การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้

นายชาญยุทธ ขจรไตรเดช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2550

ESTIMATION OF DC MOTOR VARIABLE TORQUE

USING ADAPTIVE COMPENSATION

Chanyut Khajorntraidet

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 2007

การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)
กรรมการ

(ผศ. ดร.อนันท์ อุ่นศิวิไลย์)
กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชาญยุทธ ขจรไตรเดช : การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (ESTIMATION OF DC MOTOR VARIABLE TORQUE USING ADAPTIVE COMPENSATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 105 หน้า.

ในปัจจุบันมีการนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก เช่น แขนกลของหุ่นยนต์ ระบบขับเคลื่อนสายพาน และเซอร์โวมอเตอร์แบบไฮดรอลิกส์ เป็นต้น ผลกระทบของค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (variable torque) ที่เกิดขึ้นมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งระบบควบคุมโดยทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงใช้การเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เพื่อให้ได้แรงบิด และความเร็วรอบตามต้องการเท่านั้น โดยไม่มีการพิจารณาในส่วนของค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ในทางปฏิบัติค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรง งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟกระแสตรง โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (adaptive compensation) เพื่อประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล   ลายมือชื่อนักศึกษา________________________

ปีการศึกษา 2549   ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา__________________

CHANYUT KHAJORNTRAIDET : ESTIMATION OF DC MOTOR VARIABLE TORQUE USING ADAPTIVE COMPENSATION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D. 105 PP.

ADAPTIVE COMPENSATION/ TORQUE ESTIMATION/ GRADIENT METHOD/ LYAPUNOV'S DIRECT METHOD/ SERVO MOTOR

Nowadays, DC motor drives are widely used in industry for drive systems such as robot arms, conveyors, and hydraulic servo motors. The performances of DC motor control systems are reduced by the effect of DC motor variable torque. The control system of a DC motor will increase the electric current in a DC motor to maintain a desirable speed when the DC motor receives the variable torque or disturbance torque. However, variable torque is not taken into account in most control methods. Generally, the variable torque of a DC motor is difficult to measure in practice but it can be estimated. This research project demonstrated a method for estimating the variable torque of DC motors by using a method called "adaptive compensation". The results of the study can be used to improve and develop the performance of DC motor control systems.

School of Mechanical Engineering Student's Signature ____________________

Academic Year 2007 Advisor's Signature____________________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตามาโดยตลอด และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย และให้โอกาสการทำงานในหลายด้านด้วยความกรุณาเสมอมา

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร ที่ให้ความรู้ คำแนะนำด้านวิชาการ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร ที่ให้ความรู้ คำแนะนำด้านวิชาการ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำวิจัยแก่ผู้ทำวิจัย

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

คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา คุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่าง ๆ

วิศวกรศูนย์เครื่องมือและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือที่ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

คุณพีระยุทธ หวังรักไพบูลย์ คุณสุเมธี ถีสูงเนิน และ พี่ ๆ เพื่อน ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด

คุณนารีรัตน์ จริยะนรวิชช์ ที่ให้การช่วยเหลือในทุกๆด้าน และเป็นกำลังใจในการทำงานเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และสนับสนุนด้านการศึกษาเป็นอย่างดี จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ชาญยุทธ ขจรไตรเดช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .... ข
กิตติกรรมประกาศ .... ค
สารบัญ .... ง
สารบัญตาราง .... ซ
สารบัญรูป .... ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .... ฒ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 1
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 1
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 2

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 ตัวสังเกต 3
2.1.1 การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม 4
2.2 การควบคุมแบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองโดยใช้วิธี Gradient Method 8
2.3 การควบคุมแบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองโดยใช้วิธี
Lyapunov's Direct Method 9
2.3.1 ทฤษฎีเสถียรภาพของ Lyapunov สำหรับระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.......... 9
2.3.2 ความหมายของ Lyapunov Stability Theory 9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3 ความหมายของ Positive definite และ Semi-definite Functions 10

2.3.4 การหาค่า Lyapunov Function 10

2.4 ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 12

2.5 สรุป 14

3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 15

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง... 15

3.2 ตัวสังเกต... 17

3.3 การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
โดยใช้วิธี Gradient Method.. 19

3.4 การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
โดยใช้วิธี Lyapunov's Direct Method... 23

4 ผลการจำลองสถานการณ์ 27

4.1 การจำลองสถานการณ์การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง 28

4.2 การจำลองสถานการณ์การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง 30

4.3 การจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกต
ในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง 32

4.4 การจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกต
ในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง 36

4.5 การจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้
เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Gradient Method................................. 39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6 การจำลองสถานการณ์ผลกระทบของสัญญาณรบกวน และความผิดพลาดของตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีผลต่อการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Gradient Method 48
4.7 การจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Lyapunov' Direct Method 52
4.8 การจำลองสถานการณ์ผลกระทบของสัญญาณรบกวนและความผิดพลาดของตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีผลต่อการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Lyapunov' Direct Method 60
4.9 สรุป 63
5 การทดสอบประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงและผลการทดสอบ 65
5.1 เครื่องมือทดลอง 65
5.2 การประมาณค่าตัวแปรของระบบ 68
5.3 การวัดค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของระบบ 71
5.4 การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง 73
5.5 การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง 75
5.6 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง 76
5.6.1 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทดลองที่ 1 76
5.6.2 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทดลองที่ 2 77
5.7 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง 79

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.7.1 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตต
ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทดลองที่ 1 79
5.7.2 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตต
ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทดลองที่ 2.. 80
5.8 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้
เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Gradient Method................................ 82
5.8.1 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้
เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Gradient Method
สำหรับการทดลองที่ 1 82
5.8.2 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้
เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Gradient Method
สำหรับการทดลองที่ 2 84
5.9 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้
เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Lyapunov’s Direct Method................. 86
5.9.1 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้
เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Lyapunov’s Direct Method
สำหรับการทดลองที่ 1 86
5.9.2 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้
เพื่อประมาณ ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Lyapunov’s Direct Method
สำหรับการทดลองที่ 2 88
5.10 สรุป 90
6 สรุปและข้อเสนอแนะ 91
6.1 สรุป 91
6.2 ข้อเสนอแนะ 92

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง 93

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การติดตั้งและการเปรียบวัดเครื่องมือทดลอง 94

ภาคผนวก ข. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ 100

ภาคผนวก ค. ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง 102

ประวัติผู้เขียน 105

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

5.1 แสดงค่า b และ T_F ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 72

ก.1 แสดงผลการวัดค่าความเร็วรอบ และค่าความต่างศักย์ของ GT 150X 98

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต ... 7

2.2 แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS ... 8

3.1 แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ... 16

3.2 แผนภาพระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และตัวสังเกตอันดับเต็ม ... 17

3.3 แผนภาพบล็อกของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Gradient Method สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ... 23

3.4 แผนภาพบล็อกของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Lyapunov's Direct Method สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ... 26

4.1 แสดงค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 ... 27

4.2 แสดงค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 3 ... 28

4.3 แสดงค่า ω สำหรับกรณีที่ 1 ... 29

4.4 แสดงค่า i_a สำหรับกรณีที่ 1 ... 29

4.5 แสดงค่า ω สำหรับกรณีที่ 2 ... 30

4.6 แสดงค่า i_a สำหรับกรณีที่ 2 ... 30

4.7 แสดงค่า ω สำหรับกรณีที่ 3 ... 31

4.8 แสดงค่า i_a สำหรับกรณีที่ 3 ... 31

4.9 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 ... 36

4.10 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 1 ... 36

4.11 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2 ... 37

4.12 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 2 ... 38

4.13 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3 ... 38

4.14 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 3 ... 39

4.15 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ... 40

4.16 แสดงค่า $\hat{T}_L(t) - T_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ... 40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.17 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 41
4.18 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 41
4.19 แสดงค่า $T_L(t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่ไม่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 43
4.20 แสดงค่า $T_L(t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2.............44
4.21 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3 44
4.22 แสดงค่า $\hat{T}_L(t)-T_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3 45
4.23 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3 45
4.24 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3..........................46
4.25 แสดงค่า $T_L(t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่ไม่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3 47
4.26 แสดงค่า $T_L(t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3 47
4.27 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยจากวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 4.......................49
4.28 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 4 49
4.29 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 5 50
4.30 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 5 50
4.31 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 4 และ 5 51
4.32 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 4 และ 5 51
4.33 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 51
4.34 แสดงค่า $\hat{T}_L(t)-T_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2...53
4.35 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 53
4.36 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2..........................54
4.37 แสดงค่า $T_L(t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่ไม่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 55
4.38 แสดงค่า $T_L(t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่ชดเชยโดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2.......................55
4.39 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3 56
4.40 แสดงค่า $\hat{T}_L(t)-T_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3...57
4.41 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3 57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.42 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3 58

4.43 แสดงค่า $T_L(t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่ไม่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3 59

4.44 แสดงค่า $T_L(t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3 59

4.45 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 4 60

4.46 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 4 61

4.47 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 5 61

4.48 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 5 62

4.49 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 4 และ 5 62

4.50 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 4 และ 5 63

5.1 แสดงระบบ Precision Modular Servo 65

5.2 แสดง PCI 1711 Card 66

5.3 แสดงวงจรการทำงานของระบบควบคุมความเร็ว 67

5.4 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 67

5.5 แผนภาพแสดงโปรแกรมในการเก็บข้อมูลการทำงานของระบบ 69

5.6 แผนภาพแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์จากการวัดเปรียบเทียบกับ
ความเร็วรอบที่ได้จากแบบจำลองก่อนการประมาณค่าตัวแปร 69

5.7 แผนภาพแสดงผลการปรับค่าตัวแปรของระบบ 70

5.8 แผนภาพแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์จากการวัดเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ
ที่ได้จากแบบจำลองหลังการประมาณค่าตัวแปร 70

5.9 แผนภาพแสดงวงจรของระบบเพื่อวัดค่าตัวแปร b และ T_F 72

5.10 แสดงค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 73

5.11 แสดงค่า ω สำหรับกรณีที่ 1 74

5.12 แสดงค่า i_a สำหรับกรณีที่ 1 74

5.13 แสดงค่า ω สำหรับกรณีที่ 2 75

5.14 แสดงค่า i_a สำหรับกรณีที่ 2 75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.15 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 ในการทดลองที่ 1 76
5.16 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 1 ในการทดลองที่ 1 77
5.17 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 ในการทดลองที่ 2 78
5.18 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 1 ในการทดลองที่ 2 78
5.19 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1 79
5.20 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1 80
5.21 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2 81
5.22 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2 81
5.23 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1 83
5.24 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1 83
5.25 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1 83
5.26 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2 85
5.27 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2 85
5.28 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2 86
5.29 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1 87
5.30 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1 87
5.31 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 88
5.32 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2 89
5.33 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2 89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.34 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2 90
ก.1 แสดงการติดตั้ง และวงจรของเครื่องมือทดลอง 95
ก.2 แสดงโปรแกรมในการเปรียบวัด 96
ก.3 แสดงรายละเอียด Analog Output Block 96
ก.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และค่าความต่างศักย์ของ GT150X 98
ก.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของ GT150X และความเร็วรอบที่วัดได้โดยใช้ Stroboscope 99
ข.1 แสดงข้อมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้สำหรับการทดลอง 101
ค.1 แสดงโปรแกรมสำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้จากวิธี Gradient Method 103
ค.2 แสดงโปรแกรมสำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้จากวิธี Lyapunov's Direct Method 104

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

γ	อัตราการปรับตัวของวิธีการ Gradient Method
γ_1	อัตราการปรับตัวของวิธีการ Lyapunov’s Direct Method
γ_2	อัตราการปรับตัวของวิธีการ Lyapunov’s Direct Method
ζ	อัตราส่วนความหน่วง
ω_n	ความถี่ธรรมชาติของตัวสังเกต
ω	ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
$\hat{\omega}$	ความเร็วที่ได้จากการประมาณค่า
b	ความหน่วง
i_a	กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์
$\hat{i}_a$	กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ที่ได้จากการประมาณค่า
I	โมเมนต์ความเฉื่อย
I_I	เมตริกซ์เอกลักษณ์
J	Loss Function
K	อัตราขยายของระบบ
K_b	ค่าคงที่ของ Electromotive Force
K_t	ค่าคงที่ของแรงบิด
L	เมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต
L_{a}	ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์
MRAS	Model-Reference Adaptive Control
P	เมตริกซ์ Unique Symmetric Positive Definite
Q	เมตริกซ์ Positive Definite
R_a	ความต้านทานของอาร์เมเจอร์
T_L	แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง
$\hat{T}_L$	แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณค่า
V_a	ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์
V_b	ความต่างศักย์ back emf

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก เช่น แขนกลของหุ่นยนต์ ระบบขับเคลื่อนสายพาน และเซอร์โวมอเตอร์แบบไฮดรอลิกส์ เป็นต้น ในการใช้งานจริงระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะได้รับผลกระทบจากค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (Variable Torque) เกิดขึ้นอยู่เสมอซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลง ระบบควบคุมโดยทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงใช้วิธีการเพิ่มค่าสัญญาณควบคุมและกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เพื่อควบคุมการตอบสนองให้เป็นไปตามต้องการทั้งในส่วนของแรงบิด และความเร็วรอบในกรณีที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบ โดยไม่มีการพิจารณาในส่วนของค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ในทางปฏิบัติค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่สามารถประมาณค่าได้ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟกระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive Compensation) เพื่อประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การหาค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้เป็นค่าจากการประมาณ

2. อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ และการทดลองจริงเขียนจากโปรแกรม MATLAB 7 ในส่วนของ Simulink

3. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะพิจารณาผลกระทบของอุปกรณ์อื่นในลักษณะที่เป็นค่าคงที่ในระบบของชุดควบคุม

4. ระบบที่ใช้ในการทดสอบ เป็นระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในชุดปฏิบัติการระบบควบคุมของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.วิเคราะห์และออกแบบวิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้

2. สร้างอัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ และทดลอง เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink

3.จำลองสถานการณ์และทดลองกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้อุปกรณ์การทดลอง Precision Modular Servo Control Experiment

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แนวทางและวิธีการออกแบบตัวชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2. การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงและตัวแปรสเตตในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการทำงานของตัวสังเกต การประมาณค่าตัวแปรของระบบ รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวสังเกต และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

บทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวสังเกต และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 5 ผลการทดสอบระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวสังเกต และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และเปรียบเทียบผล

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถทำได้หลายวิธีการ ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบด้วยตัวสังเกต การชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ซึ่งได้จากการประมาณให้กับตัวสังเกตจะทำให้ความผิดพลาดในการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง

หลักการในการออกแบบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive Compensator) เพื่อชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะประยุกต์จากหลักการของการควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง โดยตั้งสมมุติฐานว่าตัวแปรทุกตัวในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ และมีเพียงค่าของตัวแปรแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเท่านั้นที่ยังมีการเปลี่ยนแปลงในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.1 ตัวสังเกต (Observer)

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการป้อนกลับตัวแปรสเตต (State-Variable Feedback) เช่น วิธีการในการปรับเปลี่ยนค่าโพลของระบบ (Pole Placement Method) การสร้างหรือการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมที่ทำการออกแบบมานั้นจะต้องประกอบด้วยข้อมูลจากสัญญาณของสเตตเวกเตอร์ (State Vector) ของระบบทุกค่าซึ่งส่วนมากแล้วการวัดข้อมูลจากตัวแปรสเตตหรือสัญญาณสเตตเวกเตอร์ทุกค่าเป็นไปได้ยาก ถึงแม้ในบางระบบจะสามารถวัดค่าตัวแปรสเตตได้แต่ก็อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการวัด การควบคุมจึงมีการนำเอาตัวประมาณค่าตัวแปรสเตต (State Estimator) หรือ ตัวสังเกตมาใช้งานเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบที่จะทำการควบคุม วิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อให้สามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็วจึงมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบอย่างมาก การออกแบบตัวสังเกตนั้นสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full-Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสเตตทุกตัวของระบบ และตัวสังเกตแบบลดอันดับ (Reduce-Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสเตตที่ไม่สามารถวัดได้บางตัวเท่านั้น ตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปร

สเตตทุกตัวใหม่ทั้งหมด โดยการนำค่าของตัวแปรสเตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุทที่ส่งเข้าไปในระบบมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสเตต ตัวสังเกตแบบลดอันดับ คือ การประมาณค่าตัวแปรสเตตที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้นโดยใช้ค่าของตัวแปรสเตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุทของระบบควบคุมที่ส่งเข้าไปในระบบ ตัวสังเกตที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักใช้กับระบบที่สามารถวัดค่าตัวแปรสเตตได้บางสเตตเพื่อที่จะลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบเมื่อใช้ตัวสังเกต

2.1.1 การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full-order observer)

การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสเตตทุกตัวใหม่ทั้งหมดโดยใช้ข้อมูลของเอาท์พุทบางตัวที่สามารถวัดได้และสัญญาณอินพุทที่ส่งเข้าไปในระบบที่จะทำการประมาณค่าสเตต สมการระบบสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประมาณค่าสเตตของตัวมันเองได้แต่เป็นการประมาณในลักษณะแบบเปิด (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 x n]

B = เมตริกซ์อินพุทของระบบ [n x 1]

C = เมตริกซ์เอาท์พุทของระบบ [1 x n]

x = สเตตเวกเตอร์ของระบบ [n x 1]

u = อินพุทของระบบ [1x1]

y = เอาท์พุทของระบบ [1x1]

ตัวสังเกตของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการจะทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้คือ

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

เมื่อ L = เมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต [n x 1]

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

สมการที่ (2.1) ลบด้วยสมการที่ (2.2) จะได้

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

จัดรูปสมการจะได้

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

สมการที่ 2.4 สามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{e} = [A - LC]e \tag{2.5}$$

เมื่อ $e = x - \hat{x}$

เมื่อค่าความแตกต่างของ $x - \hat{x} \to 0$ จะทำให้ค่าความผิดพลาดของตัวแปรสเตตซึ่งวัดได้จากระบบจริง และตัวสังเกตหมดไปผลที่ได้นั้นจะทำให้ตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าของตัวแปรสเตตในระบบที่ต้องการทำการสังเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบจะต้องมีการตรวจสอบว่าระบบนั้นมีคุณสมบัติในการสังเกตได้หรือไม่ โดยพิจารณาเมตริกซ์ความสังเกตได้

$$Observability\ matrix = \vartheta = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ . \\ . \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

ระบบใดๆ จะมีคุณสมบัติความสังเกตได้ก็ต่อเมื่อ ค่าลำดับชั้นของเมตริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ n (Rank$[\vartheta]$ = n) เมื่อ n คือ อันดับของระบบหรือของเมตริกซ์ A

สำหรับค่าอัตราขยายของตัวสังเกต(Observer Gain) สามารถหาได้จาก Ackermann's Formula

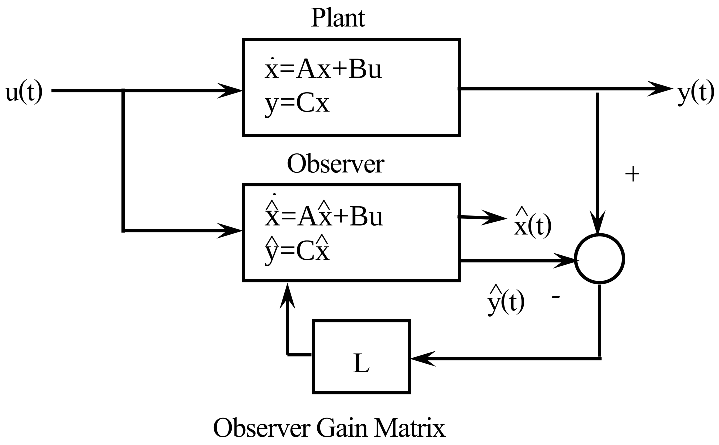
$$L = \phi(A)\begin{bmatrix} C \\ CA \\ . \\ . \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ . \\ . \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

เมื่อสมการลักษณะเฉพาะ คือ

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

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

หลักการทำงานของตัวสังเกตคือจะนำอินพุทและเอาท์พุทของระบบที่ต้องการทราบค่าตัวแปรสเตตภายในระบบ รวมทั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างระบบที่จะทำการสังเกต และตัวสังเกตมาประมวลผลโดยผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อปรับค่าตัวแปรให้ตัวสังเกต เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจนได้ค่าประมาณของตัวแปรสเตตที่ต้องการภายในระบบที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ทั้งนี้การสร้างตัวสังเกตจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรทั้งหมดของระบบที่จะทำการสังเกตเพื่อนำค่าตัวแปรนั้นมาใช้ในโครงสร้างของตัวสังเกต



รูปที่ 2.1 แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต

เมื่อ L = ค่าเมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต [n x 1]

u(t) = ค่าอินพุทของระบบ [1 x 1]

y(t) = ค่าเอาท์พุทของระบบ [1 x 1]

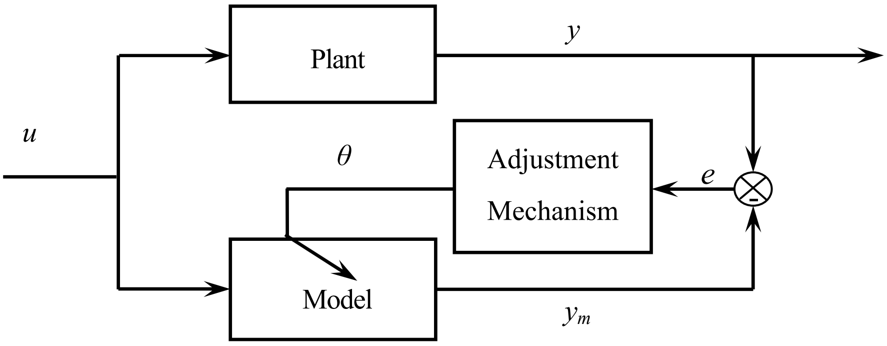
ŷ(t) = ค่าเอาท์พุทของตัวสังเกต [1 x 1]

x̂(t) = ค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกต [n x 1]

ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อใช้งานต้องทำการหาค่าตัวแปรในระบบของตัวสังเกตซึ่งได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสเตตเพื่อหาค่าของตัวแปรที่ถูกต้องของระบบเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบที่ต้องการโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ คือการกำหนดตัวแปรของตัวสังเกตในขั้นตอนการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต เพื่อทำให้ระบบของตัวสังเกตมีความเสถียรและมีความรวดเร็วในการตอบสนองเพียงพอที่จะทำให้ค่าสัญญาณความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด นั่นก็คือสัญญาณประมาณ $\hat{x}(t)$ จะมีค่าเท่ากับสัญญาณสเตตจริงหรือ $x(t)$ ในทางปฏิบัติการออกแบบจะให้โพลของตัวสังเกตอยู่บนแกนจริง (Real Axis) เพื่อที่จะนำไปทำการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตหากเราสามารถจัดรูปให้ไปอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่ารูปแบบบัญญัติของตัวสังเกต (Observer Canonical Form)ได้ จะทำให้การออกแบบมีความสะดวกมากขึ้น โดยสามารถใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ackermann’s Formula) ช่วยในการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตได้

2.2 การควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง (Model Reference Adaptive System) โดยใช้วิธีการ Gradient Method

การปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง มีหลักในการทำงานคือจะปรับค่าตัวแปรต่างๆภายในระบบเพื่อทำให้ความแตกต่างของเอาท์พุทของแบบจำลอง (Model) และระบบที่ต้องการ (Plant) หมดไป จากรูปที่ 2.2 ให้เอาท์พุทของแบบจำลองเป็น y_m เอาท์พุทของระบบเป็น y และ e เป็นความแตกต่างระหว่างเอาท์พุททั้งสอง (*error*) และมีตัวแปรที่ทำการปรับค่า คือ θ



รูปที่ 2.2 แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS

การปรับค่าตัวแปร (θ)เพื่อให้ความแตกต่างระหว่างเอาท์พุทของแบบจำลองและระบบที่ต้องการหมดไป โดยกำหนดให้ Loss function (J) มีค่า

$$J(\theta) = \frac{1}{2}e^2 \tag{2.10}$$

การปรับค่าของของตัวแปร(θ) กำหนดโดย

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma\frac{dJ}{d\theta} = -\gamma e\frac{de}{d\theta} \tag{2.11}$$

$$e = y - y_m \tag{2.12}$$

$$\frac{de}{d\theta} = -\frac{dy_m}{d\theta} \tag{2.13}$$

โดยที่ $-\gamma$ คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation Gain)

การควบคุมแบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองจากทฤษฎีของ Gradient Method จะทำการปรับค่าตัวแปรภายในระบบที่สนใจในทิศทาง Negative of Loss Function (J) เพื่อให้ค่าความแตกต่างระหว่างระบบ และแบบจำลองหมดไปโดยความเร็วในการปรับตัวจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการปรับตัวซึ่งค่าอัตราการปรับตัวต้องเลือกใช้อย่างเหมาะสมเนื่องจากอาจจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

2.3 การควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง (Model Reference Adaptive System) โดยใช้วิธี Lyapunov's Direct Method

ในหัวข้อที่ผ่านมามีการสร้างระบบควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองจากวิธีการของ Gradient Method ซึ่งไม่ได้พิจารณาเสถียรภาพของระบบที่สร้างขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอการสร้างระบบควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองจากวิธีการ Lyapunov's Stability Theory เพื่อประมาณค่าตัวแปรของระบบในลักษณะของระบบควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองโดยใช้เงื่อนไขเสถียรภาพเพื่อการปรับค่าตัวแปรของระบบ ในการสร้างระบบควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองจาก Lyapunov's Stability Theory ต้องทำการกำหนดค่าของ Lyapunov Function และหาค่าอนุพันธ์ของ Lyapunov Function เพื่อให้ได้เงื่อนไขในการปรับตัวระบบในการหาค่าตัวแปรระบบที่ต้องการคือ อนุพันธ์ของ Lyapunov Function ต้องมีลักษณะที่เป็น Negative Semidefinite ผลที่ได้จากเงื่อนไขนี้คือเสถียรภาพของระบบปรับตัวที่สร้างจะเป็น Global Stability

2.3.1 ทฤษฎีเสถียรภาพของ Lyapunov สำหรับระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

พื้นฐานทฤษฎี Lyapunov Theory สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Systems) ทฤษฎีนี้ถูกสร้างขึ้นโดยนักคณิตศาสตร์ชาวรัสเซีย เมื่อพิจารณาสมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Differential Equation)

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \quad , \quad f(0) = 0 \tag{2.14}$$

หาก $f(0) = 0$ สมการจะมีคำตอบคือ $x(t) = 0$ ซึ่งรับรองว่าสมการมีคำตอบและเป็นตำตอบที่เป็นคำตอบเดียวเท่านั้น ทำให้ต้องมีการกำหนดสมมุติฐานเพิ่มเติมเกี่ยวกับ $f(x)$ สมมุติฐานที่สำคัญคือ $f(x)$ เป็น Locally Lipschitz นั่นคือ

$$\| f(x) - f(y) \| \le K_L \| x - y \| \quad , K_L > 0 \tag{2.15}$$

ตามทฤษฎีสนใจการแก้สมการหาคำตอบของสมการที่ (2.14) ตามนิยามของเสถียรภาพ

2.3.2 ความหมายของ Lyapunov Stability Theory

คำตอบ $x(t)=0$ ของสมการอนุพันธ์ที่ (2.14) จะเรียกได้ว่ามีเสถียรภาพถ้ากำหนดให้ $\varepsilon > 0$ ผลที่ได้คือ $\delta(\varepsilon) > 0$ ดังนั้นคำตอบที่มีเงื่อนไขเริ่มต้น

$$\| x(0) \| < \delta \tag{2.16}$$

จะมีคุณสมบัติคือ

$$\| x(t) \| < \delta \text{ สำหรับ } 0 \le t < \infty \tag{2.17}$$

คำตอบของสมการจะมีลักษณะไม่มีเสถียรภาพหากไม่เป็นไปตามข้อกำหนดเสถียรภาพ คำตอบที่ได้ระบบมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (Asymptotically Stable) ถ้าสมการมีเสถียรภาพ และ δ เป็นไปตามเงื่อนไข $\| x(0) \| < \delta$ จะมีคุณสมบัติว่า $\| x(t) \| \to 0 \quad as \quad t \to \infty$

ข้อสังเกต

- ถ้าคำตอบเป็น Asymptotically Stable สำหรับค่าเริ่มต้นดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเป็น Globally Asymptotically Stable
- ทฤษฎีเสถียรภาพ Lyapunov กล่าวถึงเสถียรภาพของคำตอบเฉพาะ (Particular Solution) ของสมการไม่ได้กล่าวถึงเสถียรภาพของสมการอนุพันธ์

2.3.3 ความหมายของ Positive definite และ Semi-definite Functions

พิจารณาสมการอนุพันธ์ที่มีความต่อเนื่อง $V : R^n \to R$ ถูกเรียกว่าเป็น Positive Definite
ในพื้นที่ของ $U \subset R^n$ ซึ่งมีเงื่อนไขคือ

1.) $V(0) = 0$

2.) $V(x) > 0,\ x \in U \ and \ x \neq 0$

ฟังก์ชันนี้จะเรียกว่า Positive Semi-definite หากเงื่อนไขในข้อที่ 2 แทนด้วย $V(x) \ge 0$

2.3.4 การหาค่า Lyapunov Function

พิจารณาสมการที่เป็นเชิงเส้นที่มีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับและให้เมตริกซ์ Q เป็น Positive Definite เมตริกซ์

$$\frac{dx}{dt} = Ax \tag{2.18}$$

จะได้ Unique Symmetric Positive Definite เมตริกซ์ P คือ

$$A^T P + PA = -Q \tag{2.19}$$

และ Lyapunov Function ของสมการที่ 2.18 คือ

$$V(x) = x^T Px \tag{2.20}$$

พิสูจน์

ให้ Q คือ เมตริกซ์ที่มีคุณสมบัติ Symmetric Positive Definite

$$P(t) = \int_0^t e^{A^T(t-s)} Q e^{A(t-s)} ds \tag{2.21}$$

เมตริกซ์ P จะมีคุณสมบัติ Symmetric Positive Definite เพราะปริพันธ์ของเมตริกซ์ที่เป็น Positive Definite จะเป็น Positive Definite และเมตริกซ์ P จะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{dP}{dt} = A^T P + PA + Q \tag{2.22}$$

หากเมตริกซ์ A มีเสถียรภาพจะได้

$$P_o = \lim_{t \to \infty} P(t) \tag{2.23}$$

สำหรับระบบสมการเชิงเส้นที่มีความเสถียรเราจะสามารถหาค่าของ Quadratic Lyapunov Function ได้เสมอโดยเลือกค่าของเมตริกซ์ Q เป็น Positive Definite เมตริกซ์ และแก้สมการ 2.20 เพื่อหาค่าของ Lyapunov Function

การสร้างระบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองนี้จะสร้างจากวิธีการของ Gradient Method หรือจากวิธีการของ Lyapunov's Stability Theory ก็จะสามารถทำงานเพื่อหาค่าตัวแปรของระบบได้เช่นเดียวกัน แตกต่างที่หากสร้างตามหลักทฤษฎีของ Lyapunov's Stability Theory จะเป็นการรับรองสเถียรภาพของระบบที่สร้างทันที ทั้งนี้การสร้างตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นตามทฤษฎีของระบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง ต้องสามารถพิสูจน์ได้ว่ามีเสถียรภาพในการทำงานในช่วงของการทำงานที่กำหนด

2.4 ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปจะมีตัวควบคุมซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานได้ตามต้องการ ตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะงาน และความเหมาะสม ตัวควบคุมที่ใช้งานในอุตสาหกรรมบางประเภทต้องการค่าของตัวแปรสเตตเพื่อที่จะทำการควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง และการที่ต้องการค่าของตัวแปรสเตตเป็นที่มาของการนำตัวสังเกตมาใช้ในการประมาณค่าเนื่องจากช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์ตรวจวัดที่มีราคาแพง และลดความซับซ้อนในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด ในภาวะการทำงานจริงมักมีแรงบิดจากภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอเข้ามารบกวนระบบ ซึ่งแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้การประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาด และลดประสิทธิภาพในการทำงานของตัวควบคุมลง จากแนวคิดในการที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จึงเป็นที่มาของงานวิจัยเพื่อหาค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่เข้ามารบกวนระบบ ในทางปฏิบัติค่าแรงบิดเปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่สามารถประมาณค่าได้โดยใช้ตัวสังเกตแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งใช้หลักการของการควบคุมปรับตัว

Jong Sun Ko (1995) และคณะ ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมตำแหน่งของ Brushless DC Motor โดยใช้ตัวสังเกตแบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองที่สร้างจากทฤษฎีของ Lyapunov เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ข้อดีของตัวสังเกตแบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองที่สร้างจากทฤษฎีของ Lyapunov นอกจากจะสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้แล้วยังสามารถรับรองเสถียรภาพในการทำงานของระบบตัวสังเกตได้อีกด้วย วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการ Feeding Forward Compensation ในการควบคุมกระแสเพื่อให้ได้แรงบิดของมอเตอร์ตามต้องการเพื่อเอาชนะแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัดส่วน

โดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ ทำให้การตอบสนองในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์เป็นไปตามต้องการค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นลดลง รวมทั้งระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

Kichul Hong and Kwanghee Nam (1998) ได้ทำการวิจัยโดยใช้การชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงหรือแรงบิดที่รบกวนระบบในการปรับปรุงการทำงานของระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซอร์โว (DC Servo Motor) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมในภาวะที่แรงบิดรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา และประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากเวลาประวิง (Time Delay) ซึ่งผลที่ได้คือการตอบสนองของความเร็วรอบที่ได้มีความรวดเร็วมากขึ้นและลดการแกว่งตัวของการตอบสนองในภาวะที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนระบบรวมทั้งสามารถลดผลกระทบจากความไม่มีเสถียรภาพของระบบที่เกิดจาก Bandwidth ของระบบมีค่ามากได้อีกด้วย

Chan-Ki Kim (1998) และคณะ ทำการวิจัยโดยใช้ตัวสังเกตแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงร่วมกับ Kalman Filter นั่นก็คือตัวสังเกตแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งสามารถลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนได้ ในการสร้างระบบควบคุม Permanent Magnetic Synchronous Motor (PMSM) ที่มีความเข้มแข็ง โดยคณะผู้วิจัยให้เหตุผลในการนำเสนอวิธีการนี้ว่าตัวสังเกตเป็นโครงสร้างที่ง่าย และมีประสิทธิภาพในการประมาณค่าแรงบิดเปลี่ยนแปลงที่รบกวนระบบ การนำตัวสังเกตมาใช้ในกรณีที่มีการรบกวนระบบจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุม Permanent Magnetic Synchronous Motor (PMSM) ได้

Geeng-Kwei Chang and Tzuen-Lih Chern (2001) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุม DSP-based Servo Drive System โดยใช้การประมาณค่าแรงบิดเปลี่ยนแปลงร่วมกับตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control) และ Integral Variable Structure Model Following Control เนื่องจากในการใช้งานจริงอาจต้องพบกับปัญหาการทำงานนอกขอบเขต และการสั่นสะเทือนที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ รวมทั้งหากระบบถูกรบกวนอย่างมากจะทำให้อัตราขยายป้อนกลับ (Feedback Gain) มีขนาดใหญ่การตอบสนองชั่วครู่จึงไม่ดี ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณค่าร่วมกับตัวควบคุมแบบแบบปริพันธ์ และ Integral Variable Structure Model Following Control จะทำให้ระบบควบคุมมีความเข้มแข็งสามารถลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดที่รบกวนระบบได้ และมีประสิทธิภาพในการควบคุมความเร็วได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ตัวควบคุมทั่วไป

Ki-Hong Park (2003) และคณะทำการวิจัยเพื่อควบคุมความเร็วของ Brushless DC Motor ประสิทธิภาพสูงโดยใช้การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยตัวสังเกต และชดเชยค่ากระแสไฟฟ้าให้กับระบบเพื่อควบคุมความเร็วซึ่งสามารถแก้ปัญหาในกรณีที่ระบบควบคุมไม่สามารถใช้ค่าอัตราขยายที่มีขนาดใหญ่ได้เนื่องจากเหตุผลด้านเสถียรภาพของระบบควบคุม ผลที่ได้

คือ ระบบควบคุมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในภาวะที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงรบกวน โดยที่ไม่ต้องใช้ค่าอัตราขยายของระบบที่มีขนาดใหญ่ทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพมากขึ้น

Ata SEVINC (2003) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ตัวสังเกตแบบอันดับเต็มในการประมาณค่าตัวแปรสเตตทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซอร์โว รวมทั้งค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของระบบ โดยตั้งสมมุติฐานว่าทราบค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทุกตัว และค่าความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถวัดได้ ผู้วิจัยได้ให้เหตุผลในการใช้ตัวสังเกตว่าจะช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวควบคุมและสามารถการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดลงได้ และนอกจากนี้ตัวสังเกตที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบปรับตัวได้ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการประมาณค่า และลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนระบบได้อีกด้วย นอกจากนี้ผู้วิจัยยังกำหนดให้ค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Linear Time-Invariant) และมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับหากระบบของตัวสังเกตและระบบจริงไม่มีความแตกต่างแสดงว่าค่าตัวแปรของระบบมีค่าเทียบได้กับระบบจริงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือตัวสังเกตที่ทำงานร่วมกับตัวชดเชยแบบปรับตัวเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนเหมาะสมกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซอร์โว และตัวสังเกตที่ทำงานร่วมกับอัลกอริทึมแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตทุกตัวของระบบได้อย่างถูกต้อง รวมทั้งค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโดยที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพสูง

2.5 สรุป

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจะมีประโยชน์ต่อการควบคุมการทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้ระบบควบคุมมีการตอบสนองที่รวดเร็ว และยังทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพมากขึ้นเนื่องจากไม่ต้องใช้ค่าอัตราขยายของระบบที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในรูปแบบของ Kalman Filter ยังช่วยลดผลกระทบเนื่องจากสัญญาณรบกวนได้อีกด้วย การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ซึ่งนำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพในกรณีที่ทราบค่าตัวแปรของระบบอย่างถูกต้อง ดังนั้นวิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้การชดเชยแบบปรับตัวได้จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

บทที่ 3
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในทางปฏิบัติการทำการทดลองเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อที่จะนำมาใช้ในการสร้างตัวสังเกต และโครงสร้างของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และควบคุมด้วยวิธี Armature Control ใช้การปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์(Armature Circuit) เพื่อควบคุมความเร็วรอบ โดยให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้กับวงจรสนาม (Field Circuit) คงที่จึงสามารถพิจารณาเฉพาะวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระแสที่ให้กับวงจรสนามมีค่าคงที่ทำให้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์มีค่าคงที่ไปด้วย การควบคุมจะทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ พิจารณาสมการของแรงบิด

$$I\dot{\omega} = -b \cdot \omega + K_t \cdot i_a - T_L \tag{3.1}$$

สมการของวงจรไฟฟ้า

$$V_a - V_b = L_a \frac{di}{dt} + R_a \cdot i_a \tag{3.2}$$

เมื่อ $V_b = K_b \cdot \omega$

สมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space From

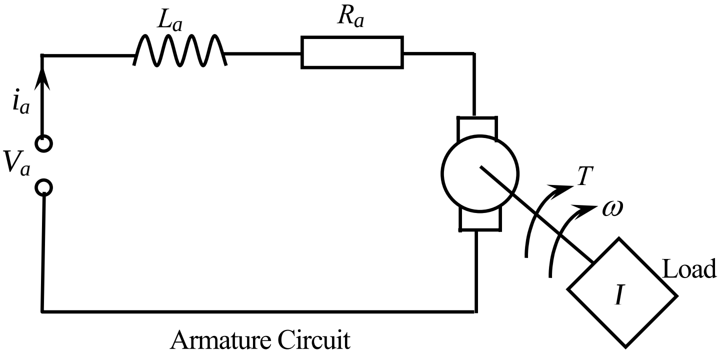
$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Hl \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{3.3}$$

เมื่อ A = เมตริกซ์สเตตของระบบ [2x2]

B = เมตริกซ์อินพุทของระบบ [2x1]

C = เมตริกซ์เอาท์พุทของระบบ [1x2]

H = เมตริกซ์ตัวรบกวนของระบบ [2x1]



รูปที่ 3.1 แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการที่ (3.1) และ(3.2) จัดให้อยู่ในรูป State Space Form จะได้

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

$$y=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix}\omega\\ i_a\end{Bmatrix} \tag{3.4}$$

เมื่อ I =โมเมนต์ความเฉื่อย (kg·m^2)

K_t = ค่าคงที่ของแรงบิด (N·m/A)

K_b = ค่าคงที่ของ Electromotive Force (V·s/rad)

T_L = แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (N·m)

b = ความหน่วง (N·m·s/rad)

R_a = ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)

L_a = ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)

i_a = กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)

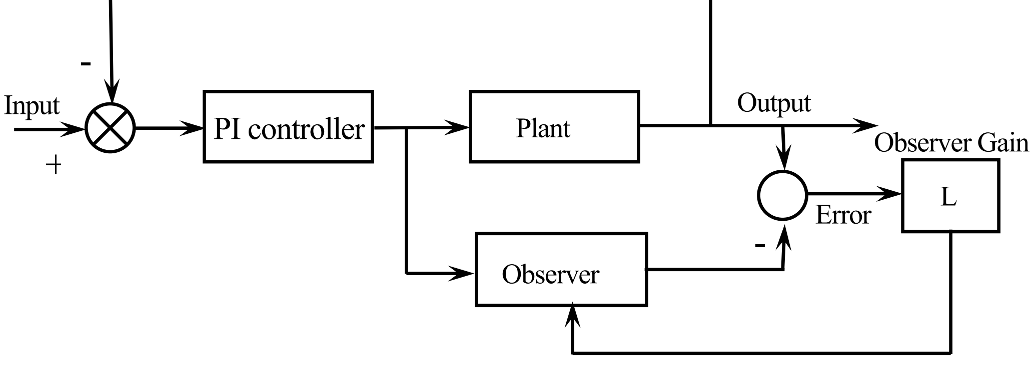
ω = ความเร็วรอบ (rad/s)

V_a = ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)

V_b = ความต่างศักย์ back emf (V)

ในทางปฏิบัติตัวแปรสเตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำการศึกษานั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้นหากมีความจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรสเตตของระบบเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการควบคุมระบบจึงต้องมีการประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกตทั้งนี้ระบบต้องมีคุณสมบัติในการสังเกตได้ ระบบที่จะสามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตโดยใช้ตัวสังเกตได้นั้นต้องสามารถทราบค่าอินพุท และเอาท์พุทของระบบได้ หลักการทำงานของตัวสังเกตจะนำค่าความแตกต่างระหว่างเอาท์พุทของระบบที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสเตต และเอาท์พุทจากระบบของตัวสังเกตมาประมวลผลผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อลดค่าความผิดพลาดระหว่างทั้งสองระบบ ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวสังเกตที่เป็นอันดับเต็มโดยที่ระบบที่ทำการศึกษามีค่าอินพุท คือ ค่าของความต่างศักย์ที่ให้กับอาร์เมเจอร์ และเอาท์พุท คือ ความเร็วรอบ ส่วนตัวแปรสเตตที่พิจารณามีสองตัว คือ ค่าของความเร็วรอบ และค่าของกระแสไฟฟ้าเมื่อมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนระบบการทำงานของตัวสังเกตจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงต้องมีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และชดเชยให้กับตัวสังเกตเพื่อลดความผิดพลาดจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้

3.2 ตัวสังเกต



รูปที่ 3.2 แผนภาพระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกตอันดับเต็ม

จากค่าสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบ State Space Form ได้ค่าเมตริกซ์ต่าง ๆ คือ

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

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

คุณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบ

$$P_c = \begin{bmatrix} B & AB \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

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

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

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

$$p(\lambda) = \lambda^2 + 2\varsigma\omega_n\lambda + \omega_n^{\ 2} \tag{3.7}$$

เมื่อ ς คือค่าอัตราส่วนความหน่วงของตัวสังเกต และ ω_n คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของตัวสังเกตซึ่งค่าทั้งสองนี้สามารถเลือกตามความเหมาะสมในการออกแบบ เพื่อให้ตัวสังเกตทำงานได้ผลการตอบสนองตามต้องการ

การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต

$$L = p(A)P_o^{-1}[0\ \ 1]^T \tag{3.8}$$

สมการของตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\dfrac{b}{I} & \dfrac{K_t}{I} \\ -\dfrac{R_a}{L_a} & -\dfrac{K_b}{L_a} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} \dfrac{-1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{T}_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} e \\ \hat{y} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i} \end{Bmatrix} \end{aligned} \tag{3.9}$$

เมื่อ $e = y - C\hat{x} = \omega - \hat{\omega}$

เมื่อกำหนดให้ค่าที่มีสัญลักษณ์ '^' คือ ค่าตัวแปรของตัวสังเกตที่ได้มาจากการประมาณค่าจากระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ค่า e คือ ค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบที่เกิดขึ้นระหว่างระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และตัวสังเกต

3.3 การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธี Gradient Method

พิจารณาสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในภาวะที่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง คือ

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\omega \\ i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\omega \\ i\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}0 \\ \frac{1}{L_a}\end{bmatrix}\cdot V_a+\begin{bmatrix}\frac{-1}{I} \\ 0\end{bmatrix}\cdot T_L$$
$$y=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix}\omega \\ i\end{Bmatrix} \tag{3.10}$$

สมการของตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง คือ

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\hat{\omega} \\ \hat{i}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\hat{\omega} \\ \hat{i}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}0 \\ \frac{1}{L_a}\end{bmatrix}\cdot V_a+\begin{bmatrix}\frac{-1}{I} \\ 0\end{bmatrix}\cdot \hat{T}_L$$
$$y=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix}\hat{\omega} \\ \hat{i}\end{Bmatrix} \tag{3.11}$$

ทำการจัดรูปสมการที่ 3.10 ที่อยู่ในรูป State Space Form ให้มาอยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่งสองสมการที่มีอินพุท คือ ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับอาร์เมเจอร์ และเอาท์พุทคือความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ดังสมการที่ 3.12 และ 3.13

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_b\omega \tag{3.12}$$

$$I\frac{d\omega}{dt} = -b\omega + K_t i_a - T_L \tag{3.13}$$

ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง วิธีการที่นำเสนอ คือ การใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธีการของ Gradient Method และเงื่อนไขในการปรับค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในหลักการการชดเชยจะใช้ค่าของความแตกต่างระหว่างความเร็วของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และค่าความเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตเมื่อพิจารณาระบบว่ามีอินพุทคือความต่างศักย์ที่ให้กับอาร์เมเจอร์ และเอาท์พุทคือค่าความเร็วรอบจากสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$\frac{K_t}{L_a I}V_a = \ddot{\omega} + \left[\frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{I}\right]\dot{\omega} + \left[\frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I}\right]\omega + \frac{1}{I}\dot{T}_L + \frac{R_a}{L_a I}T_L \tag{3.14}$$

เมื่อ $b_1 = \dfrac{K_t}{L_a I}$, $a_1 = \left[\dfrac{R_a b}{L_a I} + \dfrac{K_b K_t}{L_a I}\right]$, $a_2 = \left[\dfrac{R_a}{L_a} + \dfrac{b}{I}\right]$, $\alpha_1 = \dfrac{R_a}{L_a I}$, $\alpha_2 = \dfrac{1}{I}$

$$b_1 V_a = \ddot{\omega} + a_2\dot{\omega} + a_1\omega + \alpha_2\dot{T}_L + \alpha_1 T_L \tag{3.15}$$

เมื่อมีการทำการระบุเอกลักษณ์ระบบแล้วค่าของตัวแปรต่างๆในระบบจะคงที่มีเพียงค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเพียงตัวแปรเดียวที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของการประมาณค่าตัวแปรสเตต คือ ค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ($\hat{T}_L$) และค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงแต่จะได้จากการประมาณ แต่ในส่วนของการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะสมมุติว่าสามารถทราบค่าตัวแปรทุกตัวภายในระบบ พิจารณาสมการของตัวสังเกต

$$\frac{K_t}{L_a I}V_a = \ddot{\hat{\omega}} + \left[\frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{I}\right]\dot{\hat{\omega}} + \left[\frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I}\right]\hat{\omega} + \frac{1}{I}\dot{\hat{T}}_L + \frac{R_a}{L_a I}\hat{T}_L \tag{3.16}$$

เมื่อ $b_1 = \dfrac{K_t}{L_a I}$, $a_1 = \left[\dfrac{R_a b}{L_a I} + \dfrac{K_b K_t}{L_a I}\right]$, $a_2 = \left[\dfrac{R_a}{L_a} + \dfrac{b}{I}\right]$, $\alpha_1 = \dfrac{R_a}{L_a I}$, $\alpha_2 = \dfrac{1}{I}$

$$b_1 V_a = \ddot{\hat{\omega}} + a_2\dot{\hat{\omega}} + a_1\hat{\omega} + \alpha_2\dot{\hat{T}}_L + \alpha_1\hat{T}_L \tag{3.17}$$

ดังนั้นหลักการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้คือการปรับค่าตัวแปร ($\hat{T}_L$) ให้ความแตกต่างระหว่างเอาท์พุททั้งสองหมดไป ทำได้โดยกำหนดให้ Loss function (J) มีค่า

$$J(\hat{T}_L) = \frac{1}{2}e^2 \tag{3.18}$$

สมการที่ (3.15) ลบด้วยสมการที่ (3.17) จะได้

$$\ddot{e} = -a_2\dot{e} - a_1 e - \alpha_2(\dot{T}_L - \dot{\hat{T}}_L) - \alpha_1(T_L - \hat{T}_L) \quad (3.19)$$

เมื่อ $\ddot{e} = \ddot{\omega} - \ddot{\hat{\omega}}$, $\dot{e} = \dot{\omega} - \dot{\hat{\omega}}$, $e = \omega - \hat{\omega}$

การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ($\hat{T}_L$) ในทิศทาง Negative gradient of Loss function (J) คือ

$$\frac{d\hat{T}_L}{dt} = -\gamma \frac{dJ}{d\hat{T}_L} = -\gamma e \frac{de}{d\hat{T}_L} \quad (3.20)$$

จาก MIT Rule จะได้ตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{de}{d\hat{T}_L} = -\frac{d\hat{\omega}}{d\hat{T}_L} \quad (3.21)$$

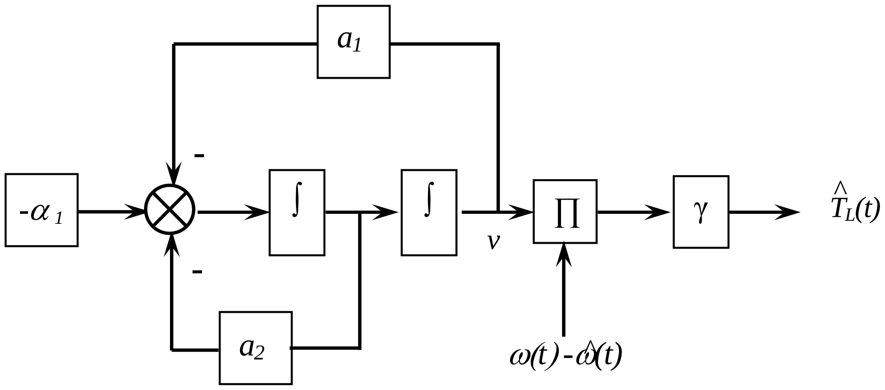
โดยที่ γ คือ อัตราการปรับตัวและกำหนดให้ Sensitivity Function เท่ากับ

$$v = \frac{d\hat{\omega}}{d\hat{T}_L} \quad (3.22)$$

เมื่อตัวแปรปรับค่า ($\hat{T}_L$) มีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของสมการ (3.17) ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + a_2 \frac{dv}{dt} + a_1 v = -\alpha_1 \quad (3.23)$$

จากสมการ (3.23) สามารถนำมาสร้างเป็นแผนภาพบล็อกการทำงานได้ดังรูป



รูปที่ 3.3 แผนภาพบล็อกของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Gradient Method สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

3.4 การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธี Lyapunov's Direct Method

การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของระบบโดยใช้วิธีการ Lyapunov's Direct Method ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างจาก Lyapunov's Direct Method จะสามารถทำการประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้เช่นเดียวกับตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างจากวิธีการของ Gradient Method แต่โครงสร้างของระบบจะมีความแตกต่างกันแต่ยังคงต้องใช้ค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในภาวะที่ไม่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากตัวสังเกตเช่นเดียวกัน พิจารณาสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง คือ

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\omega\\ i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I}\\ -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\omega\\ i\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \frac{1}{L_a}\end{bmatrix}\cdot V_a+\begin{bmatrix}\frac{-1}{I}\\ 0\end{bmatrix}\cdot T_L$$

$$y=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix}\omega\\ i\end{Bmatrix} \tag{3.24}$$

สมการของตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง คือ

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{i}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I}\\ -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{i}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \frac{1}{L_a}\end{bmatrix}\cdot V_a+\begin{bmatrix}\frac{-1}{I}\\ 0\end{bmatrix}\cdot\hat{T}_L$$

$$y=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{i}\end{Bmatrix} \quad (3.25)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ 3.24 ที่อยู่ในรูป State Space Form ให้มาอยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่ง สองสมการที่มีอินพุท คือ ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับอาร์เมเจอร์ และเอาท์พุทคือความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ดังสมการที่ 3.26และ 3.27

$$V_a = R_a i_a + L_a\frac{di_a}{dt} + K_b\omega \quad (3.26)$$

$$\frac{di_a}{dt} = -b\omega + K_t i_a - T_L \quad (3.27)$$

แทนค่าสมการที่ 3.26 การที่ 3.27 ให้ค่ากระแสไฟฟ้าในสมการหมดไปคงเหลือไว้เพียงค่าความต่างศักย์ ความเร็วรอบ และค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากนั้นจัดรูปสมการจะได้

$$\frac{K_t}{L_a I}V_a = \ddot{\omega} + \left[\frac{R_a}{L_a}+\frac{b}{I}\right]\dot{\omega} + \left[\frac{R_a b}{L_a I}+\frac{K_b K_t}{L_a I}\right]\omega + \frac{1}{I}\dot{T}_L + \frac{R_a}{L_a I}T_L \quad (3.28)$$

เมื่อ $b_1 = \frac{K_t}{L_a I},\ a_1 = \left[\frac{R_a b}{L_a I}+\frac{K_b K_t}{L_a I}\right],\ a_2 = \left[\frac{R_a}{L_a}+\frac{b}{I}\right],\ \alpha_1 = \frac{R_a}{L_a I},\ \alpha_2 = \frac{1}{I}$

$$b_1 V_a = \ddot{\omega} + a_2\dot{\omega} + a_1\omega + \alpha_2\dot{T}_L + \alpha_1 T_L \quad (3.29)$$

ในทางปฏิบัติค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถทราบค่าได้โดยตรงดังนั้น ในการจำลองระบบจะใช้ค่าตัวแปรที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ระบบ แต่ในการจำลองสถานการณ์ จะสมมุติว่าทราบค่าตัวแปรทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง พิจารณา

$$\frac{K_t}{L_a I}V_a = \ddot{\hat{\omega}} + \left[\frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{I}\right]\dot{\hat{\omega}} + \left[\frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I}\right]\hat{\omega} + \frac{1}{I}\dot{\hat{T}}_L + \frac{R_a}{L_a I}\hat{T}_L \tag{3.30}$$

เมื่อ $b_1 = \frac{K_t}{L_a I},\ a_1 = \left[\frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I}\right],\ a_2 = \left[\frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{I}\right],\ \alpha_1 = \frac{R_a}{L_a I},\ \alpha_2 = \frac{1}{I}$

$$b_1 V_a = \ddot{\hat{\omega}} + a_2\dot{\hat{\omega}} + a_1\hat{\omega} + \alpha_2\dot{\hat{T}}_L + \alpha_1\hat{T}_L \tag{3.31}$$

สมการที่ (3.29) ลบด้วยสมการที่ (3.31) จะได้

$$\ddot{e} = -a_2\dot{e} - a_1 e - \alpha_2(\dot{T}_L - \dot{\hat{T}}_L) - \alpha_1(T_L - \hat{T}_L) \tag{3.32}$$

เมื่อ $\ddot{e} = \ddot{\omega} - \ddot{\hat{\omega}}, \dot{e} = \dot{\omega} - \dot{\hat{\omega}}, e = \omega - \hat{\omega}$

จากสมการที่ (3.32) กำหนดให้ Lyapunov Function คือ

$$V(e, \dot{\hat{T}}_L, \hat{T}_L) = \frac{a_1}{2}e^2 + \frac{\dot{e}^2}{2} + \frac{1}{2\gamma_2}(\dot{T}_L - \dot{\hat{T}}_L)^2 + \frac{1}{2\gamma_1}(T_L - \hat{T}_L)^2 \tag{3.33}$$

โดยที่ γ_1 และ γ_2 คือ อัตราการปรับตัว

พิจารณาอนุพันธ์ของ Lyapunov Function

$$\frac{dV(e, \dot{\hat{T}}_L, \hat{T}_L)}{dt} = a_1 e\dot{e} + \dot{e}\ddot{e} + \frac{1}{\gamma_2}(\dot{T}_L - \dot{\hat{T}}_L)\left(-\frac{d\dot{\hat{T}}_L}{dt}\right) + \frac{1}{\gamma_1}(T_L - \hat{T}_L)\left(-\frac{d\hat{T}_L}{dt}\right) \tag{3.34}$$

แทนค่าสมการที่ (3.32) ในสมการที่ (3.34) และจัดรูปจะได้

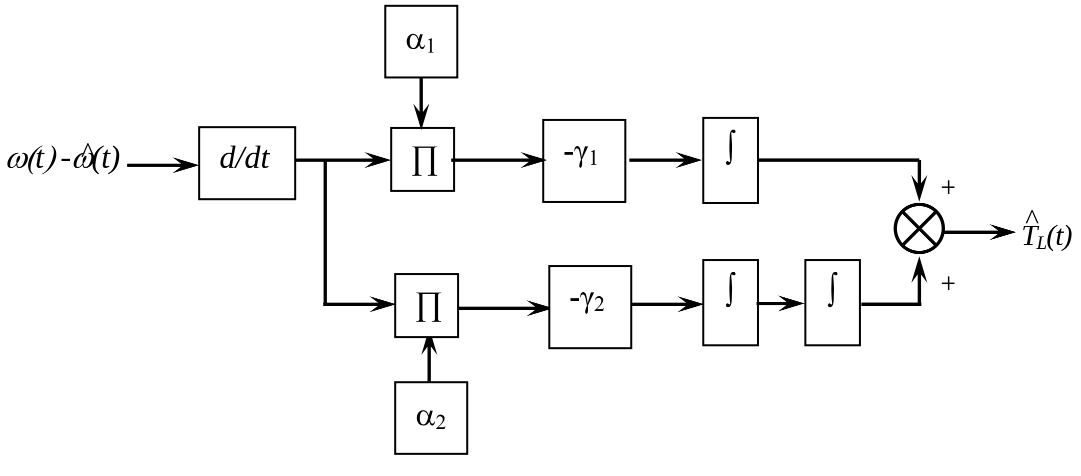
$$\frac{dV(e,\dot{\hat{T}}_L,\hat{T}_L)}{dt} = -a_2\dot{e}^2 + (\dot{T}_L - \dot{\hat{T}}_L)(-\frac{1}{\gamma_2}\frac{d\dot{\hat{T}}_L}{dt} - \dot{e}\alpha_2) + (T_L - \hat{T}_L)(-\frac{1}{\gamma_1}\frac{d\hat{T}_L}{dt} - \dot{e}\alpha_1) \quad (3.35)$$

$$\frac{d\dot{\hat{T}}_L}{dt} = -\gamma_2\dot{e}\alpha_2 \qquad \frac{d\hat{T}_L}{dt} = -\gamma_1\dot{e}\alpha_1 \quad (3.36)$$

จากสมการที่ (3.36) จะได้

$$\frac{dV(e,\dot{\hat{T}}_L,\hat{T}_L)}{dt} = -a_2\dot{e}^2 \quad (3.37)$$

จากสมการที่ (3.37) จะทำให้อนุพันธ์ของ Lyapunov Function เป็น Negative Semi-Definite ระบบที่สร้างขึ้นจะมีเสถียรภาพแบบ Global Stability



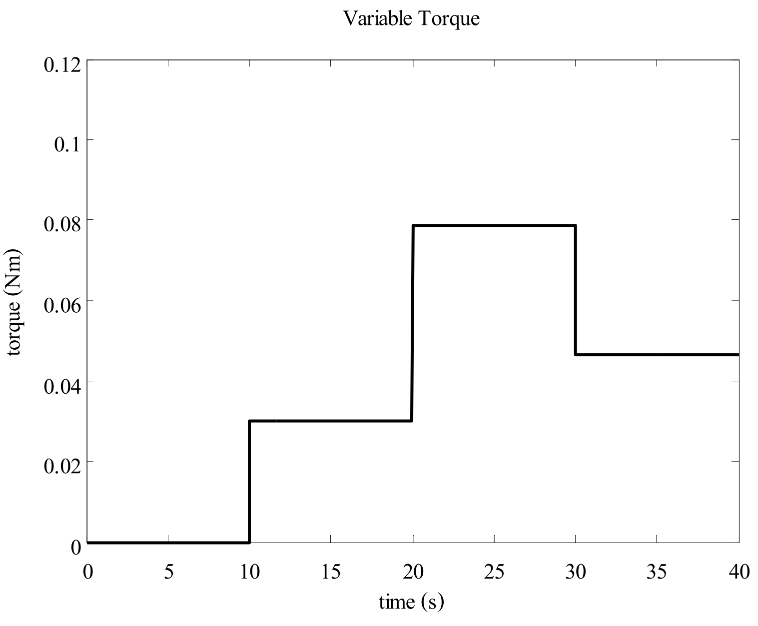
รูปที่ 3.4 แผนภาพบล็อกของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Lyapunov’s Direct Method สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

บทที่ 4
ผลการจำลองสถานการณ์

ในบทนี้แสดงผลการจำลองสถานการณ์ทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง การจำลองสถานการณ์ระบบนี้จะพิจารณาระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่เป็นระบบปิด และมีตัวควบคุมแบบพีไอ ต่อมาจะกล่าวถึงการทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงและในกรณีที่ระบบได้รับผลกระทบจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงรวมทั้งตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จากวิธีการ Gradient Method และ Lyapunov's Direct Method เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงรวมทั้งผลการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งได้จากการประมาณโดยสองวิธีการให้กับตัวสังเกต ผลการจำลองสถานการณ์ได้พิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า $T_L(t)$ เป็น 3 กรณี

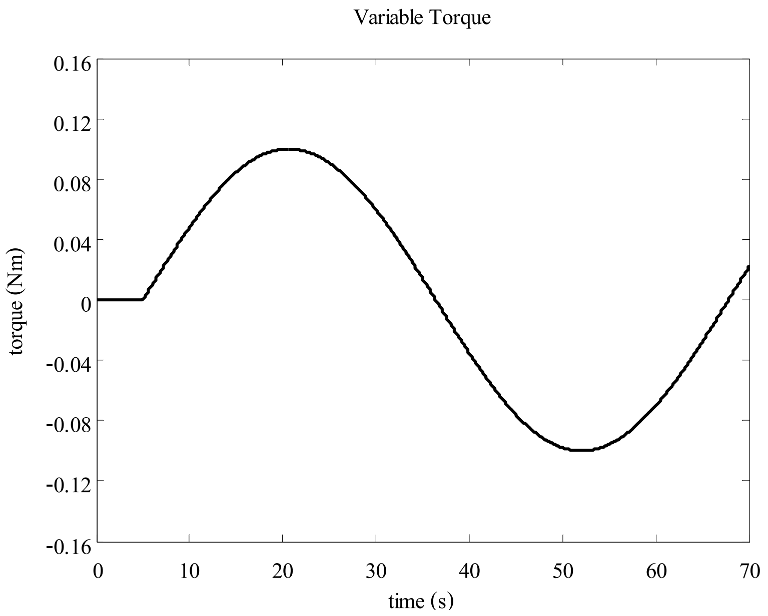
กรณีที่ 1 ระบบมีค่า $T_L(t) = 0$

กรณีที่ 2 ระบบมีค่า $T_L(t)$ เปลี่ยนแปลงเป็นขั้นบันได (Step Function) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2

กรณีที่ 3 ระบบมีค่า $T_L(t) = 0.1\sin(0.1t)$ และมีค่า Delay Time = 5 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 3

กรณีที่ 4 ระบบได้รับสัญญาณรบกวน

กรณีที่ 5 ระบบได้รับผลจากค่าตัวแปรระบบที่มีความผิดพลาด

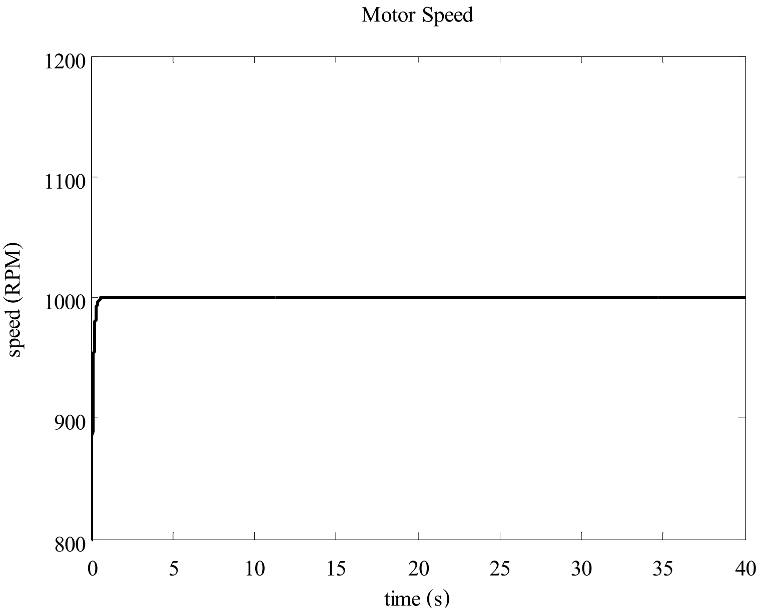
วิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ($T_L(t)$)

วิธีที่ 1 Gradient Method

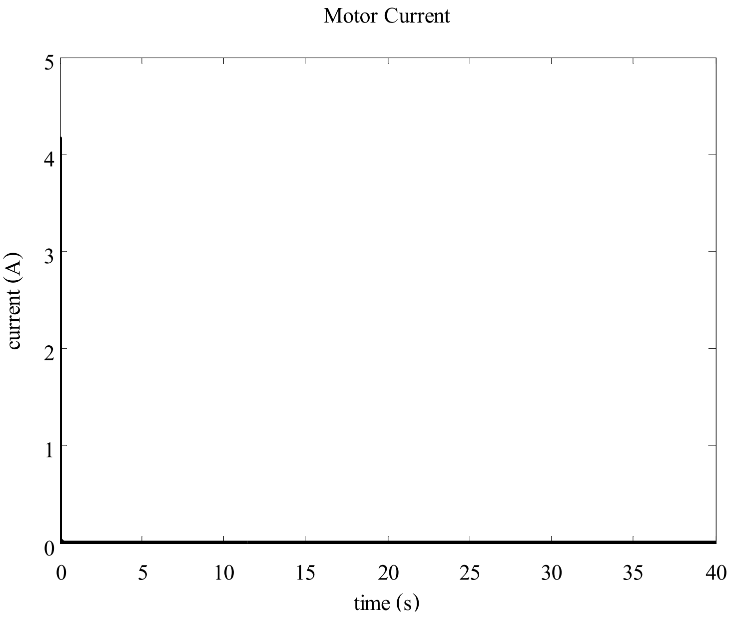
วิธีที่ 2 Lyapunov's Direct Method

4.1 การจำลองสถานการณ์ทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

พิจารณาการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ในกรณีที่ระบบได้รับผลกระทบจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อกำหนดให้อินพุทของระบบมีรูปแบบเป็นขั้นบันไดและมีความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 1000 รอบต่อนาที ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4

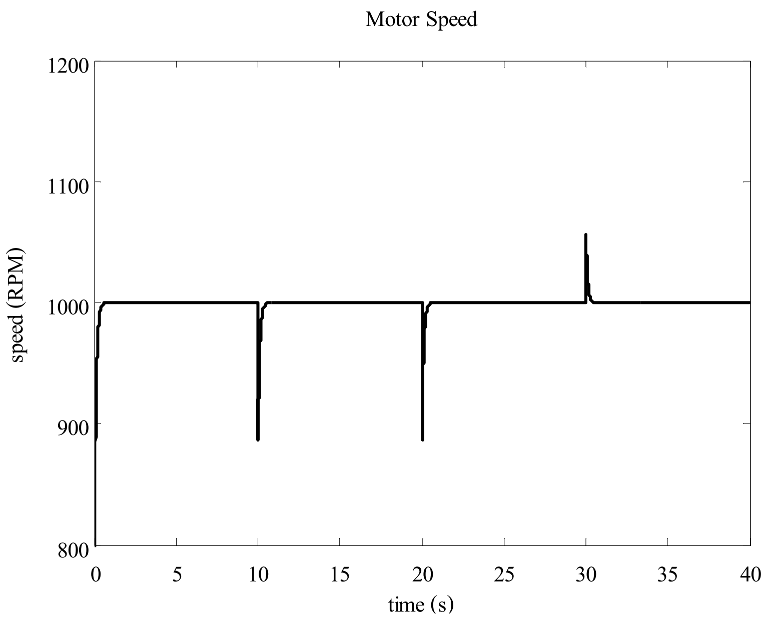


รูปที่ 4.3 แสดงค่า ω สำหรับกรณีที่ 1

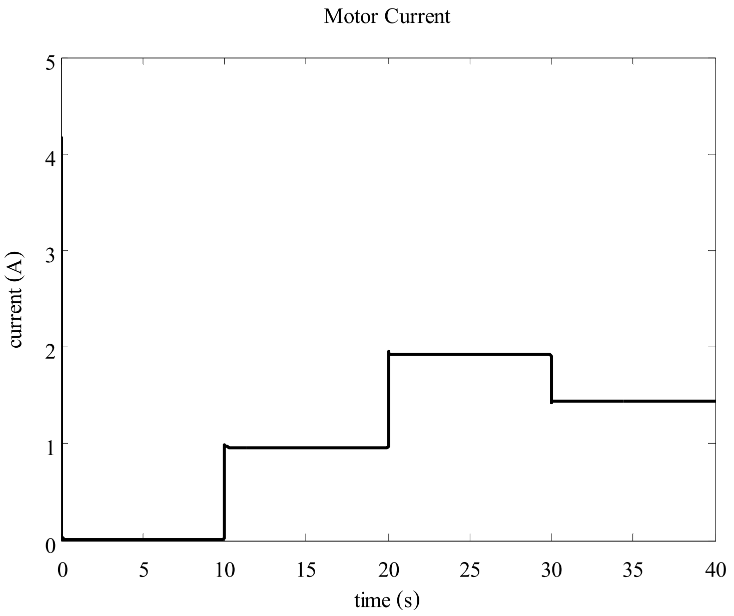


รูปที่ 4.4 แสดงค่า i_a สำหรับกรณีที่ 1

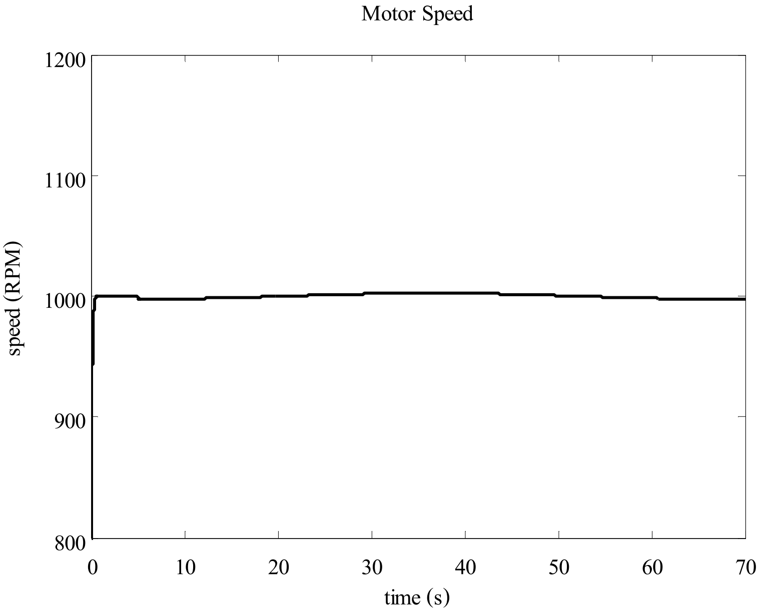
4.2 การจำลองสถานการณ์การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง



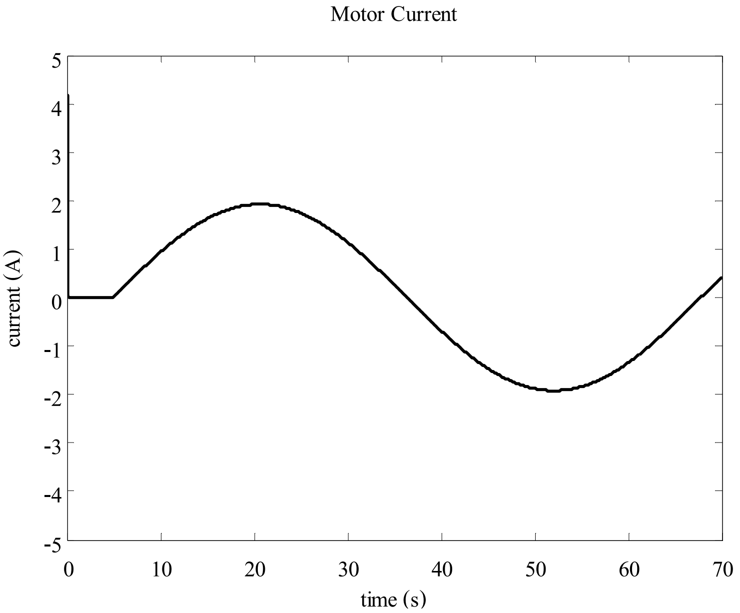
รูปที่ 4.5 แสดงค่า ω สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 4.6 แสดงค่า i_a สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 4.7 แสดงค่า ω สำหรับกรณีที่ 3



รูปที่ 4.8 แสดงค่า i_a สำหรับกรณีที่ 3

เมื่อมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงกระทำกับระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงระบบจะมีการตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8

4.3 การจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

สมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\omega\\ i_a\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I}\\ -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\omega\\ i_a\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \frac{1}{L_a}\end{bmatrix}\cdot V_a+\begin{bmatrix}\frac{-1}{I}\\ 0\end{bmatrix}\cdot T_L \tag{4.1}$$

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

สมการของตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{i}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I}\\ -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{i}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \frac{1}{L_a}\end{bmatrix}\cdot V_a+\begin{bmatrix}\frac{-1}{I}\\ 0\end{bmatrix}\cdot \hat{T}_L+\begin{bmatrix}L_1\\ L_2\end{bmatrix}e \tag{4.2}$$

$$\hat{y}=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{i}\end{Bmatrix}$$

พิจารณาแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space From ในกรณีที่ไม่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนระบบเพื่อออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม พิจารณา

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

จากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo จะได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของระบบ คือ

$$I=1.4\times10^{-5}\,kg\cdot m^2/rad,\ K_t=0.052\,N\cdot m/A,\ K_b=0.057\,V\cdot s/rad$$
$$b=1.0\times10^{-6}\,N\cdot m\cdot s/rad,\ R_a=2.5\Omega,\ L_a=2.5\times10^{-3}\,H,\ K=9.60$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะได้

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\omega \\ i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\omega \\ i\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}0 \\ \frac{1}{L_a}\end{bmatrix}\cdot V_a$$
$$y=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix}\omega \\ i\end{Bmatrix} \tag{4.3}$$

จะได้

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\omega \\ i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0.0714 & 3714.2857 \\ -22.80 & -1000\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\omega \\ i\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}0 \\ 400\end{bmatrix}\cdot V_a$$
$$y=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix}\omega \\ i\end{Bmatrix}$$

การออกแบบตัวสังเกตสำหรับประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบใดๆต้องพิจารณาคุณสมบัติในการสังเกตได้ของระบบ และคุณสมบัติในการควบคุมเพื่อจะได้ค่าตัวแปรสเตตในการออกแบบระบบควบคุมต่อไป

พิจารณาคุณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบ

$$P_c=\begin{bmatrix}B & AB\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1.4857\times10^6 \\ 400 & -0.40\times10^6\end{bmatrix}$$
$$\det(P_c)=-5.9429\times10^8\neq0 \tag{4.4}$$

ระบบมีคุณสมบัติในการควบคุมได้

พิจารณาคุณสมบัติความสังเกตได้ของระบบ

$$P_o=\begin{bmatrix}C \\ CA\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 \\ -0.0714 & 3.7143\times10^3\end{bmatrix}$$
$$\det(P_o)=3.7143\times10^3\neq0 \tag{4.5}$$

ระบบมีคุณสมบัติในการสังเกตได้

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเปิด คือ

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{IL\cdot s^2 + (IR + bL)\cdot s + (bR + K_b K_t)}$$

ระบบเปิดมีโพลที่ -93.49 และ -906.58

การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต พิจารณา

$$p(\lambda) = \lambda^2 + 2\varsigma\omega_n\lambda + \omega_n{}^2 \tag{4.6}$$

เลือก $\varsigma = 0.8$ และ $\omega_n = 1250$ rad/s

ได้ $p(\lambda) = \lambda^2 + 2000\lambda + 1562500$ และ $\lambda = -1000 \pm 750i$

พิจารณา

$$p(A) = A^2 + 2000A + 1562500I_1$$

$$= \begin{bmatrix} -0.0714 & 3714.2857 \\ -22.80 & -1000 \end{bmatrix}^2 + 2000\begin{bmatrix} -0.0714 & 3714.2857 \\ -22.80 & -1000 \end{bmatrix} + 1562500\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1.4777\times10^6 & 3.7140\times10^6 \\ -0.0228\times10^6 & 0.4778\times10^6 \end{bmatrix}$$

เมื่อ $L = p(A)P_o^{-1}[0\ \ 1]^T$

ค่าอัตราขยายของตัวสังเกต คือ $L = \begin{bmatrix} 999.9248 \\ 128.6418 \end{bmatrix}$

พิจารณา

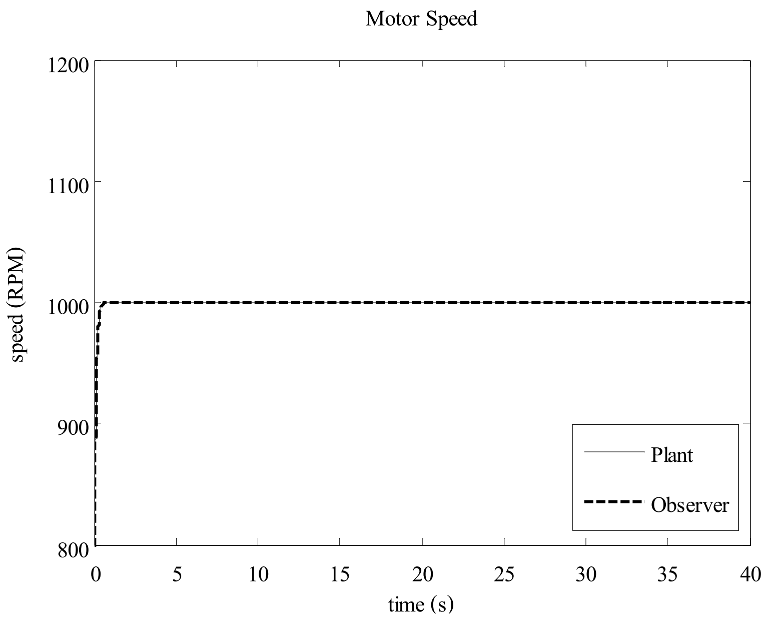
$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly$$

จะได้สมการของตัวสังเกต คือ

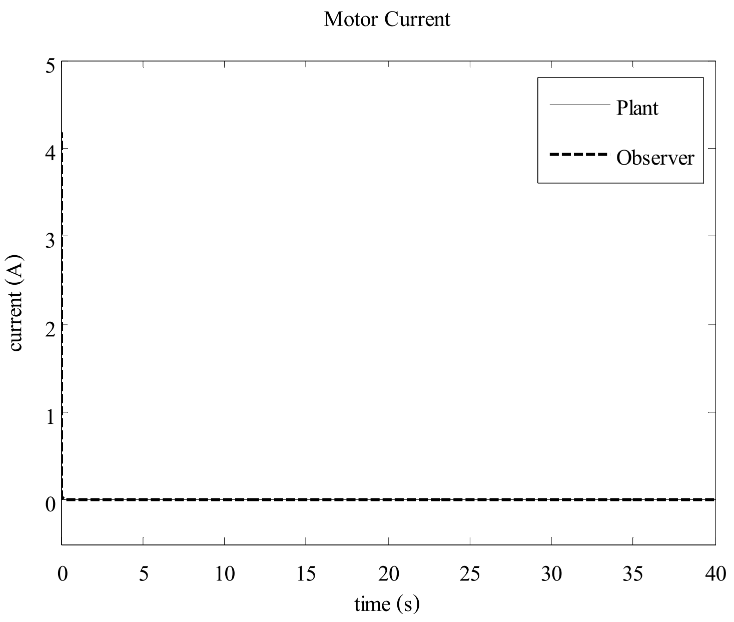
$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{i}}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.0000\times10^3 & 3.7143\times10^3 \\ -0.1514\times10^3 & -1.00\times10^3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 400 \end{bmatrix}\cdot V_a + \begin{bmatrix} 999.9248 \\ 128.6418 \end{bmatrix}\omega$$

เมื่อ L คือ ค่าเมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต และ e คือ ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วของระบบจริง และตัวสังเกต การตอบสนองของตัวสังเกตเป็นผลมาจากการเลือกค่าโพลของตัวสังเกตในการออกแบบอย่างเหมาะสม

การทำงานของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และตัวสังเกตในกรณีที่ไม่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนระบบการทำงานของระบบควบคุมจะมีประสิทธิภาพ และตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



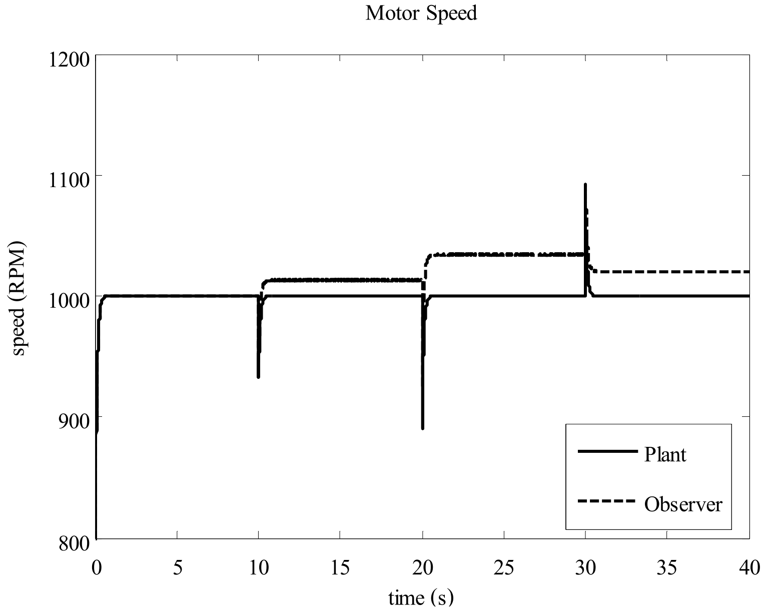
รูปที่ 4.9 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1



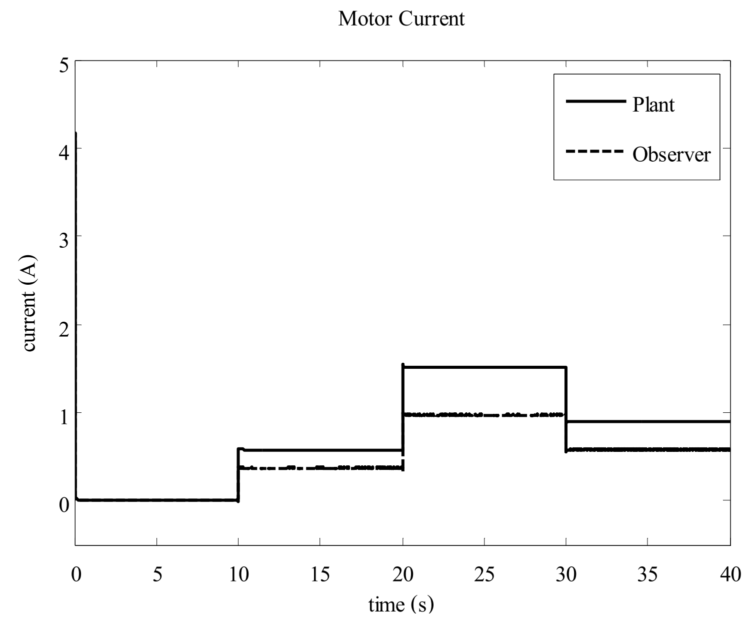
รูปที่ 4.10 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 1

4.4 การจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

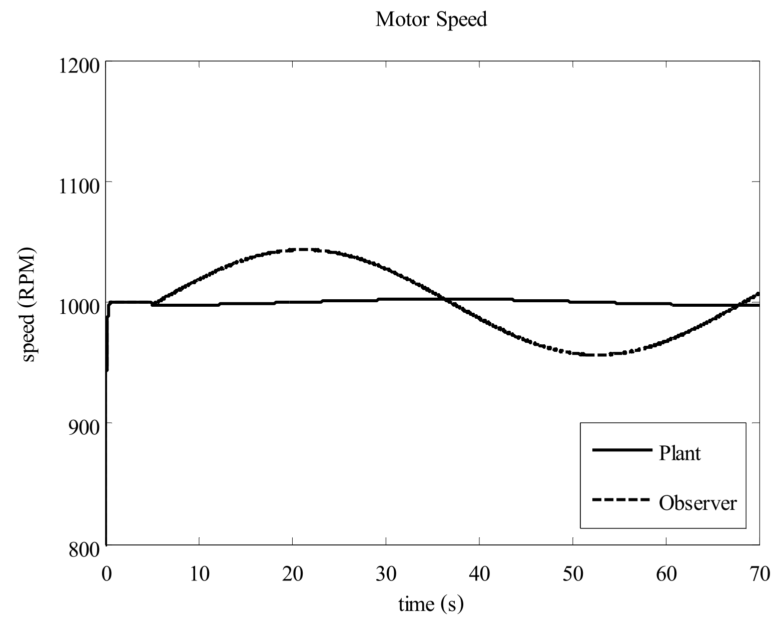
ในกรณีที่ระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง การทำงานของตัวสังเกตจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นทั้งในส่วนของความเร็ว และค่ากระแสไฟฟ้าไม่ว่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเป็นค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนตามเวลา ค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อใช้ตัวสังเกตจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งระบบได้รับ และการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของแรงบิดที่ระบบได้รับจะทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14



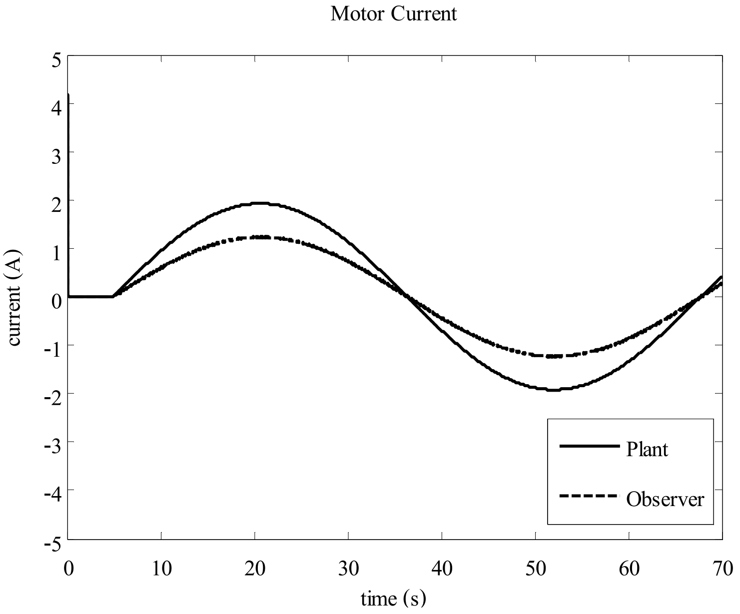
รูปที่ 4.11 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 4.12 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 2



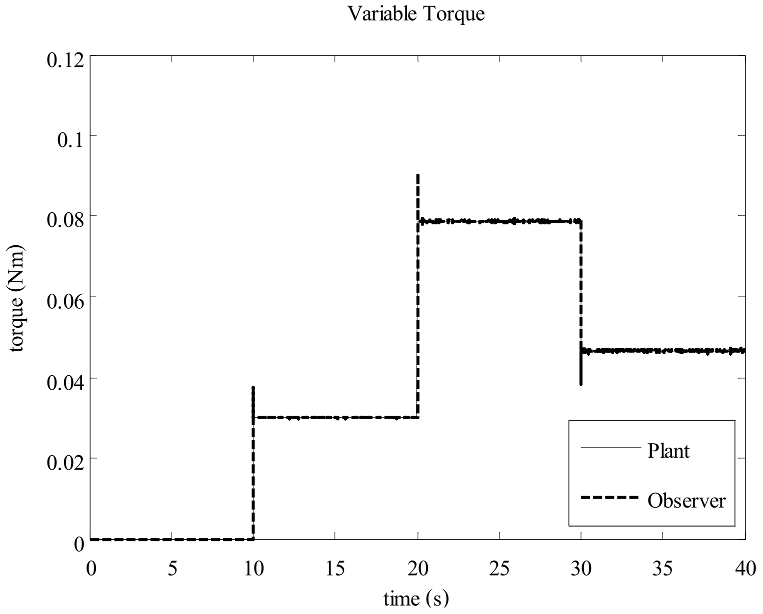
รูปที่ 4.13 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3



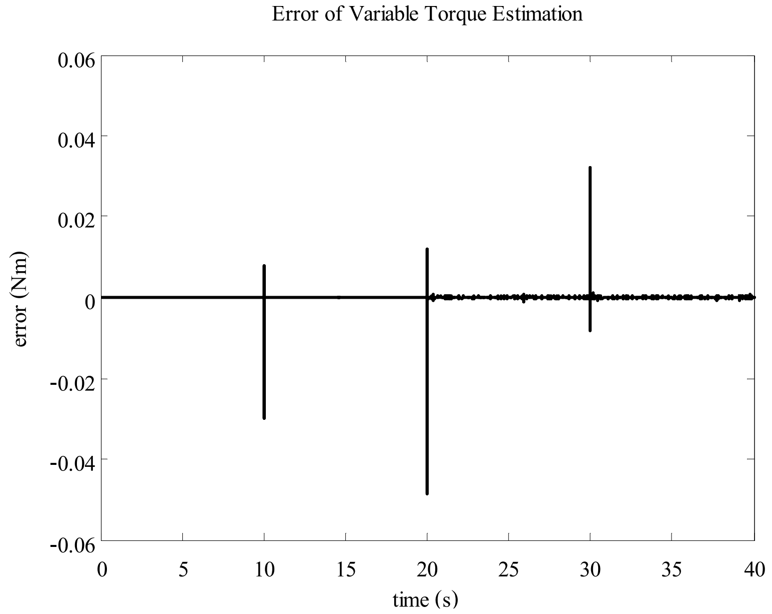
รูปที่ 4.14 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 3

4.5 การจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Gradient Method

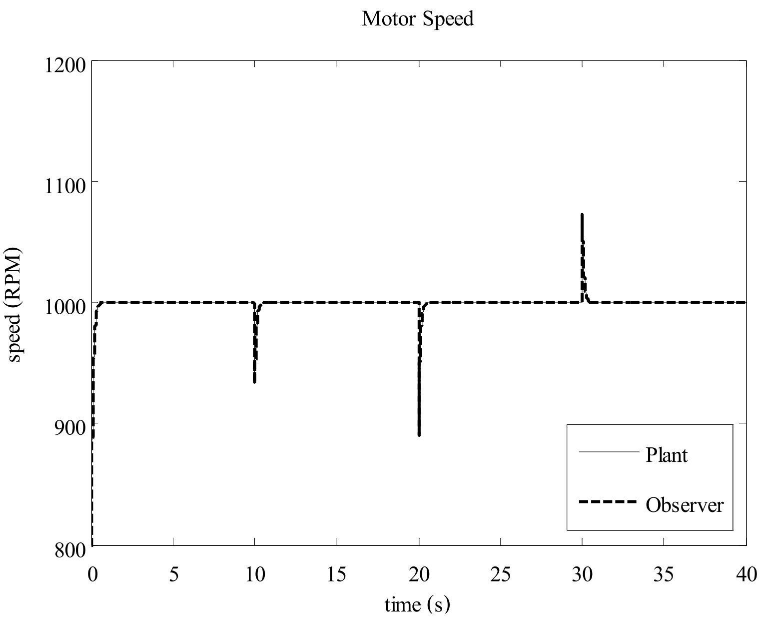
พิจารณาการทำงานของระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง โดยให้แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งเข้ามารบกวนระบบมีลักษณะเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได การรบกวนของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลต่อการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวสังเกต คือ ค่าของกระแสไฟฟ้าและค่าของความเร็วรอบ เนื่องจากความแตกต่างที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของตัวสังเกตและระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยในการจำลองสถานการณ์ระบบนี้เราจะสมมุติว่าเราทราบค่าของตัวแปรทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และสามารถวัดค่าความเร็วของระบบได้ เพื่อทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตมีประสิทธิภาพมากขึ้น และกำหนดว่าตัวแปรทุกตัวภายในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ ในขณะที่มีค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบซึ่งผลที่ได้นี้จะทำให้สามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของระบบได้ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ความผิดพลาดของการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 4.16 และเมื่อชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ให้กับระบบของตัวสังเกตจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18



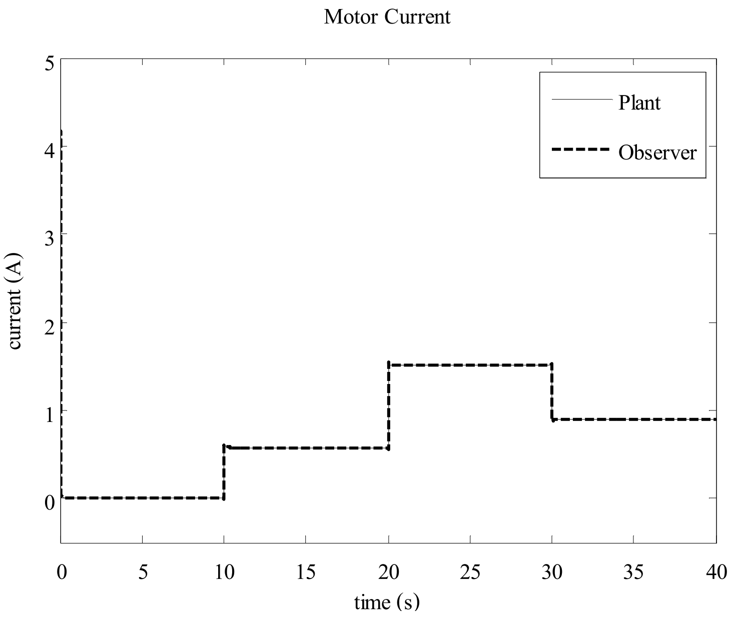
รูปที่ 4.15 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 4.16 แสดงค่า $\hat{T}_L(t) - T_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 4.17 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 4.18 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2

ผลการจำลองสถานการณ์ระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวสังเกตสำหรับการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง การทำงานของตัวสังเกตจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น แต่หากสามารถชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะทำให้การทำงานของตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง ในการจำลองสถานการณ์ระบบนี้สามารถทราบค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากสามารถทำการกำหนดได้เองเพื่อพิสูจน์หลักการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยแต่ในความเป็นจริงค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในสภาวะอยู่ตัวสามารถหาได้จากสมการ

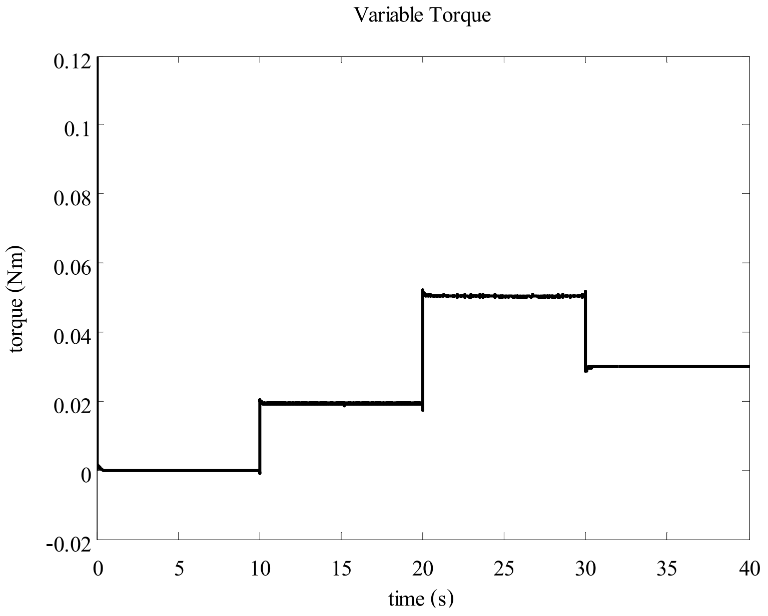
$$T_M = b\dot{\theta} + T_F \,\mathrm{sgn}(\dot{\theta}) \tag{4.7}$$

เมื่อ $T_M = K_t i_a$

ในแบบจำลองที่ทำการศึกษานี้จะไม่พิจารณาค่าของแรงเสียดทานดังนั้นจากสมการที่ (4.7)

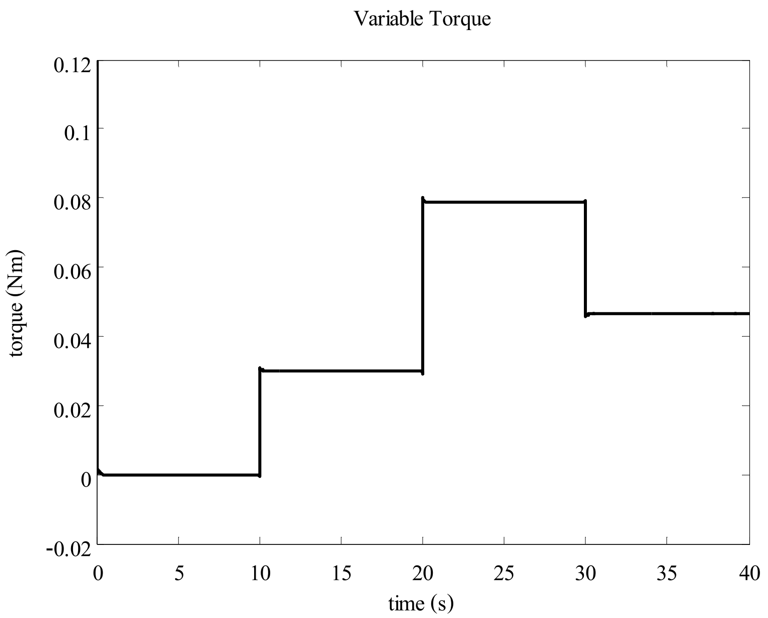
$$T_L = b\dot{\theta} - K_t i_a \tag{4.8}$$

เมื่อการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกตทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง เราจะสามารถทำการหาค่าจริงของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้จากค่ากระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบที่ประมาณค่าได้จากตัวสังเกต ในการจำลองสถานการณ์ระบบนี้จะแสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตที่ไม่ได้ทำการชดเชยมาใช้ในการหาค่าจริงของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และเมื่อใช้ค่าตัวแปรสเตตจากระบบที่ทำการชดเชยแล้วจะได้ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีความผิดพลาดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.20

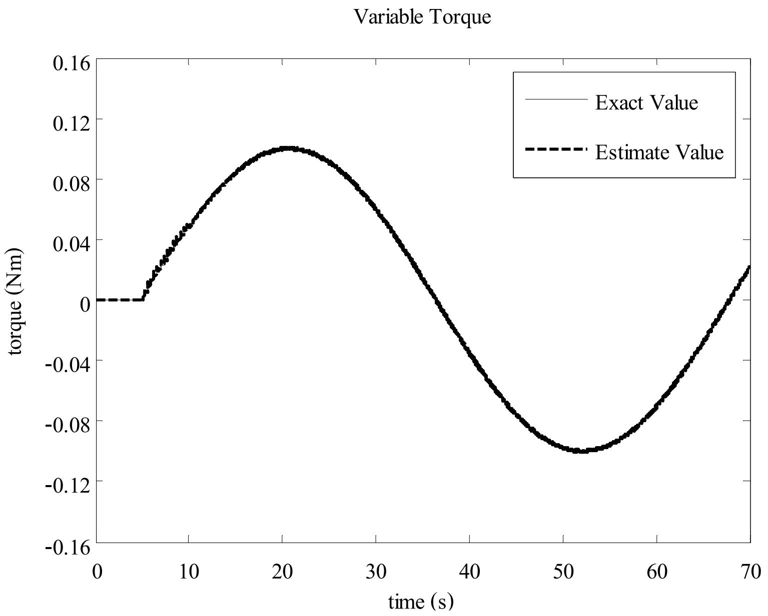


รูปที่ 4.19 แสดงค่า $T_L\ (t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่ไม่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2

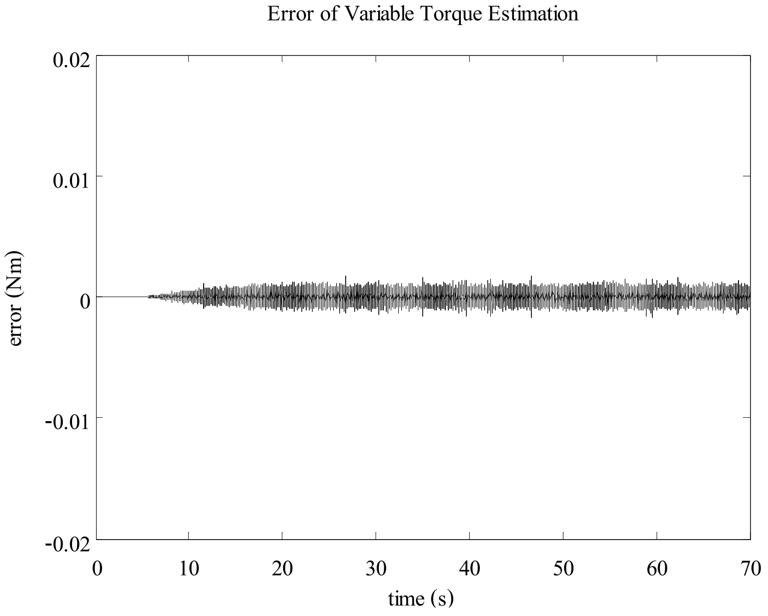
เมื่อแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีลักษณะดังกรณีที่ 3 ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของระบบได้ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ความผิดพลาดของการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 4.22 และเมื่อชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ให้กับระบบของตัวสังเกตจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24



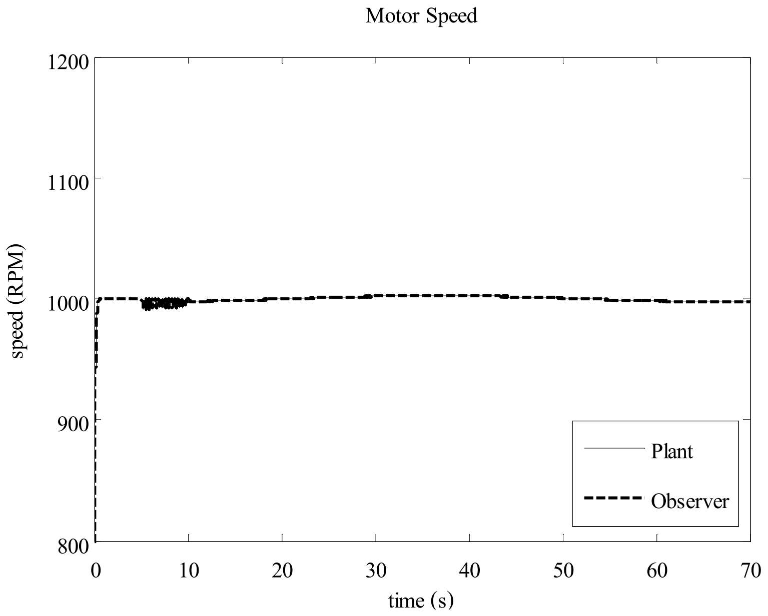
รูปที่ 4.20 แสดงค่า $T_L\ (t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2



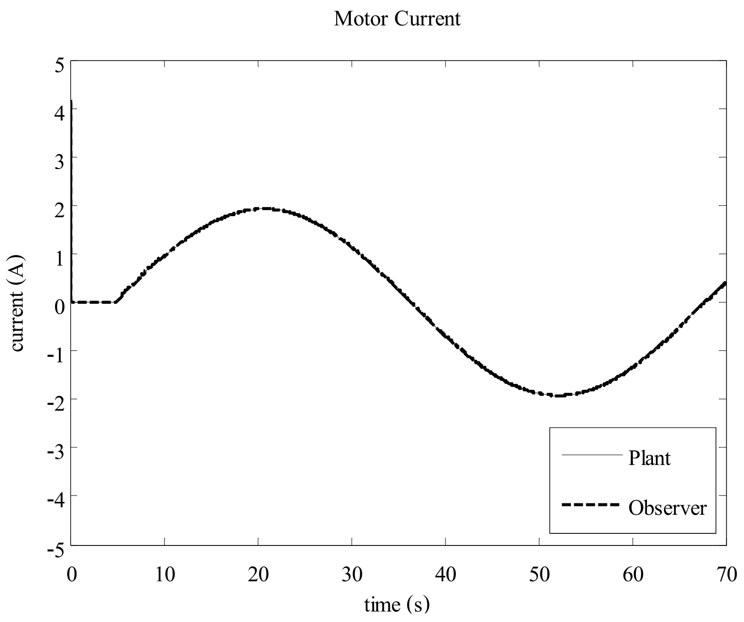
รูปที่ 4.21 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3



รูปที่ 4.22 แสดงค่า $\hat{T}_L(t) - T_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3

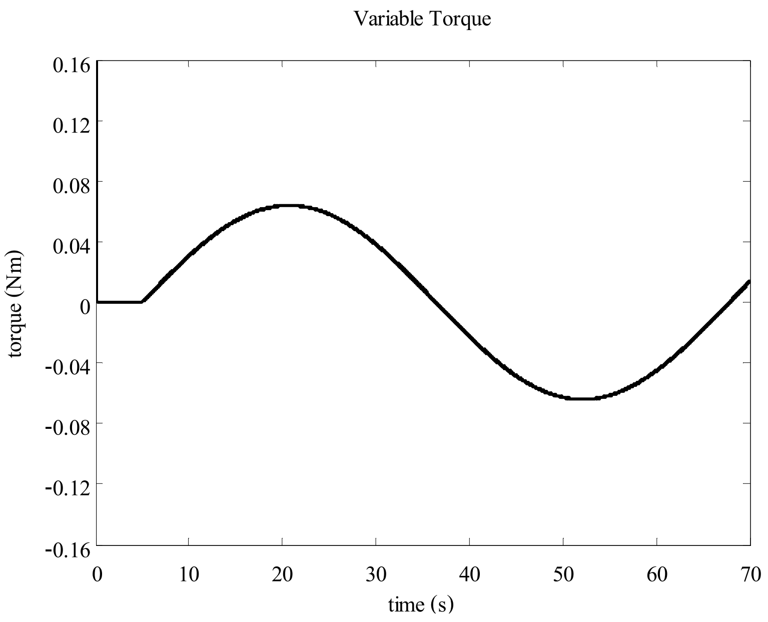


รูปที่ 4.23 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3

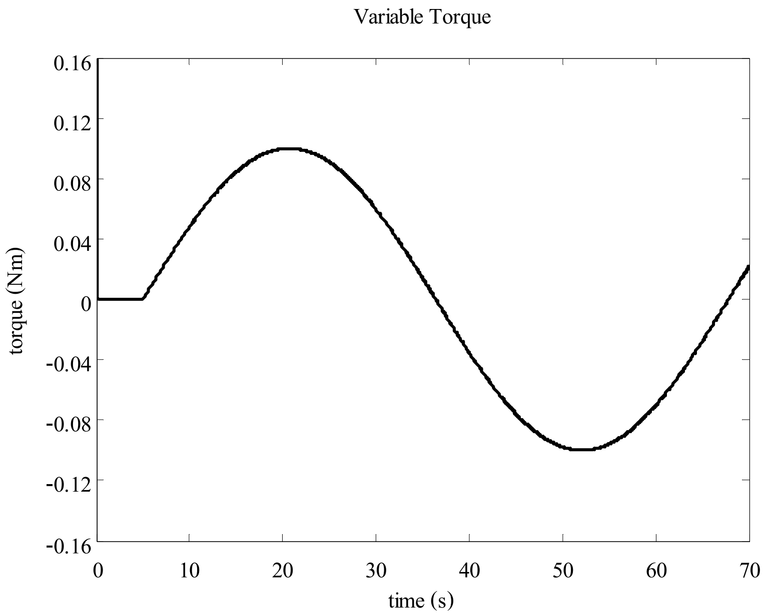


รูปที่ 4.24 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3

สำหรับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในกรณีที่ 3 ผลที่ได้ คือ หากชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีประสิทธิภาพให้กับตัวสังเกตจะทำให้สามารถหาค่าจริงของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้จากสมการที่ (4.8) ความผิดพลาดในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตที่ไม่ได้ทำการชดเชยมาใช้ในการหาค่าจริงของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และเมื่อใช้ค่าตัวแปรสเตตจากระบบที่ทำการชดเชยแล้วจะได้ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีความผิดพลาดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 แสดงค่า $T_L\ (t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่ไม่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3

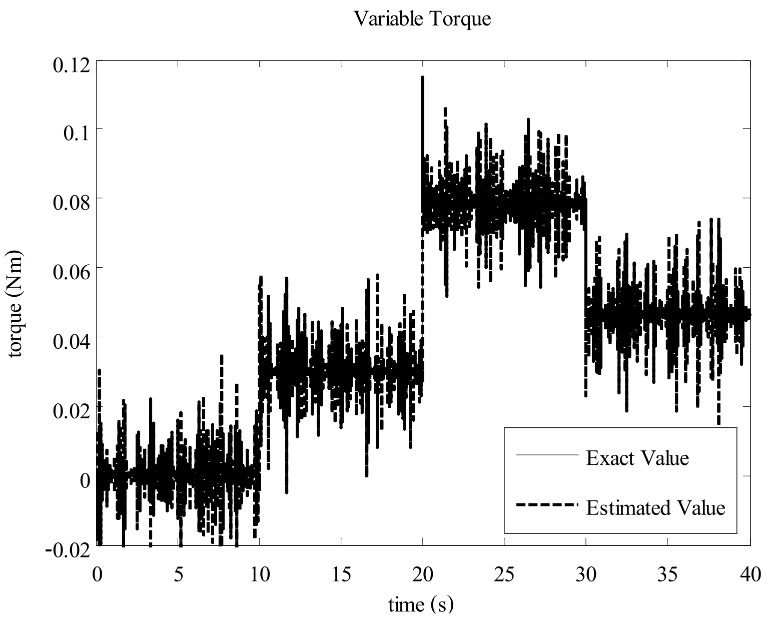


รูปที่ 4.26 แสดงค่า $T_L\ (t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3

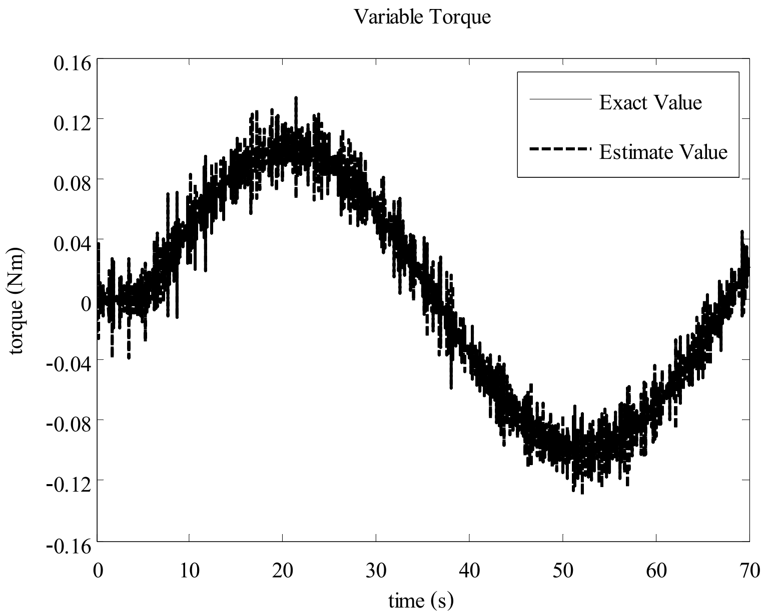
เมื่อมีการใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธีการของ Gradient Method เพื่อทำการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และชดเชยให้กับระบบของตัวสังเกต ผลที่ได้คือการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงและการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบโดยใช้ตัวสังเกตมีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานเบื้องต้นที่ได้ให้ไว้ในงานวิจัยนี้ จากผลการจำลองสถานการณ์ระบบแสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างโดยวิธีการของ Gradient Method นั้นสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ไม่ว่าแรงบิดนั้นจะคงที่หรือเปลี่ยนแปลงตามเวลา และส่วนหนึ่งที่สำคัญควรให้ความสนใจ คือ ค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากการจำลองระบบจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อสามารถทราบค่าที่ถูกต้องของตัวแปรทั้งหมดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

4.6 การจำลองสถานการณ์ผลกระทบของสัญญาณรบกวนและความผิดพลาดของตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีผลต่อการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Gradient Method

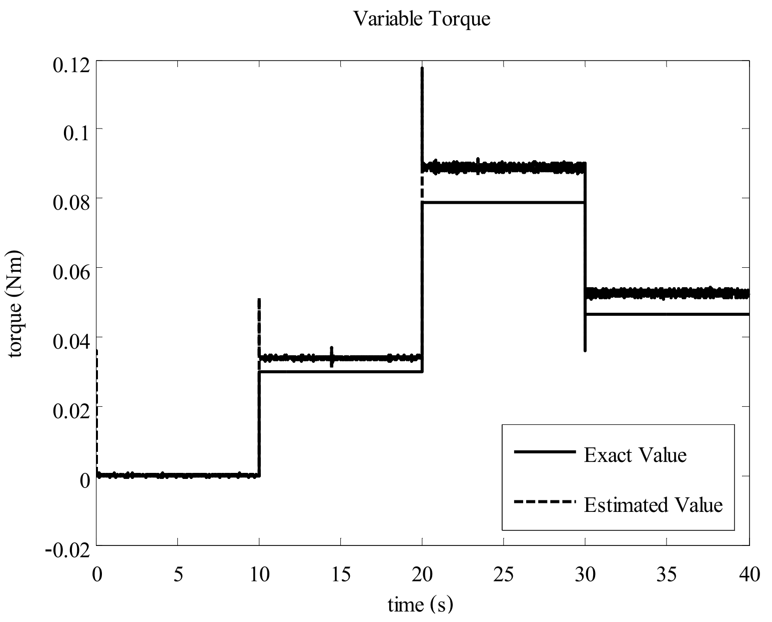
สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัดค่าเอาท์พุทของระบบจะมีผลกระทบต่อการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่ใช้วิธีการ Gradient Method เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ในการจำลองระบบจะพิจารณาทั้งกรณีที่แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีรูปแบบเป็นขั้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ Sine Wave ดังแสดงในรูปที่ 4.28 รวมทั้งพิจารณาผลจากความผิดพลาดของตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีผลทำให้การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.29, 4.30, 4.31 และ 4.32



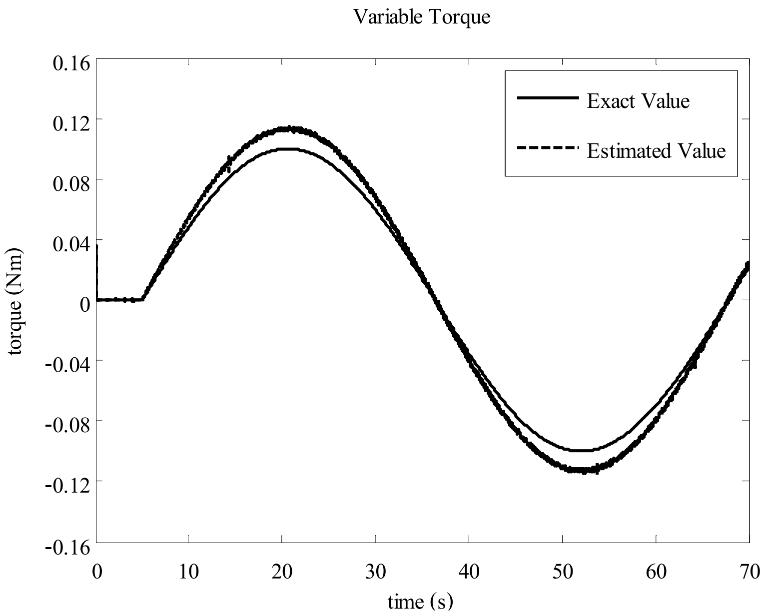
รูปที่ 4.27 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L\ (t)$ โดยจากวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 4



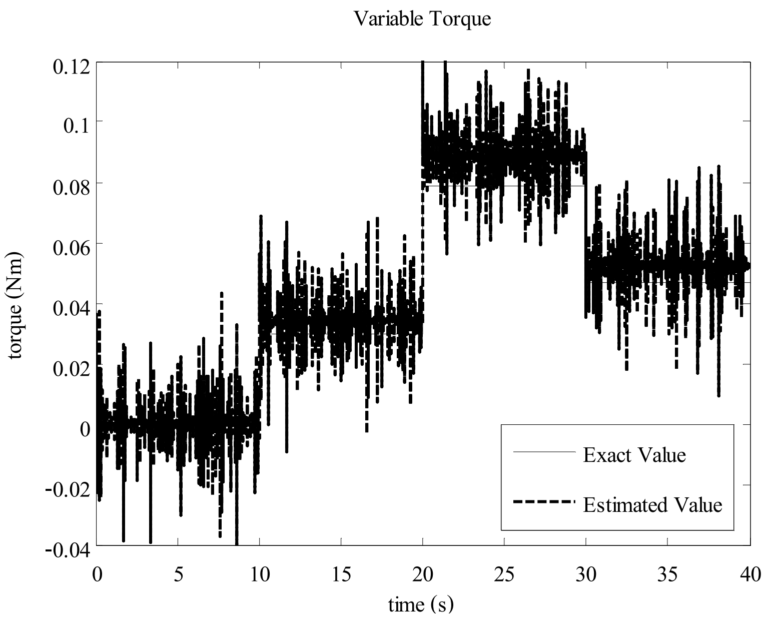
รูปที่ 4.28 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 4



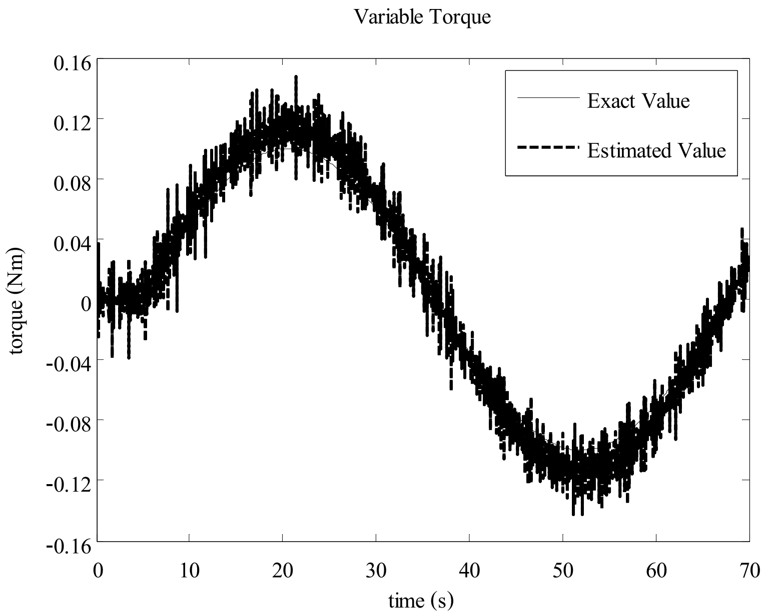
รูปที่ 4.29 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 5



รูปที่ 4.30 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 5



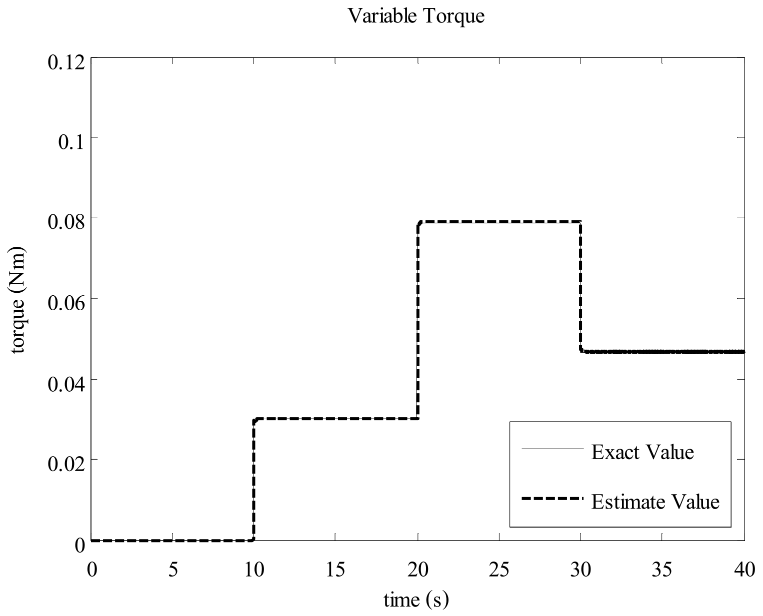
รูปที่ 4.31 แสดงค่า $T_L\,(t)$ และ $\hat{T}_L\,(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 4 และ 5



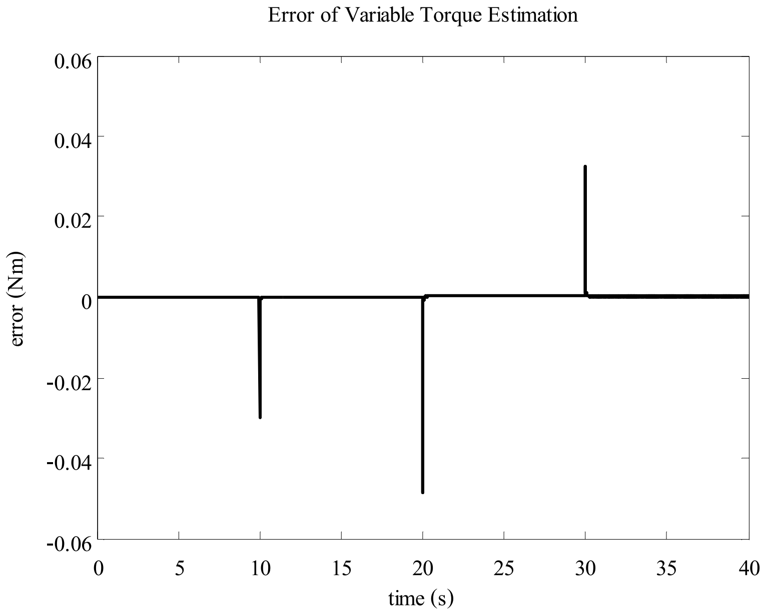
รูปที่ 4.32 แสดงค่า $T_L\,(t)$ และ $\hat{T}_L\,(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 4 และ 5

4.7 การจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Lyapunov's Direct Method

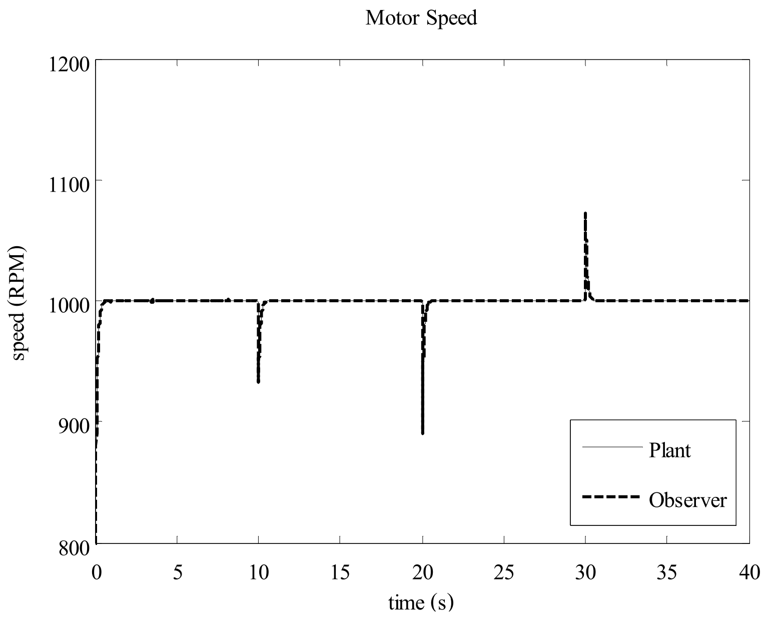
ในหัวข้อนี้จะไม่พิจารณาการทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่ไม่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบ และความผิดพลาดของตัวสังเกตที่เกิดจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง แต่จะพิจารณาการทำงานของตัวสังเกตในภาวะที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบจากนั้นจะใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธีการของ Lyapunov's Direct Method ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงและชดเชยให้กับตัวสังเกตเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธีการของ Gradient Method พิจารณาเมื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 4.33 ความผิดพลาดจากการประมาณแสดงดังรูปที่ 4.34 และผลการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกตแสดงดังรูปที่ 4.35 และ 4.36



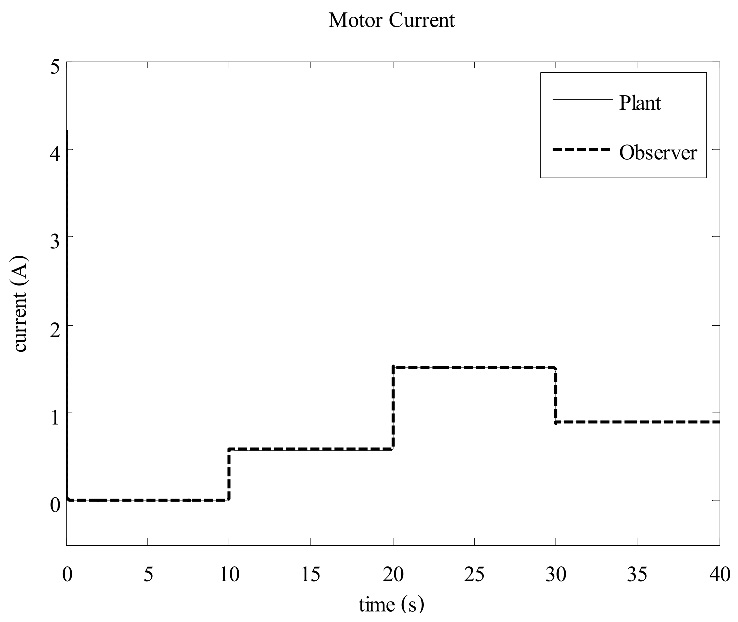
รูปที่ 4.33 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 4.34 แสดงค่า $\hat{T}_L(t) - T_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2

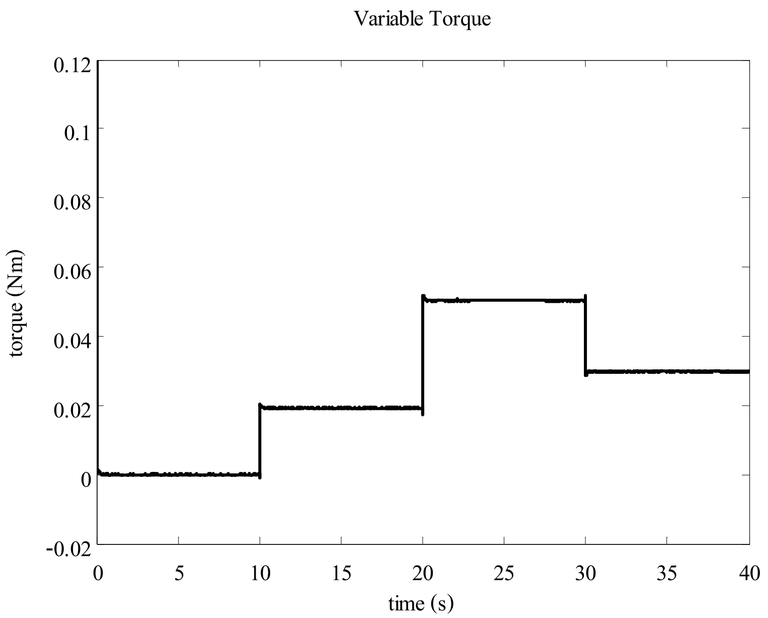


รูปที่ 4.35 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L\,(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2

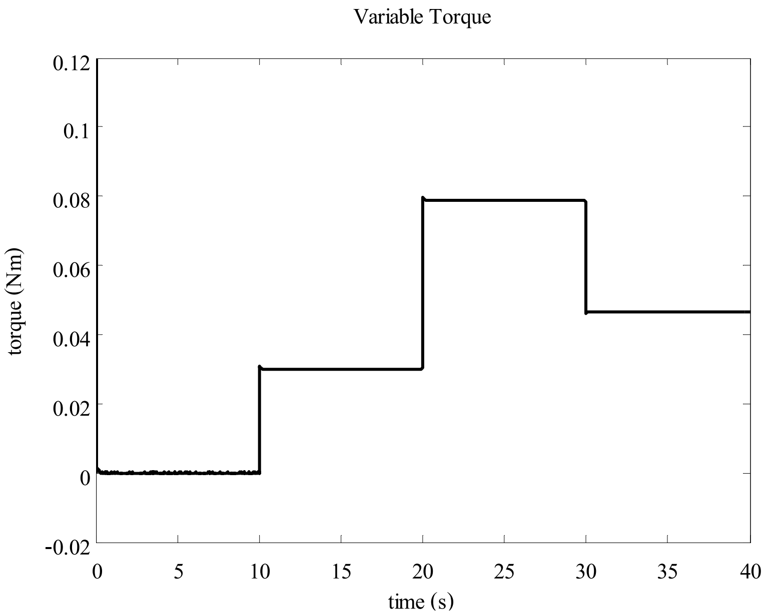


รูปที่ 4.36 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2

จากสมการที่ (4.8) สามารถนำค่าของกระแสไฟฟ้าและค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าโดยตัวสังเกตเพื่อหาค่าจริงของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้ การจำลองสถานการณ์ระบบนี้จะแสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตที่ไม่ได้ทำการชดเชยมาใช้ในการหาค่าจริงของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.37 และเมื่อใช้ค่าตัวแปรสเตตจากระบบที่ทำการชดเชยแล้วจะได้ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีความผิดพลาดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.38



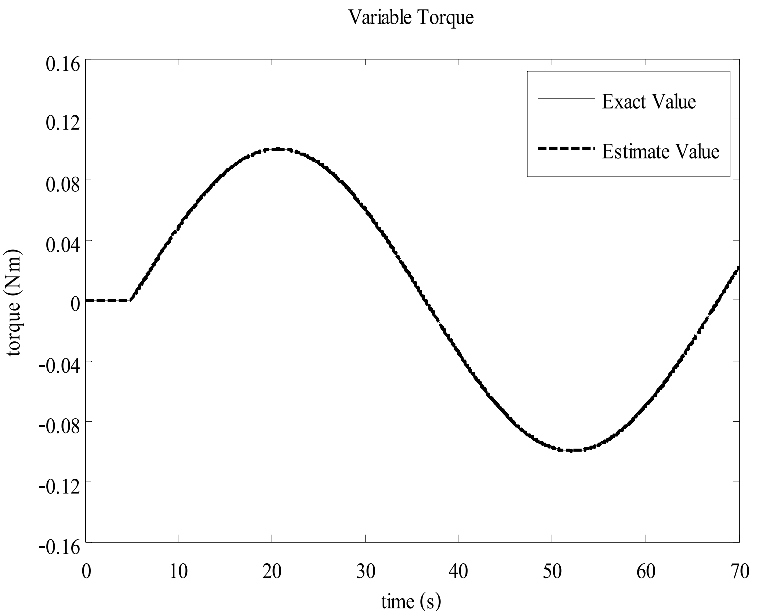
รูปที่ 4.37 แสดงค่า $T_L\ (t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่ไม่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2



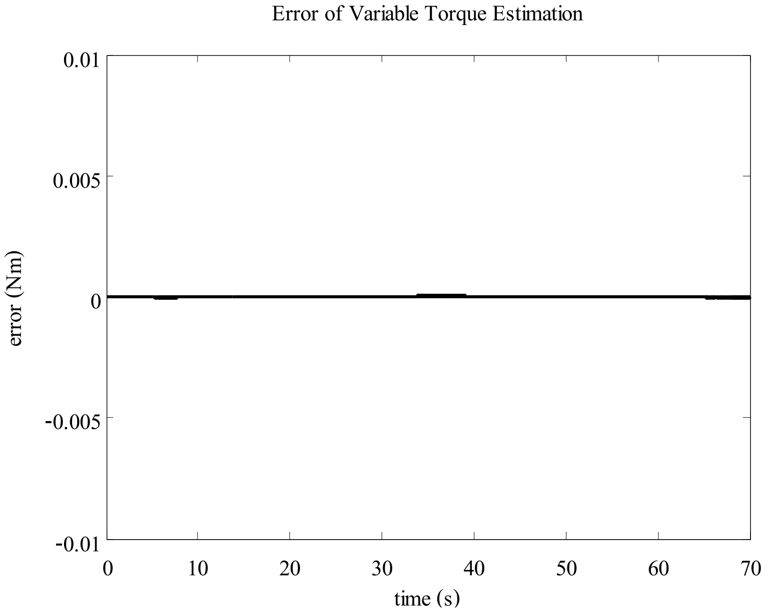
รูปที่ 4.38 แสดงค่า $T_L\ (t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่ชดเชยโดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2

ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ระบบแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างจาก Lyapunov’s Direct Method สามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างจาก Gradient Method แต่แตกต่างที่ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างจาก Lyapunov’s Direct Method มีการตอบสนองที่ดีและแกว่งตัวที่น้อยกว่าเมื่อแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีการเปลี่ยนแปลงค่ารวมทั้งตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างจากหลักการของ Lyapunov’s Direct Method จะมีเสถียรภาพในการทำงาน

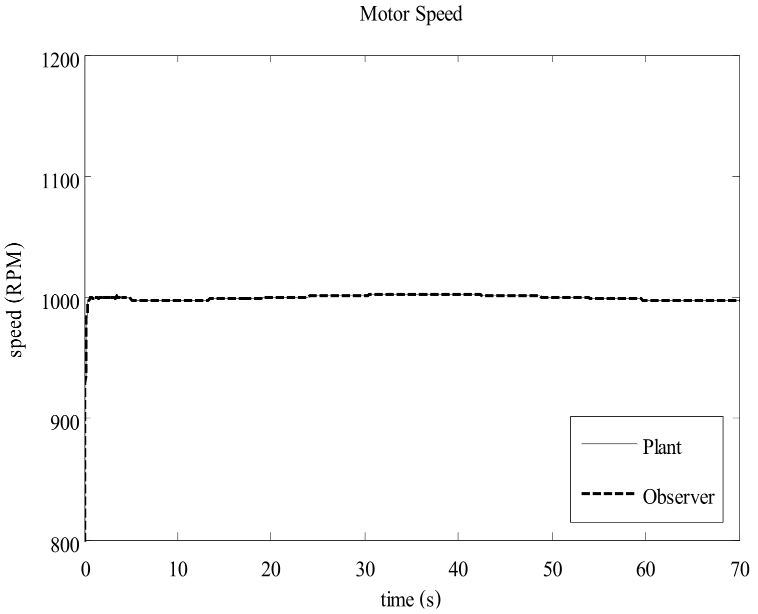
พิจารณาในกรณีที่ 3 ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งรบกวนระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในการจำลองสถานการณ์นี้ ผลการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.39 ความผิดพลาดจากการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.40 และผลการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกต ดังแสดงในรูปที่ 4.41 และ 4.42



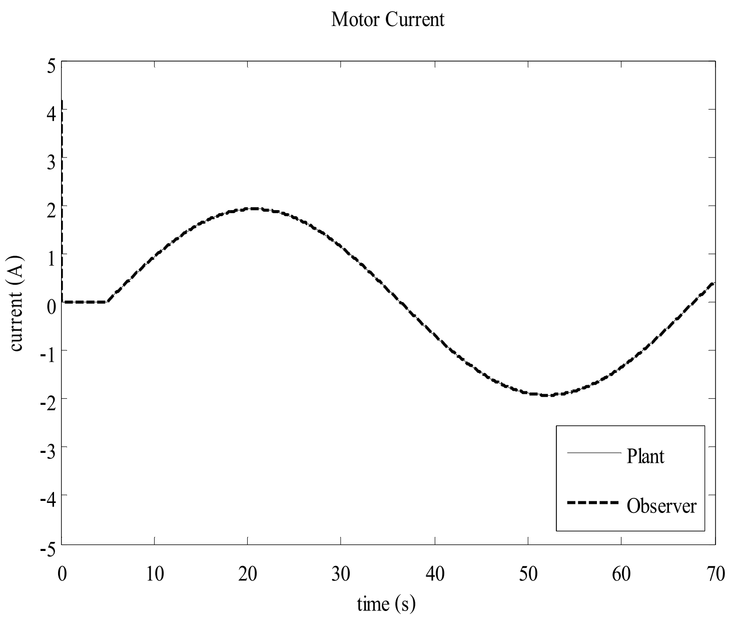
รูปที่ 4.39 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3



รูปที่ 4.40 แสดงค่า $\hat{T}_L(t) - T_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3

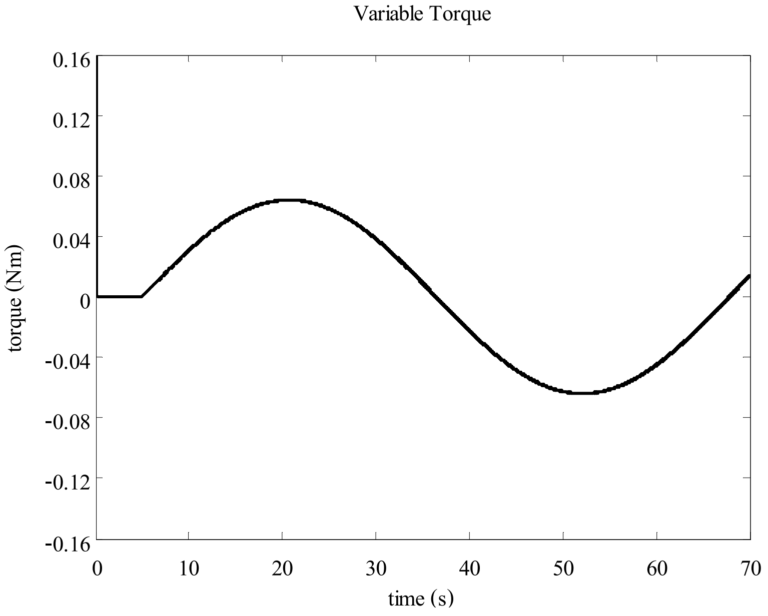


รูปที่ 4.41 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3

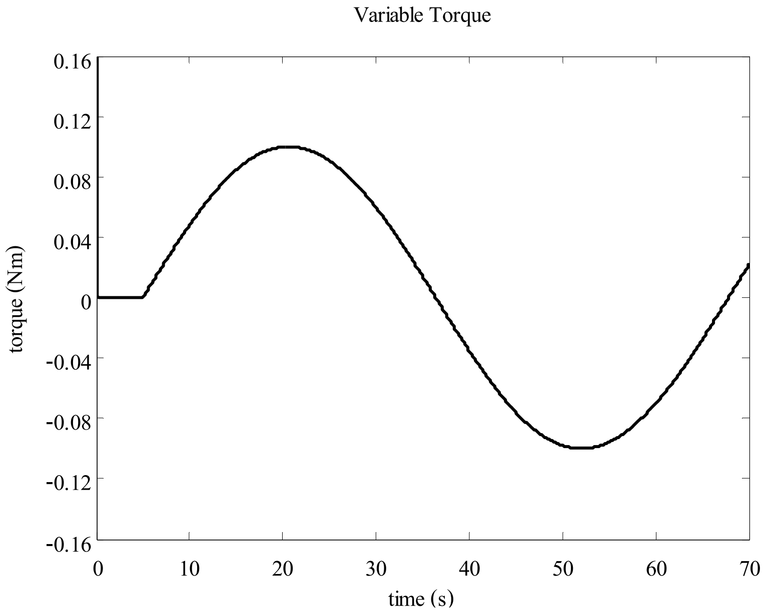


รูปที่ 4.42 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L\,(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3

จากสมการที่ 4.8 สามารถนำค่าของกระแสไฟฟ้าและค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าโดยตัวสังเกตเพื่อหาค่าจริงของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้ การจำลองสถานการณ์ระบบนี้จะแสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตที่ไม่ได้ทำการชดเชยมาใช้ในการหาค่าจริงของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.43 และเมื่อใช้ค่าตัวแปรสเตตจากระบบที่ทำการชดเชยแล้วจะได้ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีความผิดพลาดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.44



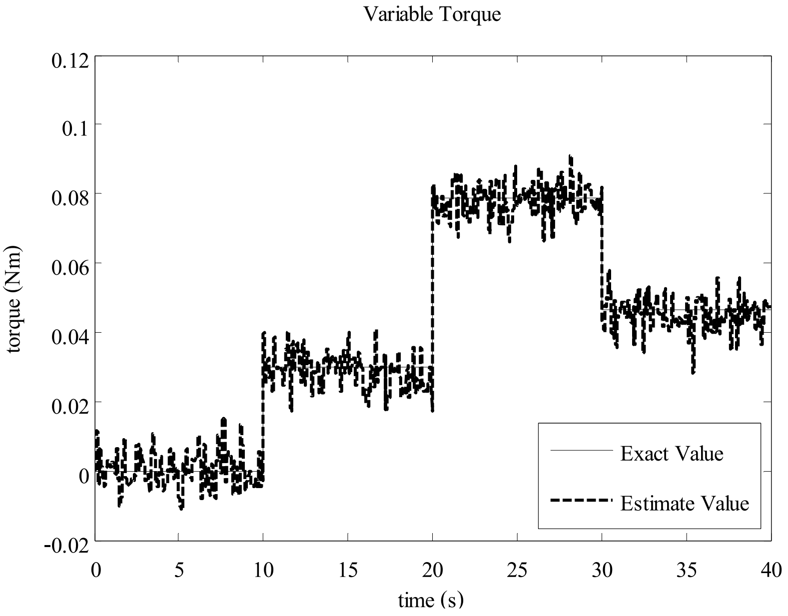
รูปที่ 4.43 แสดงค่า $T_L\ (t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่ไม่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3



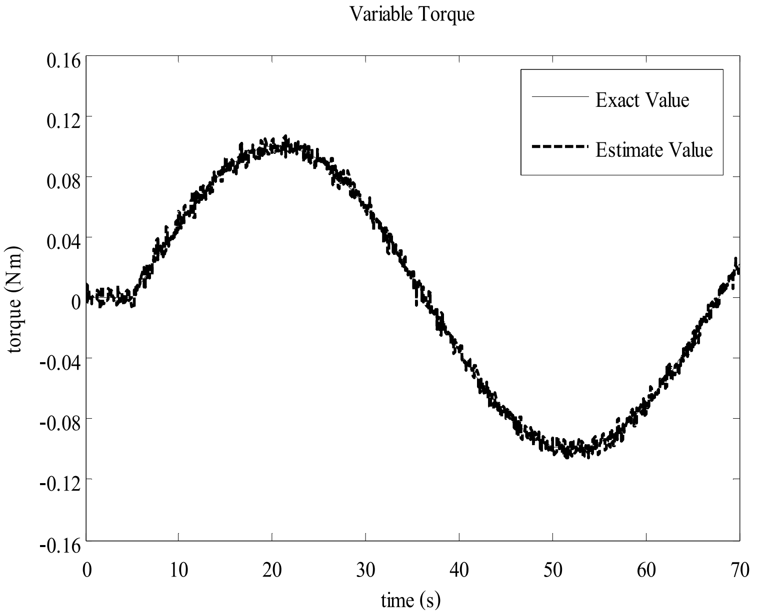
รูปที่ 4.44 แสดงค่า $T_L\ (t)$ เมื่อคำนวณมาจากระบบที่มีการชดเชยโดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3

4.8 การจำลองสถานการณ์ผลกระทบของสัญญาณรบกวนและความผิดพลาดของตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีผลต่อการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Lyapunov's Direct Method

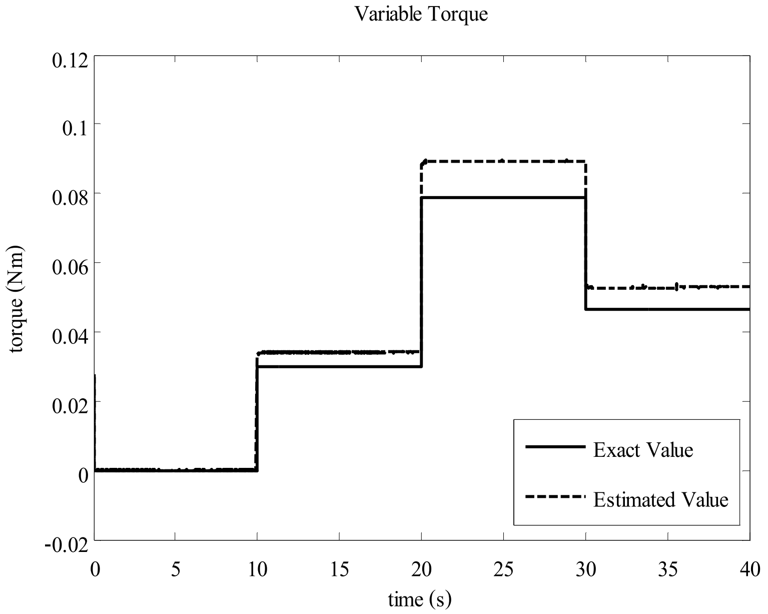
สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัดค่าเอาท์พุทของระบบจะมีผลกระทบต่อการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวโดยวิธี Lyapunov's Direct Method เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ในการจำลองระบบจะพิจารณาทั้งกรณีที่แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีรูปแบบเป็นขั้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 4.45 และเป็น Sine Wave ดังแสดงในรูปที่ 4.46 รวมทั้งพิจารณาผลจากความผิดพลาดของตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีผลทำให้การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.47, 4.48, 4.49 และ 4.50



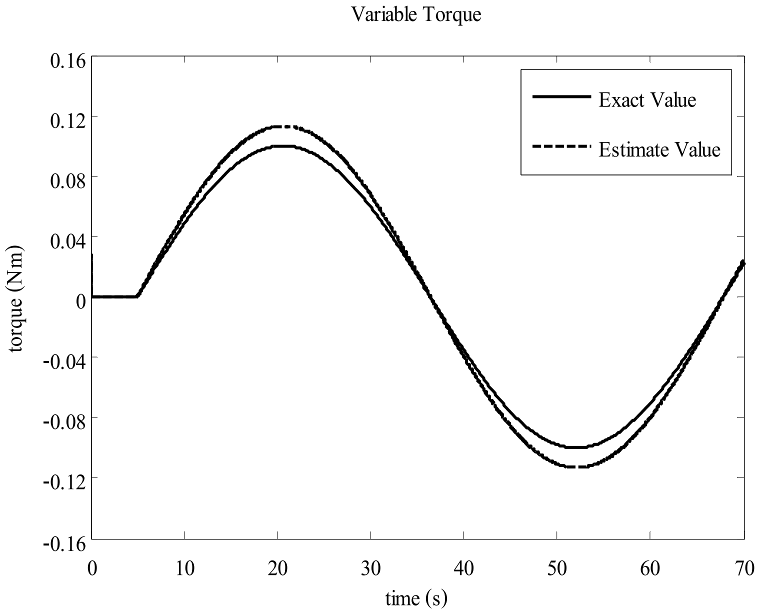
รูปที่ 4.45 แสดงค่า $T_L\,(t)$ และ $\hat{T}_L\,(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 4



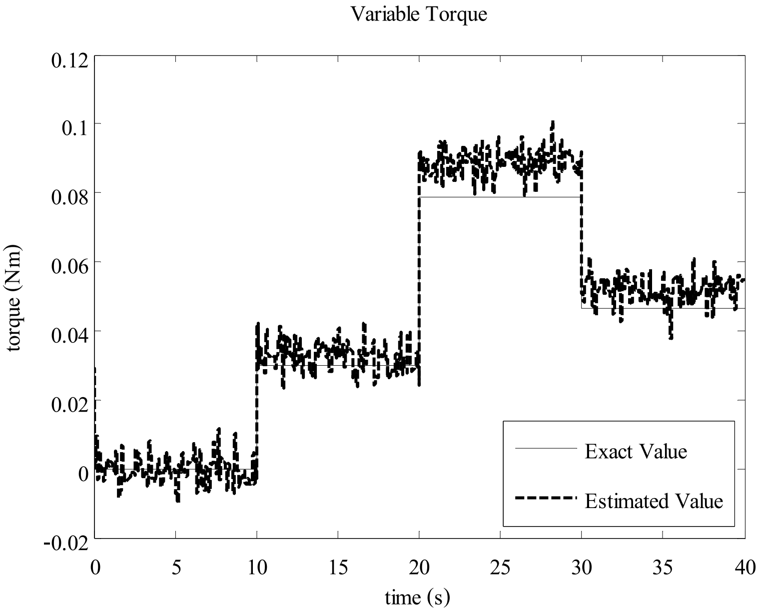
รูปที่ 4.46 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 4



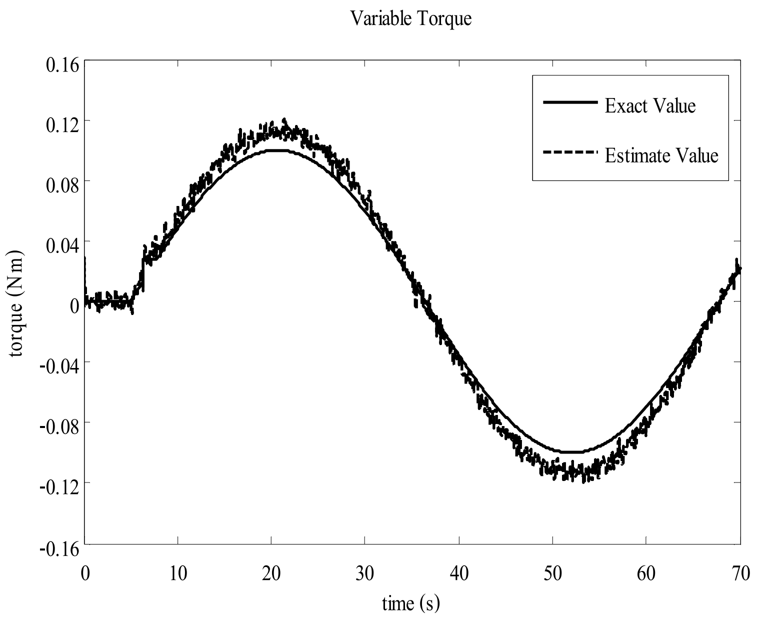
รูปที่ 4.47 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 5



รูปที่ 4.48 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 5

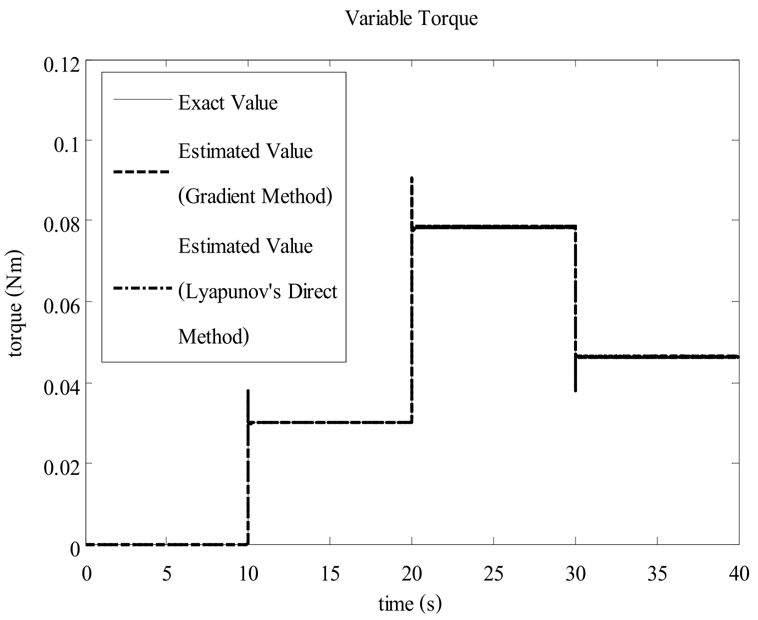


รูปที่ 4.49 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 รวมกับกรณีที่ 4 และ 5

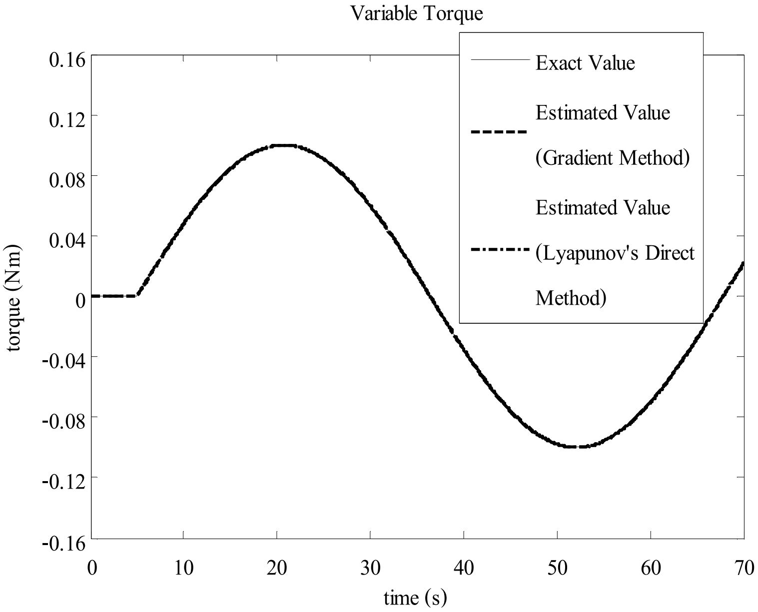


รูปที่ 4.50 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3 รวมกับกรณีที่ 4 และ 5

4.9 สรุป



รูปที่ 4.51 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 2 และ3 สำหรับกรณีที่ 2



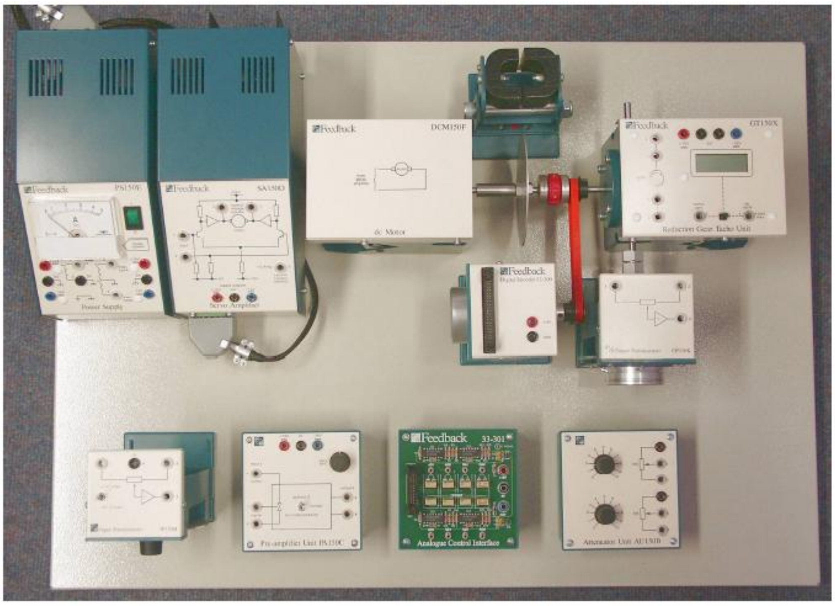
รูปที่ 4.52 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 2 และ3 สำหรับกรณีที่ 3

จากผลการจำลองสถานการณ์ระบบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากวิธีการของ Gradient Method และ Lyapunov’s Direct Method แสดงให้เห็นว่าตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีที่ไม่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบเท่านั้น การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการของ Gradient Method และ Lyapunov’s Direct Method สามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในกรณีที่แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีค่าคงที่และเปลี่ยนแปลงตามเวลา

บทที่ 5
การทดสอบการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงและผลการทดสอบ

5.1 เครื่องมือทดลอง

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



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

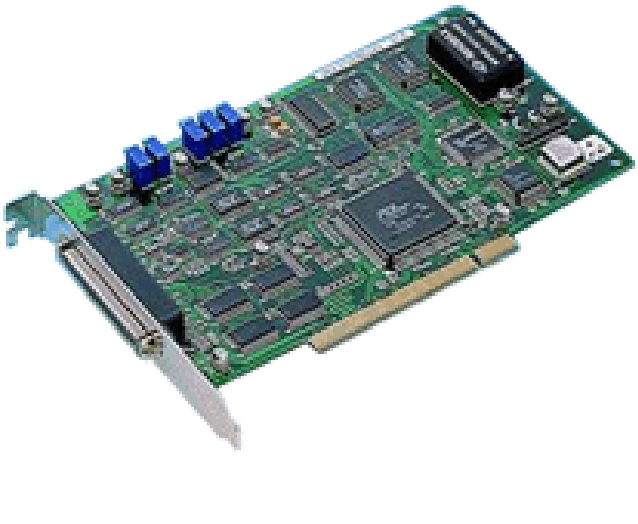
8. PA 150C – Pre-Amplifier – a pre-amplifier which provides the correct signal range to the servo amplifier.

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.

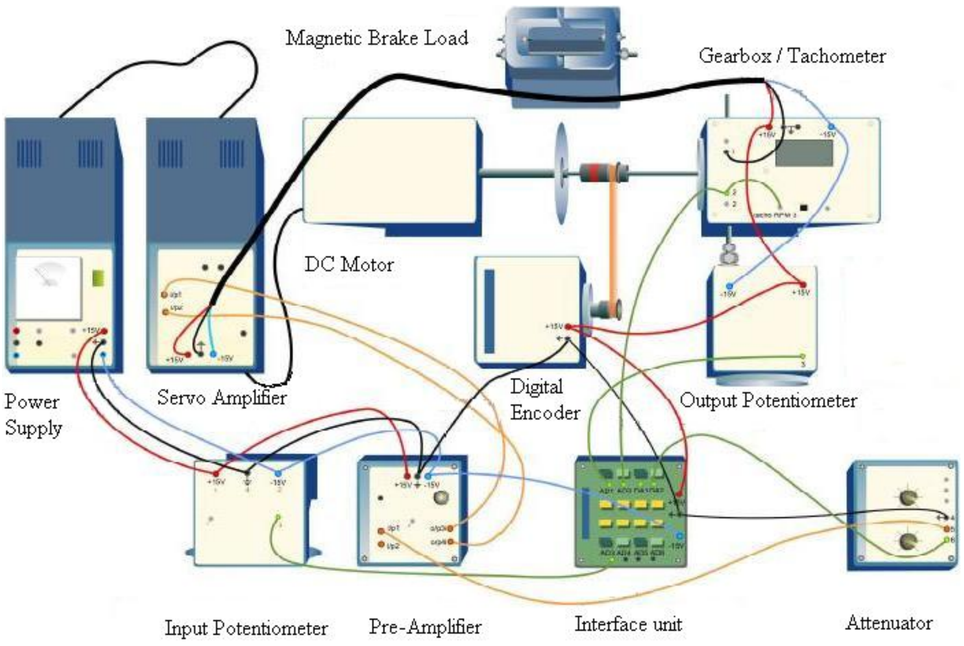
10. AU 150B – Attenuator – use to set the input to the motor control circuit to correct operating level.

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.

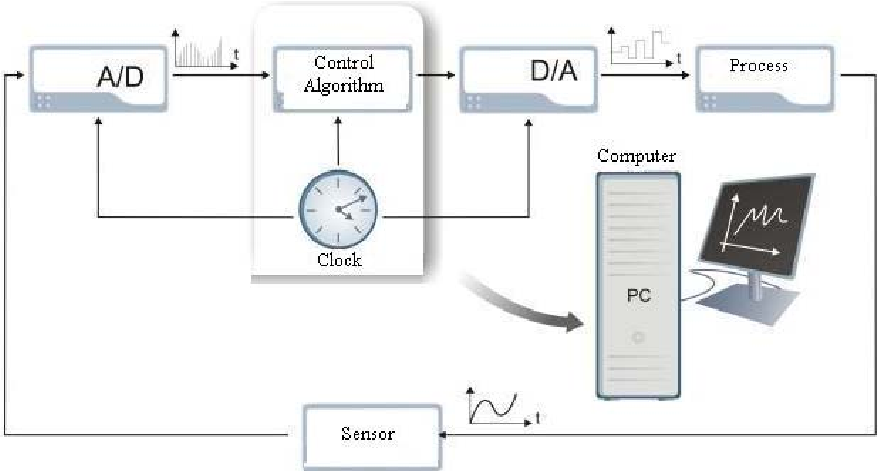


รูปที่ 5.2 แสดง PCI 1711 Card



รูปที่ 5.3 แสดงวงจรการทำงานของระบบควบคุมความเร็ว

เมื่อต่อระบบของคอมพิวเตอร์ PCI 1711 card และเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆตามวงจร ดังที่แสดงในรูปที่ 5.3 เรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อมา คือ การติดตั้งซอฟต์แวร์สำหรับเครื่องมือ Precision Modular Servo ซึ่งซอฟต์แวร์นี้จะเชื่อมต่อกับโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink Real-time Model ผู้ใช้งานสามารถเขียนโปรแกรมในลักษณะ Simulink Real-time Model และเชื่อมต่อเพื่อควบคุมการทำงานของชุดทดลองได้ทันที หลักการทำงานของระบบแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยสัญญาณที่เป็น Digital signal จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากนั้นสัญญาณจะถูกเปลี่ยนจาก Digital signal ไปเป็น Analog signal โดย Digital to Analog Converter และสัญญาณจะถูกขยายขึ้นอีกโดย Pre-amplifier และ Servo-amplifier เพื่อไปขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้หมุนในความเร็วรอบที่ต้องการ จากนั้นความเร็วรอบจะถูก ตรวจจับโดย Tachometer ในที่นี้เป็นลักษณะของ Generator ซึ่งค่าสัญญาณความต่างศักย์ที่ได้นี้จะถูกส่งต่อไปยัง Analog to Digital Converter เพื่อส่งกลับไปประมวลผลในโปรแกรมควบคุมการทำงานต่อไป

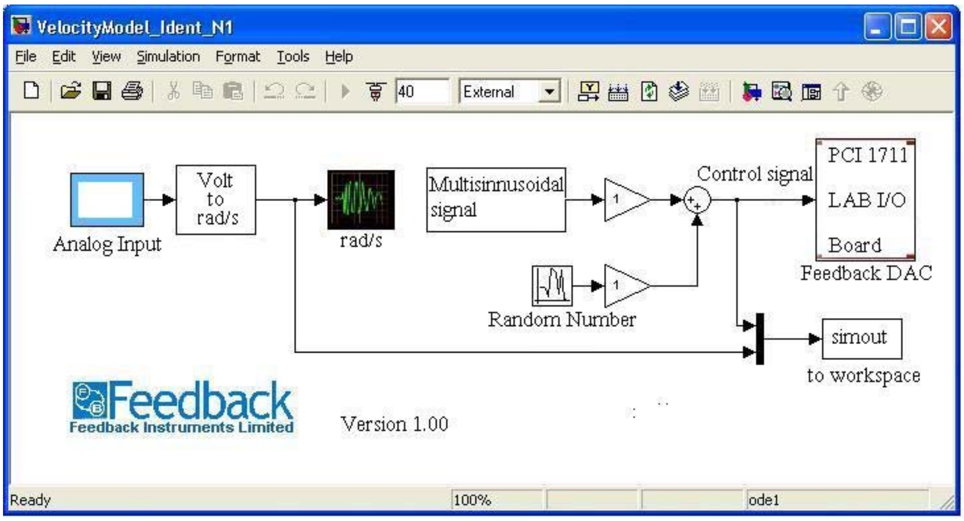
5.2 การประมาณค่าตัวแปรของระบบ

ในทางปฏิบัติการออกแบบตัวสังเกต และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้นั้นต้องทำการหาค่าตัวแปรของระบบในกรณีที่ไม่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนระบบก่อน จากนั้นจะนำค่าตัวแปรที่ได้ไปทำการออกแบบตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบก่อนแล้วจึงใช้ตัวแปรของระบบไปออกแบบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ตัวแปรของระบบจะไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงแต่จะใช้การประมาณค่าโดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยที่จะกำหนดค่าอินพุทให้กับระบบเปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแบบสุ่ม (Random) และนำค่าอินพุทและเอาท์พุทที่ได้นี้ไปทำการประมาณหาค่าตัวแปรของระบบในภาวะที่ไม่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีดังนี้คือ

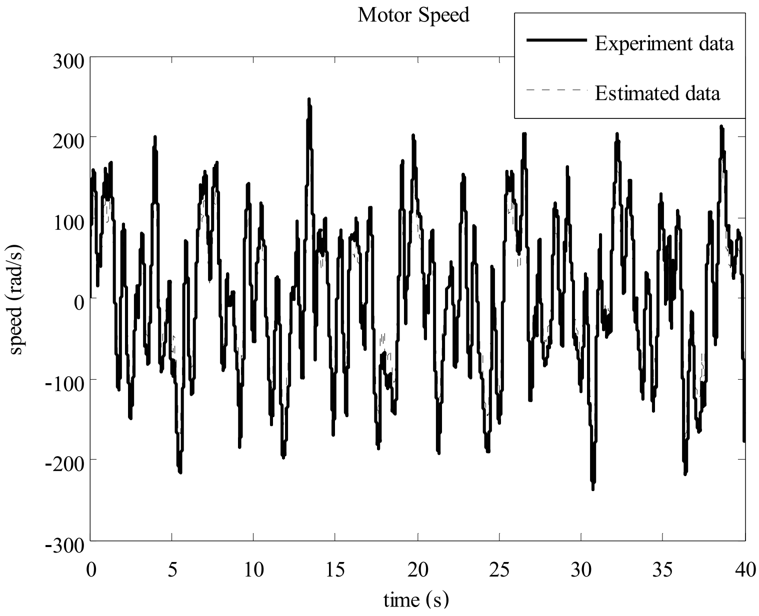
1. ทำการนำโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ในคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo มาทำการเก็บค่าของการตอบสนองของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและแบบจำลองที่เป็นระบบเปิดทั้งในส่วนของอินพุทและเอาท์พุท (โปรแกรมแสดงในรูปที่ 5.5)

2. ระบบที่พิจารณามีตัวแปรทั้งหมด 7 ตัวแปร คือ $I, R_a, L_a, K, K_t, K_b, b$ แต่สำหรับการประมาณค่าตัวแปรจะทำการประมาณค่าใหม่เพียง 4 ตัวแปร คือ I, R_a, L_a และ K กำหนดให้ค่าตัวแปรอีก 3 ตัวแปรคงที่ และมีค่าตามคู่มือของเครื่องมือทดลอง คือ $K_t = 0.052$ N.m/A และ $K_b = 0.057$ V.s/rad และกำหนดให้ค่าความหน่วงในลักษณะของความหนืด $b = 3.875\times10^{-5}$ N.m.s/rad ซึ่งได้มาจากการวัดและหาค่าเฉลี่ย

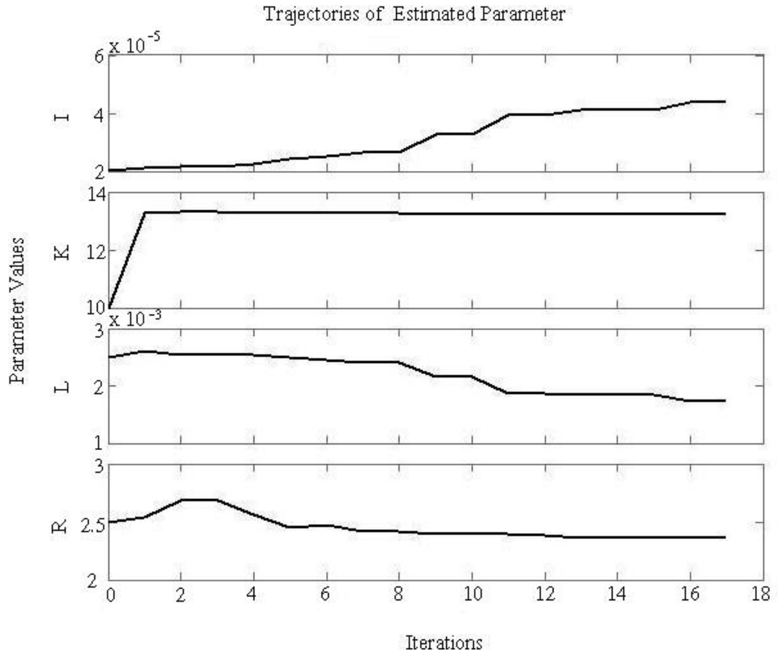
3. ประมาณค่าตัวแปรของระบบโดยใช้เครื่องมือของโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Parameter Estimation



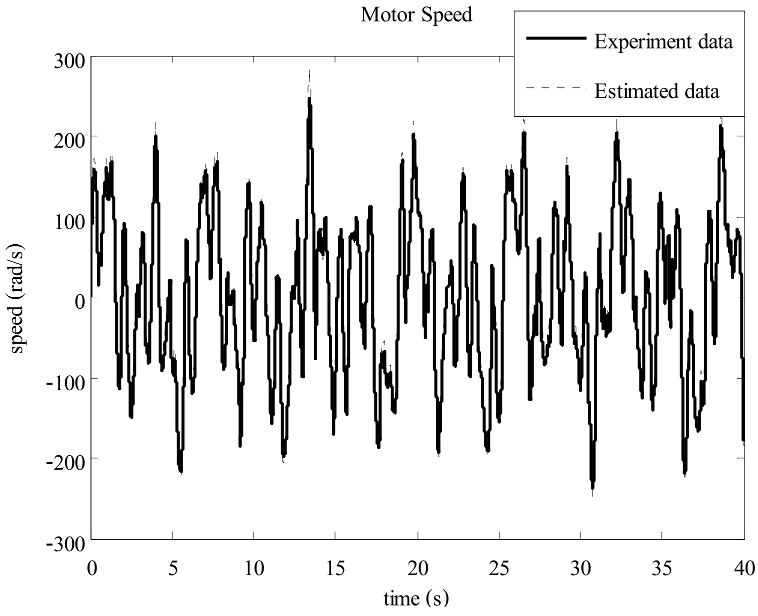
รูปที่ 5.5 แผนภาพแสดงโปรแกรมในการเก็บข้อมูลการทำงานของระบบ



รูปที่ 5.6 แผนภาพแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์จากการวัดเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ได้จากแบบจำลองก่อนการประมาณค่าตัวแปร



รูปที่ 5.7 แผนภาพแสดงผลการปรับค่าตัวแปรของระบบ



รูปที่ 5.8 แผนภาพแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์จากการวัดเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ได้จากแบบจำลองหลังการประมาณค่าตัวแปร

ตัวแปรของระบบที่ได้จาการระบุเอกลักษณ์ คือ

$$I = 4.3604\times10^{-5} kg\cdot m^2/rad,\ K_t = 0.052\,N\cdot m/A,\ K_b = 0.057V\cdot s/rad$$
$$b = 3.875\times10^{-5}\,N\cdot m\cdot s/rad,\ R_a = 2.3574\Omega,\ L_a = 1.7239\times10^{-3}\,H,\ K = 13.2380$$

5.3 การวัดค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของระบบ

ในทางปฏิบัติการหาค่าที่แท้จริงของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในภาวะอยู่ตัว (Steady State) ของระบบสามารถทำได้โดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและนำมาคำนวณ แต่ก่อนที่จะคำนวณค่าที่แท้จริงได้นั้นต้องทำการหาค่าตัวแปรของระบบ คือ viscous damp (b) และ friction constant (T_F) ของระบบจากกรณีที่ไม่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนระบบก่อนซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$T_M = b\dot{\theta} + T_F\,\mathrm{sgn}(\dot{\theta}) \tag{5.3}$$

เมื่อ $T_M = K_t i_a$

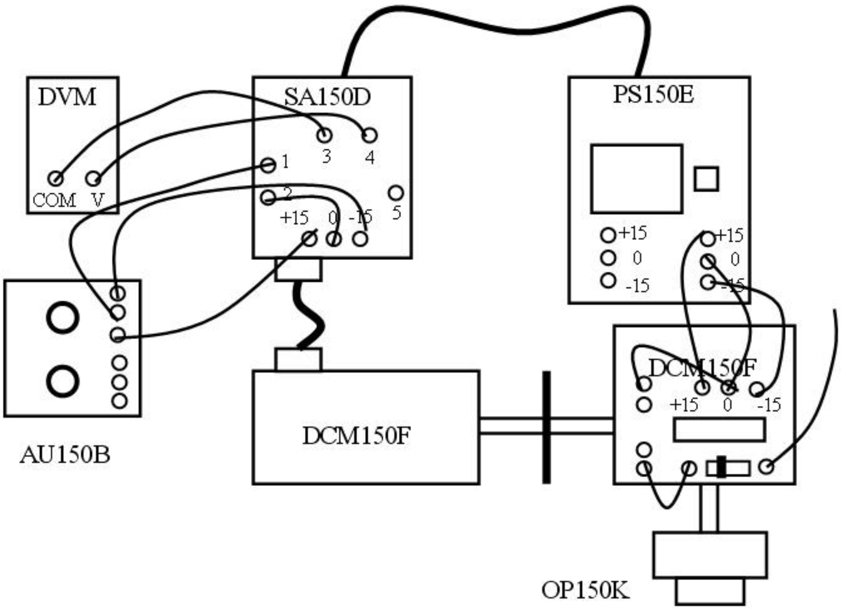
ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากสมการเมื่อระบบอยู่ในภาวะอยู่ตัว

$$T_L = T_F\,\mathrm{sgn}(\dot{\theta}) + b\dot{\theta} - K_t i_a \tag{5.4}$$

เมื่อ $\mathrm{sgn}(\dot{\theta}) = 1,\ if\ \dot{\theta} > 0$ และ $\mathrm{sgn}(\dot{\theta}) = -1,\ if\ \dot{\theta} < 0$

จากสมการที่ (5.4) จะเห็นว่าสมการไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากค่าแรงเสียดทานที่ขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ แต่หากพิจารณาในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้นสมการก็จะเป็นเชิงเส้นในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องพิจารณาผลของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบเนื่องจากค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ต้องการประมาณค่านั้นมีค่าน้อยมาก ค่าแรงเสียดทานจึงมีผลต่อค่าความถูกต้องของค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจริงที่เข้ามาในระบบการทดลองนี้ทำการวัดค่าความเร็วรอบ และค่ากระแสไฟฟ้าในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปคำนวณหาค่าตัวแปร b และ T_F การทดลองจะทำการต่อวงจรของระบบเป็นแบบควบคุมด้วยมือแสดงดังรูปที่ 5.9

การทดลองนี้จะทำการวัดค่า 3 ครั้งและนำมาหาค่าเฉลี่ยเนื่องจากข้อมูลที่ได้มีการแกว่งตัวไม่มากนักทั้งในช่วงของการเพิ่มและลดค่าความเร็วรอบ



รูปที่ 5.9 แผนภาพแสดงวงจรของระบบเพื่อวัดค่าตัวแปร b และ T_F

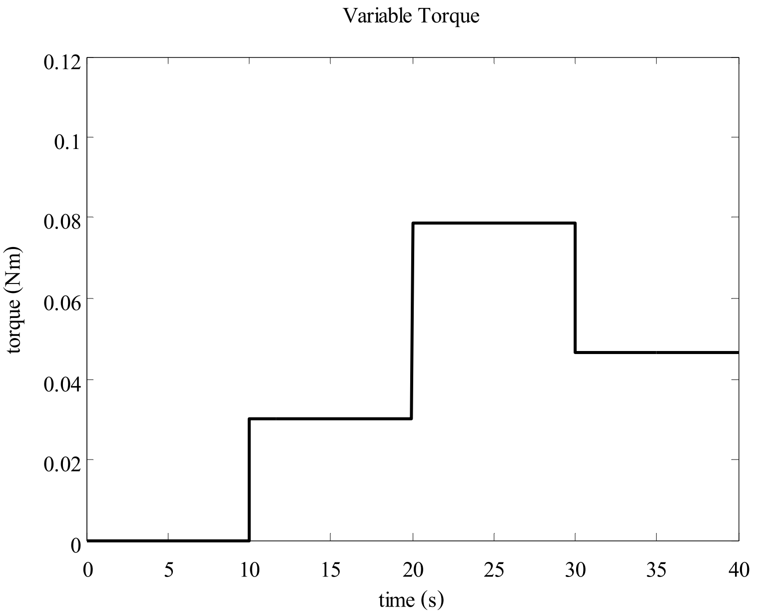
ตารางที่ 5.1 แสดงค่า b และ T_F ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Voltage (V)	i_a (A)	ω (rad/s)	b (Nms/rad)	T_F (Nm)
2.00	-0.4057	-276.4599	4.85 x10^{-5}	0.0076
1.75	-0.3755	-244.3459	4.85 x10^{-5}	0.0076
1.50	-0.3545	-212.4064	3.40 x10^{-5}	0.0112
1.25	-0.3403	-180.4669	2.30 x10^{-5}	0.0135
1.00	-0.3198	-148.1783	3.30 x10^{-5}	0.0117
0.75	-0.2957	-114.3190	3.70 x10^{-5}	0.0112
0.50	-0.2707	-81.8559	4.00 x10^{-5}	0.0108
0.25	-0.1548	-45.0295	4.60 x10^{-5}	0.0103
0.00	-0.0008	0.0000	0	0
-0.25	0.2435	44.1568	4.85 x10^{-5}	0.0105
-0.50	0.2768	79.7615	4.66 x10^{-5}	0.0107
-0.75	0.3072	113.4463	4.00 x10^{-5}	0.0114
-1.00	0.3323	145.9094	2.57 x10^{-5}	0.0135
-1.25	0.3485	178.3725	2.00 x10^{-5}	0.0145
-1.50	0.3615	211.5337	2.76 x10^{-5}	0.0129
-1.75	0.3785	243.1242	3.30 x10^{-5}	0.0116
-2.00	0.3987	274.7146	3.30 x10^{-5}	0.0116

การทดลองได้พิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า $T_L(t)$ เป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 ระบบมีค่า $T_L(t) = 0$

กรณีที่ 2 ระบบมีค่า $T_L(t)$ เปลี่ยนแปลงเป็นขั้นบันได (Step Function) ดังที่แสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แสดงค่า $T_L\ (t)$ สำหรับกรณีที่ 2

วิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง($T_L\ (t)$)

วิธีที่ 1 Gradient Method

วิธีที่ 2 Lyapunov's Direct Method

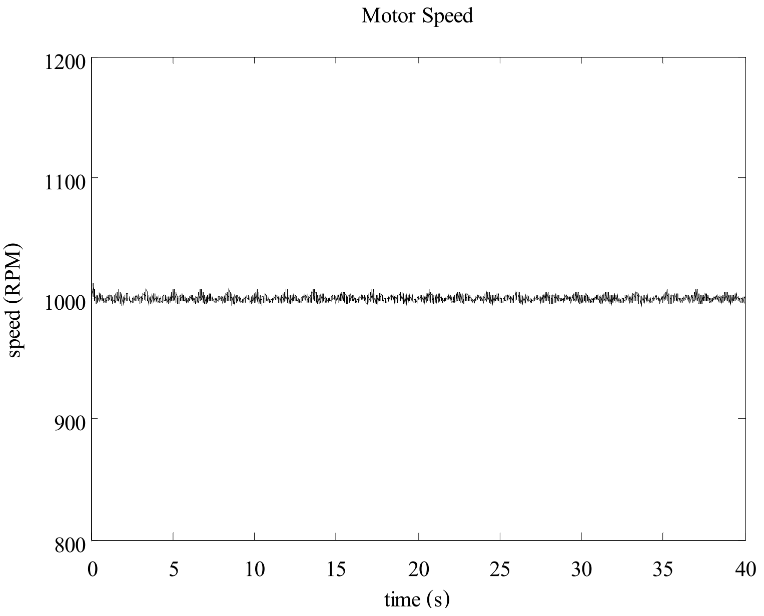
การทดลอง

การทดลองที่ 1 ใช้ค่าตัวแปรระบบจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo

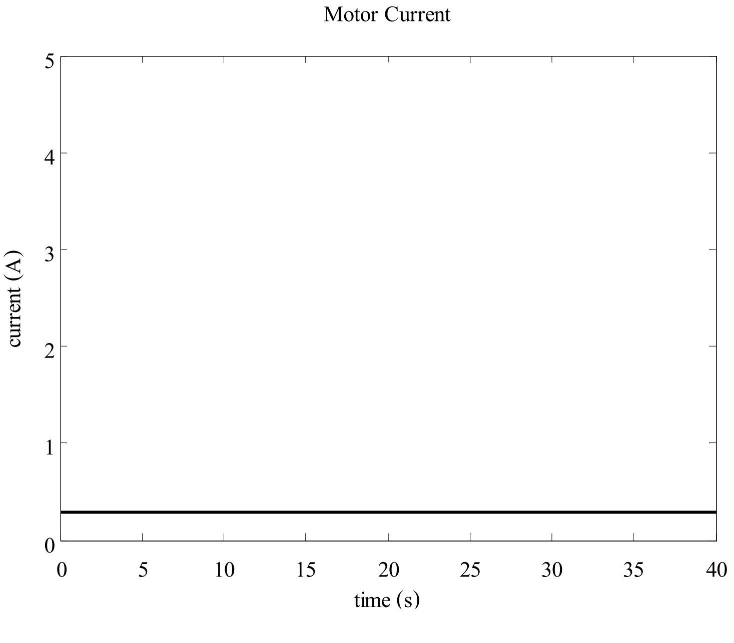
การทดลองที่ 2 ใช้ค่าตัวแปรระบบจากการระบุเอกลักษณ์

5.4 การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

พิจารณาการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับกรณีที่ 1 จะได้ผลการตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 5.11 และ 5.12

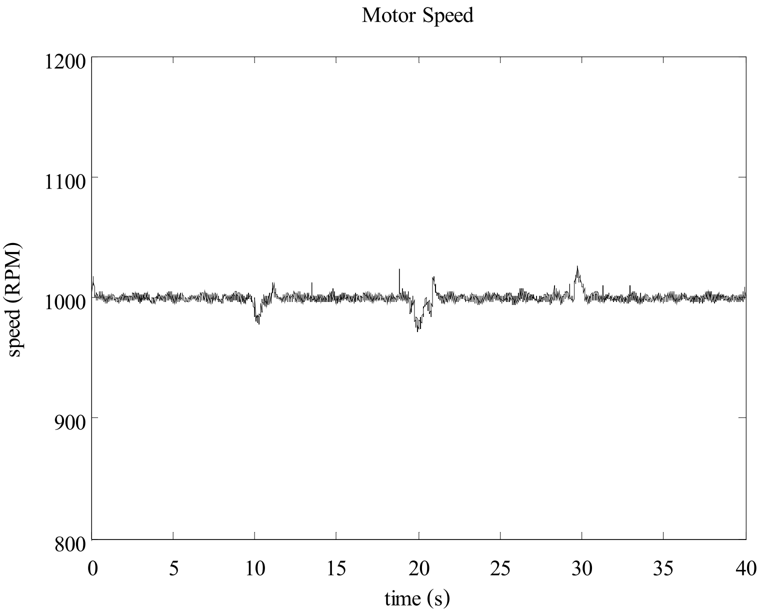


รูปที่ 5.11 แสดงค่า ω สำหรับกรณีที่ 1

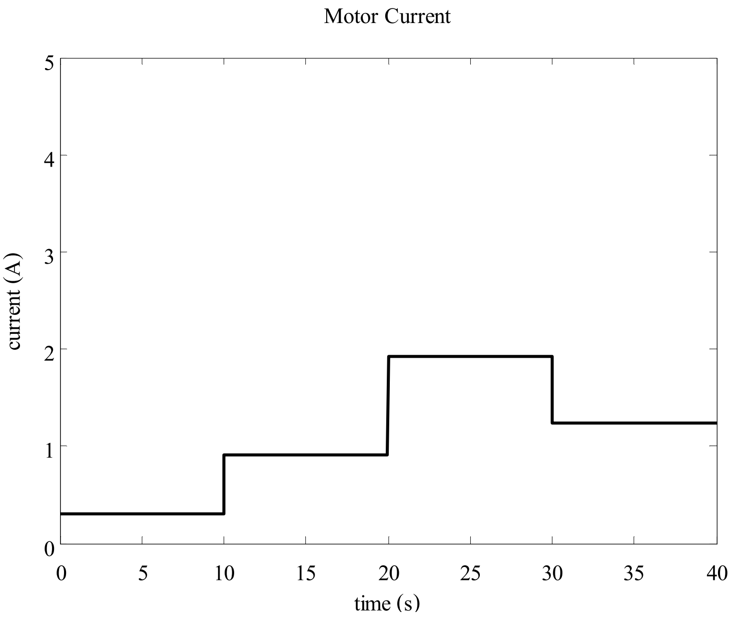


รูปที่ 5.12 แสดงค่า i_a สำหรับกรณีที่ 1

5.5 การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 5.13 แสดงค่า ω สำหรับกรณีที่ 2



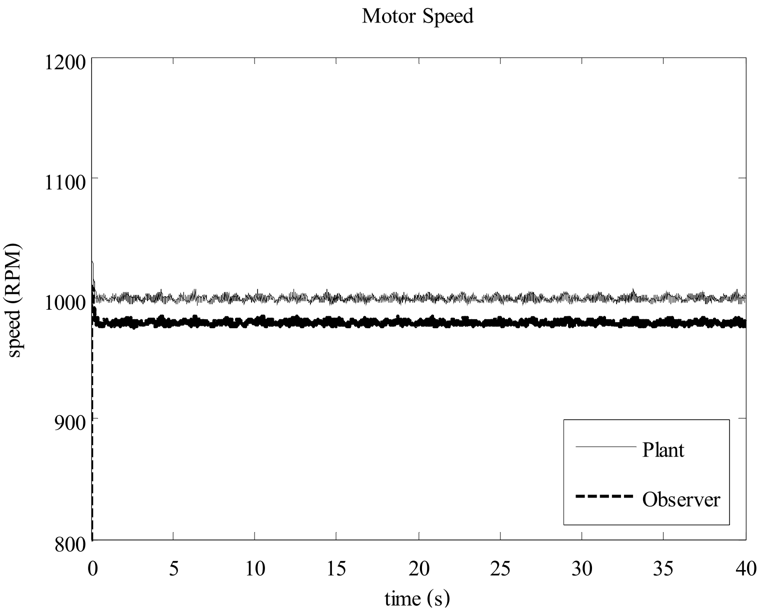
รูปที่ 5.14 แสดงค่า i_a สำหรับกรณีที่ 2

5.6 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

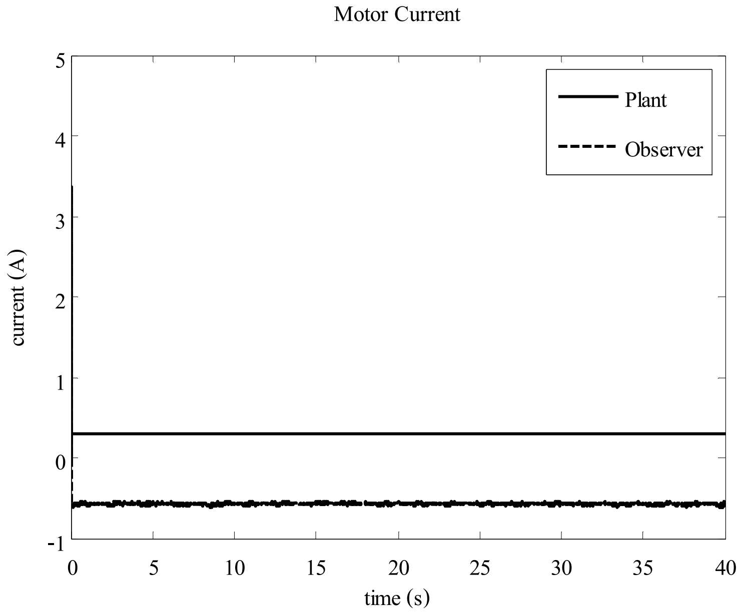
เมื่อมีการนำตัวสังเกตมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความเร็วรอบ ผลการประมาณค่าตัวแปรสเตตโดยใช้ตัวสังเกตค่าที่ได้จะมีความถูกต้อง ในกรณีที่ระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไม่ได้รับผลกระทบจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง การออกแบบตัวสังเกตนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าตัวแปรของระบบที่จะทำการสังเกต ดังนั้นในการทำการทดลองกับระบบจริงเราจำเป็นต้องใช้ค่าตัวแปรของระบบจึงจะทำให้ตัวสังเกตทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้จะแสดงการเปรียบเทียบผลการทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปรระบบจากที่มาต่างๆกัน

5.6.1 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทดลองที่ 1

การทำงานของตัวสังเกตเมื่อระบบไม่ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงพิจารณาเมื่อใช้ค่าตัวแปรของระบบจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo ค่าตัวแปรสเตตที่ได้จากการประมาณจะมีความผิดพลาดเนื่องจากค่าตัวแปรจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo ที่นำมาใช้ในการสร้างตัวสังเกตยังมีความผิดพลาด ดังแสดงในรูป 5.15 และ 5.16



รูปที่ 5.15 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1ในการทดลองที่ 1

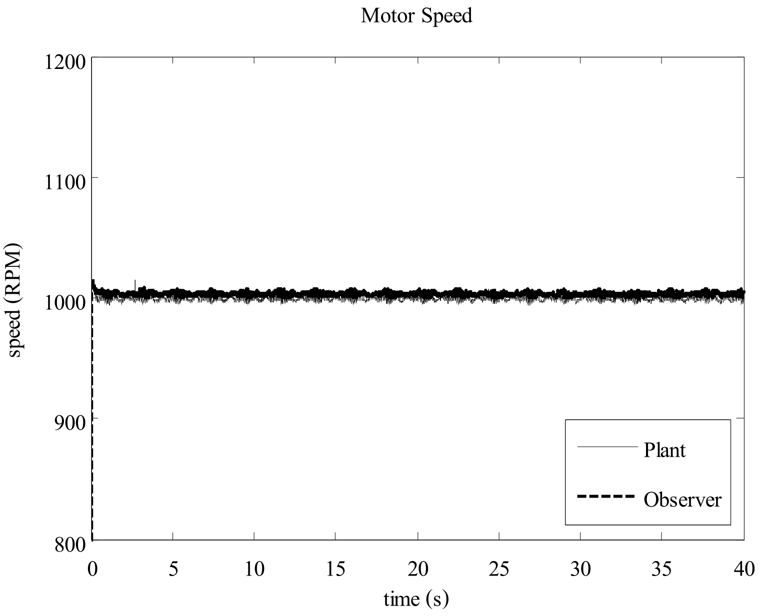


รูปที่ 5.16 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 1 ในการทดลองที่ 1

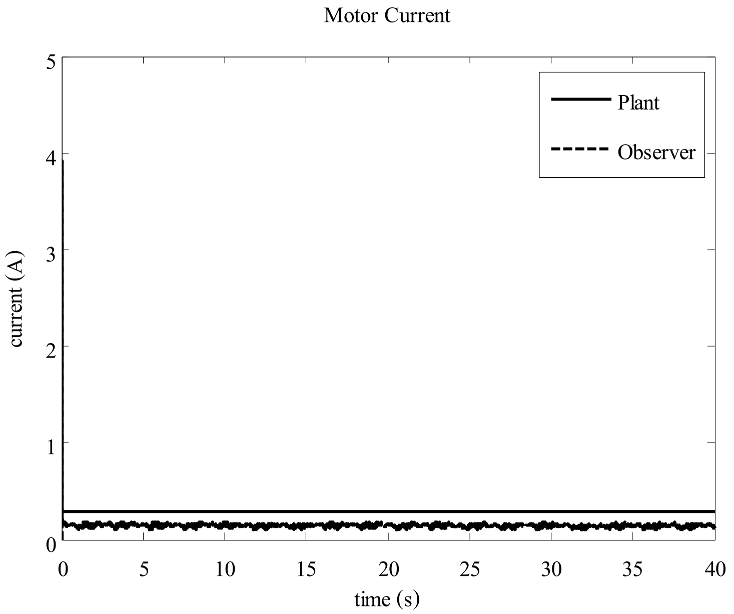
เมื่อใช้ค่าตัวแปรจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo ในการออกแบบตัวสังเกตผลการทำงานของตัวสังเกตจะยังคงมีความผิดพลาด เนื่องจากค่าตัวแปรที่มาจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo จะเป็นค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพียงอุปกรณ์เดียวไม่ได้รวมค่าตัวแปรทั้งหมดของระบบหรืออาจเกิดจากเครื่องมือถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้วส่งผลให้ค่าตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลง ค่าความผิดพลาดของตัวแปรนี้ทำให้มีความคลาดเคลื่อนของค่าตัวแปรสเตตที่ประมาณได้โดยใช้ตัวสังเกต

5.6.2 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทดลองที่ 2

การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปรจากการระบุเอกลักษณ์ระบบจะทำให้ตัวสังเกตสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปรจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo เนื่องจากสามารถประมาณค่าตัวแปรของระบบจริงที่มีผลกระทบจากอุปกรณ์อื่นรวมทั้งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือทดลองถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้วซึ่งอาจทำให้ค่าตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลง แต่ค่าที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ก็ยังคงเป็นค่าจากการประมาณเป็นผลให้ยังมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.17 และ 5.18



รูปที่ 5.17 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1ในการทดลองที่ 2



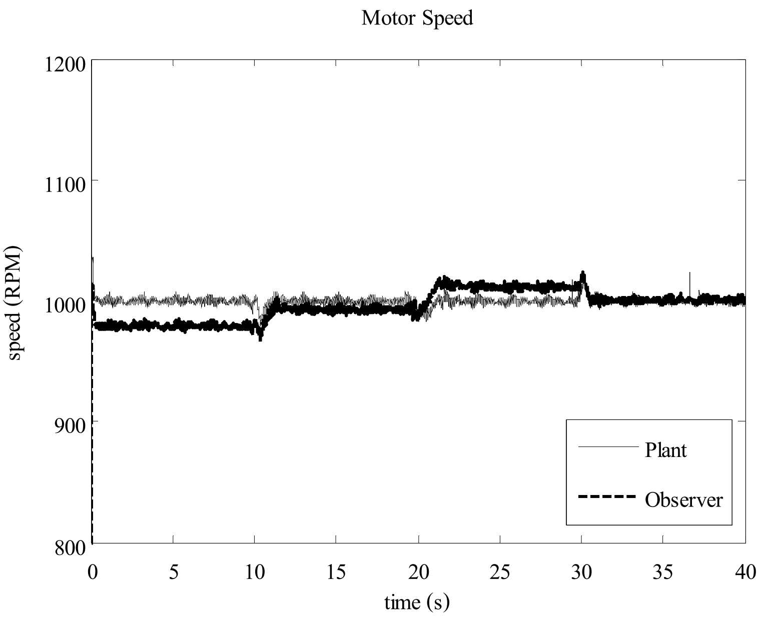
รูปที่ 5.18 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 1 ในการทดลองที่ 2

5.7 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตสำหรับกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

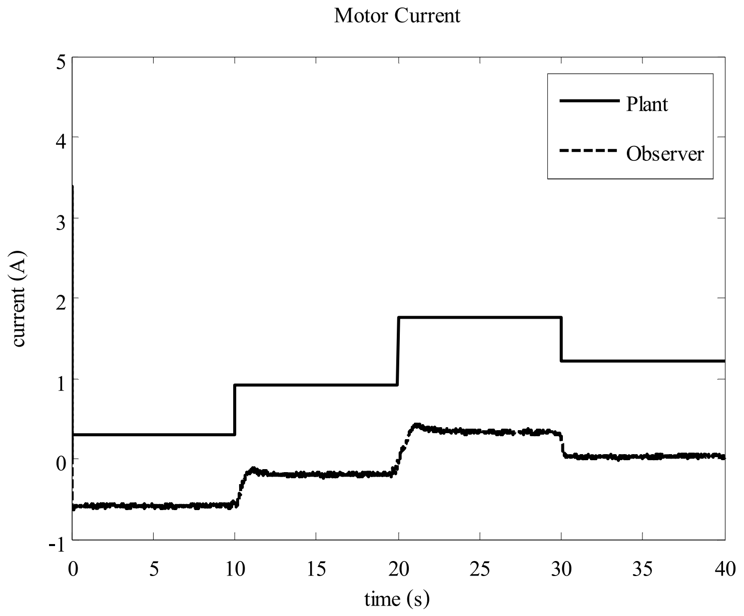
เมื่อมีผลกระทบของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตมีความผิดพลาดเกิดขึ้นทั้งในส่วนของความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้า

5.7.1 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทดลองที่ 1

ในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากคู่มือของเครื่องมือทดลองตัวสังเกตนั้นยังไม่สามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของตัวแปรของตัวสังเกต และระบบจริง แต่ตัวสังเกตก็ยังสามารถตอบสนองต่อผลของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในทุกสภาวะการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.19 และ 5.20



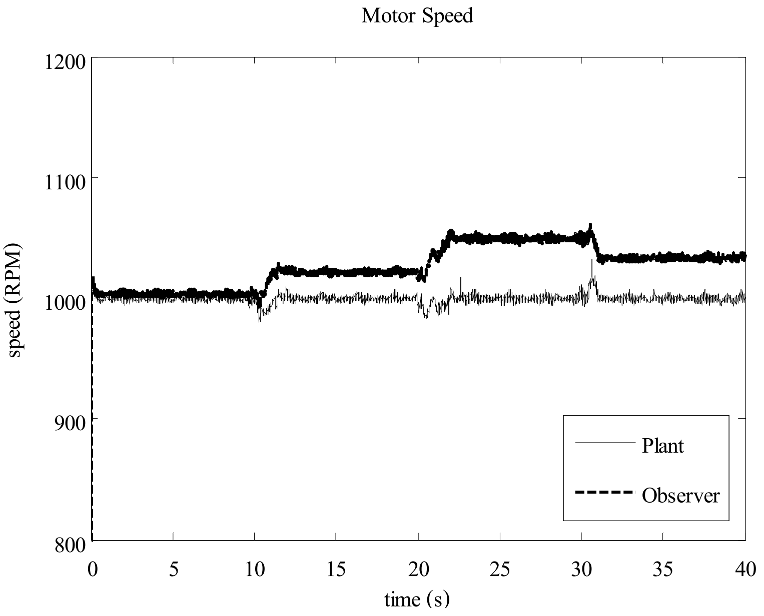
รูปที่ 5.19 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1



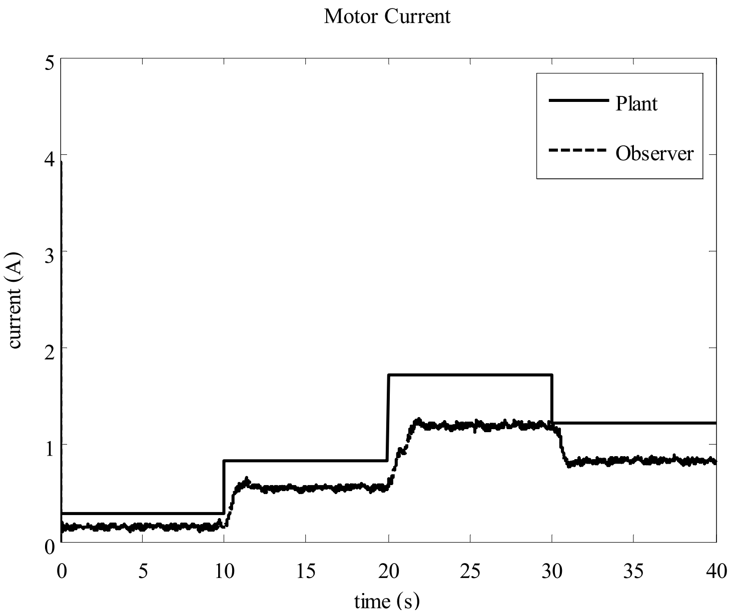
รูปที่ 5.20 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1

5.7.2 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทดลองที่ 2

เมื่อใช้ค่าตัวแปรของระบบที่มาจากการระบุเอกลักษณ์จะได้ค่าตัวแปรของระบบที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ตัวแปรที่มีที่มาจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo แต่ค่าตัวแปรที่ได้มาจากการทำระบุเอกลักษณ์ระบบก็ยังคงเป็นค่าที่ได้จากการประมาณค่า ดังนั้นความผิดพลาดจะยังคงมีอยู่ ผลการประมาณค่าตัวแปรสเตตโดยใช้ตัวสังเกตจึงยังมีความผิดพลาด ดังแสดงในรูปที่ 5.21 และ 5.22



รูปที่ 5.21 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2



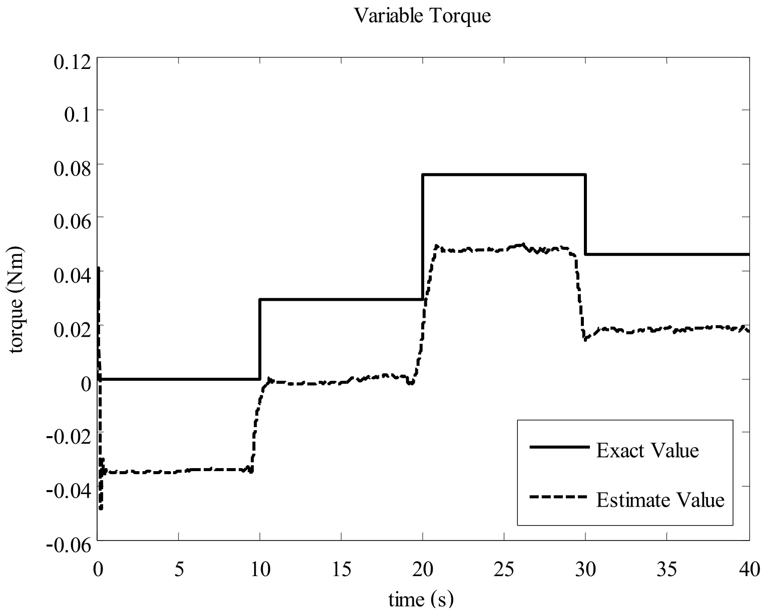
รูปที่ 5.22 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2

5.8 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Gradient Method

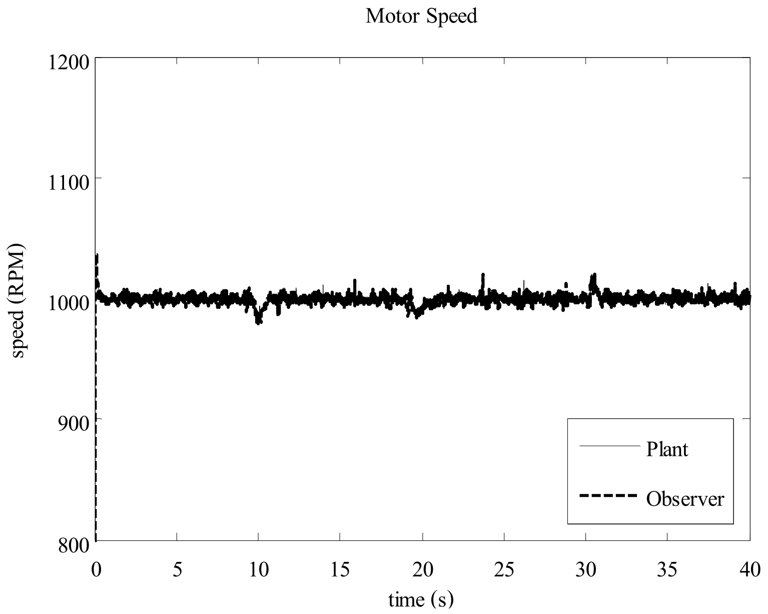
จากผลการจำลองสถานการณ์ระบบแสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จากวิธีการระบบปรับตัวโดยวิธีการของ Gradient Method สามารถที่จะประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากทราบค่าของตัวแปรทุกตัวในระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แต่ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถที่จะทราบค่าตัวแปรที่ถูกต้องของระบบได้เนื่องจากระบบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำการทดลองยังมีอุปกรณ์อื่นที่จำเป็นต่อการทำงานของระบบรวมอยู่ด้วยดังนั้นหากต้องการประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องทำการหาค่าตัวแปรที่ถูกต้องของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอผลการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ค่าตัวแปรที่มีที่มาจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo เปรียบเทียบกับค่าตัวแปรที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ระบบ

5.8.1 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Gradient Method สำหรับการทดลองที่ 1

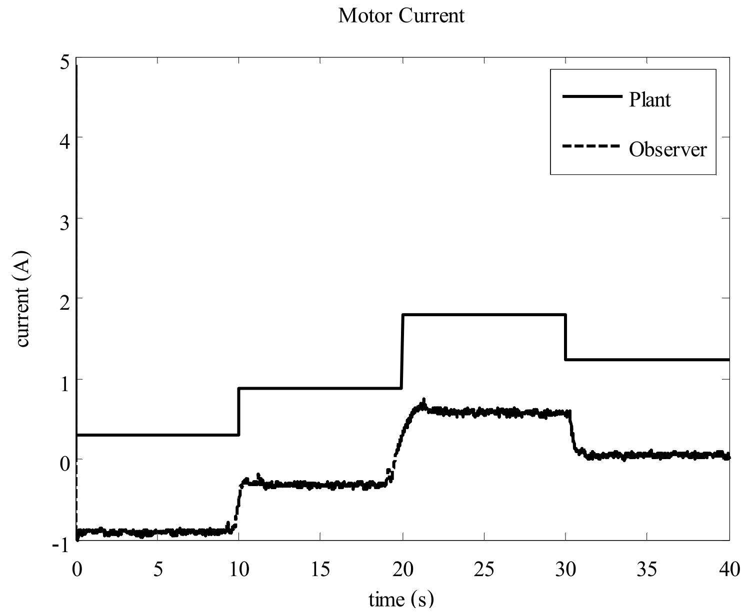
ตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มาจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo จะเป็นเพียงค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพียงอุปกรณ์เดียวเท่านั้นไม่รวมผลกระทบของอุปกรณ์อื่นในระบบดังนั้นค่าตัวแปรได้มานั้นจึงไม่ใช่ค่าของระบบทั้งหมดที่ทำการทดลองทำให้ผลที่ได้จากการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงย่อมมีความผิดพลาดเกิดขึ้น เนื่องจากตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างขึ้นจะประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าตัวแปรจากระบบจริงที่ถูกต้อง ผลการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวแปรระบบจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo ดังแสดงในรูปที่ 5.23 และผลการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกต ดังแสดงในรูปที่ 5.24 และ 5.25



รูปที่ 5.23 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1



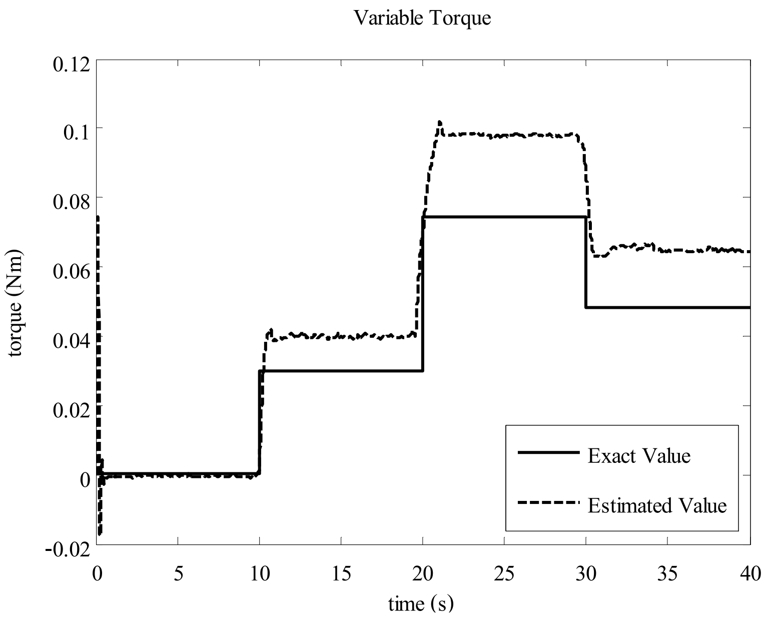
รูปที่ 5.24 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1



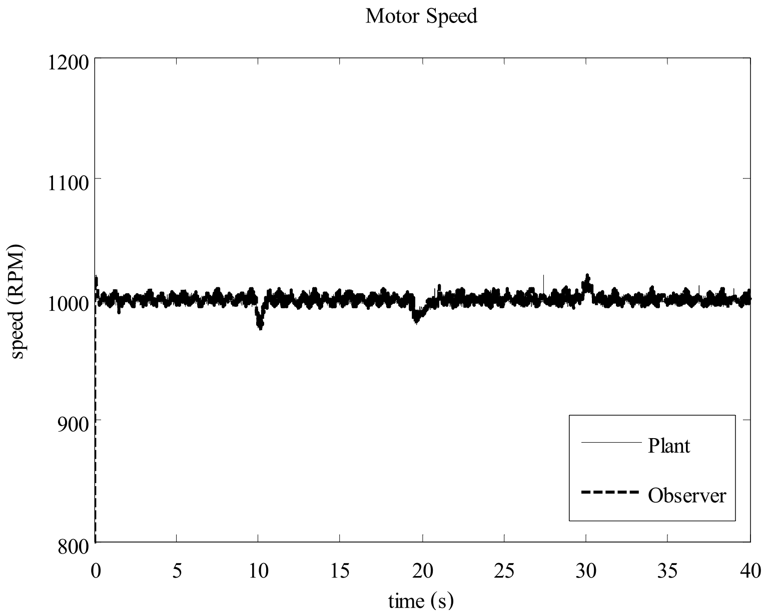
รูปที่ 5.25 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1

5.8.2 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Gradient Method สำหรับการทดลองที่ 2

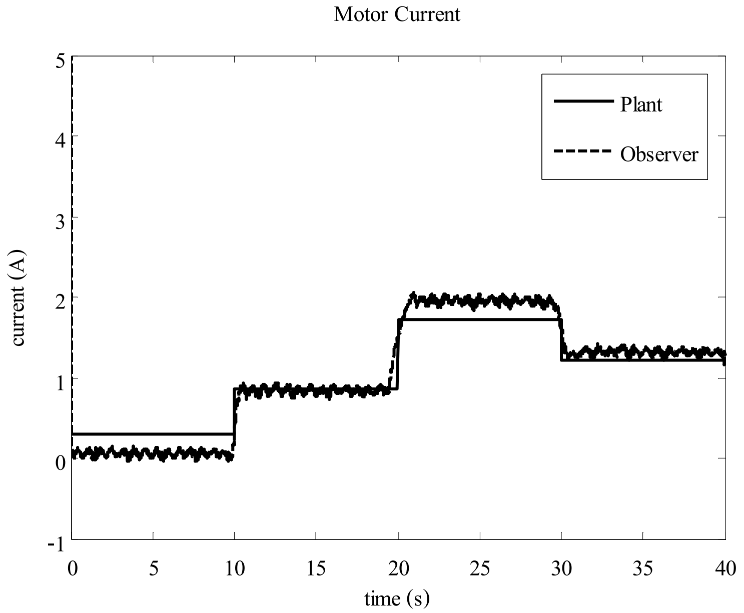
การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปรของระบบจากการระบุเอกลักษณ์จะให้ผลการประมาณที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปรของระบบจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง ผลการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวแปรระบบจากการระบุเอกลักษณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.26 และผลการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกต ดังแสดงในรูปที่ 5.27 และ 5.28



รูปที่ 5.26 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2



รูปที่ 5.27 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2



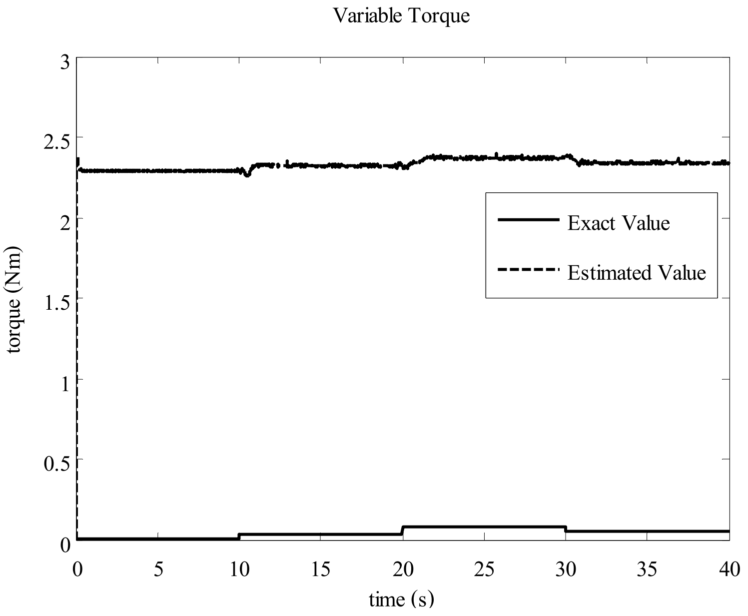
รูปที่ 5.28 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L\,(t)$ โดยวิธีที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2

5.9 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Lyapunov's Direct Method

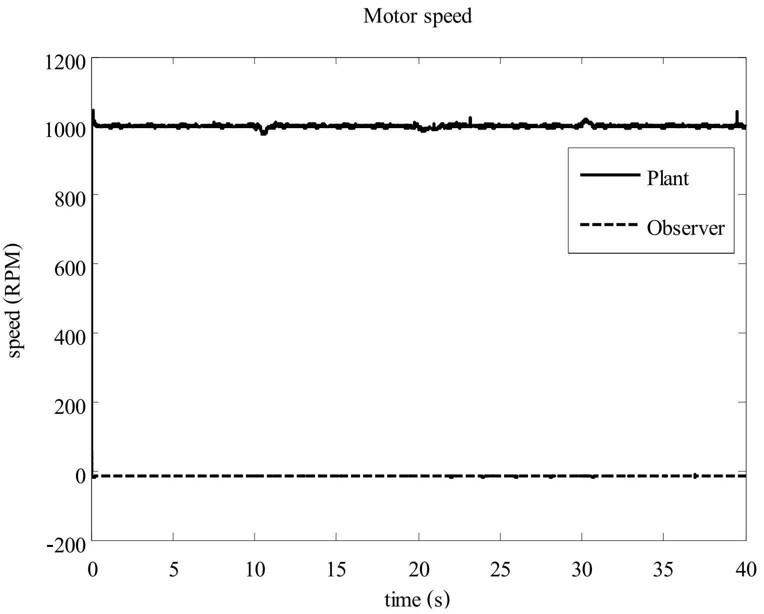
การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากวิธีการของ Lyapunov's Direct Method จะสามารถทำการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับวิธีการของ Gradient Method แต่วิธีการของ Lyapunov's Direct Method จะมีเสถียรภาพในการทำงานมากกว่า เนื่องจากตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ถูกสร้างบนพื้นฐานของทฤษฎีเสถียรภาพ แต่ผลจากความผิดพลาดของตัวแปรระบบก็ยังคงมีผลอย่างมากต่อการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

5.9.1 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Lyapunov's Direct Method สำหรับการทดลองที่ 1

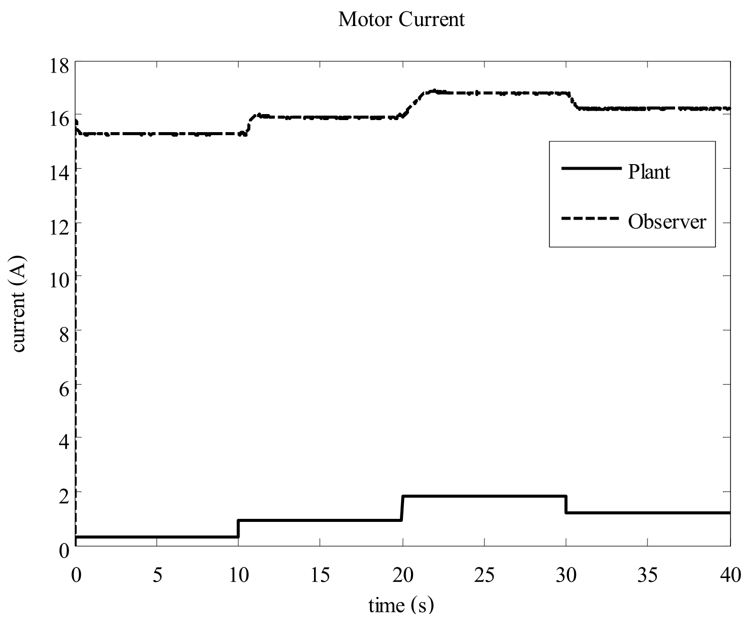
ผลการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวแปรระบบจากคู่มือของเครื่องมือทดลอง Precision Modular Servo ดังแสดงในรูปที่ 5.29 และผลการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกต ดังแสดงในรูปที่ 5.30 และ 5.31



รูปที่ 5.29 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1



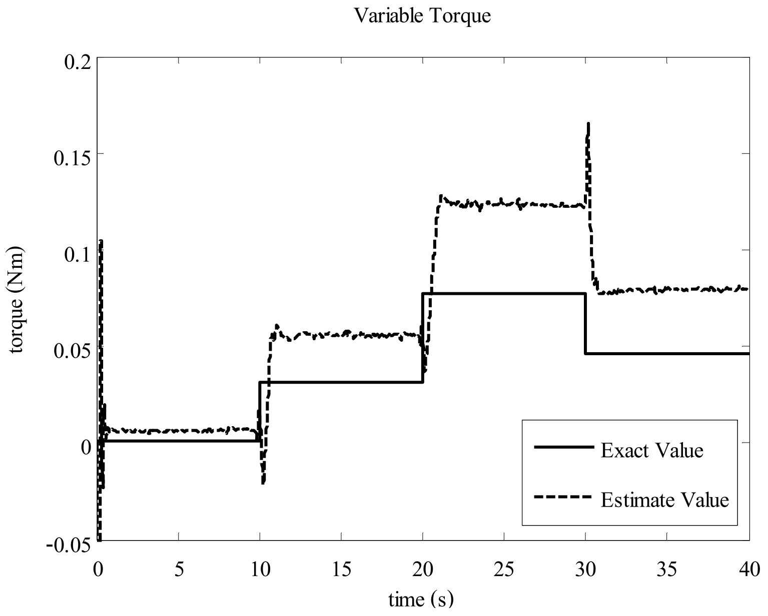
รูปที่ 5.30 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1



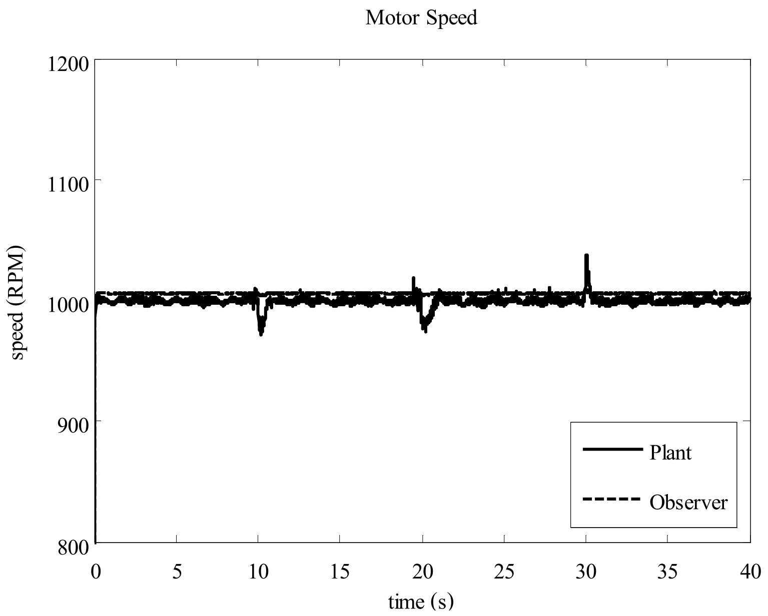
รูปที่ 5.31 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L\,(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 1

5.9.2 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธี Lyapunov's Direct Method สำหรับการทดลองที่ 2

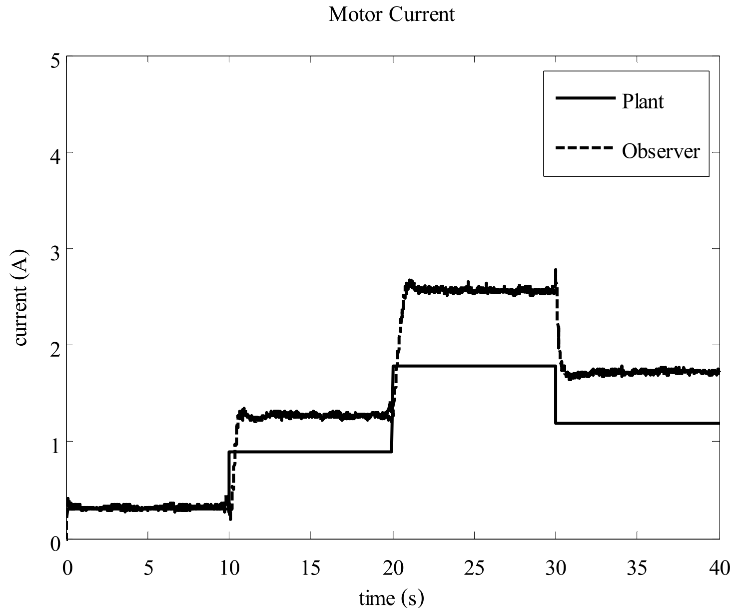
พิจารณาผลการทดลองที่ได้จากตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างจากวิธีการ Lyapunov's Direct Method โดยใช้ตัวแปรของระบบจากการระบุเอกลักษณ์ระบบจะมีความผิดพลาดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่าตัวแปรที่ได้มาจากคู่มือระบบเนื่องจากพิจารณาถึงผลการทบจากอุปกรณ์อื่นในชุดควบคุมร่วมด้วย ตัวแปรที่ได้จะเป็นตัวแปรโดยประมาณของทั้งระบบ ผลการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวแปรระบบจากการระบุเอกลักษณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.32 และผลการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกต ดังแสดงในรูปที่ 5.33 และ 5.34



รูปที่ 5.32 แสดงค่า $T_L\ (t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2



รูปที่ 5.33 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2



รูปที่ 5.34 แสดงค่า i_a และ $\hat{i}_a$ เมื่อมีการชดเชยค่า $\hat{T}_L\ (t)$ โดยวิธีที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2 ในการทดลองที่ 2

5.10 สรุป

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธีการของ Gradient Method และ Lyapunov's Direct Method สามารถตอบสนองต่อแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาได้ แต่ค่าที่ประมาณได้ยังมีความผิดพลาดทั้งในส่วนของตัวแปรสเตตที่ประมาณโดยตัวสังเกต และค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งได้จากตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เนื่องจากความผิดพลาดของตัวแปรของระบบจริง แม้ว่าตัวสังเกตของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จากทั้งสองวิธีการจะไม่มีความแตกต่างกันแต่ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งประมาณได้จากทั้งสองวิธีการมีความแตกต่างเนื่องจากโครงสร้างของตัวชดเชยทำให้เมื่อชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งได้จากการประมาณให้กับตัวสังเกตแล้วทำให้ค่าตัวแปรสเตตที่ได้จากการประมาณโดยตัวสังเกตมีความแตกต่างเกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากทั้งสองวิธีการ การประมาณค่าตัวแปรของระบบก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของตัวสังเกต และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นทั้งวิธีการของ Gradient Method และ Lyapunov's Direct Method ดังนั้นหากสามารถประมาณค่าตัวแปรของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพก็จะเป็นผลให้ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งได้จากการประมาณมีความผิดพลาดลดลงด้วย

รายการอ้างอิง

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ.(2548).**การควบคุมระบบพลศาสตร์.**(พิมพ์ครั้งที่2).จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Richard C. Dorf and Robert H Bishop, 2005. **Modern Control Systems**. (10th Edition), London, Pearson Education.

Karl J. Astrom and Bjorn Wittenmark, 1995. **Adaptive Control**. (2nd Edition), USA, Addison Wesley.

Katsuhiko Ogata, 2002. **Modern Control Engineering.** (4th Edition), USA, Prentice Hall.

Jong Sun Ko,Young Seok Jung, Sung Kwun Kim and Myung Joong Youn, 1995. MRAC Load Torque Observer for Position Control of Brushless DC Motor. **Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems**, pp.622-627.

Kichul Hong and Kwanghee Nam, 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

Chan-Ki Kim, Hong-Woo Rhew and Yoon-Ho Kim, 1997. Robust Speed Control of PMSM Using Kalman Filter Load Torque Observer. **Proceedings Of The IECON '97, 23rd International Conference On Industrial Electronics, Control And Instrumentation**, Vol.2, pp.918-924.

Geeng-Kwei Chang and Tzeuen-Lih Chern, 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

Ki-Hong Park, Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn and Dong-Seok Hyun, 2003. Speed Control of High-Performance Brushless DC Motor Drives by Load Torque Estimation. **Proceeding of IEEE Power Electronics Specialist Conference**, Vol.4. pp.1677-1681.

Ata SEVINC, 2003. A Fulll Adaptive Observer for DC Servo Motors. **Proceeding of Turk Journal Electrical Engineering**, Vol.11, pp.117-130.

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อการทำงานของระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และเพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะไม่พิจารณาถึงผลการทบของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ จากผลการจำลองระบบ และการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลง และหากระบบควบคุมซึ่งใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจำเป็นต้องใช้ค่าตัวแปรสเตตจากระบบ ซึ่งไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่ใช้การประมาณค่าด้วยตัวสังเกต แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดในระบบจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบมีความผิดพลาดทั้งในส่วนของความเร็วรอบ และค่ากระแสไฟฟ้า ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการชดเชยแบบปรับตัวได้สองวิธีการ คือ Gradient Method และ Lyapunov’s Direct Method จากผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีการสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากเราสามารถทราบค่าของตัวแปรในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ผลการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากวิธีการของ Gradient Method สามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างจากวิธีการนี้จำเป็นต้องวิเคราะห์เสถียรภาพก่อน ส่วนวิธีการของ Lyapunov’s Direct Method มีประสิทธิภาพในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน แต่เป็นการชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างขึ้นมาจากเงื่อนไขทฤษฎีเสถียรภาพของ Lyapunov ซึ่งสามารถรับรองความเสถียรของระบบได้ เมื่อพิจารณาผลกระทบจากความผิดพลาดของตัวแปรระบบที่มีต่อการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างจากวิธีการ Gradient Method จะมีผลกระทบน้อยกว่าเนื่องจากวิธีการนี้สนใจการปรับค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเพื่อลดค่าความผิดพลาดของระบบเท่านั้น แต่ในส่วนของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างจากวิธีการ Lyapunov’s Direct Method จะพิจารณาเสถียรภาพระบบที่เกิดจากการปรับค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นในโครงสร้างของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่สร้างขึ้นจากวิธีการนี้จะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจึงได้รับผลกระทบอย่างมากเมื่อตัวแปรของระบบมีความผิดพลาด

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถที่จะทราบค่าที่ถูกต้องของตัวแปรในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรง จึงต้องใช้การระบุเอกลักษณ์ของระบบเพื่อหาค่าตัวแปรโดยประมาณของระบบ เมื่อนำมาใช้ในการออกแบบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จะมีผลต่อการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ประมาณได้จากระบบหากใช้ค่าที่ถูกต้องของตัวแปรระบบมาทำการสร้างตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ จะสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเมื่อทำการทดลองใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจะมาจากค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง และอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของโครงสร้างแบบจำลองที่สร้างขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น และกำหนดให้ผลจากอุปกรณ์อื่นเป็นเพียงค่าคงที่ในระบบ การเพิ่มประสิทธิภาพของการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงสามารถทำได้โดยการลดรูปตัวสังเกตลงเพื่อลดขนาดของโครงสร้างในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ประโยชน์ของการชดเชยแบบปรับตัวได้ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเราสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมเพื่อประสิทธิภาพการตอบสนองและการควบคุมได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าต้องการที่จะให้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควรใช้กับระบบที่สามารถทราบค่าตัวแปรและโครงสร้างของระบบที่ถูกต้อง นอกจากนี้การใช้ตัวกรองสัญญาณเพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

การทำงานวิจัยเพื่อพัฒนาต่อไปจากงานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้ควรให้ความสนใจในด้านของการพัฒนาวิธีการในการประมาณค่าตัวแปรของระบบเพื่อเพิ่มความถูกต้องของค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งได้จากการประมาณ และเทคนิคการคำนวณเพื่อให้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้มีความรวดเร็วในการตอบสนองมากขึ้น

รายการอ้างอิง

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ.(2548).**การควบคุมระบบพลศาสตร์.**(พิมพ์ครั้งที่2).จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Richard C. Dorf and Robert H Bishop, 2005. **Modern Control Systems**. (10th Edition), London, Pearson Education.

Karl J. Astrom and Bjorn Wittenmark, 1995. **Adaptive Control**. (2nd Edition), USA, Addison Wesley.

Katsuhiko Ogata, 2002. **Modern Control Engineering.** (4th Edition), USA, Prentice Hall.

Jong Sun Ko,Young Seok Jung, Sung Kwun Kim and Myung Joong Youn, 1995. MRAC Load Torque Observer for Position Control of Brushless DC Motor. **Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems**, pp.622-627.

Kichul Hong and Kwanghee Nam, 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

Chan-Ki Kim, Hong-Woo Rhew and Yoon-Ho Kim, 1997. Robust Speed Control of PMSM Using Kalman Filter Load Torque Observer. **Proceedings Of The IECON '97, 23rd International Conference On Industrial Electronics, Control And Instrumentation**, Vol.2, pp.918-924.

Geeng-Kwei Chang and Tzeuen-Lih Chern, 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

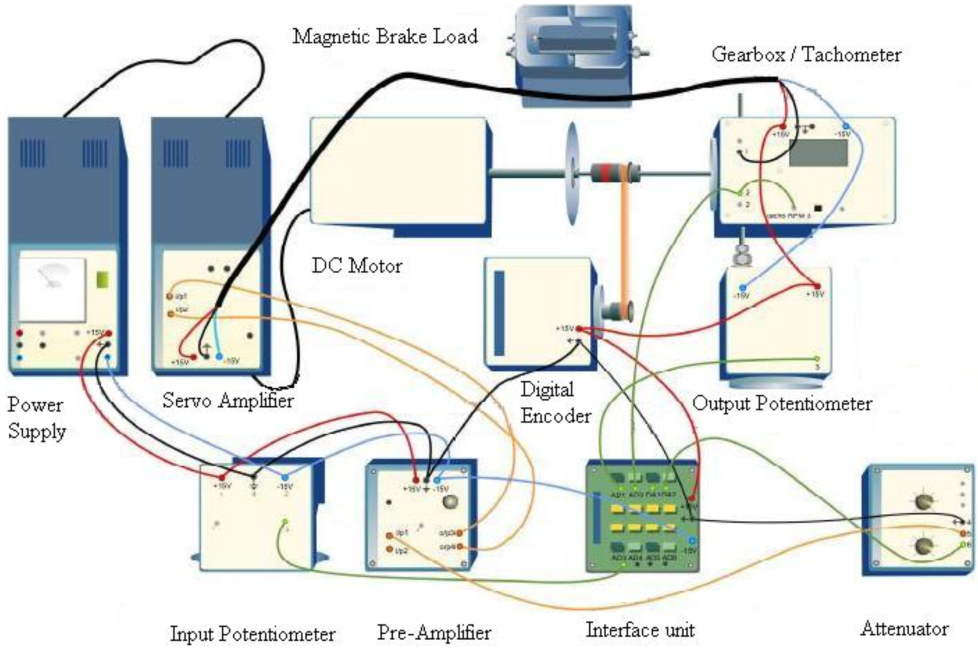
Ki-Hong Park, Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn and Dong-Seok Hyun, 2003. Speed Control of High-Performance Brushless DC Motor Drives by Load Torque Estimation. **Proceeding of IEEE Power Electronics Specialist Conference**, Vol.4. pp.1677-1681.

Ata SEVINC, 2003. A Fulll Adaptive Observer for DC Servo Motors. **Proceeding of Turk Journal Electrical Engineering**, Vol.11, pp.117-130.

ภาคผนวก ก

การติดตั้งและการเปรียบวัดเครื่องมือทดลอง

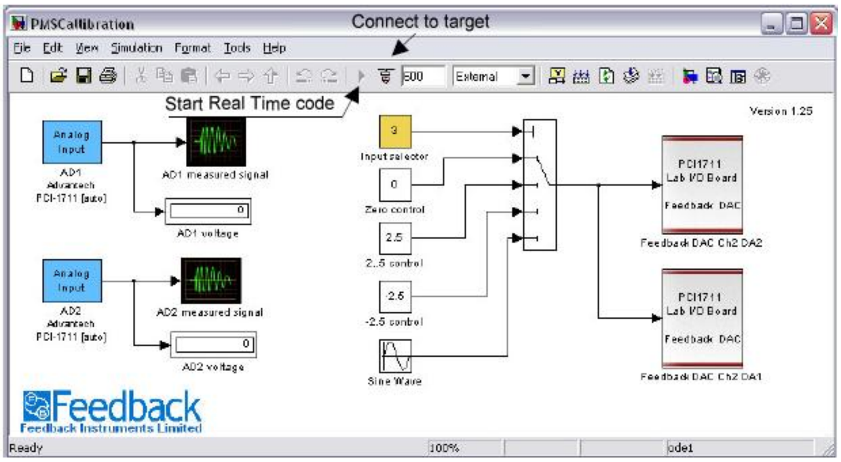
ก.1 การติดตั้งและการเปรียบวัดเครื่องมือทดลอง



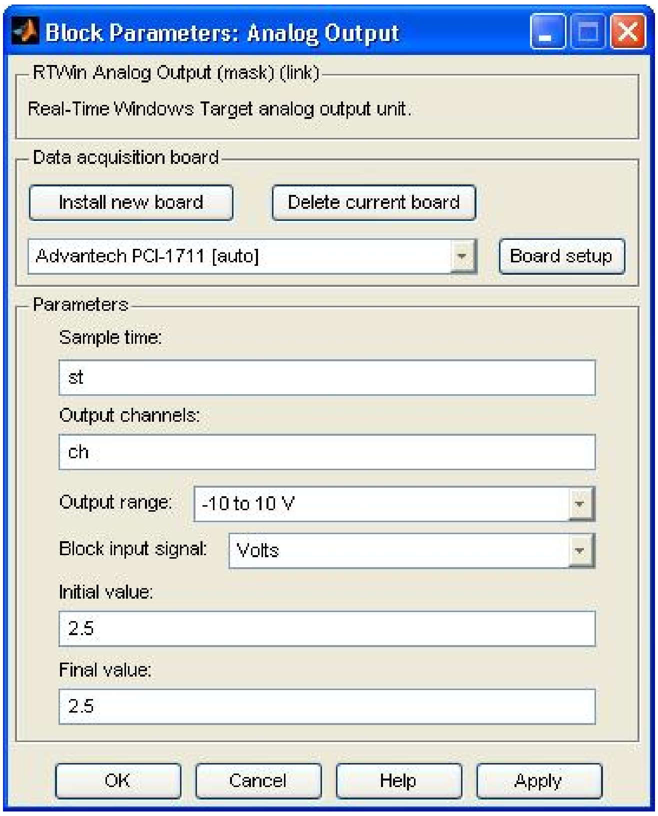
รูป ก.1 แสดงการติดตั้งและวงของเครื่องมือทดลอง

ก่อนการใช้งานเครื่องมือทดลองต้องมีการเปรียบวัดช่องสัญญาณทั้งในส่วน Analog to Digital และ Digital to Analog ของอุปกรณ์ 33-301 Analog Control Interface การเปรียบวัดนี้เครื่องมือวัดที่จำเป็นต้องใช้คือ 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

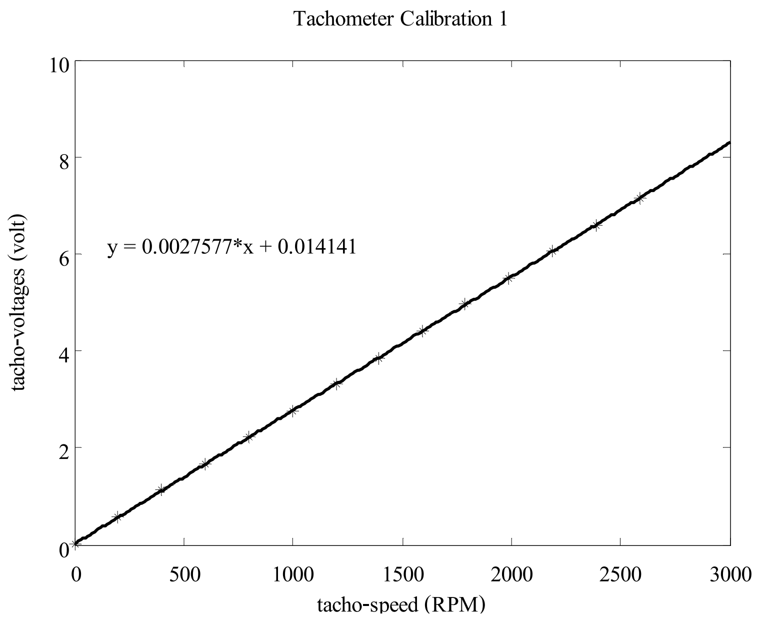
9. เลือก CONNECT TO TARGET และเปิดสวิตซ์ PS150E Modular Servo หากมอเตอร์มีการหมุนเกิดขึ้นอาจปรับค่า Zero Set ที่ PA150C จนกว่ามอเตอร์จะหยุดหมุนหรือจะไม่ต้องทำก็ได้
10. ทำการรันโปรแกรมโดยกด START REAL TIME CODE (แสดงในรูปที่ ก2)
11. ปรับค่า OFFSET ที่ Potentiometer ซึ่งอยู่ตำแหน่งล่างของ DA2 บนอุปกรณ์ 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 การเปรียบวัดอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (GT150X)

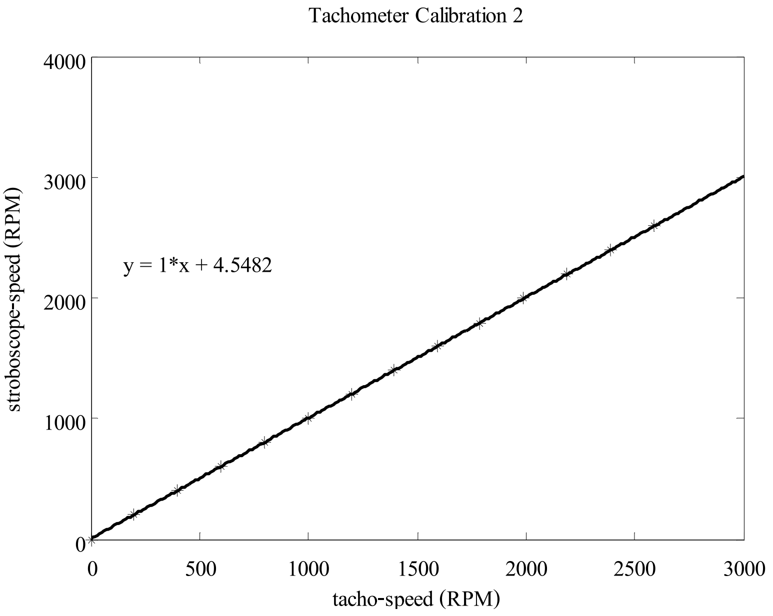
นอกจากการเปรียบวัดเครื่องมือทดลองทั้งระบบแล้วอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องทำการเปรียบวัดคือ Reduction Gear Tacho Unit (GT150X) ที่ใช้ในการวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ตาราง ก.1 แสดงผลการวัดค่าความเร็วรอบและค่าความต่างศักย์ของอุปกรณ์

GT150X (RPM)	GT150X (Volt)	Stroboscope (RPM)
0.00	0.001	0.00
200.00	0.574	206.83
400.00	1.122	406.33
600.00	1.670	605.17
800.00	2.217	805.00
1000.00	2.766	1004.17
1200.00	3.312	1203.67
1390.00	3.860	1396.50
1590.00	4.410	1595.83
1790.00	4.960	1794.00
1990.00	5.503	1994.17
2190.00	6.050	2194.33
2390.00	6.600	2393.17
2590.00	7.150	2595.00



รูป ก.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและค่าความต่างศักย์ของ GT150X



รูป ก.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของ GT150X และความเร็วรอบที่วัดได้
จาก Stroboscope

ภาคผนวก ข

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ

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 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

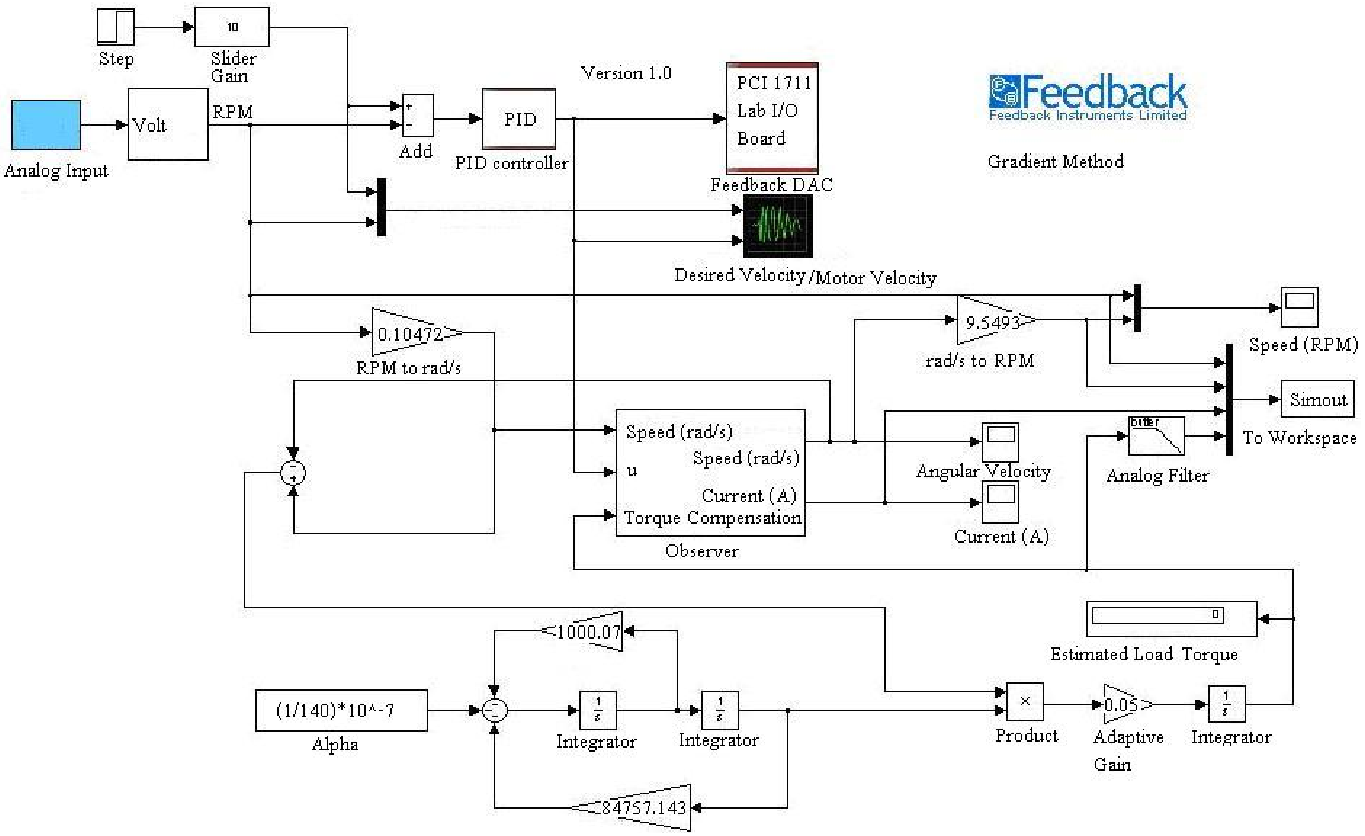
รูป ข.1 แสดงข้อมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้สำหรับการทดลอง

ภาคผนวก ค

ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

ค.1 ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

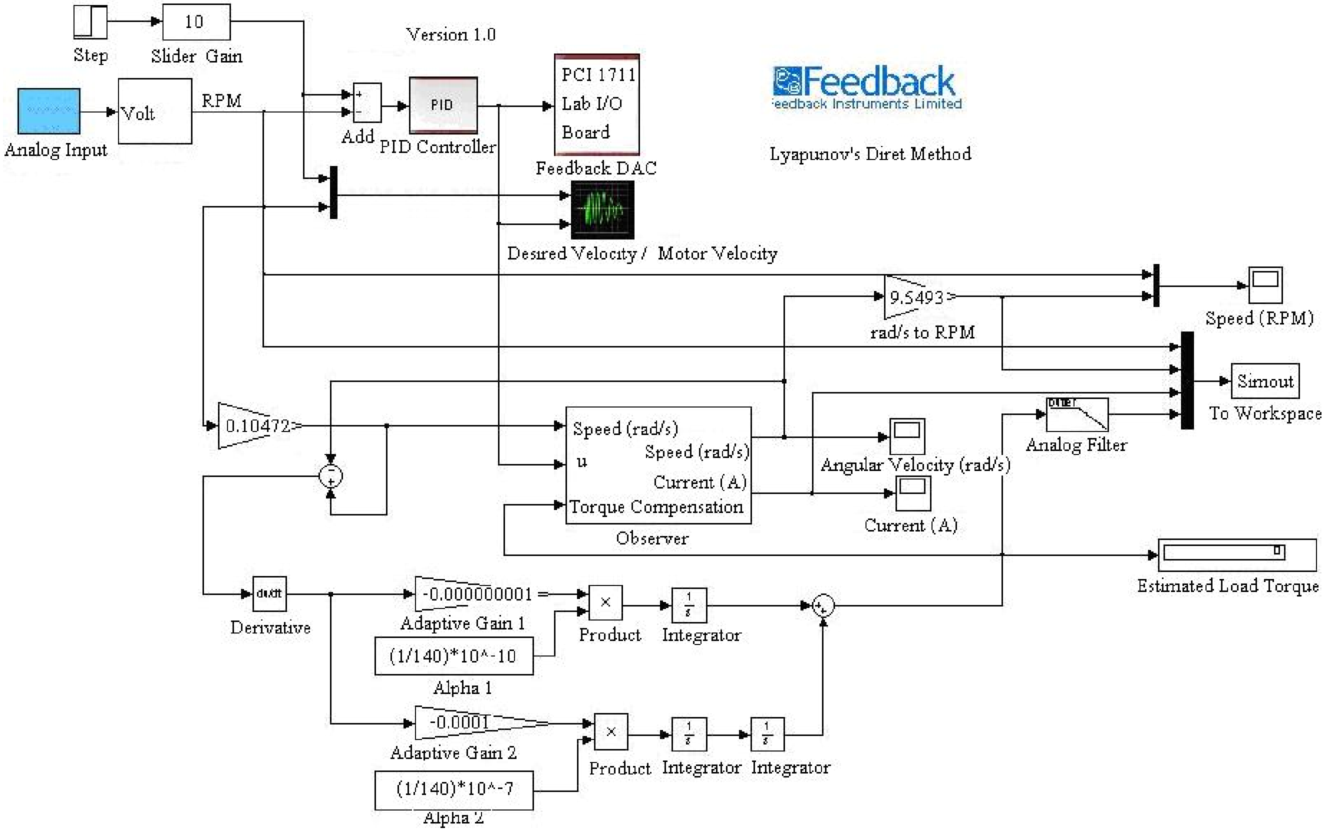
(1) โปรแกรมการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากวิธีการ Gradient Method



รูปที่ ค.1 แสดงโปรแกรมสำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้จากวิธี Gradient Method

ค.1 ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (ต่อ)

(2) โปรแกรมการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากวิธีการ Lyapunov's Direct Method



รูปที่ ค.2 แสดงโปรแกรมสำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแบบปรับตัวได้จากวิธี Lyapunov's Direct Method

ประวัติผู้เขียน

นายชาญยุทธ ขจรไตรเดช เกิดเมื่อวันที่ 13 กันยายน 2526 ที่อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านระเวิง และมัธยมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนสุรศักดิ์วิทยาคม มัธยมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนศรีราชา จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2548 และในปี พ.ศ. 2549 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 5 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1, 2 และ 3 และวิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 และ 2 เป็นเวลา 2 ปี มีการนำเสนอผลงานวิชาการเรื่อง Adaptive algorithm for suppressing beam vibration of dual cantilever mass absorber ในการประชุม Advanced Problems in Mechanics – 2008 ณ เมือง Saint Petersburg ประเทศรัสเซีย และได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ใน Proceedings of Advanced Problems in Mechanics – 2008