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	20
3.2.1	รูปการควบคุมกระแส	21
3.2.1	รูปการควบคุมแบบพีไอ.....	22
3.3	ตัวสังเกต.....	23
3.4	ตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้	25
3.4.1	ระบบควบคุมแบบฟลักซ์ล่อจิก	26
-	ทฤษฎีฟลักซ์เซต.....	26
-	ตัวแปรแบบฟลักซ์และตัวแปรทางภาษา	31
-	โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟลักซ์ล่อจิก.....	33
-	กฎของฟลักซ์ล่อจิก	34
-	การอนุมานฟลักซ์แบบแมมดานี.....	38
3.4.2	การออกแบบตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณ ค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	44
4	ผลการจำลองสถานการณ์	48
4.1	การกำหนดตัวแปรต่างๆของระบบก่อนการจำลองสถานการณ์ ระบบควบคุมแรงบิดลัฟซ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	49
4.1.1	การกำหนดตัวแปรต่างๆของระบบก่อนการจำลอง สถานการณ์ระบบควบคุมแรงบิดลัฟซ์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงที่ได้จากการออกแบบตัวสังเกต	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1	54
4.2.1	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.1	55
4.2.2	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.2	58
4.2.3	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.3	61
4.2.4	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.4	64
4.3	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิกแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณ ค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2	67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที 1.1	68
4.3.2	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที 1.2.....	70
4.3.3	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที 1.3	74
4.3.4	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที 1.4.....	77
5	การทดสอบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และการประมาณค่าแรงบิดภายนอก	81
5.1	เครื่องมือทดลอง	81
5.2	การประมาณค่าตัวแปรของระบบ	85
5.3	การวัดค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของระบบ	89
5.4	การทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที 1	91

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.1	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.1	92
5.4.2	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.2	95
5.4.3	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.3	98
5.4.4	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.4	101
5.5	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2	104
5.5.1	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพิกซ์ชิลอจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2.1	105

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5.2	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที 2.2	107
5.5.3	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที 5.3	110
5.5.4	การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิก แบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที 2.4	112
5.6	สรุป	117
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	119
6.1	สรุป	119
6.2	ข้อเสนอแนะ	120
	รายการอ้างอิง	121
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การติดตั้งและการเป็ยบวัดเครื่องมื่อทดสอบ	123
	ภาคผนวก ข. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ	134
	ภาคผนวก ค. โครงสร้างระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	135
	ภาคผนวก ง. บทความทีได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	137
	ประวัติผู้เขียน	152

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ตัวแปรทางภาษา และค่าทางภาษา32
3.2	ฟังก์ชันแสดงสมรรถภาพของค่าความผิดพลาดกระแสอินพุต.....47
3.3	ฟังก์ชันแสดงสมรรถภาพของอัตราการเปลี่ยนแปลง ของค่าความผิดพลาดกระแสอินพุต47
3.4	ฟังก์ชันแสดงสมรรถภาพของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเอาต์พุต.....47
5.1	แสดงค่า T_F ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง91
ก.1	แสดงผลการวัดค่าความเร็วรอบ และค่าความต่างศักย์ของ GT 150X126
ก.2	แสดงผลการวัดค่ากระแสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง128
ก.3	แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงและประมาณค่าโหลดแรงบิดที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที..... 130
ก.4	แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงและประมาณค่าโหลดแรงบิดที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที 130
ก.5	แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงและประมาณค่าโหลดแรงบิดที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที 130
ก.6	แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงและประมาณค่าโหลดแรงบิดที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที 131
ก.7	แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงที่ความเร็วสภาวะปกติ 2000 รอบต่อนาที 132
ก.8	แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงที่ความเร็วสภาวะปกติ 1500 รอบต่อนาที 132
ก.9	แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงที่ความเร็วสภาวะปกติ 1000 รอบต่อนาที 132
ก.10	แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงที่ความเร็วสภาวะปกติ 500 รอบต่อนาที..... 133

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต 8
3.1	โครงสร้างระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 16
3.2	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 17
3.3	แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 19
3.4	แผนภาพโครงสร้างวงจรรูปควบคุมกระแส 21
3.5	แผนภาพโครงสร้างระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 22
3.6	แผนภาพระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกตอันดับเต็ม 23
3.7	แผนภาพฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A 26
3.8	ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของเซตปกติธรรมดา..... 27
3.9	การยูเนียนของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B 28
3.10	การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B 29
3.11	ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A 30
3.12	โครงสร้างการชดเชยแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้ โดยฟัซซีลอจิก 31
3.13	โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก 33
3.14	ลักษณะสัญญาณของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก 37
3.15	ค่าความผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์ 39
3.16	อัตราค่าความผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์ 39
3.17	วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด 43
3.18	ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาดกระแสอินพุต..... 45
3.19	ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอัตราค่าความผิดพลาดกระแสอินพุต 45
3.20	ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเอาต์พุต 46
4.1	โครงสร้างระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 54

สารบัญรูป (ต่อ)

[illegible]

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28	ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกตสำหรับกรณีที่ 2.3 76
4.29	ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกตสำหรับกรณีที่ 2.3 76
4.30	ผลการตอบสนองของ $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.4 77
4.31	ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพท์ของระบบและตัวสังเกตสำหรับกรณีที่ 2.4 78
4.32	ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกตสำหรับกรณีที่ 2.4 79
4.33	ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกตสำหรับกรณีที่ 2.4 79
5.1	แสดงระบบ Precision Modular Servo 82
5.2	แสดง PCI 1711 Card..... 83
5.3	แสดงวงจรการทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์..... 84
5.4	แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 85
5.5	แผนภาพแสดงโปรแกรมในการเก็บข้อมูลการทำงานของระบบ..... 86
5.6	ผลการตอบสนองของความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับ ผลการตอบสนองของความเร็วที่ได้จากแบบจำลองก่อนการประมาณค่าตัวแปร 87
5.7	ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการวัด เปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ที่ได้ จากแบบจำลองก่อนการประมาณค่าตัวแปร 87
5.8	ผลการปรับค่าตัวแปรของระบบ 88
5.9	ผลการตอบสนองของความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการวัด เปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของความเร็วที่ได้ จากแบบจำลองหลังการประมาณค่าตัวแปร 88
5.10	ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการวัด เปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ที่ได้ จากแบบจำลองหลังการประมาณค่าตัวแปร 89
5.11	แผนภาพแสดงวงจรของระบบเพื่อวัดค่าตัวแปร T_F 90
5.12	ผลการตอบสนองของ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1.1 93
5.13	ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพท์ของระบบและตัวสังเกตสำหรับกรณีที่ 1.1 93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.40	ผลการตอบสนองของ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.4 114
5.41	ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตสำหรับกรณีที่ 2.4 115
5.42	ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกตสำหรับกรณีที่ 2.4 116
5.43	ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกตสำหรับกรณีที่ 2.4 116
ก.1	แสดงการติดตั้งและวงของเครื่องมือทดสอบ 123
ก.2	แสดงโปรแกรมในการเปรียบวัด 124
ก.3	แสดงรายละเอียด Analog Output Block 124
ก.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและค่าความต่างศักย์ของ GT150X 127
ก.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของ GT150X และความเร็วรอบที่วัดได้ Stroboscope 127
ก.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณและค่ากระแส ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 128
ก.7	แสดงระดับของโหลดแรงบิดสำหรับ Magnetic Brake Load 129
ก.8	แสดงโหลดแรงบิดในแต่ละระดับที่ได้จากการประมาณของ Magnetic Brake Load 131
ก.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 133
ข.1	แสดงข้อมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้สำหรับการทดสอบ 134
ค.1	ระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์และตัวชดเชยสำหรับการประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทดสอบ 135
ค.2	ระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์และตัวชดเชยสำหรับการประมาณค่าแรงบิดภายนอก ที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการจำลอง โดยโปรแกรม MATLAB 136

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ζ	อัตราส่วนความหน่วง
ω_n	ความถี่ธรรมชาติของตัวสั่นเกต
ω	ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
$\hat{\omega}$	ความเร็วที่ได้จากการประมาณค่า
b	ความหน่วง
i_a	กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์
$\hat{i}_a$	กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ที่ได้จากการประมาณค่า
I	โมเมนต์ความเฉื่อย
I_l	เมตริกซ์เอกลักษณ์
J	Loss Function
K_{add}	อัตราขยายของระบบ
K_e	ค่าคงที่ของ Electromotive Force
K_t	ค่าคงที่ของแรงบิด
L	เมตริกซ์อัตราขยายของตัวสั่นเกต
L_a	ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์
T_M	แรงบิดทางกล
T_F	Friction constant
T_R	แรงบิดลัพท์
R_a	ความต้านทานของอาร์เมเจอร์
T_L	แรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลง
$\hat{T}_L$	แรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณค่า
V_a	ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์
$\hat{V}_a$	ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ที่ได้จากการประมาณค่า
V_b	แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ
e_1	ค่าความผิดพลาดของกระแสอาร์เมเจอร์
e_2	ค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบ
μ	ค่าความเป็นสมาชิกภาพของเซต

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

mf	ระดับความเป็นสมาชิกภาพ
$zero$	Zero error of Fuzzy Logic Control System
pos_i	Positive error of Fuzzy Logic Control System
z_i	Zero error rate of Fuzzy Logic Control System
n_i	Negative error rate of Fuzzy Logic Control System
p_i	Positive error rate of Fuzzy Logic Control System
$cons$	Zero output of Fuzzy Logic Control System
inc_i	Positive output of Fuzzy Logic Control System
i_{ca}^*	กระแสชดเชยอ้างอิงในระบบฟัซซีลอจิก
i_{ca}	กระแสชดเชยจริงในระบบฟัซซีลอจิก



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องจักรอัตโนมัติเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการจักรซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในอุตสาหกรรม กระบวนการจักรในอุตสาหกรรมทำหน้าที่ในการยึดชิ้นส่วนของส่วนประกอบต่างๆให้ติดกันเป็นชิ้นงาน โดยเครื่องจักรอัตโนมัติมีการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ที่มีตัวตรวจรู้ความเร็วและตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้าเป็นเครื่องมือวัดความเร็วและกระแสไฟฟ้า เพื่อนำไปตรวจสอบระบบควบคุมแรงบิดและประมาณค่าแรงบิดของระบบ กระบวนการจักรต้องใช้ค่าแรงบิดที่เที่ยงตรงและแม่นยำสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านผลการตอบสนองของเครื่องจักรและเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงานที่ได้จากการประกอบ ส่วนใหญ่ปัญหาที่พบในกระบวนการจักรของเครื่องจักรเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ อาทิเช่น คุณภาพของปาสกรหรือร่องสกรที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน แนวการใส่สกรกับร่องสกรไม่ตรงกัน เหตุผลดังกล่าวทำให้เกิดแรงบิดภายนอกที่กระทำกับระบบ โดยค่าแรงบิดภายนอกจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นกับเวลา และอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพด้านผลการตอบสนองของเครื่องจักรอัตโนมัติลดลง คือ การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดของเครื่องจักรอัตโนมัติในกระบวนการจักร ดังนั้น จำเป็นจะต้องออกแบบระบบควบคุมแรงบิดให้มีประสิทธิภาพเสียก่อนก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง

เครื่องจักรอัตโนมัติมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นส่วนประกอบ ดังนั้น การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดก็จะหาแบบจำลองของระบบจริงโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแรงบิดของเครื่องจักรอัตโนมัติในกระบวนการจักรโดยใช้ตัวสังเกตร่วมกับการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้ด้วยวิธีการพีชชีลอจิก ซึ่งทำให้ทราบถึงค่าแรงบิดลัพท์และแรงบิดภายนอกที่กระทำต่อระบบได้ จึงทำให้ระบบควบคุมแรงบิดมีประสิทธิภาพด้านการตอบสนองดีขึ้นและได้ข้อมูลของแรงบิดภายนอกที่กระทำต่อระบบเพื่อนำไปประมาณสถานการณ์ของเครื่องจักรอัตโนมัติได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ
2. เพื่อประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ
2. การควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ
3. การหาค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้เป็นค่าจากการประมาณสำหรับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์และออกแบบวิธีการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการหาค่าแบบปรับตัวได้สำหรับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ
2. สร้างอัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์และทดลอง เพื่อประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงสำหรับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ
3. จำลองสถานการณ์และทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แนวทางและวิธีการออกแบบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์และการออกแบบตัวหาค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ
2. การประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ

1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 4 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการทำงานของตัวสังเกต ระบบควบคุมฟuzzyลอจิก รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ ตัวสังเกตและตัวชดเชยฟuzzyลอจิกแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงสำหรับเครื่องขับส่งกำลังอัตโนมัติในกระบวนการขับเคลื่อน

บทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟuzzyลอจิกแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงสำหรับเครื่องขับส่งกำลังอัตโนมัติ พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 5 ผลการทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟuzzyลอจิกแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงสำหรับเครื่องขับส่งกำลังอัตโนมัติและเปรียบเทียบผล

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องชันสกรูอัตโนมัติเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการชันสกรูซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในอุตสาหกรรม กระบวนการชันสกรูในอุตสาหกรรมทำหน้าที่ในการยึดชิ้นส่วนของส่วนประกอบต่าง ๆ ให้ติดกันเป็นชิ้นงาน เครื่องชันสกรูอัตโนมัติมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นส่วนประกอบ ดังนั้น การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดก็จะหาแบบจำลองของระบบจริงโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแรงบิดของเครื่องชันสกรูอัตโนมัติในกระบวนการชันสกรูโดยใช้ตัวสังเกตร่วมกับการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้ด้วยวิธีการพีชชีลอจิก ซึ่งทำให้ทราบถึงค่าแรงบิดลัษและแรงบิดภายนอกที่กระทำต่อระบบได้ จึงทำให้ระบบควบคุมแรงบิดมีประสิทธิภาพด้านการตอบสนองดีขึ้นและได้ข้อมูลของแรงบิดภายนอกที่กระทำต่อระบบเพื่อนำไปประมาณสถานการณ์ของเครื่องชันสกรูอัตโนมัติได้

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแรงบิดลัษของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแรงบิดลัษที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้รับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงของค่าแรงบิดทางกลที่คำนวณได้จากกระแสอาร์เมเจอร์หักล้างกับค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น แรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงจะเป็นตัวแปรที่สำคัญควรที่จะสามารถประมาณค่าได้ถึงจะสามารถควบคุมแรงบิดลัษได้ แต่โดยส่วนใหญ่ในการควบคุมแรงบิดจะเป็นการควบคุมแรงบิดทางกลที่ประมาณจากกระแสอาร์เมเจอร์เพียงอย่างเดียว ดังนั้นในการควบคุมก็จะสนใจเพียงกระแสอาร์เมเจอร์ที่เปลี่ยนแปลงจะไม่สนใจโหลดหรือแรงบิดภายนอกที่มารบกวนกับระบบ แต่ในงานวิจัยนี้จะควบคุมแรงบิดลัษที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และจะสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับกับระบบได้โดยวิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับเครื่องชันสกรูอัตโนมัติในกระบวนการชันสกรูได้

2.1 ตัวสังเกต (Observer)

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการป้อนกลับตัวแปรสแตต (State – Variable Feedback) เช่น วิธีการในการปรับเปลี่ยนค่าโพลของระบบ (Pole Placement Method) การสร้างหรือการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมที่ทำการออกแบบมานั้นจะต้องประกอบด้วยข้อมูลจากสัญญาณ

ของสเตตเวกเตอร์ (State Vector) ของระบบทุกค่าซึ่งส่วนมากแล้วการวัดข้อมูลจากตัวแปรสเตตหรือสัญญาณสเตตเวกเตอร์ทุกค่าเป็นไปได้ยาก ถึงแม้ในบางระบบจะสามารถวัดค่าตัวแปรสเตตได้แต่ก็อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการวัด การควบคุมจึงมีการนำเอาตัวประมาณค่าตัวแปรสเตต (State Estimator) หรือตัวสังเกตมาใช้งานเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบที่จะทำการควบคุม วิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อให้สามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็วจึงมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบอย่างมาก การออกแบบตัวสังเกตนั้นสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full – Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสเตตทุกตัวของระบบ และตัวสังเกตแบบลดอันดับ (Reduce – Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสเตตที่ไม่สามารถวัดได้บางตัวเท่านั้น ตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสเตตทุกตัวใหม่ทั้งหมด โดยการนำค่าของตัวแปรสเตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสเตต ตัวสังเกตแบบลดอันดับ คือ การประมาณค่าตัวแปรสเตตที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้นโดยใช้ค่าของตัวแปรสเตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตของระบบควบคุมที่ส่งเข้าไปในระบบ ตัวสังเกตที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักใช้กับระบบที่สามารถวัดค่าตัวแปรสเตตได้บางสเตตเพื่อที่จะลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบเมื่อใช้ตัวสังเกต

2.1.1 การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full – order observer)

การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสเตตทุกตัวใหม่ทั้งหมดโดยใช้ข้อมูลของเอาต์พุตบางตัวที่สามารถวัดได้และสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบที่จะทำการประมาณค่าสเตต สมการระบบสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประมาณค่าสเตตของตัวเองได้แต่เป็นการประมาณในลักษณะแบบเปิด (Open – Loop Observer)

พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ค่าตัวแปรของระบบไม่ขึ้นกับเวลา (Linear Time Invariant System) ที่ต้องการจะใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบเขียนในรูป State Space Form ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.1}$$

เมื่อ

- A = เมตริกซ์สเตตของระบบ $[n \times n]$
- B = เมตริกซ์อินพุตของระบบ $[n \times 1]$
- C = เมตริกซ์เอาต์พุตของระบบ $[1 \times n]$

x = สเตตเวกเตอร์ของระบบ $[n \times 1]$

u = อินพุตของระบบ $[1 \times 1]$

y = เอาต์พุตของระบบ $[1 \times 1]$

n = จำนวนเต็มบวก

ตัวสังเกตของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการจะทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้คือ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}] \quad (2.2)$$

เมื่อ L = เมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต $[n \times 1]$

$\hat{x}$ = ค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกต $[n \times 1]$

สมการที่ (2.1) ลบด้วยสมการที่ (2.2) จะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax + Bu - \{A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\} \quad (2.3)$$

จัดรูปสมการจะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = [A - LC](x - \hat{x}) \quad (2.4)$$

สมการที่ 2.4 สามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{e} = [A - LC]e \quad (2.5)$$

เมื่อ $e = x - \hat{x}$

เมื่อค่าความแตกต่างของ $x - \hat{x} \rightarrow 0$ จะทำให้ค่าความผิดพลาดของตัวแปรสเตตซึ่งวัดได้จากระบบจริงและตัวสังเกตหมดไป ผลที่ได้นี้จะทำให้ตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าของตัวแปรสเตตในระบบที่ต้องการทำการสังเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบจะต้องมีการตรวจสอบว่าระบบนั้นมีคุณสมบัติในการสังเกตได้หรือไม่ โดยพิจารณาเมตริกซ์ความสังเกตได้

$$\text{Observability matrix} = \mathcal{G} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

ระบบใด ๆ จะมีคุณสมบัติความสังเกตได้ ก็ต่อเมื่อ ค่าลำดับชั้นของเมตริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ n ($\text{Rank}[\mathcal{G}] = n$) เมื่อ n คือ อันดับของระบบหรือของเมตริกซ์ A

สำหรับค่าอัตราขยายของตัวสังเกต (Observer Gain) สามารถหาได้จาก Ackermann's Formula

$$L = \phi(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

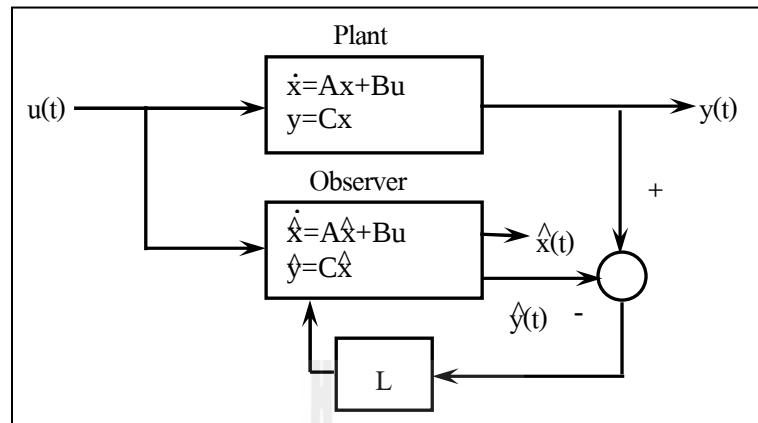
เมื่อสมการลักษณะเฉพาะ คือ

$$q(\lambda) = \lambda^n + \alpha_1 \lambda^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \lambda + \alpha_n \quad (2.8)$$

$$q(A) = A^n + \alpha_1 A^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} A + \alpha_n I \quad (2.9)$$

หลักการทำงานของตัวสังเกตก็จะนำอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ต้องการทราบค่าตัวแปรสแตตภายในระบบ รวมทั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างระบบที่จะทำการสังเกตและตัวสังเกตมาประมวลผลโดยผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อปรับค่าตัวแปรให้ตัวสังเกต เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจนได้ค่าประมาณของตัวแปรสแตตที่ต้องการภายในระบบที่ไม่สามารถวัดได้

โดยตรง ทั้งนี้การสร้างตัวสังเกตจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรทั้งหมดของระบบที่จะทำการสังเกตเพื่อนำค่าตัวแปรนั้นมาใช้ในโครงสร้างของตัวสังเกต 8



Observer Gain Matrix

รูปที่ 2.1 แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต

เมื่อ L = ค่าเมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต $[n \times 1]$
 $u(t)$ = ค่าอินพุตของระบบ $[1 \times 1]$
 $y(t)$ = ค่าเอาต์พุตของระบบ $[1 \times 1]$
 $\hat{y}(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวสังเกต $[1 \times 1]$
 $\hat{x}(t)$ = ค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกต $[n \times 1]$

ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อใช้งานต้องทำการหาค่าตัวแปรในระบบของตัวสังเกตซึ่งได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสถานะเพื่อหาค่าของตัวแปรที่ถูกต้องของระบบเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบที่ต้องการโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ คือ การกำหนดตัวแปรของตัวสังเกตในขั้นตอนการหาอัตราขยายของตัวสังเกต เพื่อให้ระบบของตัวสังเกตมีความเสถียรและมีความรวดเร็วในการตอบสนองเพียงพอที่จะทำให้ค่าสัญญาณความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด นั่นก็คือ สัญญาณประมาณ $\hat{x}(t)$ จะมีค่าเท่ากับสัญญาณสถานะจริงหรือ $x(t)$ ในทางปฏิบัติการออกแบบจะให้โพลของตัวสังเกตอยู่บนแกนจริง (Real Axis) เพื่อที่จะนำไปทำการหาค่า

อัตราขยายของตัวสังเกตหากเราสามารถจัดรูปให้ไปอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่ารูปแบบ 9
บัญญัติของตัวสังเกต (Observer Canonical Form) ได้ จะทำให้การออกแบบมีความสะดวกมาก
ขึ้น โดยสามารถใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ackermann's Formula) ช่วยในการหา
อัตราขยายของตัวสังเกตได้

2.2 ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic Control System)

การควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (fuzzy logic controller) เกิดขึ้นจากแนวความคิดของ Zadeh, L.A. (1965) เป็นวิธีการควบคุมแบบชาญฉลาดที่อาศัยข้อมูลความรู้และประสบการณ์การทำงานของมนุษย์เป็นพื้นฐานในการควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบ เหมาะสำหรับระบบที่มีความซับซ้อนหรือคลุมเครือ มีความไม่เป็นเชิงเส้นและหลายอินพุตได้เป็นอย่างดี ฟัซซีลอจิกจึงแตกต่างไปจากบูลีนที่ซึ่งมีเพียงใช่ – ไม่ใช่ หรือศูนย์ - หนึ่ง แต่ฟัซซีลอจิกเป็นตรรกะหลายระดับซึ่งเกี่ยวกับการกำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิก (degree of membership) โดยใช้ค่าตัวเลขตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่ง (ค่าความเป็นสมาชิกของกลุ่มจะอยู่ระหว่างศูนย์ถึงหนึ่ง ระบบจะทำการประเมินและนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าเอาต์พุตของระบบในขั้นตอนของการอนุมานฟัซซี)

ข้อดีของฟัซซีลอจิก

ฟัซซีลอจิกมีคุณลักษณะเด่นหลาย ๆ อย่าง ทำให้มีการนำเอาฟัซซีลอจิกมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายและอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะงานทางด้านระบบควบคุม ข้อดีของฟัซซีลอจิกสรุปคร่าวๆ ได้ดังนี้

- ฟัซซีลอจิกเป็นระบบที่มีเสถียรภาพสูง ไม่จำเป็นต้องใช้งานกับระบบที่มีอินพุตที่มีค่าแน่นอนหรือปราศจากสัญญาณรบกวน กล่าวคือระบบสามารถรองรับอินพุตที่มีความคลุมเครือได้อย่างหลากหลาย
- ฟัซซีลอจิกประมวลผลด้วยการใช้กฎที่กำหนดหรือนิยามด้วยผู้ใช้ (หรือผู้สร้างระบบ ซึ่งก็คือผู้เชี่ยวชาญนั่นเอง) ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกในการปรับแต่งระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
- ฟัซซีลอจิกไม่มีข้อจำกัดของจำนวนอินพุตหรือเอาต์พุต ทำให้การออกแบบระบบสามารถทำได้หลากหลายสามารถใช้ตัวตรวจจับที่ไม่มีความแม่นยำมากนักและมีราคาถูกได้พร้อม ๆ กันหลาย ๆ ตัว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในขณะที่ยังคงความยุ่งยากและราคารวมของระบบไม่เพิ่มขึ้น

- พืชชีลอจิกมีโครงสร้างที่สามารถแบ่งแยกเป็นหน่วยประมวลผลย่อย ๆ ได้ ทำให้ได้ระบบที่มีการกระจายการทำงาน ง่ายต่อการดูแลและปรับปรุงแก้ไขได้
- พืชชีลอจิกสามารถใช้กับงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ได้ ทำให้ลดภาระการคำนวณหาแบบจำลองระบบทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนได้

ข้อเสียของพืชชีลอจิก

พืชชีลอจิกมีคุณลักษณะเด่นหลายอย่าง แต่การนำเอาพืชชีลอจิกมาประยุกต์ใช้ก็มีข้อเสียและขีดจำกัดเช่นกัน ข้อเสียและขีดจำกัดของพืชชีลอจิกสรุปคร่าว ๆ ได้ดังนี้

- ไม่มีกระบวนการเรียนรู้ในการปรับแต่งโครงสร้างของกฎและตัวแปรต่าง ๆ ในตัวระบบเอง โครงสร้างของระบบจะถูกกำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบและนักเขียนโปรแกรมสำหรับงานนั้น ๆ

2.4 ปรัชญาวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปจะมีตัวควบคุมซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานได้ตามต้องการ ตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะงานและความเหมาะสม ตัวควบคุมที่ใช้งานในอุตสาหกรรมบางประเภทต้องการค่าของตัวแปรสแตตเพื่อที่จะทำการควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง และการหาค่าตัวแปรของระบบเป็นที่มาของการนำตัวสังเกตมาใช้ในการประมาณค่า เนื่องจากช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์ตรวจวัดที่มีราคาแพงและลดความซับซ้อนในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด ในสภาวะการทำงานจริงมักมีแรงบิดจากภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอเข้ามารบกวนระบบ ซึ่งแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้การประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาด และลดประสิทธิภาพในการทำงานของตัวควบคุมลง จากแนวคิดในการที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จึงเป็นที่มาของงานวิจัยเพื่อการออกแบบระบบควบคุมแรงบิดลัฟท์และการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่เข้ามารบกวนระบบ ในทางปฏิบัติค่าแรงบิดภายนอกเปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่สามารถประมาณค่าได้โดยใช้ตัวสังเกตแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงซึ่งใช้หลักการของการควบคุมปรับตัวได้

Kaneko, K., Komoriya, K., Ohnishi, K., and Tanie, K. (1992) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมแรงบิดที่มีความถูกต้องสูงสำหรับเกียร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขึ้นกับตัวควบคุมความเร่ง อธิบายวิธีการที่จะระบุพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับระบบการควบคุมนอกจากนี้ยังเพิ่ม

วิธีการในการที่จะเลือกค่า stiffness ที่เป็นองค์ประกอบการตรวจวัดแรงบิดเพื่อให้บรรลุ 11
จุดมุ่งหมายในการควบคุมแรงบิดและยังใช้แนวคิดพื้นฐานสำหรับตัวควบคุมอัตราเร่งที่ขึ้นกับการ
รบกวนของตัวสังเกตการณ์แทนการควบคุมตำแหน่งในช่วงเวลาที่ผ่านมาแล้ว ข้อดีของงานวิจัย
นี้คือ ผลกระทบของความล่าช้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระบบและผลกระทบของแรงเสียดทานจะ
ถูกตัดออกโดยตัวสังเกตการณ์

Meakawa, H., (1999) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการควบคุมแรงบิดแบบใหม่สำหรับ
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้การควบคุมแรงดัน ตลอดจนการวิเคราะห์ระบบควบคุมแรงบิดของ
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เกียร์ทดและเซ็นเซอร์วัดแรงบิด แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงบิดโดย
การควบคุมแรงดันสามารถทำได้ นอกจากนี้ยังจะขจัดข้อผิดพลาดคงที่ของแรงบิดสุดท้ายและ
แรงบิดจากการแทรกแซงของความวุ่นวาย เช่น แรงเสียดทานที่เกียร์ทด เป็นต้น พร้อมทั้งยังสามารถ
พัฒนาชุดขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีการควบคุมค่าแรงบิดให้ถูกต้องแม่นยำอีกด้วย

Srisertpol, J., and Khajorntraidet, C. (2009) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการในการ
ประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัว
ได้ (adaptive compensation) เพื่อประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง จากผลการจำลองระบบและ
การทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบ
ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลง การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรง โดยการชดเชยแบบปรับตัวได้สองวิธีการ คือ Gradient Method และ Lyapunov's
Direct Method จากผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีการสามารถประมาณค่าแรงบิดที่
เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบ
ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Wahyunggoro, O., and Saad, N. (2008) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลอง
และการจำลองการควบคุมสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้โปรแกรม MATLAB และการ
วิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวควบคุม ทั้งตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้ระบบฟัซซีลอจิกและตัวควบคุม
แบบพีไอที่ใช้ระบบฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวเองโดยการเปลี่ยนแปลงของค่า scaling factor ผลการ
ทดลองสำหรับเปรียบเทียบการควบคุมความเร็วรอบและการควบคุมตำแหน่งโดยใช้
วิธีการ Fuzzy Logic Based Self Tuning PI Controller กับ Scheduled PID Controller แสดงให้เห็น
ว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการควบคุมแบบ Fuzzy Logic Based Self Tuning PI Controller
ดีกว่า มีผลทำให้ค่าพุ่งเกินลดลงและเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วขึ้น

Fallahi, M., and Azadi, S. (2009) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ดี โดยวิธี Sliding mode fuzzy สำหรับการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากความไม่ทนทานของแบบจำลองและการรบกวนจากภายนอกและยังมีความสามารถในการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต วิธีการนี้ยังใช้สำหรับการควบคุมที่จะเอาชนะความไม่แน่นอนที่ปรากฏเกิดขึ้นในแบบจำลองและความเสียหายต่อระบบ วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ชาญฉลาดจะใช้ในการแก้ไขข้อบกพร่องเหล่านี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบเลื่อนโดยใช้ตรรกะแบบคลุมเครือ ประโยชน์ของงานวิจัยนี้ คือ ปรับปรุงผลการตอบสนองของระบบในสถานะที่มีภาระกรรมภายนอกมากระทำ พร้อมทั้งนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพโครงสร้างของระบบควบคุม

Iwasaki, M., and Matsui, N. (1993) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมความเร็วแบบแข็งแรงแรงของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้หลักการสังเกตแรงบิดและการควบคุมแบบ Feedforward เนื่องจากลักษณะผลการตอบสนองความเร็วของมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอแบบเดิมจะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของระบบ ในระบบจะทำการประมวลผลและดำเนินการควบคุมทั้งหมดโดยใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผลสัญญาณดิจิทัลภายในระยะเวลาที่เหมาะสม

Hong, K., and Nam, K. (1998) ได้ทำการวิจัยโดยใช้การชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงหรือแรงบิดที่รบกวนกับระบบ สำหรับปรับปรุงการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซอร์โว (DC Servo Motor) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมในภาวะที่แรงบิดรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา และประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากเวลาประวิง (Time Delay) ซึ่งผลที่ได้ คือ การตอบสนองของความเร็วรอบมีความรวดเร็วมากขึ้น และลดการแกว่งตัวของ การตอบสนองในสถานะที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนกับระบบ รวมทั้งสามารถลดผลกระทบจากความไม่มีเสถียรภาพของระบบที่เกิดจาก Bandwidth ของระบบที่มีค่ามากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Chang, G.K., and Chern, T.L. (2001) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมแบบ DSP Based Servo Drive System โดยใช้การประมาณค่าแรงบิดเปลี่ยนแปลงร่วมกับตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control) และ Integral Variable Structure Model Following Control เนื่องจากการใช้งานจริงอาจต้องพบกับปัญหาการทำงานนอกขอบเขตและการสั่นสะเทือนที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ รวมทั้งหากระบบถูกรบกวนอย่างมากจะทำให้อัตราขยายป้อนกลับ (Feedback Gain) มีขนาดใหญ่การตอบสนองชั่วครู่จึงไม่ดี ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณค่าร่วมกับตัวควบคุมแบบปริพันธ์และ Integral Variable

Structure Model Following Control จะทำให้ระบบควบคุมมีความเข้มแข็งและสามารถลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดที่รับกับระบบได้และมีประสิทธิภาพในการควบคุมความเร็วได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ตัวควบคุมทั่วไป

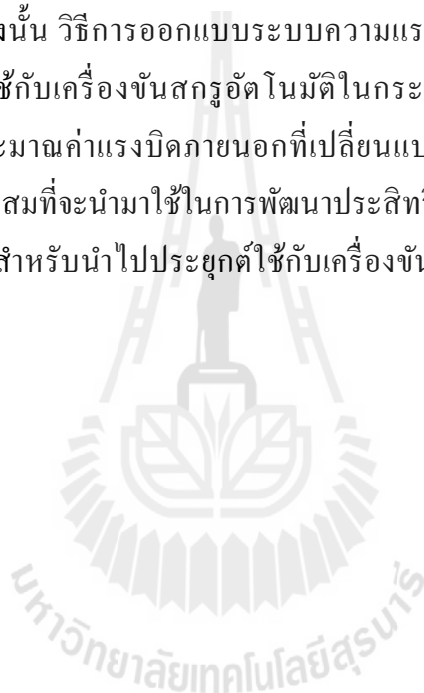
Ouassaid, M., Cherkaoui, M., Nejmi, A., and Maaroufi, M. (2005) ได้นำเสนองานวิจัยเรื่องการควบคุมแรงบิดของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับมอเตอร์เชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวร การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดแบบง่ายและตัวควบคุมแรงบิดแบบมีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการของ Lyapunov Technique (integral action) เพื่อการันตีเสถียรภาพของระบบ ผลที่ได้แสดงให้เห็นการออกแบบที่ประสบความสำเร็จในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการจำลองของวิธีการ Lyapunov สำหรับระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ถึงแม้จะมีความไม่แน่นอนหรือความปั่นป่วนของพารามิเตอร์ ผลการจำลองก็ยังยืนยันประสิทธิภาพของการควบคุมที่มีประสิทธิภาพของระบบ

Casadei, D., Serra, G., Tanie, A., and Zarri, L. (2006) ได้นำเสนองานวิจัยเรื่องการประเมินผลของการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control) สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้หลักการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control) ร่วมกับ stator flux vector control โดยค่าแรงบิดป้อนกลับจะถูกประมาณโดย stator flux estimator ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีการประมาณค่าฟลักซ์ที่ดีขึ้นจะช่วยให้การขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่ดีแม้ในสภาพการใช้งานที่มีการปรับปรุงบางโครงสร้างของ Direct Torque Control สรุปว่าการทำงานทั้งหมดของทั้งสองโครงการคือเปรียบเทียบ Direct Torque Control อาจจะต้องการสำหรับการใช้งานแบบไดนามิกที่สูง การลดแรงบิดกระเพื่อมอาจจะลดเซชบางส่วนโดยการนำโครงสร้างของการออกแบบใหม่มาประยุกต์ใช้ ข้อดีของ Direct Torque Control คือ ง่ายในการดำเนินงาน มีการคำนวณเวลาน้อยมากและแพลตฟอร์มต้นทุนต่ำ

Touforti, R., Meziane, S., Benalla, H. (2007) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมแรงบิดโดยตรงสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีการปัญญาเชิงคำนวณ โดยใช้หลักการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control) ร่วมกับวิธีฟัซซีลอจิกเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control) ร่วมกับวิธีนิวรอลเน็ตเวิร์ค (Artificial Neural Networks) ผลที่ได้ คือ ลดแรงบิดกระเพื่อมและเพิ่มประสิทธิภาพ โดยที่การควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control) ร่วมกับวิธีฟัซซีลอจิกจะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control) ร่วมกับวิธีนิวรอลเน็ตเวิร์ค (Artificial Neural Networks)

2.5 สรุป

จากปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบต่าง ๆ และการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบควบคุมแรงบิด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องขันสกรูอัตโนมัติในกระบวนการขันสกรู ทำให้ระบบควบคุมแรงบิดของเครื่องขันสกรูอัตโนมัติมีผลการตอบสนองที่รวดเร็วและยังทำให้ระบบควบคุมแรงบิดมีประสิทธิภาพ การประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้โดยฟัซซีลอจิกเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพในกรณีที่ทราบค่าตัวแปรของระบบอย่างถูกต้อง ดังนั้น วิธีการออกแบบระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องขันสกรูอัตโนมัติในกระบวนการขันสกรูจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและทำการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้การชดเชยแบบปรับตัวได้ จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องขันสกรูอัตโนมัติในกระบวนการขันสกรูได้



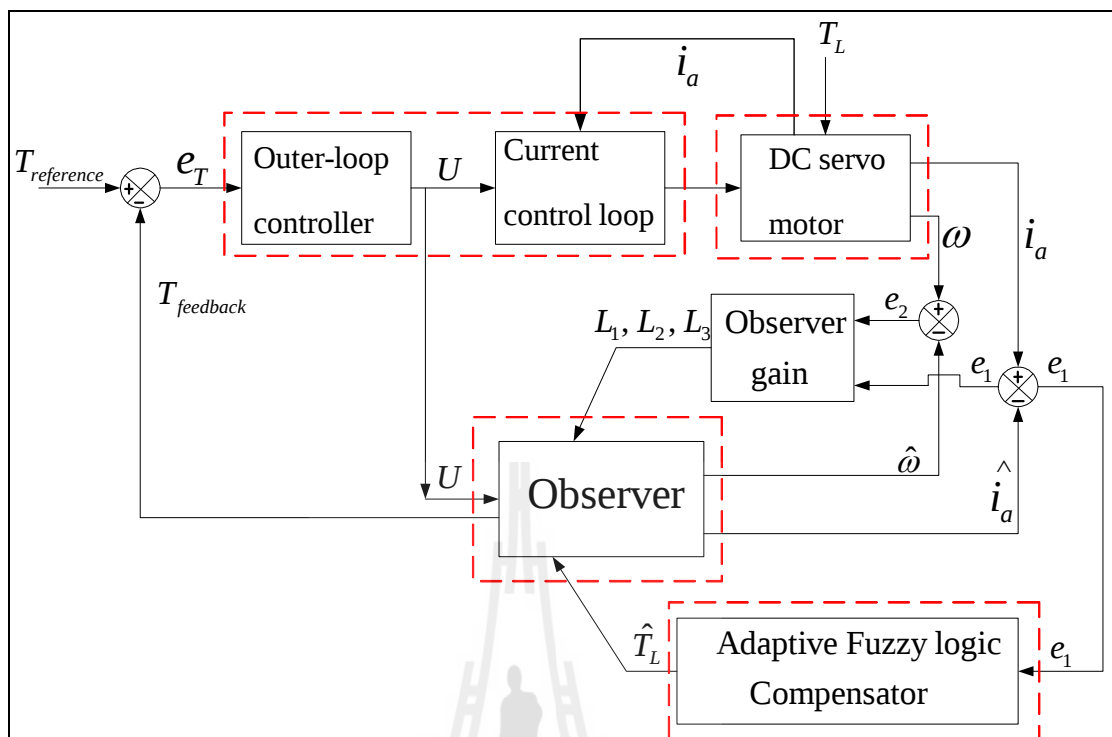
บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เครื่องขับเคลื่อนอัตโนมัติในกระบวนการขับเคลื่อนมีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นในทางปฏิบัติของการควบคุมแรงบิดของเครื่องขับเคลื่อนอัตโนมัติในกระบวนการขับเคลื่อนจำเป็นต้องเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขับเคลื่อนอัตโนมัติในกระบวนการขับเคลื่อน ซึ่งการออกแบบระบบจะประกอบไปด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ออกแบบระบบควบคุมแรงบิด ลัพธ์ ตัวสังเกตและตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ใช้ในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกของระบบ

ระบบควบคุมแรงบิดของเครื่องขับเคลื่อนอัตโนมัติในกระบวนการขับเคลื่อน ซึ่งมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโดยใช้โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแทนเครื่องขับเคลื่อนอัตโนมัติในกระบวนการขับเคลื่อน ซึ่งระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะสามารถควบคุมแรงบิดได้อย่างถูกต้องแม่นยำส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับ การออกแบบที่เหมาะสมขององค์ประกอบย่อยของแต่ละส่วนของระบบควบคุมแรงบิด ซึ่งระบบควบคุมแรงบิดจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบย่อยต่างๆดังต่อไปนี้

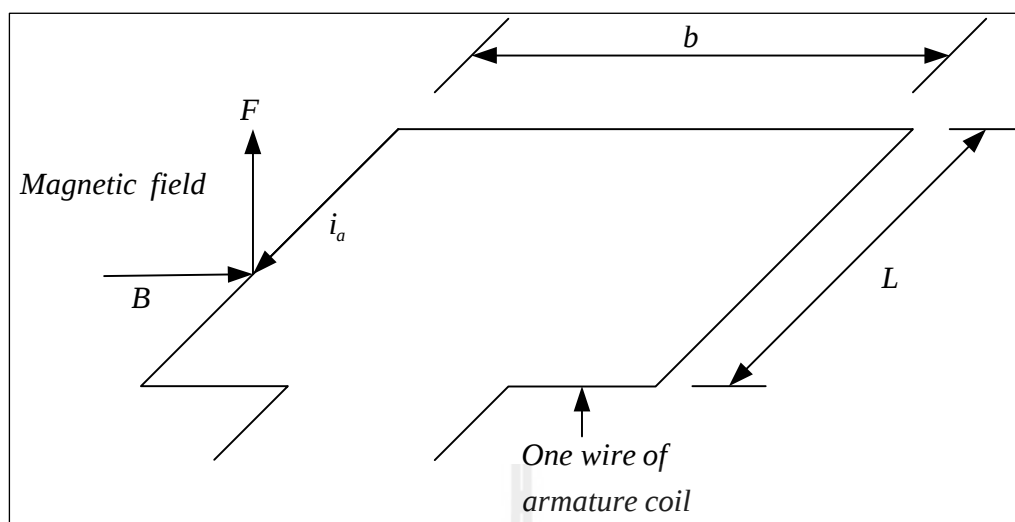
- โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Servo Motor)
- ลูปการควบคุมกระแส (Current Control Loop)
- ตัวควบคุมแบบพีไอ (Outer Loop Controller)
- ตัวสังเกต (Observer)
- ตัวชดเชยแบบฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ (Adaptive Fuzzy Logic Compensator)



รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบควบคุมแรงบิดพัลส์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือจะกล่าวว่าเป็นระบบที่มีสัญญาณไฟฟ้าเป็นอินพุต และมีเอาต์พุตเป็นพลังงานกลก็ได้ โดยทั่วไปมอเตอร์จะประกอบด้วยขดลวดส่วนที่หมุนหรือขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature coil) ซึ่งสามารถที่จะหมุนได้อย่างอิสระ ขดลวดนี้จะวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ซึ่งอาจเป็นแม่เหล็กถาวร หรือส่วนมากเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างจากกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดสนาม (field coil) เมื่อมีกระแสอาร์เมเจอร์ (i_a) ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature coil) ซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ก็จะทำให้เกิดแรงผลัก ทำให้ส่วนของอาร์เมเจอร์เกิดการหมุน ตามที่แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ดังนั้น สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ควบคุม

1. Armature – Controlled Motor
2. Field – Controlled Motor

แรง F ที่กระทำบนขนาดความยาว L ที่มีกระแส i_a ไหลผ่านและวางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก B และแรง F ที่กระทำเป็นมุมฉากกับ B นั้นจะมีค่าเป็น

$$F = Bi_a L \quad (3.1)$$

ถ้ามีขนาดจำนวน N เส้นจะได้

$$F = NBi_a L \quad (3.2)$$

แรงกระทำ F นี้ยังส่งผลให้เกิดแรงบิด T_M เมื่อ $T_M = Fb$ โดย b คือความกว้างของขดลวด ดังนั้น

$$T_M = NBi_a Lb \quad (3.3)$$

จะเห็นว่าแรงบิด T_M นี้จะเป็นสัดส่วนกับ $B i_a$ ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ จะคงที่สำหรับมอเตอร์หนึ่ง ๆ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$T_M = k_1 B i_a \quad (3.4)$$

โดยที่ $k_1 = N b L$

เนื่องจากอาร์เมเจอร์ (Armature) เป็นขดลวดที่อยู่ในสนามแม่เหล็กจึงเกิดการเหนี่ยวนำและทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้น ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ จะตรงกันข้ามกับความต่างศักย์ที่ทำให้เกิดการหมุน ดังนั้นเราจึงเรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้ว่า back emf โดยที่ back emf จะเป็นอัตราส่วนกับการหมุนของอาร์เมเจอร์ (armature) และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวด ทำให้เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็ก B มีค่าเป็น

$$v_b = k_2 B \omega \quad (3.5)$$

เมื่อ ω คือค่าความเร็วรอบของเพลาลูกและ k_2 เป็นค่าคงที่

ในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และควบคุมด้วยวิธี Armature Control Motor ใช้การปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ (Armature Circuit) เพื่อควบคุมความเร็ว โดยให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้กับวงจรสนาม (Field Circuit) คงที่ จึงสามารถพิจารณาเฉพาะส่วนของวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระแสที่ให้กับวงจรสนามมีค่าคงที่ที่ทำให้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์มีค่าคงที่ตามไปด้วย การควบคุมจะทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ พิจารณาสมการของแรงบิด

$$I \dot{\omega} = -b \cdot \omega + K_t \cdot i_a - T_L \quad (3.6)$$

สมการของวงจรไฟฟ้า

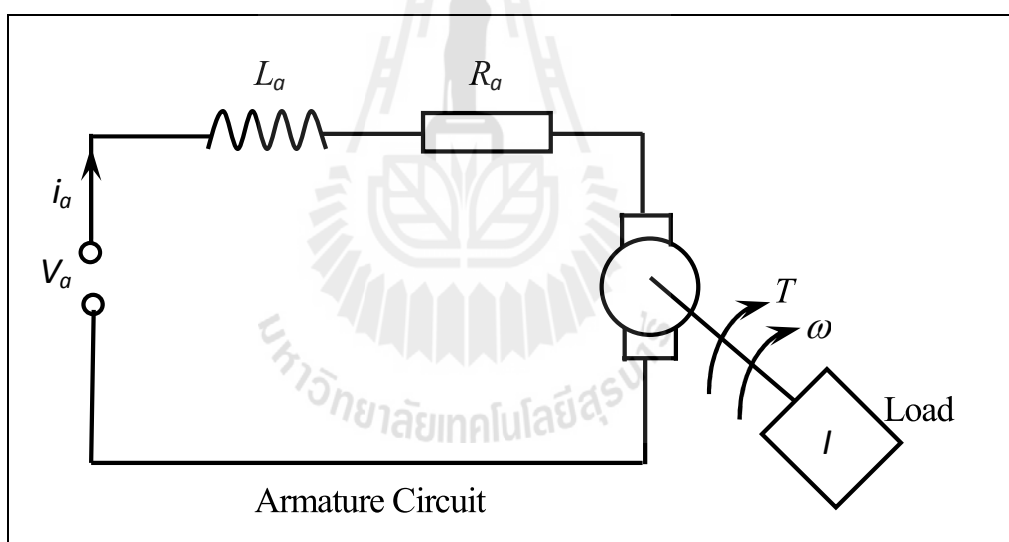
$$V_a - V_b = L_a \frac{di}{dt} + R_a \cdot i_a \quad (3.7)$$

เมื่อ $V_b = K_e \cdot \omega$

สมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space Form

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu + Hl \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{3.8}$$

เมื่อ A = เมตริกซ์สเตตของระบบ [2x2]
 B = เมตริกซ์อินพุตของระบบ [2x1]
 C = เมตริกซ์เอาต์พุตของระบบ [2x2]
 H = เมตริกซ์ตัวรบกวนของระบบ [2x1]



รูปที่ 3.3 แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการที่ (3.6) และ (3.7) จัดให้อยู่ในรูป State Space Form จะได้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega \\ i_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} \frac{-1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L \quad (3.9)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \omega \\ i_a \end{Bmatrix}$$

เมื่อ	I	= โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
	K_t	= ค่าคงที่ของแรงบิด ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$)
	K_e	= ค่าคงที่ของ Electromotive Force ($\text{V}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
	T_L	= แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ($\text{N}\cdot\text{m}$)
	T_M	= แรงบิดทางกล ($\text{N}\cdot\text{m}$)
	b	= ความหน่วง ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
	R_a	= ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)
	L_a	= ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)
	i_a	= กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)
	ω	= ความเร็วรอบ (rad/s)
	V_a	= ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)
	V_b	= ความต่างศักย์ back emf (V)

3.2 การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เนื่องจากแรงบิดลัทธิของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง แต่จะขึ้นกับแรงบิดทางกลและแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับมอเตอร์เท่านั้น ซึ่งแรงบิดทางกลของมอเตอร์จะขึ้นกับกระแสอาร์เมเจอร์เพียงอย่างเดียวและแรงบิดรบกวนภายนอกเป็นค่าที่ไม่ทราบในทางปฏิบัติ ซึ่งในการออกแบบระบบควบคุมแรงบิดทั่วไปจะเป็นการควบคุมความเร็วรอบกับแรงบิดด้วยการปรับค่ากระแสอาร์เมเจอร์ให้พอเพียงกับแรงบิดที่ต้องการ

แรงบิดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$T_M = K_t \cdot i_a \quad (3.10)$$

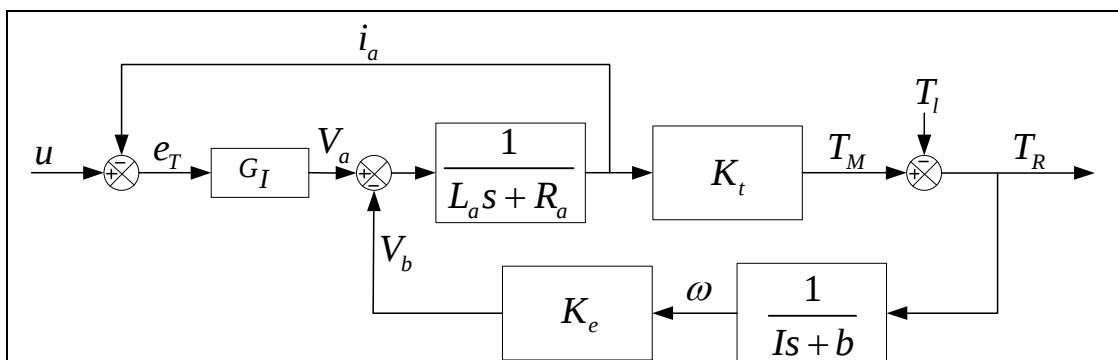
แรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$T_R = T_M - T_L \quad (3.11)$$

เมื่อ T_M = แรงบิดทางกล (N·m)
 T_R = แรงบิดลัพธ์ (N·m)
 T_L = แรงบิดรบกวนภายนอก (N·m)

3.2.1 ลูปการควบคุมกระแส (Current control loop)

เนื่องจากแรงบิดลัพธ์ประมาณจากค่ากระแสอาร์เมเจอร์ ดังนั้นการควบคุมแรงบิดลัพธ์ก็จะสามารถทำได้โดยวงจรควบคุมกระแส ซึ่งวงจรควบคุมกระแสของระบบจะต้องใช้กระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวป้อนกลับ ในการออกแบบระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์จะวางโครงสร้างของวงจรลูปกระแสอาร์เมเจอร์เป็นลูปด้านใน แสดงตามรูปที่ 3.4 โดยที่ฟังก์ชัน $G_I = \frac{1}{s}$ การเพิ่มฟังก์ชัน G_I ทำให้ชนิด (Type) ของระบบเพิ่มขึ้นมีผลทำให้การควบคุมแรงบิดลัพธ์ง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 3.4 แผนภาพโครงสร้างวงจรลูปควบคุมกระแส

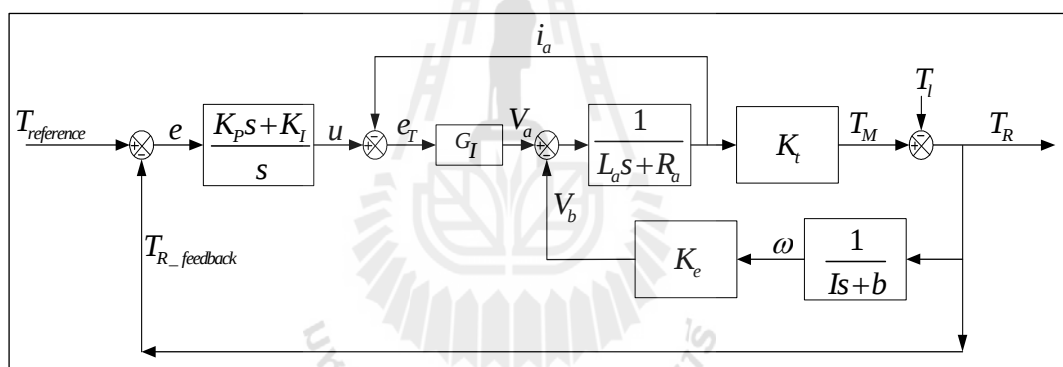
3.2.2 ลูประบบควบคุมแบบพีไอ (PI - Controller loop)

ระบบควบคุมแบบพีไอจะออกแบบโดยวางไว้วงนอกของระบบ ตัวควบคุมแบบพีไอมีหน้าที่รับสัญญาณค่าความผิดพลาดที่เปรียบเทียบกันระหว่างแรงบิดลัฟท์ที่ต้องการกับแรงบิดลัฟท์ที่ได้จากการประมาณค่าจากตัวสังเกตการณ์ของระบบเพื่อสร้างสัญญาณอินพุตให้กับระบบ สมการของระบบควบคุมแบบพีไอจะแสดงดังสมการที่ 3.12

$$G_{PI} = \frac{K_P s + K_I}{s} \quad (3.12)$$

เมื่อ K_P = สัมประสิทธิ์ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

K_I = สัมประสิทธิ์ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

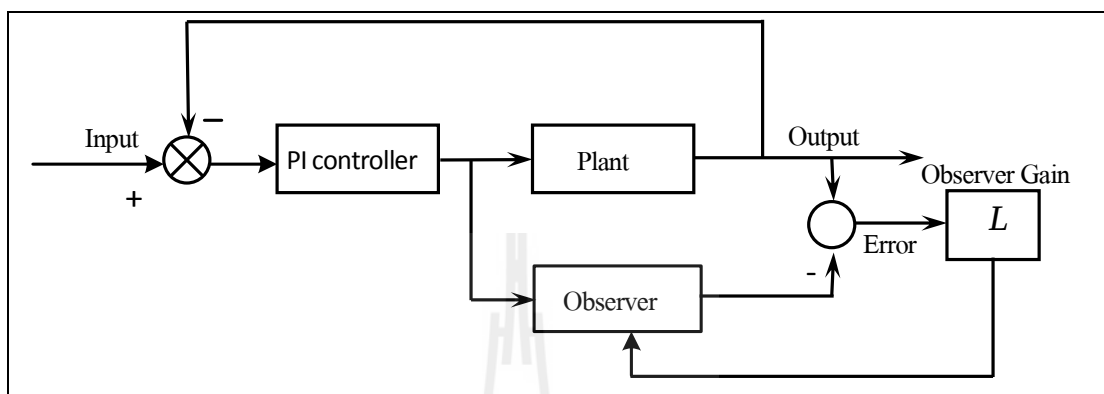


รูปที่ 3.5 แผนภาพโครงสร้างระบบควบคุมแรงบิดลัฟท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

3.3 ตัวสังเกต

ในทางปฏิบัติตัวแปรสแตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำการศึกษานั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้น จำเป็นจะต้องประมาณค่าตัวแปรสแตต โดยใช้ตัวสังเกตซึ่งระบบต้องมีคุณสมบัติในการสังเกตได้ ระบบที่จะสามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตโดยใช้ตัวสังเกตได้นั้นต้องสามารถทราบค่าอินพุต และเอาต์พุตของระบบได้ หลักการทำงานของตัวสังเกตจะนำค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของระบบที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสแตต และเอาต์พุตจากระบบของตัวสังเกตมาประมวลผลผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อลดค่าความผิดพลาดระหว่างทั้งสองระบบ ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวสังเกตที่เป็นอันดับเต็มโดยที่ระบบที่ทำการศึกษามีค่าอินพุต คือ ค่ากระแสที่ตัว

ควบคุมจ่ายให้แก่มอเตอร์ (U) ส่วนเอาต์พุต คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (ω) และกระแสไฟฟ้าที่อาร์มเจอร์ (i_a) แผนภาพระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกตอันดับเต็มแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกตอันดับเต็ม

จากค่าสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบ State Space Form ได้ค่าเมตริกซ์ต่าง ๆ คือ

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -K_{add} & 0 \\ \frac{1}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} \\ 0 & \frac{K_t}{I} & -\frac{b}{I} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} K_{add} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 1 \quad 1]$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{I} \end{bmatrix}$$

คุณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบ

$$P_c = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

หากค่า $\det(P_c) \neq 0$ ระบบจะมีคุณสมบัติในการควบคุมได้

คุณสมบัติความสังเกตได้ของระบบ พิจารณา

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

หากค่า $\det(P_o) \neq 0$ ระบบมีคุณสมบัติในการสังเกตได้

การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต พิจารณาจากสมการเฉพาะของระบบ

$$|sI - (A - LC)| = (s - \mu_1)(s - \mu_2)(s - \mu_3) \quad (3.15)$$

เมื่อ μ คือ Eigen value ของระบบเดิม และสามารถเลือกค่าความถี่ธรรมชาติของตัวสังเกต สามารถเลือกตามความเหมาะสมในการออกแบบ เพื่อให้ตัวสังเกตทำงานได้ผลการตอบสนองตามต้องการ

โดยที่อัตราขยายจะอยู่ในรูป

$$L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

สมการของตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{i} \\ \hat{\omega} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -K_{add} & 0 \\ \frac{1}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} \\ 0 & \frac{K_t}{I} & -\frac{b}{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{i} \\ \hat{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{add} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-1}{I} \end{bmatrix} \cdot \hat{T}_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} \{e_1 + e_2\} \\ \hat{y} &= [0 \quad 1 \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{i} \\ \hat{\omega} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.17)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} e &= y - C\hat{x} \\ e_1 &= i_a - \hat{i}_a \\ e_2 &= \omega - \hat{\omega} \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้ค่าที่มีสัญลักษณ์ ‘^’ คือ ค่าตัวแปรของตัวสังเกตที่ได้มาจากการประมาณค่าจากระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ค่า e คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และตัวสังเกต

3.4 ตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ (Adaptive Fuzzy Logic Compensator)

ตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้มีหน้าที่ในการประมาณค่าแรงภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบและชดเชยให้กับตัวสังเกต เพื่อให้ตัวสังเกตประมาณค่าตัวแปรสเตตได้ถูกต้อง และสามารถประมาณค่าแรงบิดลัพธ์ได้ถูกต้องตามแรงบิดอ้างอิง

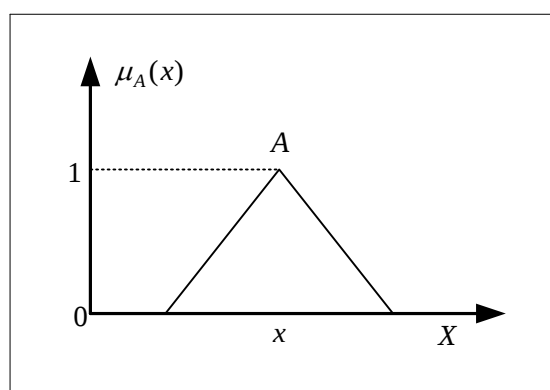
การออกแบบตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้จะต้องศึกษาโครงสร้างของระบบฟัซซีลอจิกแบบธรรมดาเสียก่อนเพื่อให้เกิดความชำนาญและเกิดทักษะด้านลอจิก ทั้งในส่วนของการเก็บข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบ ดังนั้น จะสามารถแยกหัวข้อออกเป็น 2 ส่วน คือ ระบบควบคุมฟัซซีลอจิกและการออกแบบตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบ

3.4.1 ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

การควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (fuzzy logic controller) เกิดขึ้นจากแนวความคิดของ Zadeh, L.A. (1965) เป็นวิธีการควบคุมแบบชาญฉลาดที่อาศัยข้อมูลความรู้และประสบการณ์การทำงานของมนุษย์เป็นพื้นฐานในการควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบ เหมาะสำหรับระบบที่มีความซับซ้อนหรือคลุมเครือ มีความไม่เป็นเชิงเส้นและหลายอินพุตได้เป็นอย่างดี ซึ่งในหัวข้อนี้ได้นำเสนอทฤษฎีฟัซซีเซต ตัวแปรแบบฟัซซีและตัวแปรทางภาษา โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก กฎของฟัซซี การอนุมานแบบฟัซซีลอจิก และการดีฟัซซิฟิเคชัน

ทฤษฎีฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต คือ กลุ่มของสิ่งของหรือวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงของสมาชิกในเซตอย่างค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ μ แทนค่าความเป็นสมาชิกภาพของเซตใด ๆ ที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ในช่วง 0 ถึง 1 ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A

จากรูปที่ 3.7 สังเกตได้ว่า ค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพ x จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากค่า 0 จนกระทั่งระดับความเป็นสมาชิกภาพ x เท่ากับ 1 จากนั้นค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพจะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าเท่ากับ 0 โดย ฟัซซีเซต A อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ X ซึ่งค่าความเป็นสมาชิกภาพของสมาชิก x ในเอกภพสัมพัทธ์ สามารถแทนได้ด้วย $\mu_A(x)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเซต A ตามสมการที่ (3.18) ดังนี้

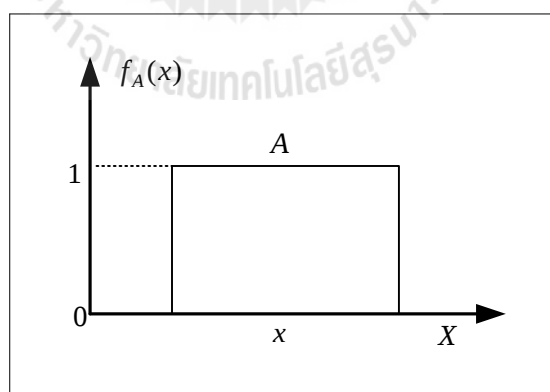
$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1] \quad (3.18)$$

โดยที่ $\mu_A(x) = 1$ เมื่อ x เป็นสมาชิกของ A อย่างสมบูรณ์

$\mu_A(x) = 0$ เมื่อ x ไม่เป็นสมาชิกของ A

$0 < \mu_A(x) < 1$ เมื่อ x เป็นสมาชิกของ A เพียงบางส่วน

จากทฤษฎีฟัซซีเซตสังเกตได้ว่า ระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีจะมีลักษณะค่อยเป็นค่อยไปซึ่งมีความแตกต่างไปจากเซตปกติธรรมดาที่ให้ค่าความเป็นสมาชิกภาพมีเพียงค่า 0 กับ 1 เท่านั้น ซึ่งค่า 0 หมายถึง การไม่เป็นสมาชิกในเซต A และ 1 หมายถึง การเป็นสมาชิกในเซต A โดยสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.8 ดังนี้



รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของเซตปกติธรรมดา

จากรูปที่ 3.8 เซตปกติธรรมดา A มีสมาชิกเป็น x ซึ่งอยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ X สามารถแทนได้ด้วย $f_A(x)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของ x ในเซต A ตามสมการที่ (3.19) ดังนี้

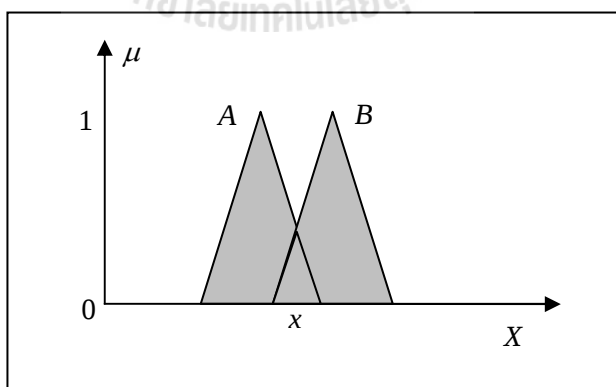
$$f_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (3.19)$$

โดยที่ $f_A(x) = 1$ เมื่อ x เป็นสมาชิกของ A อย่างสมบูรณ์

$f_A(x) = 0$ เมื่อ x ไม่เป็นสมาชิกของ A

ตัวดำเนินการ (operator) ในทฤษฎีเซตของเซตแบบปกติธรรมดาและฟัซซีเซตมีความหมายเหมือนกัน แต่ให้ค่าเชิงตัวเลขที่แตกต่างกัน สำหรับเซตแบบปกติธรรมดาตัวดำเนินการจะให้ผลว่าตัวแปรอยู่หรือไม่อยู่ในเซตอย่างไร แต่สำหรับฟัซซีเซตตัวดำเนินการจะให้ผลว่าตัวแปรอยู่ในเซตนั้น ๆ ด้วยระดับความเป็นสมาชิกเท่าไร โดยตัวดำเนินการในทฤษฎีเซต คือ ยูเนียน (union) อินเตอร์เซกชัน (intersection) และส่วนเติมเต็ม (complement) ซึ่งจะกำหนดให้ฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B อยู่บนเอกภพสัมพัทธ์ X และมีคุณสมบัติดังนี้

- ยูเนียน ของฟัซซีเซตดังรูปที่ 3.9 จะสังเกตได้ว่า ฟัซซีเซต A ยูเนียนกับฟัซซีเซต B จะได้เซตซึ่งประกอบไปด้วยสมาชิกที่เป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B ซึ่งสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (3.20)



รูปที่ 3.9 การยูเนียนของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B

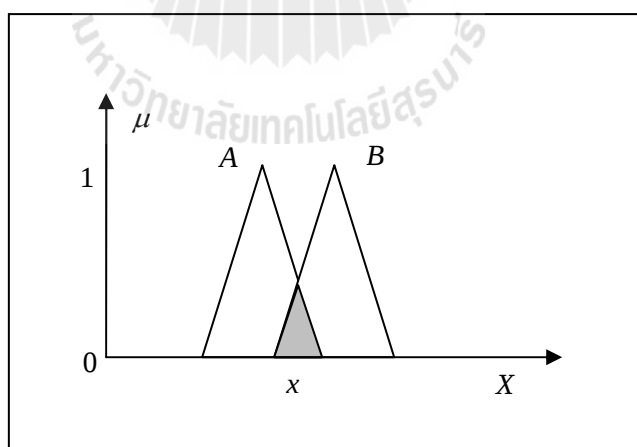
$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.20)$$

โดยที่ $\vee$ หมายถึง การหาค่า Maximum

จากสมการที่ (3.20) แสดงว่า ค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพที่ได้จากระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A ยูเนียนกับฟัซซีเซต B ผลลัพธ์ที่ได้จะพิจารณาจากค่ามากที่สุดของค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A เทียบกับฟัซซีเซต B เช่น ถ้า a และ b เป็นจำนวนจริงจะเป็นไปตามสมการที่ (3.21) ดังนี้

$$a \vee b = \max(a, b) = \begin{cases} a ; & a \geq b \\ b ; & a < b \end{cases} \quad (3.21)$$

- อินเตอร์เซกชัน ของฟัซซีเซตตามรูปที่ 3.10 สังเกตได้ว่า ฟัซซีเซต A อินเตอร์เซกชันกับฟัซซีเซต B จะได้เซตซึ่งประกอบไปด้วยสมาชิกที่เหมือนกันของทั้งฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B ซึ่งสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (3.22)



รูปที่ 3.10 การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B

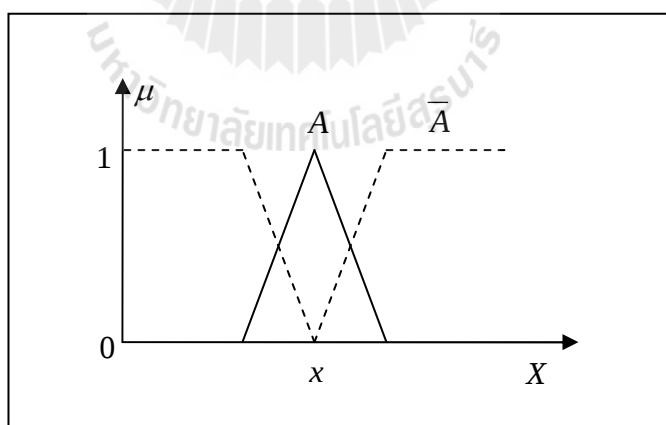
$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.22)$$

โดยที่ $\wedge$ หมายถึง การหาค่า Minimum

จากสมการที่ (3.22) แสดงว่า ค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพที่ได้จากระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A อินเตอร์เซกชันกับฟัซซีเซต B ผลลัพธ์ที่ได้จะพิจารณาจากค่าน้อยสุดของค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A เทียบกับฟัซซีเซต B เช่น ถ้า a และ b เป็นจำนวนจริงจะเป็นไปตามสมการที่ (3.23) ดังนี้

$$a \wedge b = \min(a, b) = \begin{cases} a ; & a \leq b \\ b ; & b < a \end{cases} \quad (3.23)$$

- ส่วนเติมเต็ม ของฟัซซีเซตดังรูปที่ 3.11 สังเกตได้ว่า ฟัซซีเซต A ใด ๆ จะอยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ X ซึ่งส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A คือ เซตที่ประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นสมาชิกของ X แต่ไม่เป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A ซึ่งสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (3.24)



รูปที่ 3.11 ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A

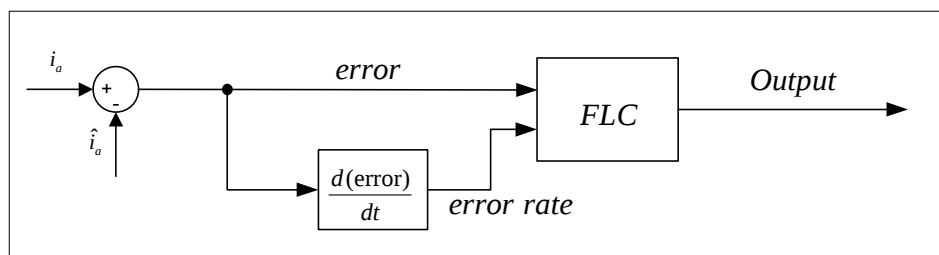
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.24)$$

จากสมการที่ (3.24) จะพบว่า ค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพที่ได้จากส่วนเติมเต็มของระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A จะเท่ากับผลต่างของค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพเท่ากับ 1 กับค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A

ตัวแปรแบบฟัซซีและตัวแปรทางภาษา

ระบบฟัซซีลอจิกประกอบไปด้วยฟัซซีเซต ที่ซึ่งใช้ระบุค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรภายในระบบจะสังเกตว่าฟัซซีเซตประกอบไปด้วยตัวแปรทางภาษา (Linguistic Variable) ตัวแปรดังกล่าวสามารถเรียกว่าเป็นตัวแปรฟัซซี ตัวแปรฟัซซีจะให้ค่าเป็นคำพูดที่มีความหมายตามที่ต้องการ เช่น “ร้อน” “กำลังดี” หรือ “เย็น” เป็นต้น ซึ่งค่าของตัวแปรเหล่านี้สามารถถูกนำไปแปลเป็นค่าเชิงตัวเลขสำหรับประมวลผลต่อไปได้ด้วยฟังก์ชันสมาชิก ค่าของตัวแปรดังกล่าวเรียกว่าค่าเชิงภาษา (Linguistic Value) ดังนั้นแล้วตัวแปรในระบบฟัซซีลอจิกจะประกอบไปด้วยตัวแปรฟัซซีเหล่านี้ เช่น เมื่อกำหนดให้ x เป็นค่าของอุณหภูมิภายในห้อง ประโยค “อุณหภูมิร้อน” จึงประกอบไปด้วยตัวแปรฟัซซี “ x เท่ากับอุณหภูมิ” และค่าของตัวแปร “ x เท่ากับร้อน” ทั้งสองคำ “อุณหภูมิ” และ “ร้อน” เป็นภาษาคำพูดของมนุษย์ เช่นระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) มีการใช้ตัวแปรภาษาในการกำหนดเกณฑ์ภายในระบบ

ตัวแปรทางภาษา (linguistic variables) หมายถึง ตัวแปรที่มีการให้ค่าเป็นคำหรือประโยค เช่น “อุณหภูมิ” ถือว่าเป็นตัวแปรทางภาษา การให้ค่าแก่อุณหภูมิอาจเป็น “ร้อน” และ “เย็น” เป็นต้นคำว่า “อุณหภูมิ” ถือเป็นตัวแปรทางภาษา ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ตัวแปรทางภาษา และตัวแปรแบบฟัซซีหมายถึงสิ่งเดียวกัน ซึ่งในระบบทางภาษานอกจากตัวแปรทางภาษาและค่าให้ค่าแล้วยังมีคำขยายเสริมความ เช่น มาก ค่อนข้าง เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้น ขอยกตัวอย่างการกำหนดตัวแปรทางภาษาของระบบที่สอดคล้องกับงานวิจัยการชดเชยแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้โดยฟัซซีลอจิก ซึ่งสามารถพิจารณาได้ ดังรูปที่ 3.12 ดังนี้



รูปที่ 3.12 โครงสร้างการชดเชยแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้โดยฟัซซีลอจิก

จากรูปที่ 3.12 แสดงการชดเชยแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้โดยฟิสิกส์ลอจิกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขันสกรูอัตโนมัติในกระบวนการขันสกรู โดยฟิสิกส์ลอจิกจะทำหน้าที่ในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงและชดเชยให้กับตัวสังเกตต่อไป โดยจะรับค่ากระแสอาร์เมเจอร์จากระบบจริงเป็นตัวอ้างอิง (i_a) และค่ากระแสอาร์เมเจอร์จากตัวสังเกตเป็นตัวชดเชย ($\hat{i}_a$) ซึ่งผลต่างระหว่างค่ากระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิงกับค่ากระแสอาร์เมเจอร์ชดเชย คือ ค่าความผิดพลาด (error) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด (error rate) ซึ่งเป็นสัญญาณทางดำนอินพุตของฟิสิกส์ลอจิก สามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (3.25) และสมการที่ (3.26) จากนั้นนำอินพุตดังกล่าวผ่านตัวชดเชยแบบฟิสิกส์ลอจิก และเอาต์พุตที่ได้จากตัวชดเชยแบบฟิสิกส์ลอจิก คือ ค่าประมาณของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบ

$$\text{error} = i_a - \hat{i}_a \quad (3.25)$$

$$\text{error rate} = \frac{d(\text{error})}{dt} \quad (3.26)$$

ค่าความผิดพลาด อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด และเอาต์พุตจะถูกกำหนดด้วยตัวแปรทางภาษา และค่าทางภาษา ตามตารางที่ 3.1 ได้ดังนี้

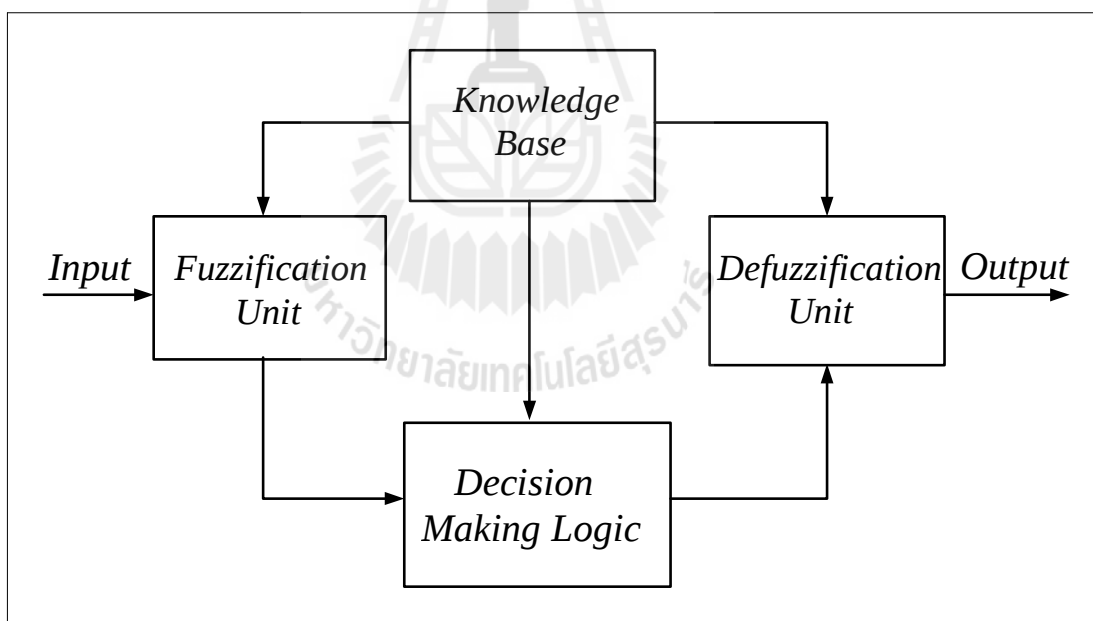
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรทางภาษา และค่าทางภาษา

ระบบ	ชื่อตัวแปร	ความหมาย	ค่าตัวแปร	ความหมาย
อินพุต	error	ค่าความผิดพลาด	zero	ศูนย์ ($i_a = \hat{i}_a$)
			pos1	ศูนย์ ($i_a = \hat{i}_a$)
			posn (positive)	บวก ($i_a > \hat{i}_a$)
	error rate	อัตราการเปลี่ยนแปลง ของค่าความผิดพลาด	neg_rate	ลดลง
			zero_rate	ไม่เปลี่ยนแปลง
			pos_rate	เพิ่มขึ้น
เอาต์พุต	output	ค่าแรงบิดภายนอก	cons	คงที่ศูนย์
			inc	เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 3.1 เมื่อพิจารณาอินพุตค่าความผิดพลาดเป็นตัวแปรทางภาษา จะให้ค่าความผิดพลาดเป็น “ ศูนย์ ” “ บวก ” เช่น ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ หมายถึงค่ากระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิงเท่ากับค่ากระแสอาร์เมเจอร์ชดเชย และเมื่อพิจารณาอินพุตเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด จะให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดเป็น “ ลดลง ” “ ไม่เปลี่ยนแปลง ” “ เพิ่มขึ้น ” และเอาต์พุตเป็นค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบ จะให้ค่าแรงบิดภายนอกเป็น “ คงที่ศูนย์ ” “ เพิ่มขึ้น ”

โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิกประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน คือ ชุดปฏิบัติการฟัซซิฟิเคชัน (fuzzification unit) ฐานความรู้ (knowledge base) ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ (decision making logic) และชุดปฏิบัติการดีฟัซซิฟิเคชัน (defuzzification unit) ซึ่งพิจารณาได้ตามรูปที่ 3.13 ดังนี้



รูปที่ 3.13 โครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

- ชุดปฏิบัติการฟัซซิฟิเคชัน ค่าอินพุตที่ได้จากการประมวลผลก่อนจะถูกแปลงให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกจากฟังก์ชันสมาชิกต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบ แล้วทำการรวมผลลัพธ์ของอินพุตตามเงื่อนไขที่ถูกออกแบบไว้ ตัวอย่างของงานวิจัย เช่น สัญญาณข้อมูลอินพุตแบบธรรมดาของระบบ คือ

ค่ากระแสอาร์เมเจอร์ที่มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere) ทำการแปลงให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรทางภาษาหรือตัวแปรแบบพีชชี ได้เป็น ค่าความผิดพลาดของกระแสอาร์เมเจอร์และอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของกระแสอาร์เมเจอร์

- **ฐานความรู้** เป็นส่วนที่จัดเก็บรวบรวมข้อมูลในการควบคุมของตัวควบคุมแบบพีชชี ลอจิกประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ฐานกฎ (rule base) และฐานข้อมูล (data base) ในส่วนของฐานกฎนั้น จะถือเป็นหัวใจในการดำเนินการควบคุมกำหนดวิธีการควบคุมโดยผู้เข้าในระบบในรูปแบบของตัวแปรทางภาษา ส่วนฐานข้อมูลนั้นจะเป็นการจัดเตรียมส่วนที่จำเป็นเพื่อใช้ในการกำหนดกฎการควบคุม

- **กลไกการอนุมาน (inference engine)** กฎต่าง ๆ ที่กำหนดไว้จะถูกอนุมานเป็นผลลัพธ์ ในการตัดสินใจของระบบ เมื่อระบบตัดสินใจได้แล้ว การดำเนินการที่สอดคล้องกับการตัดสินใจ นั้นก็จะดำเนินต่อไป ยกตัวอย่างเช่นระบบตรวจสอบว่ามีแรงบิดภายนอกมากกระทบบระบบ ระบบ จะทำการพิจารณาค่าอินพุตพร้อมกันตรวจสอบกับกฎการทำงานที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าว แล้วทำการอนุมานหรือตัดสินใจว่าจะทำการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่มากกระทบบระบบเท่าใด ผลลัพธ์การตัดสินใจที่ได้ยังคงอยู่ในเทอมของค่าเชิงภาษา ที่ซึ่งจะถูกแปลงเป็นค่าที่ใช้งานจริงใน ขั้นตอนต่อไป

- **ชุดปฏิบัติการดีฟัซซิฟิเคชัน** ผลลัพธ์เชิงภาษาที่ได้จากการอนุมานจะอยู่ในรูป เช่น ระบบพีชชีลอจิกจะประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่กระทบบระบบ ผลลัพธ์ดังกล่าวจะถูกแปลงให้เป็นค่าที่สอดคล้องกับการทำงานจริงของระบบ เช่น ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่กระทบบระบบ ได้เท่ากับ 0.01 นิวตันเมตร เป็นต้น

กฎของพีชชีลอจิก

การประยุกต์ใช้งานตรรกศาสตร์คลุมเครือโดยทั่วไป จะใช้ในการจำลองความรู้ หรือ ประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ โดยการใช้เหตุผล หรือ การตัดสินใจต่อสภาวะการณ์ต่าง ๆ ของมนุษย์ สามารถเขียนอยู่ในรูปเชิงภาษาศาสตร์ของระบบกฎเกณฑ์ (rule – based system) คือ ประโยคเงื่อนไข (IF(ถ้า) <เป็นเงื่อนไข> THEN(แล้ว) <เป็นผลที่ตามมา>) หรือ อยู่ในรูปอื่นที่เท่าเทียมกัน โดยในแต่ละส่วนอาจมีหลายตัวแปร ดังนั้นจึงเชื่อมประโยคด้วยปฏิบัติการทางเซตหรือตัวดำเนินการทางตรรกะ เช่น AND (และ) หรือ OR (หรือ) สำหรับการสร้างเงื่อนไขของเหตุการณ์ที่ซับซ้อนและเพื่อแก้ปัญหาสำหรับระบบควบคุมหลายอินพุตหลายตัวแปร (Multiple – Input and Multiple – Output : MIMO) ตัวอย่างการชดเชยแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้โดยวิธีการพีชชีลอจิกสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขันสกรูอัตโนมัติใน

กระบวนการขั้นสูงรูปที่ 3.12 เมื่อพิจารณาระบบควบคุมดังกล่าวเพียงอินพุตเดียว ค่าของตัวแปรความผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์ที่เป็นไปได้ คือ {“ศูนย์” “บวก”} ดังนั้นส่วนเงื่อนไขในกฎของฟัซซีจะพิจารณาได้ดังนี้

Rule 1: IF error is *zero* THEN output is *cons*

Rule 2: IF error is *pos1* THEN output is *cons*

Rule 3: IF error is *posn* THEN output is *inc*

หรือ

กฎ 1: ถ้า ค่าความผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์ เท่ากับ ศูนย์ แล้ว เอาต์พุต เป็น ศูนย์

กฎ 2: ถ้า ค่าความผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์ เท่ากับ ศูนย์ แล้ว เอาต์พุต เป็น ศูนย์

กฎ 3: ถ้า ค่าความผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์ เท่ากับ บวก แล้ว เอาต์พุต เป็น ค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเต็มบวก

กฎของฟัซซีประกอบด้วยสองส่วนหลัก ๆ คือ ส่วน IF (เงื่อนไข) และส่วน THEN (ผลที่ตามมา) ตามทฤษฎีแบบดั้งเดิม เมื่อค่าเงื่อนไขใน IF เป็นจริงแล้ว ส่วนของผลที่ตามมาใน THEN จะถูกประเมิน แต่ในทางทฤษฎีของฟัซซี ค่าเงื่อนไขใน IF จะมีความเป็นฟัซซีในระดับหนึ่ง ส่วน THEN จะถูกประเมินค่าด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพ ซึ่งจะให้ค่าที่สัมพันธ์ในระดับนั้น ๆ ด้วยค่าเงื่อนไขในส่วนของ IF ซึ่งสามารถมีได้หลายค่าเช่นเดียวกับส่วนของ THEN ดังรูปแบบต่อไปนี้

IF	x is A	AND	y is B	OR	z is C
THEN	p is D				
	q is E				

จากรูปแบบเงื่อนไขข้างต้น จะพบว่าทุกเงื่อนไขในส่วนของ IF จะถูกประเมินไปพร้อม ๆ กัน และรวมกันด้วยปฏิบัติการทางเซต เช่น AND หรือ OR โดยปกติแล้วจะจำกัดจำนวนค่าเงื่อนไขในระบบ โดยการเลือกใช้กฎที่จำเป็นเท่านั้นเพราะจะทำให้ลดความยุ่งยากในการออกแบบกฎของฟัซซี ซึ่งจำนวนเงื่อนไขดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรภาษาของระบบ จากระบบฟัซซีลอจิก

สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลง ค่าของความผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์เป็นไป
ได้สองรูปแบบ คือ {“ค่าศูนย์” “ค่าบวก”} สามารถมีเงื่อนไขต่าง ๆ ได้หลายเงื่อนไข โดยจะ
ยกตัวอย่างบางกรณีเพื่อแสดงลักษณะกฎของฟัซซี พิจารณาระบบฟัซซีลอจิกสำหรับประมาณค่า
แรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่มี 2 อินพุต ได้แก่ ค่าความผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์ (error) และ
อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์ (error rate) และ 1 เอาต์พุต คือ ค่า
แรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบที่ประมาณได้ (output) ซึ่งการออกแบบกฎของ
ฟัซซีพิจารณาได้ดังนี้

กฎข้อที่ 1	IF	error = zero	AND	error rate = neg_rate	THEN	output = cons
กฎข้อที่ 2	IF	error = zero	AND	error rate = zero_rate	THEN	output = cons
กฎข้อที่ 3	IF	error = zero	AND	error rate = pos_rate	THEN	output = cons
กฎข้อที่ 4	IF	error = posn	AND	error rate = neg_rate	THEN	output = incn
กฎข้อที่ 5	IF	error = posn	AND	error rate = zero_rate	THEN	output = incn
กฎข้อที่ 6	IF	error = posn	AND	error rate = pos_rate	THEN	output = incn

จากกฎการควบคุมดังกล่าวสามารถอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมได้ดังนี้

จากกฎข้อที่ 1 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ zero และค่า error rate อยู่ในเซตของ neg_rate ผล
ที่ได้ คือ ค่า output จะอยู่ในเซตของ cons หมายความว่า ค่ากระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิง (i_d) เท่ากับ
ค่ากระแสอาร์เมเจอร์ชดเชย ($\hat{i}_d$) ดังนั้นค่าแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้จะมีค่าเท่ากับศูนย์

จากกฎข้อที่ 2 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ zero และค่า error rate อยู่ในเซตของ zero_rate ผล
ที่ได้ คือ ค่า output จะอยู่ในเซตของ cons หมายความว่า ค่ากระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิง (i_d) เท่ากับ
ค่ากระแสอาร์เมเจอร์ชดเชย ($\hat{i}_d$) ดังนั้นค่าแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้จะมีค่าเท่ากับศูนย์

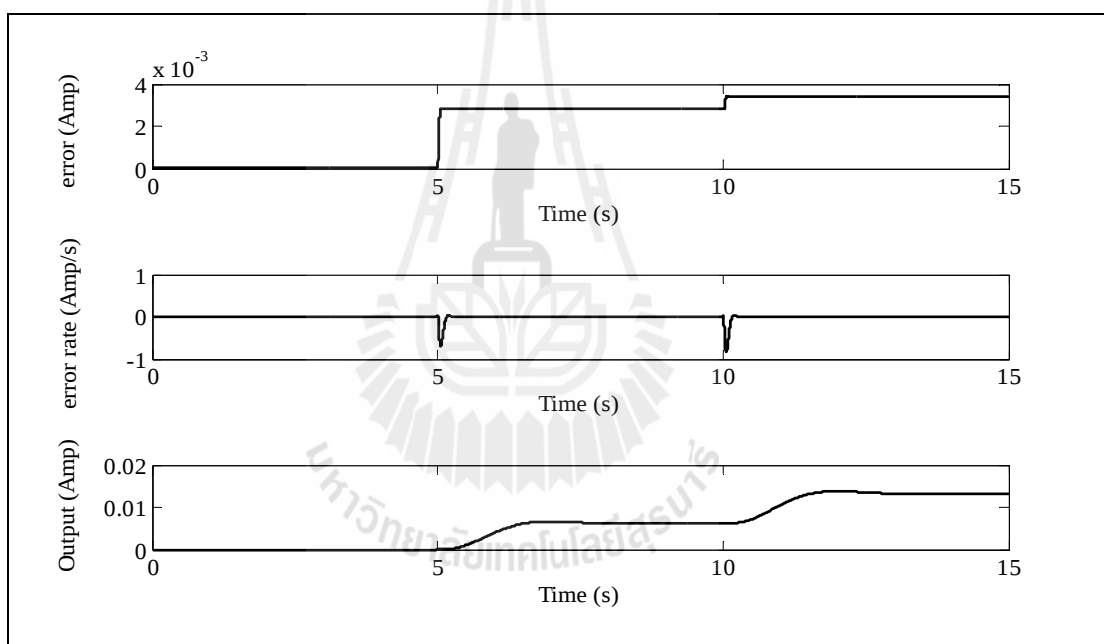
จากกฎข้อที่ 3 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ zero และค่า error rate อยู่ในเซตของ pos_rate ผล
ที่ได้ คือ ค่า output จะอยู่ในเซตของ cons หมายความว่า ค่ากระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิง (i_d) เท่ากับ
ค่ากระแสอาร์เมเจอร์ชดเชย ($\hat{i}_d$) ดังนั้นค่าแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้จะมีค่าเท่ากับศูนย์

จากกฎข้อที่ 4 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ posn และค่า error rate อยู่ในเซตของ neg_rate ผล
ที่ได้ คือ ค่า output จะอยู่ในเซตของ cons หมายความว่า ค่ากระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิง (i_d) มากกว่า
ค่ากระแสอาร์เมเจอร์ชดเชย ($\hat{i}_d$) ดังนั้นค่าแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้จะมีค่าเป็นบวก

จากกฎข้อที่ 5 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ $posn$ และค่า error rate อยู่ในเซตของ $zero_rate$ ผลที่ได้ คือ ค่า output จะอยู่ในเซตของ $cons$ หมายความว่า ค่ากระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิง (i_d) มากกว่า ค่ากระแสอาร์เมเจอร์ชดเชย ($\hat{i}_d$) ดังนั้นค่าแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้จะมีค่าเป็นบวก

จากกฎข้อที่ 6 ถ้าค่า error อยู่ในเซตของ $posn$ และค่า error rate อยู่ในเซตของ pos_rate ผลที่ได้ คือ ค่า output จะอยู่ในเซตของ $cons$ หมายความว่า ค่ากระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิง (i_d) มากกว่า ค่ากระแสอาร์เมเจอร์ชดเชย ($\hat{i}_d$) ดังนั้นค่าแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้จะมีค่าเป็นบวก

จากตัวอย่างการออกแบบกฎดังกล่าว สามารถพิจารณาลักษณะสัญญาณการทำงานของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิกได้ดังรูปที่ 3.14 ดังนี้



รูปที่ 3.14 ลักษณะสัญญาณของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอก

จากรูปที่ 3.14 นำเสนอการอธิบายกรณีที่สัญญาณของค่า error มีค่าเป็นศูนย์ และค่า error rate มีค่าประมาณศูนย์ จะได้เอาต์พุตหรือค่าแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้เท่ากับศูนย์ซึ่งเป็นไปตามกฎ ข้อที่ 1 – 3 และถ้ากรณีที่สัญญาณของค่า error มีค่าเป็นบวก และค่า error rate มีค่าประมาณศูนย์ จะได้เอาต์พุตหรือค่าแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้มีค่าเป็นบวก (จะมีค่าตามอัตราส่วนของค่าความผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์) ซึ่งเป็นไปตามกฎ ข้อที่ 4 – 6 ตามลำดับ

การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ

Ross (1995) ได้มีการนิยามความหมายของการอนุมาน คือ การกำหนดส่วนผลลัพธ์ในกฎของฟัซซี โดยใช้หลักการของทฤษฎีเซต การอนุมานฟัซซีมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี คือ (1) แบบแมมดานิ (Mamdani) (2) แบบ TSK (Takagi Sugeno Kang) (3) แบบ Tsukamoto (Ross, 1995) สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเลือกใช้การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ (Mamdani) เนื่องจากระบบสำหรับการควบคุมไม่มีความซับซ้อนทางด้านอินพุตและเอาต์พุต อีกทั้งยังง่ายต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งรายละเอียดของการอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ มีดังนี้

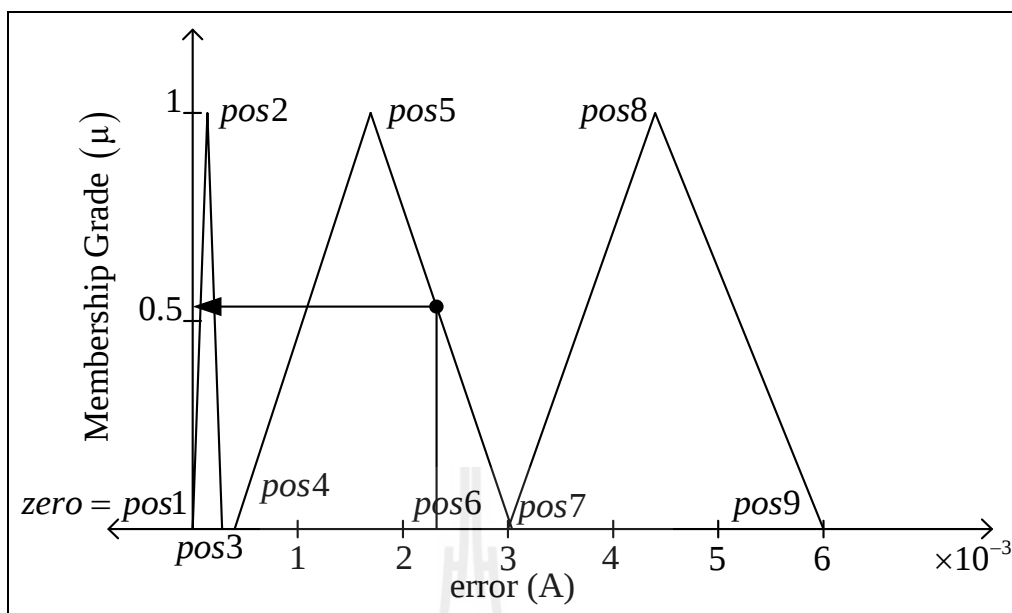
การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ (Mamdani style inference) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยามมากที่สุด ซึ่งวิธีการอนุมานนี้ได้ถูกนำเสนอในปี 1975 โดยศาสตราจารย์ Ebrahim Mamdani ซึ่งใช้ตัวแปรทางภาษาทั้งส่วนเงื่อนไข และส่วนผลลัพธ์ โดยการอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ มี 2 อินพุต คือ x_1 และ x_2 และมีเอาต์พุตค่าเดียว คือ y ซึ่งจะมีรูปแบบตามสมการที่ (3.27) ดังนี้

$$\text{IF } x_1 \text{ is } A_{k1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{k2} \text{ THEN } y \text{ is } B_k \quad \text{เมื่อ } k = 1, 2, \dots, r \quad (3.27)$$

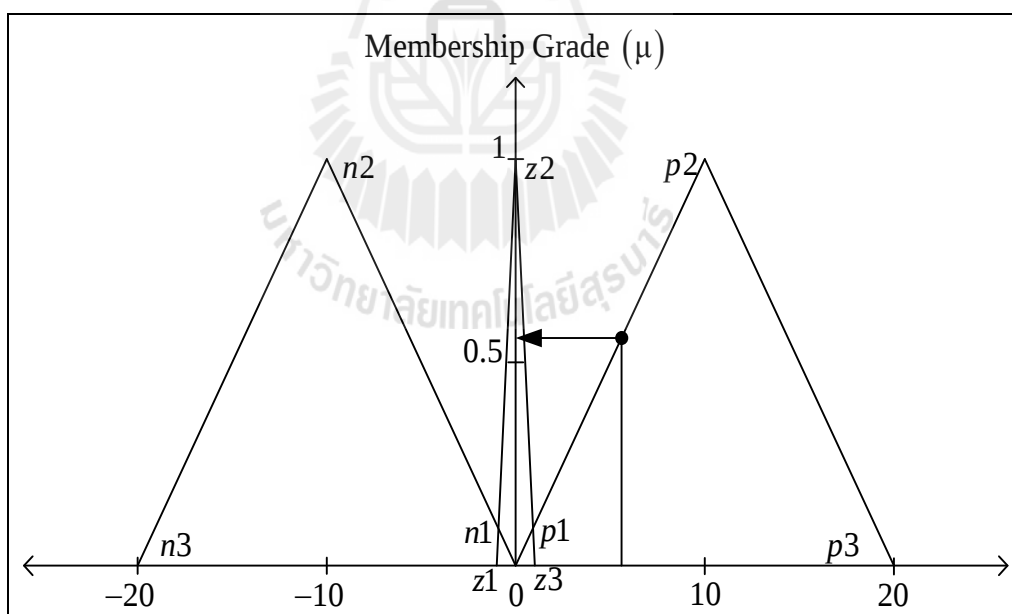
โดยที่ A_{k1} และ A_{k2} คือ จำนวน k ฟัซซีเซตในส่วนเงื่อนไขและ B_k คือ จำนวน k ฟัซซีเซตในส่วนผลลัพธ์ ซึ่งขบวนการอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน คือ การทำฟัซซี การประเมินกฎของฟัซซี การรวมกฎและการทำดีฟัซซี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

การทำฟัซซี (Fuzzification)

การทำฟัซซี คือ การคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตค่าตัวแปรเชิงภาษาของตัวแปรในระบบ ในขั้นตอนแรกของการอนุมานฟัซซีจะต้องทำการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตดังกล่าวของตัวแปรอินพุต ซึ่งค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาสู่ระบบจะอยู่ในรูปของค่าเชิงตัวเลข หลังจากนั้นแล้วค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่านั้น ๆ จะสามารถหาได้จากฟังก์ชันสมาชิก การทำฟัซซีของตัวแปรอินพุตจะขึ้นอยู่กับกฎของฟัซซีด้วยเช่นกัน เนื่องจากสำหรับอินพุตค่าหนึ่ง ๆ จะมีผลต่อกฎของฟัซซีบางข้อเท่านั้น ตัวอย่างเช่นการประมาณค่าแรงบิดภายนอกโดยฟัซซีสำหรับงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.15 ค่าความผิดพลาดกระแสนอร์มเจอร์



รูปที่ 3.16 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดกระแสนอร์มเจอร์

จากรูปที่ 3.15 และ 3.16 สามารถอธิบายได้ คือ ค่าความผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์ “ บวก ” ที่มีค่าตามแกน x ที่เท่ากับ 0.0023 แอมแปร์ จะมีระดับค่าความเป็นสมาชิกอยู่ที่เท่ากับ 0.53 และในทำเดียวกัน อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์เมเจอร์ที่มีค่าตามแกน x ที่เท่ากับ 6 แอมแปร์ต่อวินาที จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.58

การประเมินค่ากฎของฟัซซี (Fuzzy rule evaluation)

หลังจากคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกอินพุตทั้งหมดได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินค่าของตัวแปรที่ได้ในกฎของฟัซซี การประเมินค่ากฎดังกล่าวจะเป็นส่วน IF จุดประสงค์เพื่อทำการประเมินว่าค่าเงื่อนไขจากอินพุตนั้นจะทำให้กฎใดต้องกระทำในส่วน THEN ต่อไป ซึ่งอาจจะมีกฎในเงื่อนไขดังกล่าวมากกว่าหนึ่งกฎพร้อม ๆ กัน เนื่องมาจากระบบมีอินพุตมากกว่าหนึ่งเงื่อนไขของแต่ละอินพุตจะถูกประเมินค่าด้วยตัวกระทำของฟัซซีเซต เช่น AND หรือ OR เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลขที่สามารถนำไปประเมินค่าส่วน THEN ที่ซึ่งภายหลังจะถูกนำไปประเมินเพื่อหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตในขั้นตอนต่อไป พิจารณาตัวกระทำ OR จากทฤษฎีเซตจะได้ว่า

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.28)$$

อย่างไรก็ดี ตัวกระทำ OR สามารถเขียนนิยามได้หลายอย่าง ยกตัวอย่างเช่นตัวกระทำ OR ใน MATLAB Fuzzy Logic Toolbox จะมีการใช้ฟังก์ชัน $\max$ ข้างต้นและฟังก์ชันทางสถิติที่เรียกว่า propor หรือผลรวมเชิงพีชคณิต (algebraic sum) ดังนี้

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{propor}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.29)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (3.30)$$

เช่นเดียวกันกับตัวกระทำ AND ซึ่งใน MATLAB Fuzzy Logic Toolbox จะมีทั้งการใช้ฟังก์ชัน $\min$ และฟังก์ชันผลคูณ prod ดังนี้

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.31)$$

หรือ

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{prod}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.32)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (3.33)$$

การใช้ฟังก์ชันของตัวกระทำของเซตที่แตกต่างกันนั้นอาจจะให้ผลเชิงตัวเลขที่แตกต่างกันได้หลังจากประเมินค่าของแต่ละเงื่อนไขและรวมเงื่อนไขในกรณีที่มีมากกว่าหนึ่งเงื่อนไขในส่วน
ของ IF แล้วผลที่ได้จะถูกนำไปประเมินผลว่ากฎข้อใดที่ต้องพิจารณาในส่วนของ THEN ต่อไป

การรวมกฎ (aggregation)

หลังจากกฎต่างๆถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่าทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาต์พุต

การทำดีฟัซซี (defuzzification)

กระบวนการดีฟัซซีฟิเคชันเป็นกระบวนการแปลงเอาต์พุตแบบฟัซซี คือ ระดับค่าแรงบิดภายนอกที่กระทำกับระบบที่ประมาณได้ตามตารางที่ 3.1 เป็นเอาต์พุตปกติธรรมดา คือ ค่าแรงบิดภายนอกหน่วยเป็นนิวตันเมตร (Nm.) ซึ่งวิธีการดีฟัซซีฟิเคชันมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ วิธีไบเซกเตอร์ (Bisector of Area: BOA) วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (Mean of Maximum: MOM) วิธีหาค่าน้อยสุดของค่าสูงสุด (Smallest of Maximum: SOM) วิธีหาค่ามากที่สุดของค่าสูงสุด (Largest of Maximum: LOM) วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Center of Gravity: COG) สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการทำดีฟัซซีแบบวิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง โดยในแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

- วิธีไบเซกเตอร์ (BOA)

วิธีไบเซกเตอร์เป็นการหาค่าของเอาต์พุตโดยใช้การกำหนดเงื่อนไขของคำตอบไว้ตามสมการที่ (3.34) ดังนี้

$$\mu(z)^* \geq \frac{\sum \mu(z_k)}{2} \quad (3.34)$$

โดยที่ z_k คือ ค่าแต่ละตำแหน่งบนแกน y ของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ได้จากการรวมกฎ
 $\mu(z)^*$ คือ ค่าเงื่อนไขที่ต้องการ

จากสมการที่ (3.34) ผลรวมของค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพของแต่ละ z_k จะถูกนำมา
 หาค่าด้วยค่า 2 จะได้ค่า $\mu(z)^*$ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการตรวจสอบคำตอบที่ต้องการ ซึ่งกระบวนการ
 ทำงานด้วยวิธีนี้สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (3.35)

$$\mu(z_k) = \mu(z_k)^n + \mu(z_k)^{n+1} \quad (3.35)$$

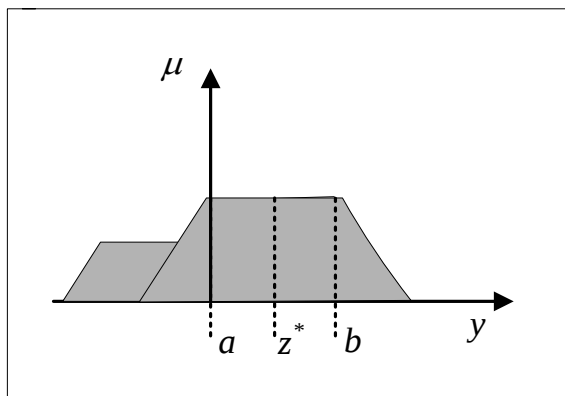
โดยที่ n คือ จำนวนรอบในการตรวจสอบ

จากสมการที่ (3.35) กำหนดให้ $\mu(z_k)^0$ เท่ากับ 0 เมื่อพิจารณาการทำงานที่ $n = 0$ จะทำการ
 ตรวจสอบระดับความเป็นสมาชิกภาพที่ตำแหน่ง z_k ค่าแรก ถ้าค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพไม่
 เท่ากับค่าเงื่อนไขที่ต้องการตามสมการที่ (3.34) จะทำการเพิ่มจำนวนรอบเรื่อย ๆ จนกระทั่ง
 ค่า $\mu(z_k)$ ตรงตามเงื่อนไข จากนั้นค่าที่ตำแหน่ง z_k ดังกล่าว จะเป็นเอาต์พุต z^* ในการดีฟัซซี่ด้วย
 วิธี BOA ตามสมการที่ (3.36)

$$z^* = z_k \quad (3.36)$$

- วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (MOM)

วิธีนี้เป็นการหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดของความเป็นสมาชิกภาพ สามารถพิจารณาได้จาก
 รูปที่ 3.17 ดังนี้



รูปที่ 3.17 วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด

จากรูปที่ 3.17 ค่า a คือค่าตามแนวแกน y ที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพสูงสุดค่าแรก และ b คือค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพสูงสุดค่าสุดท้าย และเอาต์พุต คือ z^* ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.37) ดังนี้

$$z^* = \frac{a+b}{2} \quad (3.37)$$

จากสมการที่ (3.37) เอาต์พุต z^* ของวิธี MOM จะคำนวณได้จากผลรวมของค่า a กับค่า b หารด้วย 2

- วิธีหาค่าน้อยสุดของค่าสูงสุด (SOM)

วิธีนี้เป็นการหาค่าน้อยสุดของค่ารากที่ตำแหน่ง z_k ต่าง ๆ ที่มีค่าความเป็นสมาชิกภาพสูงสุด ซึ่งเอาต์พุต z^* พิจารณาได้จากสมการที่ (3.38) ดังนี้

$$z^* = \inf \{ |z_k| \mid \mu(z_k) = hgt(c_k) \} \quad (3.38)$$

โดยที่ c_k คือ ฟัซซีเซตที่พิจารณาที่ตำแหน่ง k ต่าง ๆ

$hgt(c_k) = \sup \mu_c(z)$ คือ ค่ามากที่สุดในการยูเนียนของฟัซซีเซต c

จากสมการที่ (3.38) เอาต์พุต z^* จะพิจารณาได้จากค่าสัมบูรณ์ของ z_k ที่น้อยที่สุดของระดับความเป็นสมาชิกภาพที่มีค่ามากสุดในการยูเนียนของฟัซซีเซต c โดยค่า z ณ ตำแหน่งที่ค่าสัมบูรณ์ของ z_k มีค่าน้อยที่สุดจะเป็นคำตอบของวิธี SOM

- วิธีหาค่ามากสุดของค่าสูงสุด (LOM)

วิธีนี้เป็นการหาค่ามากสุดของค่ารากที่ตำแหน่ง z_k ต่าง ๆ ที่มีค่าความเป็นสมาชิกภาพสูงสุด ซึ่งเอาต์พุต z^* พิจารณาได้จากสมการที่ (3.39) ดังนี้

$$z^* = \sup\{ |z_k| \mid \mu(z_k) = \text{hgt}(c_k) \} \quad (3.39)$$

จากสมการที่ (3.39) เอาต์พุต z^* จะพิจารณาได้จากค่าสัมบูรณ์ของ z_k ที่มากที่สุดของระดับความเป็นสมาชิกภาพที่มีค่ามากสุดในการยูเนียนของฟัซซีเซต c โดยค่า z ณ ตำแหน่งที่ค่าสัมบูรณ์ของ z_k มีค่ามากที่สุดจะเป็นคำตอบของวิธี LOM

- วิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (COG)

วิธีการนี้เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยค่า COG ของฟัซซีเซต A ในช่วง $[a,b]$ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

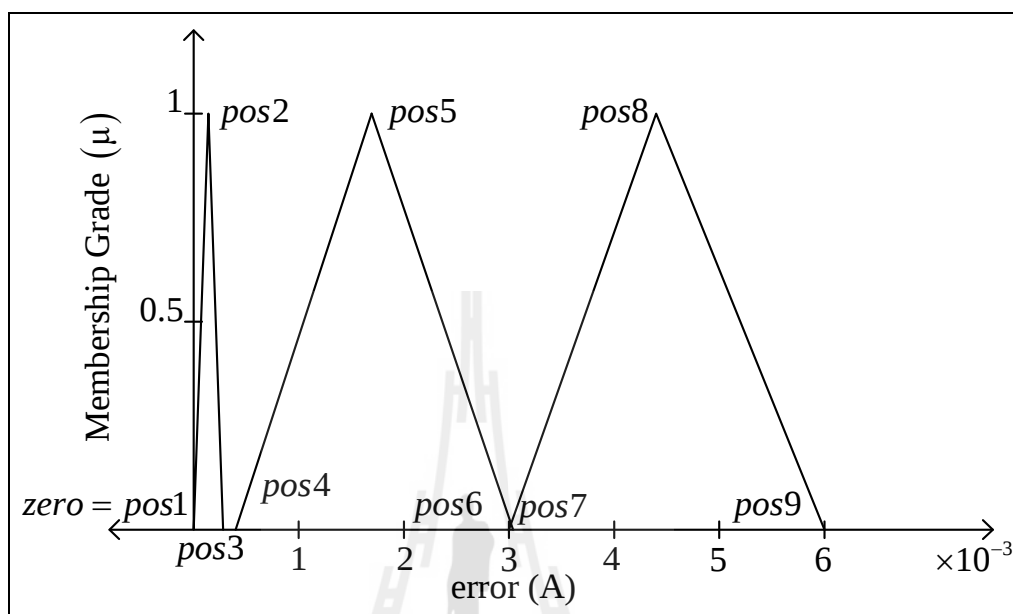
$$\text{COG} = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (3.40)$$

3.4.2 การออกแบบตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิด

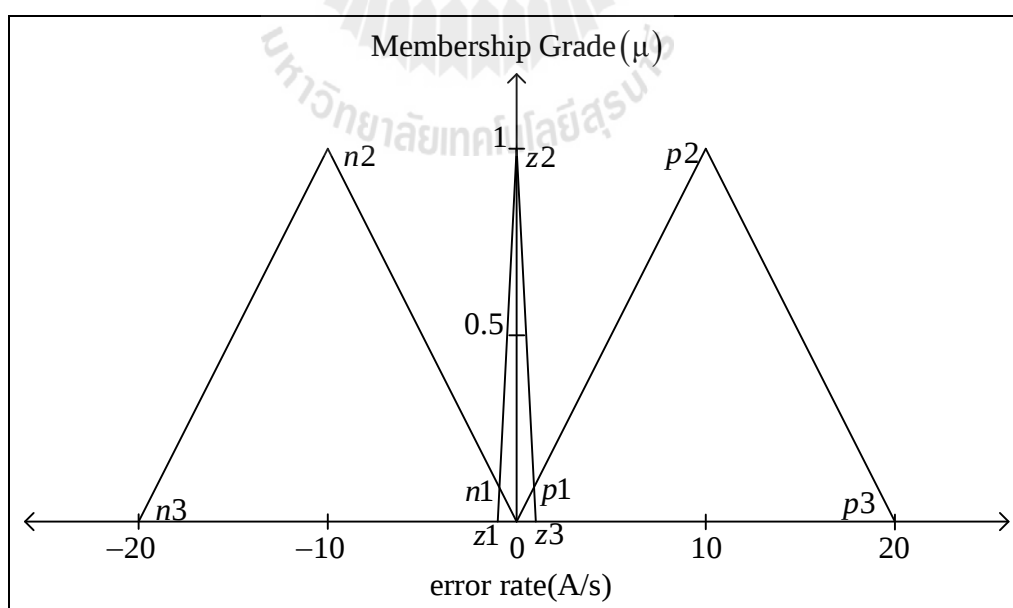
ภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การออกแบบระบบฟัซซีลอจิกสำหรับการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในเบื้องต้นได้เลือกใช้การอนุมานแบบแมกดานิที่ใช้ค่าสูงสุด - ต่ำสุด และการดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธีค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (MEAN OF MAXIMUM: MOM) โดยในขั้นแรกจะทำการออกแบบรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่ใช้สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

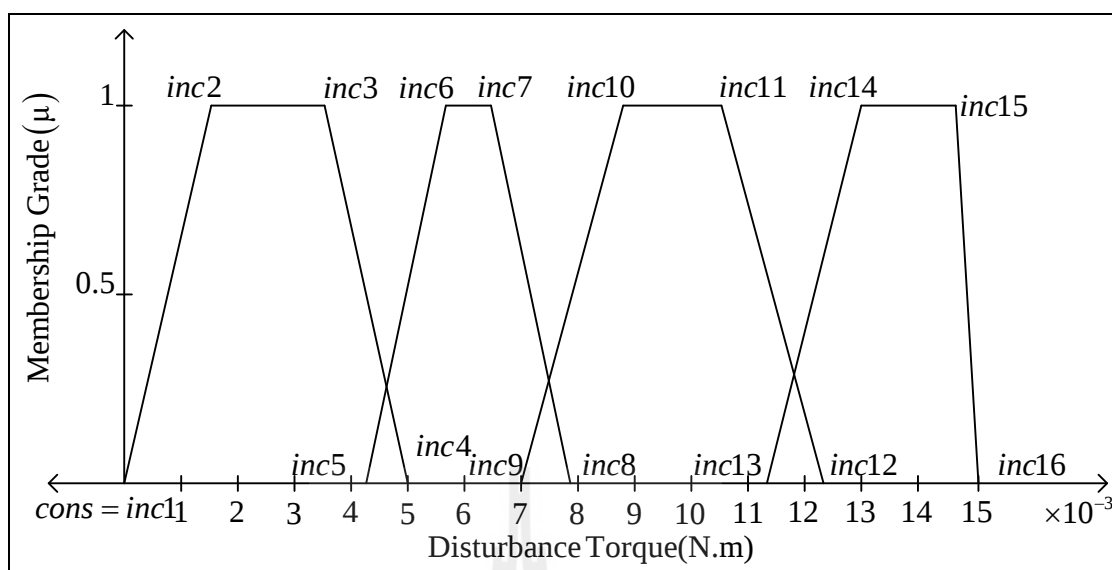
โดยรูปร่างฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพจะขึ้นกับค่าของอินพุตและเอาต์พุตของระบบ ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ทั้งหมด 36 พารามิเตอร์ ดังรูปที่ 3.18, 3.19 และ 3.20 ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาดกระแสอินพุต



รูปที่ 3.19 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอัตราค่าความผิดพลาดกระแสอินพุต



รูปที่ 3.20 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเอาต์พุต

จากรูปที่ 3.18, 3.19 และ 3.20 แสดงฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุตและเอาต์พุต จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ต้องทำการออกแบบอยู่จำนวนทั้งหมด 36 พารามิเตอร์ ได้แก่

$n1, n2, n3, p1, p2, p3, z1, z2, z3$ คือ อัตราค่าความผิดพลาดของกระแสอาร์เมเจอร์ในแต่ละตำแหน่งที่ได้จากการทดลองเพื่อนำไปออกแบบระบบฟัซซี่ลอจิก

$pos1, pos2, pos3, pos4, pos5, pos6, pos7, pos8, pos9, zero$ คือ ค่าความผิดพลาดของกระแสอาร์เมเจอร์ในแต่ละตำแหน่งที่ได้จากการทดลองเพื่อนำไปออกแบบระบบฟัซซี่ลอจิก

$cons, inc1, inc2, inc3, inc4, inc5, inc6, inc7, inc8, inc9, inc10, inc11, inc12, inc13, inc14, inc15, inc16$ คือ ค่าเอาต์พุตหรือค่าแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้ในแต่ละตำแหน่งจากการทดลองเพื่อนำไปออกแบบระบบฟัซซี่ลอจิก

โดยในเบื้องต้นจะทำการสุ่มค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวในกรณีต่าง ๆ ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก จำนวนหลายครั้งจนกระทั่งได้ชุดข้อมูลที่ดีที่สุด เพื่อนำมาทดสอบด้วยการจำลองสถานการณ์ ซึ่งการทดสอบประกอบด้วยฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาดกระแส แอ์การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดกระแสและค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเอาต์พุต โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้แสดงไว้ตามตารางที่ 3.2, 3.3 และตารางที่ 3.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของค่าความผิดพลาดกระแสนินพุต

Error									
Zero	Positive								
<i>zero</i>	<i>pos1</i>	<i>pos2</i>	<i>pos3</i>	<i>pos4</i>	<i>pos5</i>	<i>pos6</i>	<i>pos7</i>	<i>pos8</i>	<i>pos9</i>
0	0	0.00006	0.00012	0.00017	0.00169	0.00304	0.00302	0.00440	0.00600

ตารางที่ 3.3 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดกระแสนินพุต

Error Rate								
Negative Rate			Zero Rate			Positive Rate		
<i>n1</i>	<i>n2</i>	<i>n3</i>	<i>z1</i>	<i>z2</i>	<i>z3</i>	<i>p1</i>	<i>p2</i>	<i>p3</i>
0.000	-10.000	-20.000	-0.528	0.000	0.528	0.000	10.000	20.000

ตารางที่ 3.4 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเอาต์พุต

Output				
Constant	Increase			
<i>cons</i>	<i>inc1</i>	<i>inc2</i>	<i>inc3</i>	<i>inc4</i>
0.00000	0.00000	0.00150	0.00352	0.00500
<i>cons</i>	<i>inc5</i>	<i>inc6</i>	<i>inc7</i>	<i>inc8</i>
0.00000	0.00421	0.00566	0.00643	0.00748
<i>cons</i>	<i>inc9</i>	<i>inc10</i>	<i>inc11</i>	<i>inc12</i>
0.00000	0.00706	0.00882	0.01050	0.01233
<i>cons</i>	<i>inc13</i>	<i>inc14</i>	<i>inc15</i>	<i>inc16</i>
0.00000	0.01134	0.01260	0.01410	0.01500

จากข้อมูลทั้งหมดของตารางที่ 3.2, 3.3 และตารางที่ 3.4 ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพดังกล่าว จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงสำหรับระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในหัวข้อถัดไป

บทที่ 4

ผลการจำลองสถานการณ์

ในบทนี้เป็นการแสดงผลการจำลองการควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ตัวสังเกตร่วมกับการชดเชยแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้สำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขับเคลื่อนอัตโนมัติในกระบวนการขับเคลื่อน เนื่องจากกระบวนการขับเคลื่อนจะต้องควบคุมผลการตอบสนองของแรงบิดของเครื่องขับเคลื่อนอัตโนมัติให้มีความถูกต้องแม่นยำตามลักษณะของอินพุตอ้างอิงของระบบปิด ซึ่งในกระบวนการขับเคลื่อนนั้นลักษณะผลการตอบสนองของแรงบิดอ้างอิงที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปแบบฟังก์ชันขั้นบันได (Step input) รวมกับรูปแบบฟังก์ชันลาดเอียง (Ramp input) ดังนั้นในบทนี้จะขอแสดงผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ตัวสังเกตร่วมกับการชดเชยแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้สำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขับเคลื่อนอัตโนมัติในกระบวนการขับเคลื่อน ซึ่งจะขอก้าวถึงระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแทนระบบควบคุมแรงบิดของเครื่องขับเคลื่อนอัตโนมัติ เนื่องจากเครื่องขับเคลื่อนอัตโนมัติมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นส่วนประกอบหลักตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ผ่านมา โดยระบบจะแบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณี ตามลักษณะของอินพุตที่กระทำต่อระบบ คือ อินพุตแบบขั้นบันได (Step input) และอินพุตแบบลาดเอียง (Ramp input) โดยแต่ละอินพุตจะมีแรงบิดภายนอก ($T_L(t)$) ที่รบกวนกับระบบในแต่ละลักษณะ โดยแบ่งกรณีต่างๆดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ระบบควบคุมแรงบิดเป็นแบบขั้นบันได (Step Function)

กรณีที่ 1.1 ระบบมีค่า $T_L(t) = 0$

กรณีที่ 1.2 ระบบมีค่า $T_L(t)$ เปลี่ยนแปลงหนึ่งสเต็ปเป็นแบบขั้นบันได

(One-Step Function)

กรณีที่ 1.3 ระบบมีค่า $T_L(t)$ เปลี่ยนแปลงสองสเต็ปเป็นแบบขั้นบันได

(Two-Step Function)

กรณีที่ 1.4 ระบบมีค่า $T_L(t)$ เปลี่ยนแปลงหนึ่งสเต็ปเป็นแบบขั้นบันได

(One-Step Function) แล้วเอาค่า $T_L(t)$ ออกในขณะที่ระบบยังทำงานต่อ

กรณีที่ 2 ระบบควบคุมแรงบิดเป็นแบบลาดเอียง (Ramp Function)

กรณีที่ 2.1 ระบบมีค่า $T_L(t) = 0$

กรณี ที่ 2.2 ระบบมีค่า $T_L(t)$ เปลี่ยนแปลงหนึ่งสเต็ปเป็นแบบขั้นบันได
(One-Step Function)

กรณี ที่ 2.3 ระบบมีค่า $T_L(t)$ เปลี่ยนแปลงสองสเต็ปเป็นแบบขั้นบันได
(Two-Step Function)

กรณี ที่ 2.4 ระบบมีค่า $T_L(t)$ เปลี่ยนแปลงหนึ่งสเต็ปเป็นแบบขั้นบันได
(One-Step Function) แล้วเอาค่า $T_L(t)$ ออกในขณะที่ยังทำงานต่อ

4.1 การกำหนดตัวแปรต่างๆของระบบก่อนการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุม แรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ของระบบถือเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการจำลองสถานการณ์ ควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยส่วนใหญ่ตัวแปรที่ใช้จะมาจากการระบุ เอกลักษณ์ จากคู่มือทดลอง Precision Modular Servo และบางส่วนมาจากการออกแบบระบบ โดยที่ การออกแบบระบบจะประกอบไปด้วยระบบย่อย ๆ ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ดังนั้น จะได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของระบบ คือ

$$\begin{aligned} I &= 9.6664 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{rad}, K_t = 0.07 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{A} \\ K_e &= 0.0656 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{rad}, b = 3.4193 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad} \\ R_a &= 0.8311 \Omega, L_a = 1 \times 10^{-3} \text{ H}, K_{add} = 91.68 \\ L_1 &= -6.232 \times 10^{-5}, L_2 = 5.41 \times 10^{-3}, L_3 = 403.517 \end{aligned}$$

เมื่อ	I	=	โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
	K_t	=	ค่าคงที่ของแรงบิด ($\text{N} \cdot \text{m} / \text{A}$)
	K_e	=	ค่าคงที่ของ Electromotive Force ($\text{V} \cdot \text{s} / \text{rad}$)
	K_{add}	=	อัตราขยายของแอมพลิไฟเออร์
	b	=	ความหน่วง ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$)
	R_a	=	ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)
	L_a	=	ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)
	L_1	=	อัตราขยายตัวสังเกตตัวที่หนึ่ง
	L_2	=	อัตราขยายตัวสังเกตตัวที่สอง
	L_3	=	อัตราขยายตัวสังเกตตัวที่สาม

4.1.1 การกำหนดตัวแปรของระบบควบคุมก่อนการจำลองสถานการณ์
ระบบควบคุมแรงบิดพัลส์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ที่ได้จากการออกแบบตัวสังเกต

สมการระบบควบคุมแรงบิดพัลส์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_a \\ i_a \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -K_{add} & 0 \\ \frac{1}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} \\ 0 & \frac{K_t}{I} & -\frac{b}{I} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_a \\ i_a \\ \omega \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{add} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-1}{I} \end{bmatrix} \cdot T_L$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} V_a \\ i_a \\ \omega \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

สมการของตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{i}_a \\ \hat{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -K_{add} & 0 \\ \frac{1}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} \\ 0 & \frac{K_t}{I} & -\frac{b}{I} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{i}_a \\ \hat{\omega} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{add} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-1}{I} \end{bmatrix} \cdot T_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} [e_1 + e_2]$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{i}_a \\ \hat{\omega} \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

พิจารณาแบบจำลองระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space Form ในกรณีที่ไม่มีแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบเพื่อออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม พิจารณา

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะได้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_a \\ i_a \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -K_{add} & 0 \\ \frac{1}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} \\ 0 & \frac{K_t}{I} & -\frac{b}{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{add} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U(t)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ i_a \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

จะได้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_a \\ i_a \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -91.68 & 0 \\ 1000 & -831.1 & -65.707 \\ 0 & 5.91 \times 10^8 & -2.89 \times 10^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 91.68 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U(t)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ i_a \\ \omega \end{bmatrix}$$

การออกแบบตัวสังเกตสำหรับประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบใด ๆ ต้องพิจารณาคุณสมบัติในการสังเกตได้ของระบบ และคุณสมบัติในการควบคุมเพื่อจะได้ค่าตัวแปรสเตตในการออกแบบระบบควบคุมต่อไป

พิจารณาคูณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบ

$$P_c = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 91.68 & 0 & -8.41 \times 10^6 \\ 0 & 91680.0 & -7.62 \times 10^7 \\ 0 & 0 & 5.42 \times 10^{13} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\det(P_c) = 4.5525 \times 10^{20} \neq 0$$

ระบบมีคุณสมบัติในการควบคุมได้

พิจารณาคูณสมบัตินี้ความสังเกตได้ของระบบ

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1000 & 5.91 \times 10^8 & -2.89 \times 10^6 \\ 5.91 \times 10^{11} & -1.71 \times 10^{15} & 8.29 \times 10^{12} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\det(P_o) = -3.5243 \times 10^{20} \neq 0$$

ระบบมีคุณสมบัติในการสังเกตได้

การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต พิจารณา

$$\det(\lambda I - (A - LC)) \quad (4.6)$$

จาก Matrix L จะกำหนดได้ดังนี้

$$L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

พิจารณา

$$\det(\lambda I - (A - LC)) = \det \left\{ \begin{bmatrix} \lambda & L_1 + 91.68 & L_1 \\ -1000 & \lambda + L_2 + 831.1 & L_2 + 65.707 \\ 0 & L_3 - (5.91 \times 10^8) & \lambda + L_3 + (2.886 \times 10^6) \end{bmatrix} \right\}$$

ค่าอัตราขยายของตัวสังเกต คือ $L = \begin{bmatrix} -6.232 \times 10^{-5} \\ 5.41 \times 10^{-3} \\ 403.517 \end{bmatrix}$

พิจารณา

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly$$

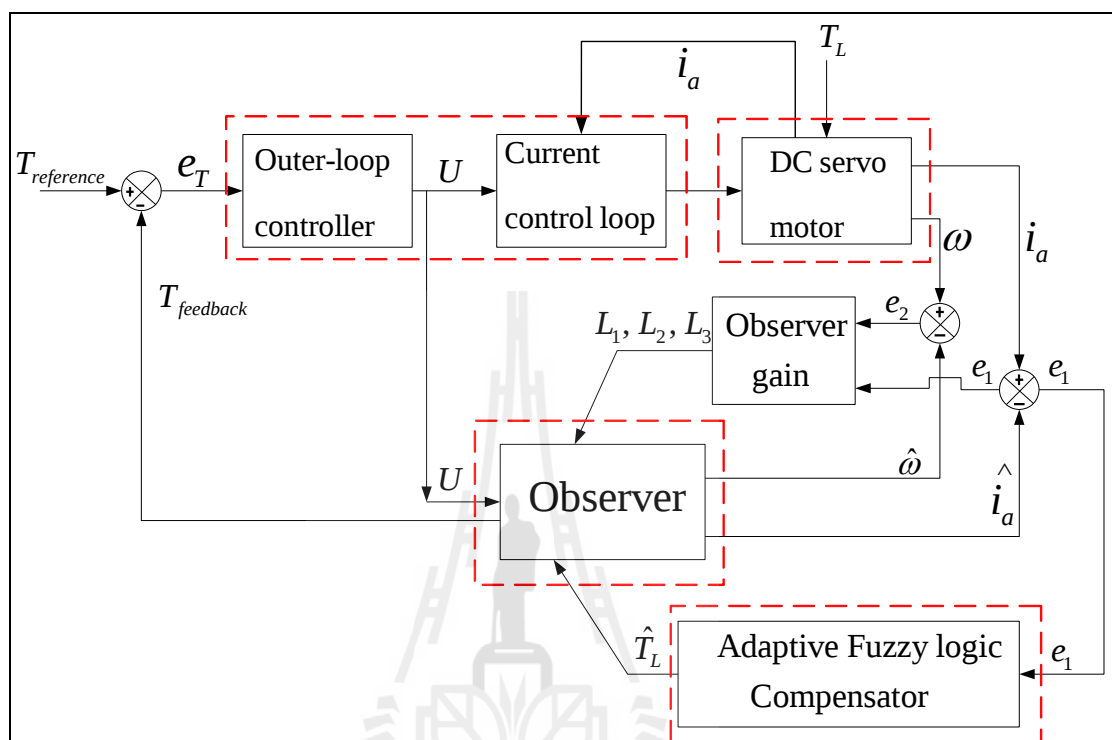
จะได้สมการของตัวสังเกต คือ

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_a \\ i_a \\ \omega \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -91.68 & 0 \\ 1000 & -831.1 & -65.707 \\ 0 & 5.91 \times 10^8 & -2.89 \times 10^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 91.68 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U(t) \\ &+ \begin{bmatrix} -6.232 \times 10^{-5} \\ 5.41 \times 10^{-3} \\ 403.517 \end{bmatrix} [e_1 + e_2] \end{aligned}$$

เมื่อ L คือ ค่าเมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต และ $e_1 + e_2$ คือ ค่าความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์รวมกับความเร็วของระบบจริงและตัวสังเกต การตอบสนองของตัวสังเกตเป็นผลมาจากการเลือกค่าโพลของตัวสังเกตในการออกแบบอย่างเหมาะสม

การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดพัลส์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้โปรแกรมในการจำลอง คือ โปรแกรม MATLAB เนื่องจากโปรแกรมนี้ง่ายต่อการจำลองระบบ ในส่วนของโปรแกรมก็จะประกอบไปด้วยระบบย่อย ๆ อีกหลายระบบตามที่ได้กล่าว

ไว้ในบทที่ 3 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ก็จะแบ่งตามลักษณะของอินพุตที่กระทำกับระบบ และแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบตามกรณี que แบ่งไว้ข้างต้น



รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

4.2 การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลิฟท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1

พิจารณาการทำงานของระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1 คือ สัญญาณอินพุตที่กระทำกับระบบเป็นลักษณะแบบขั้นบันได (Step input) โดยการแบ่งกรณีสำหรับอินพุตแบบขั้นบันไดก็จะถูกแบ่งตามลักษณะของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลง ($T_L(t)$) ที่รบกวนกับระบบ การรบกวนของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลต่อการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ตัวสังเกต คือ ค่าความต่างศักย์อาร์เมเจอร์ ค่ากระแสอาร์เมเจอร์และค่าความเร็วรอบ เนื่องจากความแตกต่างที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของตัวสังเกตและระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยในการจำลองสถานการณ์ระบบนี้เราจะสมมุติว่าเราทราบค่าของตัวแปรทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และสามารถวัดค่า

กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์และค่าความเร็วของระบบได้ เพื่อให้การประมาณค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตมีประสิทธิภาพมากขึ้น และกำหนดว่าตัวแปรทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ ในขณะที่มีค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบ ซึ่งผลที่ได้นี้จะทำให้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของระบบได้ตามกรณีต่าง ๆ ที่แบ่งไว้ข้างต้น และเมื่อخذเซชค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงนี้ให้กับระบบของตัวสังเกตจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง

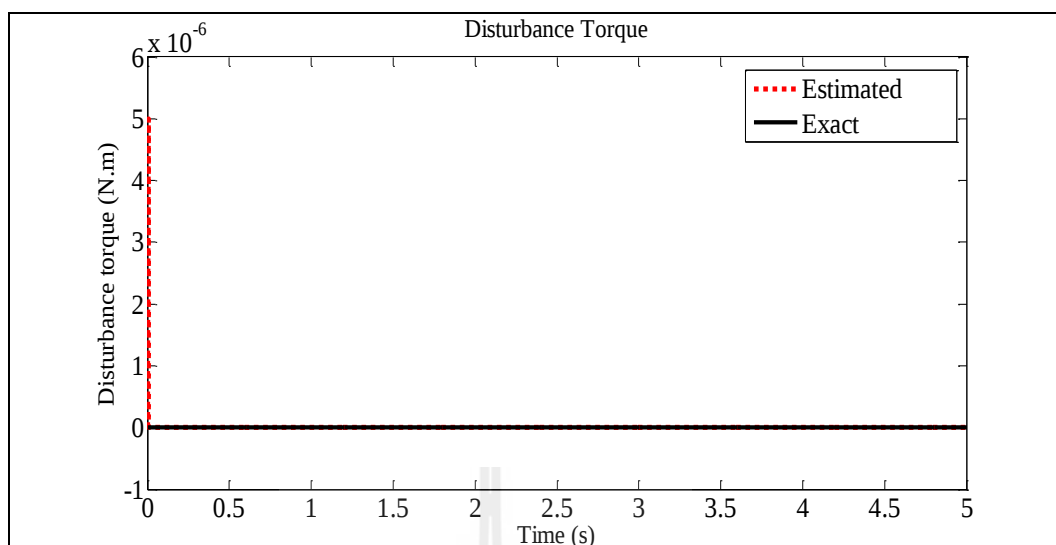
สำหรับกรณีที่ 1 ระบบควบคุมแรงบิดเป็นแบบขั้นบันได (Step input) กล่าวคือ การควบคุมในลักษณะอินพุตแบบขั้นบันได (Step input) จะอ้างอิงค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ในการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัฟท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับกรณีนี้เราจะอ้างอิงอินพุตที่ 0.025 นิวตันเมตร และจะแบ่งออกเป็นกรณีย่อย ๆ โดยพิจารณาจากแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่เข้ามารบกวนกับระบบได้ดังนี้

4.2.1 การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัฟท์ของ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ลอจิกแบบปรับตัวได้

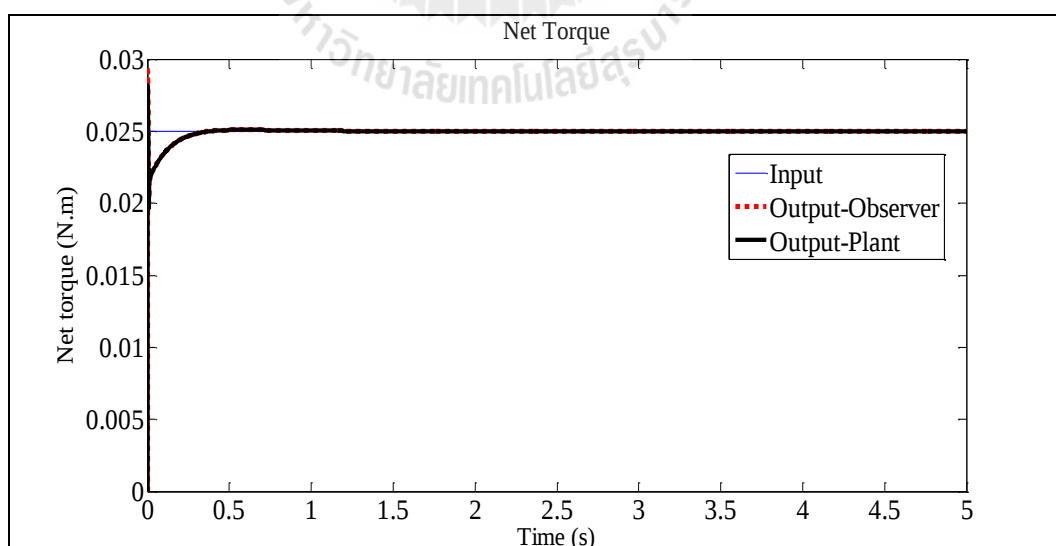
สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.1

ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัฟท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1.1 เมื่อไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบและตัวชดเชยฟลักซ์ลอจิกแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบที่มีค่าเท่ากับศูนย์และชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าของตัวแปรสเตตมีความถูกต้องและทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัฟท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5



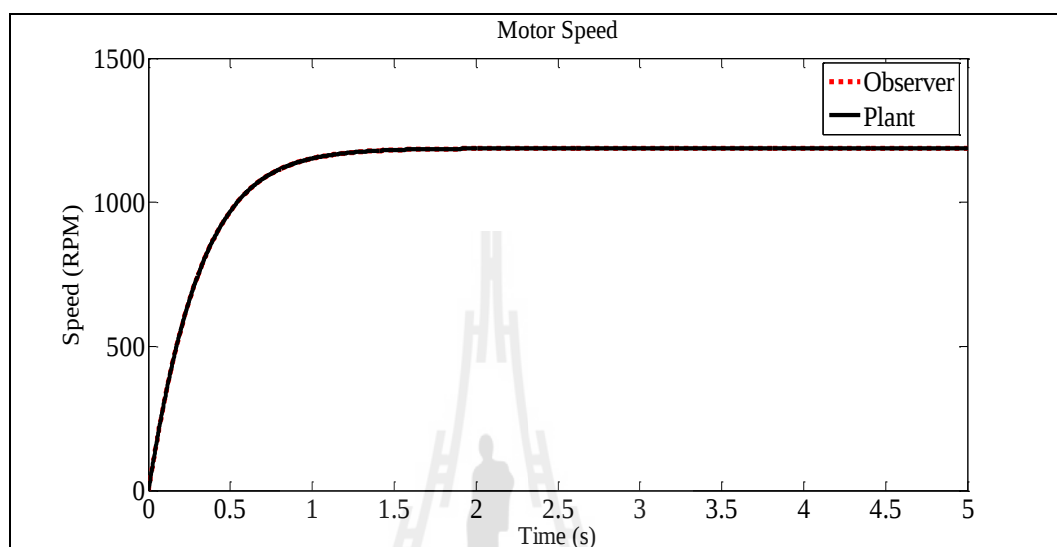
รูปที่ 4.2 ผลการตอบสนองของ $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1.1

จากรูปที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกจริงและค่าแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการพีชชิลอจิกแบบปรับตัวได้และทำการชดเชยให้กับตัวสังเกตในสถานะไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ แสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยพีชชิลอจิกแบบปรับตัวได้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

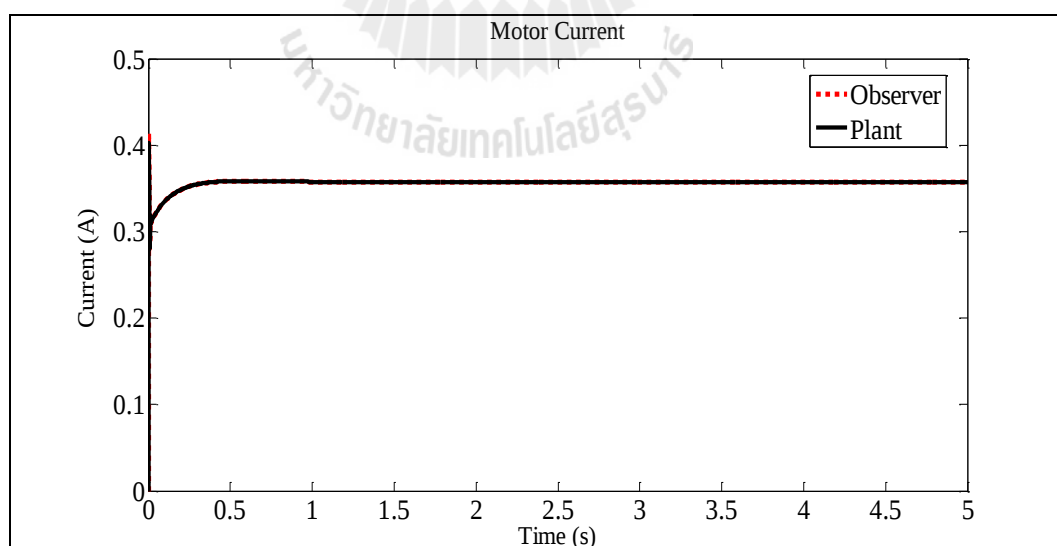


รูปที่ 4.3 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.1

จากรูปที่ 4.3 ผลการตอบสนองของแรงบิดพัลส์ของระบบและตัวสังเกตทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามอินพุตของระบบ เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.4 วินาที



รูปที่ 4.4 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.1



รูปที่ 4.5 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์มเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.1

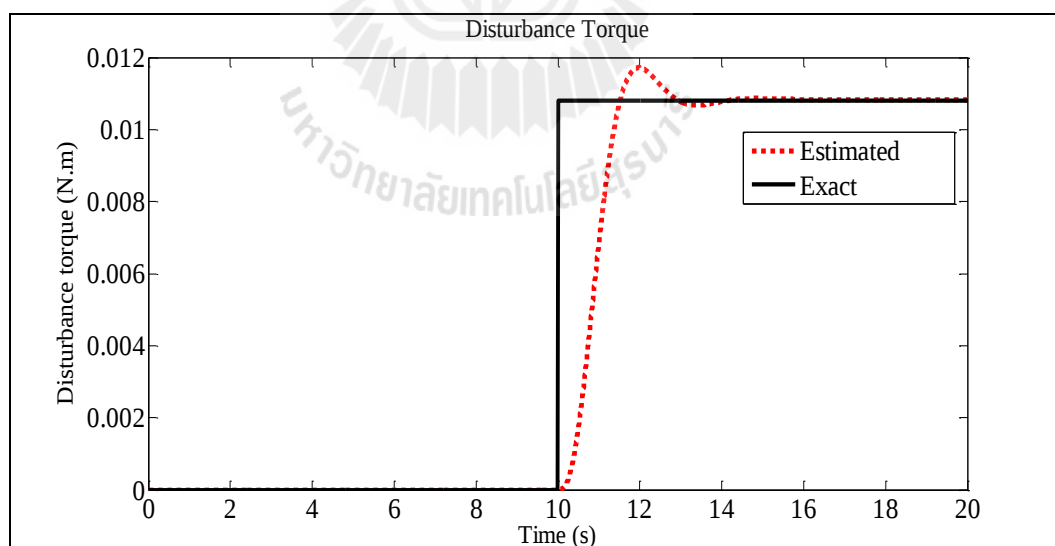
จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้องในสถานะที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ

4.2.2 การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้

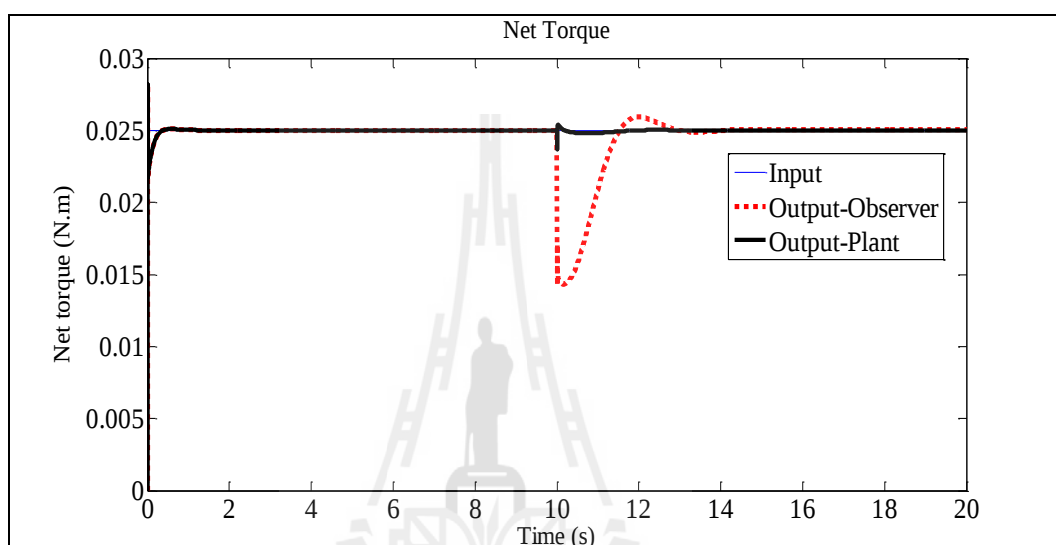
สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.2

ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1.2 ลักษณะแรงบิดที่รบกวนกับระบบจะเป็นแบบขั้นบันได (Step function) มีค่าคงที่ประมาณ 0.01 นิวตันเมตร จะเริ่มรบกวนกับระบบตั้งแต่วินาทีที่ 10 จนจบการทำงานของระบบ จะเห็นว่าเมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบและชดเชยให้กับตัวสังเกต การประมาณค่าของตัวแปรสแตตจะมีความถูกต้องและทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัพท์มีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9



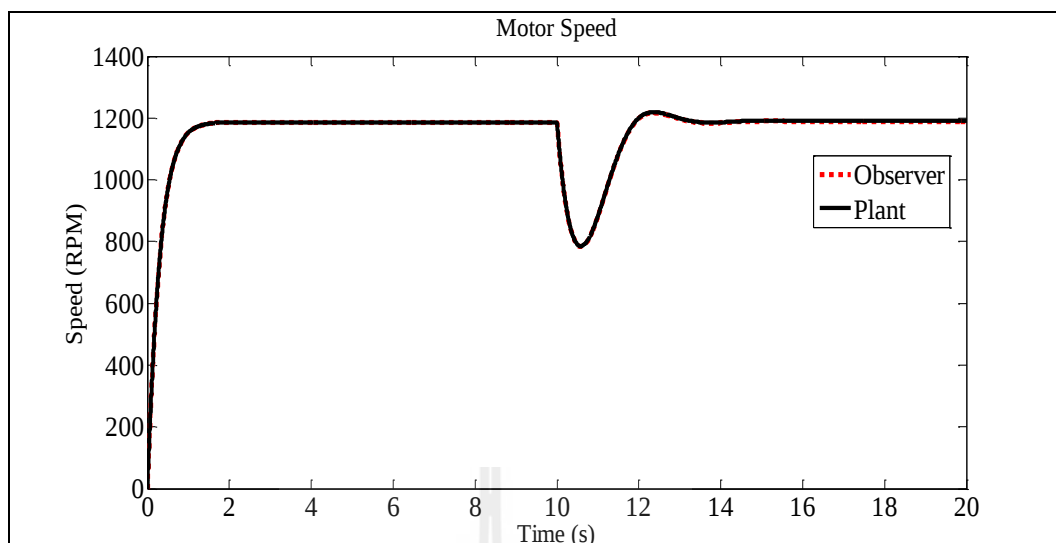
รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองของ $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1.2

จากรูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกจริงและแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้และทำการชดเชยให้กับตัวสังเกตในสภาวะมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้จะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกประมาณ 3.5 วินาที และช่วงผลการตอบสนองชั่วคราวจะเกิดค่าพุ่งเกิน

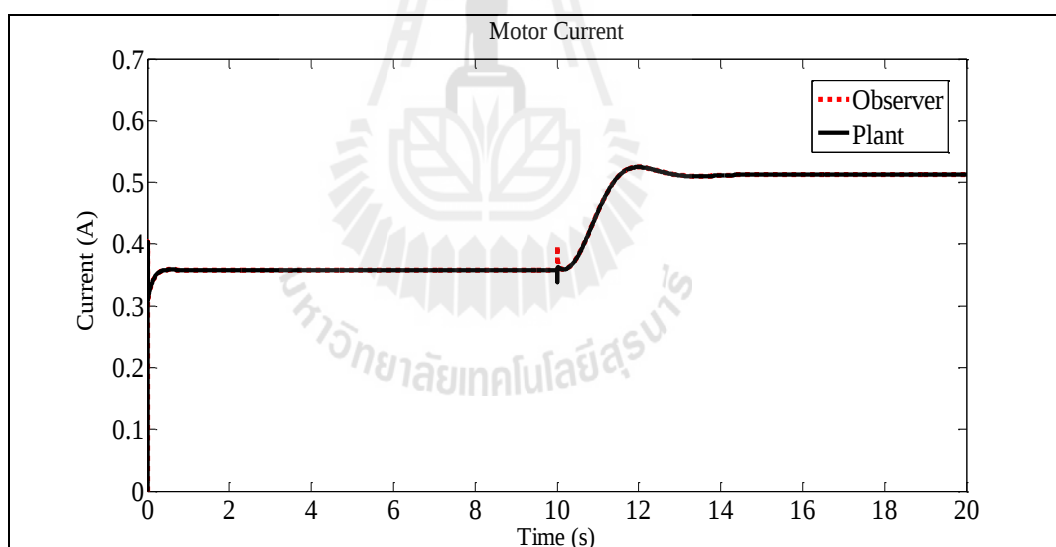


รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.2

จากรูป 4.7 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตจะลดลง ซึ่งแรงบิดลัพธ์ที่ประมาณได้จากตัวสังเกตจะลดลงมากกว่าและเห็นได้ชัดเจน แต่เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ที่ประมาณจากตัวสังเกตและระบบก็จะมีค่าถูกต้อง



รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.2



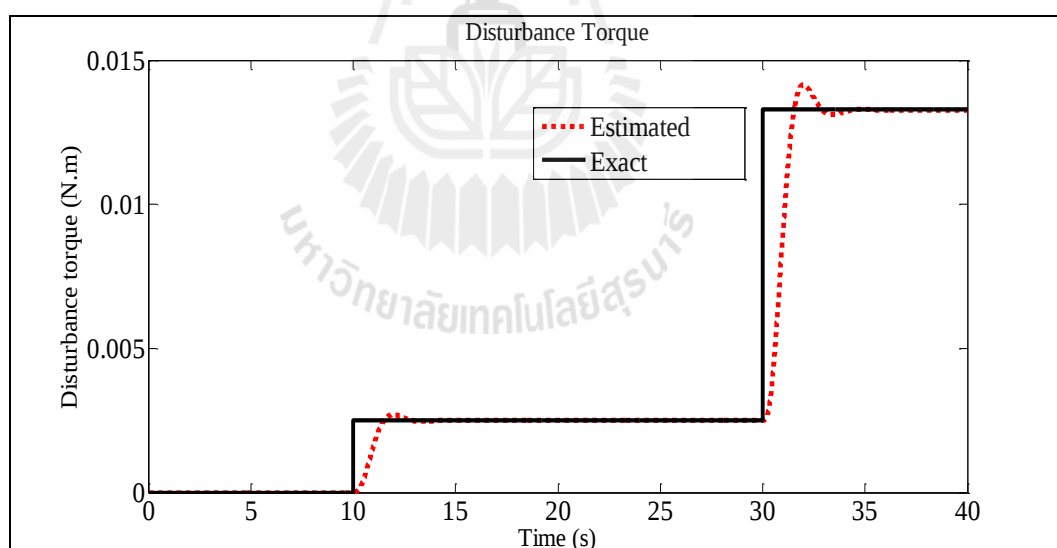
รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.2

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ในสภาวะมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ

จะเห็นว่าผลการตอบสนองกระแสอาร์เมเจอร์จะมีการปรับตัวเพิ่มขึ้นในสภาวะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ เพื่อรักษาแรงบิดพัทธ์ให้ได้ตามอินพุตของระบบ

4.2.3 การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดพัทธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.3

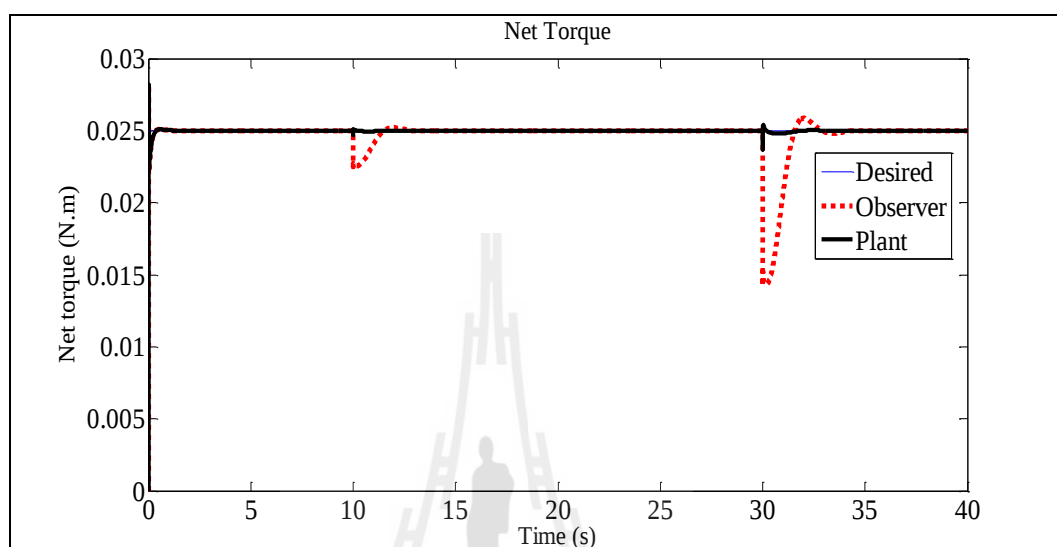
ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมแรงบิดพัทธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1.3 ระบบถูกแรงบิดภายนอกกรบกวนเป็นแบบขั้นบันได (Step function) โดยมีค่าคงที่ที่ไม่เท่ากัน โดยค่าแรงบิดภายนอกค่าแรกจะใส่เข้าไปในระบบที่วินาทีที่ 10 และค่าแรงบิดภายนอกค่าที่สองจะใส่เข้าไปในวินาทีที่ 30 ตามลำดับ เมื่อตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบและชดเชยให้กับตัวสังเกต การประมาณค่าของตัวแปรสเตรตจะมีความถูกต้องและทำให้ระบบควบคุมแรงบิดพัทธ์มีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.10, 4.11, 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองของ $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1.3

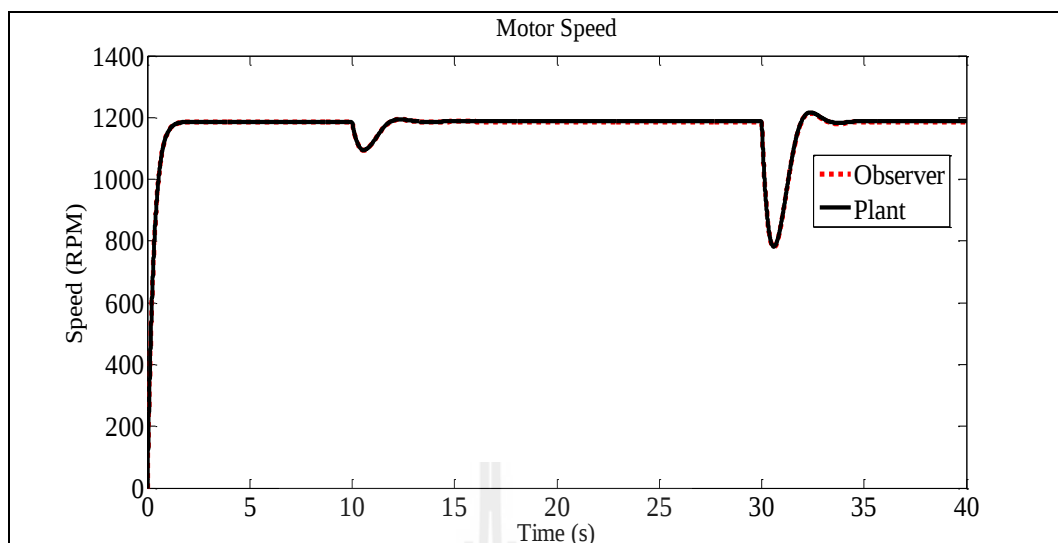
จากรูปที่ 4.10 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกจริงและแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณ โดยใช้วิธีการฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้และทำการชดเชยให้กับตัวสังเกตในสภาวะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ สำหรับกรณีที่แรงบิดภายนอกมีค่าคงที่

ที่ไม่เท่ากัน จะเห็นว่าตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้จะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกประมาณ 3 วินาที และช่วงผลการตอบสนองชั่วคราวจะเกิดค่าพุ่งเกินทั้งสองค่าแรงบิดภายนอกที่เข้ามารบกวนกับระบบ

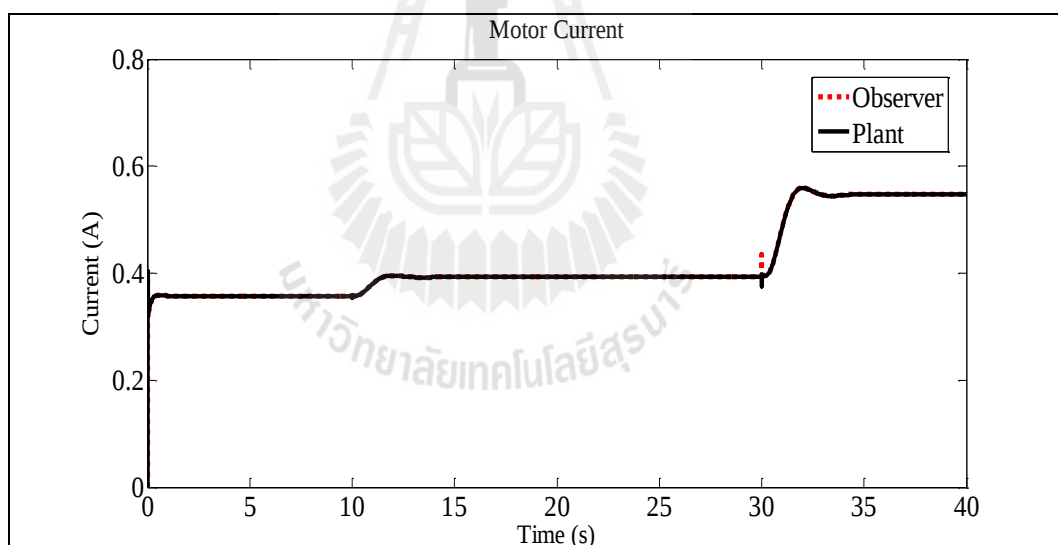


รูปที่ 4.11 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.3

จากรูป 4.11 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตจะลดลง โดยเฉพาะตัวสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน และเมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ที่ประมาณจากตัวสังเกตและระบบก็จะมีค่าคลาดเคลื่อน



รูปที่ 4.12 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.3



รูปที่ 4.13 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.3

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เมื่อตัวชดเชยฟัซซี่ลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับ

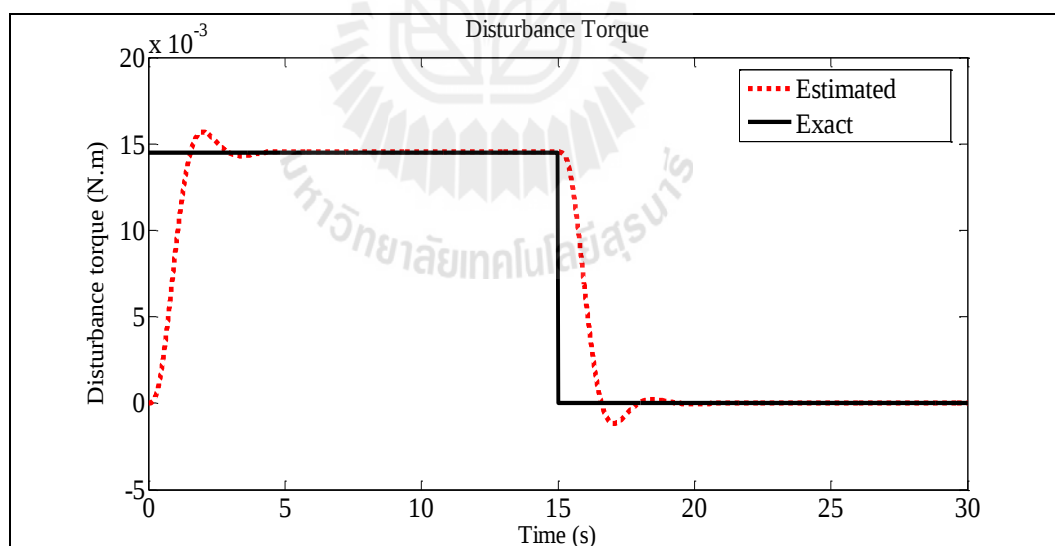
ระบบ จะเห็นว่าผลการตอบสนองกระแสอาร์เมเจอร์จะมีการปรับตัวเพิ่มขึ้นในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ เพื่อรักษาแรงบิดลัพท์ให้ได้ตามอินพุตของระบบ

4.2.4 การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้

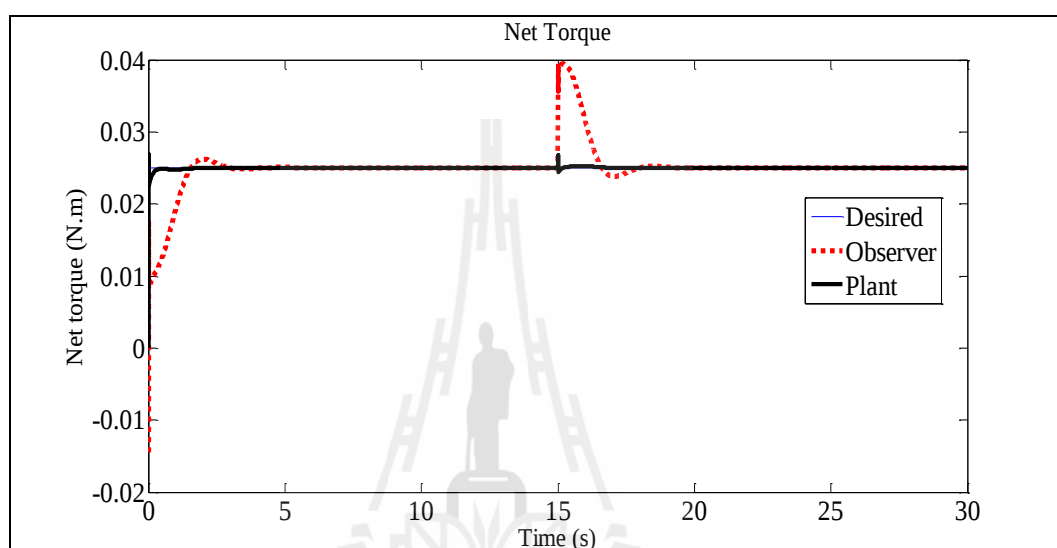
สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.4

ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1.4 ระบบถูกแรงบิดภายนอกรบกวนเป็นแบบขั้นบันได (Step function) แรงบิดภายนอกจะกระทำกับระบบตั้งแต่เริ่มการทำงานจนถึงวินาทีที่ 10 และค่อยเอาแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบออก สำหรับกรณีนี้จะเป็นการทดสอบตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้ว่าจะสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้หรือไม่ ผลที่ได้ คือ สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ ทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัพท์มีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.14, 4.15, 4.16 และ 4.17



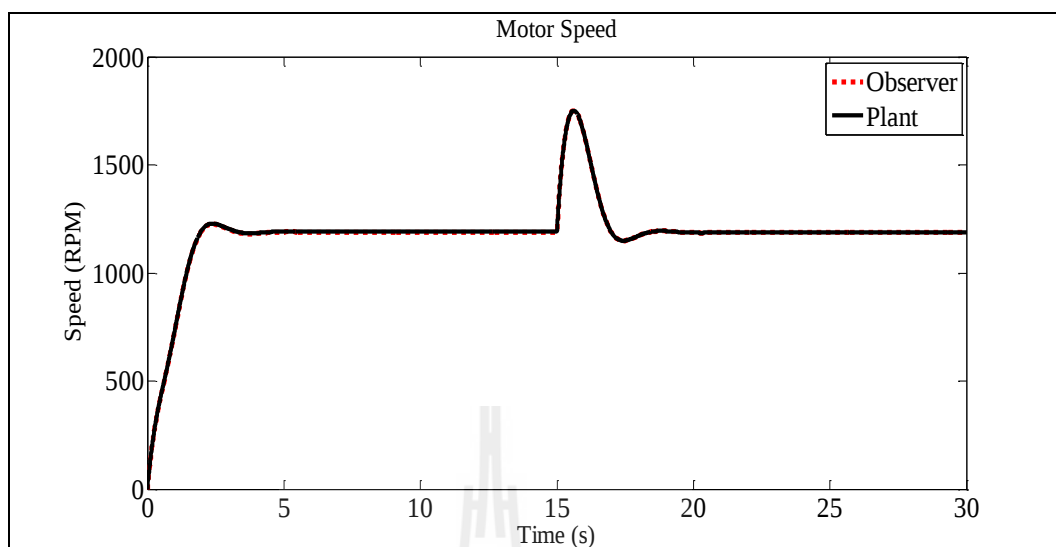
รูปที่ 4.14 ผลการตอบสนองของ $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1.4

จากรูปที่ 4.14 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกจริงและค่าแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟัซซี่ลอจิกแบบปรับตัวได้และทำการชดเชยให้กับตัวสังเกตในสถานะมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าระบบฟัซซี่ลอจิกจะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกประมาณ 3 วินาที และช่วงผลการตอบสนองชั่วคราวจะเกิดค่าพุ่งเกิน

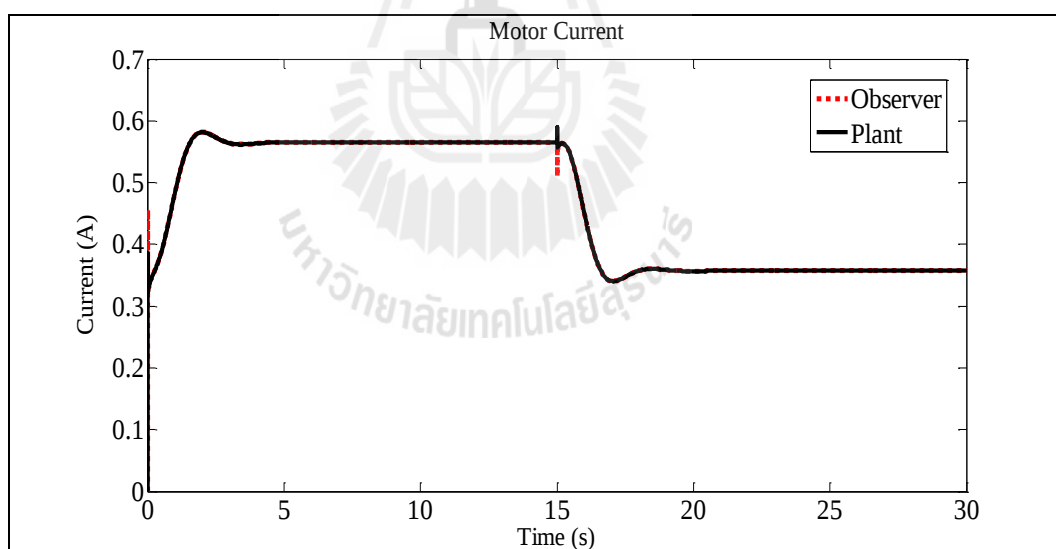


รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.4

จากรูป 4.15 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตในวินาทีที่ 15 เมื่อไม่มีแรงบิดภายนอกมากกระทำกับระบบ (เอาแรงบิดภายนอกออก) ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์จะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะแรงบิดลัพธ์ของตัวสังเกต แต่เมื่อตัวชดเชยฟัซซี่ลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองแรงบิดลัพธ์ที่ประมาณจากตัวสังเกตและของระบบก็จะมีค่าความถูกต้อง



รูปที่ 4.16 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.4



รูปที่ 4.17 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.4

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 เมื่อตัวชดเชยพีซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตต

ทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ทั้งในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบและไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะแสดงให้เห็นว่าผลการตอบสนองกระแส

อาร์เมเจอร์จะมีการปรับตัวลดลงในสถานะที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ (ตอนเอาแรงบิดภายนอกออก) เพื่อรักษาแรงบิดลัพธ์ให้ได้ตามอินพุตของระบบ

4.3 การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้สำหรับ

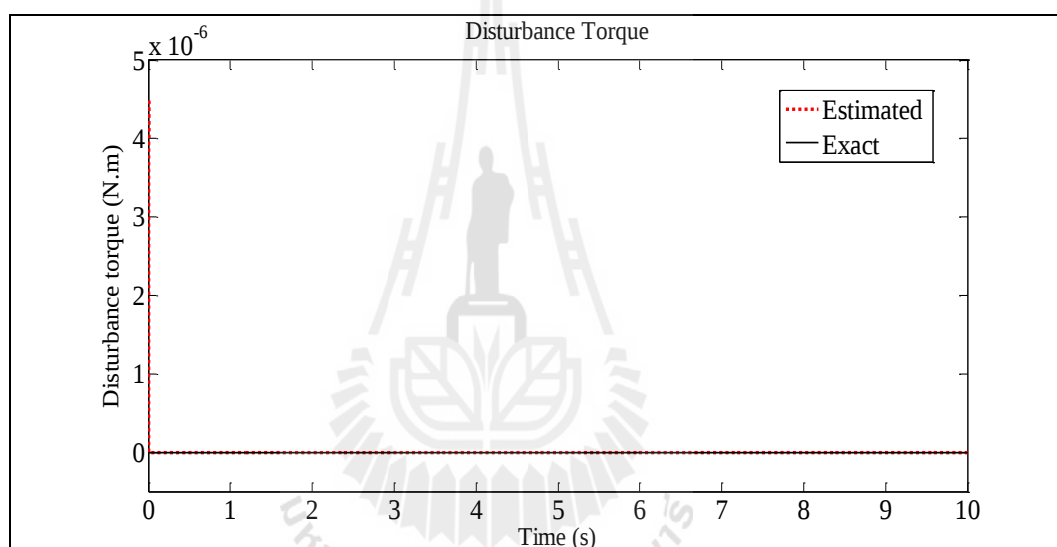
ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2

พิจารณาการทำงานของระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2 คือ สัญญาณอินพุตที่กระทำกับระบบเป็นลักษณะแบบลาดเอียง (Ramp input) โดยการแบ่งกรณีสำหรับอินพุตแบบลาดเอียงก็จะถูกแบ่งตามลักษณะของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลง ($T_L(t)$) ที่รบกวนกับระบบ การรบกวนของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลต่อการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวสังเกต คือ ค่าความต่างศักย์อาร์เมเจอร์ ค่ากระแสอาร์เมเจอร์และค่าความเร็วรอบ เนื่องจากความแตกต่างที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของตัวสังเกตและระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยในการจำลองสถานการณ์ระบบนี้เราจะสมมุติว่าเราทราบค่าของตัวแปรทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และสามารถวัดค่ากระแสอาร์เมเจอร์และค่าความเร็วของระบบได้ เพื่อให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตของตัวสังเกตมีประสิทธิภาพมากขึ้น และกำหนดว่าตัวแปรทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ ในขณะที่มีค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบ ซึ่งผลที่ได้นี้จะทำให้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของระบบได้ตามกรณีต่าง ๆ ที่แบ่งไว้ข้างต้น และเมื่อชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงนี้ให้กับระบบของตัวสังเกตจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตของตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง

สำหรับกรณีที่ 2 ระบบควบคุมแรงบิดเป็นแบบลาดเอียง (Ramp input) กล่าวคือ การควบคุมในลักษณะอินพุตแบบลาดเอียง (Ramp input) จะอ้างอิงที่ค่าความชันคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ในการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับกรณีนี้จะควบคุมค่าแรงบิดเริ่มต้นที่ 0.02 นิวตันเมตร ไปถึงค่าแรงบิดสุดท้ายที่ 0.03 นิวตันเมตรเป็นเวลา 10 วินาที ดังนั้น ระบบจะอ้างอิงอินพุตที่มีความชันเท่ากับ 0.001 นิวตันเมตร และจะแบ่งออกเป็นกรณีย่อย ๆ โดยพิจารณาจากแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่เข้ามารบกวนกับระบบได้ดังนี้

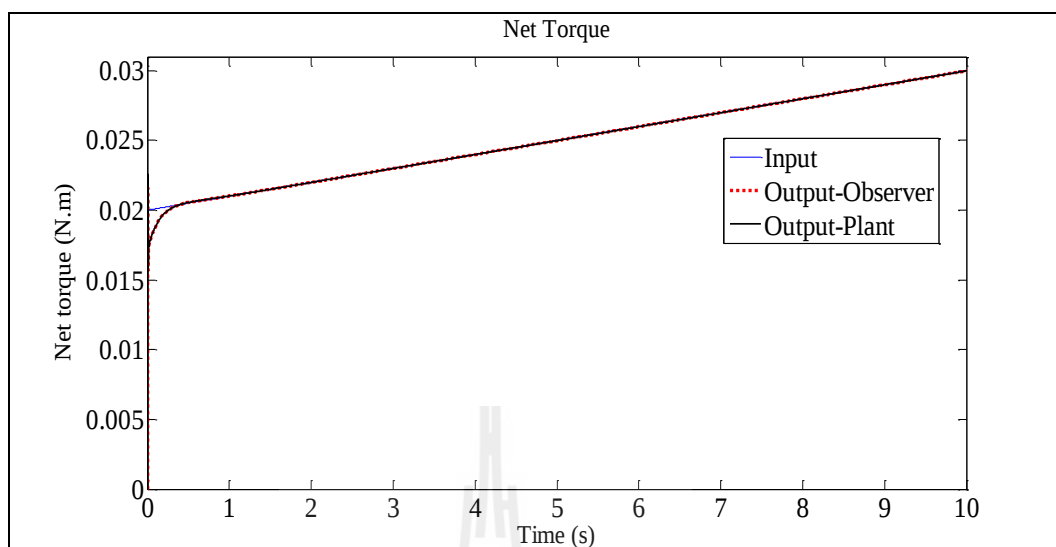
4.3.1 การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ลอจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2.1

ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2.1 เมื่อไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบและตัวชดเชยฟลักซ์ลอจิกแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่มีค่าเท่ากับศูนย์และชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าของตัวแปรสเตรตจะมีความถูกต้องและทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.18, 4.19, 4.20 และ 4.21



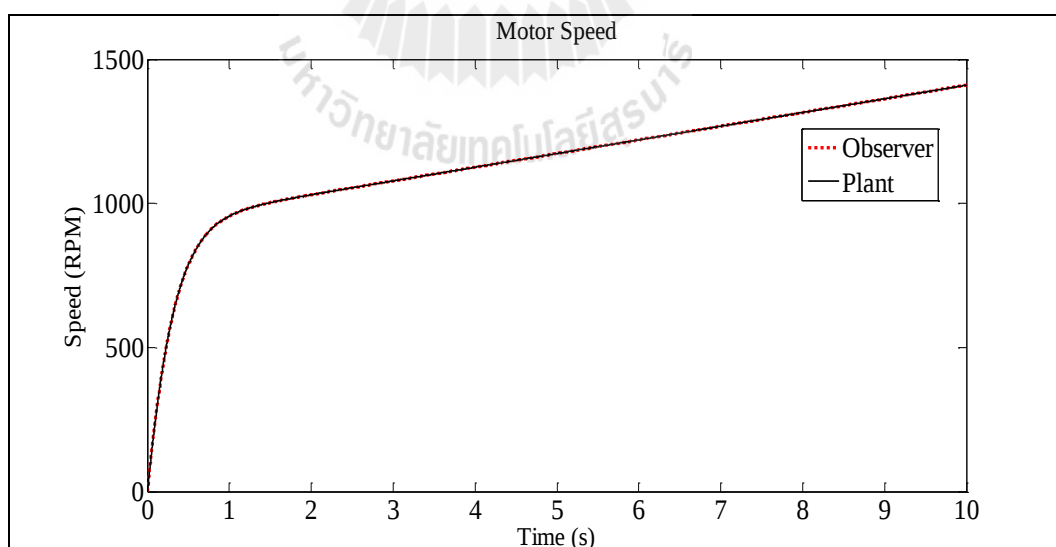
รูปที่ 4.18 ผลการตอบสนองของ $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.1

จากรูปที่ 4.18 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกจริงและแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟลักซ์ลอจิกแบบปรับตัวได้และทำการชดเชยให้กับตัวสังเกต ในสถานะที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ แสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยฟลักซ์ลอจิกแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่มีค่าเท่ากับศูนย์

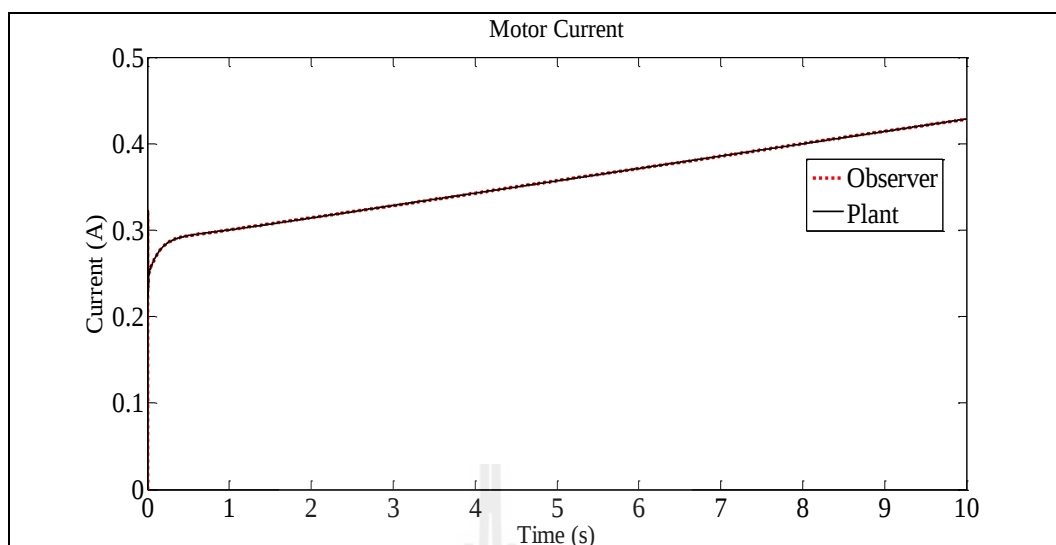


รูปที่ 4.19 ผลการตอบสนองของแรงบิดพัลส์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.1

จากรูปที่ 4.19 ผลการตอบสนองของแรงบิดพัลส์ของระบบและตัวสังเกตทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพตามอินพุตของระบบ



รูปที่ 4.20 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.1



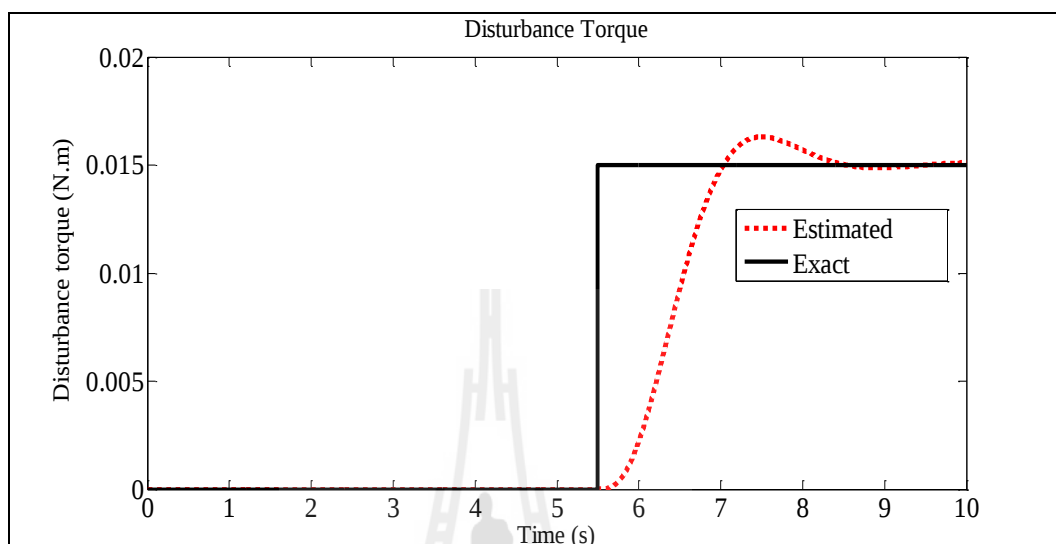
รูปที่ 4.21 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.1

จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ในสภาวะที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่า ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วจะมีลักษณะเป็นแบบลาดเอียง (Ramp function) เหมือนกับลักษณะของอินพุตของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากค่าแรงบิดลัพท์จะสัมพันธ์กับค่ากระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วรอบโดยตรง

4.3.2 การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2.2

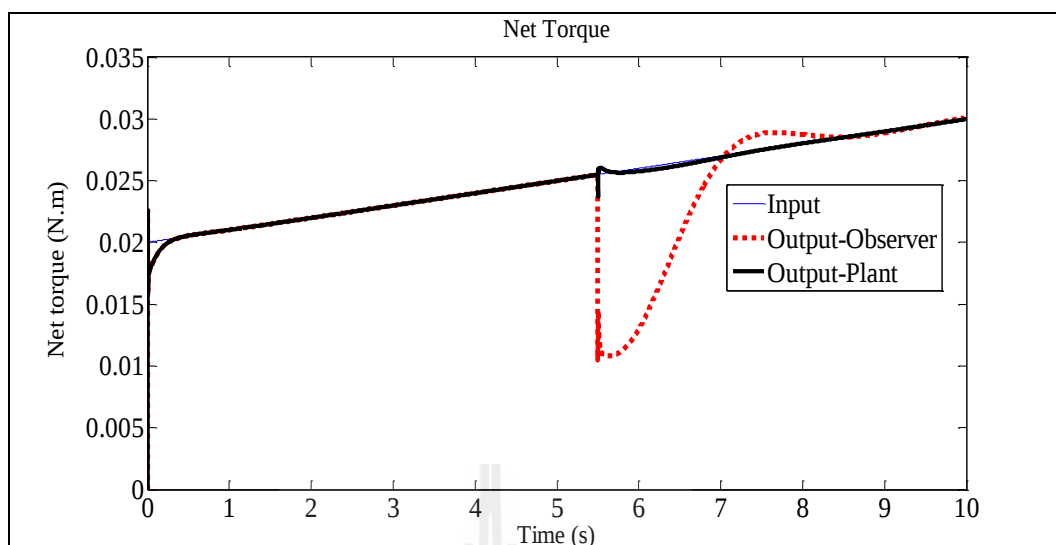
ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2.2 อินพุตของระบบจะเป็นแบบลาดเอียง (Ramp input) แต่ลักษณะของแรงบิดภายนอกที่กระทำกับระบบจะเป็นแบบขั้นบันได (Step function) ที่มีค่าคงที่ประมาณ 0.015 นิวตันเมตร จะเริ่มรบกวนกับระบบที่เวลาประมาณ 5.5 วินาที เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบและชดเชยให้กับตัวสังเกต การประมาณค่าของตัวแปรสแตตจะมีความถูกต้องและทำให้ระบบ

ควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.22, 4.23, 4.24 และ 4.25



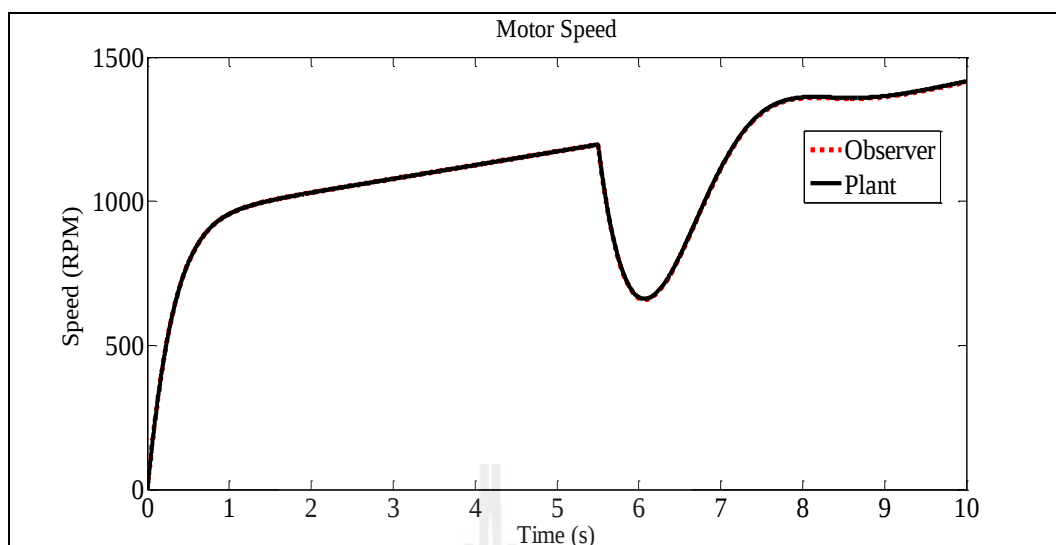
รูปที่ 4.22 ผลการตอบสนองของ $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.2

จากรูปที่ 4.22 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกจริงและแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้และทำการชดเชยให้กับตัวสังเกตในสภาวะมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้จะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกประมาณ 3.5 – 4 วินาที และช่วงผลการตอบสนองชั่วคราวจะเกิดค่าพุ่งเกิน

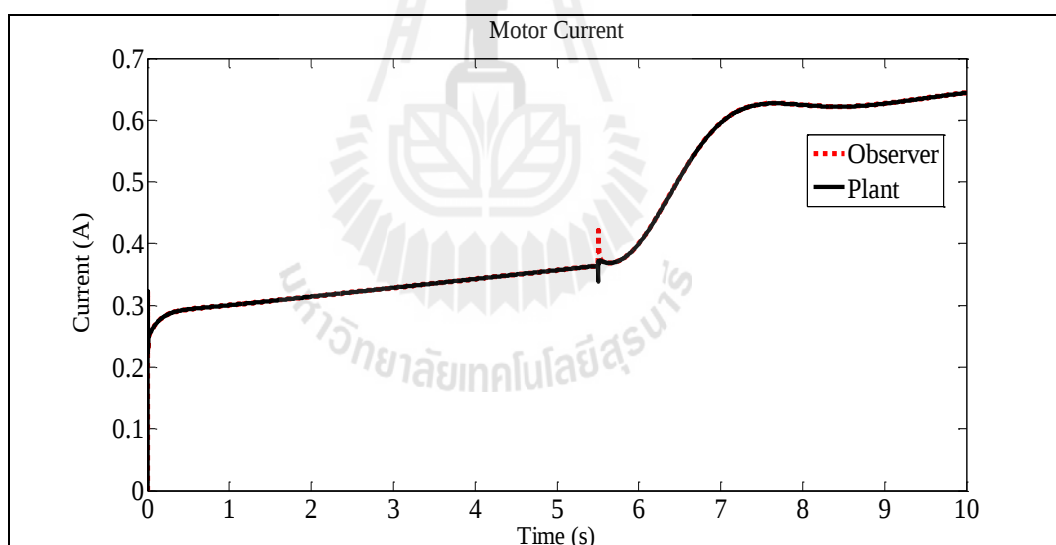


รูปที่ 4.23 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.2

จากรูป 4.23 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตจะลดลง โดยเฉพาะผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ที่ประมาณได้จากตัวสังเกต และเมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ประมาณได้จากตัวสังเกตและของระบบก็จะมีค่าถูกต้อง



รูปที่ 4.24 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.2



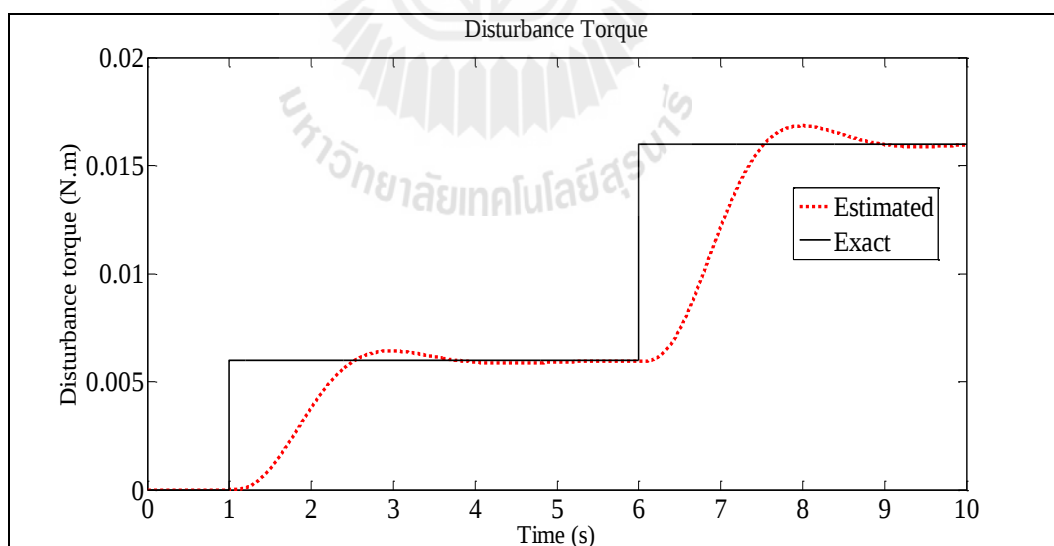
รูปที่ 4.25 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.2

จากรูปที่ 4.24 และ 4.25 เมื่อตัวชดเชยฟัซซี่ลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ทั้งในสภาวะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์จะมีการปรับตัวเพิ่มขึ้นในสภาวะที่มี

แรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ เพื่อรักษาแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ได้ตามอินพุตของระบบ

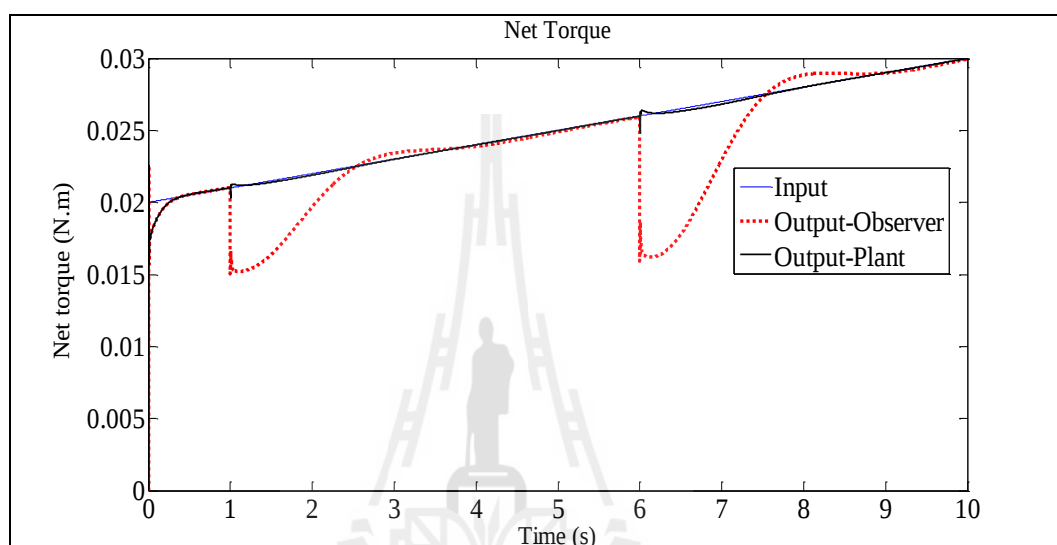
4.3.3 การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2.3

ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2.3 ระบบถูกแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนเป็นแบบขั้นบันได (Step function) โดยมีค่าที่ไม่เท่ากันสองค่า โดยค่าแรงบิดภายนอกค่าแรกจะใส่เข้ามารบกวนในระบบในวินาทีที่ 1 มีค่าประมาณ 0.005 นิวตันเมตร และค่าแรงบิดภายนอกค่าที่สองจะเข้ามารบกวนกับระบบในวินาทีที่ 6 มีค่าประมาณ 0.015 นิวตันเมตร ตามลำดับ เมื่อตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบและชดเชยให้กับตัวสังเกต การประมาณค่าของตัวแปรสแตตจะมีความถูกต้องและทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.26, 4.27, 4.28 และ 4.29



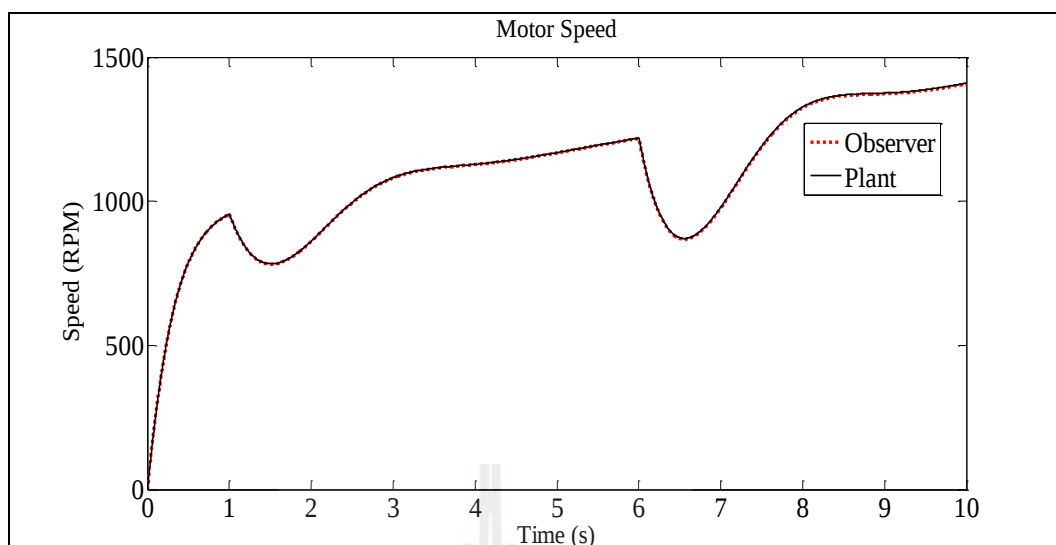
รูปที่ 4.26 ผลการตอบสนองของ $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.3

จากรูปที่ 4.26 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกจริงและแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้และทำการชดเชยให้กับตัวสังเกต ในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้จะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกประมาณ 3.5 – 4 วินาที และช่วงผลการตอบสนองชั่วคราวจะเกิดค่าพุ่งเกินทั้งสองค่าแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้ที่เข้ามารบกวนกับระบบ

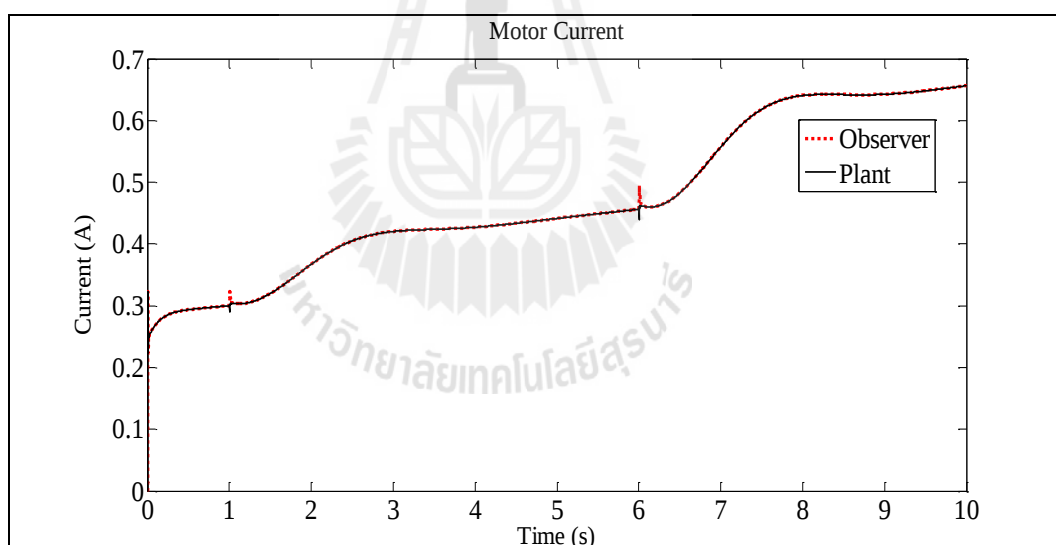


รูปที่ 4.27 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.3

จากรูป 4.27 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตจะลดลง โดยเฉพาะผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ที่ประมาณได้จากตัวสังเกต และเมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ประมาณได้จากตัวสังเกตและของระบบก็จะมีค่าถูกต้อง



รูปที่ 4.28 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.3



รูปที่ 4.29 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.3

จากรูปที่ 4.28 และ 4.29 เมื่อตัวชดเชยพีซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์จะมีการปรับตัวเพิ่มขึ้นในสถานะที่มี

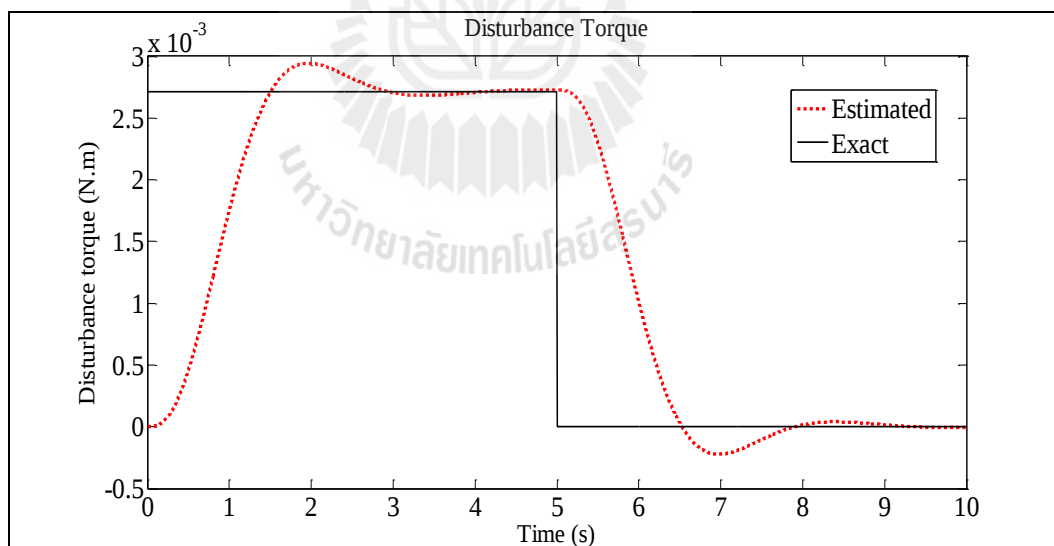
แรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ เพื่อรักษาแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ได้ตามอินพุตของระบบ

4.3.4 การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้

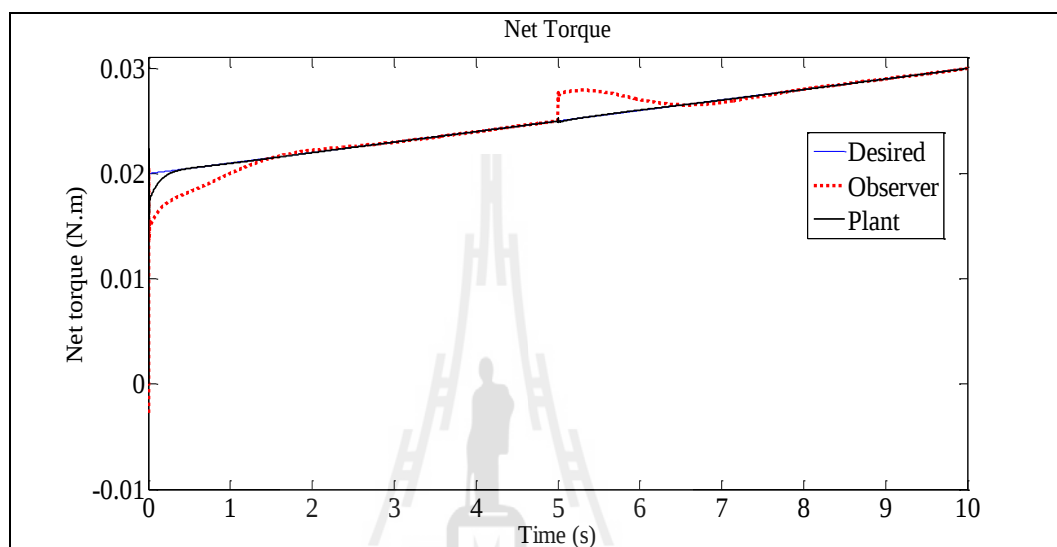
สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2.4

ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2.4 ระบบถูกแรงบิดภายนอกรบกวนเป็นแบบขั้นบันได (Step function) แต่จะเริ่มรบกวนกับระบบตั้งแต่ระบบเริ่มทำงานไปจนถึงวินาทีที่ 5 โดยค่าแรงบิดภายนอกมีค่าประมาณ 0.00275 นิวตันเมตร และค่อยเอาแรงบิดภายนอกออก ในกรณีนี้จะเป็นการทดสอบตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้ว่าจะสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่รบกวนกับระบบได้หรือไม่ ผลที่ได้คือสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ ทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.30, 4.31, 4.32 และ 4.33



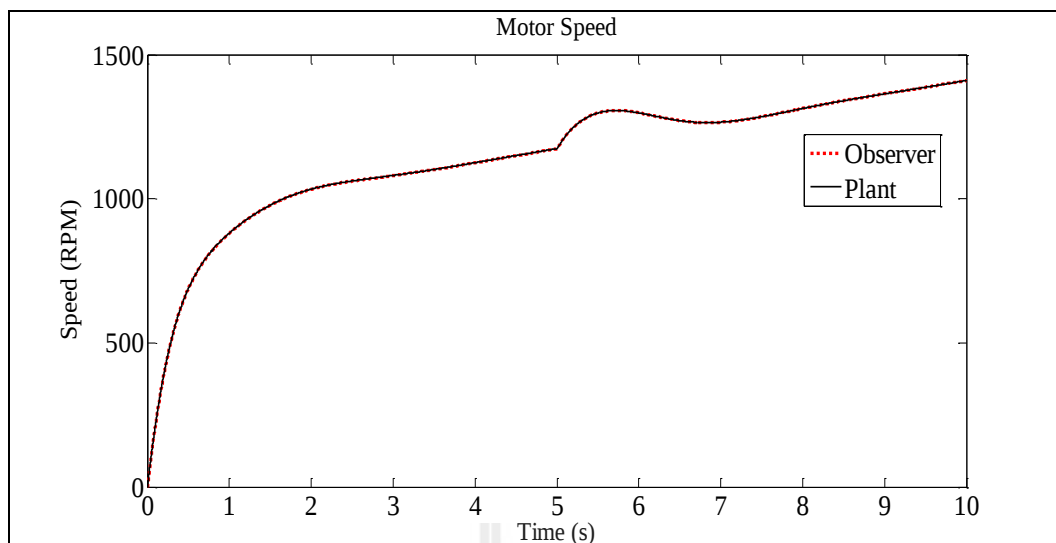
รูปที่ 4.30 ผลการตอบสนองของ $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.4

จากรูปที่ 4.30 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกจริงและแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้และทำการชดเชยให้กับตัวสังเกต ในสภาวะมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบและไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้จะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกประมาณ 3 – 4 วินาที และช่วงผลการตอบสนองชั่วคราวจะเกิดค่าพุ่งเกิน

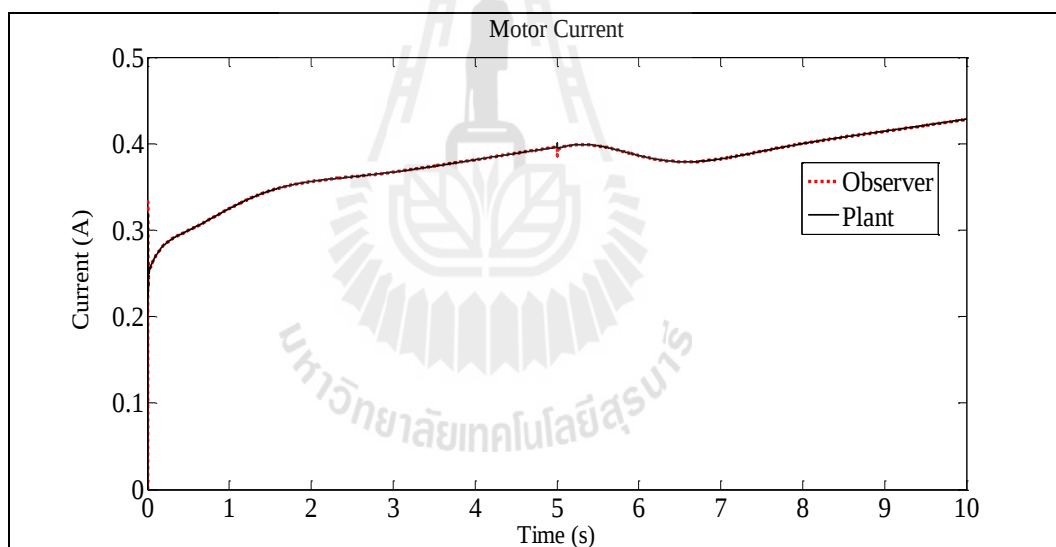


รูปที่ 4.31 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.4

จากรูป 4.31 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตในวินาทีที่ 5 เมื่อไม่มีแรงบิดภายนอกมากระทำกับระบบ (เอาแรงบิดภายนอกออก) ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์จะเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะแรงบิดลัพธ์ของตัวสังเกต แต่เมื่อตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองแรงบิดลัพธ์ที่ประมาณจากตัวสังเกตและของระบบก็จะมีค่าถูกต้อง



รูปที่ 4.32 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.4



รูปที่ 4.33 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.4

จากรูปที่ 4.32 และ 4.33 เมื่อตัวชดเชยพีซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้องทั้งในสภาวะมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบและไม่มีแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบ จะแสดงให้เห็นว่าผลการตอบสนองของกระแส

อาร์เมเจอร์จะมีการปรับตัวลดลงในสถานะที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ (ตอนเอาแรงบิดภายนอกออก) เพื่อรักษาแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ได้ตามอินพุตของระบบ

จากผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวสังเกต และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงจากวิธีการของฟิชเชอิจสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพในกรณีที่แรงบิดภายนอกที่กระทำกับระบบอยู่ในรูปแบบฟังก์ชันขั้นบันได (Step function) และทำการชดเชยให้กับตัวสังเกตจึงสามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นผลทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขั้วสกรูอัตโนมัติในกระบวนการขันสกรูมีประสิทธิภาพด้านผลการตอบสนองของแรงบิดลัพท์ทั้งในกรณีการควบคุมแรงบิดลัพท์แบบมีอินพุตเป็นขั้นบันได (Step input) และกรณีการควบคุมแรงบิดลัพท์แบบมีอินพุตเป็นลาดเอียง (Ramp input)



บทที่ 5

ผลการทดสอบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและการ ประมาณค่าแรงบิดภายนอก

ในบทนี้เป็นการแสดงผลการทดสอบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ตัวสังเกตร่วมกับการชดเชยแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้สำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรอุตสาหกรรมอัตโนมัติในกระบวนการขึ้นสกรู ซึ่งจะใช้ชุดทดสอบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแทนเครื่องจักรอัตโนมัติ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการแสดงผลการทดสอบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ตัวสังเกตร่วมกับการชดเชยแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้เท่านั้น โดยแบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณี ตามลักษณะของอินพุตที่กระทำต่อระบบ คือ อินพุตแบบขั้นบันได (Step input) และอินพุตแบบลาดเอียง (Ramp input) โดยแต่ละอินพุตจะมีแรงบิดภายนอก ($T_L(t)$) ที่รบกวนกับระบบในแต่ละลักษณะ โดยแบ่งกรณีต่าง ๆ ตามบทที่ 4 ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

5.1 เครื่องมือทดลอง

การทดลองนี้ใช้เครื่องมือ Precision Modular Servo System เป็นชุดเครื่องมือทดลองที่มีระบบหลักคือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมคือ Simulink Real Time ซึ่งเป็นโปรแกรมส่วนหนึ่งของ MATLAB การเชื่อมต่อสัญญาณการควบคุมระหว่างคอมพิวเตอร์ และระบบของ Precision Modular Servo System จะใช้ PCI 1711 card ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ในการทดลองนี้จะสนใจระบบการควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์และค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของระบบ



รูปที่ 5.1 แสดงระบบ Precision Modular Servo

อุปกรณ์ส่วนประกอบของระบบ คือ

1. 33 – 008 – PCI – Precision modular servo and software packed for PCI bus
2. DCM 150 F – DC motor – primary control power source
3. LU 150 L – Magnetic brake load – apply torque load to DC motor
4. GT 150 X – Gearbox/Tachometer – tachometer for motor speed measurement.

Provides an output voltage proportional to the speed. The gearbox provides a different drive ratio to the output potentiometer

5. 33-300 – Digital Encoder – provides an accurate angle measurement corresponding to the motor position. The digital signals from the encoder are sent to I/O board via the wide ribbon cable.

6. PS 150E – Power Supply – power supply for the whole system. Provides +15 V and -15 V rails.

7. SA 150D – Servo Amplifier – the amplifier provides the controlled power to DC motor

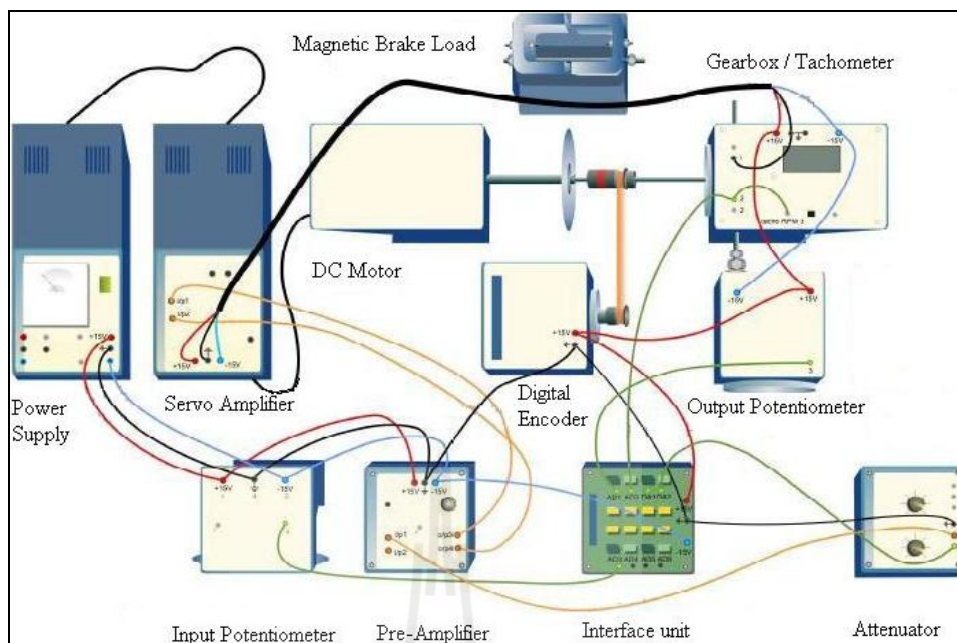
8. PA 150C – Pre-Amplifier – a pre – amplifier which provides the correct signal range to the servo amplifier.

9. 33 – 301 – Interface unit – use to scale the analog input and out to the I/O board in the PC to the correct operating range.

10. AU 150B – Attenuator – use to set the input to the motor control circuit to correct operating level.
11. IP 150H – Input Potentiometer – establishes the set point for manual position control. Provides an analogue voltage proportional to its angular position.
12. OP 150K – Output Potentiometer – used as a visual display of motor (gearbox shaft) position. It provides an analogue voltage proportional to the position.

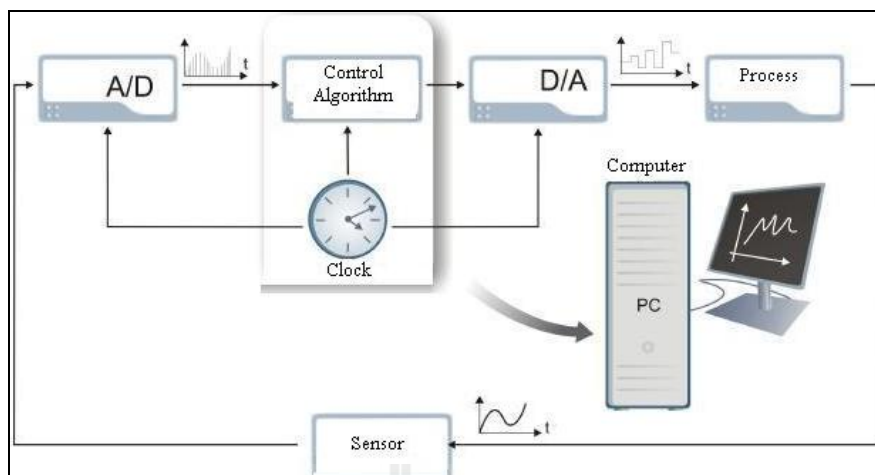


รูปที่ 5.2 แสดง PCI 1711 Card



รูปที่ 5.3 แสดงวงจรการทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์

เมื่อต่อระบบของคอมพิวเตอร์ PCI 1711 card และเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ตามวงจร ดังที่แสดงในรูปที่ 5.3 เรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อมา คือ การติดตั้งซอฟต์แวร์สำหรับเครื่องมือเครื่องมือ Precision Modular Servo ซึ่งซอฟต์แวร์นี้จะเชื่อมต่อกับ โปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink Real – Time Model โดยทั่วไปผู้ใช้งานสามารถเขียนโปรแกรมในลักษณะลักษณะ Simulink Real – time Model และเชื่อมต่อเพื่อควบคุมการทำงานของชุดทดลองได้ทันที หลักการทำงานของระบบแสดงในรูปที่ 5.4



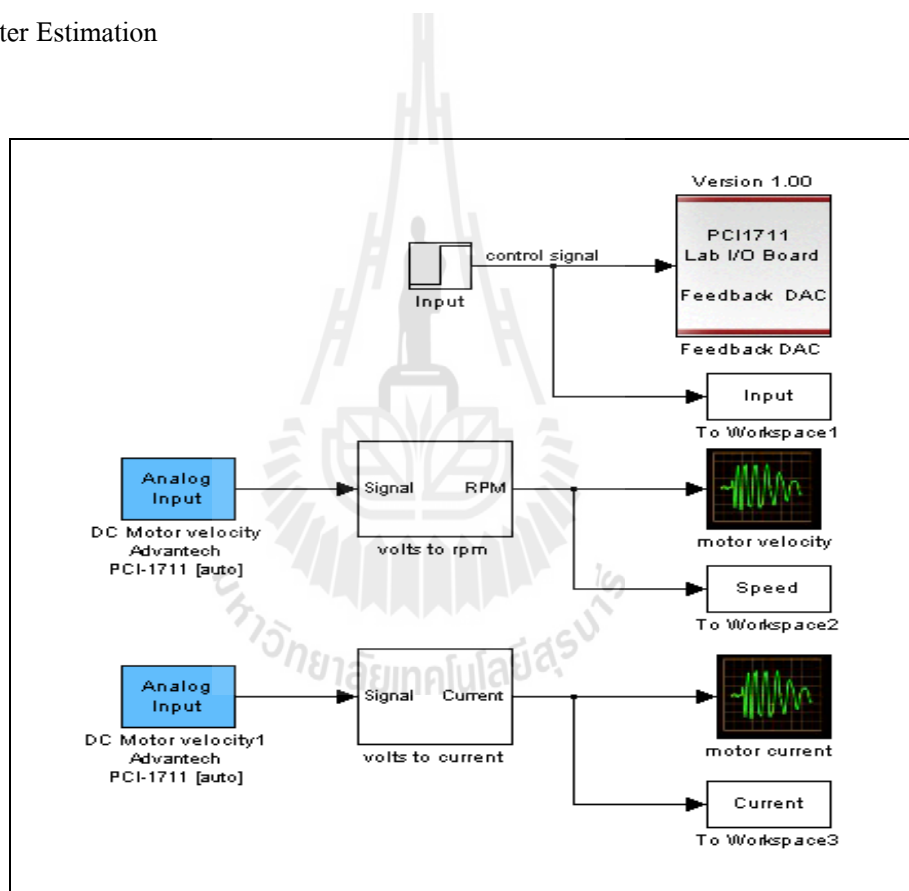
รูปที่ 5.4 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยสัญญาณที่เป็น Digital signal จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากนั้นสัญญาณจะถูกเปลี่ยนจาก Digital signal ไปเป็น Analog signal โดย Digital to Analog Converter และสัญญาณจะถูกขยายขึ้นอีกโดย Pre – amplifier และ Servo – amplifier เพื่อไปขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้หมุน จากนั้นความเร็วรอบจะถูกตรวจจับโดย Tachometer ในที่นี้เป็นลักษณะของ Generator ซึ่งค่าที่ได้คือสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าและในทำนองเดียวกันก็จะทำการวัดกระแสอาร์เมเจอร์โดยวงจรที่ Servo Amplifier แล้วสัญญาณที่ได้นี้จะถูกส่งต่อไปยัง Analog to Digital Converter เพื่อส่งกลับไปประมวลผลในโปรแกรมควบคุมการทำงานต่อไป

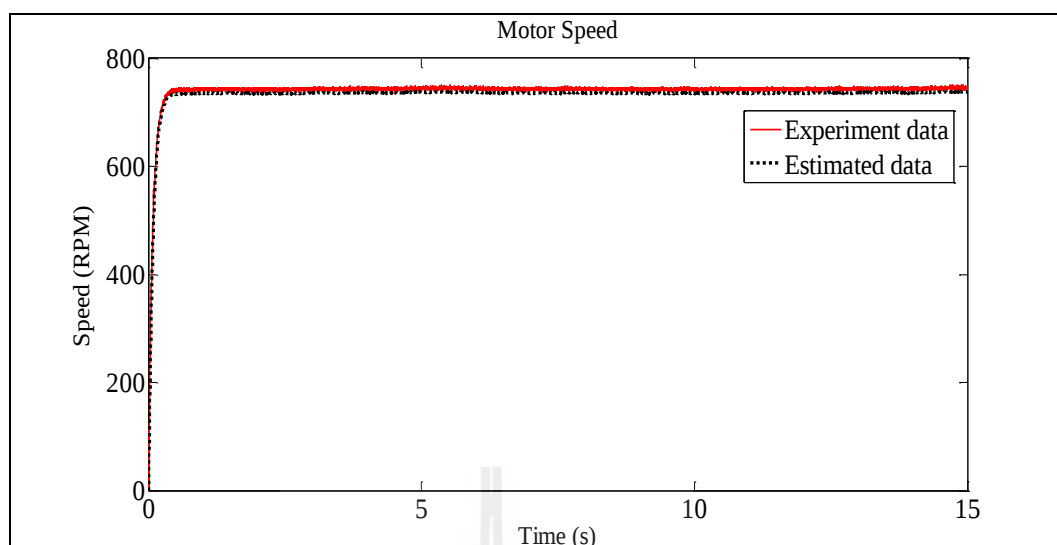
5.2 การประมาณค่าตัวแปรของระบบ

ในทางปฏิบัติการออกแบบตัวสังเกต และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงได้นั้นต้องทำการหาค่าตัวแปรของระบบในกรณีที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนระบบก่อน จากนั้นจะนำค่าตัวแปรที่ได้ไปทำการออกแบบตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบก่อนแล้วจึงใช้ตัวแปรของระบบไปออกแบบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลง ตัวแปรของระบบจะไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงแต่จะใช้การประมาณค่าโดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยที่จะกำหนดค่าอินพุตให้กับระบบเปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแบบขั้นบันได (Step function) และนำค่าอินพุตและเอาต์พุตที่ได้ไปทำการประมาณหาค่าตัวแปรของระบบในกรณีที่ไม่มีแรงบิดภายนอกมารบกวนกับระบบ ขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีดังนี้คือ

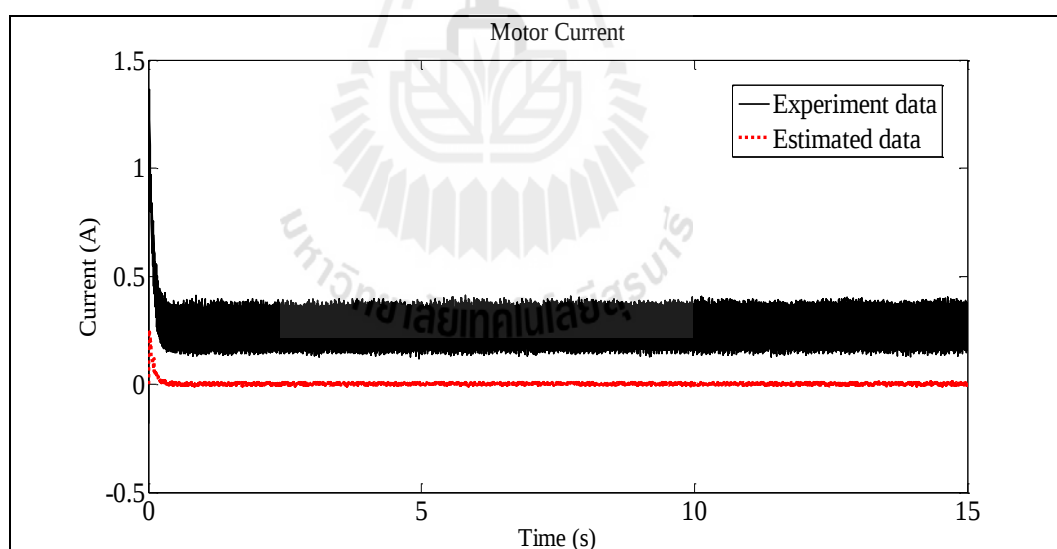
1. ทำการนำโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ในคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo มาทำการเก็บค่าของการตอบสนองของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและแบบจำลองที่เป็นระบบเปิดทั้งในส่วนของอินพุตและเอาต์พุต (โปรแกรมแสดงในรูปที่ 5.5)
2. ระบบที่พิจารณามีตัวแปรทั้งหมด 7 ตัวแปร คือ $I, R_a, L_a, K_{add}, K_r, K_e, b$ แต่สำหรับการประมาณค่าตัวแปรจะทำการประมาณค่าใหม่เพียง 6 ตัวแปร คือ I, R_a, L_a, K_r, K_e, b และ K_{add} กำหนดให้ค่าตัวแปรอีกตัวแปรคงที่ และมีค่าตามคู่มือของเครื่องมือทดลอง คือ $K_{add} = 91.68$ เป็นอัตราขยายของแอมพลิไฟเออร์
3. ประมาณค่าตัวแปรของระบบโดยใช้เครื่องมือของโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Parameter Estimation



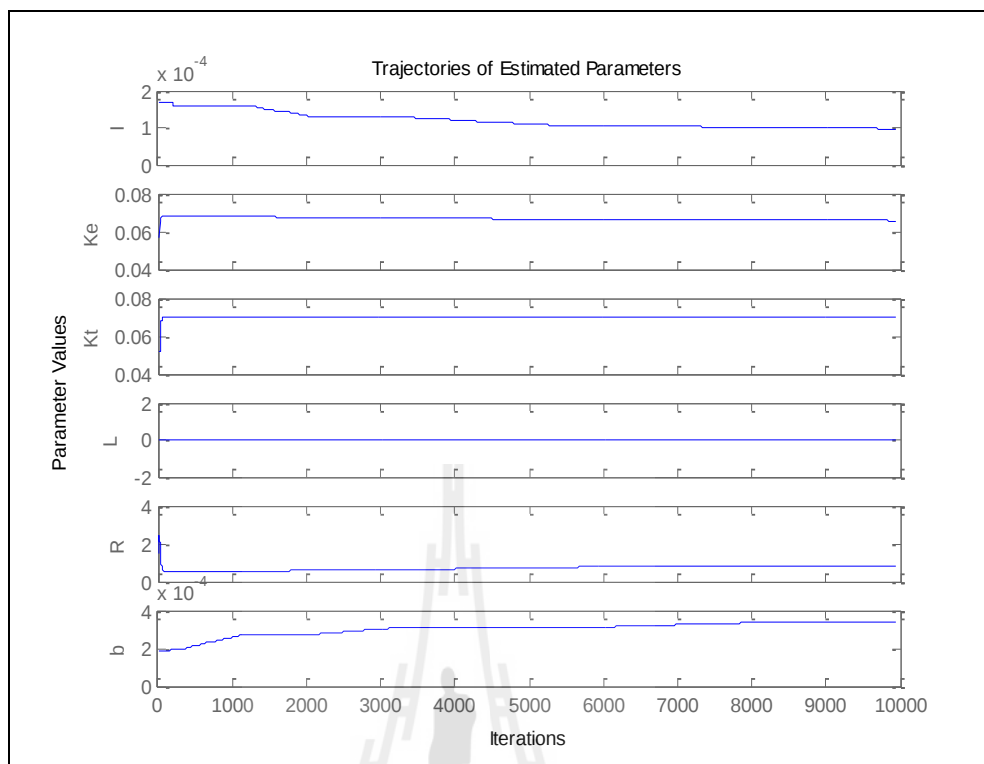
รูปที่ 5.5 แผนภาพแสดงโปรแกรมในการเก็บข้อมูลการทำงานของระบบ



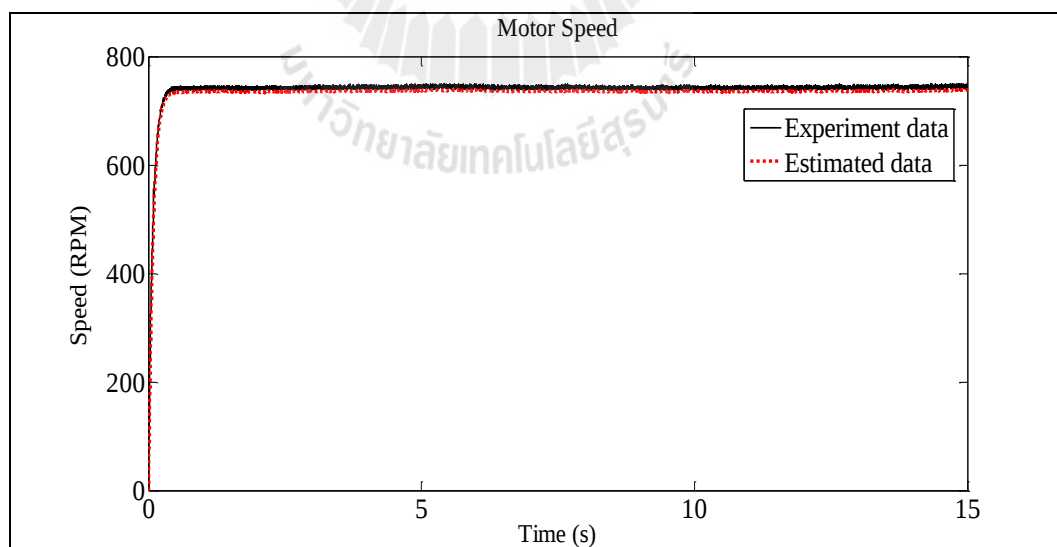
รูปที่ 5.6 ผลการตอบสนองของความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของความเร็วที่ได้จากแบบจำลองก่อนการประมาณค่าตัวแปร



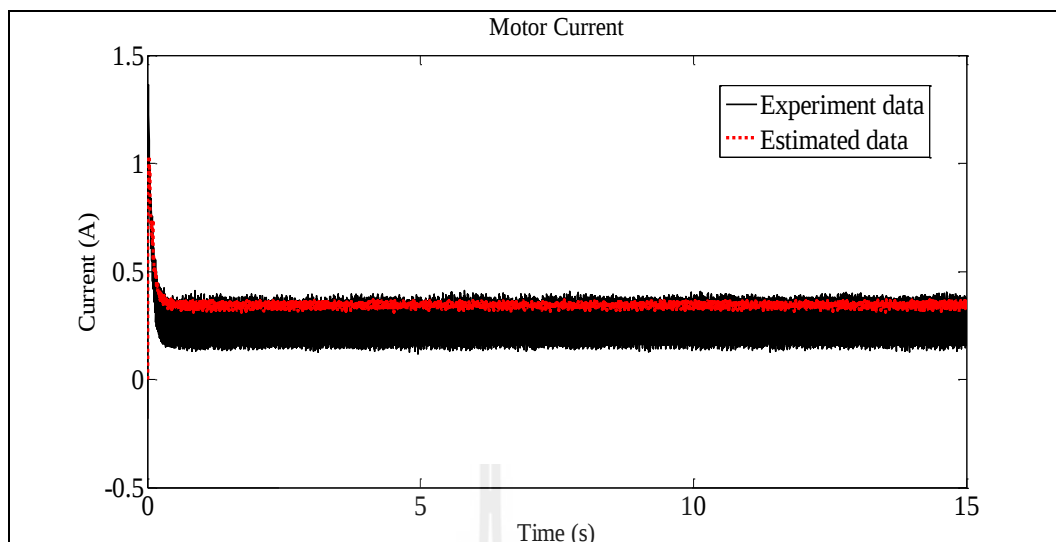
รูปที่ 5.7 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ที่ได้จากแบบจำลองก่อนการประมาณค่าตัวแปร



รูปที่ 5.8 ผลการปรับค่าตัวแปรของระบบ



รูปที่ 5.9 ผลการตอบสนองของความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของความเร็วที่ได้จากแบบจำลองหลังการประมาณค่าตัวแปร



รูปที่ 5.10 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับผล
การตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ที่ได้จากแบบจำลองหลังการประมาณค่าตัวแปร

ตัวแปรของระบบที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ คือ

$$I = 9.6664 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{rad}, K_t = 0.07 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{A}, K_e = 0.065707 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{rad} \\ b = 3.4193 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}, R_a = 0.8311 \Omega, L_a = 1 \times 10^{-3} \text{ H}$$

5.3 การวัดค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของระบบ

ในทางปฏิบัติการหาค่าที่แท้จริงของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงในภาวะอยู่
ตัว (Steady State) ของระบบสามารถทำได้โดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของ
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและนำมาคำนวณ แต่ก่อนที่จะคำนวณค่าที่แท้จริงได้นั้นต้องทำการหา
ค่าตัวแปรของระบบ คือ viscous damp (b) และ friction constant (T_F) ของระบบจากกรณีที่ไม่มี
แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนระบบก่อนซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$T_M = b\dot{\theta} + T_F \text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (5.1)$$

เมื่อ $T_M = K_t i_a$

ตารางที่ 5.1 แสดงค่า T_F ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Voltage (V)	i_a (A)	ω (rad/s)	b (Nms/rad)	T_F (Nm)
0.000	0.011	0.00	3.4193×10^{-4}	0.00077
0.247	0.094	0.00	3.4193×10^{-4}	0.00658
0.501	0.180	0.00	3.4193×10^{-4}	0.01262
0.757	0.242	0.00	3.4193×10^{-4}	0.01696
1.000	0.261	0.00	3.4193×10^{-4}	0.01827
1.502	0.222	13.79	3.4193×10^{-4}	0.01505
2.031	0.225	23.40	3.4193×10^{-4}	0.01495
2.499	0.232	31.78	3.4193×10^{-4}	0.01513
3.004	0.237	41.21	3.4193×10^{-4}	0.01520
3.507	0.242	50.46	3.4193×10^{-4}	0.01519
4.000	0.249	59.54	3.4193×10^{-4}	0.01539
4.498	0.255	68.79	3.4193×10^{-4}	0.01550
5.013	0.261	78.40	3.4193×10^{-4}	0.01557
5.507	0.266	87.30	3.4193×10^{-4}	0.01566
5.997	0.272	96.21	3.4193×10^{-4}	0.01577
6.503	0.276	105.46	3.4193×10^{-4}	0.01571
7.030	0.281	114.89	3.4193×10^{-4}	0.01577
7.513	0.286	124.32	3.4193×10^{-4}	0.01579
8.003	0.291	133.40	3.4193×10^{-4}	0.01581
8.370	0.294	140.03	3.4193×10^{-4}	0.01579

5.4 การทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1

พิจารณาการทำงานของระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1 คือ สัญญาณอินพุตที่กระทำกับระบบเป็นลักษณะแบบขั้นบันได (Step input) โดยการแบ่งกรณีสำหรับอินพุตแบบขั้นบันไดก็จะถูกแบ่งตามลักษณะของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลง ($T_L(t)$) ที่รบกวนกับระบบ การรบกวนของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลต่อการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวสังเกต คือ ค่าความต่างศักย์อาร์เมเจอร์ ค่ากระแสอาร์เมเจอร์และค่าความเร็วรอบ เนื่องจากความแตกต่างที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของตัวสังเกตและระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยในการทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบนี้จะสมมุติว่าทราบค่าของตัวแปรทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และสามารถวัดค่ากระแสอาร์เมเจอร์และค่าความเร็วของระบบได้ เพื่อทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตมีประสิทธิภาพมากขึ้น และกำหนดว่าตัวแปรทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้า

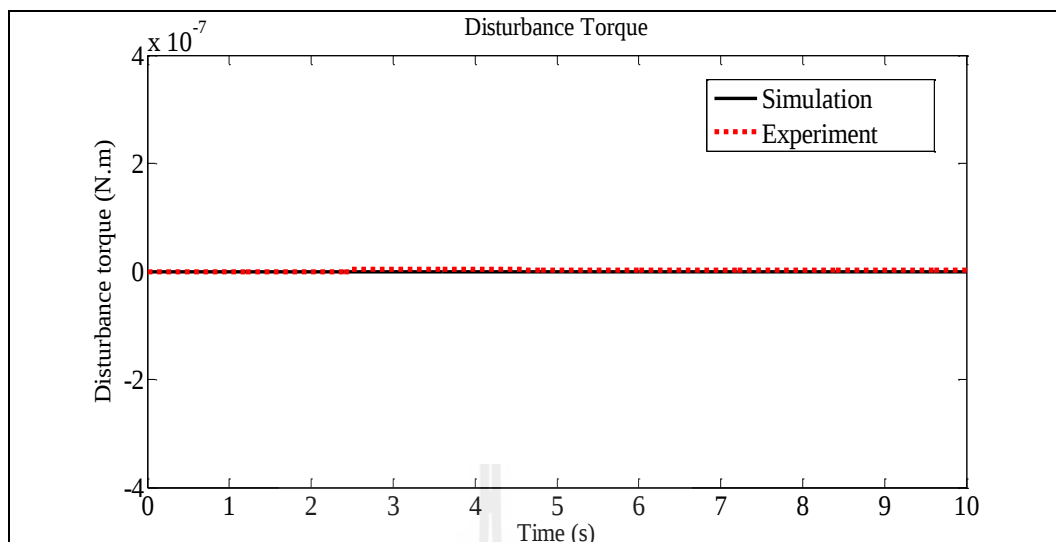
กระแสตรงมีค่าคงที่ ในขณะที่มีค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบ ซึ่งผลที่ได้นี้จะทำให้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของระบบได้ตามกรณีต่าง ๆ ที่แบ่งไว้ข้างต้น และเมื่อخذเซตค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงนี้ให้กับระบบของตัวสังเกตจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง

สำหรับกรณีที่ 1 ระบบควบคุมแรงบิดเป็นแบบขั้นบันได (Step input) กล่าวคือ การควบคุมในลักษณะอินพุตแบบขั้นบันได (Step input) จะอ้างอิงค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ในการทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัทธิของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับกรณีนี้เราจะอ้างอิงอินพุตที่ 0.025 นิวตันเมตร และจะแบ่งออกเป็นกรณีย่อย ๆ โดยพิจารณาจากแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่เข้ามารบกวนกับระบบได้ดังนี้

5.4.1 การทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัทธิของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้

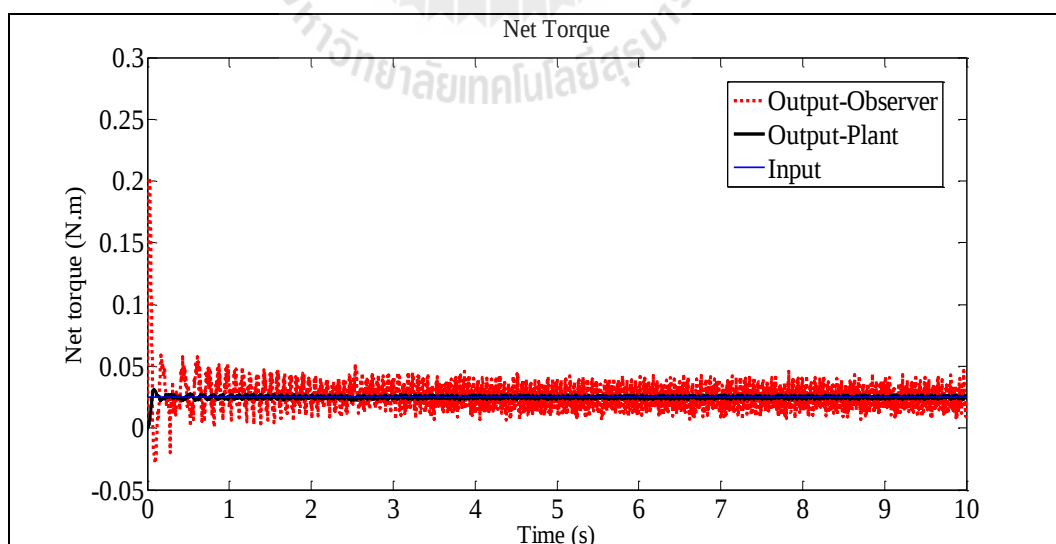
สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.1

ผลการทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัทธิของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1.1 เมื่อไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบและตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบที่มีค่าเท่ากับศูนย์และชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าของตัวแปรสเตตมีความถูกต้องและทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัทธิของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.12, 5.13, 5.14 และ 5.15



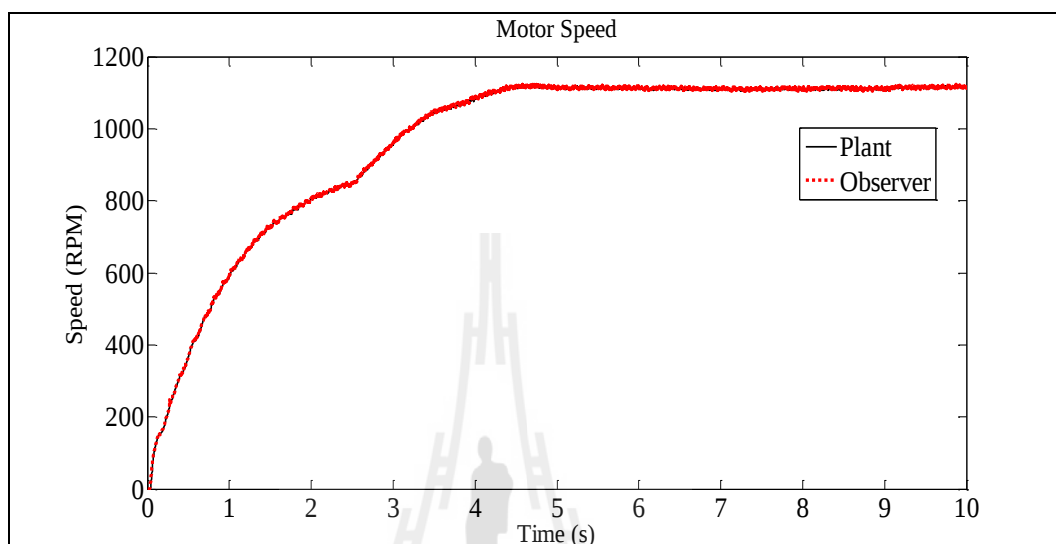
รูปที่ 5.12 ผลการตอบสนองของ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1.1

จากรูปที่ 5.12 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟิชชิลอจิกแบบปรับตัวได้จากการจำลองและจากการทดสอบ เมื่อทำการชดเชยให้กับตัวสังเกตในสถานะไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ แสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยฟิชชิลอจิกแบบปรับตัวได้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

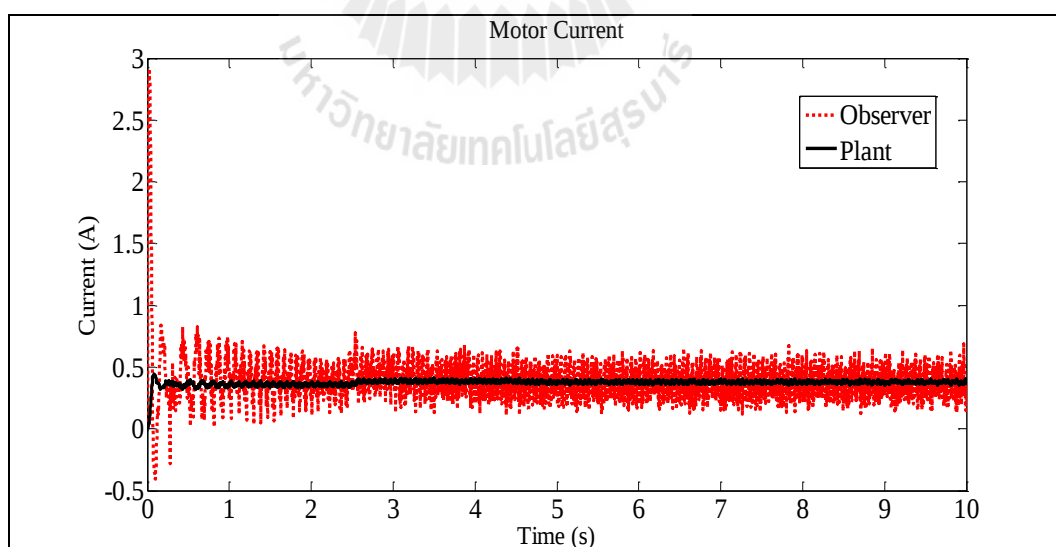


รูปที่ 5.13 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.1

จากรูปที่ 5.13 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพท์ของระบบและตัวสังเกตทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามอินพุตของระบบ เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.4 วินาที



รูปที่ 5.14 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.1



รูปที่ 5.15 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.1

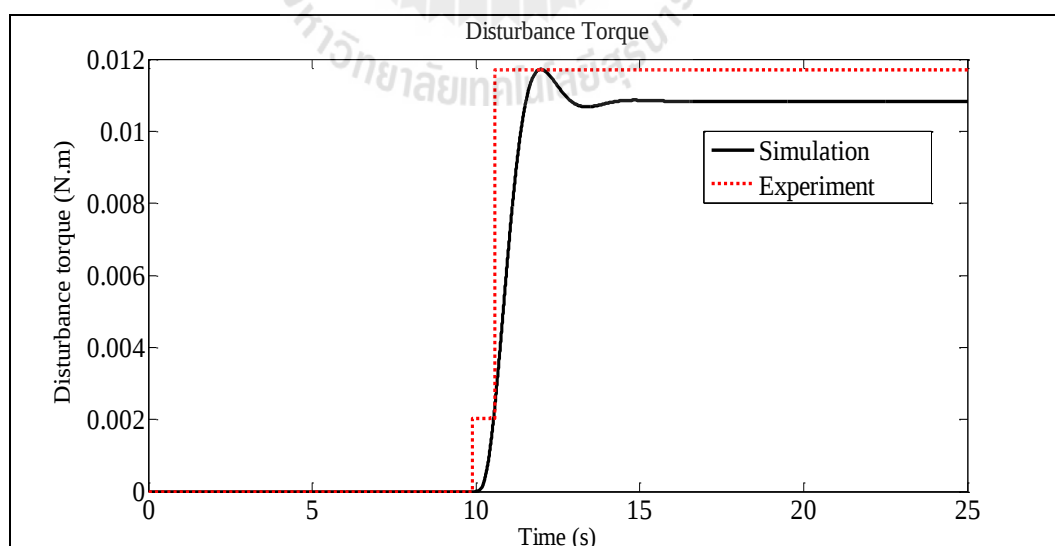
จากรูปที่ 5.14 และ 5.15 เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตรตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้องในสถานะที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของความเร็วจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ประมาณ 1100 RPM และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 4.5 วินาที ในส่วนของผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์จะมีลักษณะคงที่และมีการแกว่งตัวของสัญญาณ

5.4.2 การทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้สำหรับ

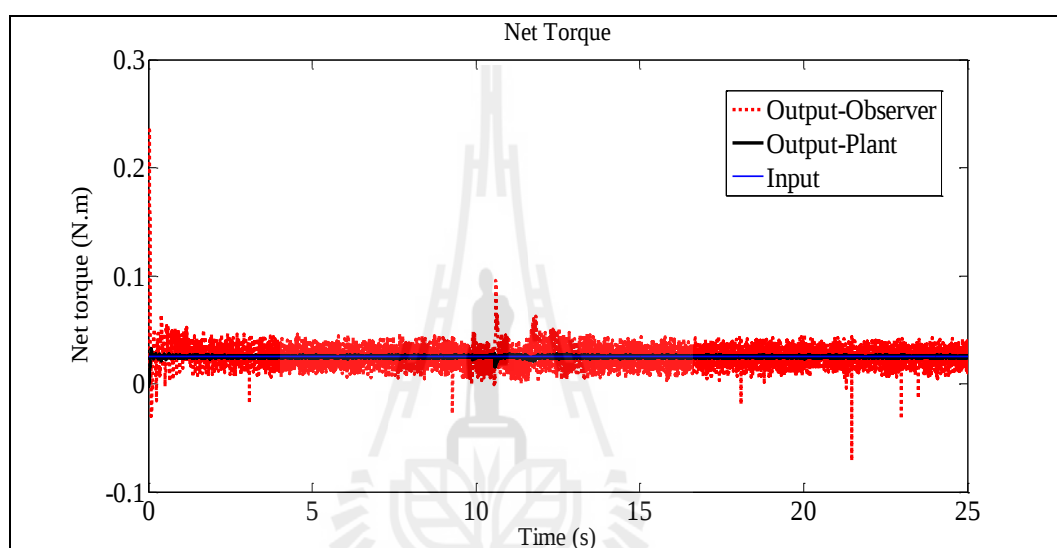
ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.2

ผลการทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1.2 ลักษณะแรงบิดที่รบกวนกับระบบจะเป็นแบบขั้นบันได (Step function) มีค่าคงที่ประมาณ 0.012 นิวตันเมตร จะเริ่มรบกวนกับระบบตั้งแต่วินาทีที่ 10 จนจบการทำงานของระบบ จะเห็นว่าเมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบและชดเชยให้กับตัวสังเกต การประมาณค่าของตัวแปรสเตรตจะมีความถูกต้องและทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัพท์มีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.16, 5.17, 5.18 และ 5.19



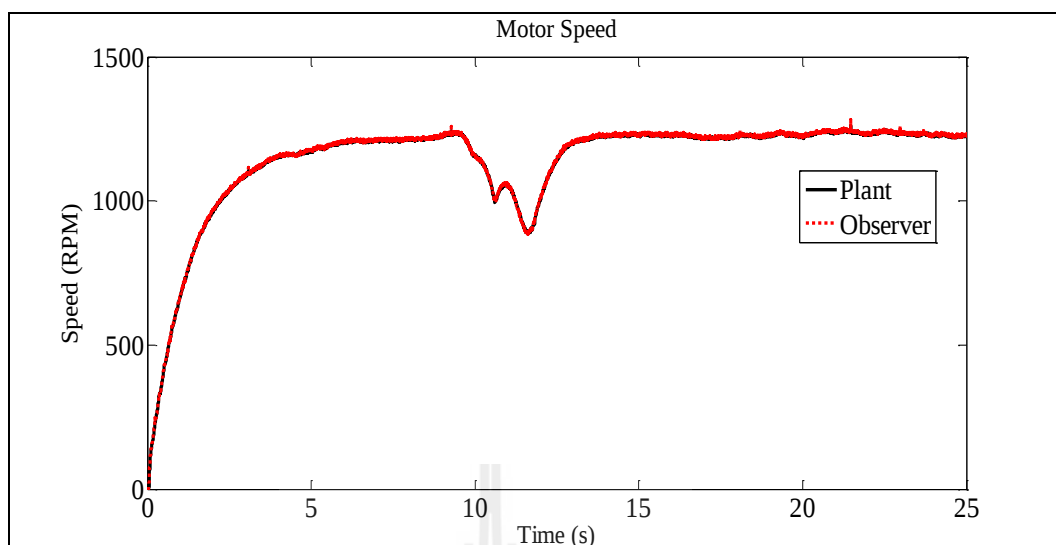
รูปที่ 5.16 ผลการตอบสนองของ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1.2

จากรูปที่ 5.16 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟิชชีลอจิกแบบปรับตัวได้จากการจำลองและจากการทดสอบ เมื่อทำการชดเชยให้กับตัวสังเกตในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ สำหรับการทดสอบจะเห็นว่าตัวชดเชยฟิชชีลอจิกแบบปรับตัวได้จะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกได้เร็วกว่าการจำลอง และช่วงผลการตอบสนองชั่วคราวของแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้จากการจำลองจะมีค่าพุ่งเกินแต่สำหรับการทดสอบจะไม่มี

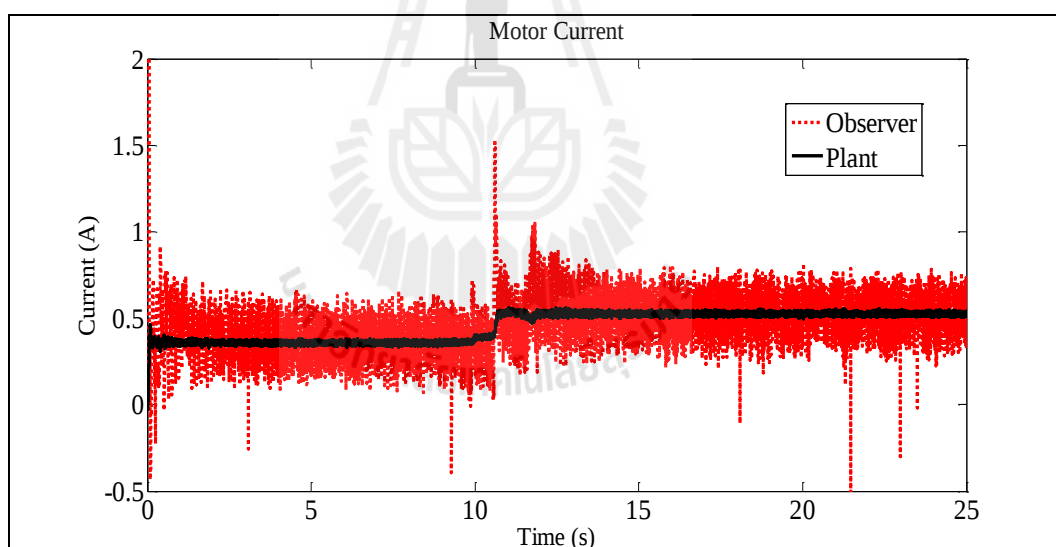


รูปที่ 5.17 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.2

จากรูป 5.17 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตจะลดลง แต่เมื่อตัวชดเชยฟิชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ที่ประมาณจากตัวสังเกตและระบบก็จะมี ความถูกต้อง



รูปที่ 5.18 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.2



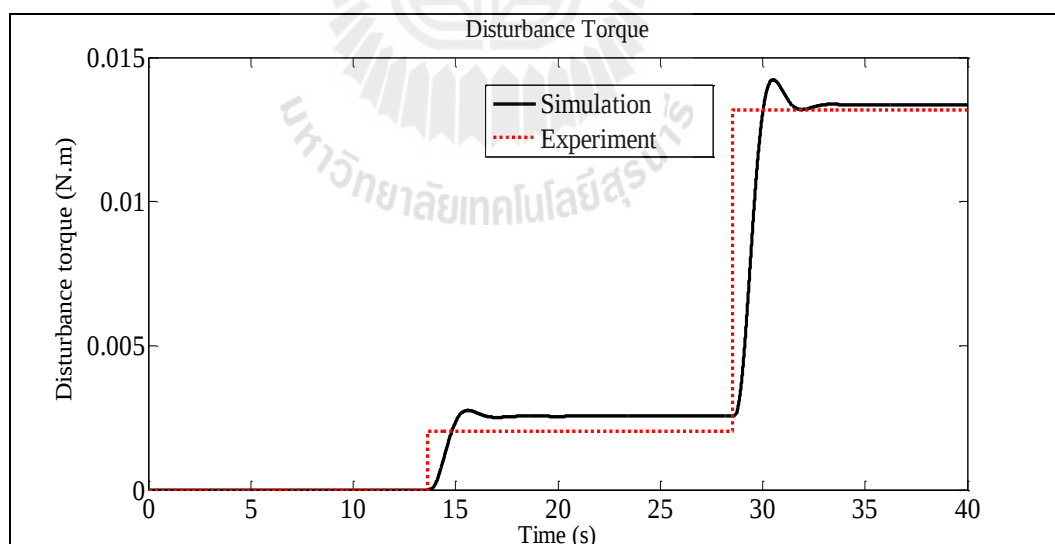
รูปที่ 5.19 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.2

จากรูปที่ 5.18 และ 5.19 เมื่อตัวชดเชยพีซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ในสภาวะมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์จะมีการปรับตัวเพิ่มขึ้นในสภาวะที่มี

แรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ เพื่อรักษาแรงบิดลัพท์ให้ได้ตามอินพุตของระบบ และมีการแกว่งตัวเกิดขึ้น ในส่วนของผลการตอบสนองของความเร็วก็จะลดลงในสภาวะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบแต่จะเพิ่มขึ้นแล้วเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากมีการชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต

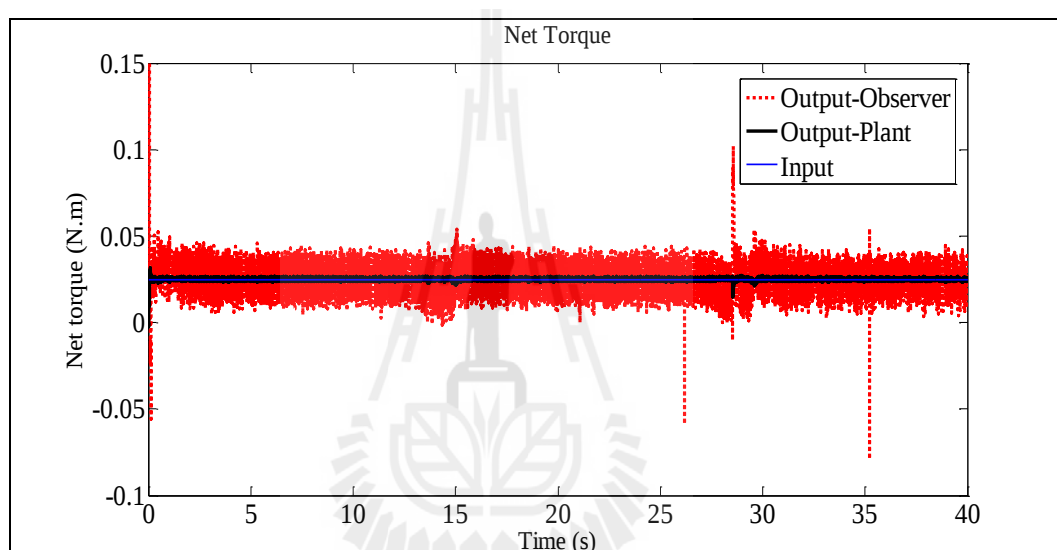
5.4.3 การทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.3

ผลการทดสอบสถานการณ์ระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1.3 ระบบถูกแรงบิดภายนอกรบกวนเป็นแบบขั้นบันได (Step function) โดยมีค่าคงที่ที่ไม่เท่ากัน โดยค่าแรงบิดภายนอกค่าแรกจะใส่เข้าไปในระบบที่วินาทีที่ 14 และค่าแรงบิดภายนอกค่าที่สองจะใส่เข้าไปในวินาทีที่ 29 ตามลำดับ เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบและชดเชยให้กับตัวสังเกต การประมาณค่าของตัวแปรสเตรตจะมีความถูกต้องและทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัพท์มีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.20, 5.21, 5.22 และ 5.23



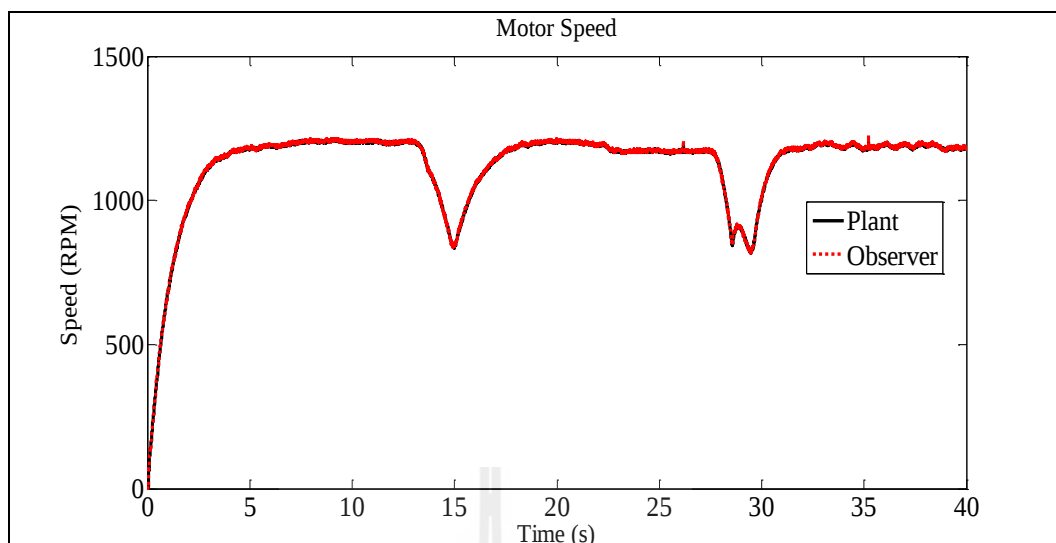
รูปที่ 5.20 ผลการตอบสนองของ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1.3

จากรูปที่ 5.20 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้จากการจำลองและการทดสอบ เมื่อทำการชดเชยให้กับตัวสังเกตในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ สำหรับกรณีที่แรงบิดภายนอกมีค่าคงที่ที่ไม่เท่ากัน จะเห็นว่าตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้จากการทดสอบจะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกเร็วกว่าตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้จากการจำลอง และในส่วนของการตอบสนองของแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้นั้นอาจจะไม่เท่ากัน ก็เนื่องมาจากการใส่แรงบิดภายนอกของการทดสอบ

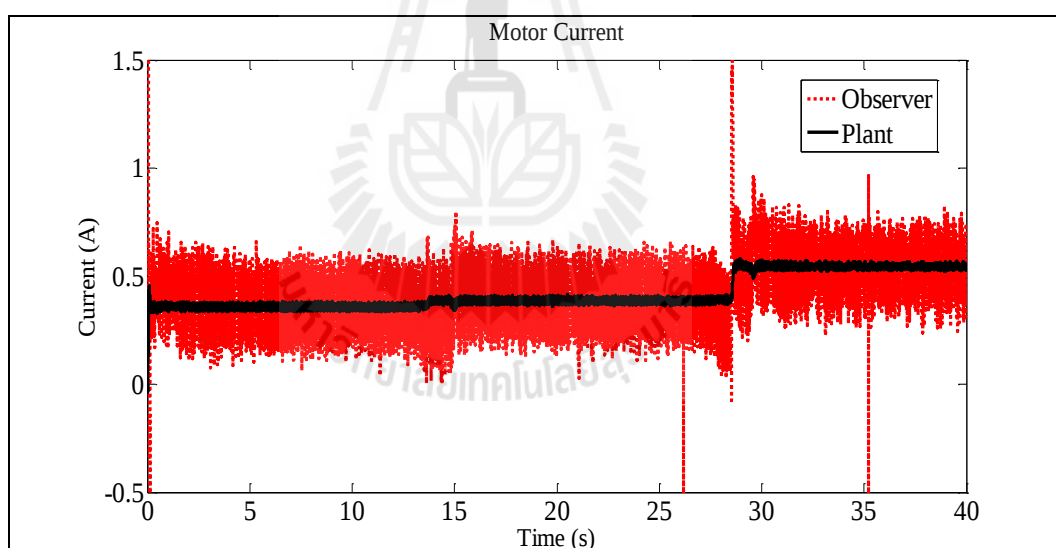


รูปที่ 5.21 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.3

จากรูป 5.21 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตจะลดลง และเมื่อตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ที่ประมาณจากตัวสังเกตและระบบก็จะมี ความถูกต้อง



รูปที่ 5.22 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.3



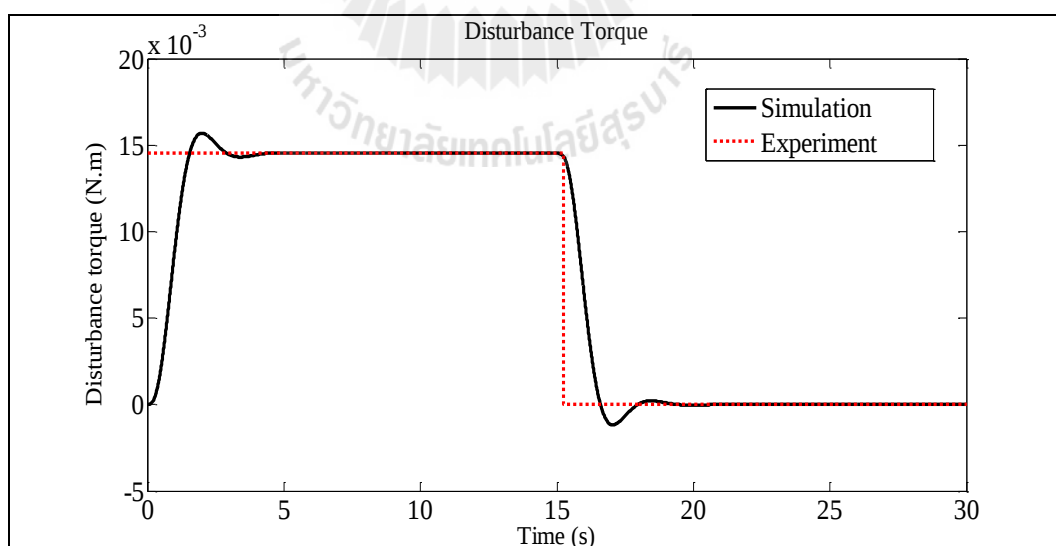
รูปที่ 5.23 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.3

จากรูปที่ 5.22 และ 5.23 เมื่อตัวชดเชยฟัซซี่ลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ในสภาวะมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์จะมีการปรับตัวเพิ่มขึ้นในสภาวะที่มี

แรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ เพื่อรักษาแรงบิดลัพธ์ให้ได้ตามอินพุตของระบบ และมีการแกว่งตัวเกิดขึ้น ในส่วนของผลการตอบสนองของความเร็วก็จะลดลงในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบแต่จะเพิ่มขึ้นแล้วเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากมีการชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต

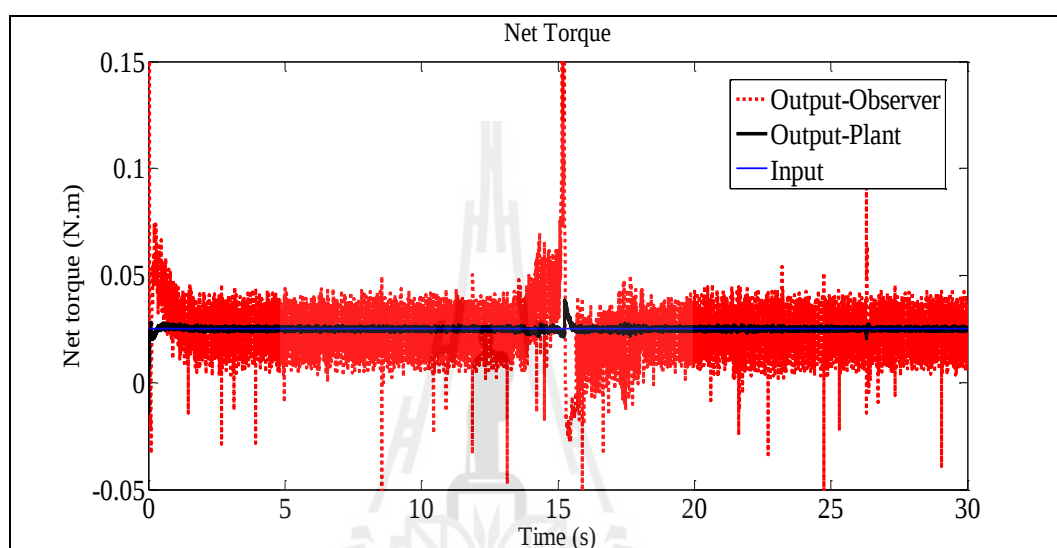
5.4.4 การทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 1.4

ผลการทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1.4 ระบบถูกแรงบิดภายนอกรบกวนเป็นแบบขั้นบันได (Step function) แรงบิดภายนอกจะกระทำกับระบบตั้งแต่เริ่มการทำงานจนถึงวินาทีที่ 15 และค่อยเอาแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบออก สำหรับกรณีนี้จะเป็นการทดสอบตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ว่าจะสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้หรือไม่ ผลที่ได้ คือ สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ ทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์มีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.24, 5.25, 5.26 และ 5.27



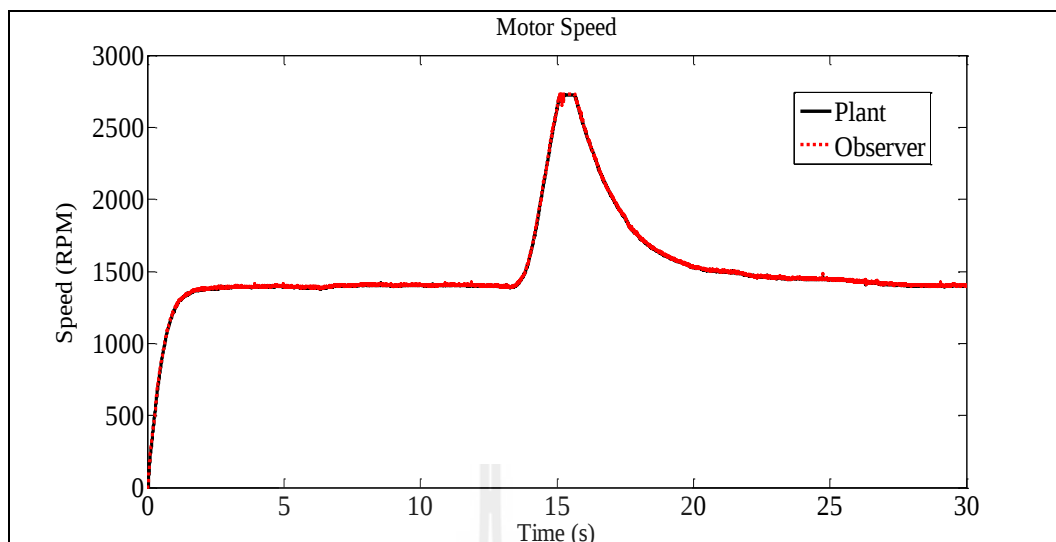
รูปที่ 5.24 ผลการตอบสนองของ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1.4

จากรูปที่ 5.24 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้จากการจำลองและการทดสอบ เมื่อทำการชดเชยให้กับตัวสังเกตในสถานะที่มีและไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้จากการทดสอบจะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกเร็วกว่าตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้จากการจำลอง

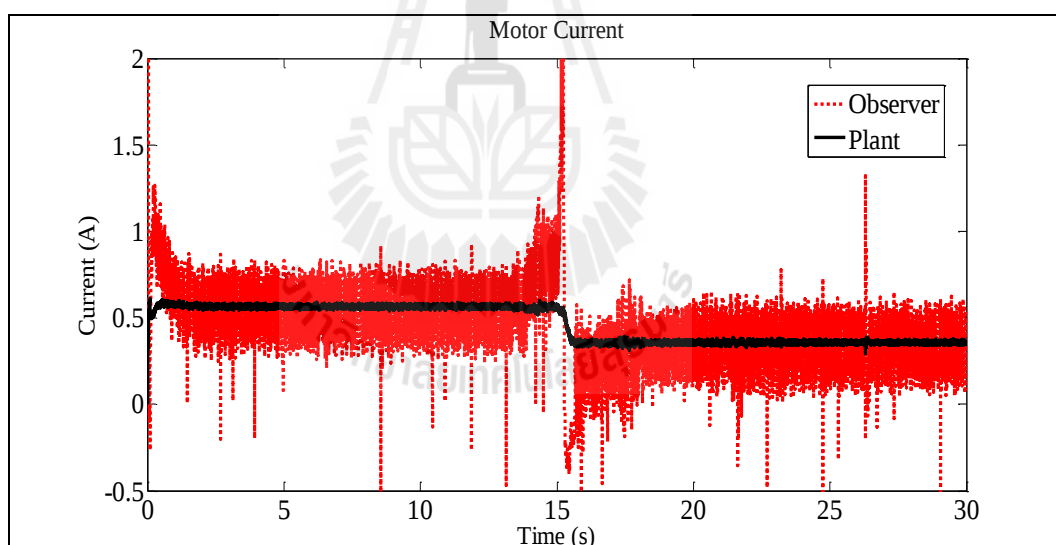


รูปที่ 5.25 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.4

จากรูป 5.25 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตในวินาทีที่ 15 เมื่อไม่มีแรงบิดภายนอกมากกระทำกับระบบ (เอาแรงบิดภายนอกออก) ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์จะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะแรงบิดลัพธ์ของตัวสังเกต แต่เมื่อตัวชดเชยฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองแรงบิดลัพธ์ที่ประมาณจากตัวสังเกตและของระบบก็จะมีค่าที่ถูกต้อง



รูปที่ 5.26 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.4



รูปที่ 5.27 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 1.4

จากรูปที่ 5.26 และ 5.27 เมื่อตัวชดเชยพีซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ทั้งในสภาวะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบและไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะแสดงให้เห็นว่าผลการตอบสนองกระแส

อาร์เมเจอร์จะมีการปรับตัวลดลงในสภาวะที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ (ตอนเอาแรงบิดภายนอกออก) เพื่อรักษาแรงบิดลัพธ์ให้ได้ตามอินพุตของระบบ

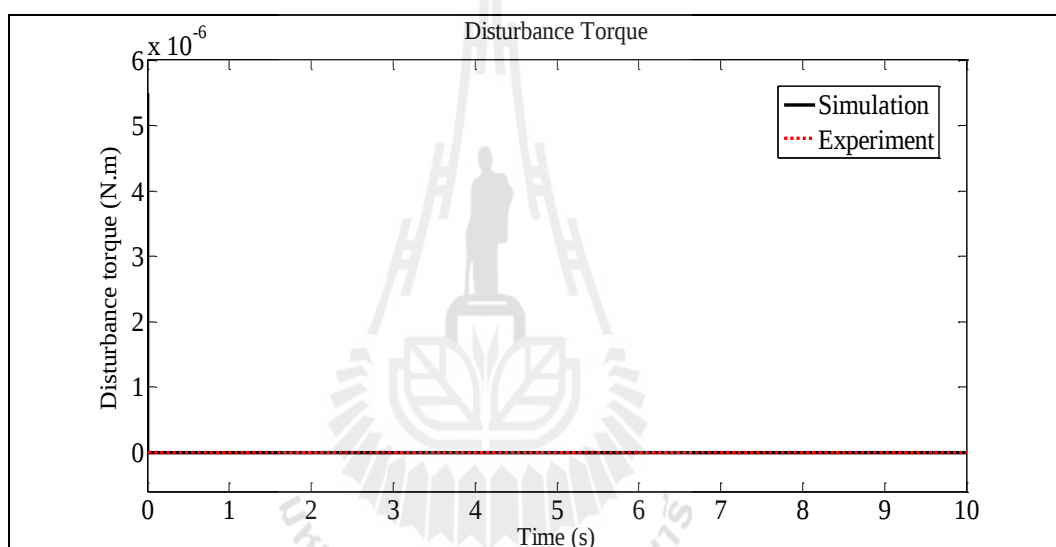
5.5 การทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2

พิจารณาการทำงานของระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2 คือ สัญญาณอินพุตที่กระทำกับระบบเป็นลักษณะแบบลาดเอียง (Ramp input) โดยการแบ่งกรณีสำหรับอินพุตแบบลาดเอียงก็จะถูกแบ่งตามลักษณะของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลง ($T_L(t)$) ที่รบกวนกับระบบ การรบกวนของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลต่อการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวสังเกต คือ ค่าความต่างศักย์อาร์เมเจอร์ ค่ากระแสอาร์เมเจอร์และค่าความเร็วรอบ เนื่องจากความแตกต่างที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของตัวสังเกตและระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยในการทดสอบสถานการณ์ระบบนี้เราจะสมมุติว่าเราทราบค่าของตัวแปรทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และสามารถวัดค่ากระแสอาร์เมเจอร์และค่าความเร็วของระบบได้ เพื่อให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตของตัวสังเกตมีประสิทธิภาพมากขึ้น และกำหนดว่าตัวแปรทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ ในขณะที่มีค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบ ซึ่งผลที่ได้นี้จะทำให้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของระบบได้ตามกรณีต่างๆที่แบ่งไว้ข้างต้น และเมื่อชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงนี้ให้กับระบบของตัวสังเกตจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตของตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง

สำหรับกรณีที่ 2 ระบบควบคุมแรงบิดเป็นแบบลาดเอียง (Ramp input) กล่าวคือ การควบคุมในลักษณะอินพุตแบบลาดเอียง (Ramp input) จะอ้างอิงที่ค่าความชันคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ในการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับกรณีนี้จะควบคุมค่าแรงบิดเริ่มต้นที่ 0.02 นิวตันเมตร ไปถึงค่าแรงบิดสุดท้ายที่ 0.03 นิวตันเมตรเป็นเวลา 10 วินาที ดังนั้น ระบบจะอ้างอิงอินพุตที่มีความชันเท่ากับ 0.001 นิวตันเมตร และจะแบ่งออกเป็นกรณีย่อย ๆ โดยพิจารณาจากแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่เข้ามารบกวนกับระบบได้ดังนี้

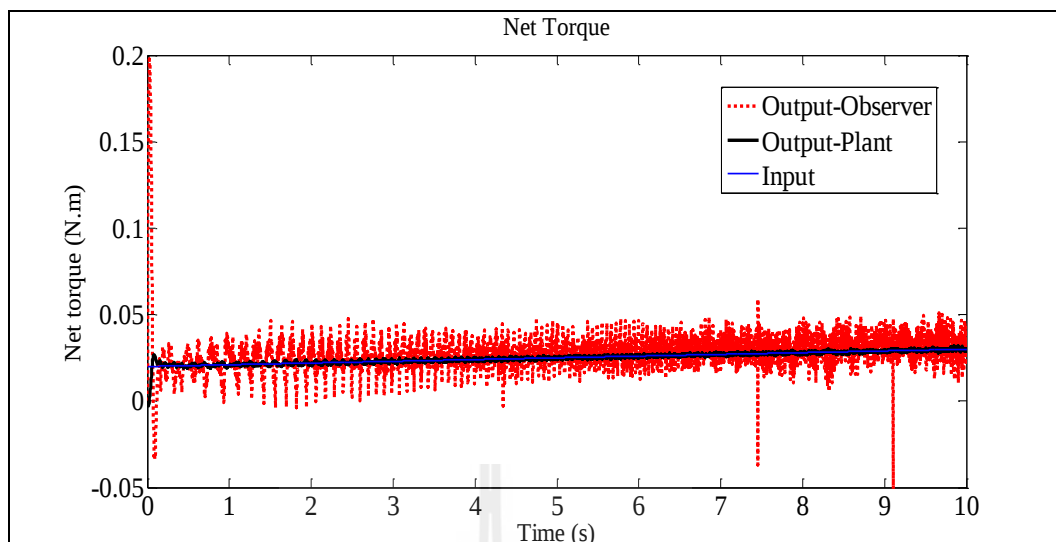
5.5.1 การทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2.1

ผลการทดสอบสถานการณ์ของระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2.1 ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบและตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่มีค่าเท่ากับศูนย์และชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าของตัวแปรสแตตจะมีความถูกต้องและทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.28, 5.29, 5.30 และ 5.31



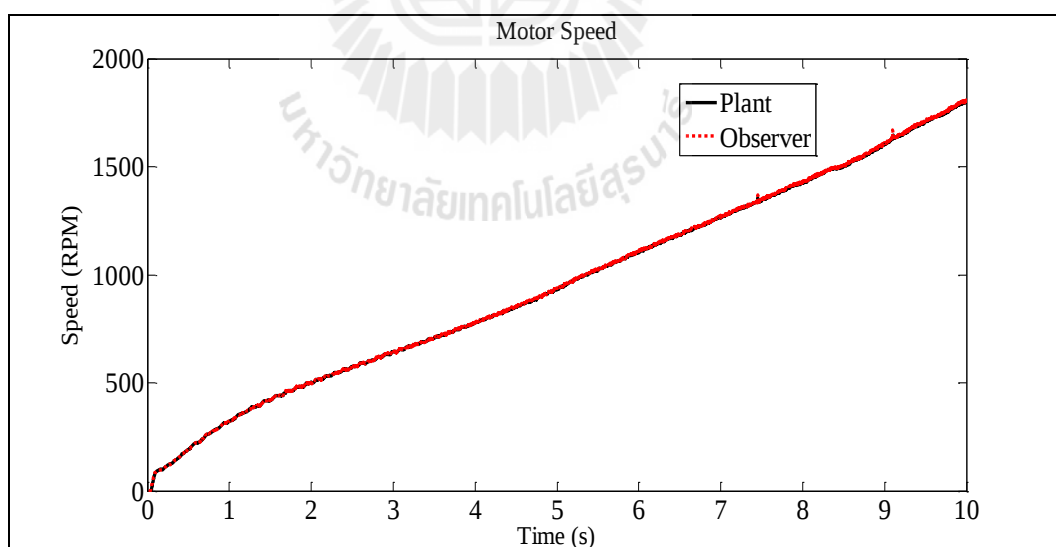
รูปที่ 5.28 ผลการตอบสนองของ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.1

จากรูปที่ 5.28 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้จากการจำลองและการทดสอบ เมื่อทำการชดเชยให้กับตัวสังเกต ในสถานะที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ แสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่มีค่าเท่ากับศูนย์

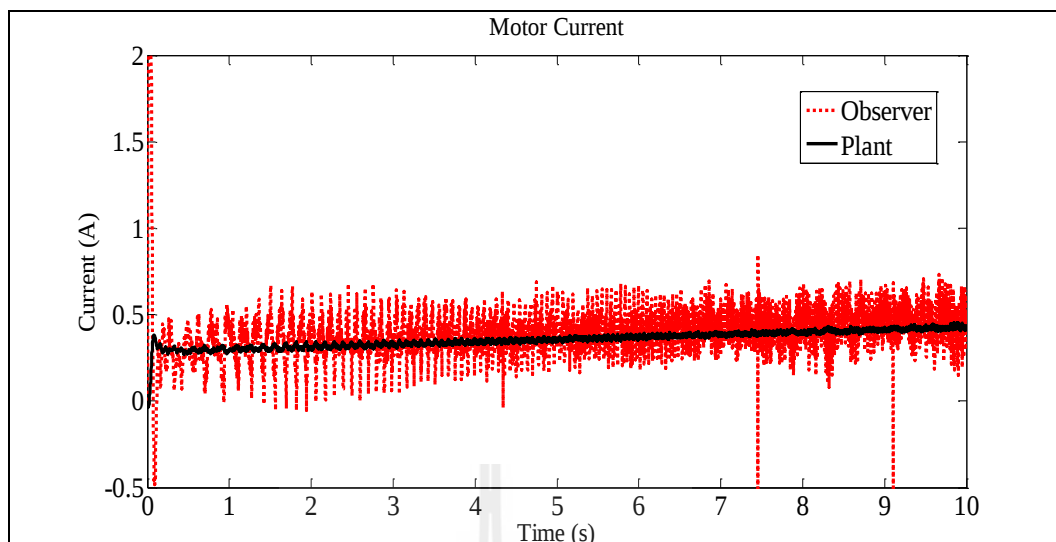


รูปที่ 5.29 ผลการตอบสนองของแรงบิดพัทธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.1

จากรูปที่ 5.29 ผลการตอบสนองของแรงบิดพัทธ์ของระบบและตัวสังเกตทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพตามอินพุตของระบบ



รูปที่ 5.30 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.1



รูปที่ 5.31 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.1

จากรูปที่ 5.30 และ 5.31 เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตรตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ในสภาวะที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่า ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วจะมีลักษณะเป็นแบบลาดเอียง (Ramp function) เหมือนกับลักษณะของอินพุตของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากค่าแรงบิดลัพท์จะสัมพันธ์กับค่ากระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วรอบโดยตรง

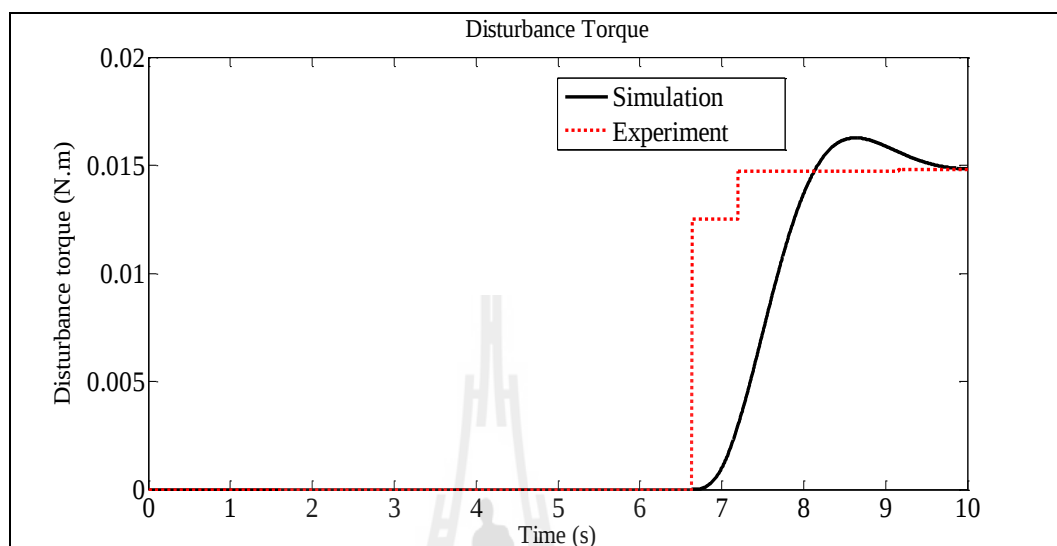
5.5.2 การทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้

สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2.2

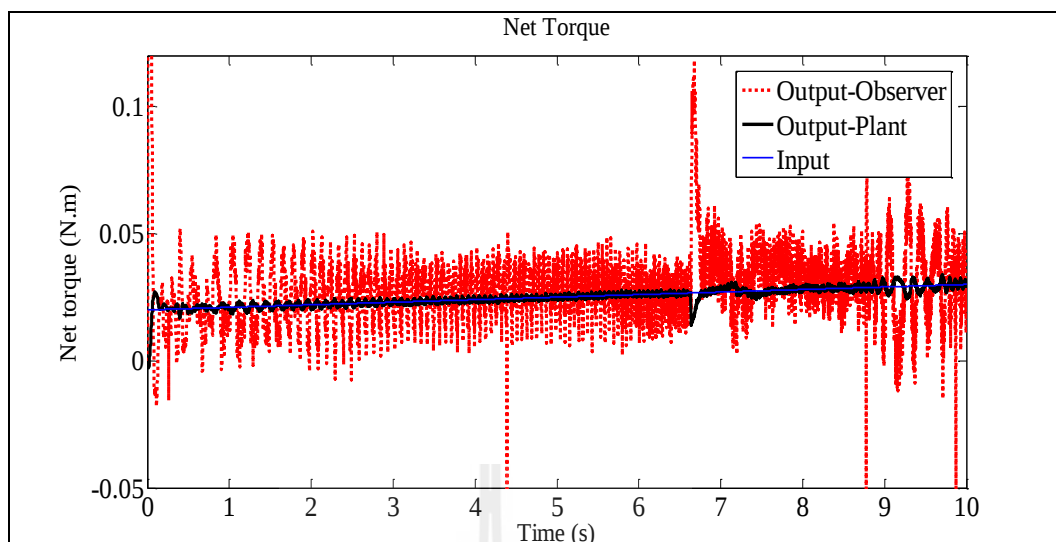
ผลการทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2.2 อินพุตของระบบจะเป็นแบบลาดเอียง (Ramp input) แต่ลักษณะของแรงบิดภายนอกที่กระทำกับระบบจะเป็นแบบขั้นบันได (Step function) ที่มีค่าคงที่ประมาณ 0.015 นิวตันเมตร จะเริ่มรบกวนกับระบบที่เวลาประมาณ 6.6 วินาที เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบและชดเชยให้กับตัวสังเกต การประมาณค่าของตัวแปรสเตรตจะมีความถูกต้องและทำให้ระบบควบคุม

แรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.32, 5.33, 5.34 และ 5.35



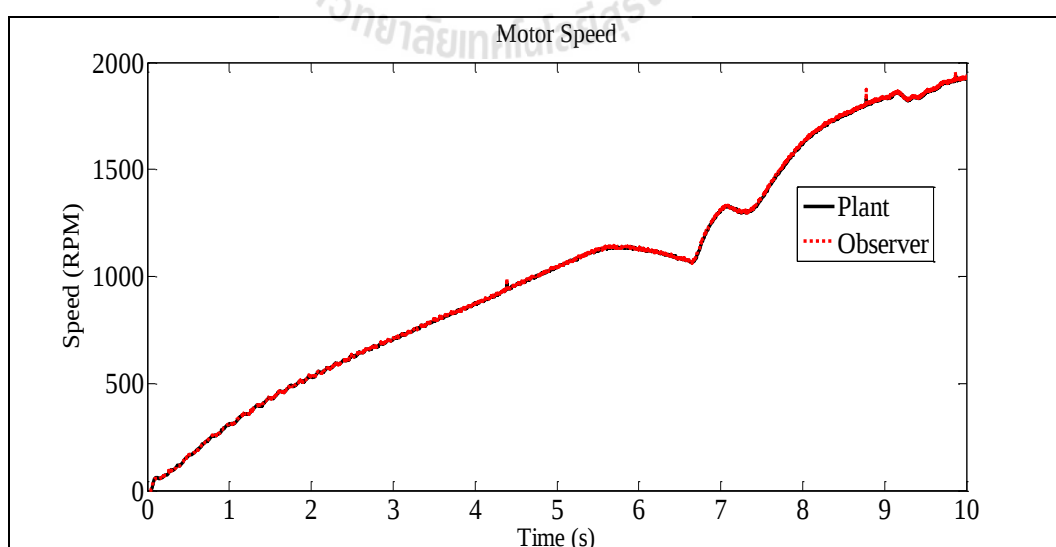
รูปที่ 5.32 ผลการตอบสนองของ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.2

จากรูปที่ 5.32 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟuzzyลอจิกแบบปรับตัวได้จากการจำลองและจากการทดสอบ เมื่อทำการชดเชยให้กับตัวสังเกตในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าตัวชดเชยฟuzzyลอจิกแบบปรับตัวได้จากการทดสอบจะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกเร็วกว่าตัวชดเชยฟuzzyลอจิกแบบปรับตัวได้จากการจำลอง

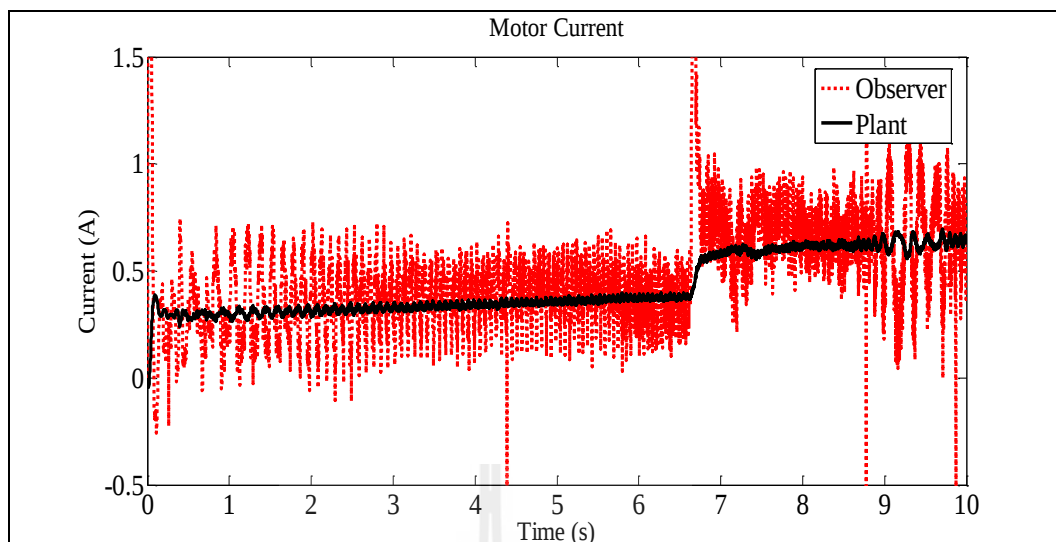


รูปที่ 5.33 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.2

จากรูป 5.33 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตจะลดลง และเมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ประมาณได้จากตัวสังเกตและของระบบก็จะมีค่าที่ถูกต้อง



รูปที่ 5.34 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.2



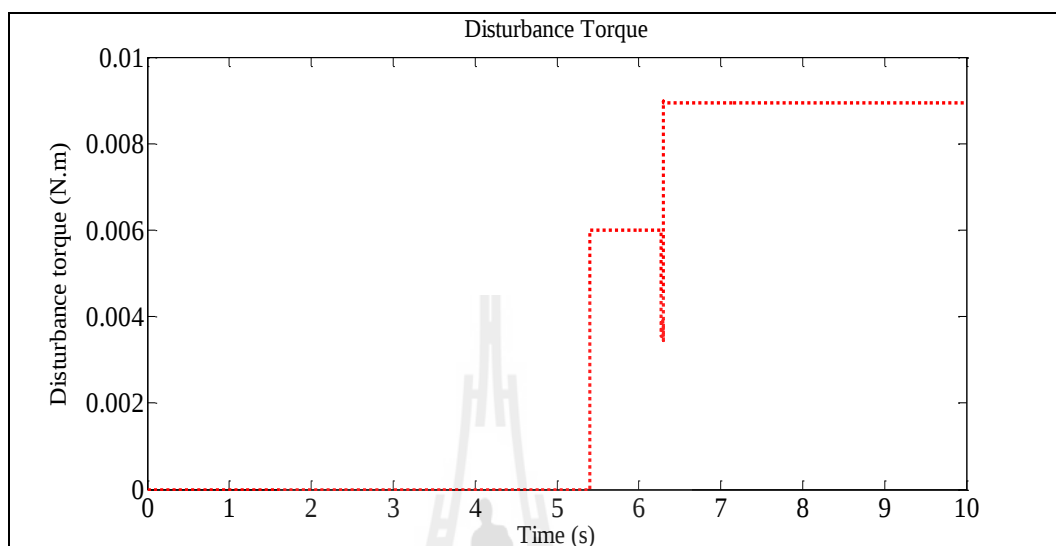
รูปที่ 5.35 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.2

จากรูปที่ 5.34 และ 5.35 เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์จะมีการปรับตัวเพิ่มขึ้นในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ เพื่อรักษาแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ได้ตามอินพุตของระบบ

5.5.3 การทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2.3

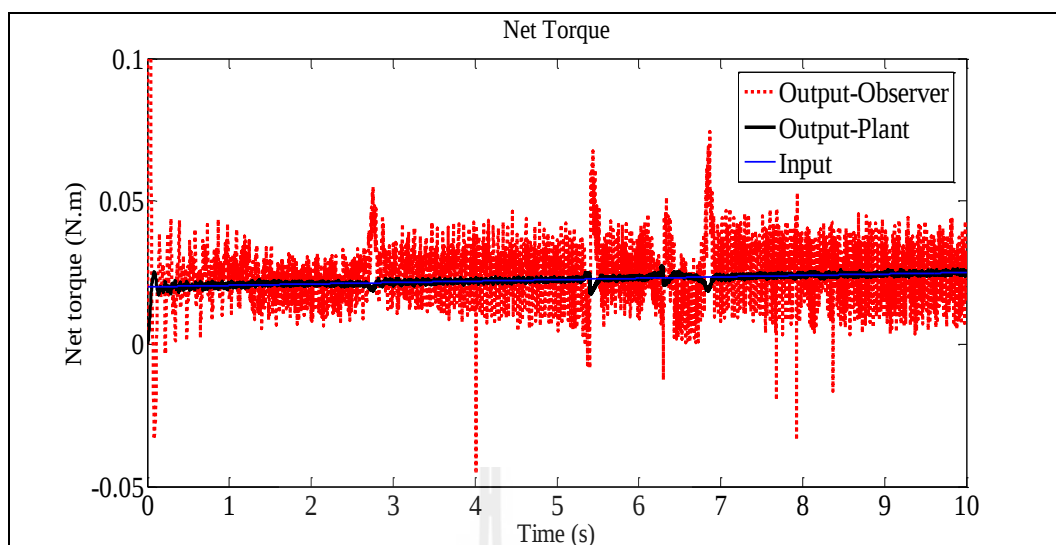
ผลการทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2.3 ระบบถูกแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนเป็นแบบขั้นบันได (Step function) โดยมีค่าที่ไม่เท่ากันสองค่า โดยค่าแรงบิดภายนอกค่าแรกจะใส่เข้ามารบกวนในระบบที่วินาทีที่ 5.5 มีค่าประมาณ 0.006 นิวตันเมตร และค่าแรงบิดภายนอกค่าที่สองจะเข้ามารบกวนกับระบบในวินาทีที่ 6.5 มีค่าประมาณ 0.009 นิวตันเมตร ตามลำดับ เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบและชดเชยให้กับตัวสังเกต การประมาณค่าของตัวแปรสแตตมีความถูกต้องแม่นยำและทำให้

ระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.36, 5.37, 5.38 และ 5.39



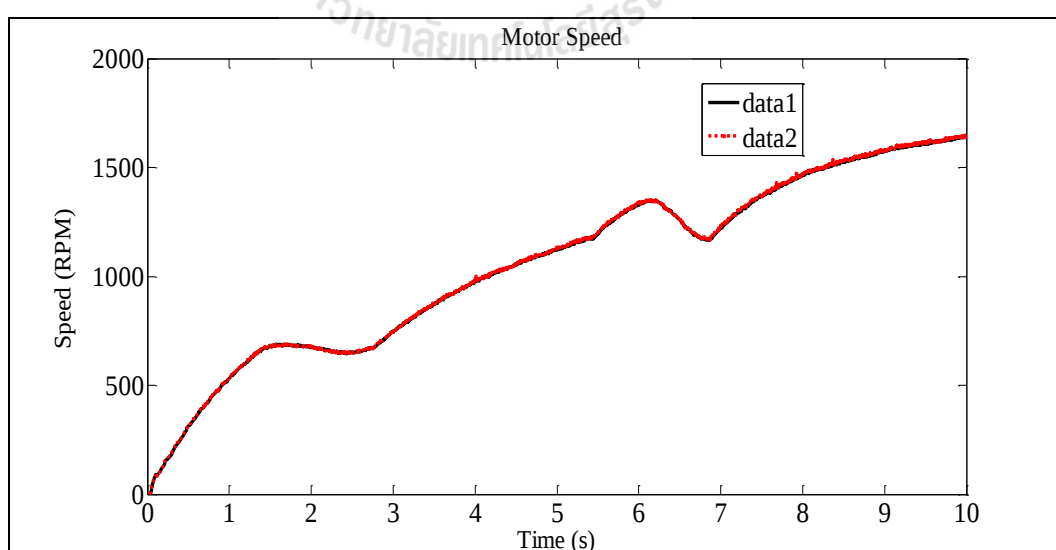
รูปที่ 5.36 ผลการตอบสนองของ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.3

จากรูปที่ 5.36 ผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอกที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟัซซี่ลอจิกแบบปรับตัวได้ของการทดสอบและทำการชดเชยให้กับตัวสังเกต ในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าตัวชดเชยฟัซซี่ลอจิกแบบปรับตัวได้จะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกค่อนข้างเร็ว

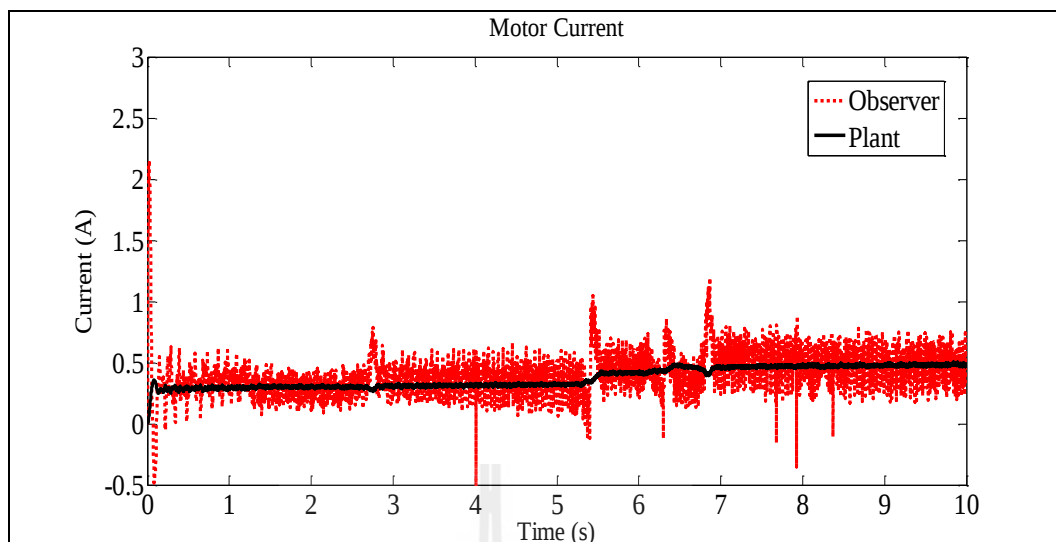


รูปที่ 5.37 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.3

จากรูป 5.37 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตจะลดลง และเมื่อตัวหัดเซชพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ประมาณได้จากตัวสังเกตและของระบบก็จะมีค่าที่ถูกต้อง



รูปที่ 5.38 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.3



รูปที่ 5.39 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.3

จากรูปที่ 5.38 และ 5.39 เมื่อตัวชดเชยพีซีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเทตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้อง ในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์จะมีการปรับตัวเพิ่มขึ้นในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ เพื่อรักษาแรงบิดผลลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ได้ตามอินพุตของระบบ

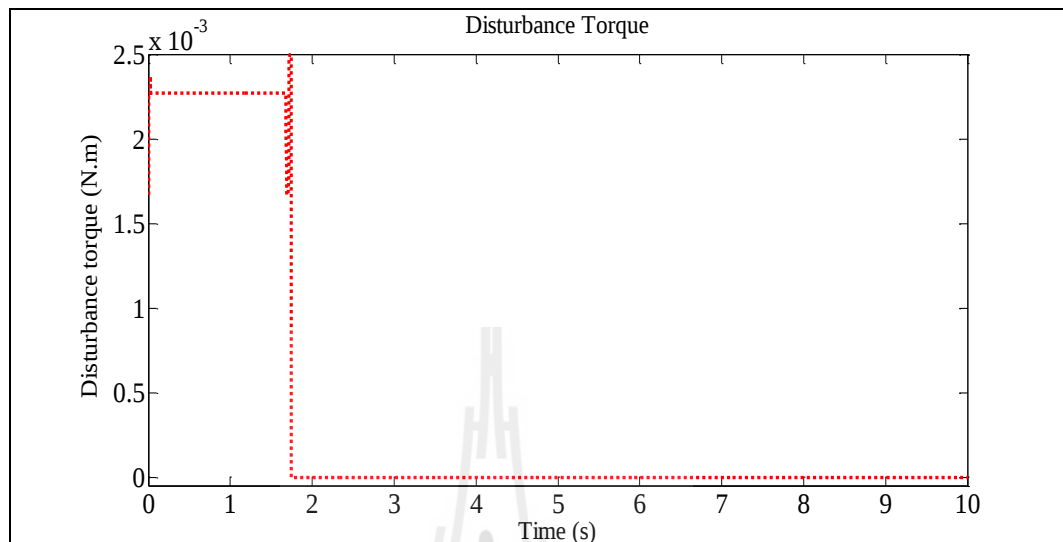
5.5.4 การทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดผลลัพธ์ของ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยพีซีลอจิกแบบปรับตัวได้

สำหรับประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบสำหรับกรณีที่ 2.4

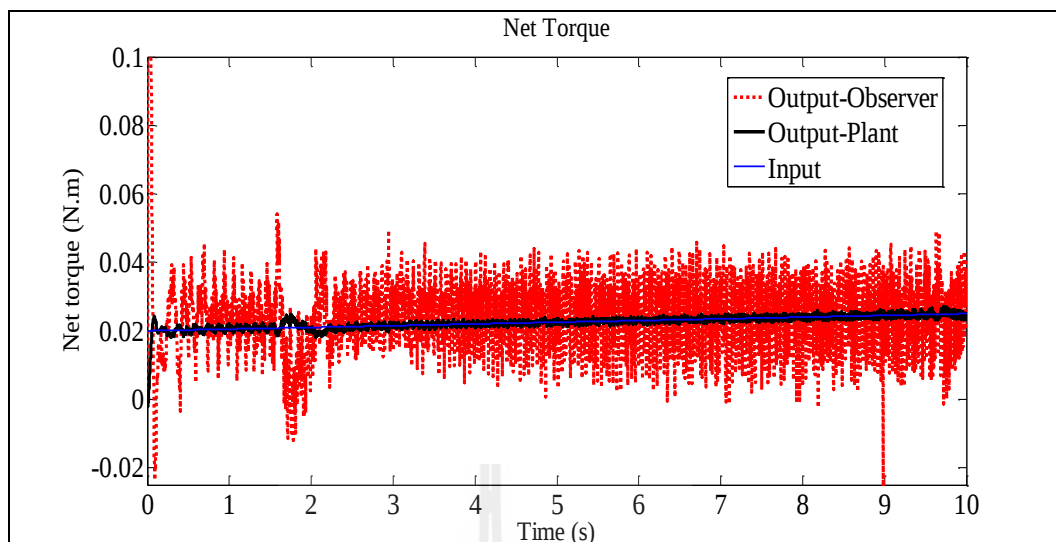
ผลการทดสอบสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุมแรงบิดผลลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2.4 ระบบถูกแรงบิดภายนอกรบกวนเป็นแบบขั้นบันได (Step function) แต่จะเริ่มรบกวนกับระบบตั้งแต่ระบบเริ่มทำงานไปจนถึงวินาทีที่ 1.8 โดยค่าแรงบิดภายนอกมีค่าประมาณ 0.0023 นิวตันเมตร และค่อยเอาแรงบิดภายนอกออกในกรณีนี้จะเป็นการทดสอบตัวชดเชยพีซีลอจิกแบบปรับตัวได้ว่าจะสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่รบกวนกับระบบได้หรือไม่ ผลที่ได้

คือ สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ ทำให้ระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.40, 5.41, 5.42 และ 5.43



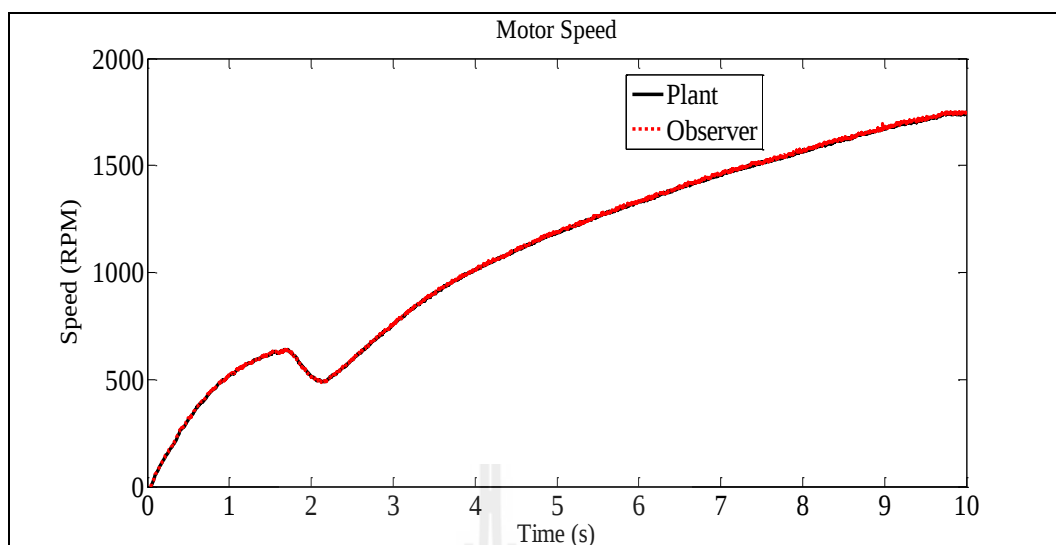
รูปที่ 5.40 ผลการตอบสนองของ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.4

จากรูปที่ 5.40 ผลการตอบสนองของแรงบิดภายนอก ที่ได้จากการประมาณโดยใช้วิธีการฟัซซี่ลอจิกแบบปรับตัวได้ของการทดสอบและทำการชดเชยให้กับตัวสังเกต ทั้งในสถานะที่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบและไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ จะเห็นว่าตัวชดเชยฟัซซี่ลอจิกแบบปรับตัวได้จะใช้เวลาในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกค่อนข้างเร็ว

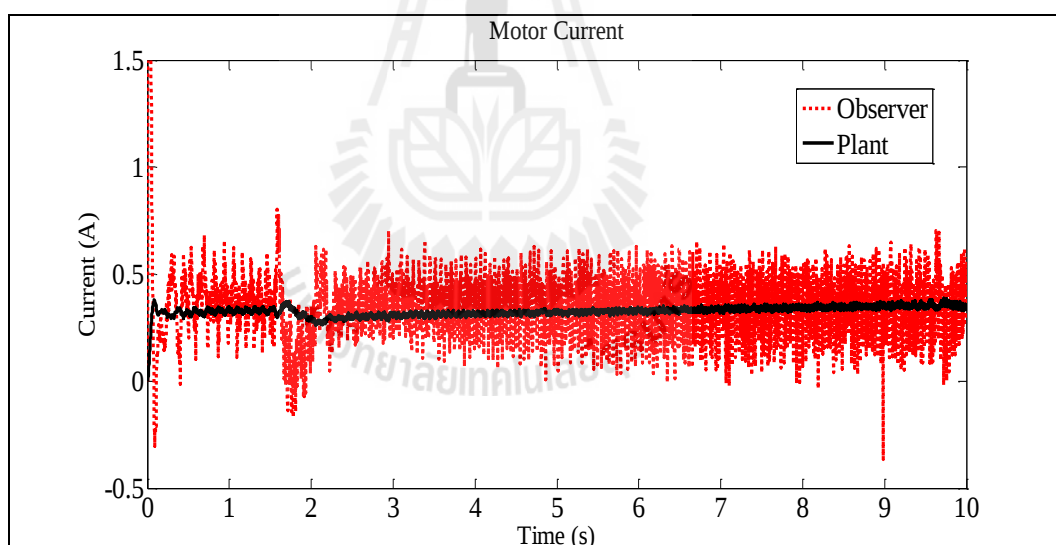


รูปที่ 5.41 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.4

จากรูป 5.41 ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์ของระบบและตัวสังเกตในวินาทีที่ 1.8 เมื่อไม่มีแรงบิดภายนอกมากระทำกับระบบ (เอาแรงบิดภายนอกออก) ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์จะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะแรงบิดลัพธ์ของตัวสังเกต แต่เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าและชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบให้กับตัวสังเกต ผลการตอบสนองแรงบิดลัพธ์ที่ประมาณจากตัวสังเกตและของระบบก็จะมีค่าที่ถูกต้อง



รูปที่ 5.42 ผลการตอบสนองของความเร็วของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.4



รูปที่ 5.43 ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบและตัวสังเกต สำหรับกรณีที่ 2.4

จากรูปที่ 5.42 และ 5.43 เมื่อตัวชดเชยพีซซีลอจิกแบบปรับตัวได้ประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบได้ถูกต้องและชดเชยให้กับตัวสังเกต ทำให้การประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งความเร็วและกระแสอาร์เมเจอร์มีความถูกต้องทั้งในสภาวะมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบและไม่มีแรงบิดภายนอกที่รบกวนกับระบบ ผลการตอบสนองของกระแสอาร์เมเจอร์จะมีการ

ปรับตัวลดลงในสภาวะที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนกับระบบ (ตอนเอาแรงบิดภายนอกออก) เพื่อรักษาแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ได้ตามอินพุตของระบบ

5.6 สรุป

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการออกแบบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบโดยรวมของระบบ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์สำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
2. การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ ได้ทำการออกแบบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ โดยประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่
 - ลูปรการควบคุมกระแส ทำหน้าที่ควบคุมกระแสอาร์เมเจอร์ของระบบปิด
 - ลูประบบควบคุมแบบพีไอ ทำหน้าที่สร้างสัญญาณอินพุตให้กับระบบปิด
3. การออกแบบตัวสังเกต จะใช้วิธีออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม โดยจะใช้ค่าโพลเดิมของระบบคำนวณหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต สำหรับหน้าที่ของตัวสังเกต คือ ประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบและประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่กระทำกับระบบปิด
4. การออกแบบตัวชดเชยแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้ โดยใช้วิธีการพีชชีลอจิก ผลที่ได้ คือ สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่กระทำกับระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติได้ในย่านของการทำงานที่มีค่าแรงบิดภายนอกอยู่ที่ประมาณ $0 - 0.015$ นิวตันเมตร โดยค่าแรงบิดภายนอกที่ประมาณได้จะถูกชดเชยให้กับตัวสังเกตต่อไป

สำหรับการสรุปผลด้านผลการตอบสนองของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติ สามารถสรุปได้ตามลักษณะอินพุตของระบบปิดที่ให้แก่ระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ ซึ่งประกอบไปด้วยอินพุตดังต่อไปนี้

1. อินพุตแบบขั้นบันได กล่าวคือ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพท์จะถูกควบคุมให้ได้ตามอินพุตของระบบปิด โดยค่าอินพุตของระบบปิดมีค่าเท่ากับ 0.025 นิวตันเมตร ทั้งกรณีที่ไม่และมีแรงบิดภายนอกมากระทำกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพท์จะมีการแกว่งตัวค่อนข้างมาก

2. อินพุตแบบลาดเอียง กล่าวคือ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์จะถูกควบคุมให้ได้ตามอินพุตของระบบปิด โดยค่าความชันของค่าอินพุตของระบบปิดมีค่าเท่ากับ 0.001 นิวตันเมตรต่อวินาที ทั้งกรณีที่ไม่มีและมีแรงบิดภายนอกมากระทำกับระบบ ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพธ์จะมีการแกว่งตัวค่อนข้างมาก



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงกับการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบโดยวิธีการพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้สำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติในกระบวนการขึ้นสกรู ซึ่งสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนและหน้าที่ได้ดังนี้

1. การเพิ่มอินทิเกรตเข้าไปในแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าในการควบคุมแรงบิดลัพท์สำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัตินั้นเป็นการเพิ่ม Type ของระบบ ซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวลดลง
2. ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ สำหรับควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงสำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติได้
3. ออกแบบตัวสังเกตเพื่อให้ได้ข้อมูลของตัวแปรสเตตที่อยู่ในระบบและใช้ค่าแรงบิดลัพท์ที่ประมาณได้เป็นค่าป้อนกลับให้ระบบ
4. ออกแบบตัวชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกต โดยใช้พีชชีลอจิกในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

ผลการจำลองสถานการณ์และการทดสอบให้ผลที่สอดคล้องกัน ดังต่อไปนี้

1. ผลการตอบสนองของระบบที่มีอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อมีแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเข้ามากระทำกับระบบ ระบบจะมีผลการตอบสนองของแรงบิดลัพท์และความเร็วลดลง ทำให้เกิดความผิดพลาด แต่เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบได้ถูกต้องและทำการชดเชยให้กับตัวสังเกต ตัวแปรสเตตของระบบก็จะมีค่าถูกต้อง ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพท์และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็จะมีค่าถูกต้อง

2. ผลการตอบสนองของระบบที่มีอินพุตแบบลาดเอียง ทำนองเดียวกัน คือ เมื่อมีแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเข้ามากระทำกับระบบ ระบบจะมีผลการตอบสนองของแรงบิดลัพท์และความเร็วลดลงทำให้เกิดความผิดพลาด แต่เมื่อตัวชดเชยพีชชีลอจิกประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบได้ถูกต้องและทำการชดเชยให้กับตัวสังเกต ตัวแปรสเตตของระบบ

ก็จะมีความถูกต้อง ผลการตอบสนองของแรงบิดลัพท์และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็
จะมีความถูกต้อง

3. การประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธีการพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้
ตัวชดเชยพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมี
ประสิทธิภาพสำหรับกรณีระบบที่มีอินพุตแบบขั้นบันได

6.2 ข้อเสนอแนะ

การควบคุมระบบแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับการประมาณค่าแรงบิด
ภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบโดยวิธีการของพีชชีลอจิกแบบปรับตัวได้สำหรับ
ประยุกต์ใช้กับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติในกระบวนการขึ้นสกรู มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. เราจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลของอินพุตและเอาต์พุตของระบบให้พอเพียงต่อการ
ออกแบบระบบพีชชีลอจิกในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่กระทำต่อระบบ

2. การทดสอบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจำเป็นต้องใช้ตัว
กรองสัญญาณเพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนภายนอกที่กระทำกับระบบเพื่อเพิ่ม
ประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

3. ในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบควบคุมแรงบิดลัพท์
ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรของ
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4. การทำงานวิจัยเพื่อพัฒนาต่อไปจากงานวิจัยที่ได้นำเสนอสมควรให้ความสนใจในด้าน
ของการพัฒนาวิธีการในการประมาณค่าตัวแปรของระบบเพื่อเพิ่มความถูกต้องของค่าแรงบิดที่
เปลี่ยนแปลงซึ่งได้จากการประมาณ และเทคนิคการคำนวณเพื่อให้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้มีความ
รวดเร็วในการตอบสนองมากขึ้น

5. งานวิจัยนี้สามารถนำหลักการออกแบบระบบควบคุมแรงบิดลัพท์ของมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรงประยุกต์ใช้กับเครื่องขึ้นสกรูอัตโนมัติในกระบวนการขึ้นสกรู เพื่อเป็นแนวทางในการ
พัฒนาด้านอุตสาหกรรมต่อไป

รายการอ้างอิง

- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). **ปัญญาเชิงคำนวณ**. (พิมพ์ครั้งที่1). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Katsuhiko Ogata, (2002). **Modern Control Engineering**. (4th Edition), USA, Prentice Hall.
- Richard C. Dorf and Robert H Bishop, (2005). **Modern Control Systems**. (10th Edition), London, Pearson Education.
- Kaneko, K., Komoriya, K., Ohnishi, K., and Tanie, K. (1992). Accurate Torque Control for a Geared DC Motor based on an Acceleration Controller. **Proceedings of the 1992 International Conference**, Vol.1, pp.395 – 400.
- Meakawa, H., (1999). Compact Servo Driver for Torque Control of DC Servo Motor Based on Voltage Control. **Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics**, pp.341 – 346.
- Srisertpol, J., and Khajorntraidet, C. (2009). Estimation of DC Motor Variable Torque Using Adaptive Compensation. **Proceeding CCDC'09 Proceedings of the 21st annual international conference on Chinese Control and Decision Conference**, pp.767 – 772.
- Wahyunggoro, O., and Saad, N. (2008). Evaluations of Fuzzy – Logic – Based Self Tuning PI Controller and Fuzzy Scheduled PID Controller for DC Servomotor. **Information Technology, 2008. ITSIm 2008. International Symposium**, Vol.1, pp.1 – 7.
- Fallahi, M., and Azadi, S. (2009). Fuzzy PID Sliding Mode Controller Design for the position control of a DC Motor. **International Conference on Education Technology and Computer**, pp.73 – 77.
- Iwasaki, M., and Matsui, N. (1993). Robust Speed Control of IM with Torque Feed forward Control. **Proceeding IEEE Transaction on Industrial Electronic**, Vol.40, pp.553 – 560.
- Hong, K., and Nam, K. (1998). A Load Torque Compensation Scheme Under the Speed Measurement Delay. **Journal of IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol.45, Issue 2, pp.283 – 290.

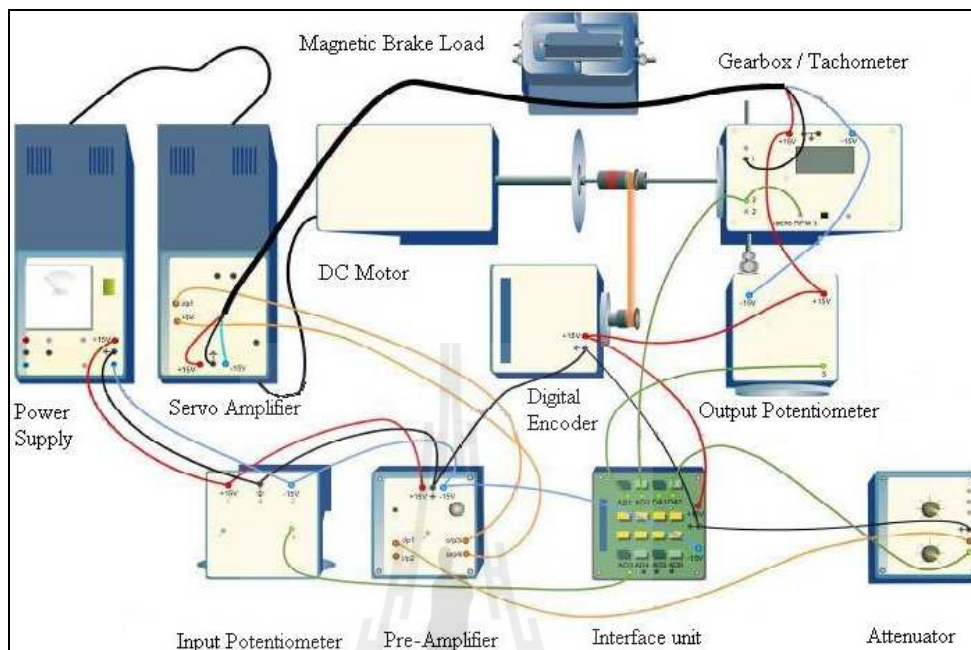
- Chang, G.K., and Chern, T.L. (2001). Design of Integral Variable Structure Model Following Control with Load Torque Estimator for DSP – based Servo Drive System. **Proceeding of IEEE International Electric Machines and Drives Conference**, pp.730 – 732.
- Casadei, D., Serra, G., Tanie, A., and Zarri, L. (2006). Assessment of direct torque control for induction motor drives. **Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences**. Vol.54. No.3. pp.237 – 254.
- Touforti, R., Meziane, S., Benalla, H. (2007). Direct torque control for induction motor using intelligent techniques. **Journal of Theoretical and Applied Information Technology**. pp.35 – 44.
- Ouassaid, M., Cherkaoui, M., Nejmi, A., and Maaroufi, M. (2005). Nolinear Torque Control for PMSM: A Lyapunov Technique Approach. **World Academy of Science Engineering and Technology 6**. pp.118 – 121.
- Prasomsak, P., Areerak, K.N., Areerak, K.L., and Srikaew, A. (2010). Control of shunt active power filters using fuzzy logic controller. **Proceeding of the IASTED International Conference Modelling Identification, and Control (AsiaMIC 2010)**. pp.107 – 113.
- Ahmed, F.S., Laghrouche, S., and El Bagdouri, M. (2010). Nonlinear modeling of Pancake DC Limited Angle Torque Motor base on LuGre friction model. **Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)**. pp.1 – 6.
- Dupuis, A., Ghribi, M., and Kaddouri, A. (2004). Multiobjective genetic estimation of DC motor parameter and load torque. **International Conference on Industrial Technology (ICIT)** Vol.3, pp.1511 – 1514.

ภาคผนวก ก

การติดตั้งและการเปรียบวัดเครื่องมือทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 การติดตั้งและการเปรียบวัดเครื่องมือทดสอบ

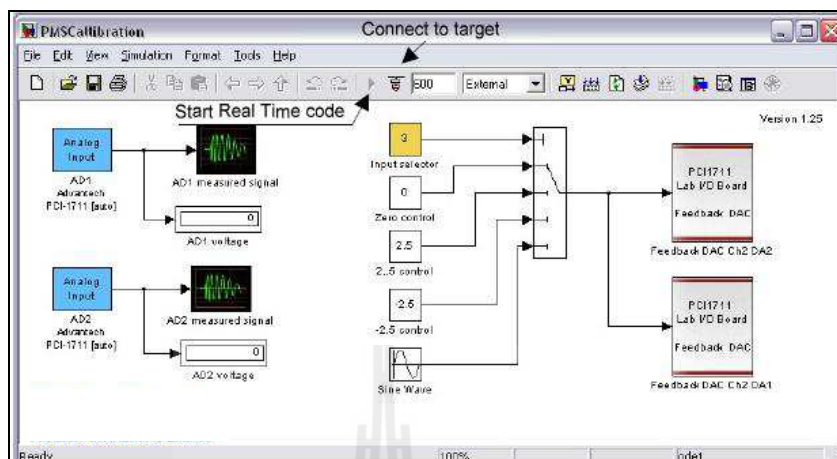


รูป ก.1 แสดงการติดตั้งและวงของเครื่องมือทดสอบ

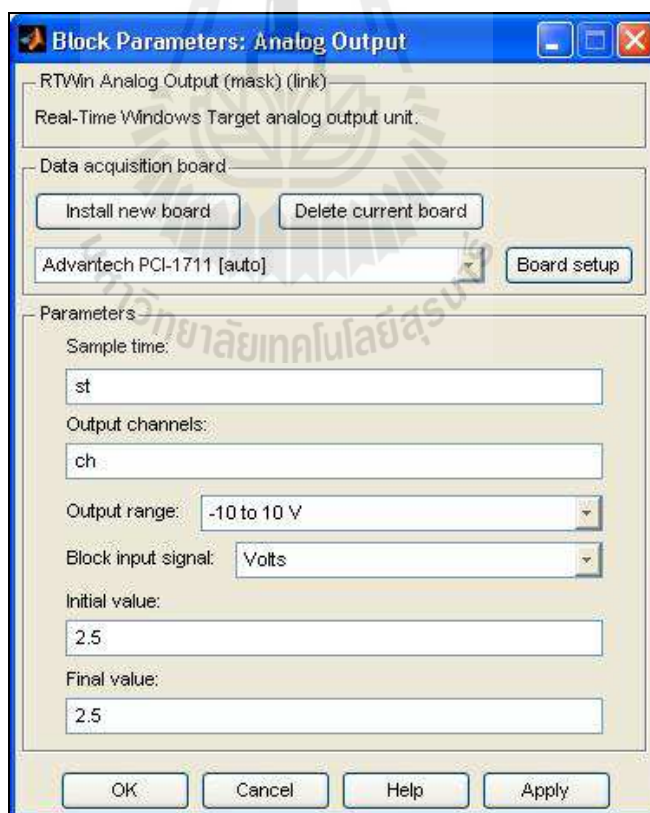
ก่อนการใช้งานเครื่องมือทดสอบต้องมีการเปรียบวัดช่องสัญญาณทั้งในส่วน Analog to Digital และ Digital to Analog ของอุปกรณ์ 33 – 301 Analog Control Interface การเปรียบวัดนี้ เครื่องมือวัดที่จำเป็นต้องใช้คือ Digital Volt Meter

1. ทำการเปิดโปรแกรม MATLAB และกำหนด Path ของโปรแกรม
2. เปิดไฟล์ชื่อ PMSCalibration.mld จะได้โปรแกรมที่แสดงในรูป ก.2
3. ทำการกำหนดค่าบอร์ดในการส่งผ่านข้อมูลใช้คำสั่ง Look Under the Mask ที่ Feedback DAC Block จะได้หน้าต่างแสดงดังรูปที่ ก.3
4. เลือกชนิดของบอร์ด Advantech PCI-1711 และปิดหน้าต่างโปรแกรม
5. ทำการถอดสายที่เชื่อมต่อ DAn และ ADn ออกทั้งหมดยกเว้นสายจ่ายไฟของอุปกรณ์ที่ยังคงไว้
6. Double Click ที่ Input Selector ของโปรแกรม PMSCalibration.mld ใส่ค่าเท่ากับ 3 ในค่าคงที่
7. เชื่อมต่อ Digital Volt Meter ระหว่าง Analog Output DA2 และ 0 Volt

8. Build RTW Model โดยกด CTRL+B หรือใช้ Menu : Tool : Build Model



รูป ก.2 แสดงโปรแกรมในการเปรียบวัด



รูป ก.3 แสดงรายละเอียด Analog Output Block

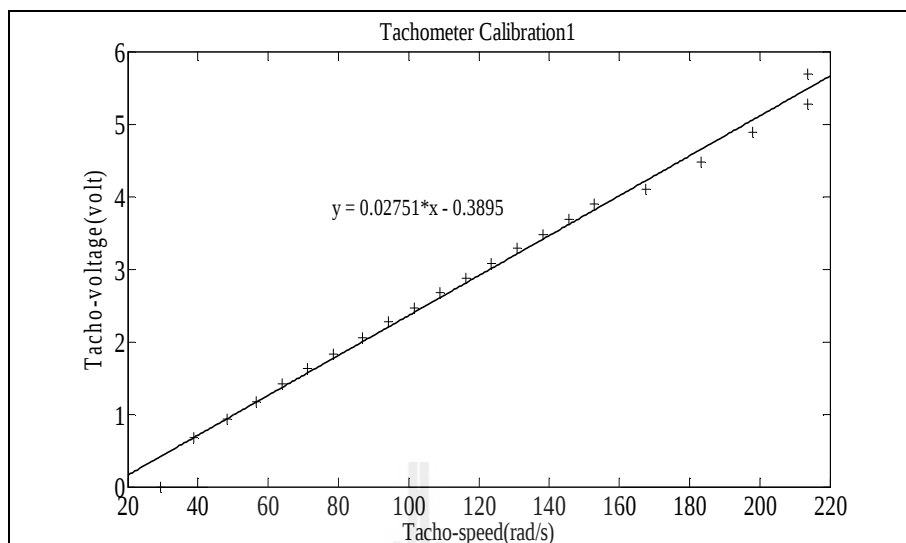
9. เลือก CONNECT TO TARGET และเปิดสวิตช์ PS150E Modular Servo หากมอเตอร์มีการหมุนเกิดขึ้นอาจปรับค่า Zero Set ที่ PA150C จนกว่ามอเตอร์จะหยุดหมุนหรือจะไม่ต้องทำก็ได้
10. ทำการรันโปรแกรมโดยกด START REAL TIME CODE (แสดงในรูปที่ ก2)
11. ปรับค่า OFFSET ที่ Potentiometer ซึ่งอยู่ตำแหน่งล่างของ DA2 บนอุปกรณ์ Analog Control Interface จนกระทั่งค่า Volt Meter อ่านค่าได้เท่ากับ 0 Volt ทำการหยุดรันโปรแกรม
12. เปลี่ยนค่าของ Input Selector ของโปรแกรม PMSCalibration.mld ให้เท่ากับ 2 และทำการรันโปรแกรมโดยไม่ต้องทำการ Build RTW Model
13. ปรับค่า GAIN / ATTN ที่ Potentiometer ซึ่งอยู่ตำแหน่งล่างของ DA2 บนอุปกรณ์ Analog Control Interface จนกระทั่งค่า Volt Meter อ่านค่าได้เท่ากับ 5 Volt ทำการปรับค่า OFFSET อีกครั้งจนกระทั่ง Volt Meter อ่านค่าได้เท่ากับ 2.5 Volt
14. เชื่อมต่อ AD1 และ AD2 เข้ากับ DA2 ที่เป็น Output
15. เปลี่ยนค่าของ Input Selector ของโปรแกรม PMSCalibration.mld ให้เท่ากับ 1 และทำการรันโปรแกรม
16. ปรับค่า OFFSET ที่ Potentiometer ซึ่งอยู่ตำแหน่งล่างของ AD1 และ AD2 บนอุปกรณ์ Analog Control Interface จนกระทั่งค่า Display ภายในโปรแกรมของ AD1 และ AD2 อ่านค่าได้เท่ากับ 0 Volt หยุดการรันโปรแกรม
17. เปลี่ยนค่าของ Input Selector ของโปรแกรม PMSCalibration.mld ให้เท่ากับ 2 และทำการรันโปรแกรม
18. ปรับค่า GAIN / ATTN ที่ Potentiometer ซึ่งอยู่ตำแหน่งล่างของ AD1 และ AD2 บนอุปกรณ์ Analog Control Interface จนกระทั่งค่า Display ภายในโปรแกรมของ AD1 และ AD2 อ่านค่าได้เท่ากับ 2.5 Volt หยุดการรันโปรแกรม
19. ปิดเครื่องและทำการเชื่อมต่อสายไฟให้กลับเป็นดังรูปที่ ก1
20. เปิดเครื่องอีกครั้งและทำการปรับค่าของ Zero Set ที่ PA150C จนกระทั่งมอเตอร์หยุดหมุน เครื่องมือทดลองในขณะนี้พร้อมใช้งานแล้ว

ก.2 การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (GT150X)

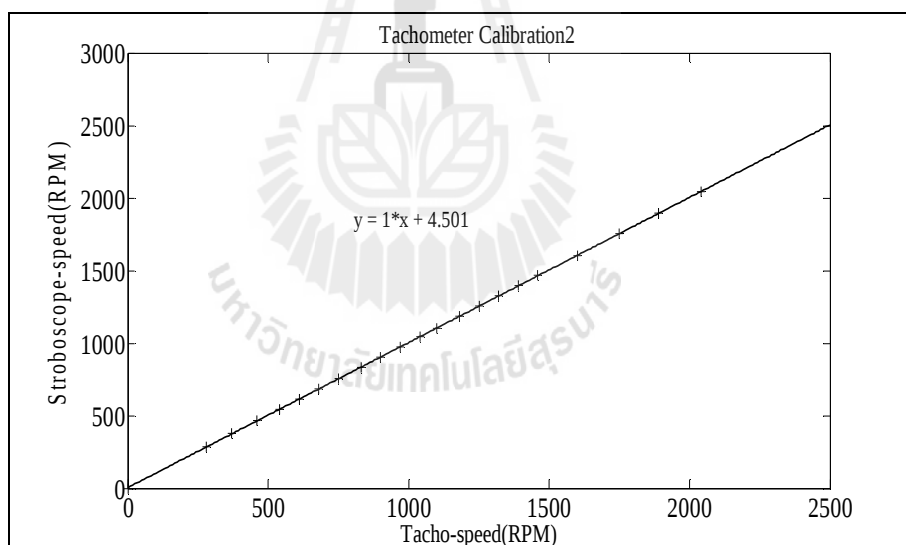
จำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงเพื่อหาค่า Sensitivity ของ Potentiometer และทำการเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความเร็วรอบจริง

ตาราง ก.1 แสดงผลการวัดและการคำนวณค่าความเร็วรอบและค่าความต่างศักย์ของอุปกรณ์

GT150X (rad/s)	GT150X (RPM)	GT150X (Volt)	Stroboscope (RPM)
0.00	0.00	0.00	0.00
29.32	280.00	0.68	285.23
38.75	370.00	0.94	376.55
48.17	460.00	1.17	466.21
56.55	540.00	1.42	545.70
63.88	610.00	1.63	615.17
71.21	680.00	1.83	685.12
78.54	750.00	2.05	755.24
86.92	830.00	2.28	835.00
94.25	900.00	2.46	904.87
101.58	970.00	2.68	975.11
108.91	1040.00	2.88	1044.17
116.24	1100.00	3.08	1103.67
123.57	1180.00	3.29	1184.00
130.90	1250.00	3.48	1255.15
138.23	1320.00	3.69	1325.83
145.56	1390.00	3.90	1396.50
152.89	1460.00	4.10	1465.25
167.55	1600.00	4.48	1604.85
183.26	1750.00	4.89	1754.00
197.92	1890.00	5.28	1894.67
213.63	2040.00	5.69	2044.95



รูป ก.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและค่าความต่างศักย์ของ GT150X



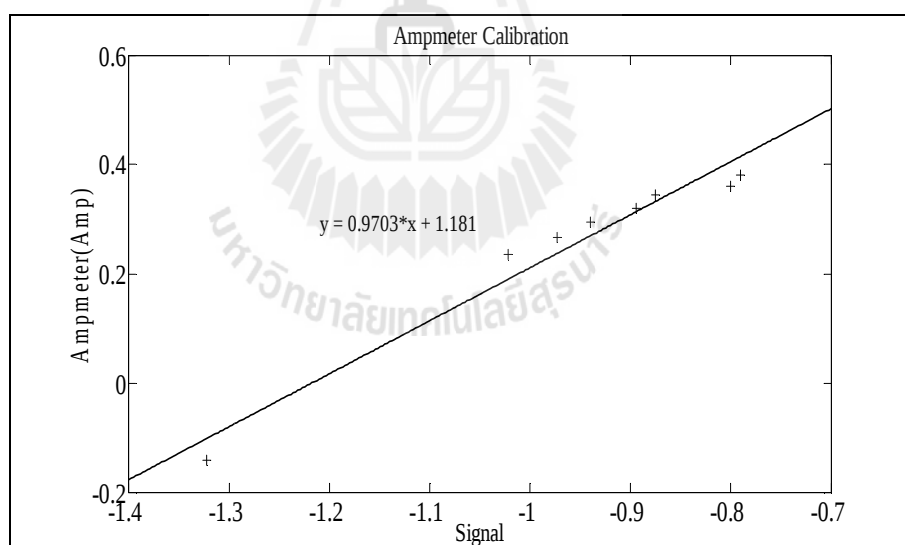
รูป ก.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของ GT150X และความเร็วรอบที่วัดได้จาก Stroboscope

ก.3 การเปรียบเทียบวัดอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า

จำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่ากระแสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณดิจิทัลที่เข้าสู่คอมพิวเตอร์กับค่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ไม่มีแรงบิดภายนอกมารบกวนกับระบบ

ตาราง ก.2 แสดงผลการวัดค่ากระแสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

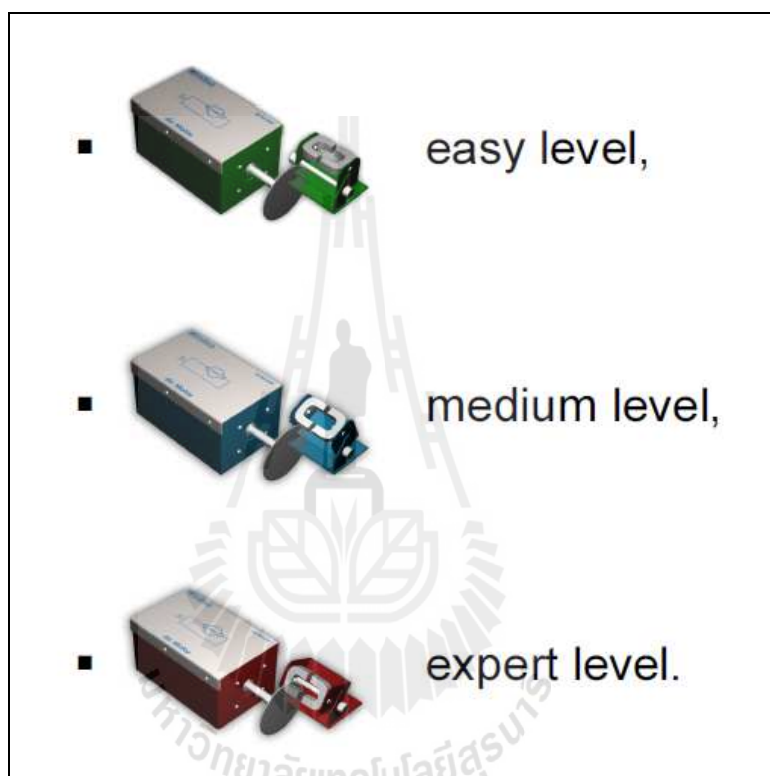
GT150X (RPM)	Signal	Amp meter (Volt/Amp)
0.00	-1.322	-0.141
330.00	-1.022	0.235
680.00	-0.973	0.267
980.00	-0.940	0.295
1280.00	-0.894	0.320
1570.00	-0.875	0.345
1870.00	-0.800	0.360
2150.00	-0.790	0.380



รูป ก.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณและค่ากระแสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ก.4 การประมาณค่าโหลดแรงบิดที่รบกวนกับระบบ

ชุดอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองเป็น โหลดแรงบิดภายนอก คือ Magnetic Brake Load ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการทางแม่เหล็กถาวรเพื่อสร้างโหลดแรงบิด โดยสามารถแบ่งตามขนาดหรือระดับของโหลดแรงบิดได้เป็น 3 ลำดับ ได้แก่ Easy level, Medium level และ Expert level ตามลำดับ ดังรูปต่อไปนี้



รูป ก.7 แสดงระดับของโหลดแรงบิดสำหรับ Magnetic Brake Load

สำหรับการทดลองจะใช้ในระดับของ Easy level และในย่านความเร็วในช่วง 0 – 2000 RPM ซึ่งสามารถวัดค่าและประมาณค่าโหลดแรงบิดที่รบกวนกับระบบได้ดังตาราง

ตาราง ก.3 แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
และประมาณค่าโหลดแรงบิดที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที

500rpm						
Amp (A)	Voltage (Volt)	Speed (rpm)	Disturbance Torque (N.m)	Magnetic Level	Power (watt)	Net Current(A)
0.236	3.385	485	0.01649	0	0.79717	0.2355
0.237	3.378	480	0.00011	1	0.80047	0.0015
0.283	3.335	445	0.00329	2	0.94214	0.0470
0.353	3.266	400	0.00819	3	1.15126	0.1170
0.456	3.159	335	0.01540	5	1.43870	0.2200
0.635	2.969	220	0.02797	10	1.88499	0.3995
0.977	2.645	0	0.05187	stopped	2.58284	0.7410

ตาราง ก.4 แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
และประมาณค่าโหลดแรงบิดที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที

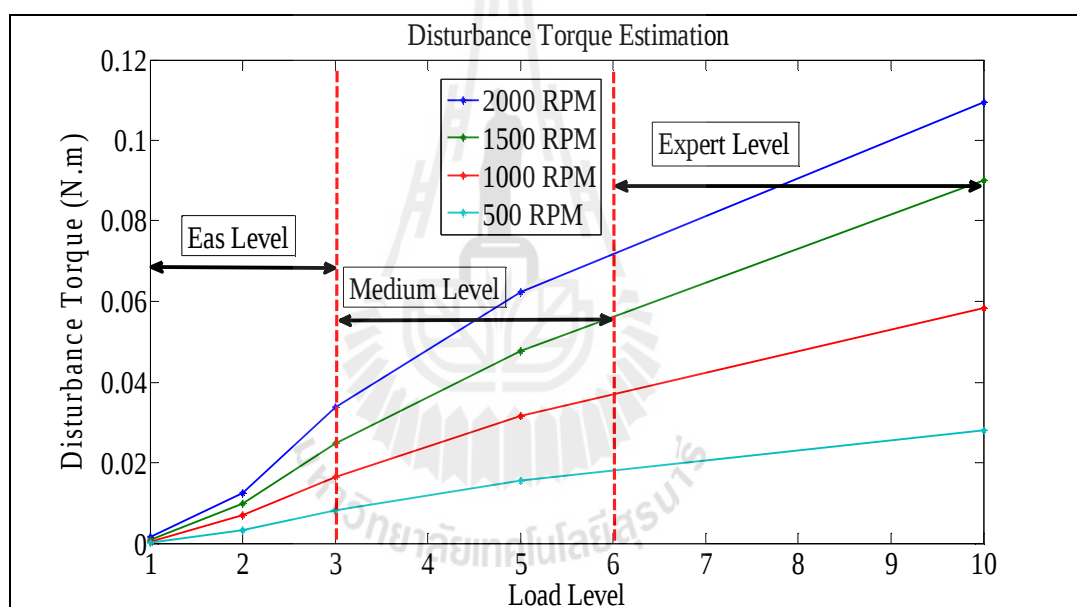
1000rpm						
Amp (A)	Voltage (Volt)	Speed (rpm)	Disturbance Torque (N.m)	Magnetic Level	Power (watt)	Net Current (A)
0.265	6.220	995	0.01855	0	1.64830	0.2650
0.271	6.215	985	0.00042	1	1.68427	0.0060
0.366	6.120	920	0.00707	2	2.23992	0.1010
0.502	5.980	825	0.01656	3	2.99897	0.2365
0.716	5.755	690	0.03154	5	4.11770	0.4505
1.099	5.325	470	0.05838	10	5.85218	0.8340
1.951	3.500	0	0.11799	stopped	6.82675	1.6855

ตาราง ก.5 แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
และประมาณค่าโหลดแรงบิดที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที

1500rpm						
Amp (A)	Voltage (Volt)	Speed (rpm)	Disturbance Torque (N.m)	Magnetic Level	Power (watt)	Net Current(A)
0.298	9.115	1515	0.02086	0	2.71627	0.2980
0.309	9.105	1500	0.00074	1	2.80889	0.0105
0.438	8.975	1415	0.00977	2	3.92656	0.1395
0.652	8.750	1270	0.02478	3	5.70500	0.3540
0.981	8.395	1080	0.04781	5	8.23550	0.6830
1.585	7.750	725	0.09009	10	12.28375	1.2870
1.964	3.900	0	0.11659	stopped	7.65765	1.6655

ตาราง ก.6 แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และประมาณค่าโหลดแรงบิดที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที

2000rpm						
Amp (A)	Voltage (Volt)	Speed (rpm)	Disturbance Torque (N.m)	Magnetic Level	Power (watt)	Net Current(A)
0.336	12.135	2030	0.02352	0	4.07736	0.3360
0.358	12.105	2010	0.00158	1	4.32754	0.0225
0.513	11.940	1915	0.01243	2	6.11925	0.1775
0.819	11.620	1730	0.03385	3	9.51097	0.4835
1.226	11.100	1465	0.06237	5	13.60860	0.8910
1.900	9.335	900	0.10952	10	17.73183	1.5645
1.972	3.850	0	0.11459	stopped	7.59220	1.6370



รูป ก.8 แสดงโหลดแรงบิดในแต่ละระดับที่ได้จากการประมาณของ Magnetic Brake Load

ก.5 ความสัมพันธ์ของความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

(Torque – Speed Curve)

จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยนี้ การเก็บข้อมูลจากเครื่องทดสอบจะทำการเก็บ 3 ครั้งและทำการหาค่าเฉลี่ย เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดสอบ

ตาราง ก.7 แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ที่ความเร็วสภาวะปกติ 2000 รอบต่อนาที

2000RPM			
Current(A)	Voltage(Volt)	Speed(RPM)	Estimated Torque(N.m)
0.336	12.135	2030	0.023520
0.358	12.105	2010	0.025025
0.513	11.94	1915	0.035875
0.819	11.62	1730	0.057295
1.226	11.11	1465	0.085820
1.900	9.335	900	0.132965
1.972	3.850	0	0.138040

ตาราง ก.8 แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ที่ความเร็วสภาวะปกติ 1500 รอบต่อนาที

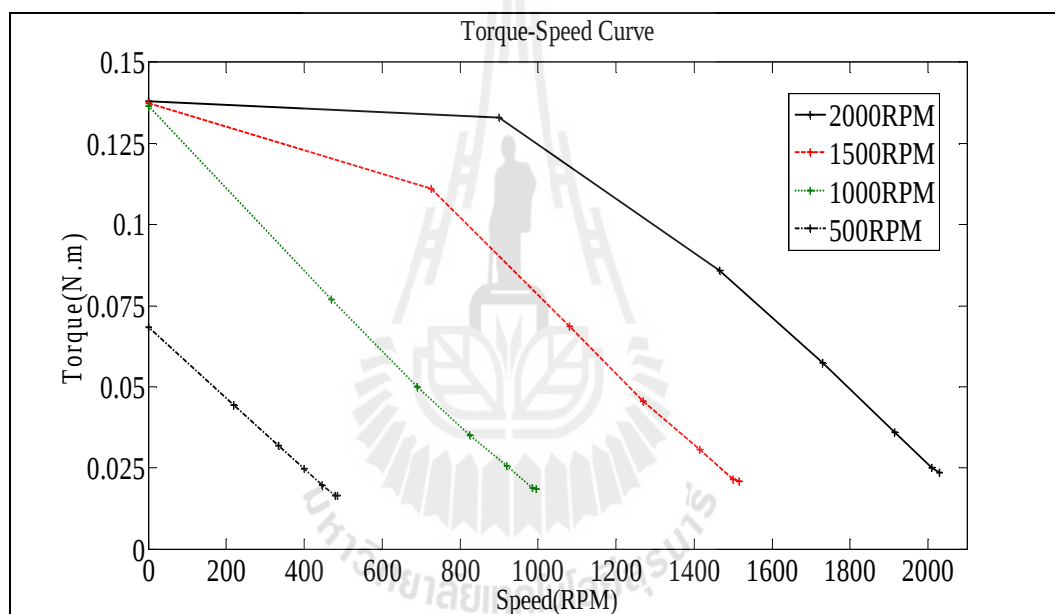
1500RPM			
Current(A)	Voltage(Volt)	Speed(RPM)	Estimated Torque(N.m)
0.298	9.115	1515	0.020860
0.309	9.105	1500	0.021595
0.438	8.975	1415	0.030625
0.652	8.750	1270	0.045640
0.981	8.395	1080	0.068670
1.585	7.750	725	0.110950
1.964	3.900	0	0.137445

ตาราง ก.9 แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ที่ความเร็วสภาวะปกติ 1000 รอบต่อนาที

1000RPM			
Current(A)	Voltage(Volt)	Speed(RPM)	Estimated Torque(N.m)
0.265	6.220	995	0.018550
0.271	6.215	985	0.018970
0.366	6.120	920	0.025620
0.502	5.980	825	0.035105
0.716	5.755	690	0.050085
1.099	5.325	470	0.076930
1.951	3.500	0	0.136535

ตาราง ก.10 แสดงผลการวัดค่ากระแส ความต่างศักย์ และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ที่ความเร็วสภาวะปกติ 500 รอบต่อนาที

500RPM			
Current(A)	Voltage(Volt)	Speed(RPM)	Estimated Torque(N.m)
0.236	3.385	485	0.016485
0.237	3.378	480	0.016590
0.283	3.335	445	0.019775
0.353	3.266	400	0.024675
0.456	3.159	335	0.031885
0.635	2.969	220	0.044450
0.977	2.645	0	0.068355



รูป ก.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ภาคผนวก ข

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ

DC direct drive brushed motors - Ø 42 mm 22 to 52 Watts	
Selling points of the range	
A range of small D.C. direct-drive brushed motors with a case diameter of 42 mm and between 22 and 52 Watts output power.	
- Available in either 12 or 24 V D.C. versions. - Sintered bronze bearings lubricated for life - Supply connection by 2 leads	
Part number characteristics	82 850 002
Type	828500
Voltage	24 V
Option	
No-load characteristics	
Speed of rotation (rpm)	4050
Absorbed power (W)	7.44
Absorbed current (A)	0.31
Nominal characteristics	
Speed (rpm)	3200
Torque (mNm)	100
Usable power (W)	33.5
Absorbed power (W)	52
Absorbed current (A)	2.15
Gearbox case temperature rise (°C)	54
Efficiency (%)	64
General characteristics	
Insulation class (conforming to IEC 85)	F (155 °C)
Protection (IEC 529) Terminal	IP20
Max. output power (W)	52
Start torque (mNm)	490
Starting current (A)	9.6
Resistance (Ω)	2.5
Inductance (mH)	2.5
Torque constant (Nm/A)	0.052
Electrical time constant (ms)	1
Mechanical time constant (ms)	13
Thermal time constant (mn)	21
Inertia (g.cm ²)	140
Weight (g)	640
Number of segments	8
Service life (h)	3000
Sintered bronze bearings	✓
Wires length (mm)	200
Caractéristiques codeur	
Current consumption (mA)	0.5 → 15
Output current (mA)	20 (25°C)
Supply (V)	4.5 → 35 DC
Ambient temperature (°C)	-25 → +85

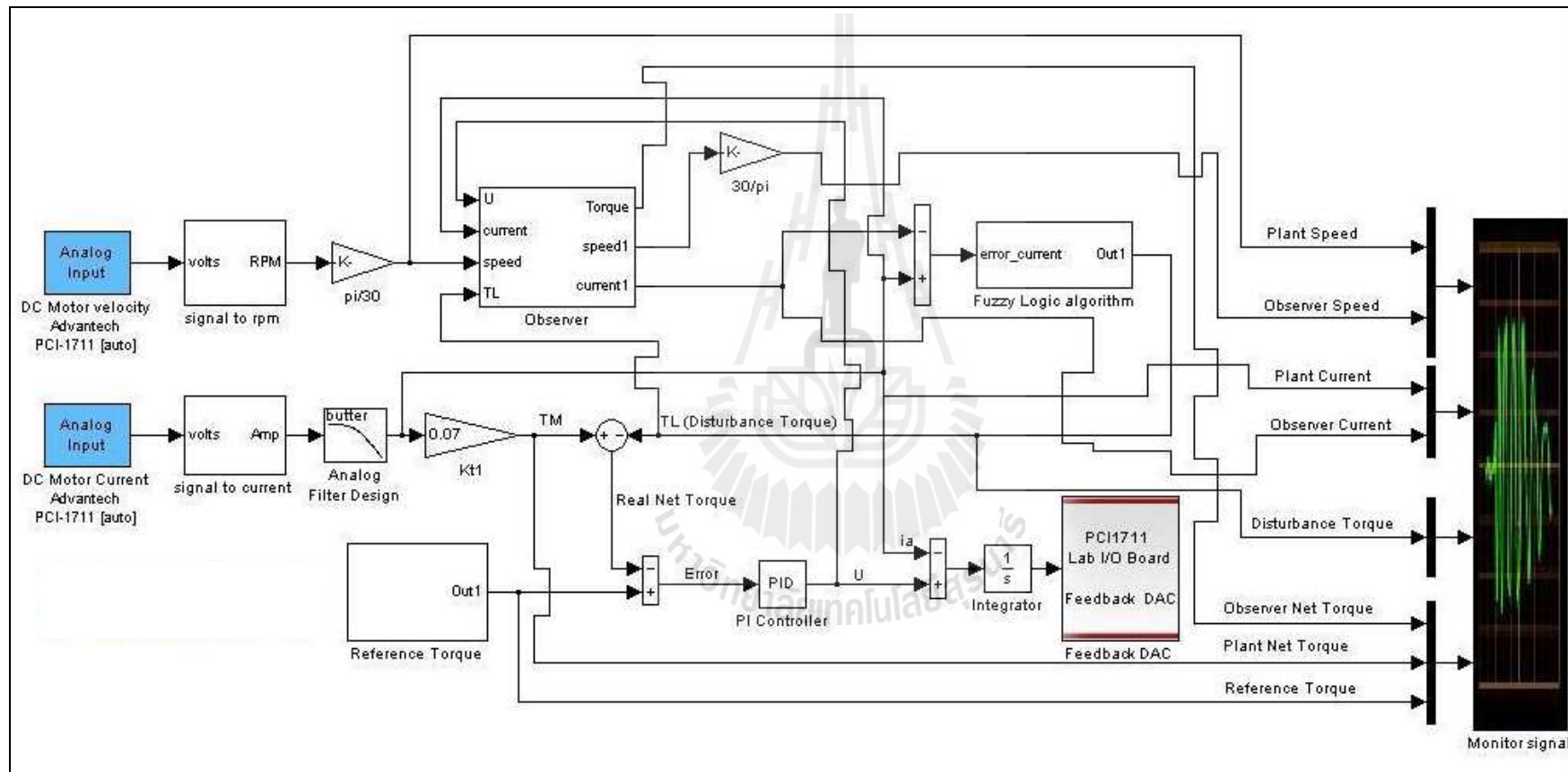
รูป ข.1 แสดงข้อมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้สำหรับการทดสอบ



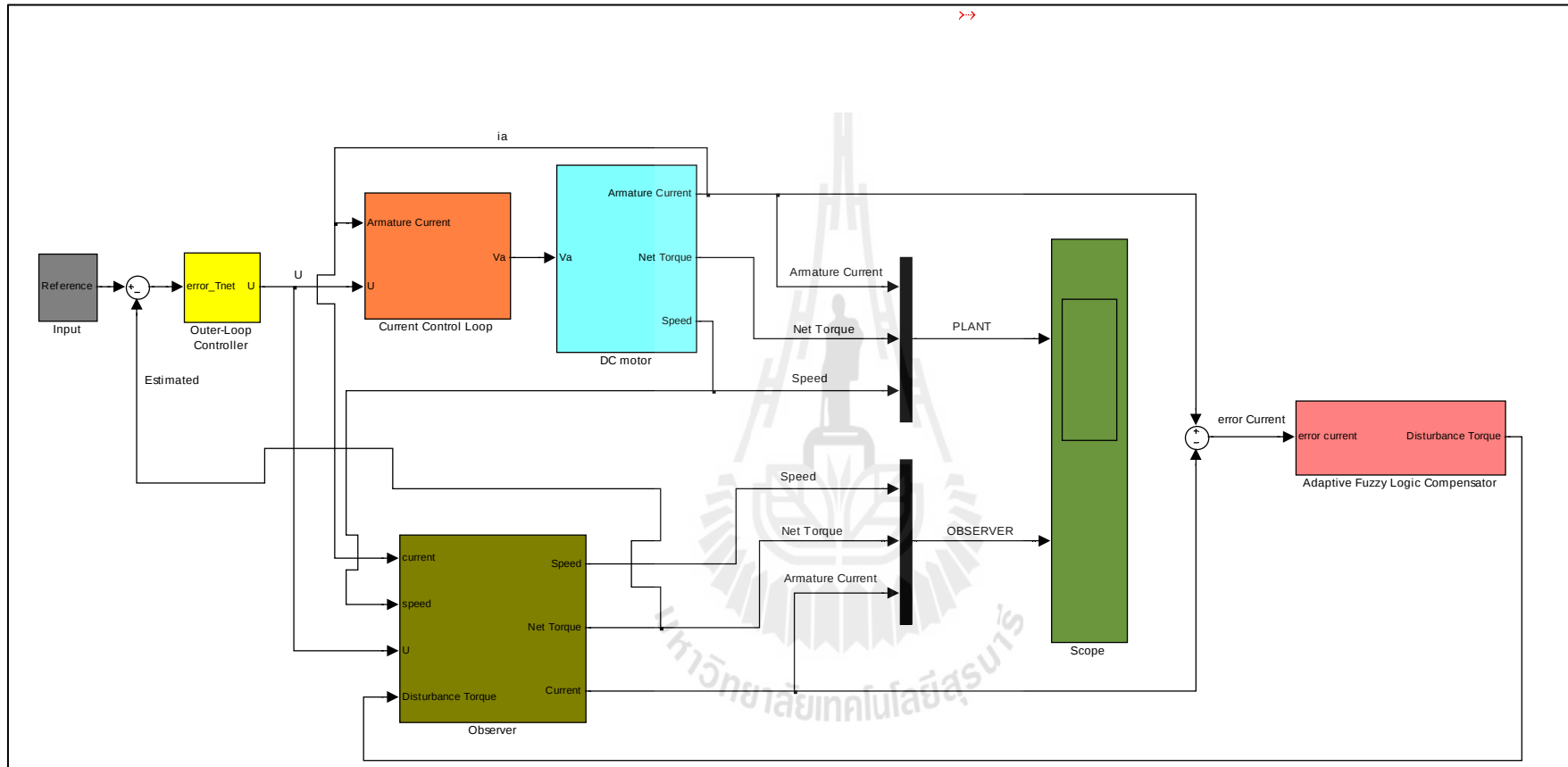
ภาคผนวก ค

โครงสร้างระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับตัวชดเชย
ฟลักซ์ล่อจิกแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลง

ก.1 โครงสร้างระบบควบคุมแรงบิดและตัวชดเชยสำหรับการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ ก.1 ระบบควบคุมแรงบิดลัพธ์และตัวชดเชยสำหรับการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทดสอบ



รูปที่ ค.2 ระบบควบคุมแรงบิดลัพท์และตัวชดเชยสำหรับการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลง
ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB



บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

Pewmaikam, C., Srisertpol, J. and Khajorntridet, C. (2012). Adaptive Fuzzy Logic Compensation for Permanent Magnet Synchronous Motor Torque Control System, International Journal of Modeling and Optimization. April, 2012. Vol.2, pp141-146.

Pewmaikam, C., Srisertpol, J. and Khajorntridet, C. (2012). Torque Control with Adaptive Fuzzy Logic Compensation for Permanent Magnet Synchronous Motor, International Conference on System Modeling and Optimization(ICSMO2012) in Singapore, 2012. Vol.23, pp31-37.



Adaptive Fuzzy Logic Compensator for Permanent Magnet Synchronous Motor Torque Control System

Pewmaikam C., Srisertpol J., and Khajorntraidet C.

Abstract—A torque control system of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) is an important process in industries, especially in the hard disk drive assembly processes. For example, the automatic screw machine is one of important machines in the hard disk drive assembly processes. The PMSM is a fundamental component of the automatic screw machine. The feedback torque control system use estimated torque received from motor current. The disturbance torque caused by the screw process depends on the quality of the screw heads and screw holes. The automatic screw machine requires precise output torque because the error of output torque affects the automatic screw machine performance. The damage in the hard disk drive assembly process may result from an inaccurate output torque. For instance, the defect of product is broken threads of the screws and the out of length of the screw heads. When the control process requires precision output torque, the machines must be calibrated by operator with standard value consumed 20-30 minutes per machine. This paper presents a torque control system with an adaptive fuzzy logic compensator for torque control and torque estimation simultaneously. The method of the research can increase the efficiency of torque control system and decrease the calibration time of the automatic screw machines.

Index Terms—Permanent magnet synchronous motor, control theory, observer and adaptive fuzzy logic compensator.

I. INTRODUCTION

The PMSM has also been exploited in many fields. The screw driving process, one of the important machines in hard disk drive industry, can take part of hard disk drive to adjoin. By using a feedback control system of the automatic screw machine, torque of the machine converted from current and Linear Variable Differential Transformer (LVDT) is used to verify length of the screw heads. The torque screw driver must be controlled both speed and torque. In the original method speed control of PMSM use the procedure that ensure robust speed control against the variations of the moment of inertia and step change of load torque [1]. A screw driving process requires precise output torque. Many problems happen in the screw machine process, for example the screw and screw groove do not match and a quality of screw groove out of standard. The machines have to increase an output torque affected the physical system of the machine. Because of this reason, the physical system is changed. Each screw machine has different values of PID-controller parameters that improper for screw driving process. The screw driver of

automatic screw must be calibrated by standard machine, which takes time in calibration process about 20–30 minutes per machine that affects the hard disk drive assembly processes performance.

The dynamic responses of the PMSM motor transformed to the estimated rotor frame are nonlinear, thus the observer and observer error dynamics are nonlinear. The stability of control system is analyzed as a linearized error model [2]. Nowadays, fuzzy logic is one of the well known methods, which is used to overcome the problem in many fields, and also in electrical machine control problems. The main idea to design the fuzzy logic is based on the exact behaviors of the machines. Therefore, fuzzy logic can perform very well with nonlinear system, e.g. AC machines [3]. A Fuzzy control has been employed to control temperature. The error-count is used to trigger the fuzzy inference process [4]. A novel self-tuning PI controller is real-time designed according to the identified parameters based on pole assignment theory; the least-square estimator and a torque observer are used in the system [5]. A fuzzy PI-Controller is described that take into account some of the unique characteristic of such a furnace. Entries in the rule base are used to prevent integrator windup, and a fuzzy gain scheduler allows the controller to be tuned and used over the whole operating temperature range of the system [6]. The structure hierarchy and computational complexity of the controller were simplified by reducing the number of fuzzy groups in the membership function without losing the system performance. The tuning of fuzzy logic controller is achieved by development of a knowledge/rule base with scaling factors [7]. Additionally, a fuzzy logic based direct torque control of PMSM can improve the performance of the drive in term of torque, flux, speed and current ripples [8].

A worldwide energy-saving emission has stimulated extensive application of permanent magnet synchronous motor in industry. This work is a contribution to velocity control of the permanent magnet synchronous motor. The model of the permanent magnet synchronous motor has multivariable, highly nonlinear, strong coupling character with external load; in order to control this complicated nonlinear model, the hierarchy model reference dynamic inversion control method has been developed [9]. The speed Sensorless Indirect Field Oriented Control (IFOC) of a Permanent Magnet Synchronous machine (PMSM) is studied. The closed loop scheme of the drive system utilizes fuzzy speed and current controllers [10]. A DSP-based nonlinear speed control of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) is robustness for unknown parameter variations. The model reference adaptive system (MRAS) based adaptation mechanisms for the estimation of slowly varying parameters are derived using the Lyapunov's stability theory

Manuscript received March 11, 2012; revised April 4, 2012. This work was supported in part by the Suranaree University of Technology.

The authors are with the school of mechanical engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000 (e-mail: chalermpon_tle@hotmail.com; jiraphon@sut.ac.th; chanyut_k@hotmail.com).

[11]. The current control schemes for a voltage source inverter-fed PMSM drive can be classified as the hysteresis control, ramp comparison control, synchronous frame proportional-integral (PI) control, and predictive control. Among them, the predictive control is known as a superior performance control scheme [12]. A technique for torque control of DC servo motor uses an adaptive load torque compensation method. The load torque can be compensated to the observer, the result show that the estimated current error from the observer is reduced [13].

This paper presents a torque control system with an adaptive fuzzy logic compensator for torque control and the torque estimator of the machine for torque measurement. The method in this research can increase efficiency and decrease the calibrated time of the automatic screw machines.

II. MATHEMATICAL DESCRIPTIONS

The governing equation of an AC servo motor consists of two parts, electrical and mechanical systems.

A. Electrical Governing Equation

The mathematical model of the PMSM is composed of three phase's stator windings and permanent magnets mounted on the rotor surface (surface mounted PMSM). The electrical equations of the PM synchronous motor can be described in the rotor rotating reference frame, written in the (d - q axis) rotor flux reference frame are described as follows:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_e \lambda_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_e \lambda_d \quad (2)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_m \quad (3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (4)$$

B. Mechanical Governing Equation

The torque that is generated by the energy conversion process is used to drive mechanical loads. Its expression is related to mechanical parameters via the fundamental law of the dynamics as follows:

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \quad (5)$$

In the servo applications, the unknown load is a significant parameter. The propose scheme for permanent magnet synchronous motor torque control is shown in Fig. 1. This control system consists of PMSM and PI controller. In addition, the system will work with a full-state observer and an adaptive fuzzy logic load torque compensator. The feedback torque for this torque control system receives from estimated current of the observer.

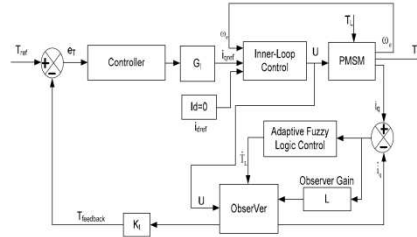


Fig. 1. PMSM torque control system

III. OBSERVER DESIGN

A cost and a complexity of the control system increase if the number of required sensor increases. A state observer can be designed to estimate the state variables of the PMSM via current measurement. Fortunately, if the system is completely observable, then it is possible to estimate the states that are not measured. The equations of observer are.

$$\frac{d\hat{i}_d}{dt} = \frac{V_d}{L_d} - \frac{R_s}{L_d} \hat{i}_d + \omega_e \hat{i}_q \frac{L_q}{L_d} + eL_1 \quad (6)$$

$$\frac{d\hat{i}_q}{dt} = \frac{V_q}{L_q} - \frac{R_s}{L_q} \hat{i}_q - \omega_e \hat{i}_d \frac{L_d}{L_q} - \omega_e \frac{\lambda_m}{L_q} + eL_2 \quad (7)$$

where L_1 and L_2 are the observer gains, $(\hat{\cdot})$ is the estimated state and an error is $e = i - \hat{i}$

IV. CONTROLLER AND COMPENSATOR DESIGN

A torque control system of the PMSM is an important process in industries, especially in the hard disk drive assembly processes. A PI controller is used in feedback control system. The current of the observer is the feedback signal to the torque control system before it is converted to torque of the motor. If the d -axis inductance is equal to the q -axis inductance (PMSMs with surface mounted magnets), the motor torque depends only on the q -axis, and motor current is shown in equation.

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_m i_q \quad (8)$$

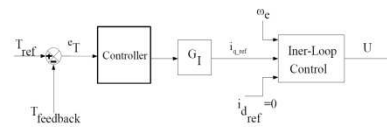


Fig. 2. Inner-loop control.

From Fig. 2, The G_1 is the integral in the inner loop of control system and the inner loop control equations are shown in equation (9) and (10) respectively.

$$PI \text{ Controller} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (9)$$

$$G_I = \frac{1}{S} \quad (10)$$

The structure of fuzzy logic controller is shown in Fig. 3. There are four main parts for fuzzy logic approach. The first part is 'fuzzification unit' to convert the input variable to the linguistic variable or fuzzy variable. The second part is 'knowledge base' to keep the necessary data for setting the control method by the expert engineer. The 'decision making logic' or the inference engine is the third part to imitate the human decision using rule bases and data bases from the second part. The final part is 'defuzzification unit' to convert the fuzzy variable to easy understanding variable.

The compensating control using fuzzy logic controller in Fig. 3, i_q and $\dot{i}_q$ are the actual compensating current and the reference current, respectively. The inputs of the fuzzy logic controller are the error and the error rate that can be calculated by equation (11) and (12)

$$error = i_q - \hat{i}_q \quad (11)$$

$$error\ rate = \frac{d(i_q - \hat{i}_q)}{dt} \quad (12)$$

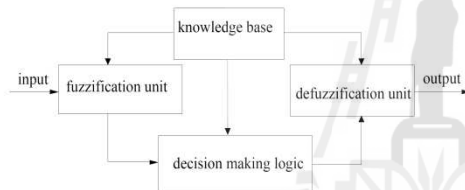


Fig. 3. The basic structure of fuzzy logic controller

The shape of the output signal from the fuzzy logic controller is the pulse waveform that can be adjusted. The linguistic variables of input and output for the fuzzy logic controller to control the compensating torques in the paper are shown in Table I and the parameter values of the input and output membership function are shown in Table II. The error input, the error rate and the disturbance torque output of the fuzzy logic controller are shown in Fig. 4, 5, and 6, respectively.

TABLE I. THE INPUT AND OUTPUT LINGUISTIC VARIABLES OF THE FUZZY LOGIC CONTROLLER

Variable name	Variable value	Meaning
Input of the fuzzy logic controller		
Error input	neg	The error is negative.
	zero	The error is zero.
	pos	The error is positive.
Error rate input	dec_rate	The error rate decreases.
	zero_rate	The error rate is zero.
	inc_rate	The error rate increases.
Output of the fuzzy logic controller		
Torque	zero	The zero.
	pos	The positive value.

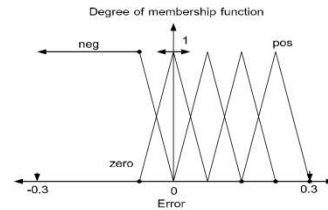


Fig. 4. The error input

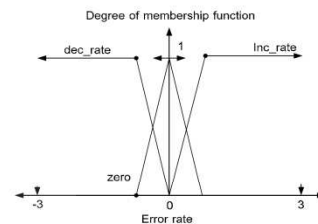


Fig. 5. The error rate input

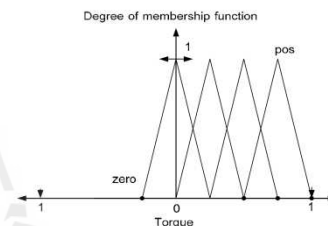


Fig. 6. The disturbance torque output

TABLE II. THE PARAMETER VALUES OF THE INPUT AND OUTPUT MEMBERSHIP FUNCTION

Error Input (A)	Error Rate Input (A/s)	Output Torque (Nm)
0.0247	[0,3]	0.1
0.0505	[0,3]	0.2
0.0772	[0,3]	0.3
0.1048	[0,3]	0.4
0.1334	[0,3]	0.5
0.1629	[0,3]	0.6
0.1933	[0,3]	0.7
0.2245	[0,3]	0.8
0.2565	[0,3]	0.9
0.2893	[0,3]	1.0

V. SIMULATION RESULTS

This section demonstrated the simulation results of permanent magnet synchronous motor torque control system when the system and controller parameters are as follow:

$$J = 1.854 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{rad}, K_t = 2.2224 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{A}$$

$$P = 8, B = 1.0 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}, \lambda_m = 0.1852 \text{ Wb}$$

$$R_s = 1.6 \Omega, L_d = L_q = 6.365 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$K_p = 2500 \text{ A} / \text{N} \cdot \text{m}, K_i = 25 \text{ A} / \text{N} \cdot \text{m}$$

$$V_{rms} = 220 \text{ V}_{rms}, f = 50 \text{ Hz}$$

The simulation of the torque control system was applied the disturbance torque as the step function, as shown in Fig.7. In the simulation, there were three patterns of desired inputs. The first pattern of desired input was the step function. Then, the desired input was the ramp function. Finally, the step and ramp functions were combined as the process of torque screw driver. If no load torque interacted with the system, the torque control system which used estimated current from the observer had high efficiency to control the output torque. On the other hand, an error between the desired torque and the output torque was occurred when the system received the disturbance torque because of the incorrect estimated current from the observer. Therefore, the adaptive fuzzy logic load torque compensator was be used to compensate load torque to the observer. The results of torque compensation to the torque control system were shown in Figure 8, 9, 10 and 11.

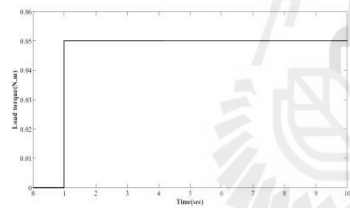


Fig. 7. Disturbance torque

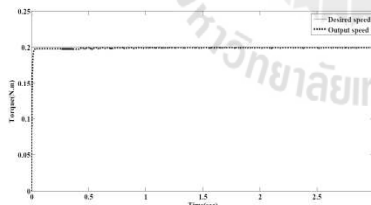


Fig. 8. Dynamic response of torque control in the case of the step function input with load torque compensation

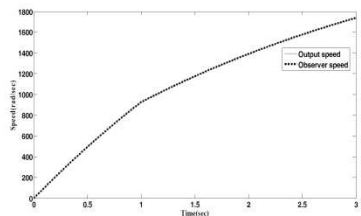


Fig. 9. Dynamic response of speed in the case of the step function input with load torque compensation

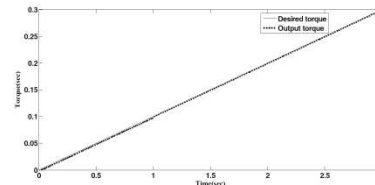


Fig. 10. Dynamic response of torque control in the case of the ramp function input with load torque compensation

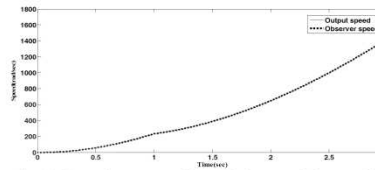


Fig. 11. Dynamic response of speed in the case of the ramp function input with load torque compensation

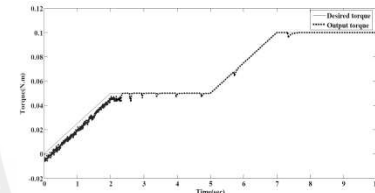


Fig. 12. Dynamic response of torque control in the case of no-load operation

For the control process of the torque screw driver in the case of no-load operation, PI controller can control the output torque of permanent magnet synchronous motor by using current feedback from the observer as shown in Fig. 12 and in Fig. 13 shown the speed response of the torque screw driver. The response of torque and speed depict good results because of without system disturbance.

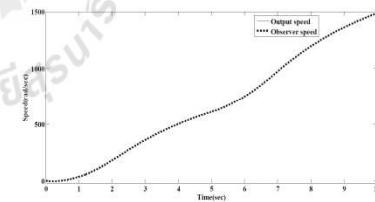


Fig. 13. Dynamic response of speed in the case of no-load operation

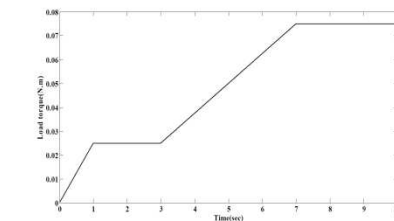


Fig. 14. The disturbance torque of torque screw process

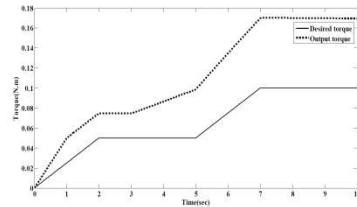


Fig. 15. Dynamic response of torque control in the case of load operation without load torque compensation

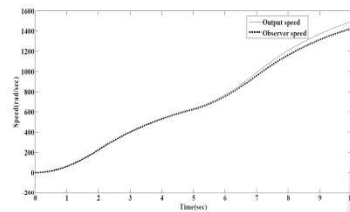


Fig. 16. Dynamic response of speed in the case of load operation without load torque compensation

When the permanent magnet synchronous motor system, an actuator of screw driver, receives disturbance torque during the operation as shown Fig.14, the state variable which is estimated from the observer was incorrect. If the incorrect estimated current is used to control torque of the system, the inaccurate output torque will occur. The result is shown in Fig. 15 and 16.

After compensate the estimated load torque from the adaptive fuzzy logic compensator to the observer, the error of estimated current was reduced. The responses of torque control system are shown in Fig. 17 and 18.

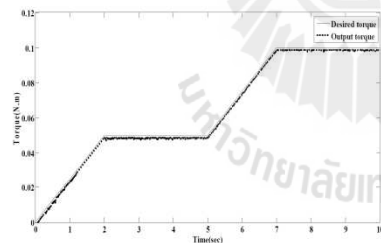


Fig. 17. Dynamic response of torque control in the case of load operation with load torque compensation

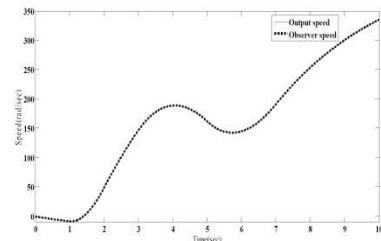


Fig. 18. Dynamic response of speed in the case of load operation with load torque compensation

Additionally, the responds of load torque from the adaptive

fuzzy logic compensator can indicate that the torque screw in assembly process work well or has some problems during the process. For example, if the value of load torque increases rapidly, the misalignment of screw may occur or some parts of the product are not match with each other.

VI. CONCLUSIONS

The feedback of the torque control system of this method hinges on the estimated current from the observer. The load torque not only disturbed the system but also affected the quality of estimated current. This paper demonstrated advantages of the adaptive fuzzy logic compensation technique that can be developed to the PMSM torque estimation. The results of the research shown that, this method can improve the efficiency of the torque control system. Additionally, this method leads to the process that can apply to decrease the calibration time of the automatic screw machines, reduce the cost of sensors, and develop the diagnostic system.

NOMENCLATURES:

- R_s – Motor phase resistance (Ω)
- L_d – d-axis inductance (H)
- L_q – q-axis inductance (H)
- p – Number of magnetic poles
- T_e – Electromagnetic torque (Nm)
- T_L – Load torque (Nm)
- B – Viscous damping coefficient (Nm.s)
- J – Moment of inertia of the motor (kg/m^2)
- i_d – d-axis current in synchronous frame (A)
- i_q – q-axis current in synchronous frame (A)
- V_d – d-axis voltage in synchronous frame (V)
- V_q – q-axis voltage in synchronous frame (V)
- ω_r – Motor electrical angular velocity (rad/s)
- ω_m – The machine angle velocity of rotor (rad/s)
- λ_d – d-axis flux linkage in synchronous frame (Wb)
- λ_q – q-axis flux linkage in synchronous frame (Wb)
- λ_m – PM flux linkage in synchronous frame (Wb).

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thankfully acknowledge the research grant from Suranaree University of Technology (SUT).

REFERENCES

- [1] T. Pajchrowski and Zawirski K., "Application of fuzzy logic techniques to robust speed control of PMSM," in *Proc. of Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, 2008, pp. 1198-1203.
- [2] A. L. Jones and H. J. Lang, "A state observer for the permanent magnet synchronous motor," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 36, pp. 374-382, August 1989.
- [3] P. Thiemann, C. Mantala, T. Mueller, R. Strothmann, and E. Zhou, "Sensorless control for buried magnet PMSM based on direct flux control and fuzzy logic," in *Proc. of IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDMPED)*, pp. 405-412, 2011.

- [4] M. D. Hanamane, R. R. Mudholkar, B. T. Jadhav, and S. R. Sawant, "Implementation of fuzzy temperature control using microprocessor," *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 65(2), pp. 142-147, February 2006.
- [5] X. Cao and Liping Fan, "Real-time PI controller based on pole assignment theory for permanent magnet synchronous motor," in *Proc. of IEEE International Conference on Automation and Logistics Qingdao, China*, pp. 211-215, 2008.
- [6] C. L. Ramiller, M. Y. Chow, and R. T. Kuehn, "Fuzzy control of temperature in a semiconductor processing furnace," in *Proc. of the 24th Annual Conference of the IEEE*, Aachen, Germany, vol.3, pp. 1774-1779, 1998.
- [7] C. Kamala Kannan, S. R. Paranjothi, and S. Paramasivam, "Optimal control of switched reluctance motor using tuned fuzzy logic control," *European Journal of Scientific Research*, vol.55, no.3, pp. 436-443, 2011.
- [8] A. Rahideh, M. Karimi, A. Shakeri, and M. Azadi, "High performance direct torque control of a PMSM using fuzzy logic and genetic algorithm," in *Proc. of IEEE International Electric Machine and Drives Conference (IEMDC'07)*, Antalya, Turkey, 2007, vol.2, pp. 932-937.
- [9] Z. Yaou, Z. W. Sheng, and K. X. Ming, "Control of the permanent magnet synchronous motor using model reference dynamic inversion," *WSEAS Trans. on System And Control*, vol.5, pp.301-311, May 2010.
- [10] G. Faten and S. Lassaad, "Speed sensorless IFOC of PMSM based on adaptive Luenberger observer," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, pp. 149-155, 2010.
- [11] I.C. Baik, K. H. Kim, and M. J. Youn, "Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using adaptive and sliding mode control techniques," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol.145(4), pp. 369–376, July 1998.
- [12] M. S. Kim, D. S. Song, Y. K. Lee, T. H. Won, H.W. Park, Y. I. Jung, M. H. Lee, and H. Lee, "A robust control of permanent magnet synchronous motor using load torque estimation," in *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2001*, Pusan, South Korea, 2001, vol. 2, pp. 1157–1162.
- [13] C. Khajontraidet and J. Srisertpol, "Torque Control for DC servo motor using adaptive load torque compensation," in *Proc. of the 9th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering (ICOSSSE'10)*, Iwate, Japan, 2010, pp. 454-458.



Pewmaikam C., is a graduate student in School of mechanical engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. He got Bachelor degree in Mechanical Engineering from Suranaree University of Technology in Thailand. His research interests are in area of the system identification and control system design.



Srisertpol J. is an Assistant Professor in School of mechanical engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. He got Ph.D degree in System Analysis, Control and Processing Information from St.Petersburg State University of Aerospace Instrumentation in Russia. He is senior member IACSIT and head of system and control engineering laboratory. His research interests are in area of the mathematical modeling, adaptive system and

vibration analysis.



Khajontraidet C. is a Lecturer in School of mechanical engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. He got Master degree and Bachelor degree in Mechanical Engineering from Suranaree University of Technology in Thailand. His research interests are in area of the system identification, control system design and vibration.

Torque Control with Adaptive Fuzzy Logic Compensator for Permanent Magnet Synchronous Motor

Chalermporn Pewmaikam¹⁺, Jiraphon Srisertpol², Chanyut Khajorntraidet³

¹ School of Mechanical Engineering Institute of Engineering

Abstract. A torque control system of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) is an important process in industries, especially in the hard disk drive assembly processes. For example, the automatic screw machine is one of important machines in the hard disk drive assembly processes. The PMSM is a fundamental component of the automatic screw machine. The feedback torque control system use estimated torque received from motor current. The disturbance torque caused by the screw process depends on the quality of the screw heads and screw holes. The automatic screw machine requires precise output torque because the error of output torque affects the automatic screw machine performance. The damage in the hard disk drive assembly process may result from an inaccurate output torque. For instance, the defect of product is broken threads of the screws and the out of length of the screw heads. When the control process requires precision output torque, the machines must be calibrated by operator with standard value consumed 20-30 minutes per machine. This paper presents a torque control system with an adaptive fuzzy logic compensator for torque control and torque estimation simultaneously. The method of the research can increase the efficiency of torque control system and decrease the calibration time of the automatic screw machines.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Motor, Control theory, Observer and Adaptive fuzzy logic compensator.

1. Introduction

The screw driving process, one of the important machines in hard disk drive industry, can take part of hard disk drive to adjoin. By using a feedback control system of the automatic screw machine, torque of the machine converted from current and Linear Variable Differential Transformer (LVDT) is used to verify length of the screw heads. A screw driving process requires precise output torque. Many problems happen in the screw machine process, for example the screw and screw groove do not match and a quality of screw groove out of standard. The machines have to increase an output torque affected the physical system of the machine. Because of this reason, the physical system is changed. Each screw machine has different values of PID-controller parameters that improper for screw driving process. The screw driver of automatic screw must be calibrated by standard machine, which takes time in calibration process about 20 – 30 minutes per machine that affects the hard disk drive assembly processes performance.

The dynamic responses of the PMSM motor transformed to the estimated rotor frame are nonlinear, thus the observer and observer error dynamics are nonlinear. The stability of control system is analyzed as a linearized error model [1]. A novel self-tuning PI controller is real-time designed according to the identified parameters based on pole assignment theory; the least-square estimator and a torque observer are used in the system [2]. A Fuzzy logic has been employed to control temperature. The error-count is used to trigger the fuzzy inference process [3]. A fuzzy PI-Controller is described that take into account some of the unique characteristic of such a furnace. Entries in the rule base are used to prevent integrator windup, and a fuzzy

⁺ Corresponding author.
 E-mail address: chanyut_k@hotmail.com

gain scheduler allows the controller to be tuned and used over the whole operating temperature range of the system [4]. The structure hierarchy and computational complexity of the controller were simplified by reducing the number of fuzzy groups in the membership function without losing the system performance. The tuning of Fuzzy Logic Controller is achieved by development of a knowledge/rule base with scaling factors [5]. A worldwide energy-saving emission has stimulated extensive application of permanent magnet synchronous motor in industry. This work is a contribution to velocity control of the permanent magnet synchronous motor. The model of the permanent magnet synchronous motor has multivariable, highly nonlinear, strong coupling character with external load; in order to control this complicated nonlinear model, the hierarchy model reference dynamic inversion control method has been developed [6]. The speed Sensorless Indirect Field Oriented Control (IFOC) of a Permanent Magnet Synchronous machine (PMSM) is studied. The closed loop scheme of the drive system utilizes fuzzy speed and current controllers [7]. A DSP-based nonlinear speed control of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) is robustness for unknown parameter variations. The model reference adaptive system (MRAS) based adaptation mechanisms for the estimation of slowly varying parameters are derived using the Lyapunov's stability theory [8]. The current control schemes for a voltage source inverter-fed PMSM drive can be classified as the hysteresis control, ramp comparison control, synchronous frame proportional-integral (PI) control, and predictive control. Among them, the predictive control is known as a superior performance control scheme [9]. A technique for torque control of DC servo motor uses an adaptive load torque compensation method. The load torque can be compensated to the observer, the result show that the estimated current error from the observer is reduced [10].

This paper presents a torque control system with an adaptive fuzzy logic compensator for torque control and the torque estimator of the machine for torque measurement. The method in this research can increase efficiency and decrease the calibrated time of the automatic screw machines.

2. MATHEMATICAL DESCRIPTIONS

The governing equation of an AC servo motor consists of two parts, electrical and mechanical systems.

1) Electrical governing equation:

The mathematical model of the PMSM is composed of three phase's stator windings and permanent magnets mounted on the rotor surface (surface mounted PMSM). The electrical equations of the PM synchronous motor can be described in the rotor rotating reference frame, written in the (d - q axis) rotor flux reference frame are described as follows:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_e \lambda_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_e \lambda_d \quad (2)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_m \quad (3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (4)$$

2) Mechanical governing equation:

The torque that is generated by the energy conversion process is used to drive mechanical loads. Its expression is related to mechanical parameters via the fundamental law of the dynamics as follows:

$$T_e = J \frac{d\omega_e}{dt} + B\omega_e + T_L \quad (5)$$

Where R_s is motor phase resistance [Ω], L_d is d-axis inductance [H], L_q is q-axis inductance [H], P is number of magnetic poles, T_e is electromagnetic torque [Nm], T_L is load torque [Nm], B is viscous damping coefficient [Nm.s], J is moment of inertia of the motor [kg/m²], i_d is d-axis current in synchronous frame [A], i_q is q-axis current in synchronous frame [A], V_d is d-axis voltage in synchronous frame [V], V_q is q-axis

voltage in synchronous frame [V], ω_r is motor electrical angular velocity [rad/s], ω_e is the machine angle velocity of rotor [rad/s], λ_d is d-axis flux linkage in synchronous frame [Wb], λ_q is q-axis flux linkage in synchronous frame [Wb], λ_m is PM flux linkage in synchronous frame [Wb].

In the servo applications, the unknown load is a significant parameter. The propose scheme for permanent magnet synchronous motor torque control is shown in Figure 1.

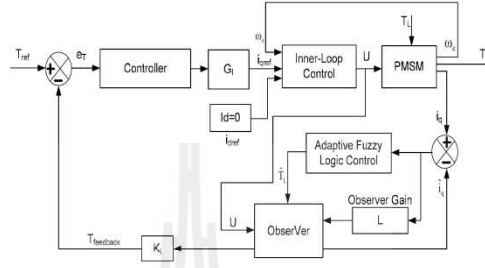


Fig. 1 PMSM torque control system

3. OBSERVER DESIGN

A cost and a complexity of the control system increase if the number of required sensor increases. A state observer can be designed to estimate the state variables of the PMSM via current measurement. Fortunately, if the system is completely observable, then it is possible to estimate the states that are not measured. The equations of observer are.

$$\frac{d\hat{i}_d}{dt} = \frac{V_d}{L_d} - \frac{R_s}{L_d} \hat{i}_d - \omega_e \hat{i}_q \frac{L_q}{L_d} + eL_1 \quad (6)$$

$$\frac{d\hat{i}_q}{dt} = \frac{V_q}{L_q} - \frac{R_s}{L_q} \hat{i}_q - \omega_e \hat{i}_d \frac{L_d}{L_q} - \omega_e \frac{\lambda_m}{L_q} + eL_2 \quad (7)$$

Where L_1 and L_2 are the observer gains, $\hat{(\cdot)}$ is the estimated state and an error is $e = i - \hat{i}$

4. CONTROL THEORY AND CONTROLLER DESIGN

A torque control system of the PMSM is an important process in industries, especially in the hard disk drive assembly processes. A PI controller is used in feedback control system. The current of the observer is the feedback signal to the torque control system before it is converted to torque of the motor. If the d-axis inductance is equal to the q-axis inductance (PMSMs with surface mounted magnets), the motor torque depends only on the q-axis, and motor current is show in equation.

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_m i_q \quad (8)$$

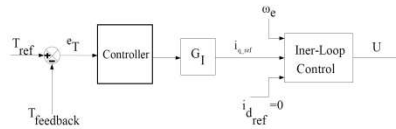


Fig. 2 Control Loop

From figure 2, The G_I is the integral in the inner loop of control system and the inner loop control equations are show in equation (9) and (10) respectively.

$$PI \text{ Controller} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (9)$$

$$G_I = \frac{1}{s} \quad (10)$$

5. ADAPTIVE FUZZY LOGIC COMPENSATOR

The structure of fuzzy logic controller is shown in Fig. 3. There are four main parts for fuzzy logic approach. The first part is 'fuzzification unit' to convert the input variable to the linguistic variable or fuzzy variable. The second part is 'knowledge base' to keep the necessary data for setting the control method by the expert engineer. The 'decision making logic' or the inference engine is the third part to imitate the human decision using rule bases and data bases from the second part. The final part is 'defuzzification unit' to convert the fuzzy variable to easy understanding variable.

The compensating control using fuzzy logic controller in Fig. 3, i_q and $\hat{i}_q$ are the actual compensating current and the reference current, respectively. The inputs of the fuzzy logic controller are the error and the error rate that can be calculated by equation (11) and (12)

$$error = i_q - \hat{i}_q \quad (11)$$

$$error \text{ rate} = \frac{d(i_q - \hat{i}_q)}{dt} \quad (12)$$

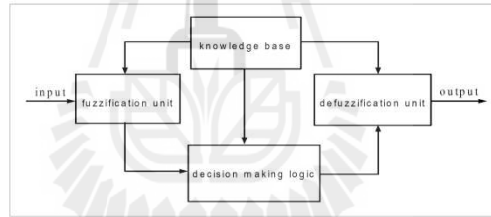


Fig. 3 The basic structure of fuzzy logic controller

6. SIMULATION RESULTS

This section demonstrated the simulation results of permanent magnet synchronous motor torque control system when the system and controller parameters are as follow:

$$J = 1.854 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{rad}, K_t = 2.2224 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{A}$$

$$P = 8, B = 1.0 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}, \lambda_m = 0.1852 \text{ Wb}$$

$$R_s = 1.6 \Omega, L_d = L_q = 6.365 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$K_p = 2500 \text{ A} / \text{N} \cdot \text{m}, K_i = 25 \text{ A} / \text{N} \cdot \text{m}$$

$$V_{rms} = 220 \text{ V}_{rms}, f = 50 \text{ Hz}$$

The simulation of the torque control system was applied the disturbance torque as the step function, as shown in Figure 7. In the simulation, there were three patterns of desired inputs. The first pattern of desired input was the step function. Then, the desired input was the ramp function. Finally, the step and ramp functions were combined as the process of torque screw driver. If no load torque interacted with the system, the torque control system which used estimated current from the observer had high efficiency to control the output torque. On the other hand, an error between the desired torque and the output torque was occurred

when the system received the disturbance torque because of the incorrect estimated current from the observer. Therefore, the adaptive fuzzy logic load torque compensator was used to compensate load torque to the observer. The results of torque compensation to the torque control system were shown in Figure 5, 6, 7 and 8.

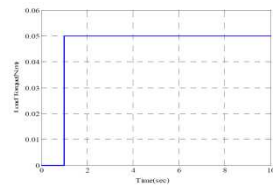


Fig. 4 Disturbance Torque

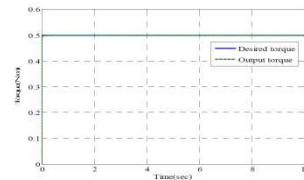


Fig. 5 Dynamic response of torque control in the case of the step function input with load torque compensation

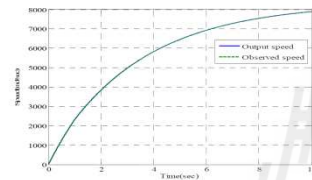


Fig. 6 Dynamic response of speed in the case of the step function input with load torque compensation

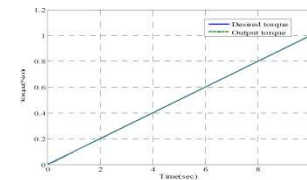


Fig. 7 Dynamic response of torque control in the case of the ramp function input with load torque compensation

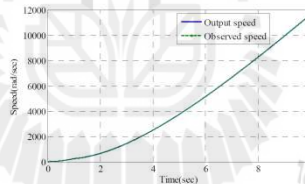


Fig. 8 Dynamic response of speed in the case of the ramp function input with load torque compensation

For the control process of the torque screw driver, in the case of no-load operation PI controller can control the output torque of anent magnet synchronous motor by using current feedback from the observer as shown in Figure 9.

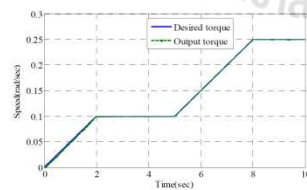


Fig. 9 Dynamic response of torque control in the case of no-load operation

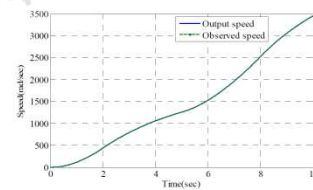


Fig. 10 Dynamic response of speed in the case of no-load operation

When the Permanent magnet synchronous motor system receives disturbance torque during the operation, the state variable which is estimated from the observer was incorrect. If the incorrect estimated current is used to control torque of the system, the inaccurate output torque will occur. The result is shown in Figure 11.

After compensate the estimated load torque from the adaptive fuzzy logic compensator to the observer, the error of estimated current was reduced. The responses of torque control system are shown in Figure 13 and 14.

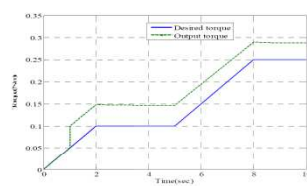


Fig. 11 Dynamic response of torque control in the case of load operation without load torque compensation

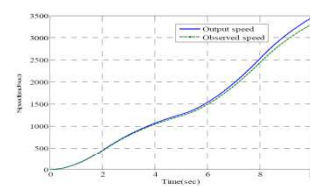


Fig. 12 Dynamic response of speed in the case of load operation without load torque compensation

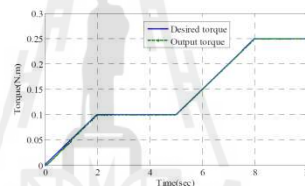


Fig. 13 Dynamic response of torque control in the case of load operation with load torque compensation

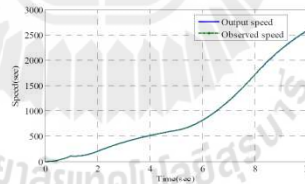


Fig. 14 Dynamic response of speed in the case of load operation with load torque compensation

7. Conclusions

The feedback of the torque control system of this method hinges on the estimated current from the observer. The load torque not only disturbed the system but also affected the quality of estimated current. This paper demonstrated advantages of the adaptive fuzzy logic compensation technique that can be developed to the PMSM torque estimation. The results of the research shown that, this method can improve the efficiency of the torque control system. Additionally, this method leads to the process that can apply to decrease the calibration time of the automatic screw machines.

8. References

- [1] JONES; A. L.; LANG; H. J. A state observer for the permanent magnet synchronous motor. IEEE Trans, Vol. 36, August 1989, PP: 374-382.
- [2] Xianqing Cao; Liping Fan. Real-time PI Controller Based on Pole Assignment Theory for Permanent Magnet

- Synchronous Motor. IEEE International Conference on Automation and Logistics Qingdao, China, September 2008, PP: 211-215.
- [3] M.D. Hanamane; R.R. Mudholkar; B. T. Jadhav; S. R. Sawant. Implementation of fuzzy temperature control using microprocessor. Journal of Scientific and Industrial Research, Vol. 65, February 2006, PP: 142-147.
 - [4] Ch. L. Ramiller; M. Y. Chow; R. T. Kuehn. Fuzzy logic of temperature in a Semiconductor processing furnace. IECON Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, Vol.3, 1993, PP: 1774-1779.
 - [5] C. Kamala Kannan; S. R. Paranjothi; and S. Paramasivam. Optimal Control of Switched Reluctance Motor Using Tuned Fuzzy Logic Control. Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X. European, Vol. 55, 2011, PP: 436-443.
 - [6] ZHANG YAOU; ZHAO WANSHEG; KANG XIAOMING. Control of the Permanent Magnet Synchronous Motor Using Model Reference Dynamic Inversion. Trans, Vol. 5, May 2010, PP: 301-311.
 - [7] Grouz Faten; Sbita Lassaad. Speed Sensorless IFOC of PMSM Based On Adaptive Luenberger Observer. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2010, PP:149-155.
 - [8] I.C. Balk; K. H. Kim; M. J. Youn. Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using adaptive and sliding mode control techniques. IEE Proceedings, Electric Power Applications, Vol. 145, July 1998, PP: 369 – 376.
 - [9] M.S. Kim; D. S. Song; et al. A robust control of permanent magnet synchronous motor using load torque estimation. IEEE Int, Symposium on Industrial Electronics 2001, Vol. 2, June (12-16) 2001, PP: 1157 – 1162.
 - [10] Chanyut Khajorntraidet; Jiraphon Srisertpol. Torque Control for DC Servo Motor using Adaptive Load Torque Compensation. The 9th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering (ICOSSSE'10), Iwate, Japan, October (4-6) 2010, PP: 454-458.

ประวัติผู้เขียน

นายเฉลิมพล ผิวไหมคำ เกิดเมื่อวันที่ 4 มีนาคม 2529 ที่อำเภอโคกสูง จังหวัดสระแก้ว เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1 – 6 ที่โรงเรียนบ้านหนองมั่ง และมัธยมศึกษาปีที่ 1 – 3 ที่โรงเรียนตาพระยา จังหวัดสระแก้ว และมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาวศกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2551 และในปีเดียวกัน ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนในรายวิชาของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1 (2) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3 (3) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 (2) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 2 เป็นเวลา 3 ปี

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโทได้นำเสนอผลงานวิชาการเรื่อง Torque Control with Adaptive Fuzzy Logic Compensator for Permanent Magnet Synchronous Motor ในการประชุม International conference on system modeling and optimization. ระหว่างวันที่ 15 – 19 กุมภาพันธ์ 2555 ณ เมืองฮ่องกง ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน และได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในปี ค.ศ. 2012 International Conference on System Modeling and Optimization (ICSMO 2012) และ International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 2, No. 2, April, 2012